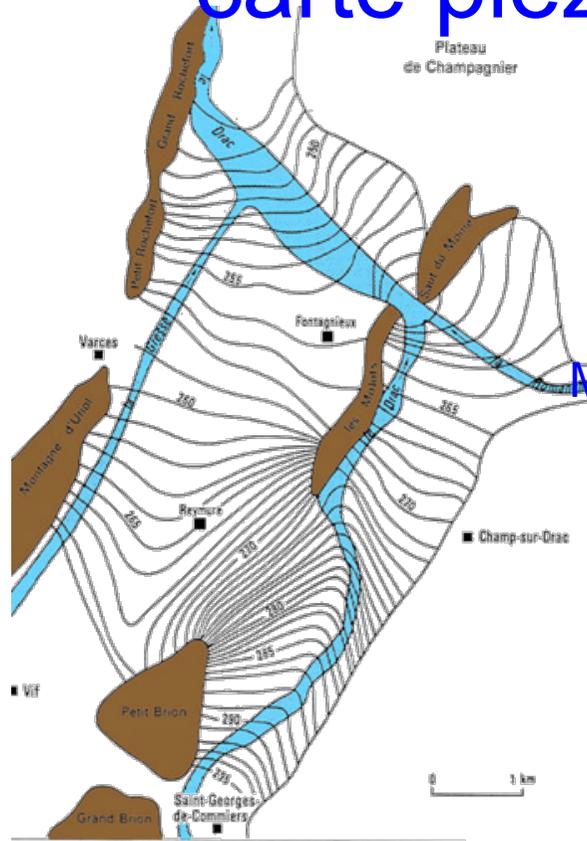
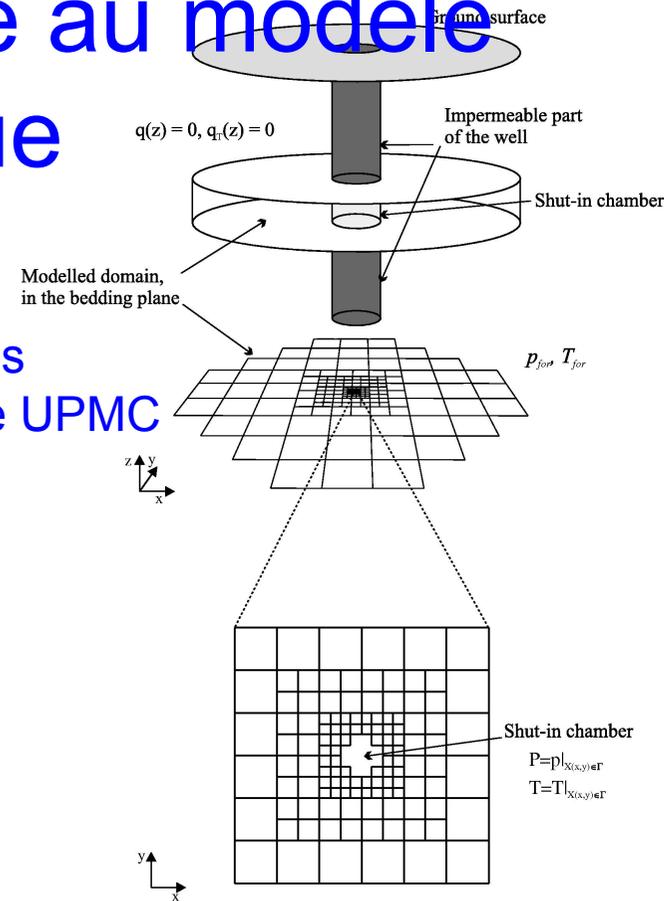


Modélisation en hydrogéologie: de la carte piézométrique au modèle numérique



Extrait carte hydrogéologique de Grenoble

Julio Gonçalves
Maître de conférence UPMC



Interprétation d'essai de puits (Trémosa et al., 2010)

Points abordés

- Les systèmes hydrogéologiques modélisés
- Un premier modèle « purement mathématique » : la carte piézométrique
- Modélisation numérique
- Quelques réflexions et conclusions

Hydrodynamique souterraine (Hyp.: ρ constant, milieu poreux)

h [m] : Charge hydraulique = potentiel hydraulique = cote piézométrique

$h = P/\rho g + z_0$

$P_a = 0$

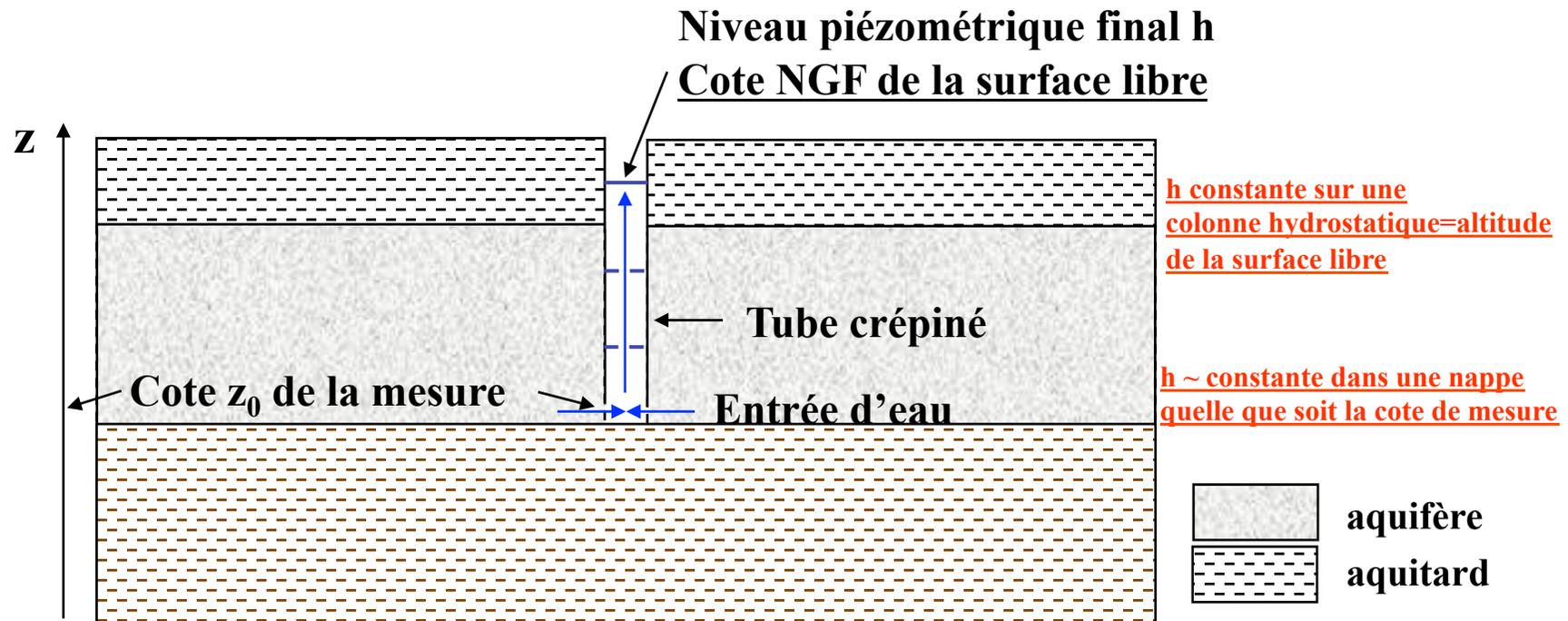
(convention)

P : pression de l'eau (Pa)

ρ : masse volumique de l'eau kg/m^3

g : accélération de la pesanteur (m^2/s)

z_0 : cote de la mesure



FONTAINES PUBLIQUES

Hydrodynamique souterraine

DE LA VILLE DE DIJON

EXPOSITION ET APPLICATION

DES PRINCIPES A SUIVRE ET DES FORMULES A EMPLOYER

DANS LES QUESTIONS

DE

DISTRIBUTION D'EAU

OUVRAGE TERMINÉ

PAR UN APPENDICE RELATIF AUX FOURNITURES D'EAU DE PLUSIEURS VILLES
AU FILTRAGE DES EAUX

ET

A LA FABRICATION DES TUYAUX DE FORTE, DE PLOMB DE TOLE ET DE BITUME
PAR

HENRY DARCY

INSPECTEUR, GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES.

La bonne qualité des eaux étant une des choses qui contribuent le plus à la santé des citoyens d'une ville, il n'y a rien à quoi les magistrats aient plus d'intérêt qu'à entretenir la salubrité de celles qui servent à la boisson commune des hommes et des animaux, et à remédier aux accidents par lesquels ces eaux pourraient être altérées, soit dans le lit des fontaines, des rivières, des ruisseaux où elles coulent, soit dans les lieux où sont conservées celles qu'on en dérive, soit enfin dans les puits d'où naissent des sources.

(De JUSSIEU, *Hist. de l'Académie royale des sciences*, 1733, p. 351.

PARIS

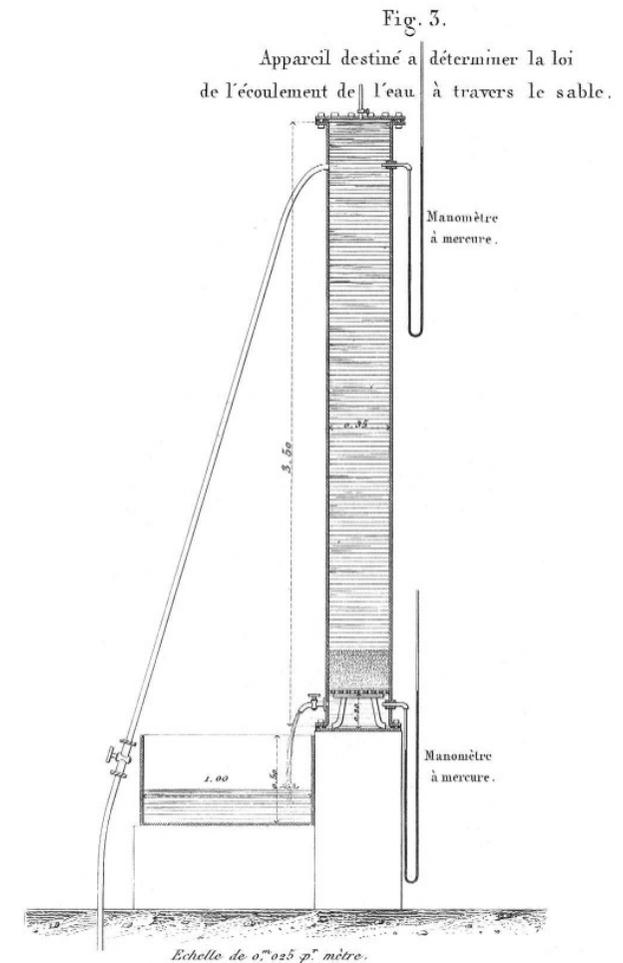
VICTOR DALMONT, ÉDITEUR,

Successesseur de Carilian-Gaery et V^of Dalmont,

LIBRAIRE DES CORPS IMPÉRIAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,

Quai des Augustins, 49.

1856



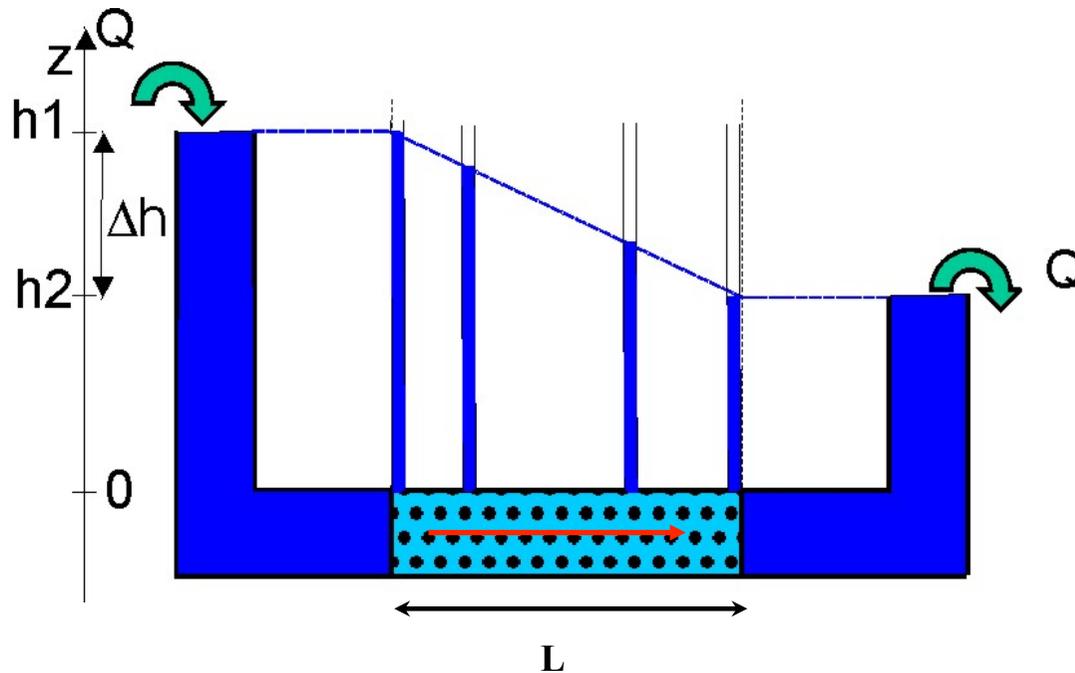
Loi de DARCY (1803-1858)

Q : Débit (m^3/s)

S : Section d'écoulement (m^2)

Δh : « Hauteur » de charge (m)

L : Longueur du milieu poreux (m)

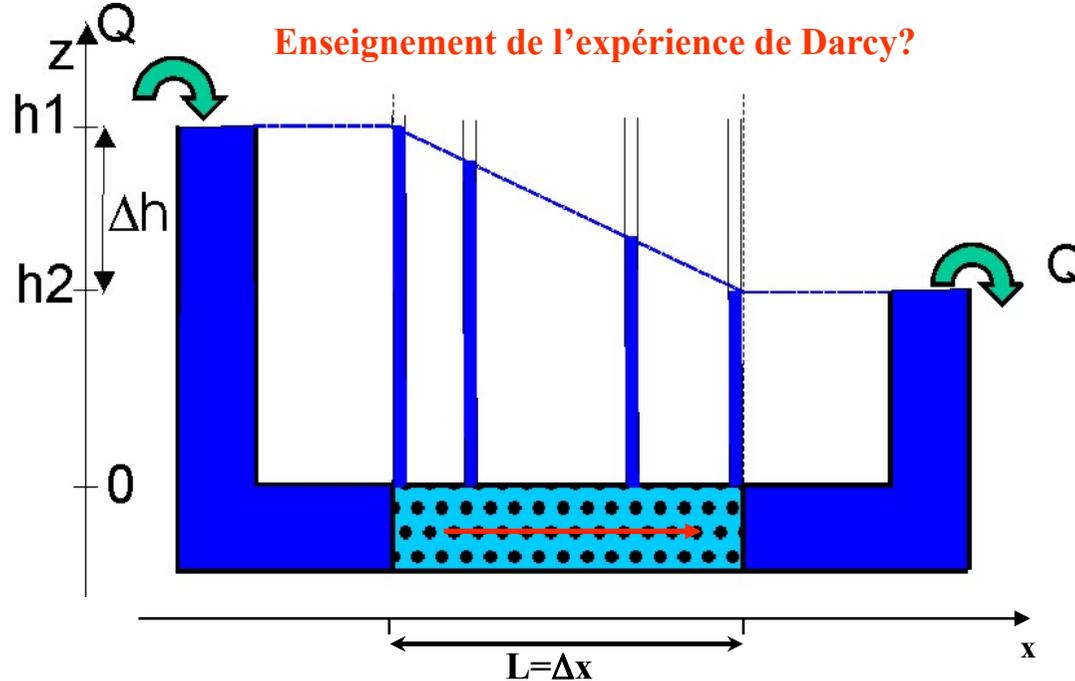


Filtration d'eau à travers une carotte de milieu poreux...sous quel(s) effet(s)?



Loi de DARCY (1803-1858)

Enseignement de l'expérience de Darcy?



Filtration d'eau à travers la carotte sous l'effet d'une différence de h
Rq: que se passe-t-il si on coupe l'alimentation à gauche?

Q : Débit (m^3/s)

S : Section d'écoulement (m^2)

h : Hauteur de charge (m)

L : Longueur du milieu poreux (m)

K : Conductivité hydraulique
(m/s) (=perméabilité)

$$Q = S K \frac{\Delta h}{L} = S K \frac{\Delta h}{\Delta x}$$

$\frac{\Delta h}{\Delta x} = i$ = gradient hydraulique

= "Moteur de l'écoulement"

$$\Rightarrow U = Q/S$$

Notation différentielle (vecteur)

$$U = -K \text{ grad}(h)$$

$$U = Q / S = -K \frac{\partial h}{\partial x}$$

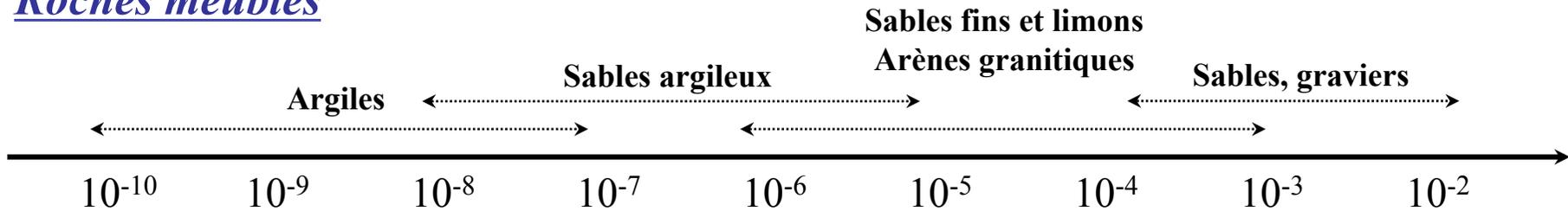
Signification de K et h...



