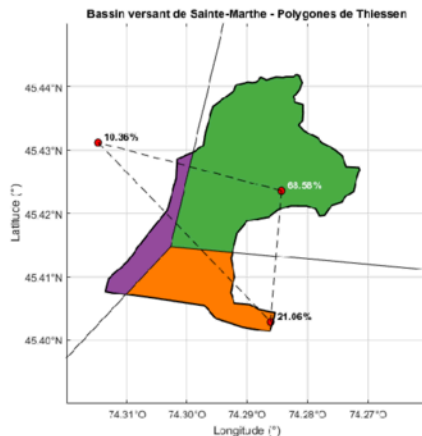
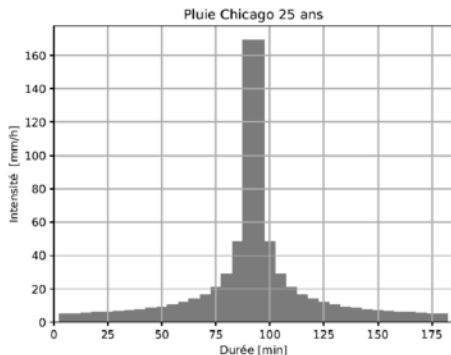


## Cours 03:

### Précipitations et écoulements

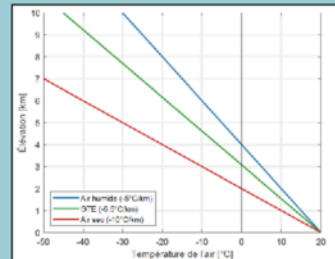


## Rappel: humidité relative (Problème #6 p. 90)

Une masse d'air entreprend une montée convective, mais on ignore la température au moment exact du déclenchement de cette montée. On dispose toutefois des informations suivantes:

1. Le gradient thermique environnemental est de  $-6.5\text{ °C/km}$ ;
2. La masse d'air possède une tension de vapeur de 1200 Pa;
3. La température initiale près du sol (avant le réchauffement) était de  $20\text{ °C}$ ;
4. À saturation, la masse d'air ascendante est  $2\text{ °C}$  plus chaude que le GTE (à une même élévation).

Quelle était la température de la masse d'air immédiatement avant le début de la montée convective?

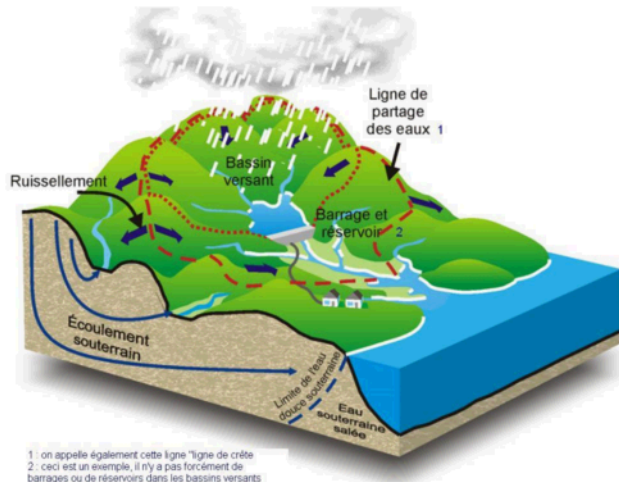
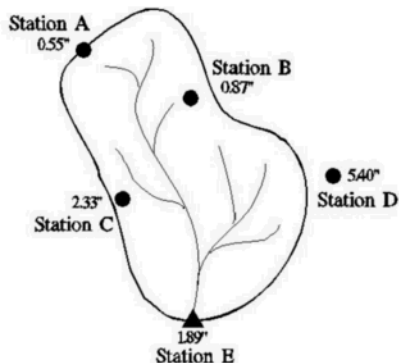


Réponse:  $T_{rech} = 28.7\text{ °C}$



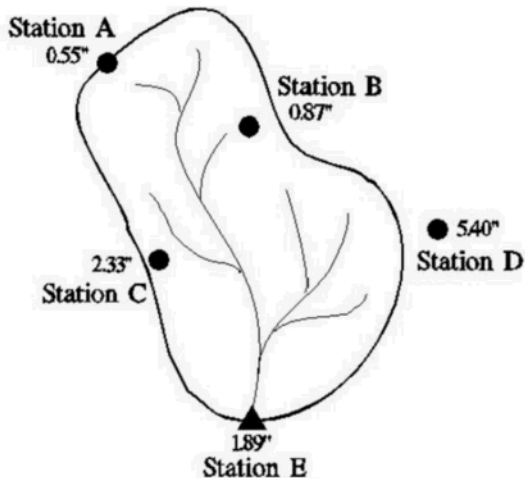
# Bassin versant – Précipitations spatialisées

- Moyenne arithmétique
- Méthode des isohyètes
- Polygones de Thiessen
- Autres



## Bassin versant – Précipitations spatialisées

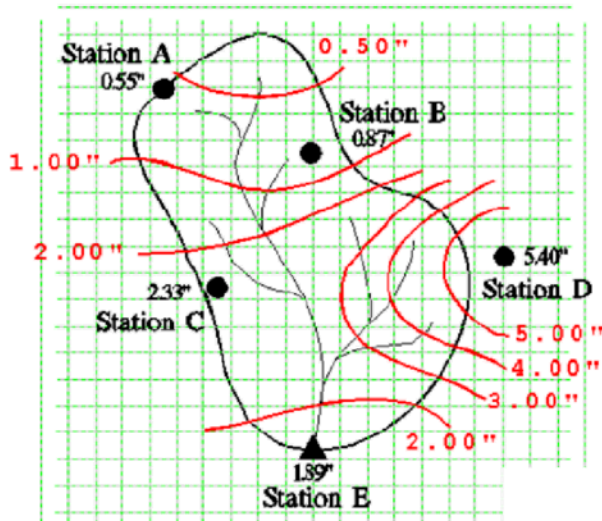
Moyenne arithmétique:



$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

# Bassin versant – Précipitations spatialisées

## Méthode des isohyètes:



$$P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

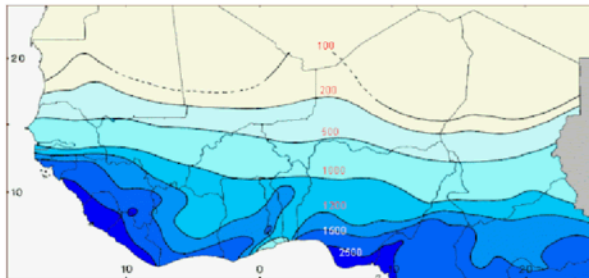
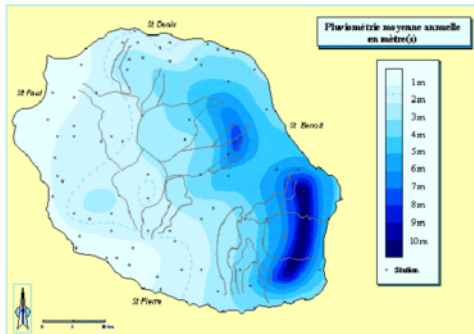
$$P = \frac{\sum_{i=1}^k A_i P_i}{A}$$

où

- $A_i$  est la superficie comprise entre les isohyètes  $i$  et  $i+1$
- $A$  est la superficie totale du bassin versant
- $K$  est le nombre d'intervalles

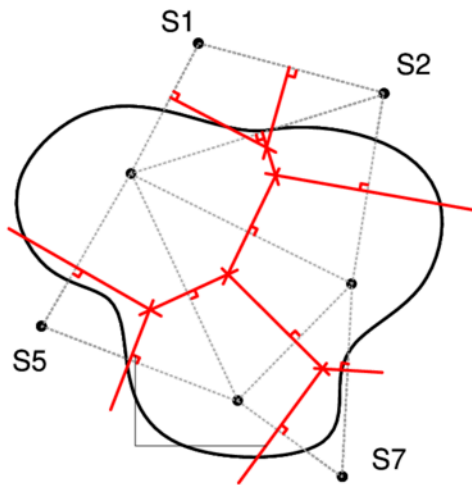
# Bassin versant – Précipitations spatialisées

