

## MODULE M3101 - BASES DE LA GÉOTECHNIQUE

### Cours 1 - Introduction générale et action de l'eau dans les sols

# La géotechnique dans les textes, dans le projet de construction et dans votre cursus

## LA GÉOTECHNIQUE SELON LA NORME NF P94-500 (NOVEMBRE 2013)

La géotechnique est l'ensemble des activités liées aux applications de :

- la mécanique des sols,
- la mécanique des roches,
- la géologie de l'ingénieur.

Elle englobe l'étude des propriétés géotechniques des sols et de l'interaction entre :

- l'ouvrage objet de la prestation (du fait de sa réalisation et/ou de son exploitation), et
- les terrains et les ouvrages environnants.

## LA GÉOTECHNIQUE SELON LE DICTIONNAIRE PROFESSIONNEL DU BTP

La géotechnique est l'étude des propriétés physiques et mécaniques des sols et des roches soumis aux actions des constructions.

# Les spécificités de l'approche géotechnique

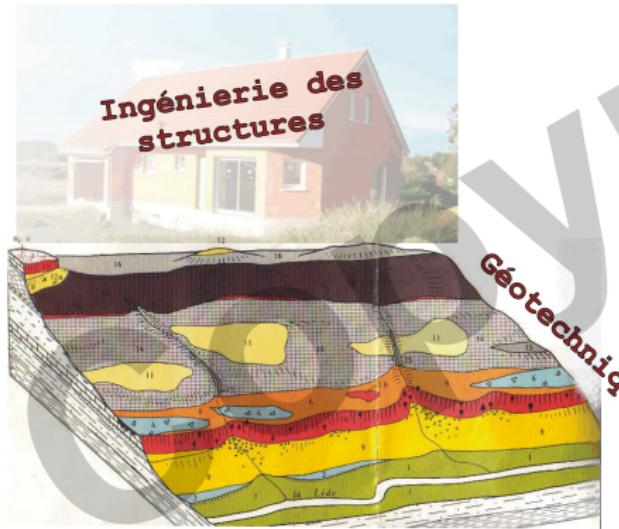
## Le projet de construction



COPYRIGHT

# Les spécificités de l'approche géotechnique

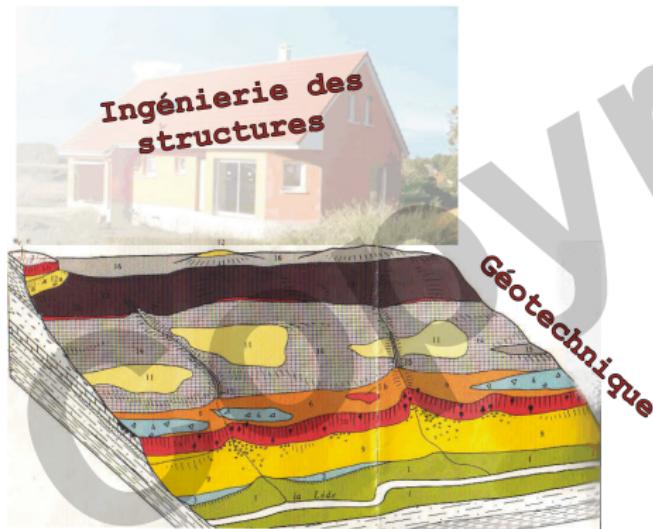
## Le projet de construction



Objectif : déterminer le comportement  
du sol **à toutes les phases du projet.**

# Les spécificités de l'approche géotechnique

## Le projet de construction

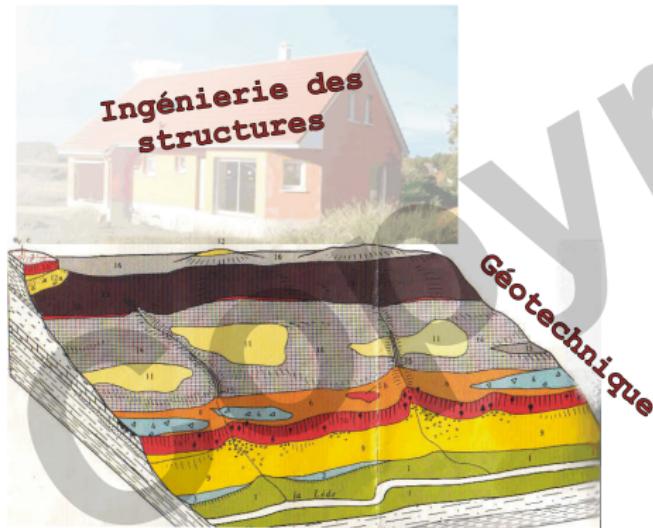


Objectif : déterminer le comportement du sol **à toutes les phases du projet.**

- ① Sol : matériau naturel.
  - caractéristiques très variables (taille des grains de  $1\mu\text{m}$  à 1m).
  - jugement sur l'aspect superficiel du sol insuffisant.
- ② Reconnaissance partielle du site.
  - volume de sol *reconnu* très inférieur au volume de sol *concerné* par le projet.
- ③ Chaque ouvrage est unique.
  - nécessité d'*adapter* les investigations géotechniques au projet.

# Les spécificités de l'approche géotechnique

## Le projet de construction

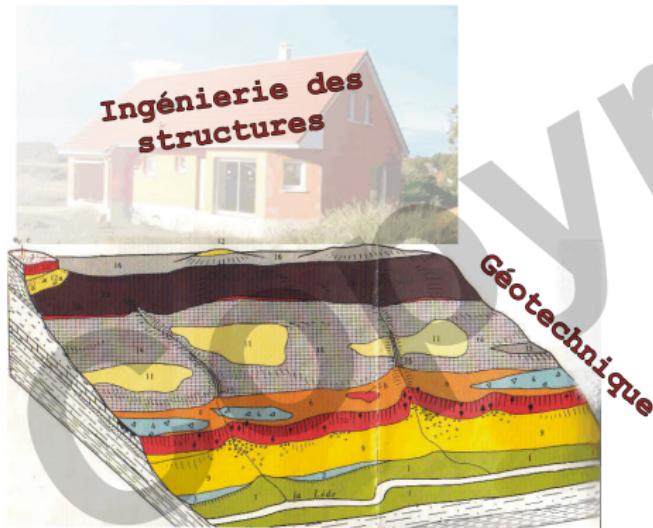


Objectif : déterminer le comportement du sol **à toutes les phases du projet**.

- ① Sol : matériau naturel.
  - caractéristiques très variables (taille des grains de  $1\mu\text{m}$  à 1m).
  - jugement sur l'aspect superficiel du sol insuffisant.
- ② Reconnaissance partielle du site.
  - volume de sol *reconnu* très inférieur au volume de sol *concerné* par le projet.
- ③ Chaque ouvrage est unique.
  - nécessité d'*adapter* les investigations géotechniques au projet.

# Les spécificités de l'approche géotechnique

## Le projet de construction



Objectif : déterminer le comportement du sol **à toutes les phases du projet**.

- ① Sol : matériau naturel.
  - caractéristiques très variables (taille des grains de  $1\mu\text{m}$  à 1m).
  - jugement sur l'aspect superficiel du sol insuffisant.
- ② Reconnaissance partielle du site.
  - volume de sol *reconnu* très inférieur au volume de sol *concerné* par le projet.
- ③ Chaque ouvrage est unique.
  - nécessité d'*adapter* les investigations géotechniques au projet.

# Les spécificités de l'approche géotechnique

L'erreur peut être très coûteuse en personnes et en biens !

Tour de Pise :



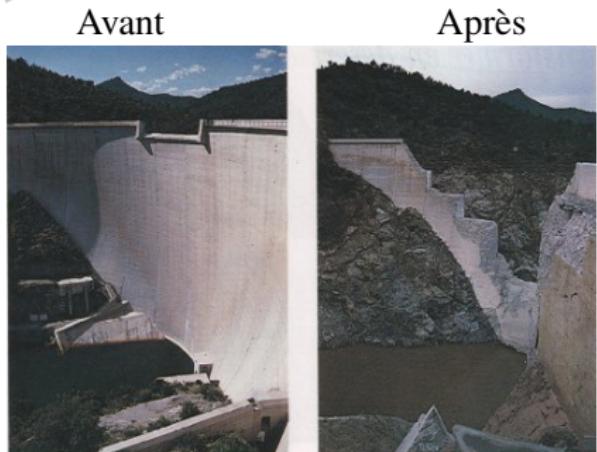
Eboulement de la colline de Fourvière (1930)  
40 victimes