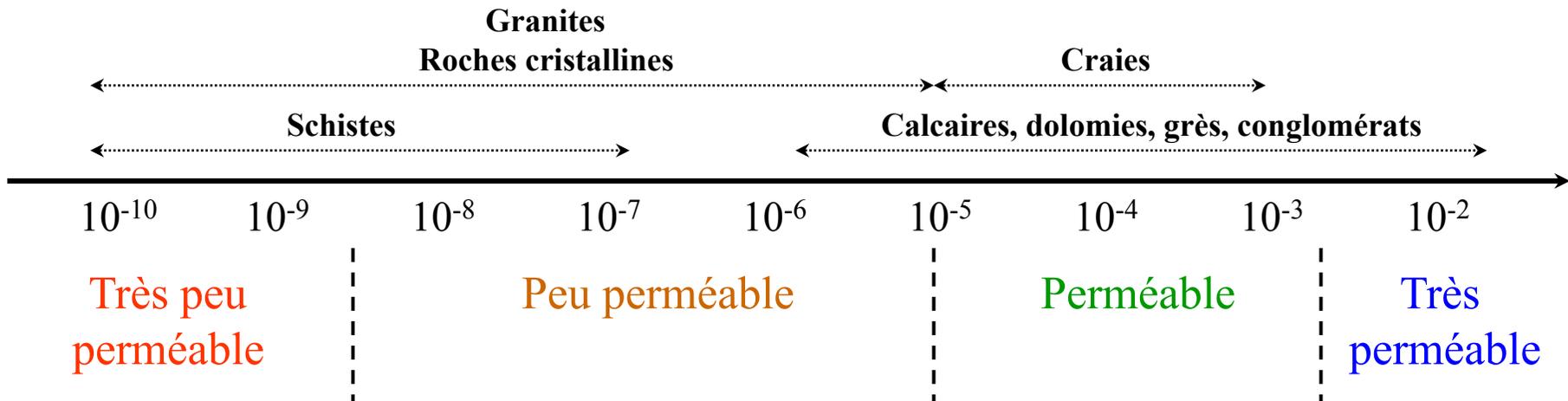
Loi de DARCY (1802-1858)

K : conductivité hydraulique (m/s)

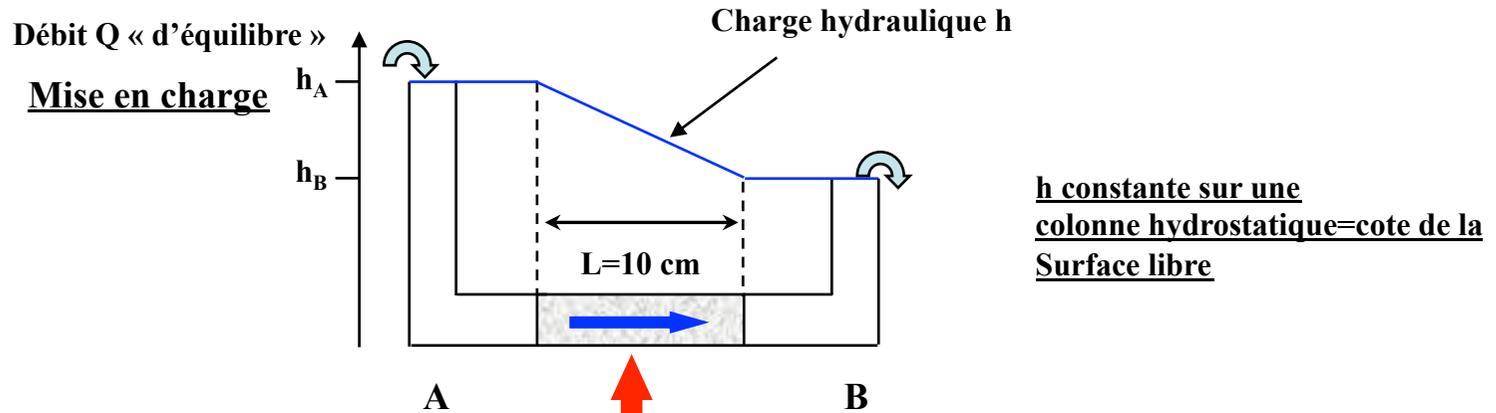
Roches meubles



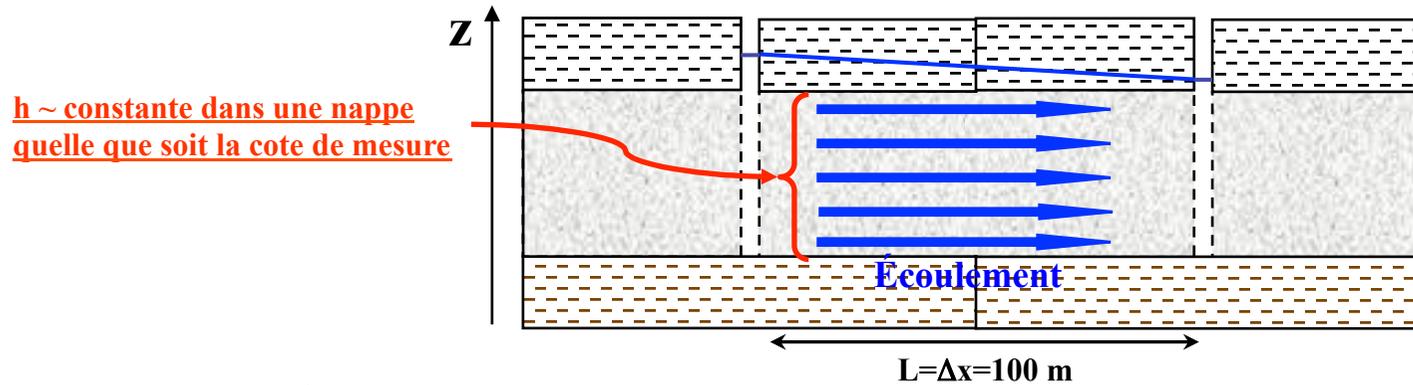
Roches consolidées



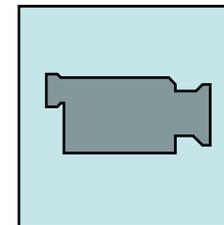
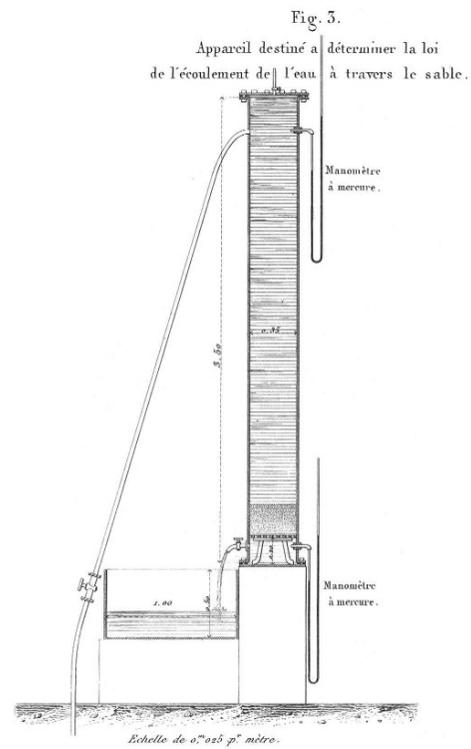
Conditions expérimentales : perméamètre horizontal



Conditions naturelles : écoulement dans un aquifère



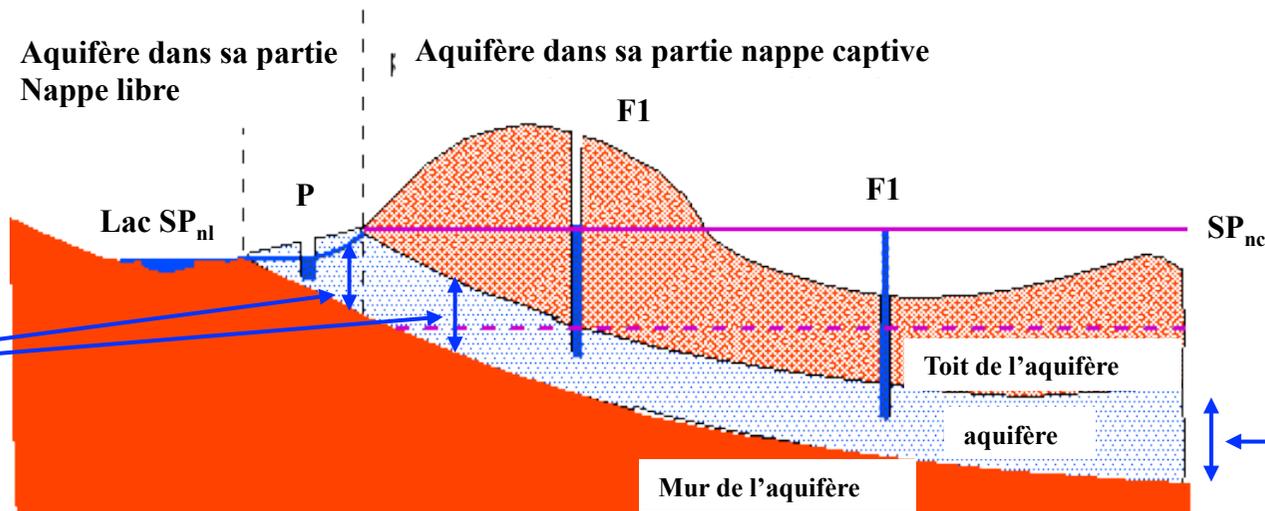
⇒ Écoulement depuis les charges élevées vers les charges faibles

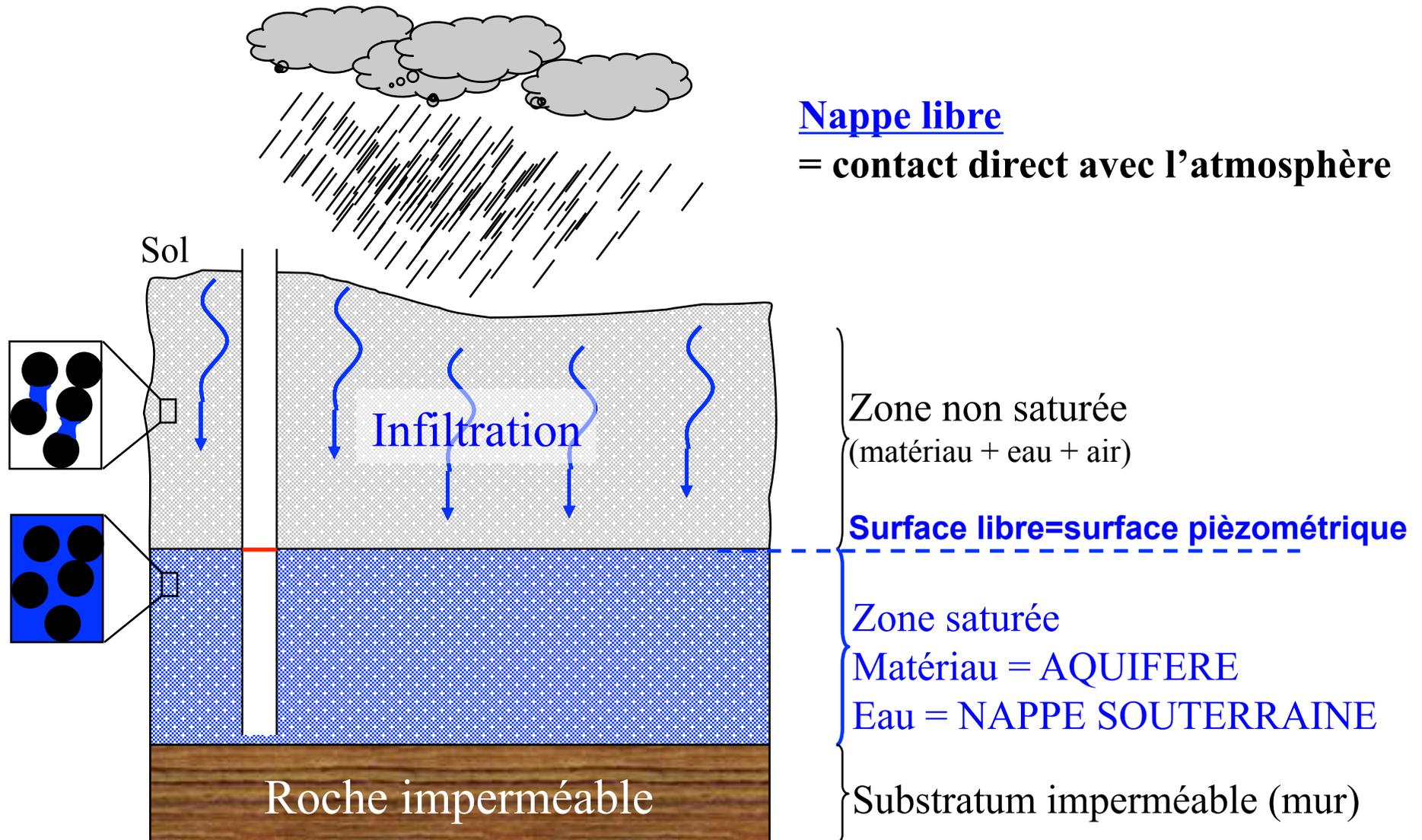


- **Aquifère** : « corps (couche ou massif) de roches perméables comportant une zone saturée et suffisamment conducteur d'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. »

- **Nappe** : « ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique »

- **Perméabilité** : capacité d'un milieu à conduire de l'eau





La nappe libre « évacue » vers l'aval l'eau reçue par infiltration...

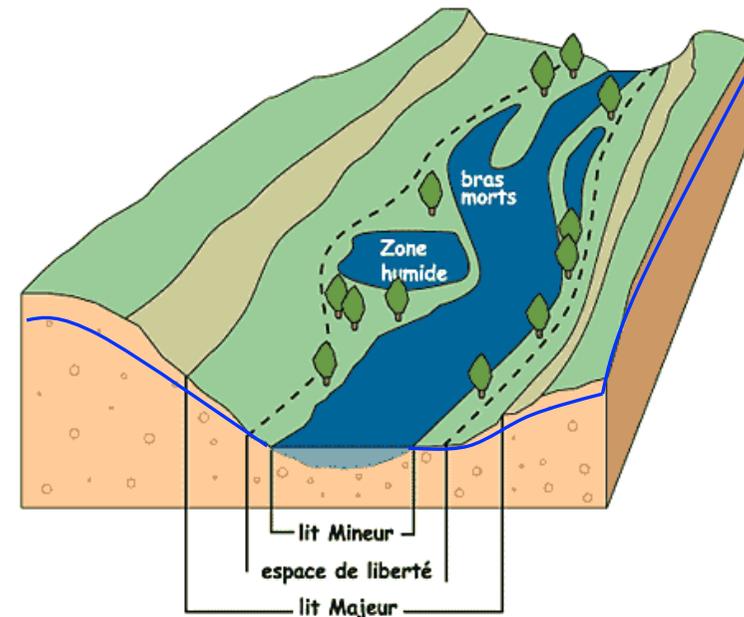
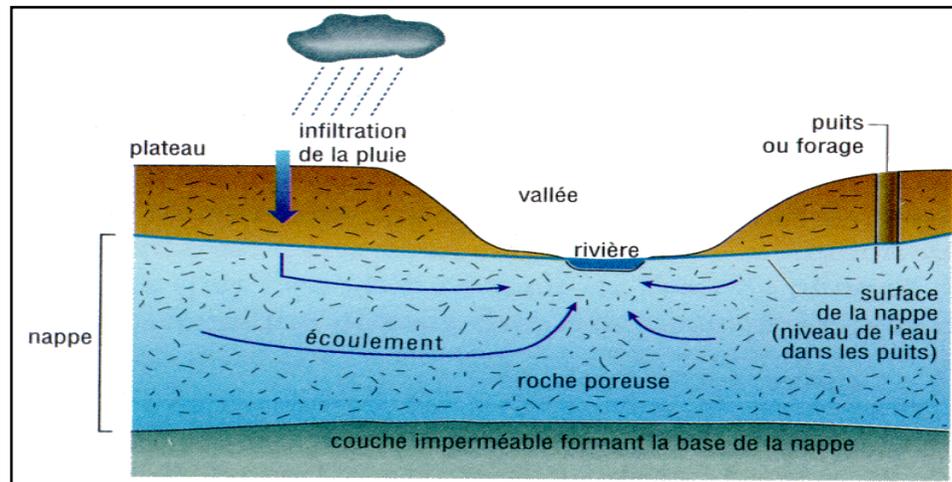
Exemples de nappes libres

- nappe de vallée en zone tempérée

Réservoir de sub-surface, l'infiltration par la pluie alimente la nappe \Rightarrow exutoires sont les points bas de la topographie (source, rivières). Le drainage se fait par les vallées suffisamment profonde (\neq vallées sèches).

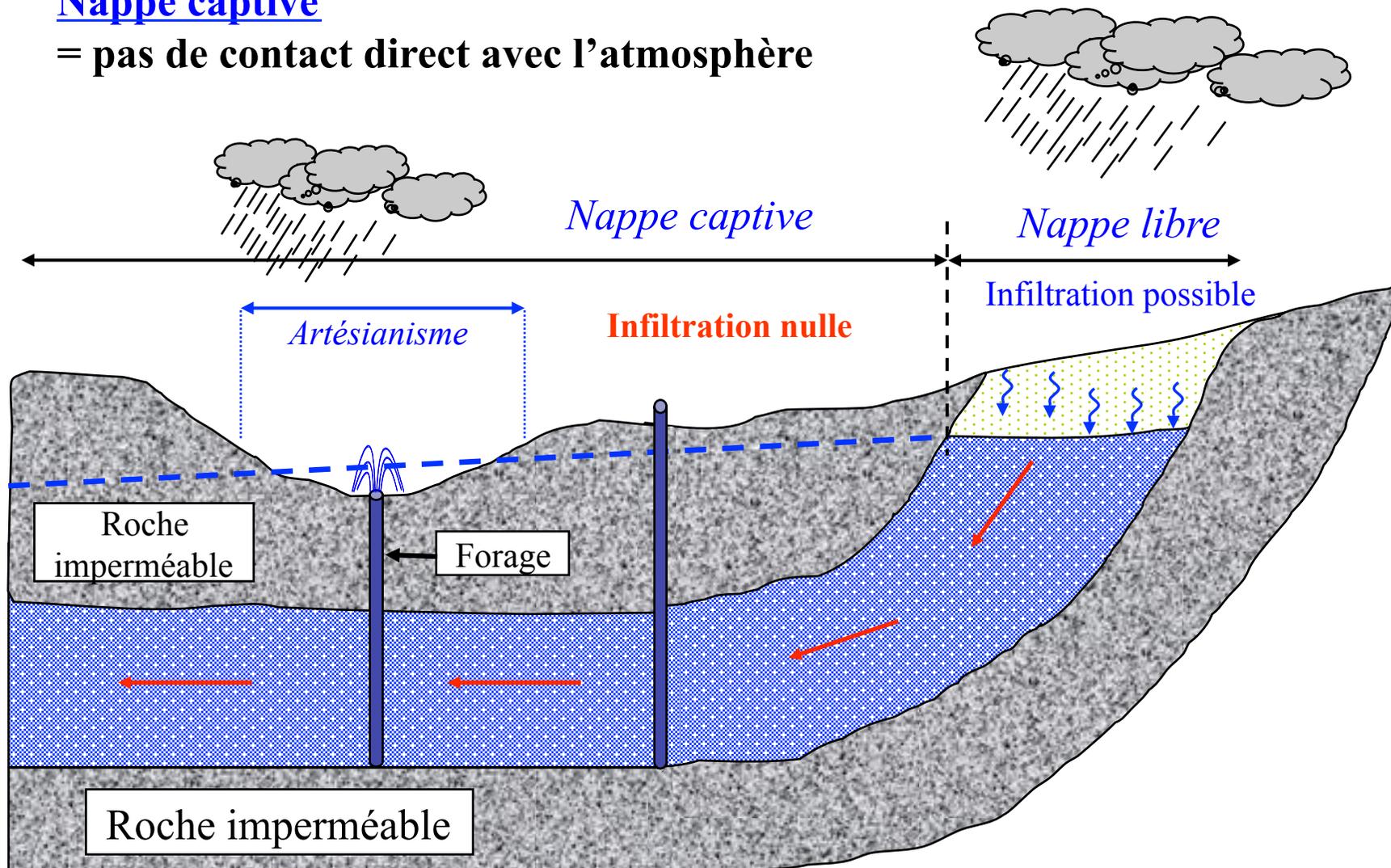
- nappe alluviale

Nappe libre contenue dans les alluvions d'un fleuve
Niveau en équilibre avec celui du fleuve.



