

Caractérisation des  
roches non consolidées  
(roches meubles,  
« sols »)

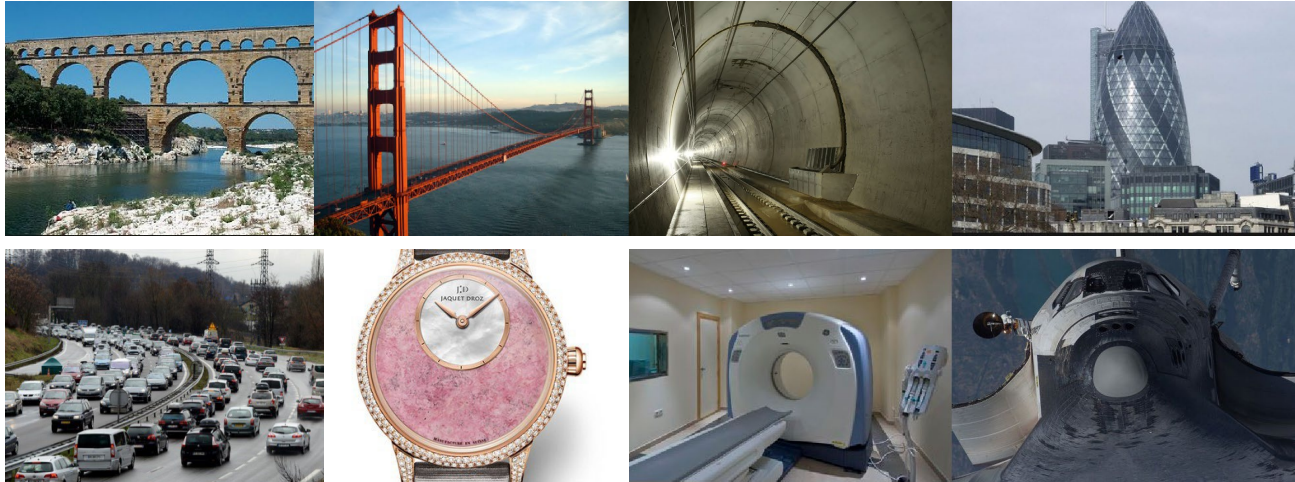
# Caractérisation des formations géologiques et propriétés globales des géomatériaux

## Définition

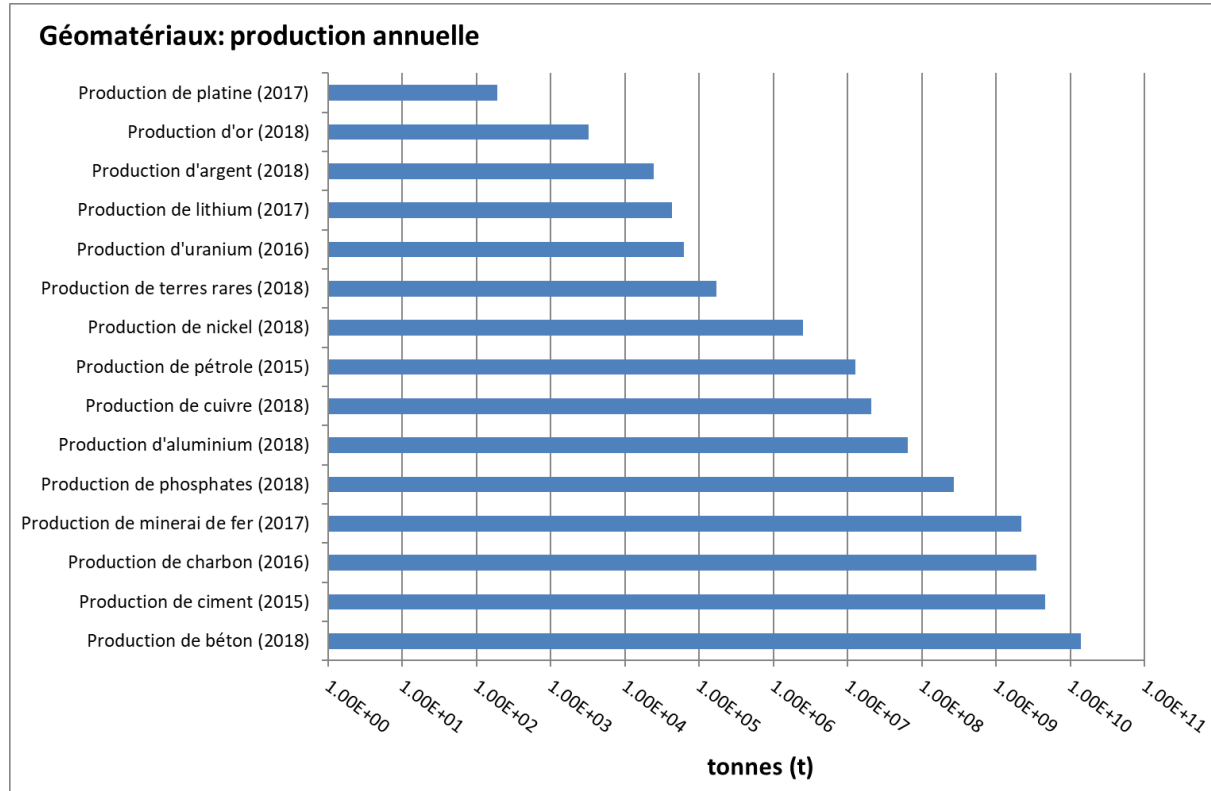
Géomatériaux = matériaux géologiques ou d'origine géologique Deux catégories :