## Méthode des isohyètes:



# Bassin versant – Précipitations spatialisées

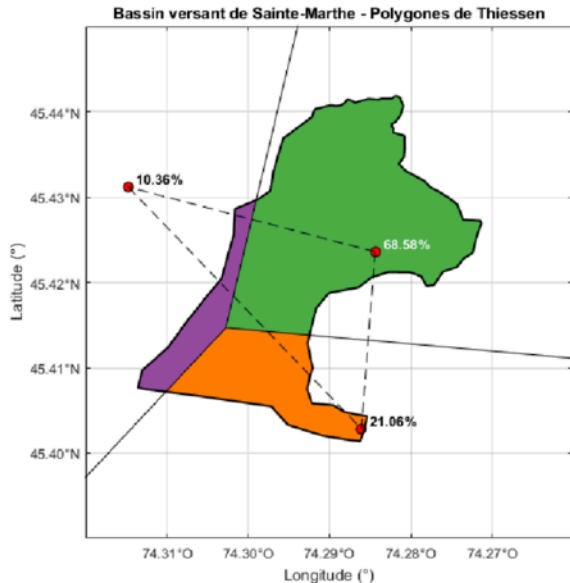
Polygones de Thiessen:



$$P = \frac{\sum_{i=1}^k A_i P_i}{A}$$

# Bassin versant – Précipitations spatialisées

## Polygones de Thiessen:

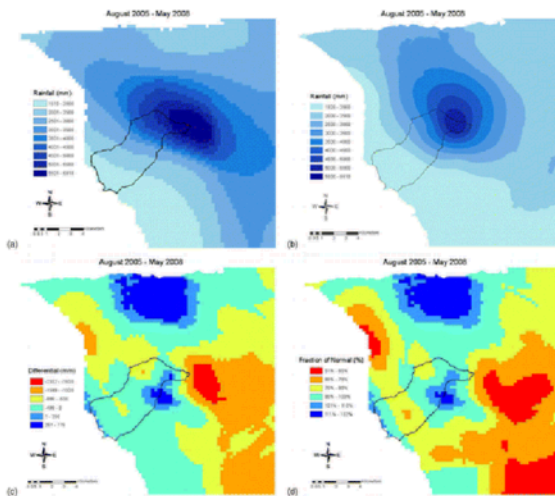


$$P = \frac{\sum_{i=1}^k A_i P_i}{A}$$

# Bassin versant – Précipitations spatialisées

## Autres méthodes:

- À partir de logiciels (p. ex. ArcGIS, QGIS)
- Géostatistique
- Possibilité de prendre en compte d'autres paramètres

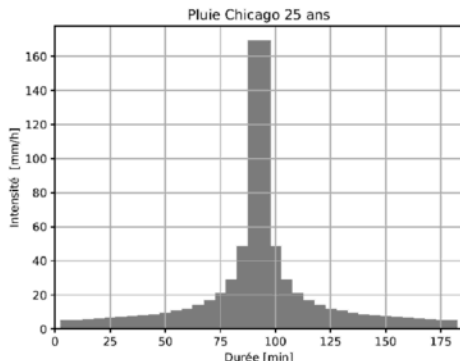


Différentes méthodes d'interpolation de données de précipitations

Source: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0000330>

# Hyétoigrammes synthétiques

- Lorsque la mesure ne peut pas être utilisée
- Pour répartir dans le temps une valeur moyenne (de journalier à horaire par exemple)
- Ce sont des modèles qui doivent être adaptés à la région d'étude et au type de précipitation
- Exemples de hyétoigrammes synthétiques:
  - Services Environnementaux Atmosphériques Canada (SEA)
  - Soil Conservation Services (SCS), maintenant le Natural Resources Conservation Service (NRCS)
  - Pluie de Chicago adaptée localement



# Hyétogrammes synthétiques

## Services Environnementaux Atmosphériques Canada (SEA):

- horaire, type orage (attention aux cas particuliers)
- 12 heures (p. 85)

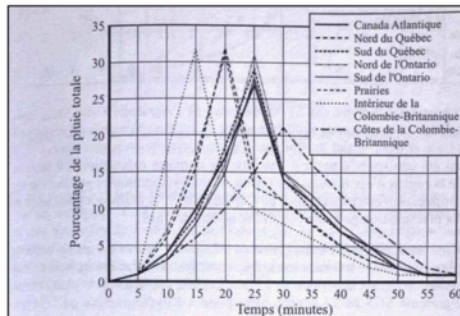


Figure 3.19 Hyétogrammes synthétiques AES de 1 heure de type 2.

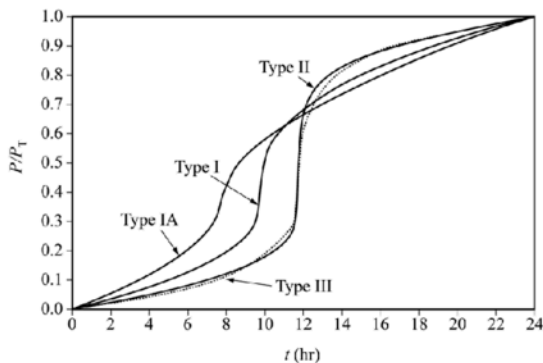
Tableau 3.5 Hyétogrammes synthétiques AES de 1 heure de type 2 (Hogg et Carr, 1985)

Région	Intervalle de temps (minutes)													
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60		
Canada Atlantique	1	4	10	17	27	14	11	7	5	2	1	1		
Nord du Québec	1	6	15	32	15	11	8	5	3	2	1	1		
Sud du Québec	1	4	9	18	29	14	10	7	4	2	1	1		
Nord de l'Ontario	1	3	8	16	31	15	11	7	4	2	1	1		
Sud de l'Ontario	1	3	8	15	28	15	12	8	5	3	1	1		
Prairies	1	7	17	31	13	11	8	5	3	2	1	1		
Intérieur de la Colombie-Britannique	1	17	32	14	10	8	6	4	2	1	1	1		
Côtes de la Colombie-Britannique	1	3	6	10	15	21	16	12	8	5	2	1		

# Hyétogrammes synthétiques

Soil Conservation Services (SCS), maintenant le  
Natural Resources Conservation Service (NRCS):

- 24 heures (attention aux cas particuliers)
- Graphique cumulé
- Type = Régions d'application (p. 86)
- Cumul de pluie sur 24h (p. 87)

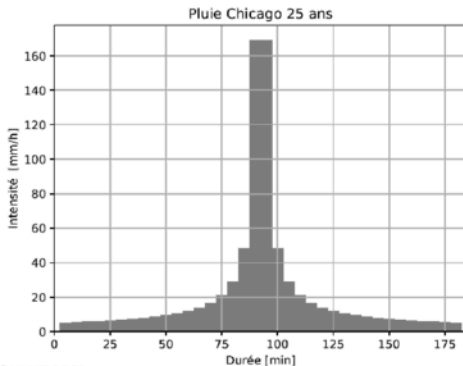


SCS (NRCS) Rainfall Types (Source Nicklow *et al.*, 2006)