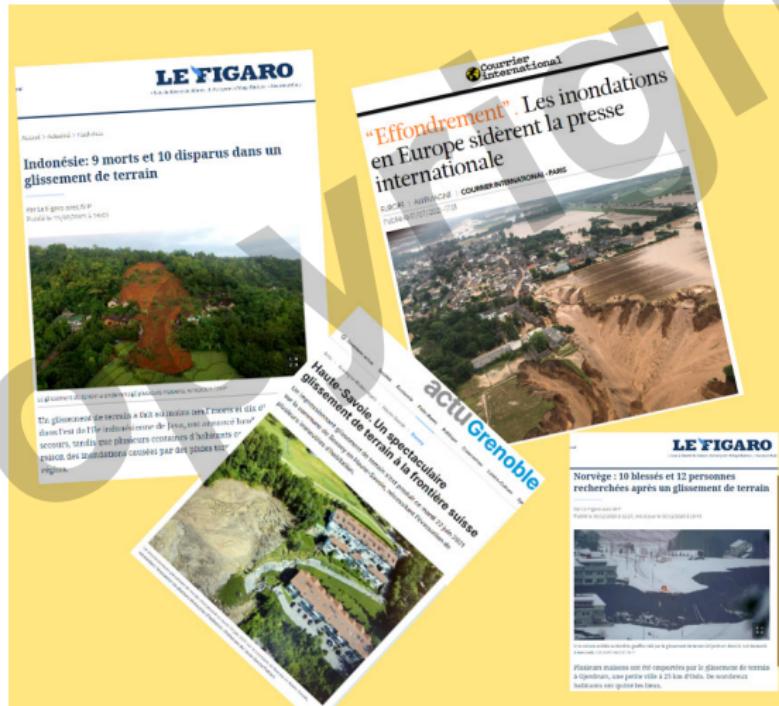
Plus fréquemment :



Rupture du barrage de Malpasset (2 décembre 1959)  
500 victimes environ



# Les spécificités de l'approche géotechnique



# Les moyens de la géotechnique

- ① La documentation géologique
- ② L'observation des ouvrages existants
- ③ Le prélèvement et l'analyse des sols en laboratoire
- ④ La reconnaissance in situ
- ⑤ La modélisation (physique ou mathématique)

# Les missions d'ingénierie géotechnique (1/6)

A chaque phase du projet, sa mission géotechnique (NF P 94-500, **novembre 2013**)

Objectif : **Maîtrise des risques géotechniques**

Définition d'un enchaînement de **5 missions d'ingénierie géotechnique** :

- Mission **G1** : Etude géotechnique préalable
- Mission **G2** : Etude géotechnique de conception
- Mission **G3** : Etude et suivi géotechnique d'exécution
- Mission **G4** : Supervision géotechnique d'exécution
- Mission **G5** : Diagnostic géotechnique

**en adéquation avec les phases de la maîtrise d'œuvre générale (loi MOP)**

Rappel : La loi MOP définit la Maîtrise d'Ouvrage Publique et ses relations avec la maîtrise d'œuvre privée

# Les missions d'ingénierie géotechnique (2/6)

A chaque phase du projet, sa mission géotechnique (NF P 94-500, **novembre 2013**)

## Phase ETUDE

Loi MOP		ESQ	APS	APD	PRO	DCE	ACT
Missions géotechniques	G1 (ES)	G1 (PGC)		G2 (AVP)	G2 (PRO)	G2 (DCE/ACT)	
	Risques MAJEURS			Risques IMPORTANTS			
Diagnostic							G5

## Phase TRAVAUX

Loi MOP	EXE / VISA	DET / AOR
Missions géotechniques	G3 (à la charge de l'entreprise) + G4 (à la charge du maître d'ouvrage)	
	Risques MINEURS	
Diagnostic	G5	

# Les missions d'ingénierie géotechnique (3/6)

A chaque phase du projet, sa mission géotechnique (NF P 94-500, **novembre 2013**)

## ETUDE GÉOTECHNIQUE PRÉALABLE (G1)

- **PHASE ETUDE DE SITE (ES)**

Etablir le modèle géologique préalable par une enquête documentaire + visite de site.

Si besoin, définir le programme d'investigations géotechniques complémentaire.

- **PHASE PRINCIPES GÉNÉRAUX DE CONSTRUCTION (PGC)**

Définir (ou confirmer) le programme d'investigations géotechniques.

Suivre et contrôler l'exécution des investigations (adapter, interpréter)

Etudier l'adaptation au site de l'ouvrage (implantation préférentielle, fondations envisageables, définition de la zone d'influence géotechnique (ZIG), ...)

# Les missions d'ingénierie géotechnique (4/6)

A chaque phase du projet, sa mission géotechnique (NF P 94-500, novembre 2013)

## ETUDE GÉOTECHNIQUE DE CONCEPTION (G2)

- **PHASE AVANT PROJET (AVP)**

Etudier les solutions envisageables (ébauche dimensionnelle, principes de construction et première approche des quantités)

- **PHASE PROJET (PRO)**

Déterminer les caractéristiques géotechniques

Etablir les notes techniques sur les choix constructifs (dossier *complet* de définition des ouvrages) et donner les principes de maintenance des ouvrages

- **PHASE DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES ET ASSISTANCE AU MAÎTRE D'OUVRAGE POUR LA PASSATION DES CONTRATS DE TRAVAUX (DCE/ACT)**

Rédiger les notes techniques nécessaires à la consultation des entreprises

Analyser les offres (et variantes) des entreprises (prix, hypothèses, exécution, dimensionnement, ... )

# Les missions d'ingénierie géotechnique (5/6)

A chaque phase du projet, sa mission géotechnique (NF P 94-500, novembre 2013)

## ETUDE ET SUIVI GÉOTECHNIQUE D'EXÉCUTION (G3)

à la charge de l'entreprise

- **ETUDE** : Analyser, dans le détail, la conception des ouvrages géotechniques  
A faire en amont des travaux et s'achève après avis de ceux en charge de la mission G4
- **SUIVI** : Vérifier la conformité et constituer le dossier des ouvrages nécessaires à leur exploitation

## SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXÉCUTION (G4)

à la charge du maître d'ouvrage

- **ETUDE** : S'assurer de la conformité avec les objectifs du projet + Avis sur la pertinence des hypothèses (dimensionnement, caractéristiques employées, ...)
- **SUIVI** : Intervenir *ponctuellement* sur le chantier pour vérifier les similitudes entre comportement prévu et comportement observé + Avis sur DOE et DIUO

# Les missions d'ingénierie géotechnique (6/6)

A chaque phase du projet, sa mission géotechnique (NF P 94-500, **novembre 2013**)

## **DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE (G5)**

Etude d'éléments géotechniques spécifiques.

Réalisable à tous les stades d'avancement d'un projet ou pour un ouvrage existant, avec ou sans désordre

Si désordres, identifier les causes et proposer des mesures de stabilisation ou de réparation.

# La géotechnique dans votre cursus

## PRÉREQUIS (À SAVOIR, À RÉVISER, À TRAVAILLER, À CONNAÎTRE, À MAÎTRISER)

Connaissance  
des matériaux

**M1103**

Matériaux  
granulaires

**M1104**

Contraintes dans  
les structures

**M1302**

Hydraulique

**M1304**

## BASES DE LA GÉOTECHNIQUE

**M3101 - S3**

## APPLICATIONS À L'IUT

Les fondations des  
ouvrages

Les ouvrages de  
soutènement

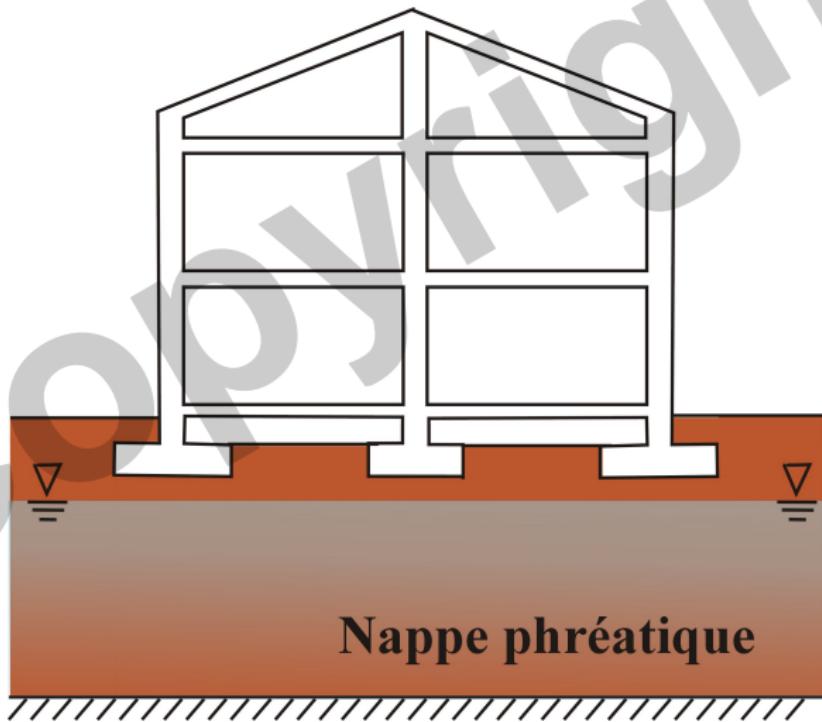
**M3102 - S3**

Hydraulique souterraine  
Lois de comportement des sols  
Stabilité des ouvrages (pentes, rideaux de  
palplanches, ...)