Nappe captive

= pas de contact direct avec l'atmosphère



Différences nappe libre / nappe captive

Nappe libre (eau non confinée)

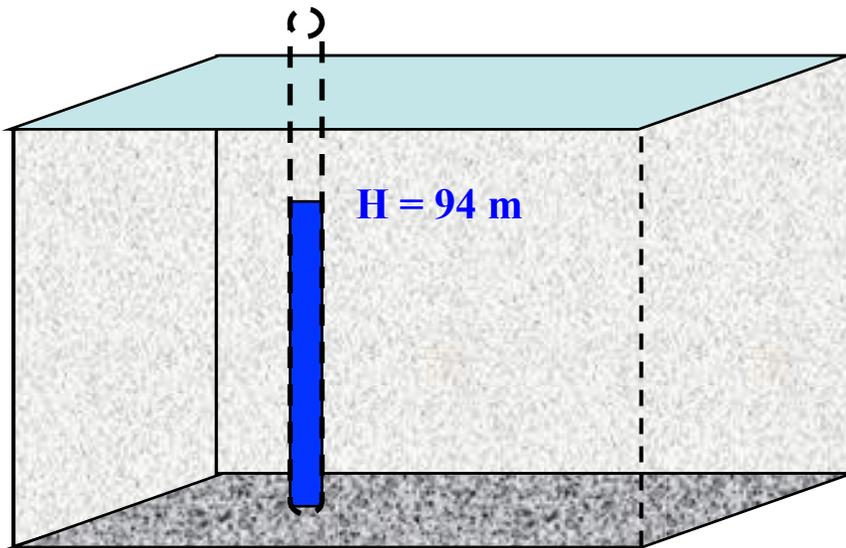
- Contact direct avec l'atmosphère
- Existence d'une zone non saturée
- Recharge (alimentation) rapide
- Pas de protection naturelle face aux pollutions de surface

Nappe captive (eau confinée)

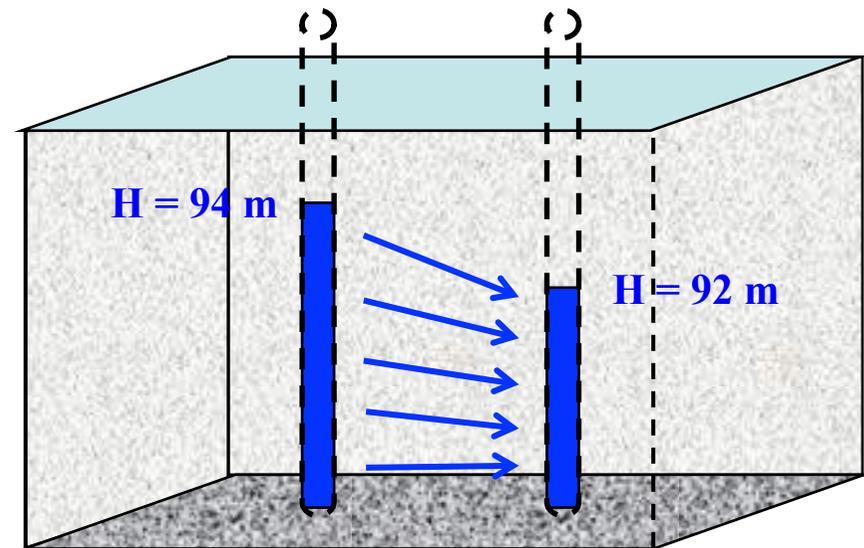
- Pas de contact direct avec l'atmosphère
- Niveau piézométrique > toit de l'aquifère
- Recharge (alimentation) lente
- Protection naturelle face aux pollutions de surface
- Eau généralement fortement minéralisée

Réalisation d'une carte piézométrique

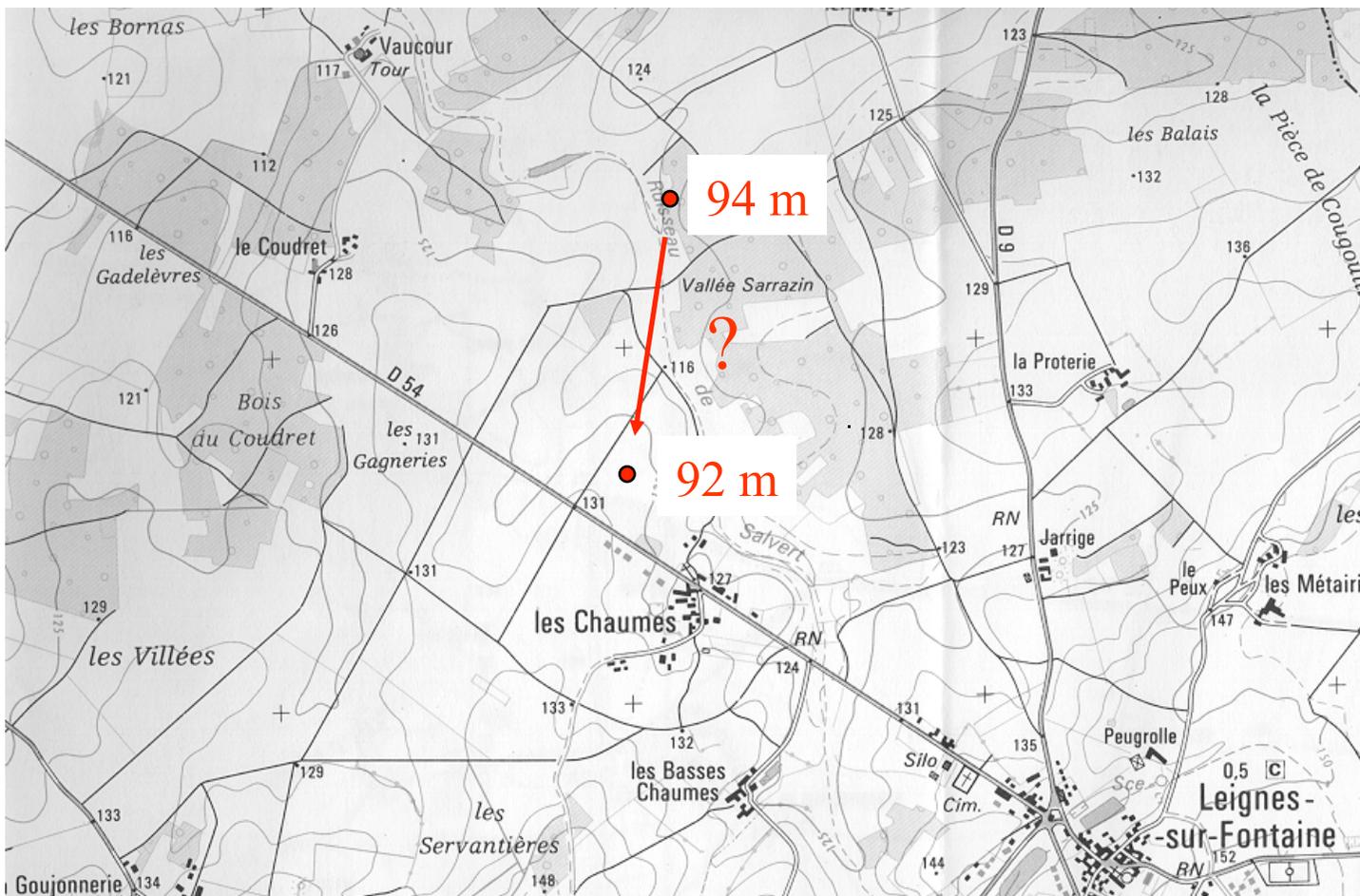
Réalisation d'un premier forage



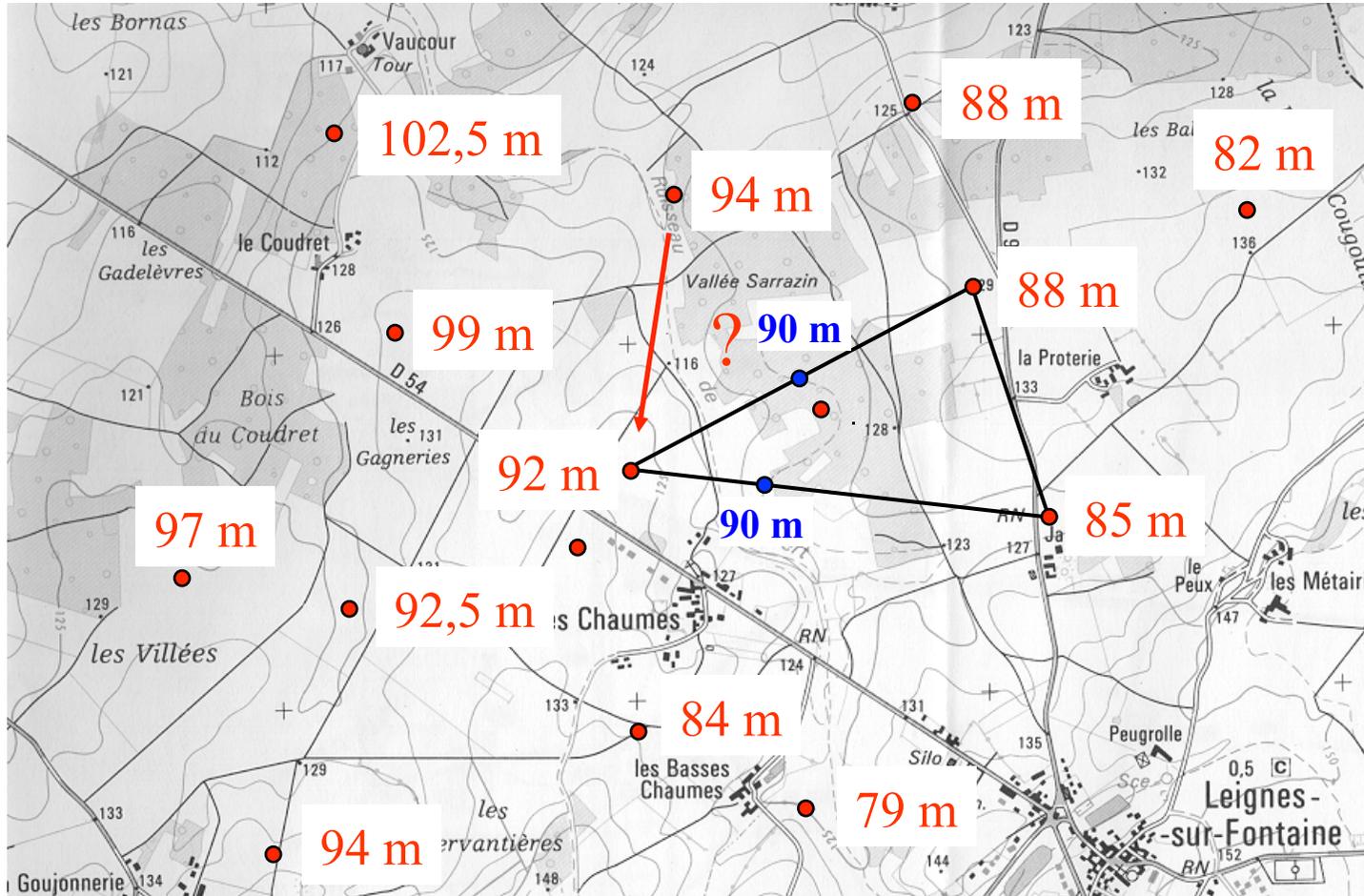
Réalisation d'un second forage



Réalisation d'une carte piézométrique



Réalisation d'une carte piézométrique



● **Points d'observation :**
puits, forage,
piézomètre,
source

● **Cote piézométrique interpolée**

Géostatistique (statistique des variables régionalisées, Matheron 50-60)

Concept de base : la distribution d'une variable naturelle (%Fe, [O₃], e...)
régie par une loi statistique \Rightarrow distribution est **UNE** réalisation d'un processus
aléatoire

\hookrightarrow milieu \Leftrightarrow infinité de variables aléatoires $Z(X(x,y,z))$ spatialement corrélées

Déterminer la structuration spatiale : corrélation entre $Z(X)$ et $Z(X+D)$

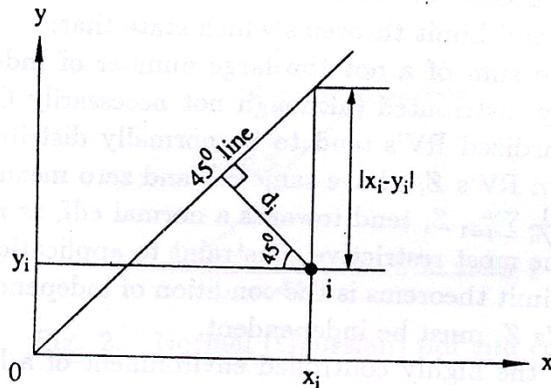


Fig. 4. Pair (x_i, y_i) on a scattergram

45°: corrélation parfaite sinon écart

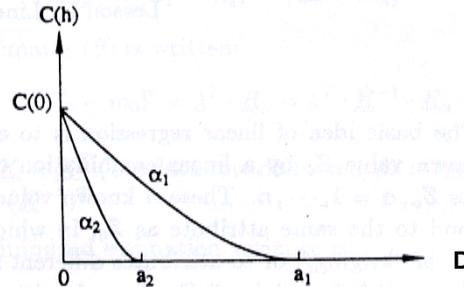
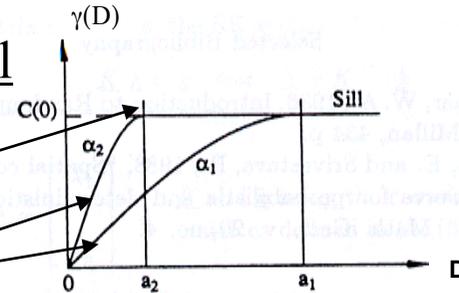
$$\gamma_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2$$

Si on fait varier $D \Rightarrow$ fonction variogramme expérimental
 $\gamma(D)$ Puis calage d'une fonction théorique continue

$$2\gamma(D) = E((Z(X) - Z(X + D))^2)$$

Seuil $C(0) = \text{Var}(Z(X))$

Portée (distance au delà de laquelle plus de structure)

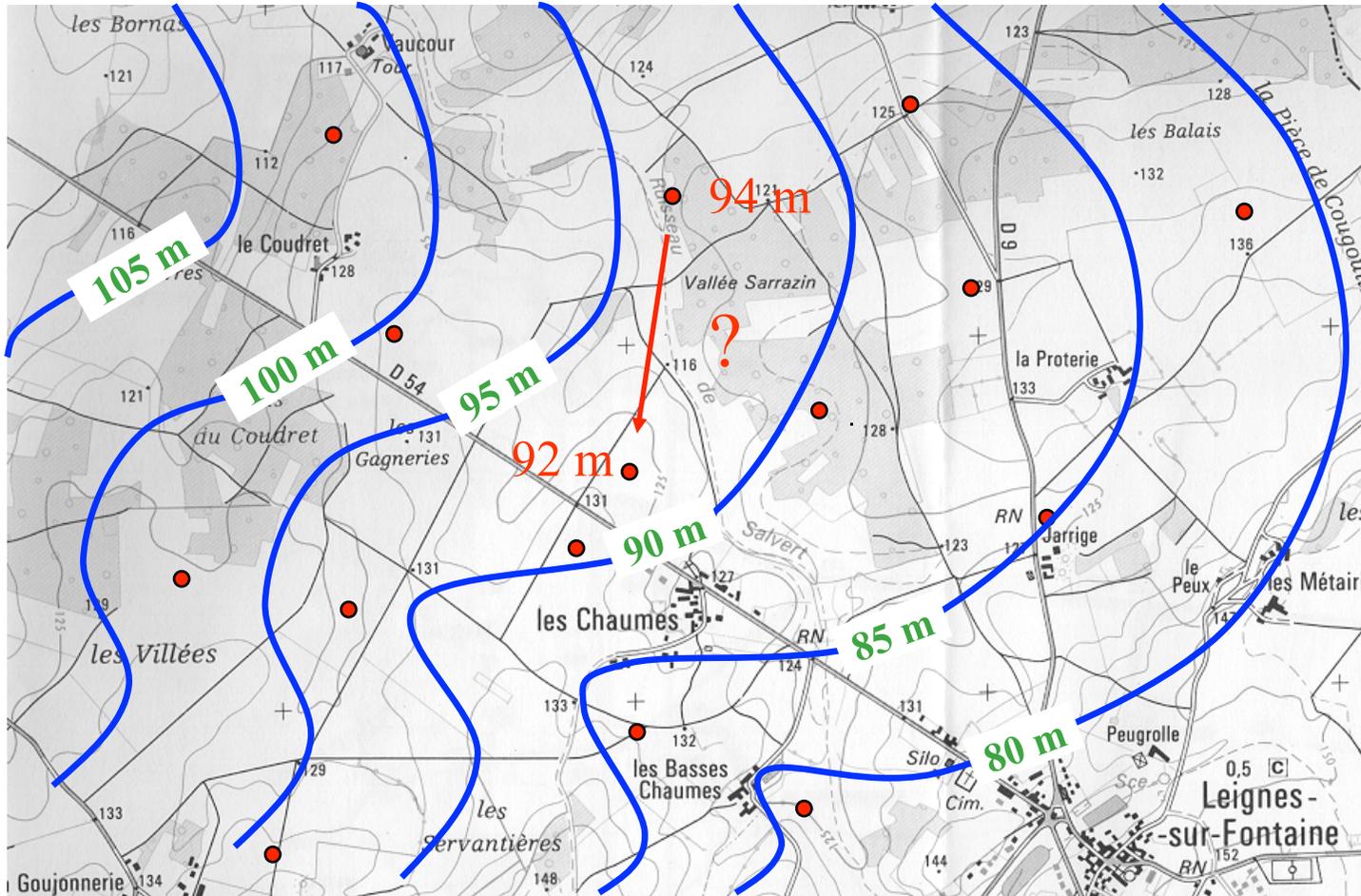


\Rightarrow Comblent les vides d'échantillonnage
par interpolation en tenant compte de la structure