- Géomatériaux naturels (ex. granite, calcaires, grès, sable, argile, minéral, pétrole, etc.)
- Géomatériaux artificiels (ex. béton, ciment, verre, composites, etc.)

## Utilisation des géomatériaux



# Caractérisation des formations géologiques et propriétés globales des géomatériaux



Source Planétoscope <http://www.planetoscope.com>

# Caractérisation des formations géologiques et propriétés globales des géomatériaux/carrières et gravières

## Exemple des carrières et gravières du canton de Vaud Besoins et consommations

Production en 2012 de géomatériaux dans le canton de Vaud : 4'318'850 t/an (2'500'000 m<sup>3</sup>, avec un facteur de 1.7 t/m<sup>3</sup>) ~ 0.3‰ production mondiale

Type de géomatériaux	Volume (m <sup>3</sup> )	%
Graviers terrestres	956 000	37.6
Graviers lacustres et rivières	330 000	13.0
Graviers et roches concassées et importés	450 000	17.7
calcaires concassés (ciment et filler)	467 000	18.4
Calcaires concassés y.c. « roches dures »	172 000	6.8
Marnes (cimenterie)	102 900	4.1
Marnes (briqueteries – tuileries)	22 600	0.9
Gypses (cimenterie – plâtres)	40 000	1.6
<b>Total</b>	<b>2 540 500</b>	<b>100</b>

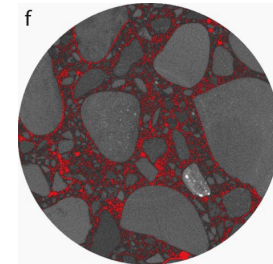
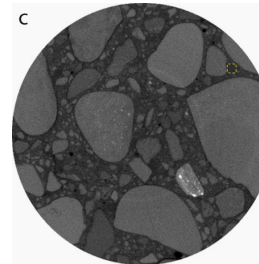
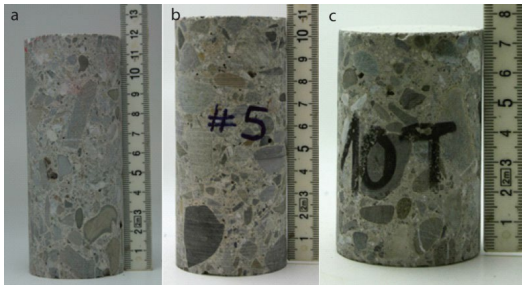
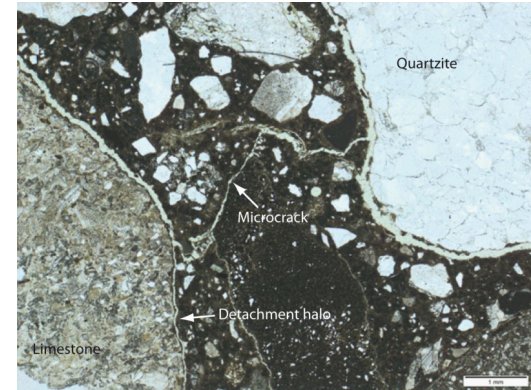
Volumes de matériaux extraits en 2012 (canton de Vaud, PDCar 2014)

Production prévue dans le futur pour un approvisionnement en continu du canton de Vaud : entre 2 et 3.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (= 3'400'000 à 5'100'000 t) dont les 2/3 sont des graviers et roches concassées destinés au génie civil.