**Certains groupes de S4**

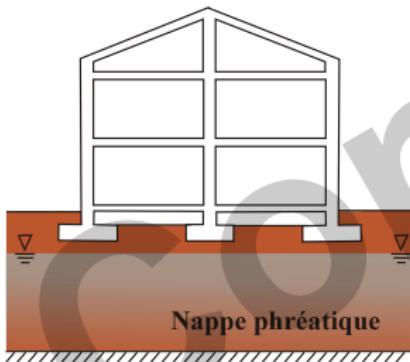
# Contenu de ce module (1/6)

Exemple - fil conducteur du cours



# Contenu de ce module (2/6)

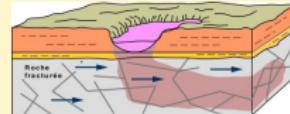
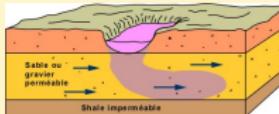
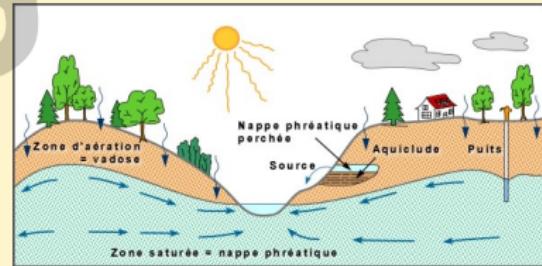
Exemple - fil conducteur du cours



## NAPPE PHRÉATIQUE

**Ce n'est pas un lac souterrain !  
C'est une zone SATURÉE**

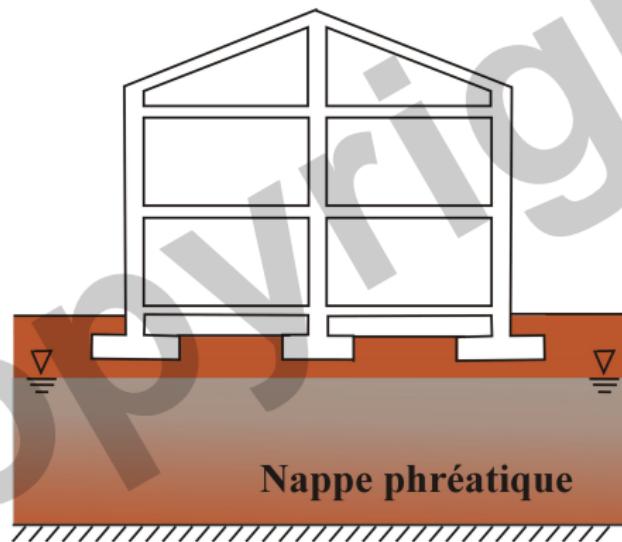
Ensemble des eaux comprises dans un milieu granulaire saturé ou dans une roche fissurée (ou fracturée) saturée.



Images issues de <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/eaux.souterraines.html>

# Contenu de ce module (3/6)

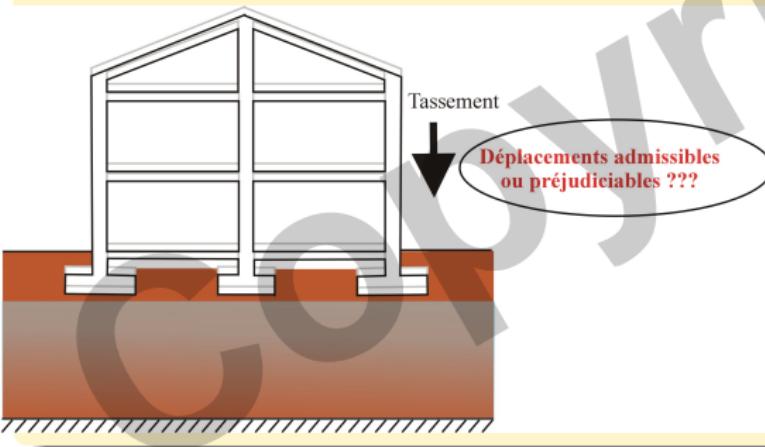
Exemple - fil conducteur du cours



# Contenu de ce module (3/6)

Exemple - fil conducteur du cours

## Comprendre et quantifier les DÉPLACEMENTS



- Pourquoi ?
- De combien ?
- En combien de temps ?

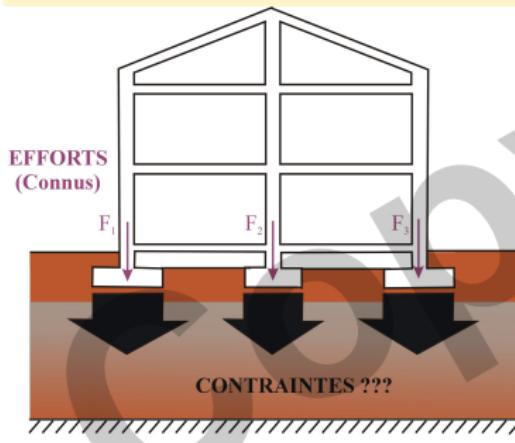
Cours 2 ➔ Origine des déplacements et un moyen expérimental de les estimer

Cours 4 ➔ Calcul des déplacements et méthodes pour les accélérer

# Contenu de ce module (4/6)

Exemple - fil conducteur du cours

## Comprendre et quantifier les CONTRAINTES



- **Contraintes avant la construction ?**
- **Contraintes après la construction ?**
- **Qui reprend les charges ? les grains ? l'eau ? les deux ?**

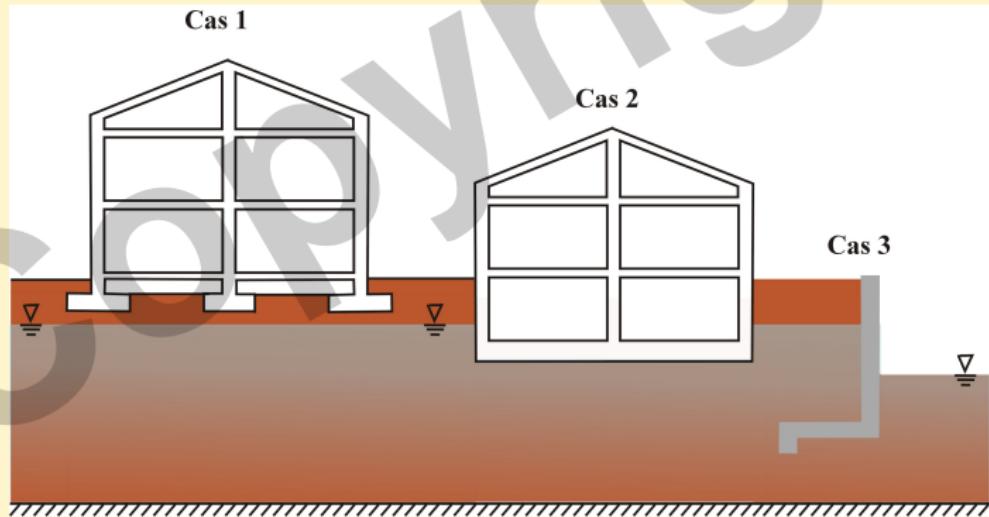
Cours 3 ➔ Contraintes dans les sols, notions de contraintes totales et effectives  
Cours 3 ➔ Calcul des accroissements de contraintes dus aux ouvrages

# Contenu de ce module (5/6)

## Exemple - fil conducteur du cours

Suite du cours 1 ➔ Comportement et action de l'eau dans les sols

### Comprendre et quantifier les effets de l'EAU

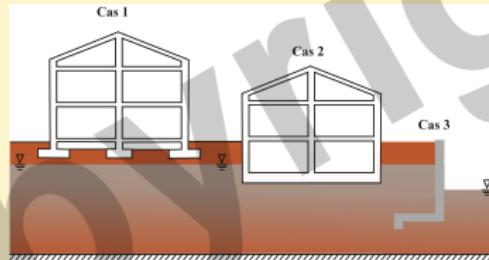


➔ Eau = élément central (et souvent perturbateur !) de la mécanique des sols

# Contenu de ce module (6/6)

Exemple - fil conducteur du cours

## Problèmes spécifiques à la présence d'EAU

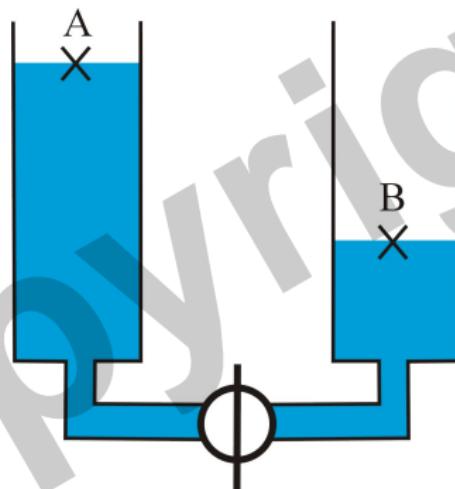


- Gestion des écoulements
  - Rabattement de nappe ?
  - Infiltrations ou dispositifs d'étanchéité ?
- Stabilité mécanique des ouvrages
  - Mise en charge des parois (risque de basculement, glissement, ...)
  - Développement de sous-pressions sous les fondations
- Conception et entretien de dispositifs de drainage

## Comportement et action de l'eau dans les sols

- ① Charges hydrauliques et pressions interstitielles
- ② Ecoulement de l'eau dans les sols
- ③ Mesures du coefficient de perméabilité

# Rappels d'hydraulique générale

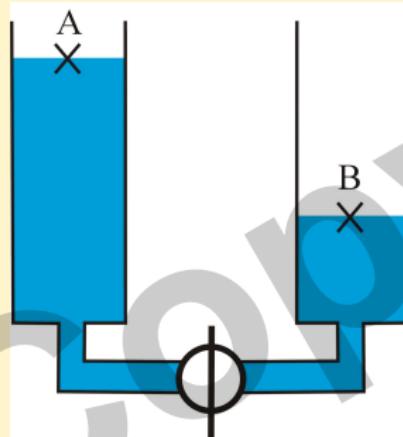


Robinet fermé

Que se passe-t-il si l'on ouvre le robinet ? Pourquoi ?