- Définition de la population à moyenner (voisinage)
- Construction du variogramme expérimental à partir de tous les couples de points
- Choix d'un variogramme modèle \Leftrightarrow variogramme expérimental
- Utilisation de ce modèle dans une démarche de comblement de vide d'échantillonnage

Fig. 5. Anisotropic variogram and covariance
 α_1 : direction of continuity
 α_2 : direction across continuity
 α_1 : distance at which spatial correlation vanishes in direction α_1 :
 $C(|h|, \alpha_1) = 0$, $\gamma(|h|, \alpha_1) = \text{sill value} = C(0)$,
 for all $|h| \geq \alpha_1$

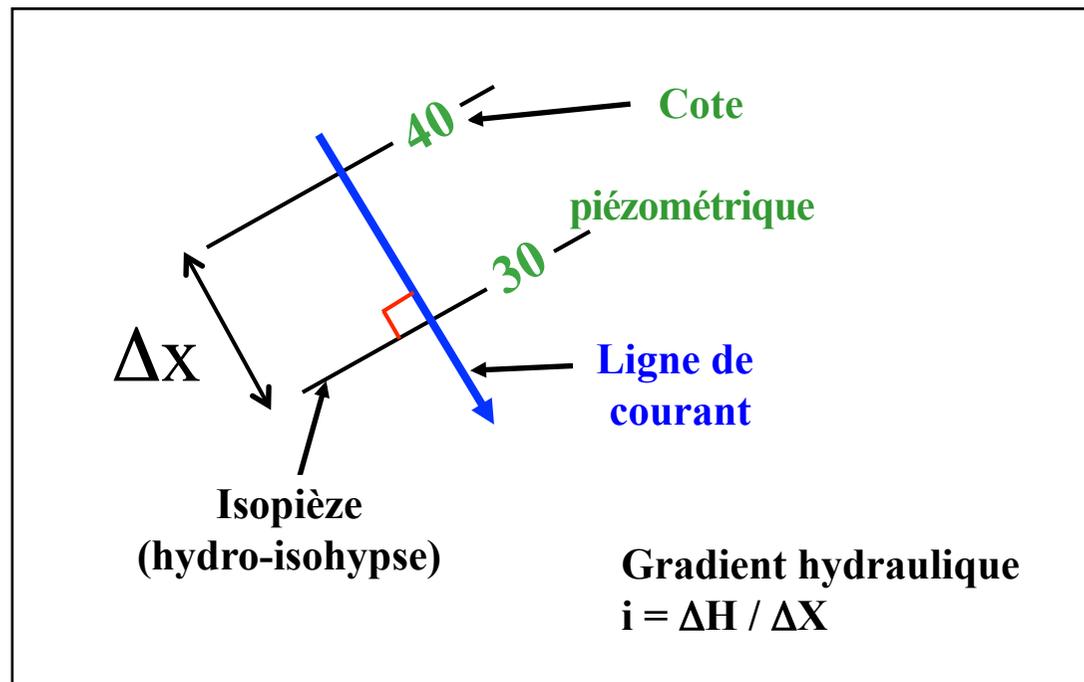
Réalisation d'une carte piézométrique



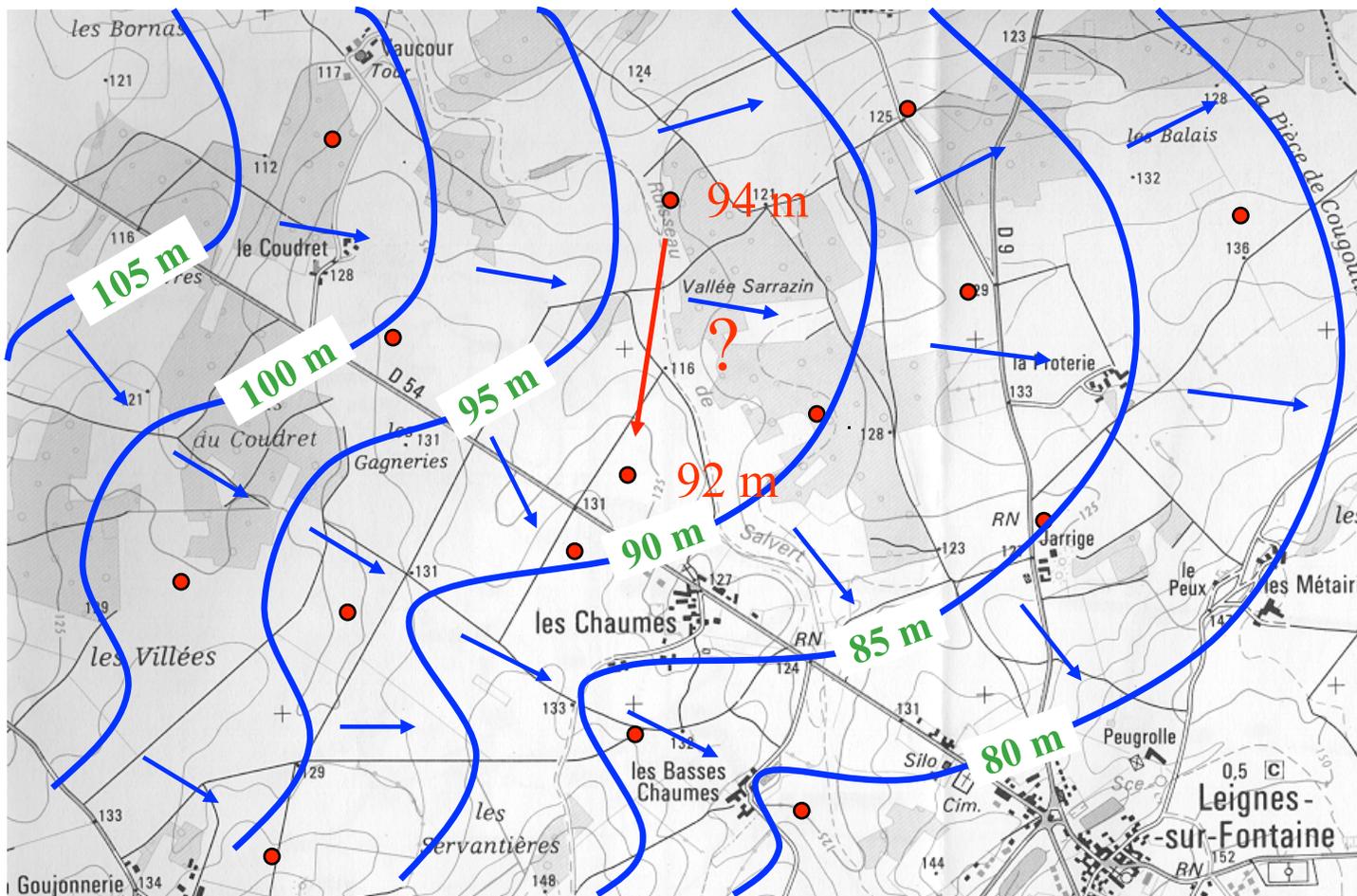
Points
d'observation :
puits, forage,
piézomètre,
source

Isopièze

Vocabulaire spécifique aux cartes piézométriques



Réalisation d'une carte piézométrique



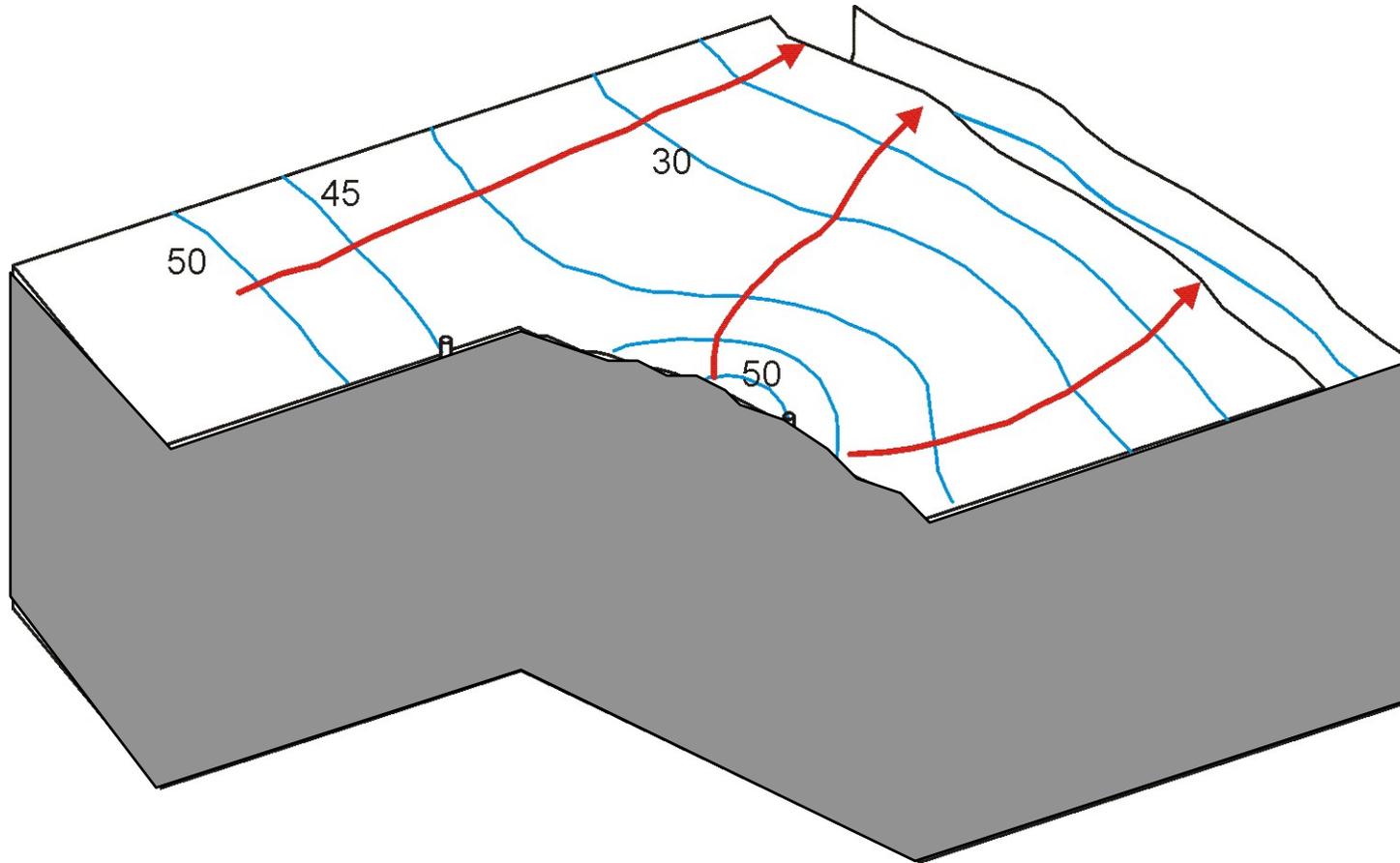
- **Points d'observation : puits, forage, piézomètre, source**
- **Sens d'écoulement de l'eau**

Systemes
Hydrogéologiques

Carte
Piézométrique

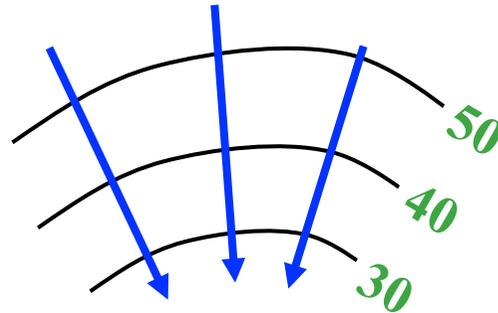
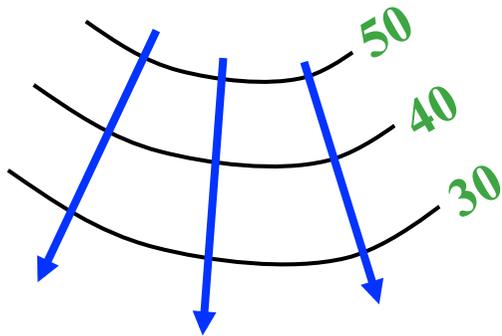
Modèles
numériques