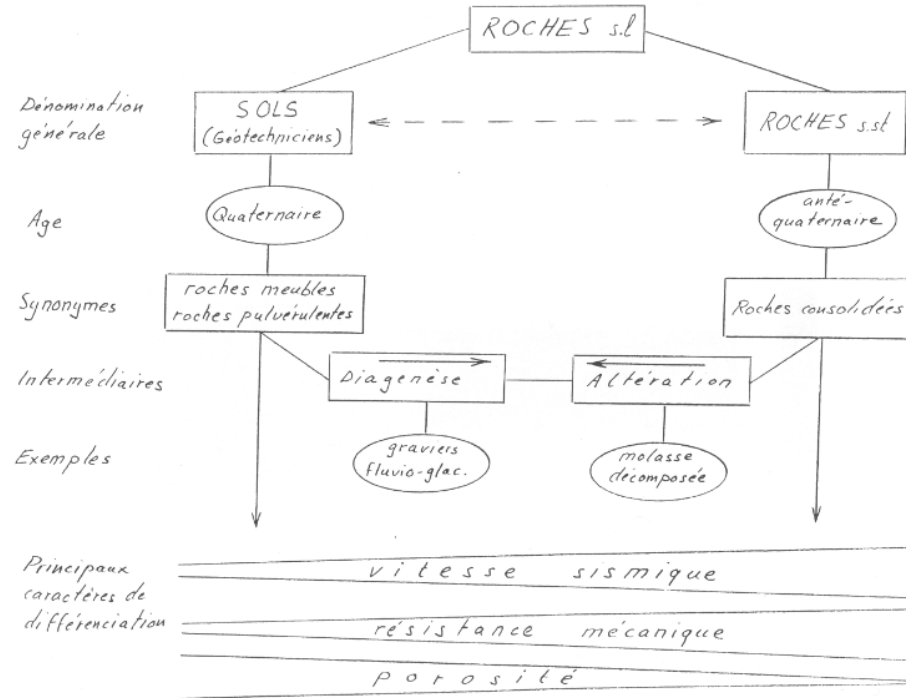
# Caractérisation des formations géologiques et propriétés globales des géomatériaux/bétons/PDM

“Non-destructive 3D characterisation of the alteration of concrete by high-resolution X-ray computed tomography”

Projet de master UNIL-EPFL, B. Lengyel , 2014



# Caractérisation des formations géologiques/terminologie



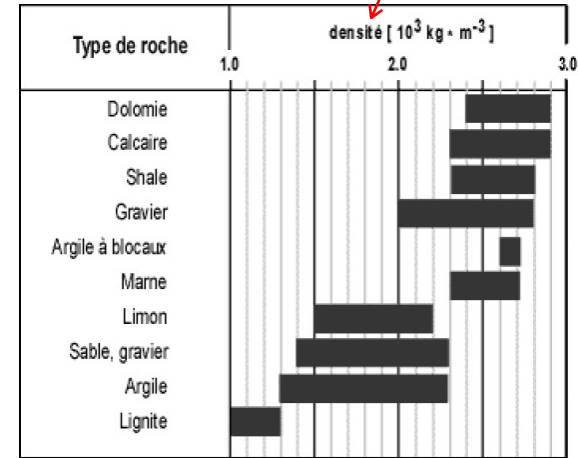
# Caractérisation des formations géologiques/propriétés globales

Table 3.2 TYPICAL VALUES FOR UNIT WEIGHT AND POROSITY OF ROCKS

Rock	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Porosity (%)
Andesite	22–23.5	10–15
Amphibolite	29–30	–
Basalt	27–29	0.1–2
Chalk	17–23	30
Coal	10–20	10
Diabase	29	0.1
Diorite	27–28.5	–
Dolomite	25–26	0.5–10
Gabbro	30–31	0.1–0.2
Gneiss	27–30	0.5–1.5
Granite	26–27	0.5–1.5 (0.9)
Greywacke	28	3
Gypsum	23	5
Limestone	23–26	5–20 (11)
Marble	26–28	0.3–2 (0.6)
Mudstone	22–26	2–15
Quartzite	26–27	0.1–0.5
Rhyolite	24–26	4–6
Salt	21–22	5
Sandstone	23–26	5–25 (16)
Schist	25–28	3
Shale	25–27	0.1–1
Tuff	19–23	14–40

Source: Valejo & Ferrer, 2011

Masse volumique !