# Rappels d'hydraulique générale

## Robinet fermé

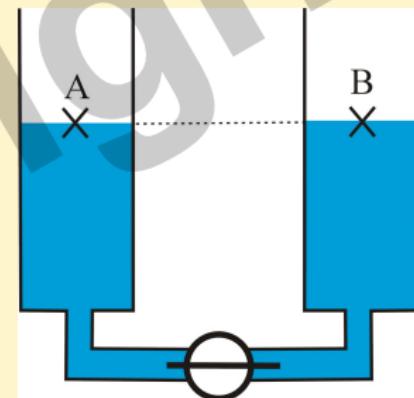


Robinet fermé

$h_A > h_B$  : déséquilibre de **charges** entre 2 points

(Même pression :  $p_A = p_B$ )

## Robinet ouvert

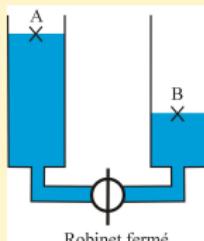


Robinet ouvert

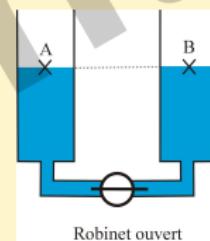
Ecoulement de A vers B (**du point où la charge hydraulique est la plus grande vers le point où elle est plus faible**) jusqu'à l'équilibre des charges

# Rappels d'hydraulique générale

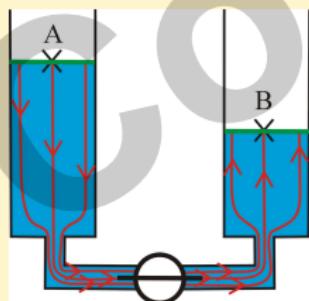
## Robinet fermé



## Robinet ouvert



## Etat intermédiaire



**Ligne de courant** : courbe tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse

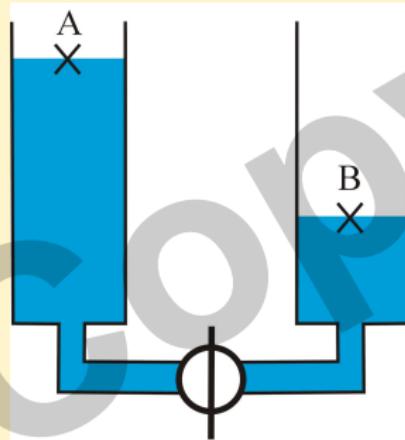
➡ se confond avec la **trajectoire** d'une particule fluide en **régime permanent**.

**Equipotentielle** : courbe d'égale charge hydraulique

Les lignes de courant sont orthogonales aux équipotentielles.

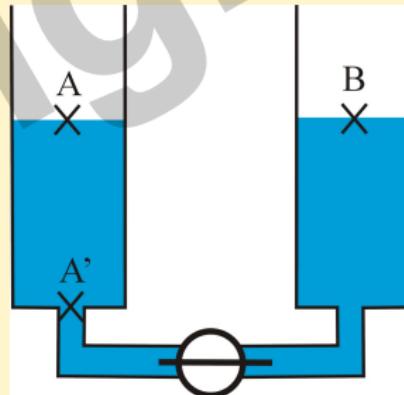
# Rappels d'hydraulique générale

Robinet fermé



Robinet fermé

Robinet ouvert



Robinet ouvert

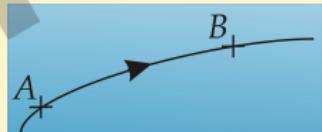
Que vaut la charge hydraulique en A' ?  
Pourquoi ?

# Rappels d'hydraulique générale

## LE THÉORÈME DE BERNOULLI

Hypothèses :

- ① Pour un écoulement permanent,
- ② de fluide parfait (incompressible et non visqueux),
- ③ où les seules forces motrices sont les forces de pesanteur,



Le long d'une ligne de courant ➔ Conservation de la **charge hydraulique (m)** :

$$\underbrace{\frac{1}{2} \frac{v^2}{g}}_{\text{charge cinétique}} + \underbrace{\frac{p}{\rho g}}_{\text{charge de pression}} + \underbrace{z}_{\text{charge de position}} = \underbrace{H}_{\text{la charge totale}} = \text{constante}$$

$\rho$ , la masse volumique du fluide (en  $\text{kg/m}^3$ ),

$v$ , la vitesse du fluide au point considéré (en  $\text{ms}^{-1}$ ),

$p$ , la pression au point considéré (en Pa),

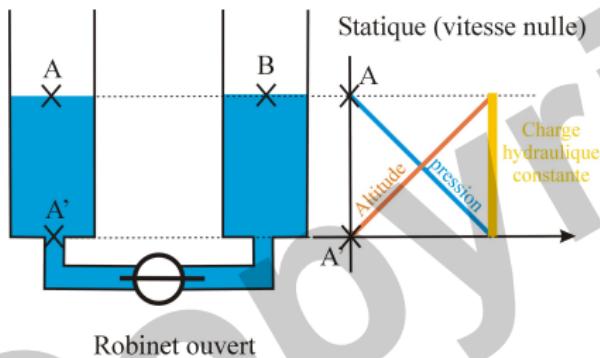
$g$ , l'accélération de la pesanteur ( $g=9,81\text{ms}^{-2}$ )

$z$ , la cote du point considéré dans le référentiel *choisi* (en m).

# Rappels d'hydraulique générale

Théorème de Bernoulli - Retour sur le terme d'énergie (ou charge) de pression

$$\frac{P}{\rho g}$$



Robinet ouvert

Utilisation des **pressions**  
en échelle relative

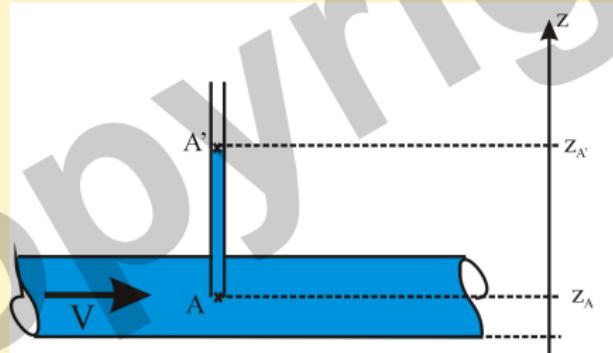
- Conservation de la charge hydraulique :  $h_A = h_{A'}$
- **Dans un fluide incompressible, homogène et au repos, la pression varie linéairement avec la profondeur (et croît de haut en bas !)**
- La pression en un point d'un fluide au repos dépend de la **masse volumique du fluide** et de la **profondeur du point considéré**. Elle ne dépend pas du volume de liquide.

# Rappels d'hydraulique générale

Théorème de Bernoulli - Retour sur le terme d'énergie (ou charge) de pression

$$\frac{p}{\rho g}$$

## Un moyen de mesure de la pression : le tube piézométrique



$$p_A = \rho g (z_{A'} - z_A)$$

car  $V_A = V_{A'} = 0$  m/s (**vitesse du fluide nulle dans le tube**) et  $p_{A'} = 0$  kPa (échelle relative)

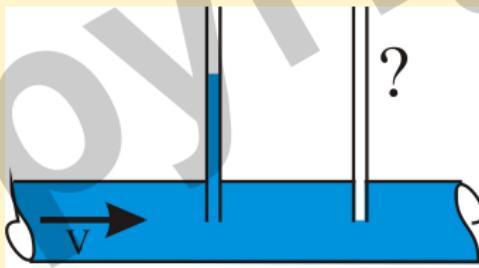
Une autre illustration (en anglais) : [http://youtube.com/watch?v=\\_VDVi\\_zq3nk](http://youtube.com/watch?v=_VDVi_zq3nk)

# Rappels d'hydraulique générale

Théorème de Bernoulli - Retour sur le terme d'énergie (ou charge) de pression

$$\frac{p}{\rho g}$$

## Un moyen de mesure de la pression : le tube piézométrique



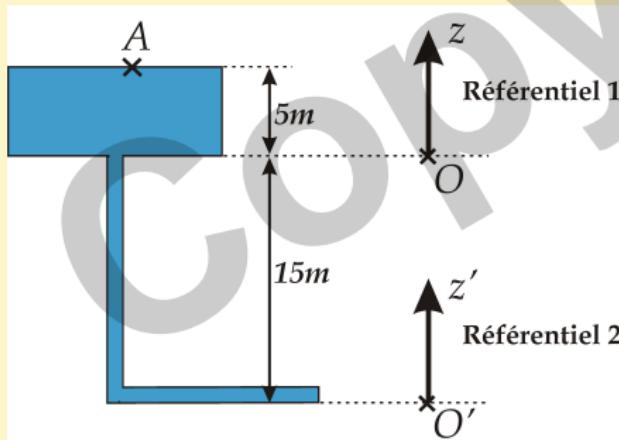
Que va-t-il se passer si l'on dispose un autre tube piézométrique plus loin dans l'écoulement ?