Conclusions

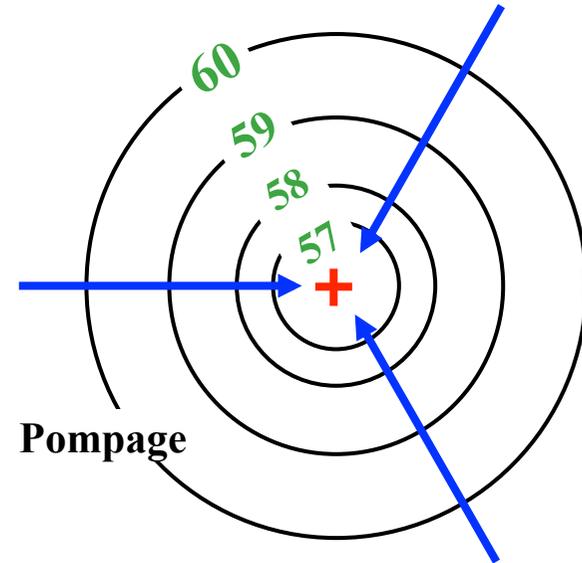


Diverses configurations d'écoulement

Zone divergente

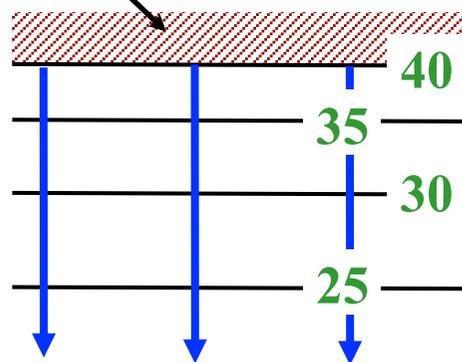


Zone convergente

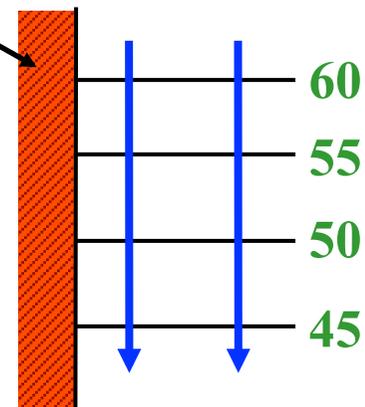


Pompage

Zone d'alimentation

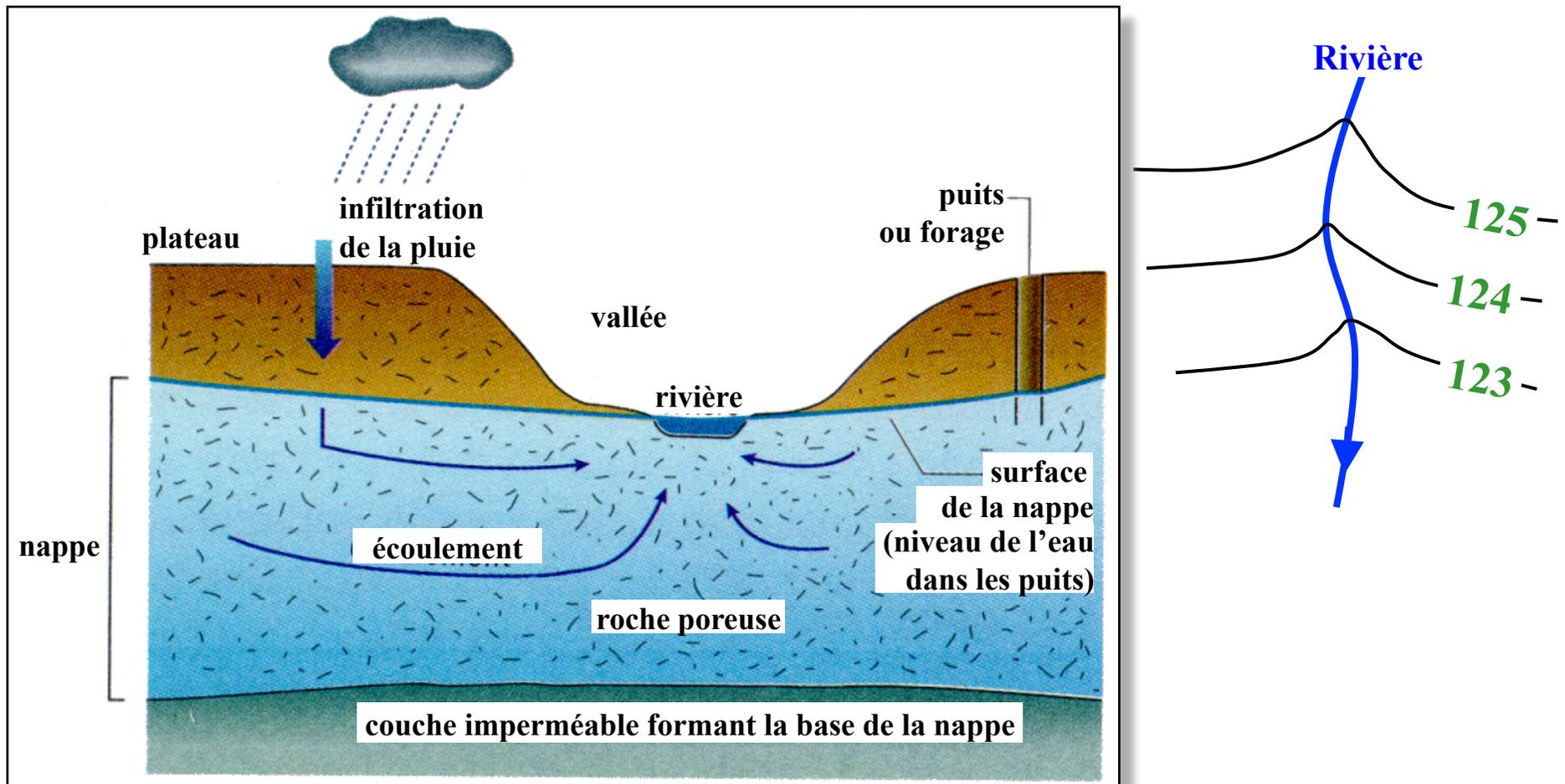


**Barrière
imperméable**



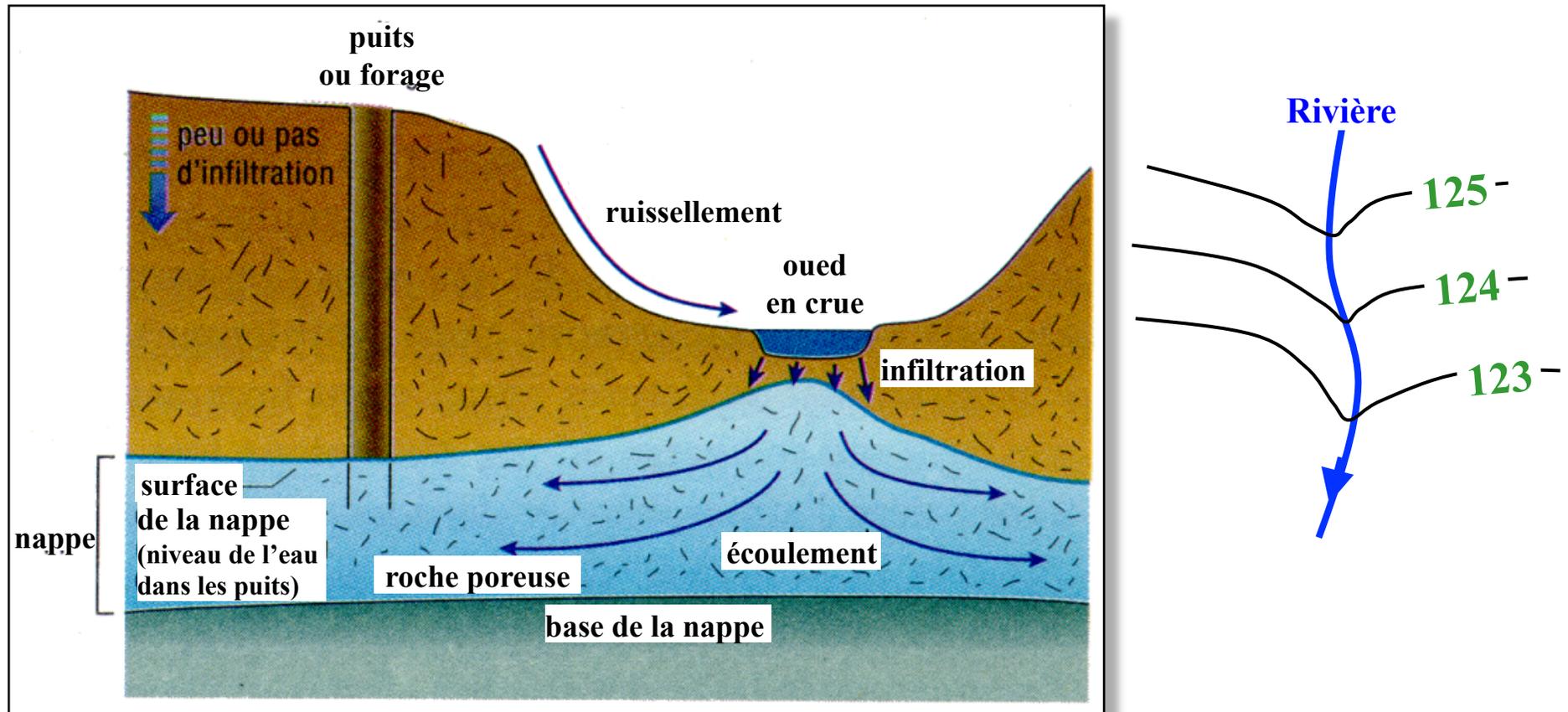
Diverses configurations d'écoulement

Relation Nappe/Rivière : nappe drainée par la rivière



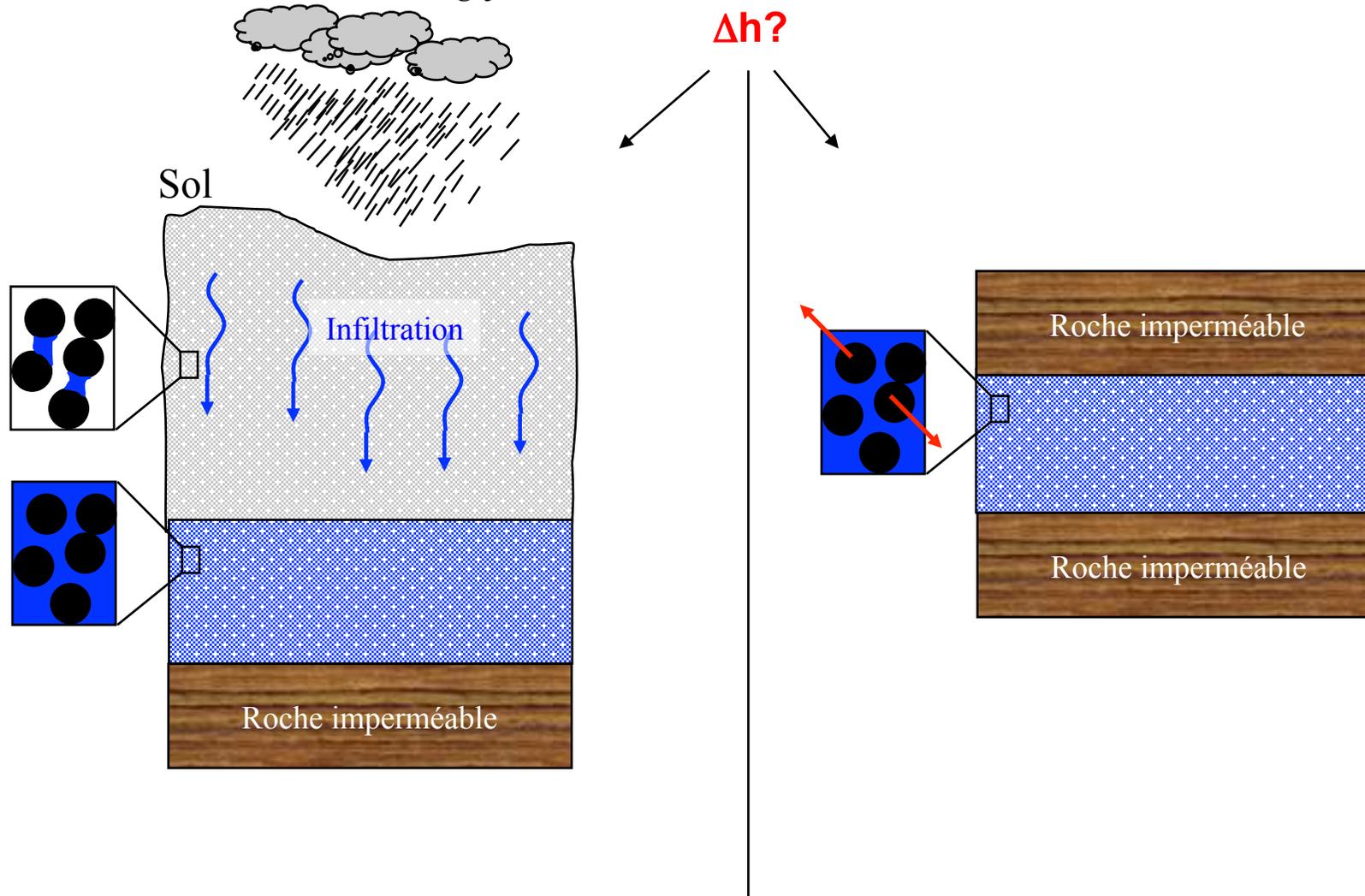
Diverses configurations d'écoulement

Relation Nappe/Rivière : nappe alimentée par la rivière



Équation de conservation (continuité) + loi d'écoulement (Darcy)

$$\text{div}(\rho U) + \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} = 0 \quad + U = -K \text{grad}(h) \quad (\omega: \text{porosité})$$



Un modèle numérique pour quoi faire?

- Contexte trop complexe (milieu hétérogène, non linéarité des processus...) pour avoir des solutions simples
- Tester des hypothèses de travail : fonctionnement, la réactivité, l'importance relative de processus
- Une fois validé, il peut constituer un outil prédictif: outils pour la gestion des ressources et/ou de la qualité des eaux

Étapes de la construction du modèle

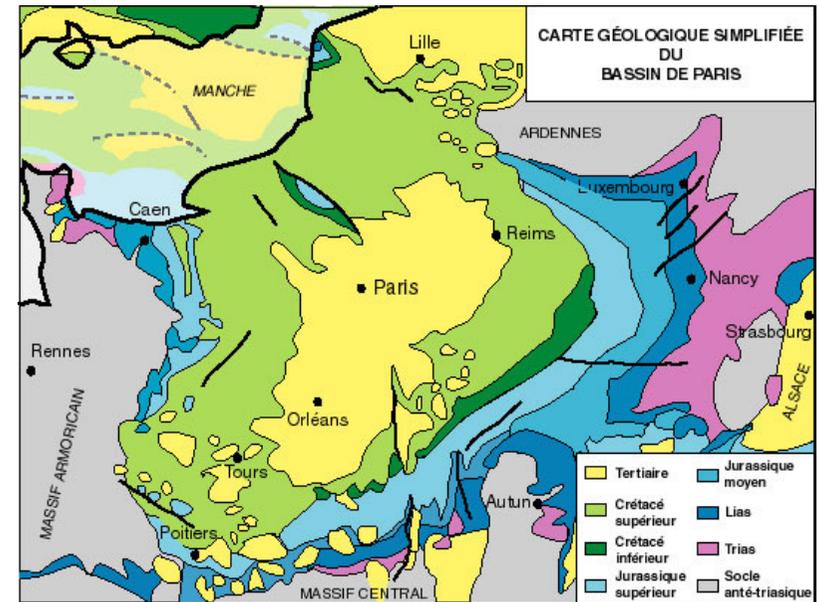
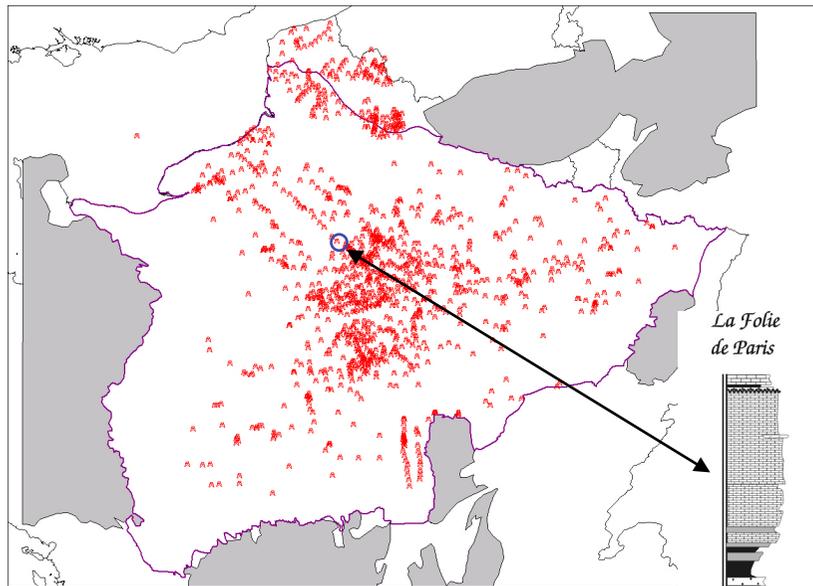
- Description géométrique du domaine (milieu géologique)
- Construction du maillage (méthodes numériques)
- Estimation de l'hétérogénéité des propriétés : habillage du maillage
- Conditions initiales et limites
- Calage et Validation

Systèmes
Hydrogéologiques

Carte
Piézométrique

Modèles
numériques

Conclusions



Forages \Leftrightarrow bases de données
Exemple : Bassin de Paris

500
100
0 m

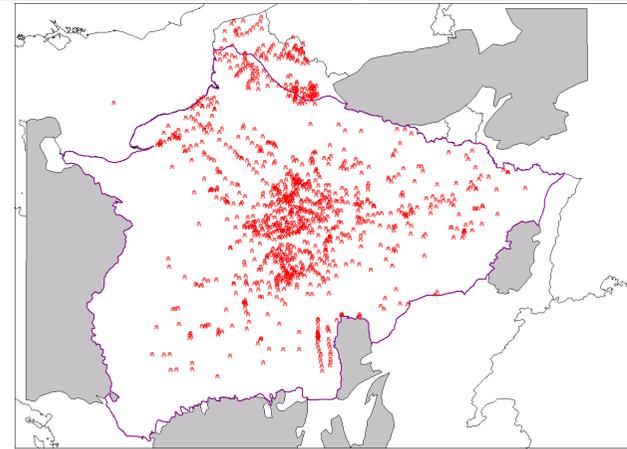
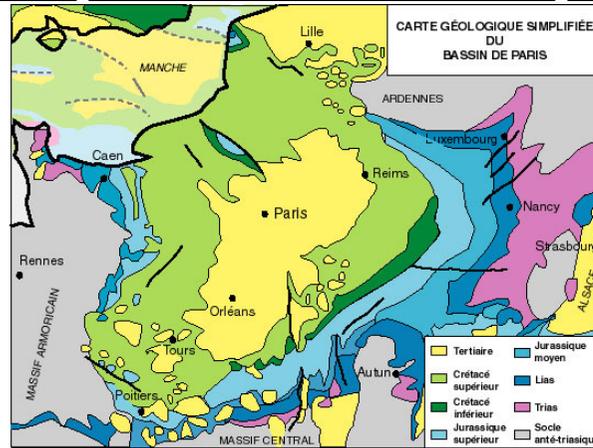
Log de Forage

Systemes
Hydrogéologiques

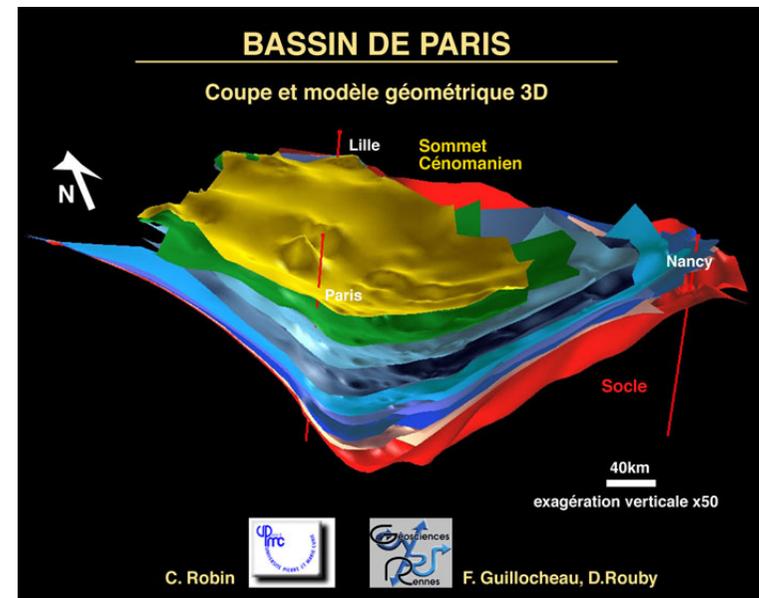
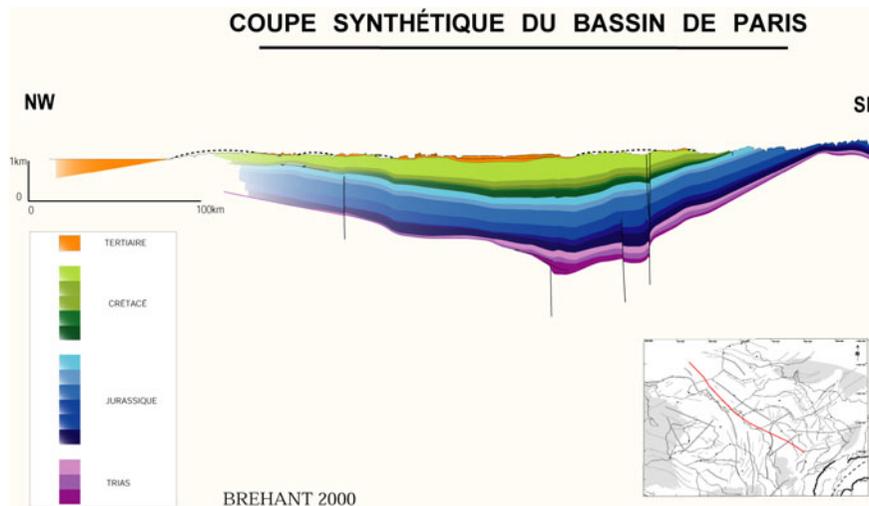
Carte
Piézométrique