# Hyétogrammes synthétiques

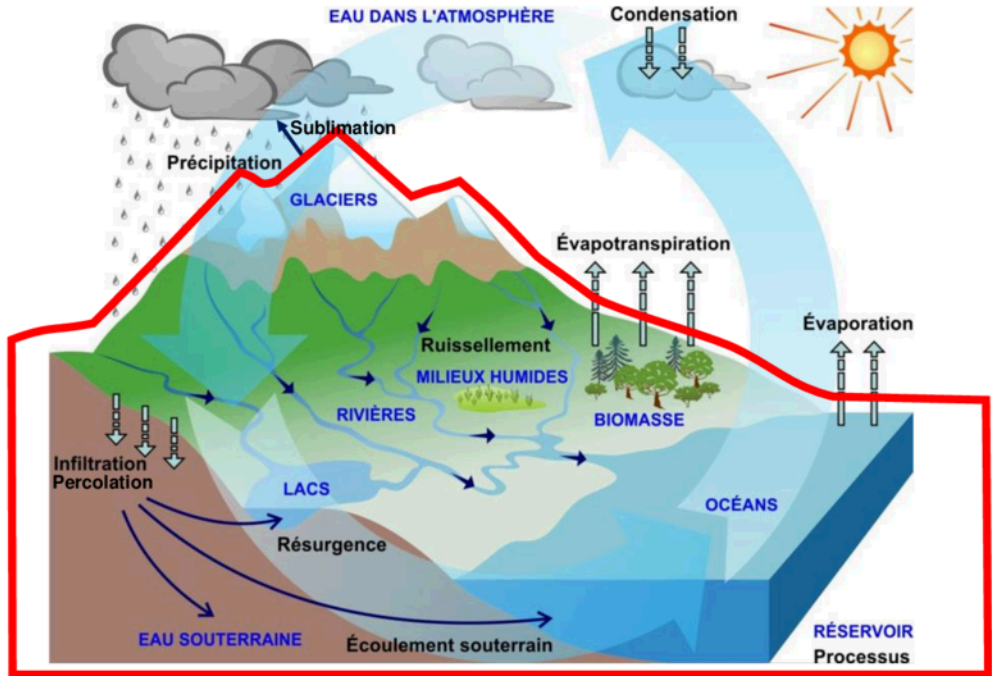
## Pluie de type Chicago:

- **Aucun rapport avec la Ville de Chicago (seulement le nom!)**
- Mêmes principes mais adaptés aux réalités locales sur la base de données mesurées
- Exemple Ville de Montréal – Pluie de type Chicago 25 ans (utilisée pour les simulations de rétention du drainage urbain)



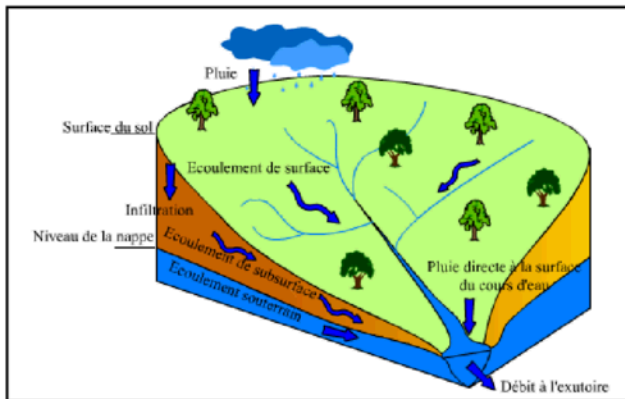
# Les écoulements

## Les cheminements terrestre de l'eau



# Les écoulements À l'échelle du bassin versant

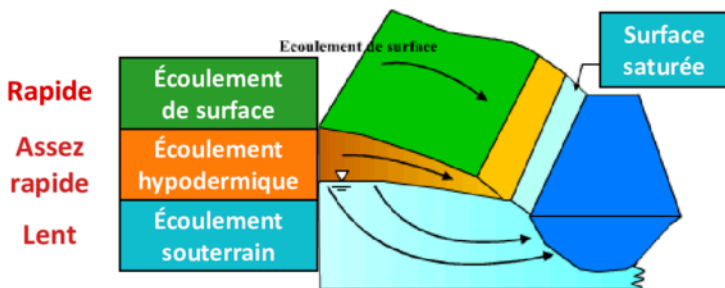
- Ruissellement de surface
- Précipitation sur les cours d'eau
- Écoulement souterrain
- Écoulement hypodermique (de sub-surface)
- Fonte



Source : cours d'hydrologie de A. Musy, EPFL

# Les écoulements À l'échelle du bassin versant

- Ruissellement de surface
- Précipitation sur les cours d'eau
- Écoulement souterrain
- Écoulement hypodermique (de sub-surface)
- Fonte



Source : cours d'hydrologie de A. Musy, EPFL

## Les écoulements

### Caractéristiques du bassin versant

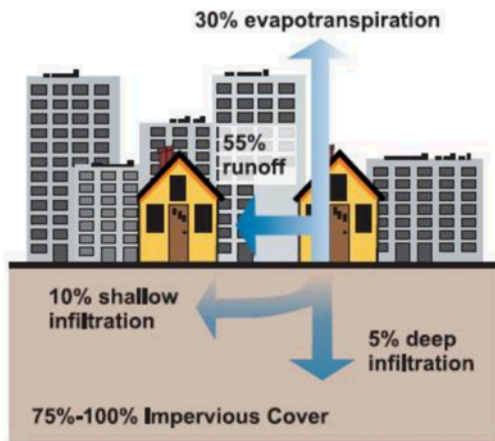
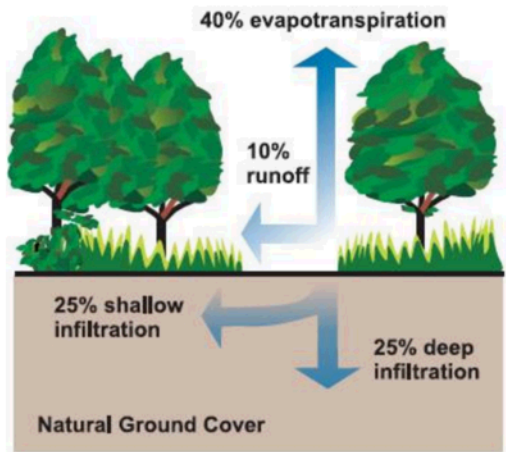
Plusieurs caractéristiques du bassin versant qui peuvent avoir un impact direct sur le **ruissellement** et peuvent être intégré au modèle hydrologique:

- **Imperméabilité:**
  - Occupation du sol : forêt mixte, de conifères, de feuillus, terres agricoles, etc.
  - Affectation du territoire : zones urbaines, agriculture, milieu rural, etc.
  - Urbanisation du territoire
- **Pentes du bassin versant** (douce, raide, etc.)
- **Types de sol** (argileux, silteux, sableux, graveleux, etc.)
- **Superficie du bassin versant** (petit, moyen, grand, etc.)

# Les écoulements

## Caractéristiques du bassin versant

Impact de l'**urbanisation** sur le bilan hydrique:

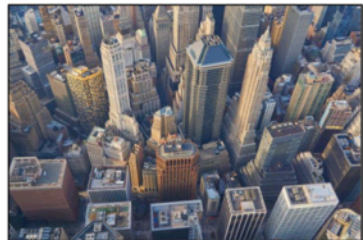
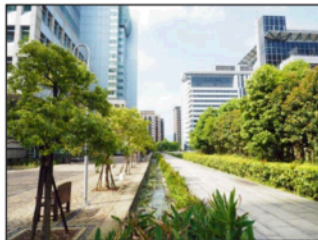
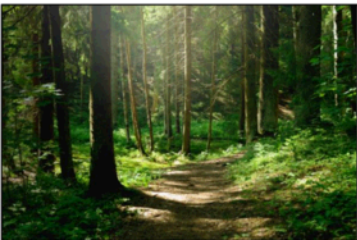


Source: [https://www.appropedia.org/Low Impact Development \(LID\) Technology](https://www.appropedia.org/Low_Impact_Development_(LID)_Technology)

# Les écoulements

## Caractéristiques du bassin versant

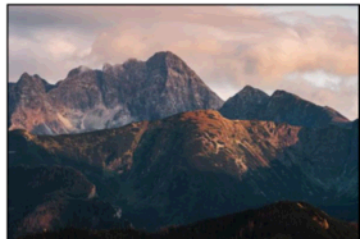
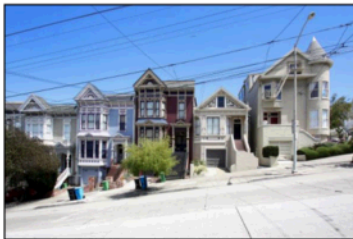
Impact de l'imperméabilité sur le **ruissellement**:



# Les écoulements

## Caractéristiques du bassin versant

Impact de la **pente** sur le **ruissellement**:



# Les écoulements

## Caractéristiques du bassin versant

Impact du **type de sol** sur le **ruissellement**:



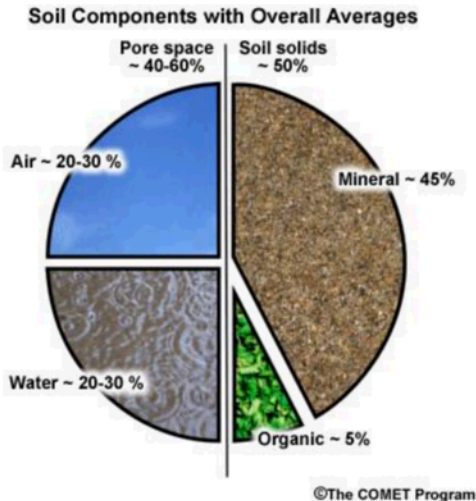
## Les écoulements

### Autres facteurs importants

- Forme et intensité des précipitations
- Porosité du sol de surface
- Végétation
- Profondeur et perméabilité du sous-sol
- Profondeur de la nappe
- Humidité du sol
- Topographie

# Caractérisation des sols

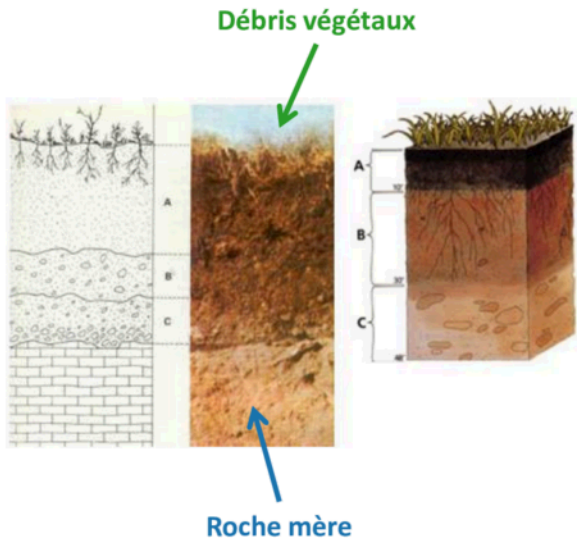
## Composition de la colonne de sol:



# Caractérisation des sols

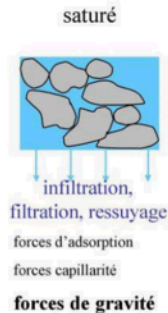
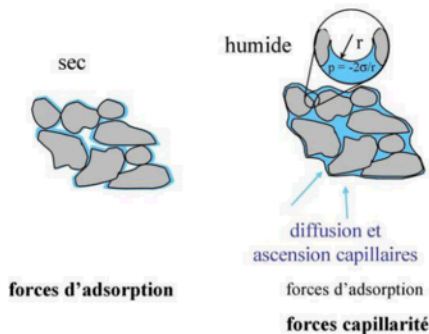
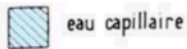
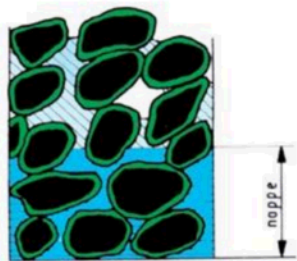
## Horizons:

- A. Riche en matière organique
- B. Moins organique et plus minéral que A
- C. Variable en granulométrie, généralement minéral



# Caractérisation des sols

## Eau dans le sol:



Source: Planette TP

# Caractérisation des sols

## Paramètres importants:

- Porosité ( $\phi$ )

$$\phi = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}} = \frac{S_e + S_a}{S_t}$$

- Teneur en eau ( $\theta$ )

$$\theta = \frac{\text{volume d'eau}}{\text{volume total}} = \frac{S_e}{S_t}$$

- Sol saturé si  $\theta = \phi$

# Caractérisation des sols

## Vitesse d'écoulement dans un sol saturé:

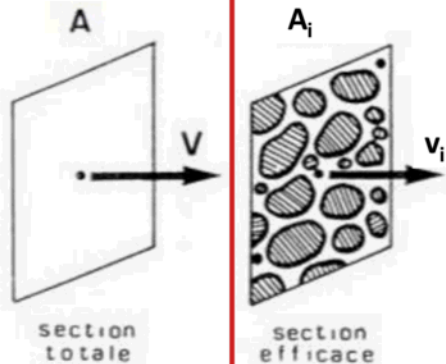
- Vitesse moyenne réelle d'écoulement

$$\bar{v}_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$$

- Section moyenne réelle d'écoulement

$$A_r = \sum_{i=1}^N A_i$$

où  $N$  = nombre de pores



# Caractérisation des sols

## Vitesse d'écoulement dans un sol saturé:

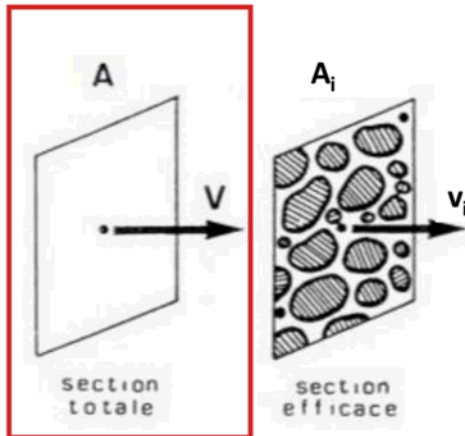
- Vitesse moyenne fictive d'écoulement (vitesse de Darcy)

$$v = \frac{Q}{A}$$

- Section moyenne fictive d'écoulement

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{v_r A_r}{A} \sim v_r \frac{S_e}{S_T} = v_r \phi$$

$$\phi = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}} = \frac{S_e + S_a}{S_t}$$

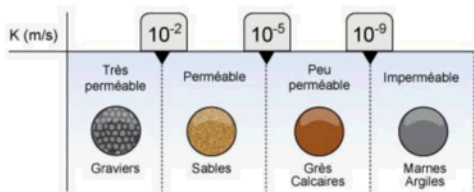


**Sol saturé si  $S_a = 0$  &  $\theta = \phi$**

# Caractérisation des sols

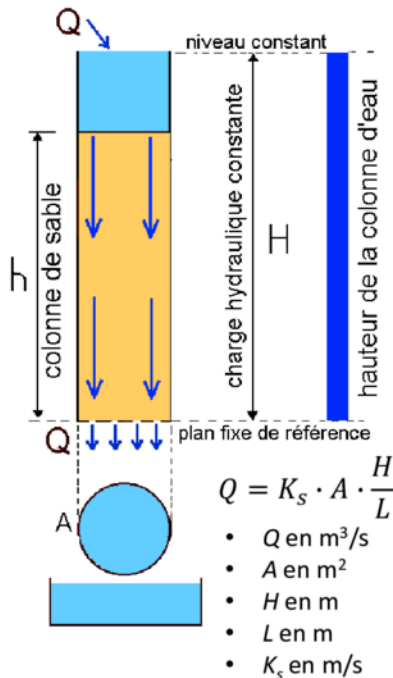
## Zone saturée: loi de Darcy

1 direction: verticale



$K_s$  = conductivité hydraulique

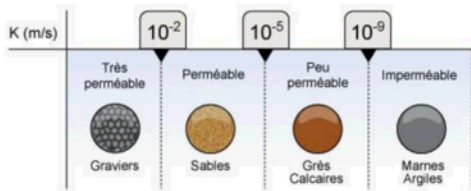
- Table livre p 109 pour  $K_s$  et  $\theta$
- Peuvent être mesurés en laboratoire ou sur le terrain (*in situ*)