# Rappels d'hydraulique générale

Théorème de Bernoulli - Retour sur le terme d'énergie (ou charge) de position  $z$

La charge hydraulique dépend du référentiel choisi pour le calcul de  $z$  !

## EXEMPLE : CALCUL DE LA CHARGE HYDRAULIQUE À LA SURFACE LIBRE D'UN FLUIDE AU REPOS



Calcul de  $h_A$  dans le référentiel 1 :

$$h_A =$$

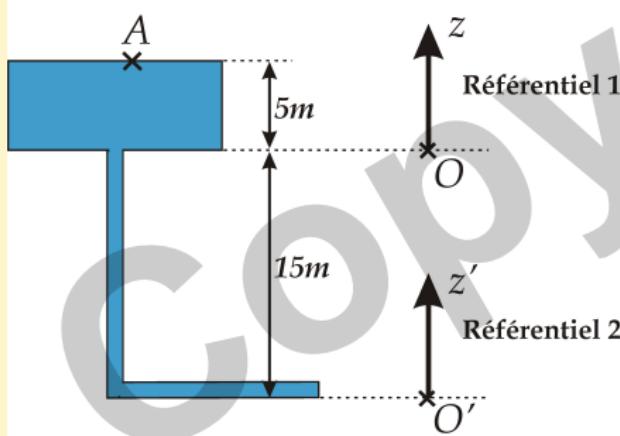
Calcul de  $h_A$  dans le référentiel 2 :

$$h_A =$$

# Rappels d'hydraulique générale

Théorème de Bernoulli - Retour sur le terme d'énergie (ou charge) de position  $z$

## EXEMPLE : CALCUL DE LA CHARGE HYDRAULIQUE À LA SURFACE LIBRE D'UN FLUIDE AU REPOS



En A règne la pression atmosphérique  
La pression relative en A est donc nulle.

Calcul de  $h_A$  dans le référentiel 1 :

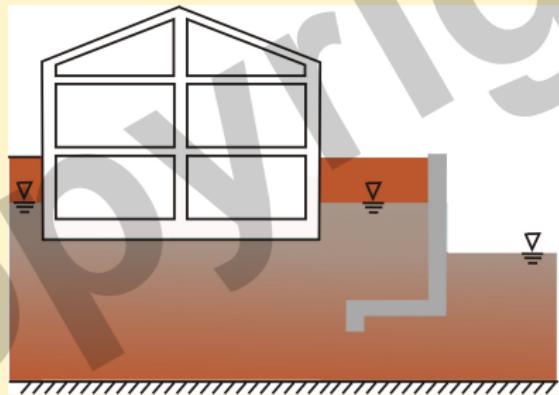
$$h_A = 5\text{m}$$

Calcul de  $h_A$  dans le référentiel 2 :

$$h_A = 20\text{m}$$

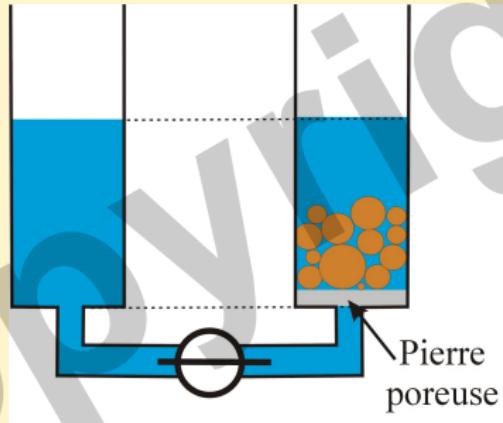
- La charge hydraulique est définie à une constante près.  
Mais la *différence de charge entre deux points* ne dépend pas du référentiel choisi.
- En règle générale, on choisit comme origine du référentiel le point le plus bas.

## ET SI ON AJOUTE UN SOL ? ? ?



Et si on ajoute un sol ???

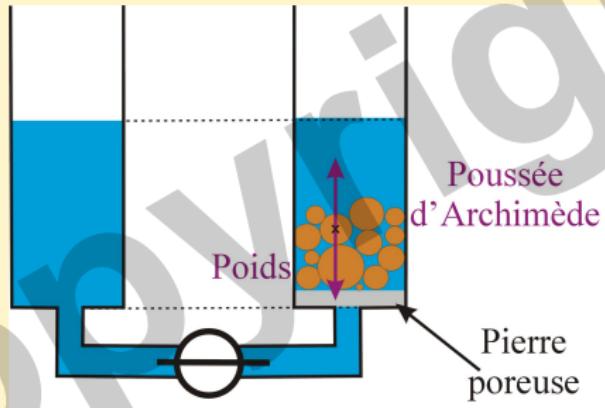
## DANS UNE NAPPE STATIQUE



Forces exercées sur les grains ?

# Et si on ajoute un sol ???

## DANS UNE NAPPE STATIQUE

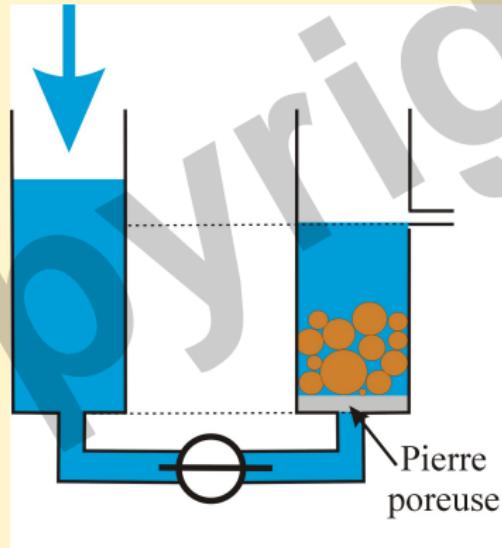


Forces exercées sur les grains :

- **Poids propre**
- **Poussée d'Archimède** : la résultante des forces de pression sur un corps immergé dans un fluide au repos est une poussée verticale, dirigée de bas en haut et égale au poids du volume de fluide déplacé par ce corps immergé.

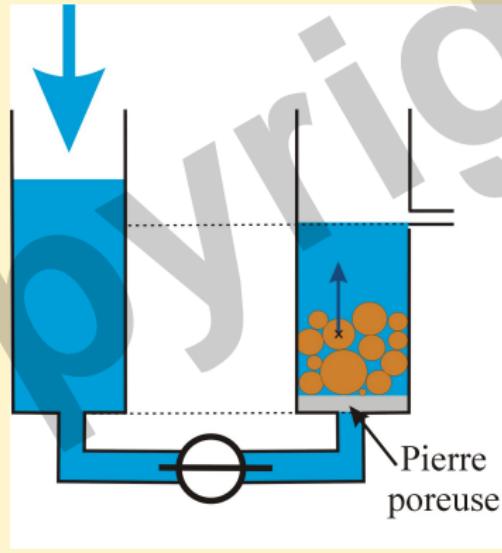
Et si on ajoute un sol ???

### DANS UNE NAPPE EN ÉCOULEMENT



# Et si on ajoute un sol ???

## DANS UNE NAPPE EN ÉCOULEMENT ASCENDANT



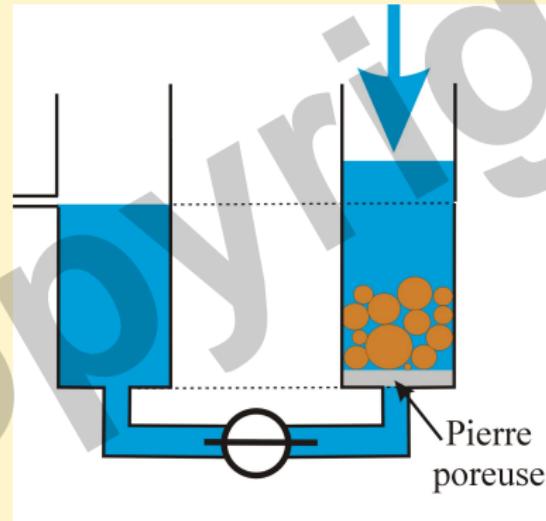
### Risque d'entraînement des grains

si les forces d'écoulement sont supérieures au poids déjaugé des grains.