Modèles
numériques

Conclusions



Géométrie 2D, 3D



Très onéreux et rare...Géophysique

Étapes de la construction du modèle

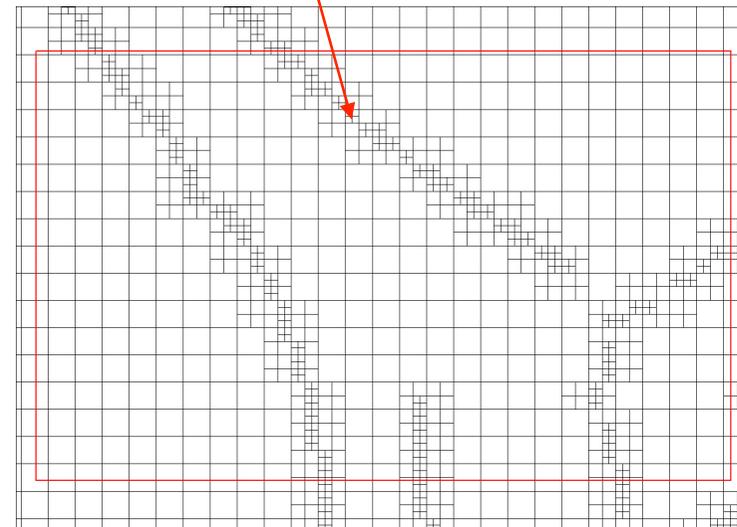
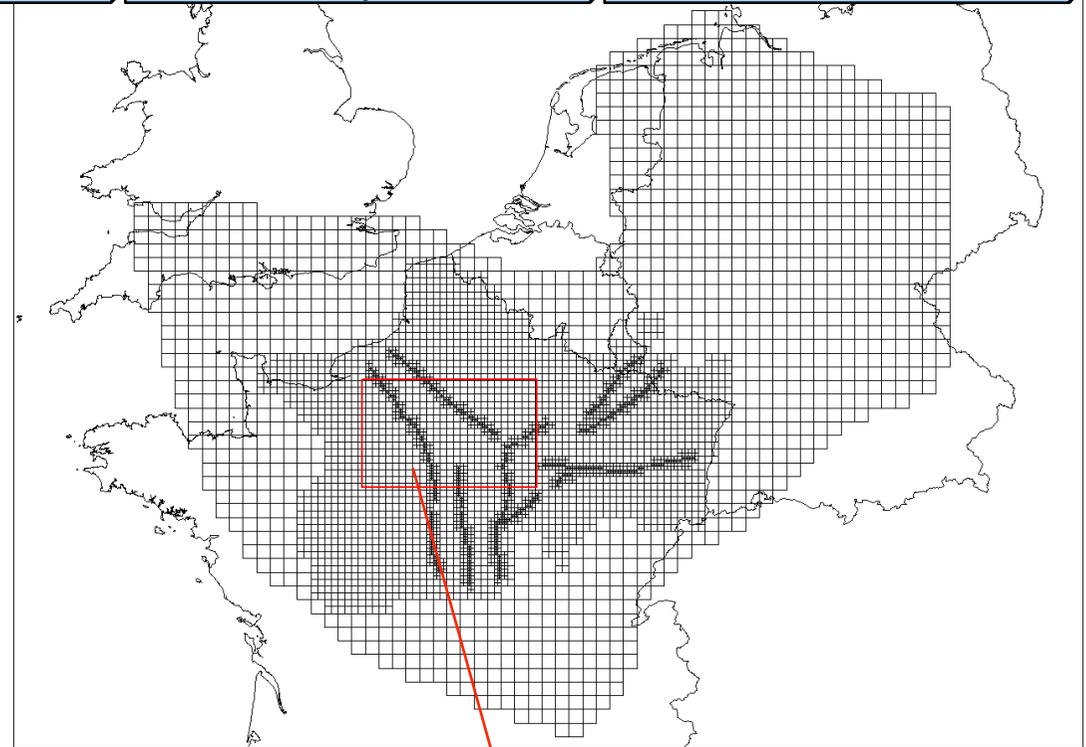
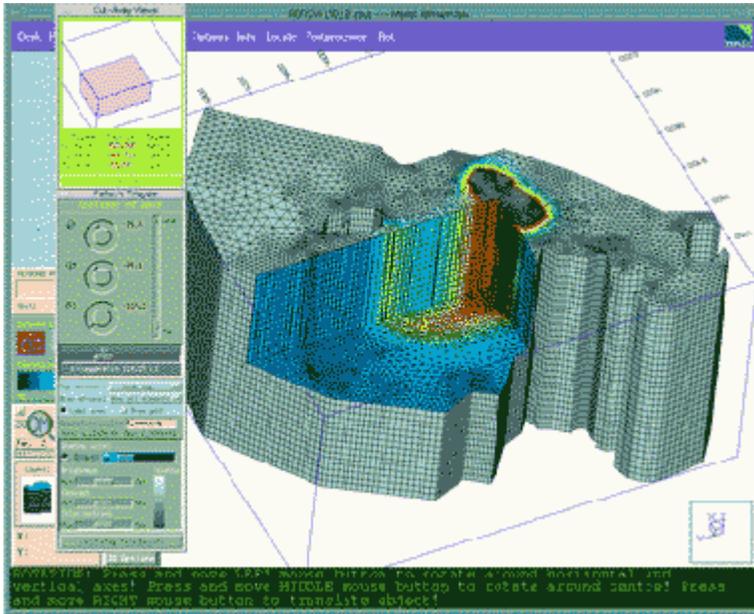
- Description géométrique du domaine (milieu géologique)
- **Construction du maillage (méthodes numériques)**
- Estimation de l'hétérogénéité des propriétés : habillage du maillage
- Conditions initiales et limites
- Calage et Validation

Systèmes Hydrogéologiques

Carte Piézométrique

Modèles numériques

Conclusions



Différentes méthodes numériques « classiques » : Différences finies, Volume finis et Éléments finis

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad \text{Inconnue: } h(x,y)$$

Pas de solution analytique (K hétérogène) ⇒ solution approchée

◆ Différences finies

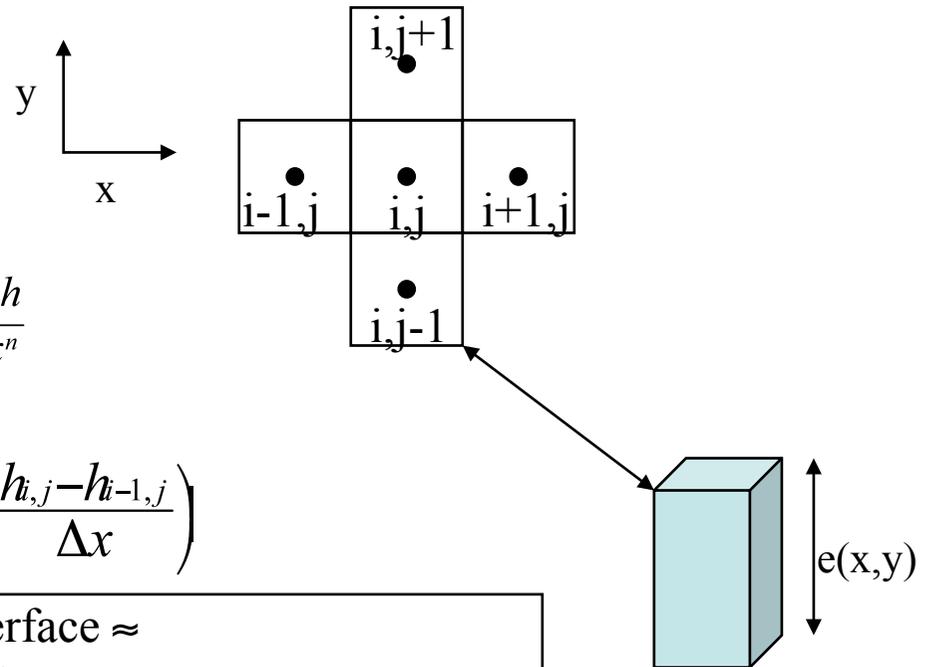
Application deux fois de l'approximation de Taylor :

Approximation de Taylor

$$h(x+\Delta x) = h(x) + \frac{\Delta x}{1!} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2!} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\Delta x^3}{3!} \frac{\partial^3 h}{\partial x^3} + \dots + \frac{\Delta x^n}{n!} \frac{\partial^n h}{\partial x^n}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) \approx \frac{1}{\Delta x} \cdot \left(K_{x+1/2,j} \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x} - K_{x-1/2,j} \frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta x} \right)$$

$K_{x+1/2,j}$ $K_{x-1/2,j}$ Perméabilité à l'interface ≈
perméabilité équivalente
entre i et $i+1$ ou $i-1$ ⇒ pb de stabilité numérique
Quand milieu trop contrasté



◆ Volumes finis, éléments finis...

Étapes de la construction du modèle

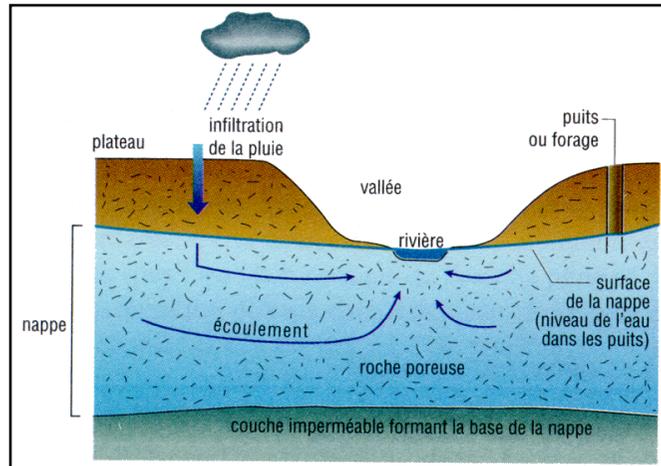
- Description géométrique du domaine (milieu géologique)
- Construction du maillage (méthodes numériques)
- Estimation de l'hétérogénéité des propriétés : habillage du maillage
- Conditions initiales et limites
- Calage et Validation

Étapes de la construction du modèle

- Description géométrique du domaine (milieu géologique)
- Construction du maillage (méthodes numériques)
- Estimation de l'hétérogénéité des propriétés : habillage du maillage
- **Conditions initiales et limites**
- Calage et Validation

◆ Conditions de Dirichlet : limites à charge h imposée

- Contact nappe avec un plan d'eau libre (mer, lac, rivière,)

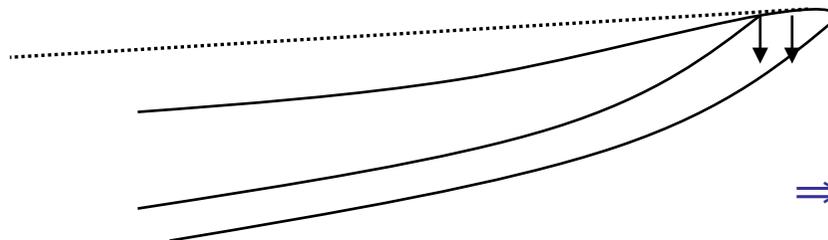


⇒ La charge hydraulique est constante, imposée par la cote de la rivière ($f(x,t)$)

- Ligne de source

⇒ La charge hydraulique est constante, imposée par la cote de la source

- Cas de la nappe captive ayant un taux d'infiltration $>$ au flux d'eau s'écoulant dans la nappe



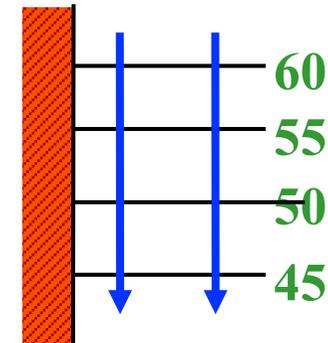
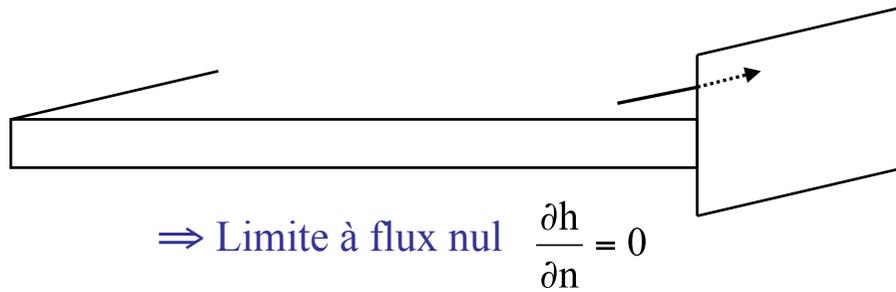
⇒ h imposé = cote de l'affleurement



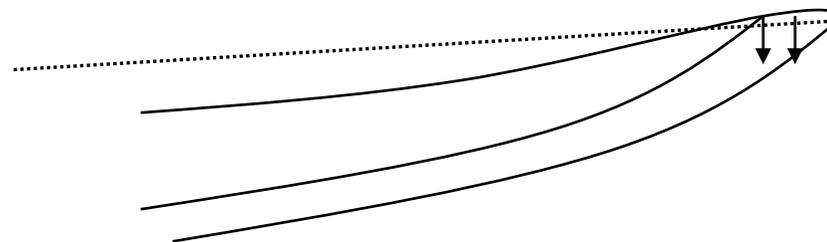
Conditions de Neumann : limites à flux imposé

$$-K \frac{\partial h}{\partial n} \text{ imposé}$$

- Contact nappe avec un imperméable (ex. faille)



- Cas de la nappe captive ayant un taux d'infiltration < au flux d'eau s'écoulant dans la nappe



⇒ Limite à flux imposé qui est le taux d'infiltration de la pluie

Étapes de la construction du modèle

- Description géométrique du domaine (milieu géologique)
- Construction du maillage (méthodes numériques)
- Estimation de l'hétérogénéité des propriétés : habillage du maillage
- Conditions initiales et limites
- **Calage et Validation**

Thématiques de modélisation hydrogéologiques actuelles

- **Ressources en eaux (stress hydrique...)**
- Sureté et impacts stockages (déchets nucléaires, gaz...)
- Processus de couplages (écoulements « non purement darciens » dans les argiles)
- Écoulements multiphasiques (Pétrole, Gaz, zone non-saturé, pollutions)
- Transport réactif (précipitations, dissolution)
- Contexte côtier mélanges eaux douces/eaux salées
- « Accommodation climatique » des aquifères/rivières...

Exple 1: Modélisation de l'écoulement dans l'Albien, Raoult, 1999

Influence de l'exploitation sur la ressource et la chimie de l'aquifère de l'Albien

E.1 Définition de la (des) géométrie(s)

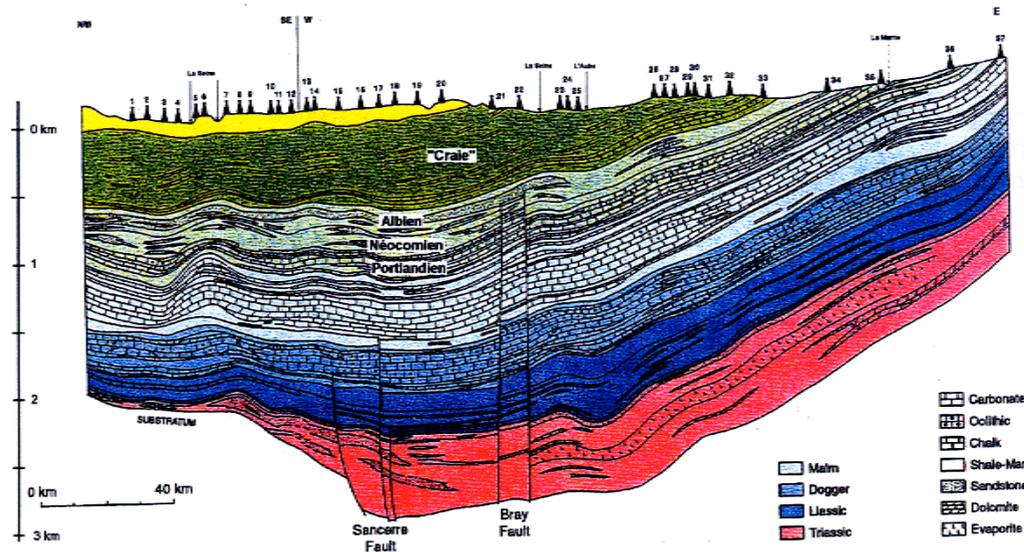
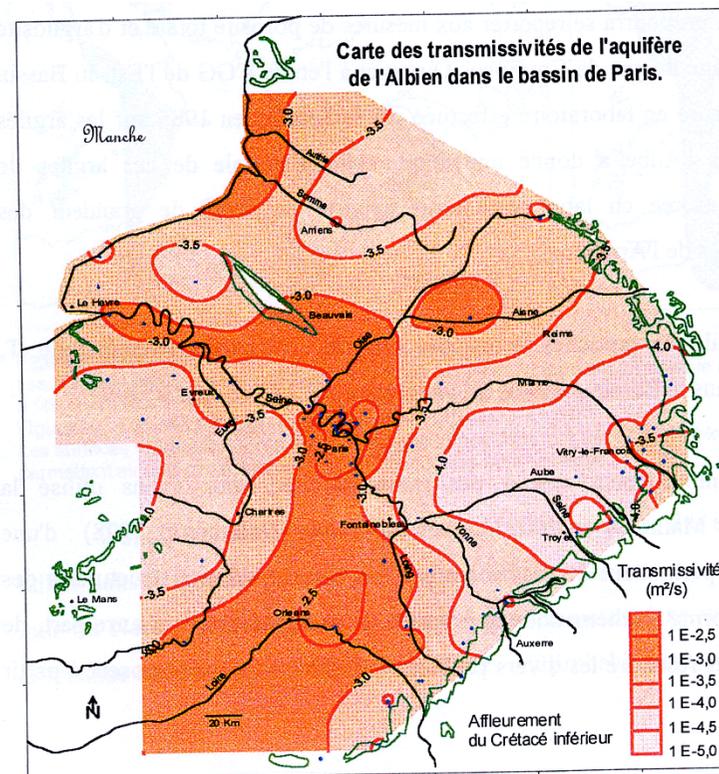
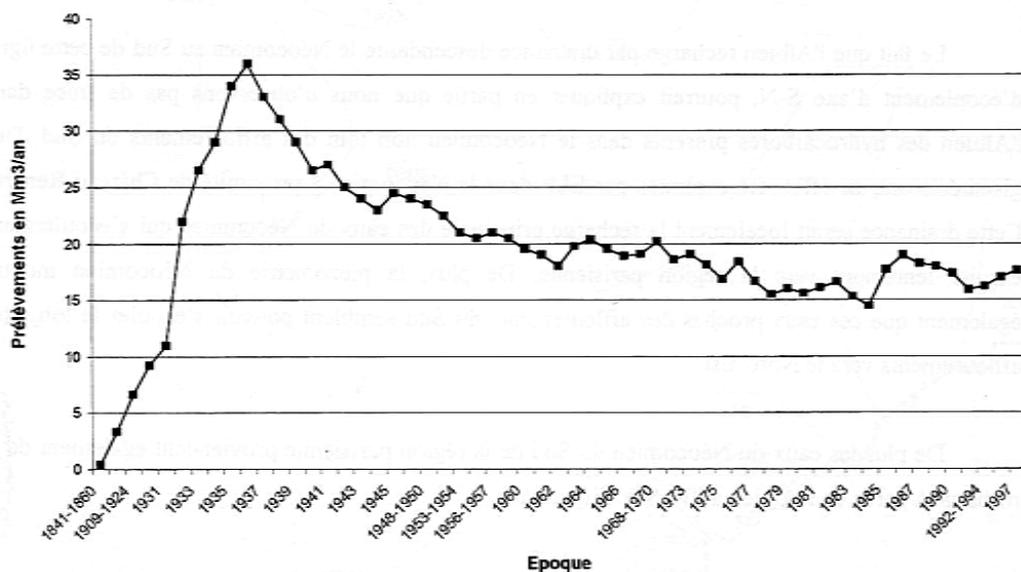
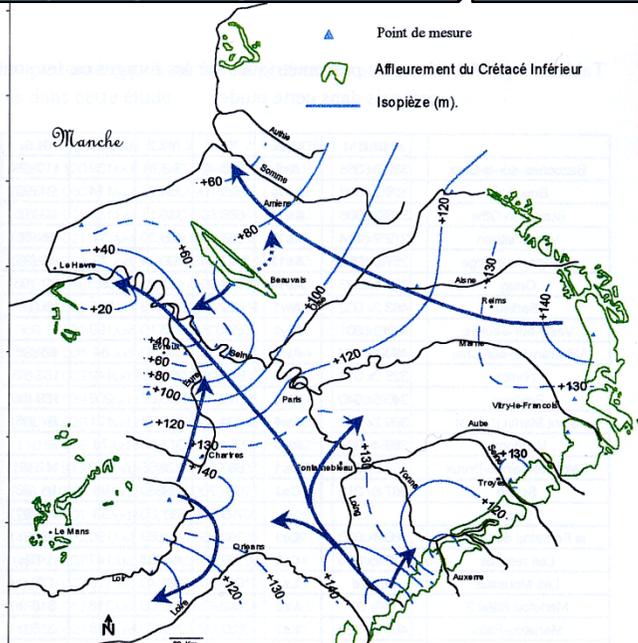