# Caractérisation des sols

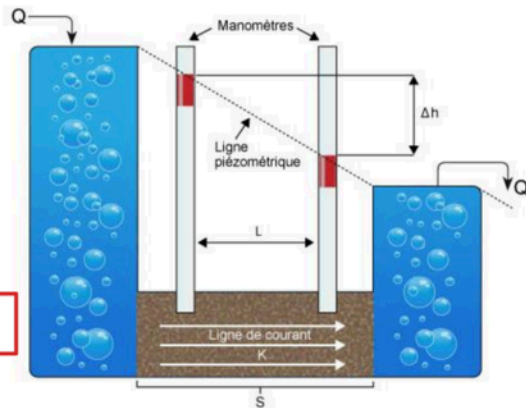
## Zone saturée: loi de Darcy

1 direction: horizontale



$K_s$  = conductivité hydraulique

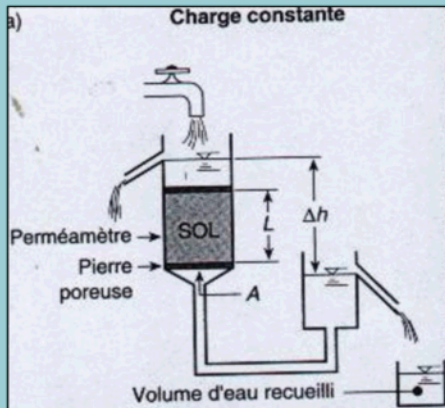
- Table livre p 109 pour  $K_s$  et  $\theta$
- Peuvent être mesurés en laboratoire ou sur le terrain (*in situ*)



$$Q = K_s \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

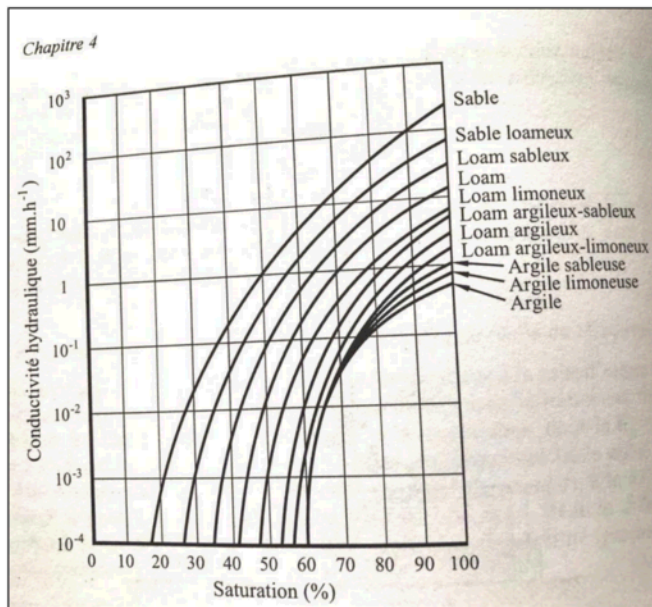
## Exemple #1: caractérisation des sols (Exemple 4.1 p. 110)

Un cylindre de sol de 7.3 cm de diamètre et de 16.8 cm de long est testé dans un œdomètre. La charge de pression est de 75 cm. Après une minute de test, on a recueilli un total de 945.7 g d'eau. La porosité du sol est de 20 %. Estimer la conductivité hydraulique de l'échantillon de sol en cm/s et calculer la vitesse réelle d'écoulement.



Réponse:  $K_s = 0.084$  cm/s et  $v_r = 1.9$  cm/s

# Cas des sols non saturés



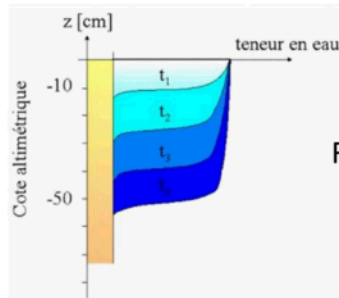
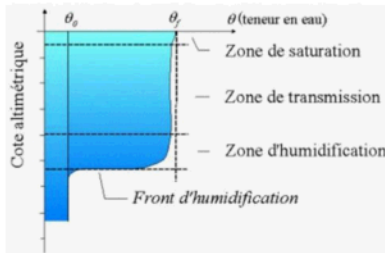
# Infiltration

Transfert de l'eau → couches superficielles de sol

- Remplissage des interstices en surface
- Pénétration par la gravité essentiellement
- Influencée par :
  - Propriété du sol
  - Végétation
  - Pente
  - Humidité du sol
  - Écoulements en zone non saturée
  - ...

# Infiltration

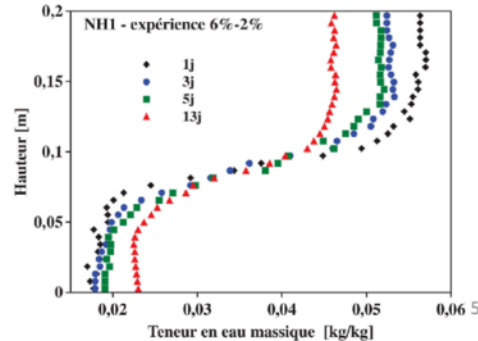
## Un système dynamique:



Front d'humidification

## Évolution temporelle:

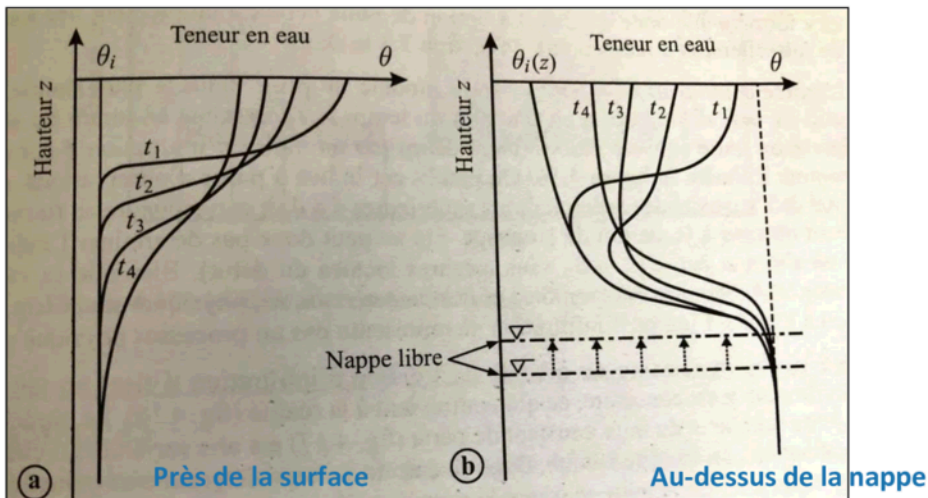
Source: [https://www.researchgate.net/figure/Profil-hydrique-dun-sol\\_fig6](https://www.researchgate.net/figure/Profil-hydrique-dun-sol_fig6)



# Infiltration

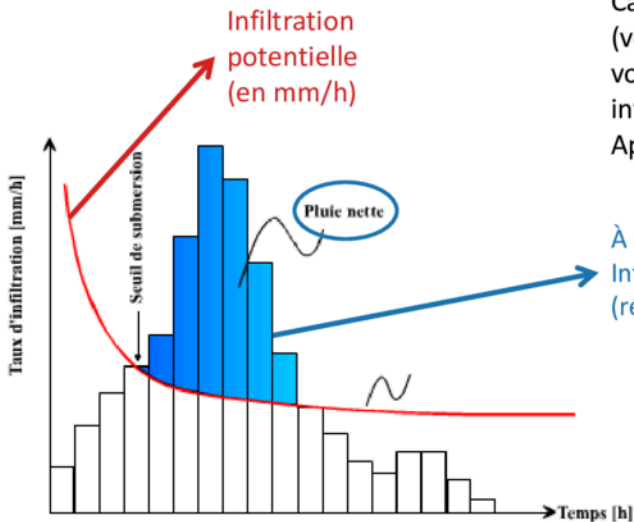
## Redistribution:

- Rééquilibrage de l'humidité dans le sol une fois l'infiltration achevée



# Infiltration

## Capacité d'infiltration:



Source : cours d'hydrologie de A. Musy, EPFL

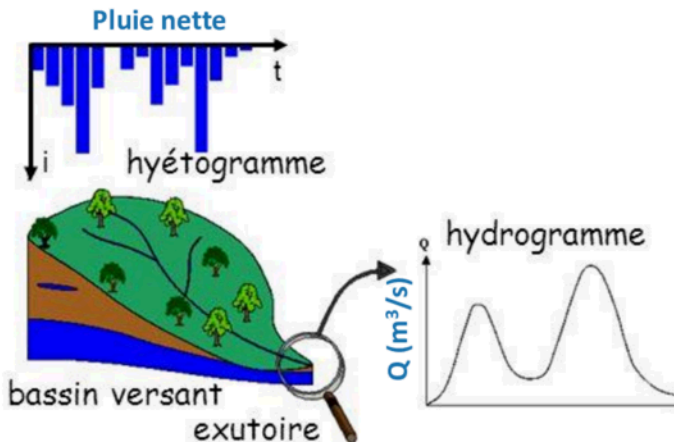
Capacité d'infiltration:  
(volume d'eau par unité de temps)  
volume d'eau maximal qui peut  
infiltrer par unité de temps.  
Appelé aussi **infiltration potentielle**

À un certain moment :  
Intensité  $i >$  capacité d'infiltration  
(régime limité par capacité)

**Pluie nette (mm) :**  
Portion de la précipitation qui  
génère du ruissellement

# Infiltration

Pluie nette, pluie brute:



# Infiltration

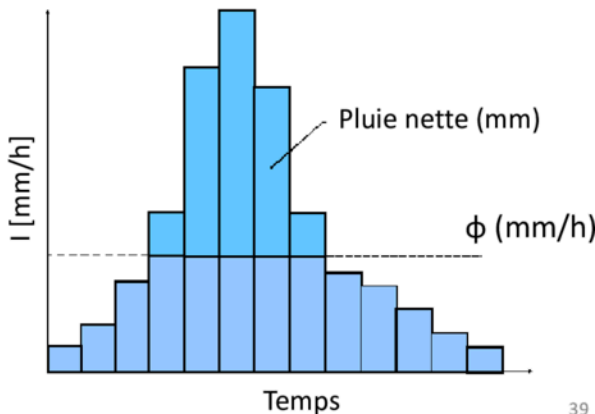
## Modélisation de l'infiltration:

Indice d'infiltration  $\phi$  (le modèle le plus simple!)

$$R = \begin{cases} \sum_i^N (i_i - \phi) \Delta t, & \text{si } i_i > \phi \\ 0, & \text{si } i_i \leq \phi \end{cases}$$

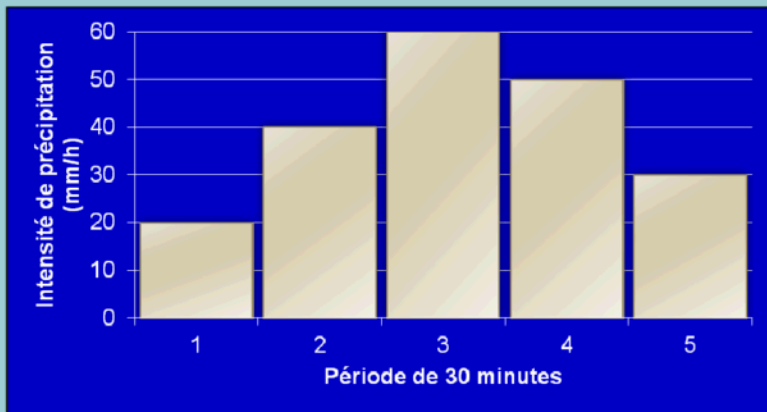
- $R$  : Volume de ruissellement total (pluie nette) (mm)
- $i_i$  : intensité de pluie au temps  $i$  (mm/h)
- $\Delta t$  : pas de temps

$\phi \rightarrow$  intensité pluviométrique à partir de laquelle toute lame précipitée participe au ruissellement.  **$\phi$  est constant!**



## Exemple #2: infiltration (indice $\phi$ )

Le ruissellement net recueilli à l'exutoire du bassin à la suite de cette pluie a été mesuré:  $R = 40$  mm. Il faut déterminer l'indice d'infiltration  $\phi$  pour ce bassin.



Réponse:  $\phi = 25$  mm/h

# Infiltration

## Modélisation de l'infiltration:

### Modèle de Horton

$$f(t) = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty})e^{-kt}$$

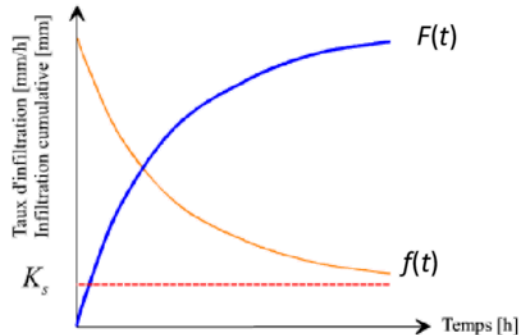
$f(t)$ : taux d'infiltration au temps  $t$  (mm/h)

$$F(t) = f_{\infty}t + \frac{(f_0 - f_{\infty})}{k}(1 - e^{-kt})$$

$F(t)$ : infiltration cumulative au temps  $t$  (mm)

### 3 paramètres:

1.  $k$  : constante empirique ( $\text{h}^{-1}$ )  
( $\beta$  dans le livre)
2.  $f_0$  : infiltration maximum au temps  $t = 0$  (mm/h) ( $h_{i0}$  dans le livre)
3.  $f_{\infty}$  : infiltration asymptotique quand  $t$  devient grand (tend vers  $K_s$ ) (mm/h)  
( $h_{ic}$  dans le livre)



# Infiltration

## Modélisation de l'infiltration:

### Modèle de Horton

$$f(t) = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty})e^{-kt}$$

$$F(t) = f_{\infty}t + \frac{(f_0 - f_{\infty})}{k}(1 - e^{-kt})$$

### Caractéristiques du sol :

- Sol humide, nappe haute :  
 $0.5 f_0$  (ou moins), jusqu'à  $f_{\infty}$
- Présence de végétation : augmentation de  $f_0$  (rappel : tend à favoriser l'infiltration)
- Sol sec :  $4 f_0$

**Paramètres d'infiltration de Horton**

Catégorie de sol	A	B	C	D
$f_0$ (mm/h)	250	200	125	75
$f_{\infty}$ (mm/h)	25	12	6	2,5
$k$ (1/h)	2 à 5	2 à 5	2 à 5	2 à 5

Texture de plus en plus fine,  
D: nappe haute

## Exemple #3: infiltration (modèle d'Horton)

Le sol d'un bassin possède les caractéristiques suivantes:

- $f_0 = 74 \text{ mm/h}$
- $f_\infty = 15 \text{ mm/h}$
- $k = 2 \text{ h}^{-1}$

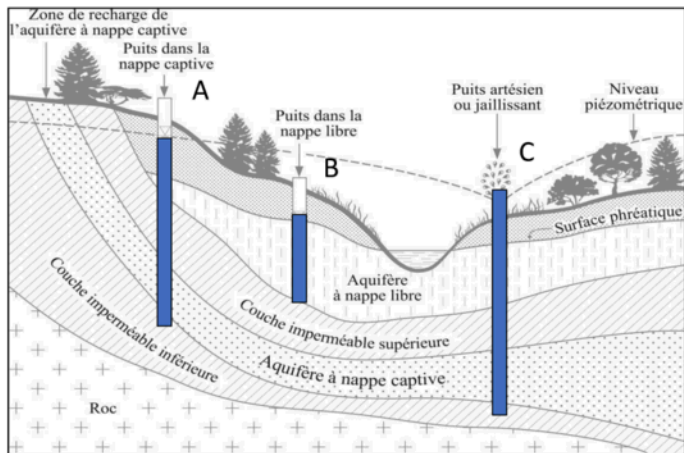
Quelle est l'infiltration cumulative potentielle de ce bassin pour une durée de 5 heures ?