(si  $F_{\text{écoulement}} > \text{Poids propre} - \text{Poussée d'Archimède}$ )

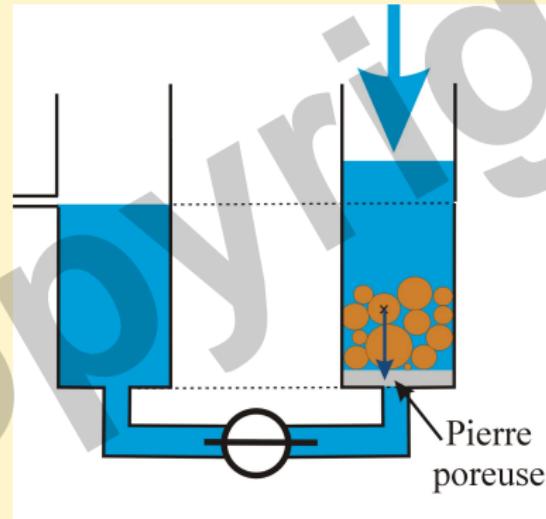
Et si on ajoute un sol ???

### DANS UNE NAPPE EN ÉCOULEMENT



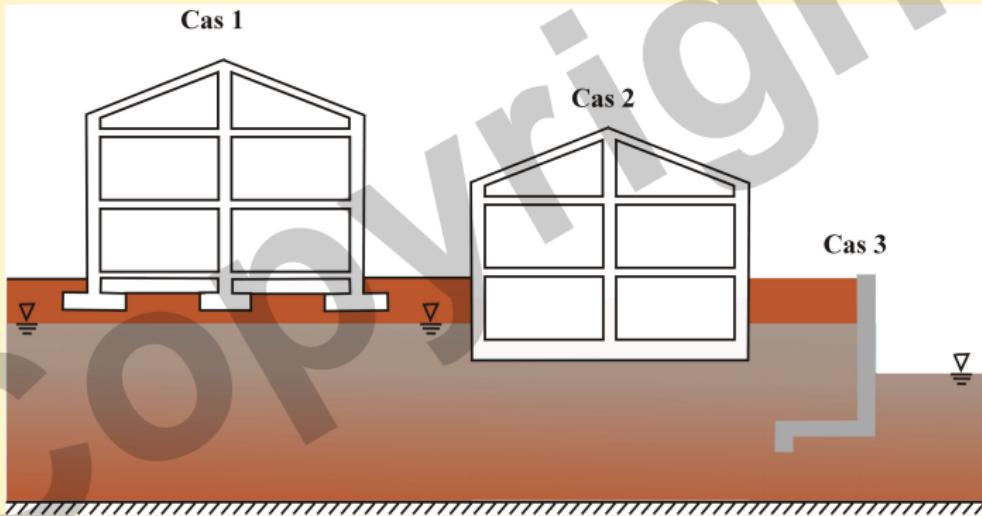
# Et si on ajoute un sol ???

DANS UNE NAPPE EN ÉCOULEMENT DESCENDANT



Risque de **tassement**

# Et si on ajoute un sol ???



- ➔ Besoin d'une connaissance précise du contexte hydraulique
- ➔ Instrumentation adaptée

# Etude hydrogéologique

Besoin d'informations sur :

**① la nature des terrains**

- ➡ localisation des niveaux aquifères

**② les mécanismes d'écoulement des eaux**

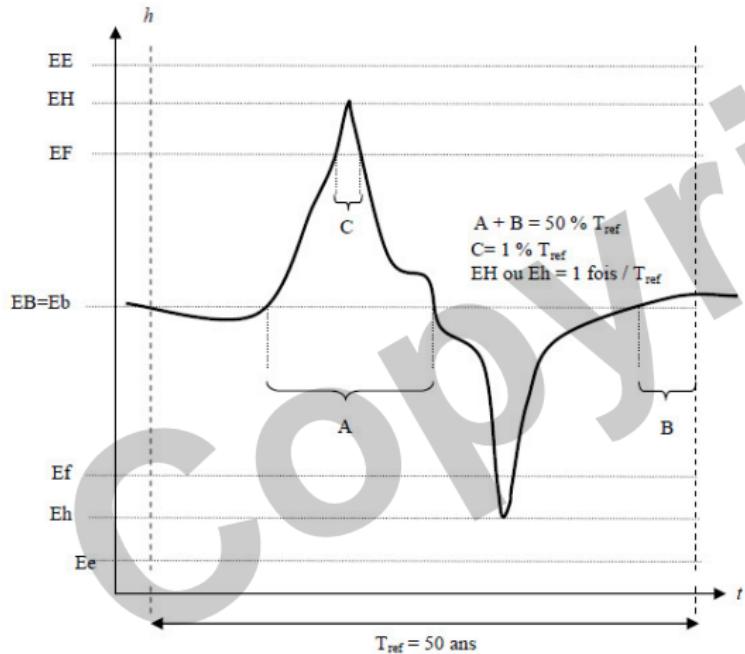
- ➡ direction et sens d'écoulement
- ➡ importance des forces d'écoulement

**③ les variations de la nappe phréatique**

Suivi de l'évolution de la nappe pendant au moins 1 an

- ➡ importance de la mission G1/ES

# Prise en compte de la variation des niveaux d'eau



- EB : niveau des basses eaux
- EF : niveau fréquent
- EH : niveau des hautes eaux
- EE : niveau des eaux exceptionnelles (niveau accidentel)

➡ Ces différents niveaux vont intervenir dans les **combinations d'actions ELS/ELU**.

# La charge hydraulique dans les sols

Résoudre les problèmes liés à  
la circulation de l'eau dans les sols  
repose sur notre capacité à évaluer  
la charge hydraulique  
en différents points de ces sols !

# La charge hydraulique dans les sols

## LA CHARGE HYDRAULIQUE EN HYDRAULIQUE GÉNÉRALE

$$\underbrace{H_M}_{\text{la charge totale}} = \underbrace{\frac{1}{2} \frac{v_M^2}{g}} + \underbrace{\frac{p_M}{\rho g} + z_M}_{h_M, \text{ la cote piézométrique du point } M}$$

## CAS PARTICULIER DE L'HYDRAULIQUE DES SOLS

- Vitesse d'écoulement de l'eau toujours très faible, de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-2}$  m/s.  
 $\Rightarrow \frac{1}{2} \frac{v_M^2}{g} \ll z_M$  (Si  $v=10^{-2}$  m/s alors  $\frac{1}{2} \frac{v^2}{g} = 5 \mu\text{m} !!!$ )
- Les pressions relatives sont notées  $u$ ,  $\Rightarrow p_M = u_M$ .
- $\rho g = \rho_w g = \gamma_w$ .

## LA CHARGE HYDRAULIQUE EN HYDRAULIQUE DES SOLS

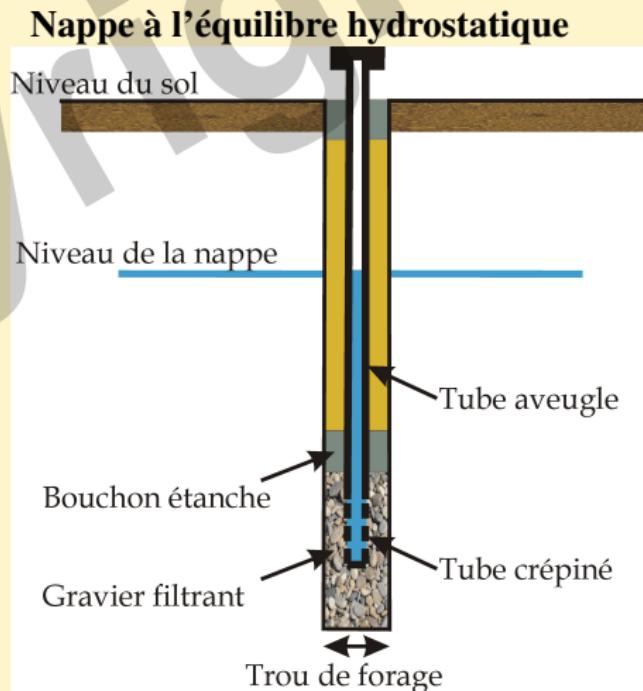
$$H_M = \frac{u_M}{\gamma_w} + z_M = h_M$$

La charge totale  $H$  se confond avec la cote piézométrique  $h$ .