Figure 4 : coupe transversale de Bassin de Paris d'après Goy (1979)

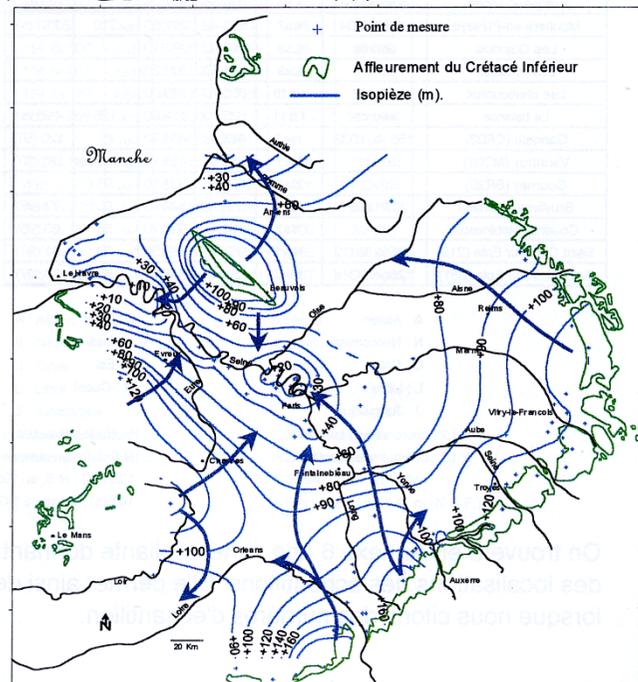
E.2 Synthèse et acquisition des données

Figure 51 : Evolution des prélèvements dans la nappe de l'Albien en Ile-de-France depuis 1841.





Carte Piézométrique 1930
≈ R. Permanent



Carte Piézométrique 1995
Exploitant, BRGM,
Raoul(1995)

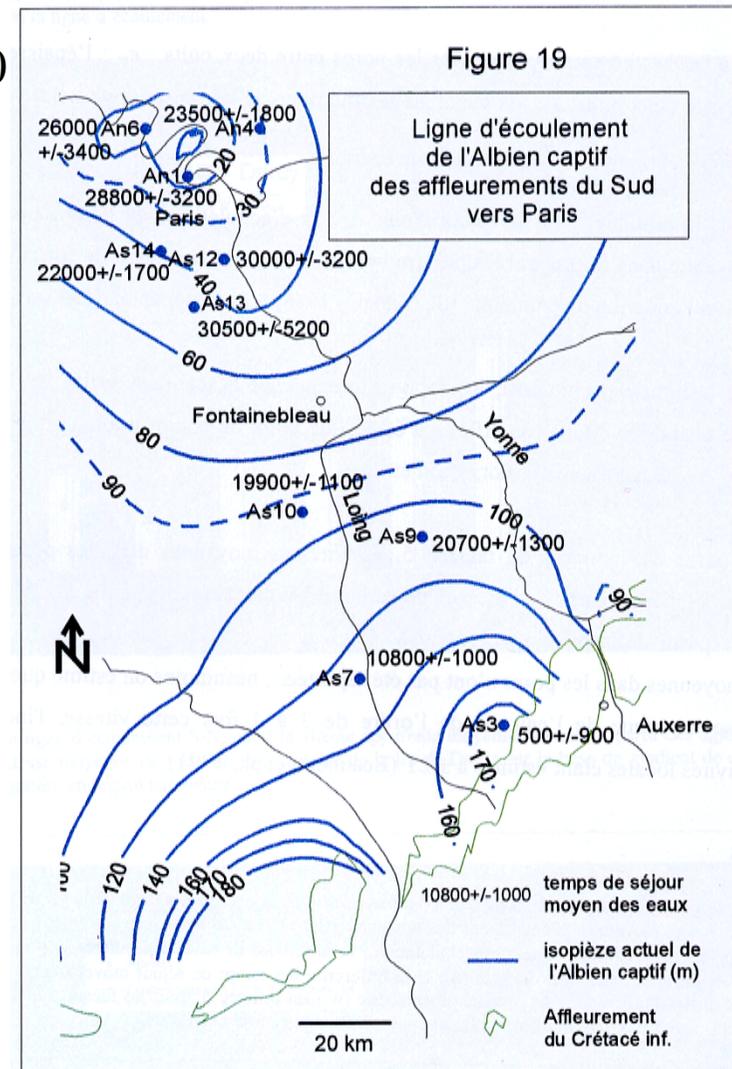


Figure 19

Ligne d'écoulement
de l'Albien captif
des affleurements du Sud
vers Paris

temps de séjour
moyen des eaux

isopièze actuel de
l'Albien captif (m)

Affleurement
du Crétacé inf.

Systemes
Hydrogéologiques

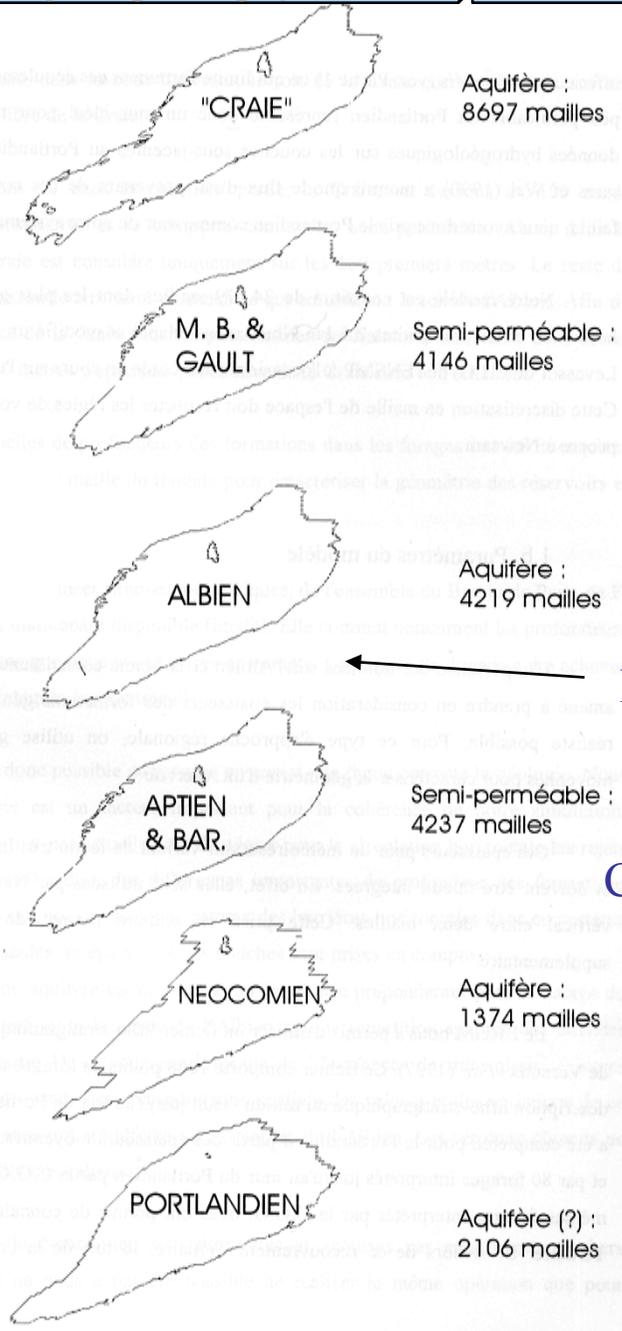
Carte
Piézométrique

Modèles
numériques

Conclusions

Figure 52 : carte piézométrique simulée de l'Albien en 1924.

E.3 Modélisation « 3D »



Maillage et CL

Calage/Validation

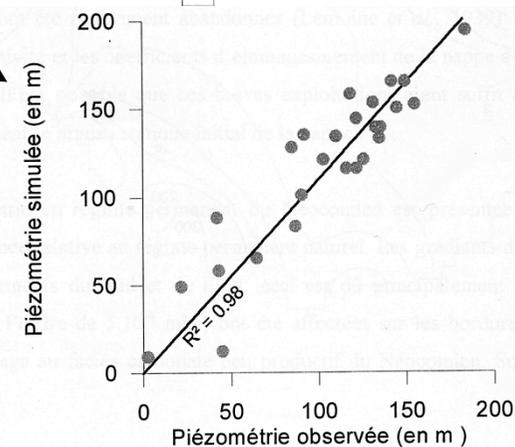
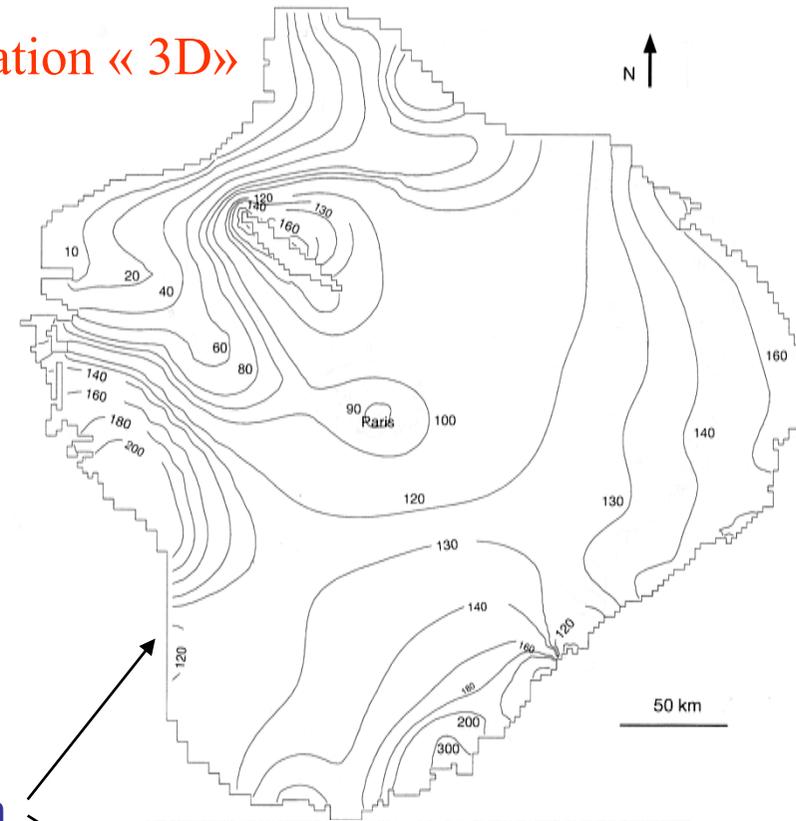
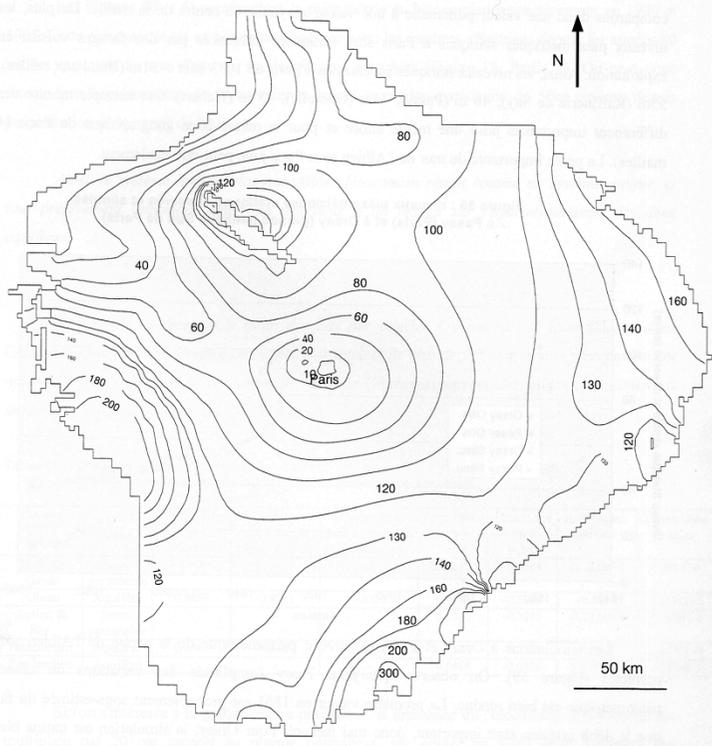


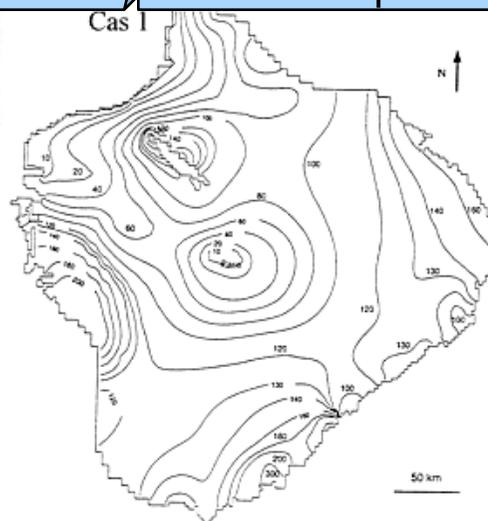
Figure 58 : carte piézométrique simulée de l'Albien en 1995



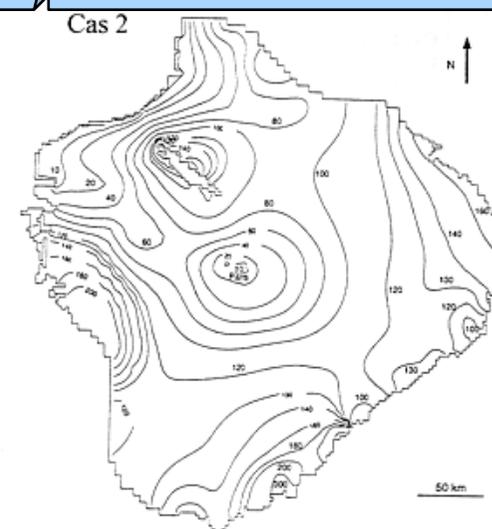
Simulation 'à l'actuel'

Scénario d'exploitation

Cas 1

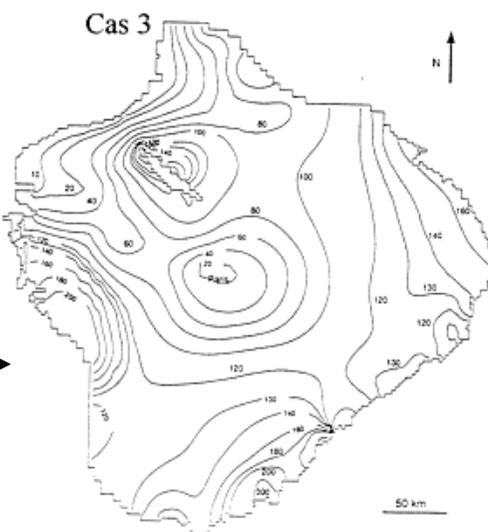


Cas 2

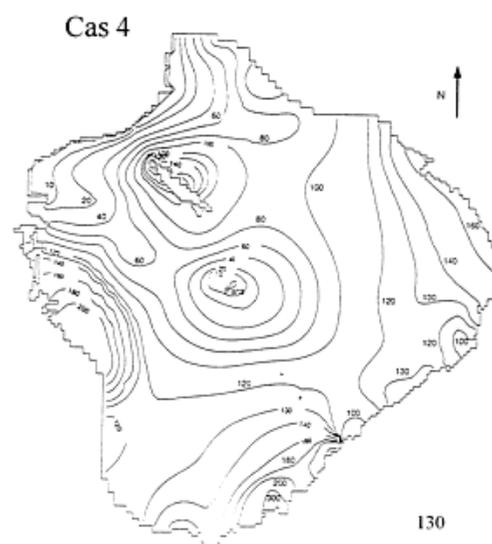


- Cas 1** : même prélèvement qu'en 1997 : 17.6 Mm³/an dans l'Albien en Ile de France et 1.3 Mm³/an dans le Néocomien au Sud de l'Ile de France.
- Cas 2** : 16 Mm³/an dans l'Albien en Ile de France et 1.3 Mm³/an dans le Néocomien au Sud de l'Ile de France.
- Cas 3** : 14 Mm³/an dans l'Albien en Ile de France et 1.3 Mm³/an dans le Néocomien au Sud de l'Ile de France.
- Cas 4** : 17.6 Mm³/an dans l'Albien en Ile de France et 26 Mm³/an dans le Néocomien au Sud de l'Ile de France.