**Réponse: 104.5 mm**

# Écoulements souterrains

## Les eaux souterraines:

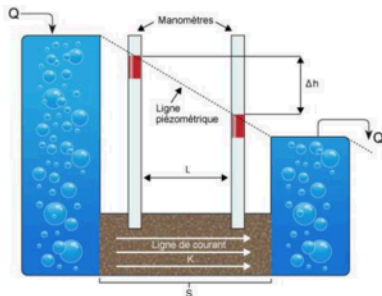
- Nappe confinée (captive): sous pression
- Nappe libre: pression atmosphérique



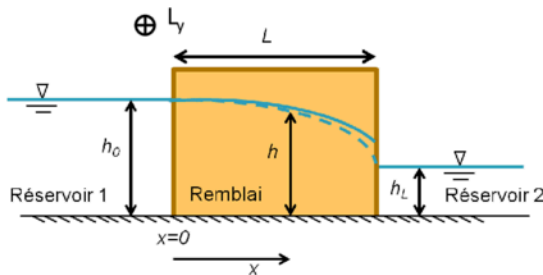
Sondage!

# Écoulements souterrains

Loi de Darcy appliquée aux écoulements souterrains  
dans deux dimensions (x, z) → nappe libre



$$Q = K_s \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L}$$



$$Q' = -K_s \cdot h \cdot \frac{dh}{dx}$$

- $Q'$ : débit dans le plan x, z  
 $Q' = Q / L_y$  en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  ou  $\text{m}^2/\text{s}$
- $h$ : charge hydraulique

# Écoulements souterrains

## Écoulement non confiné:

- Écoulement uniforme

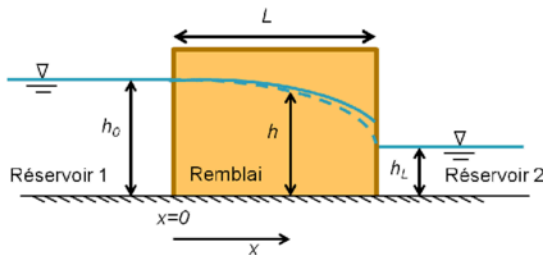
$$Q' = -K_s \cdot h \cdot \frac{dh}{dx}$$

$$\frac{dQ'}{dx} = 0$$

$$h^2 = \frac{h_L^2 - h_0^2}{L} x + h_0^2$$

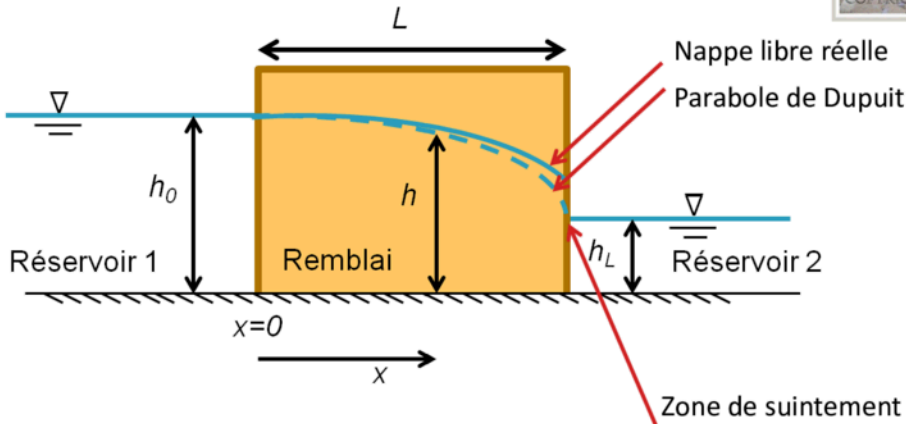
$$Q' = \frac{K_s}{2L} (h_0^2 - h_L^2)$$

Parabole de Dupuit



# Écoulements souterrains

Modèle non respecté à  $x = L - \varepsilon$



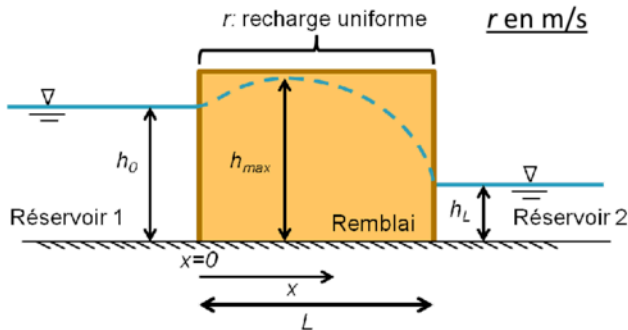
# Écoulements souterrains

## Avec recharge (infiltration)

- Écoulement non-uniforme

$$Q' = -K_s \cdot h \cdot \frac{dh}{dx}$$

$$\frac{dQ'}{dx} = r$$

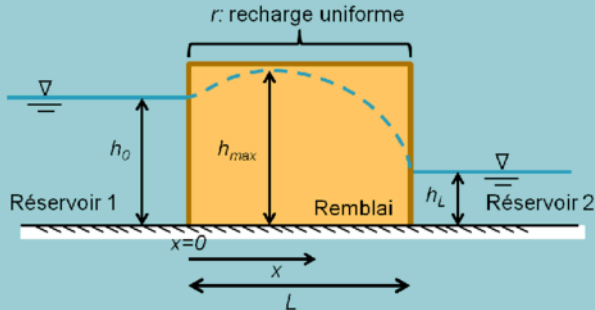


$$Q'_0 = \frac{K_s}{2L} (h_0^2 - h_L^2) - \frac{rL}{2}$$

$$Q' = r \left( x - \frac{L}{2} \right) + \frac{K_s}{2L} (h_0^2 - h_L^2)$$

## Exemple #4: écoulements souterrains (Exemple 4.6 p. 130)

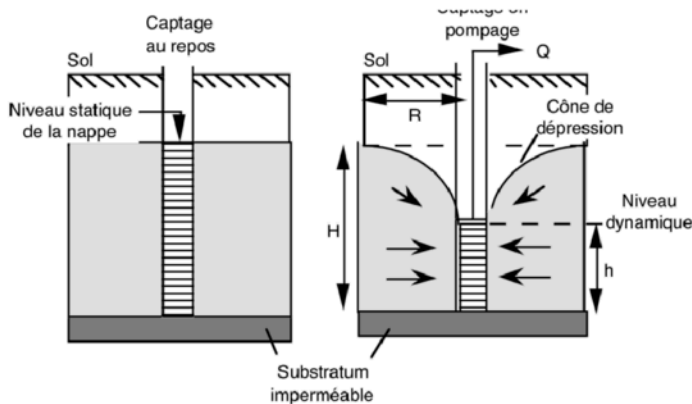
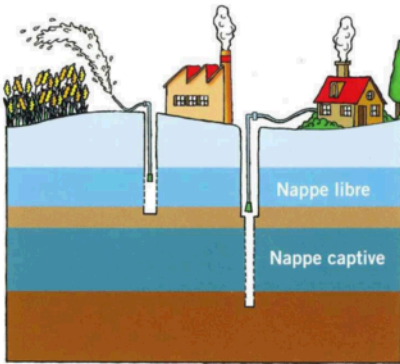
Évaluer le débit à la sortie d'un aquifère de 1 km de longueur, avec une recharge de 0.3 cm par jour. Les charges hydrauliques à l'entrée et à la sortie de l'aquifère sont respectivement de 20 m et de 13 m. On évalue la conductivité hydraulique à  $4 \times 10^{-6}$  m/s. Quelle part du débit est attribuable à la recharge de la nappe?