# La charge hydraulique dans les sols

Mesure à l'aide d'un piézomètre - présentation de l'appareil

## UTILISATION D'UN PIÉZOMÈTRE



# La charge hydraulique dans les sols

Lien entre le piézomètre et la charge hydraulique

## UTILISATION D'UN PIÉZOMÈTRE



### Nappe à l'équilibre hydrostatique

Niveau du sol

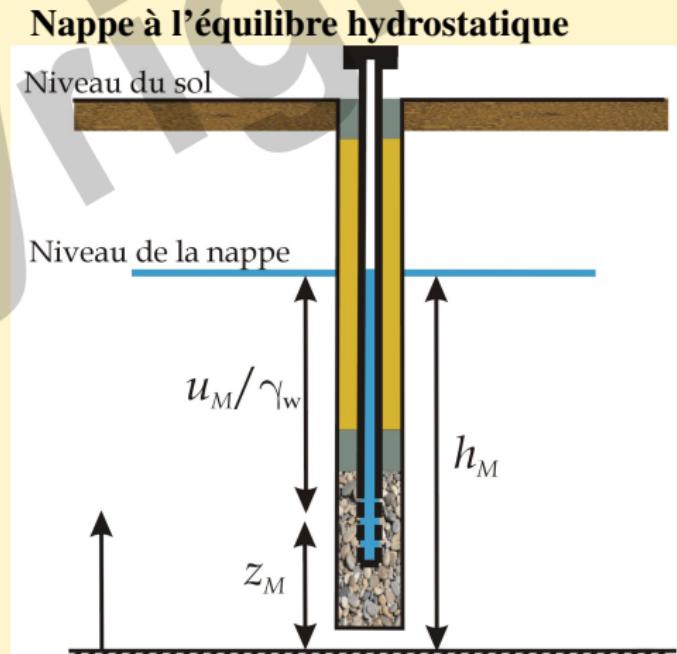
Niveau de la nappe

Plan de référence

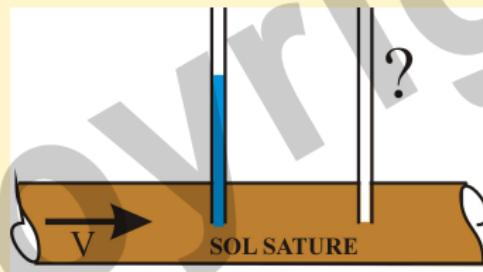
$$u_M / \gamma_w$$

$$z_M$$

$$h_M$$



# La charge hydraulique dans les sols



Que va-t-il se passer si l'on dispose un autre tube piézométrique plus loin dans l'écoulement ?

# La charge hydraulique dans les sols

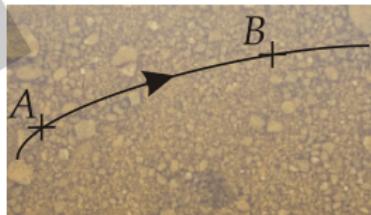
## La perte de charge en mécanique des sols



Dans le cas de l'écoulement de l'eau **dans un sol**, le théorème de Bernoulli ne s'applique plus !

La charge ne se conserve pas le long d'une ligne de courant.  
Interaction eau/sol ↗ frottements ↗ dissipation d'énergie

Il y a **perte de charge**.

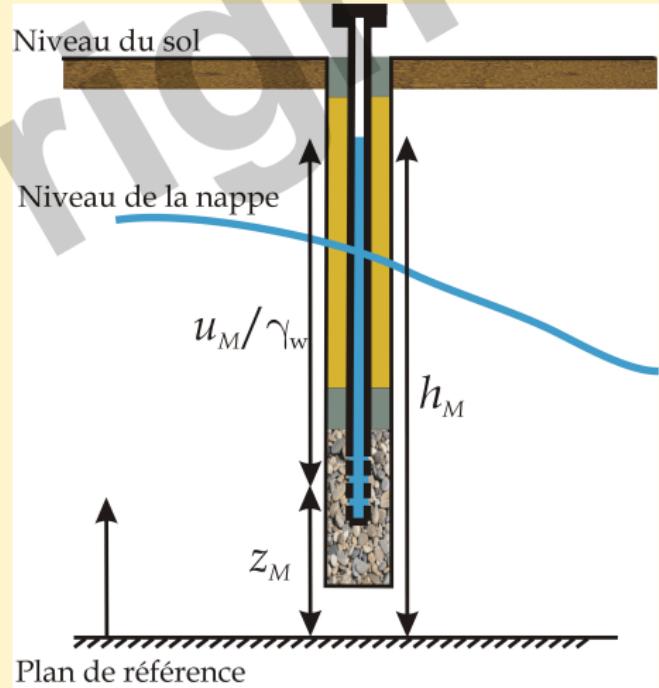
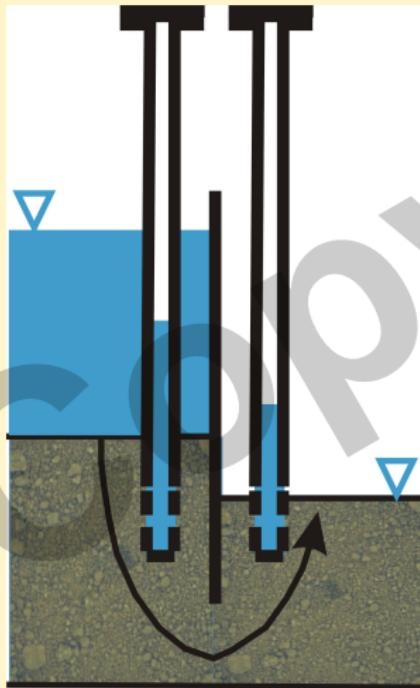


$$h_A \neq h_B$$

$h_A > h_B$  : L'écoulement d'eau se produit de A vers B et la perte de charge vaut  $h_A - h_B$ .

# La charge hydraulique dans les sols

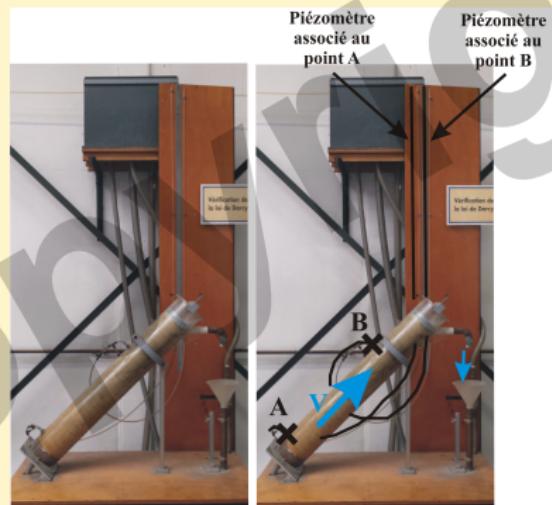
## PIÉZOMÈTRE EN PRÉSENCE D'UN ÉCOULEMENT



# La charge hydraulique dans les sols

## Application

### MESURES DE CHARGES HYDRAULIQUES EN PRÉSENCE D'UN ÉCOULEMENT



- Que se passe-t-il au niveau des piézomètres ?
- Comment détermine-t-on la charge hydraulique au point A ?
- Comment détermine-t-on la charge hydraulique au point B ?

# Où en est-on ?

## COURS 1

### Comportement et action de l'eau dans les sols

- La charge hydraulique : définition et principe de mesure ✓

# Où en est-on ?

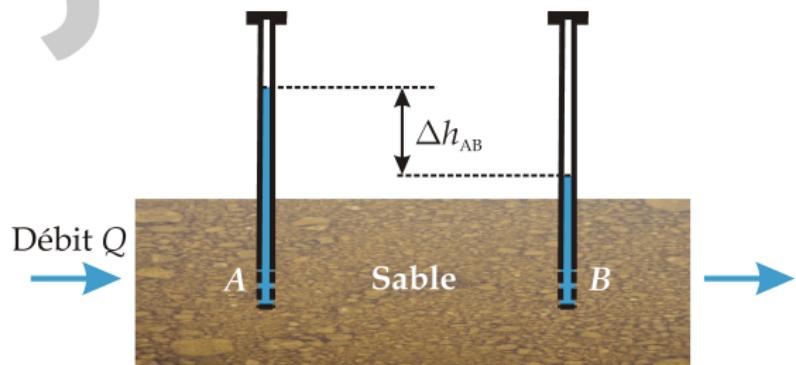
## COURS 1

### Comportement et action de l'eau dans les sols

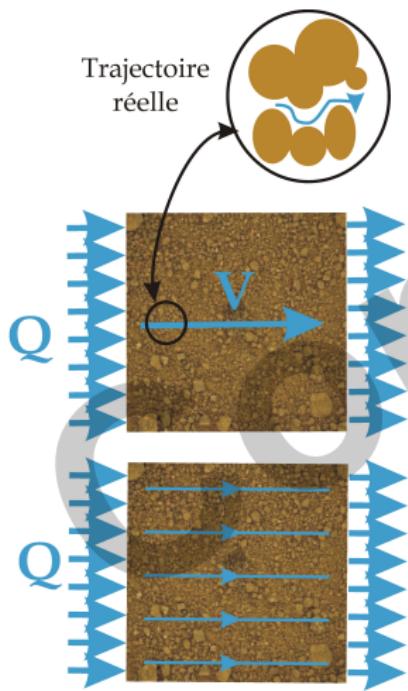
- La charge hydraulique : définition et principe de mesure ✓