Cas 3



Cas 4



Thématiques de modélisation hydrogéologiques actuelles

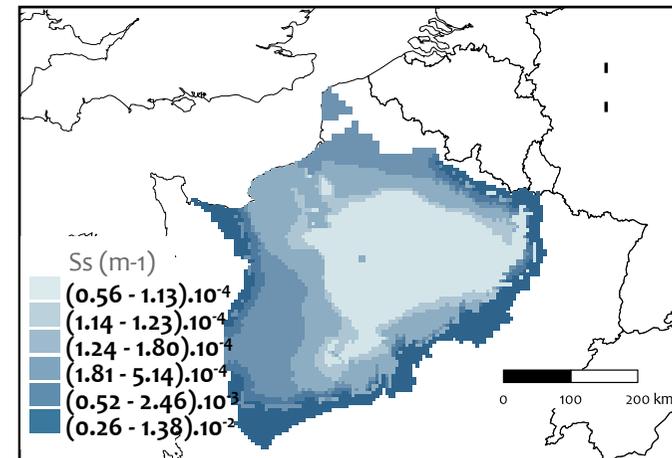
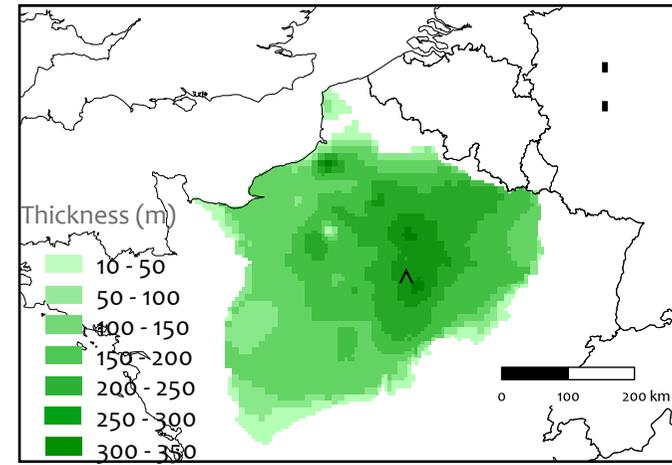
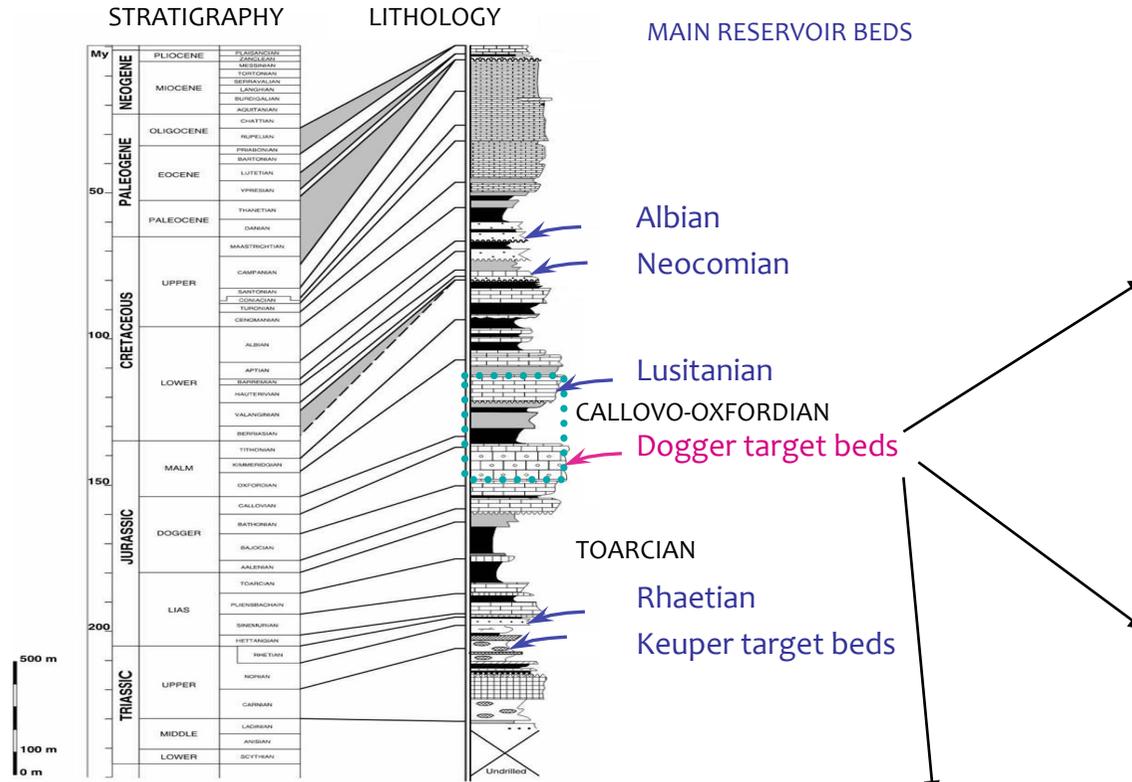
- Ressources en eaux (stress hydrique...)
- Sûreté et impacts stockages (déchets nucléaires, gaz...)
- Processus de couplages (écoulements « non purement darciens » dans les argiles)
- Écoulements multiphasiques (Pétrole, Gaz, zone non-saturé, pollutions)
- Transport réactif (précipitations, dissolution)
- Contexte côtier mélanges eaux douces/eaux salées
- « Accommodation climatique » des aquifères/rivières...

Systèmes Hydrogéologiques

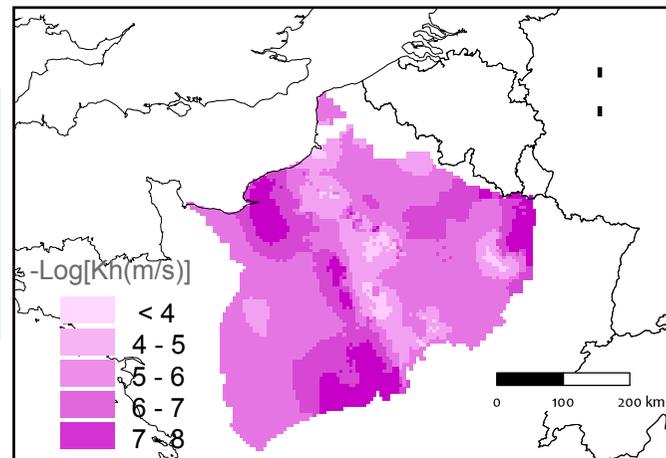
Carte Piézométrique

Modèles numériques

Conclusions

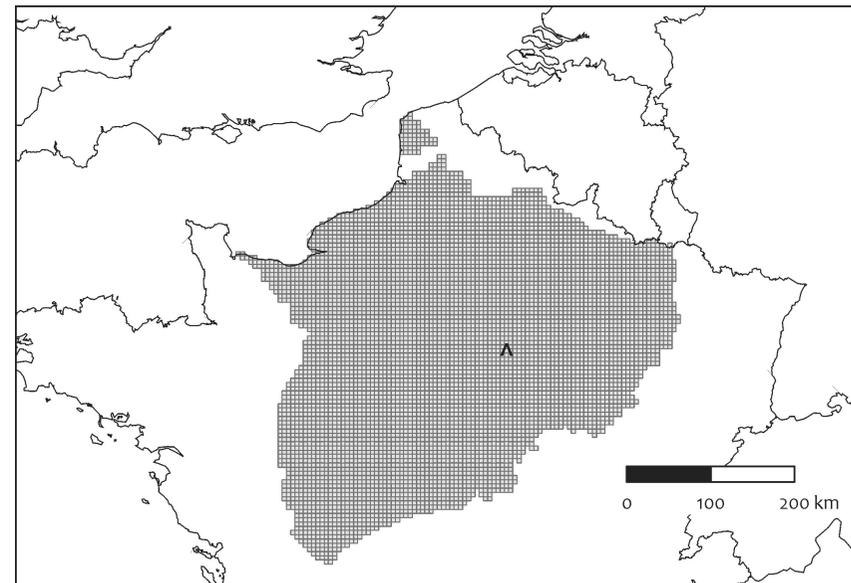


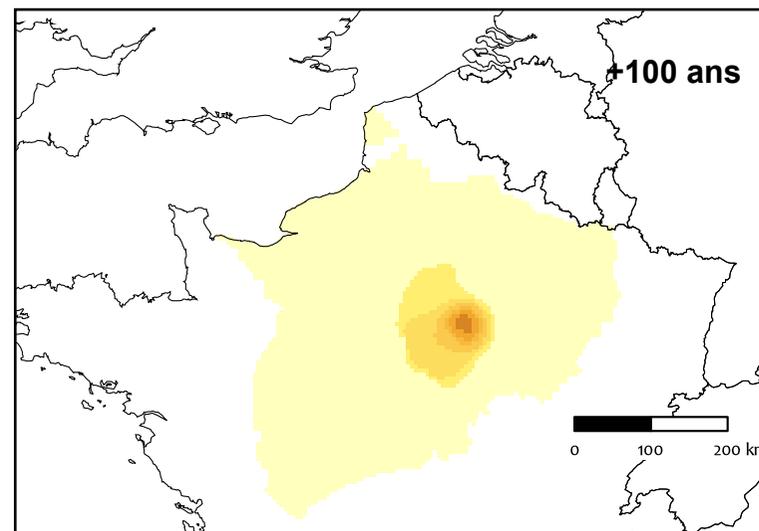
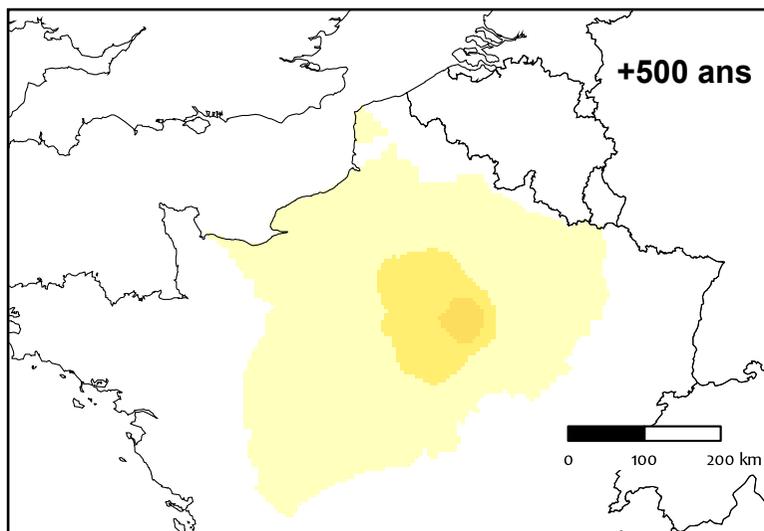
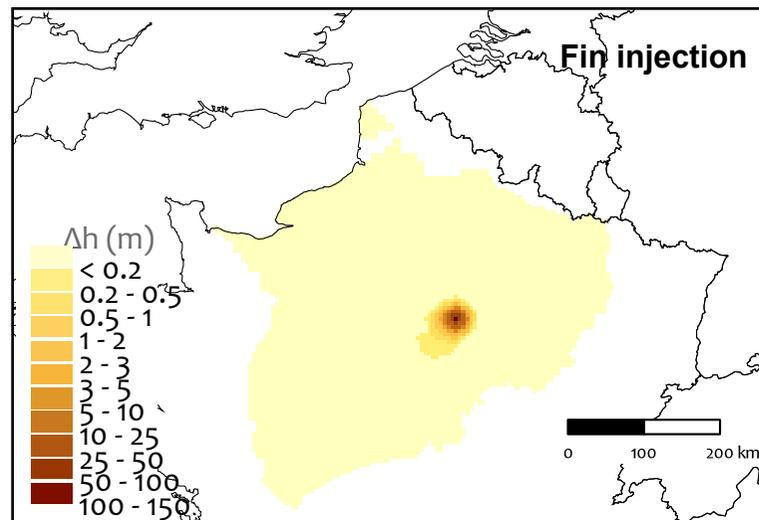
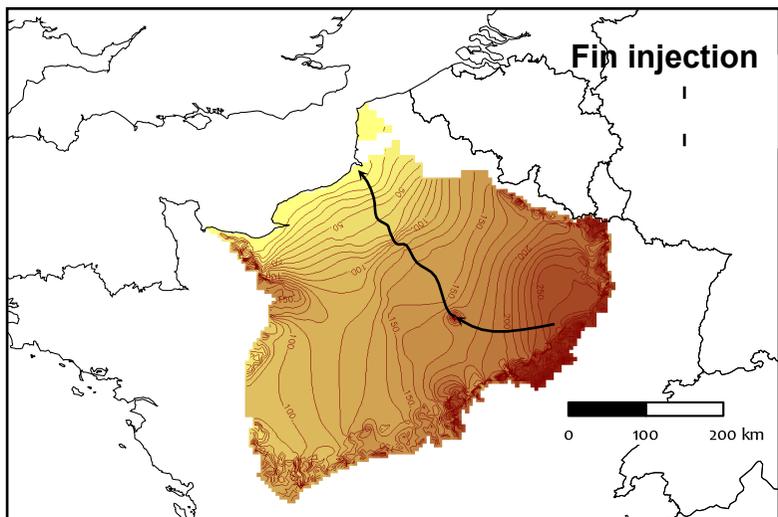
Exple 2 : Impact hydrogéologique du stockage de CO₂?

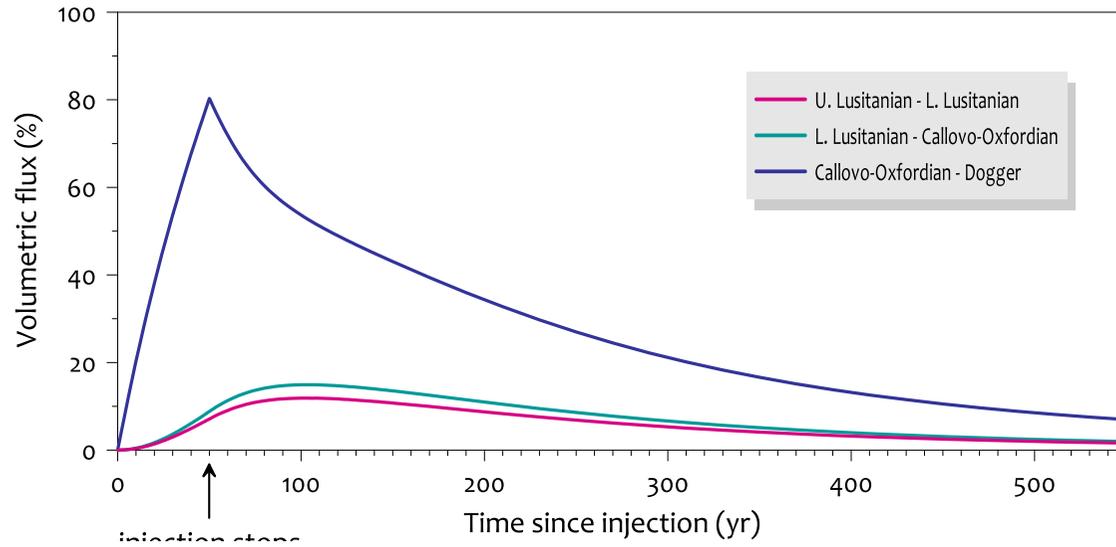


Anne JOST, Julio GONÇALVES, Guillaume BOUQUARD and Hugo DAYAN
Deep Saline Aquifers for Geological Storage of CO₂ and Energy
 27 - 29 May 2009, IFP, Rueil-Malmaison (France)

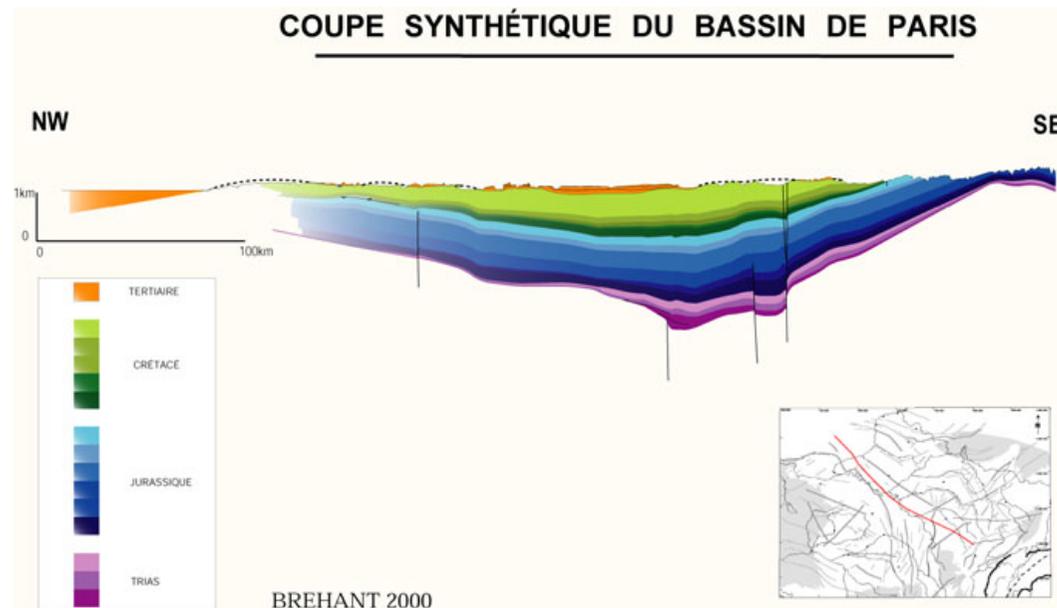
- Modèle 4 couches extraites d'un 3D complet maillage 5 km*5km avec ModFlow96 (PMWIN package)
- Lias et Kim. Imperméables et charges imposées à l'affleurement
- Simulation en permanent sans injection
- Simulation transitoire: Injection « équivalent eau douce » à 5 Mt/an $\text{CO}_2 \Leftrightarrow 9\text{Mm}^3/\text{an}$ sur un puits pendant 50 ans.







Impact sur la drainance flux d'échange verticaux entre deux couches en % par rapport au régime permanent (sans injection)



Thématiques de modélisation hydrogéologiques actuelles

- Ressources en eaux (stress hydrique...)
- Sureté et impacts stockages (déchets nucléaires, gaz...)
- Processus de couplages (écoulements « non purement darciens » dans les argiles)
- Écoulements multiphasiques (Pétrole, Gaz, zone non-saturé, pollutions)
- Transport réactif (précipitations, dissolution)
- Contexte côtier mélanges eaux douces/eaux salées
- « Accommodation climatique » des aquifères/rivières...

- Adapter le modèle et la méthode au problème posé
- Tester des hypothèses et/ou prédiction
- Implique test de sensibilité \Rightarrow erreur de la modélisation
- Réflexion avant de concevoir le modèle

« Ce n'est donc pas au modèle que l'on devrait faire confiance mais à l'homme derrière le modèle, à son expérience et à sa capacité à représenter par le modèle ce qu'il a perçu de la réalité représentée » G. de Marsily