Réponse: 97.4%

# Écoulements souterrains

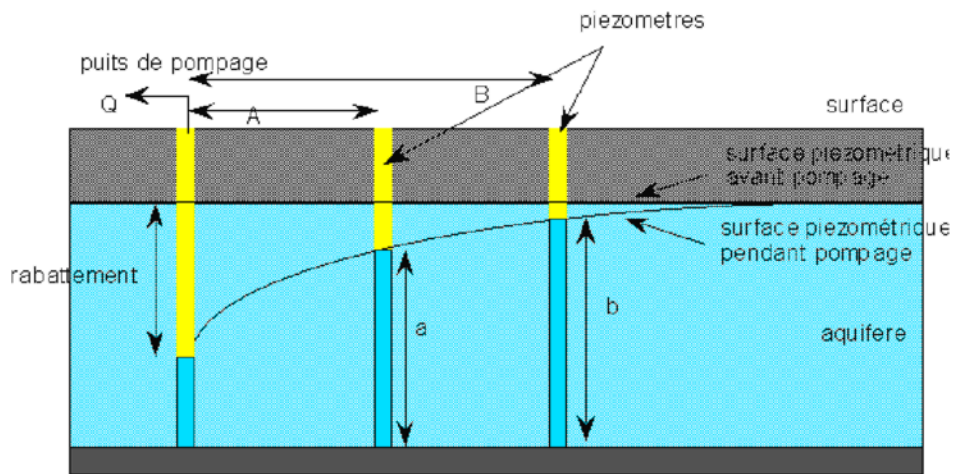
## Pompage dans la nappe libre:



Source: <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article24> & Research Gate

# Écoulements souterrains

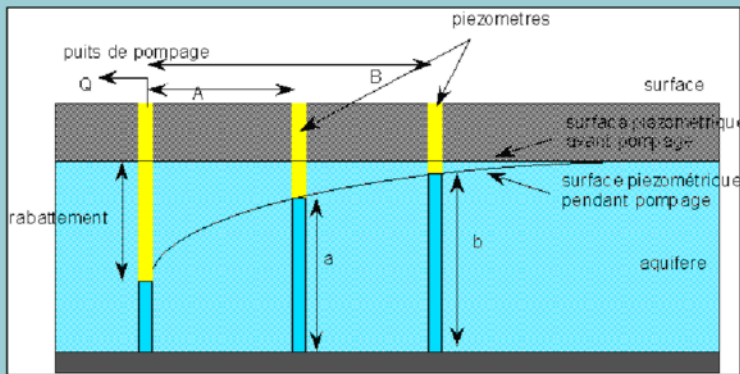
## Test de pompage, nappe libre:



$$K_s = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{\pi \cdot (h_1^2 - h_2^2)}$$

## Exemple #5: test de pompage (Exemple 4.7 p. 134)

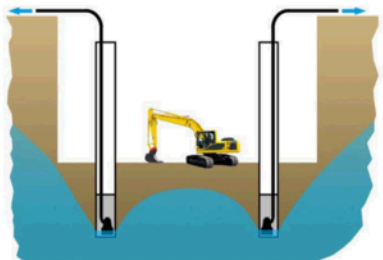
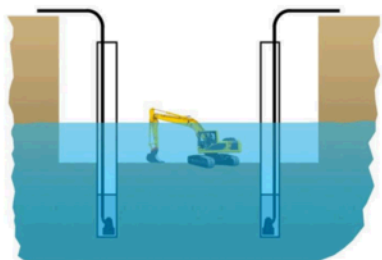
Un puits traverse entièrement un aquifère à nappe libre et on y extrait un débit de 5 litres par seconde, ou  $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le niveau de l'eau avant pompage était de 11 mètres. Après une longue période de pompage, le niveau de l'eau est de 6 mètres dans un piézomètre situé à 25 mètres du puits, et de 10 mètres dans un second piézomètre situé à 600 mètres du puits. Déterminer la conductivité hydraulique de l'aquifère.



Réponse:  $K_s = 7.9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

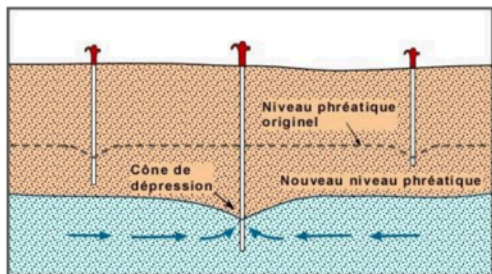
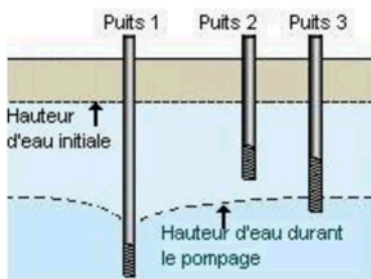
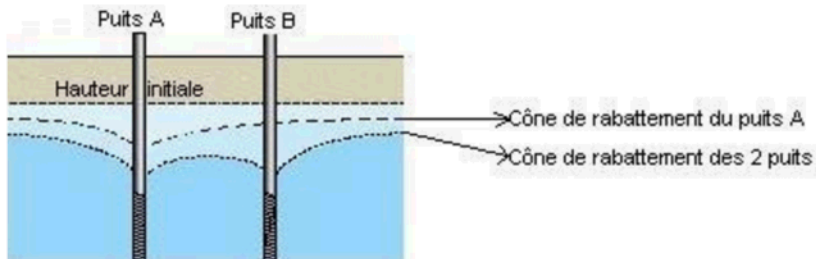
# Écoulements souterrains

Rabatement de la nappe:



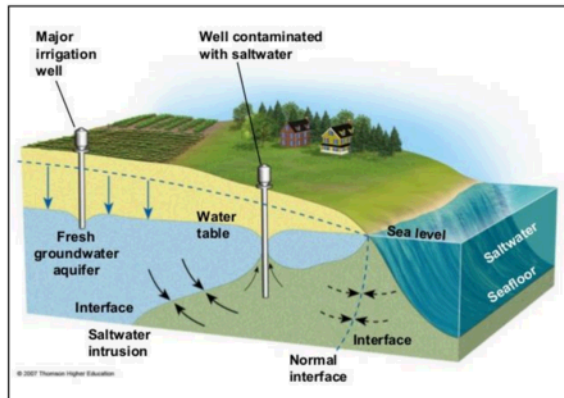
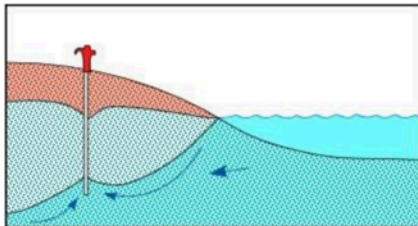
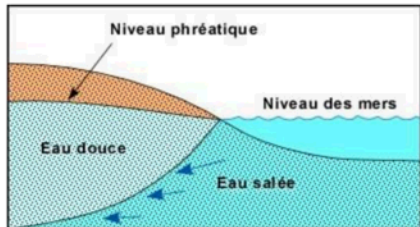
# Écoulements souterrains

## Interférences entre puits:



# Écoulements souterrains

## Bord de mer:

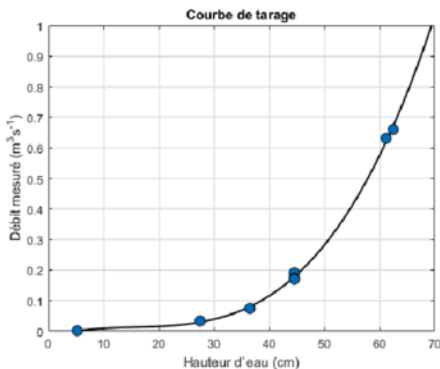


Source: ulaval.qc

# Mesure des débits des cours d'eau

## Courbe de tarage:

« Pour une section d'un cours d'eau, la courbe de tarage donne la relation entre la hauteur ou niveau d'eau et le débit. Elle permet de ramener la mesure du débit à celle de la hauteur. »



<https://youtu.be/D5Jei0Aki70>

# Exercices à faire au TP

## Exercices à faire au TP #3:

- Problèmes supplémentaires
- Chapitre 3: p. 94 et 95: 17
- Chapitre 4: p. 150: 16

## À faire à la maison:

- Lecture du chapitre 3 (restant)
- Lecture du chapitre 4 au complet
- **Autant d'exercices que nécessaire** pour bien maîtriser la matière!
- Voir la liste des problèmes suggérés!