- L'écoulement de l'eau dans les sols

- La loi de Darcy
- La notion de perméabilité



# Quelques définitions fondamentales

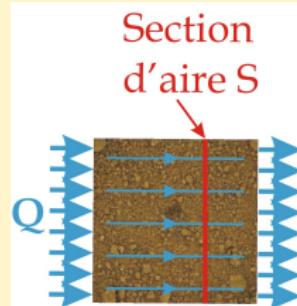


## UNE VITESSE FICTIVE D'ÉCOULEMENT

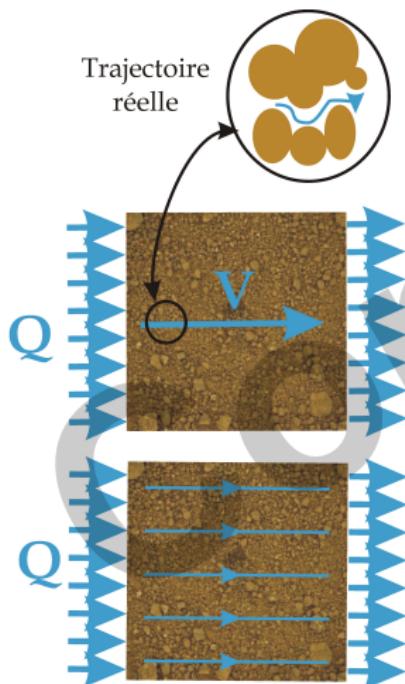
$$V = \frac{Q}{S}$$

$V$ , vitesse fictive ou vitesse de décharge de l'eau,  
 $Q$ , débit de l'eau,  
 $S$ , aire **totale** de la section de sol traversée par l'eau.

La section considérée est **perpendiculaire** aux lignes de courant !



# Quelques définitions fondamentales



## UNE VITESSE FICTIVE D'ÉCOULEMENT

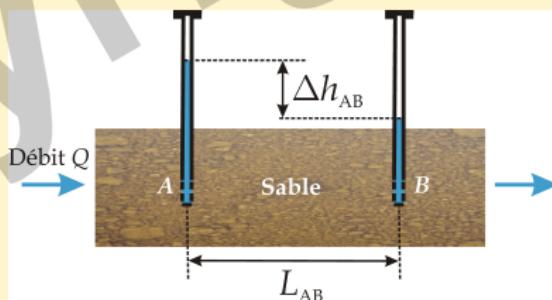
$$V = \frac{Q}{S}$$

$V$ , vitesse fictive ou vitesse de décharge de l'eau,

$Q$ , débit de l'eau,

$S$ , aire **totale** de la section de sol traversée par l'eau.

## LE GRADIENT HYDRAULIQUE, NOTÉ $i$



$$i = \frac{\Delta h_{AB}}{L_{AB}} = \frac{h_A - h_B}{L_{AB}}$$

$L_{AB}$  : longueur de la **ligne de courant** allant de A à B.

# La loi de Darcy (1856)

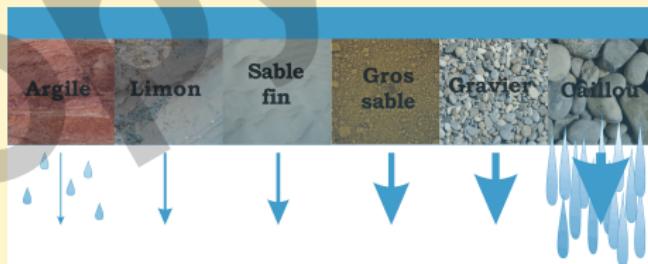
## LA LOI DE DARCY

Il existe une relation de proportionnalité entre la vitesse de décharge  $V$  et le gradient hydraulique  $i$ .

$$V = k \cdot i$$

$k$  est appelé coefficient de **perméabilité** du sol (Unité : m/s).

## LA NOTION DE PERMÉABILITÉ

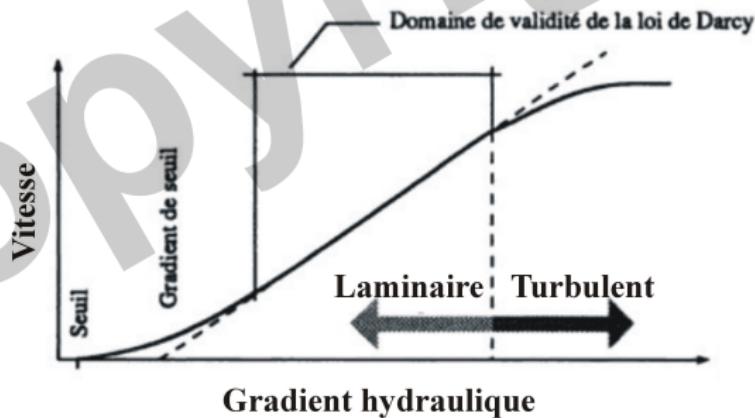


	Argile	Limon	Sables	Gravier
$k$ (m/s)	$10^{-13} \leq k \leq 10^{-9}$	$10^{-9} \leq k \leq 10^{-5}$	$10^{-5} \leq k \leq 10^{-3}$	$10^{-3} \leq k \leq 10^{-1}$

Formule empirique de Hazen :  $k = 1,5 d_{10}^2$ .

# Limites de la loi de Darcy

- Perte de linéarité à grande vitesse d'écoulement (régime turbulent)
- Gradient d'initiation à faibles vitesses d'écoulement

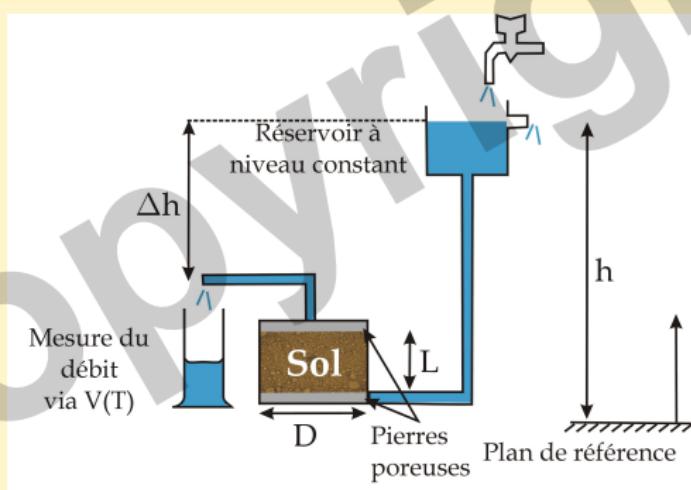


➡ A garder à l'esprit pour les TP...

# La mesure de la perméabilité en laboratoire

## Perméabilité à charge constante

### PERMÉAMÈTRE À CHARGE CONSTANTE



En négligeant les pertes de charge dans l'installation hydraulique, on peut montrer que :

$$k = \frac{4VL}{\pi D^2 T \Delta h}$$

# La mesure de la perméabilité en laboratoire

## Perméabilité à charge constante

### PERMÉAMÈTRE À CHARGE CONSTANTE

Si on impose un gradient hydraulique de 0,5 et que l'on souhaite recueillir 100 mL d'eau, il faut attendre :

Gravier	Entre 0,25 secondes et 25 secondes
Sables	Entre 25 secondes et 2550 secondes
Limons	Entre 2550 secondes et 42 semaines
Argiles	Entre 42 semaines et 8097 ans

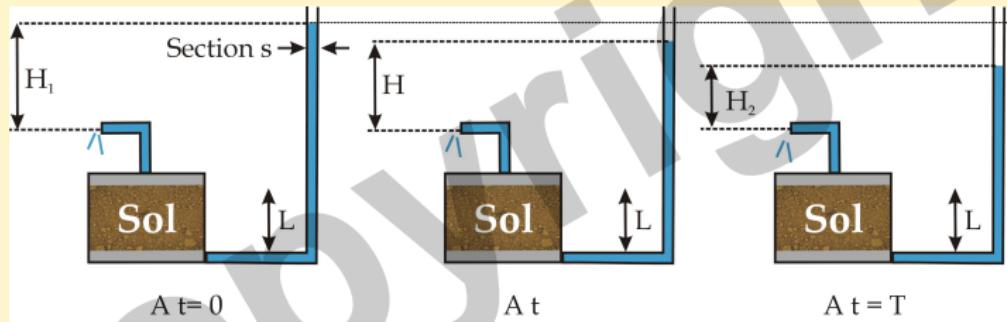
Dimensions du moule :  $L=125\text{mm}$  et  $D=100\text{mm}$

➡ Seulement utilisé pour les matériaux pulvérulents !

# La mesure de la perméabilité en laboratoire

Perméabilité à charge variable

## PERMÉAMÈTRE À CHARGE VARIABLE



$$\underbrace{-s dH}_{\text{Diminution de volume dans le tube}} = \underbrace{q dt}_{\text{Volume traversant l'échantillon}} = \frac{k(h_{\text{amont}} - h_{\text{aval}})S}{L} dt = \frac{kHS}{L} dt$$

$$k dt = -\frac{sL}{S} \frac{dH}{H}$$

Par intégration,

$$k = \frac{sL}{ST} \ln \frac{H_1}{H_2}$$

# Limites des mesures de perméabilité en laboratoire

Problèmes posés par l'échantillonnage :

- Remaniement
- Faible volume