Source: Wohlenberg 1982

$$\gamma = \rho g$$

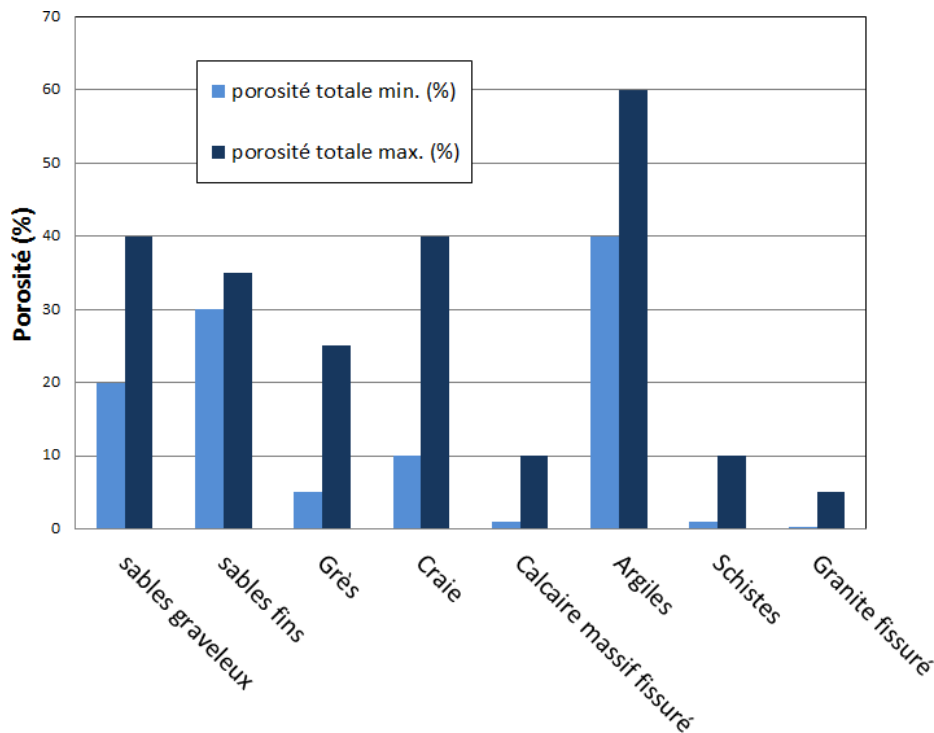
Where

$\gamma$  is the specific weight of the material (weight per unit volume, typically N/m<sup>3</sup> units)

$\rho$  is the density of the material (mass per unit volume, typically kg/m<sup>3</sup>)

$g$  is acceleration due to gravity (rate of change velocity, given in m/s<sup>2</sup>)

# Caractérisation des formations géologiques/propriétés globales/porosité



Roche	Eau contenue min. (l)	Eau contenue max. (l)
sables graveleux	200	400
sables fins	300	350
Grès	50	250
Craie	100	400
Calcaire massif fissuré	10	100
Argiles	400	600
Schistes	10	100
Granite fissuré	1	50

Litres d'eau contenus dans  
1m<sup>3</sup> de roche saturée

# EPFL Caractérisation des formations géologiques/propriétés globales/ perméabilité en roche meuble

Material	Hydraulic conductivity (m/s)	
	Low	High
<b>Clay</b>		
Unweathered	1.0E-11	1.0E-10
High plastic (CH)	1.0E-11	1.0E-09
Low plastic (CL)	1.0E-10	1.0E-08
<b>Silt</b>		
High plastic (MH)	1.0E-09	1.0E-07
Low plastic (ML)	1.0E-09	1.0E-06
<b>Sand</b>		
(SP)	1.0E-05	1.0E-03
Well sorted, fine	1.0E-07	1.0E-05
Well sorted, medium	1.0E-06	1.0E-04
Well sorted, coarse	1.0E-05	1.0E-03
(SW)	1.0E-06	1.0E-03
Poorly sorted, fine	1.0E-06	1.0E-04
Poorly sorted, medium	1.0E-05	1.0E-03
Poorly sorted, coarse	1.0E-05	1.0E-03
Silty sand (SM)	1.0E-08	1.0E-06
Clayey sand (SC)	1.0E-09	1.0E-07
<b>Gravel</b>		
(GP)	1.0E-05	1.0E-02
Well sorted	1.0E-05	1.0E-02
(GW)	1.0E-04	1.0E-02
Poorly sorted	1.0E-04	1.0E-02
Silty gravel (GM)	1.0E-07	1.0E-05
Clayey gravel (GC)	1.0E-09	1.0E-06

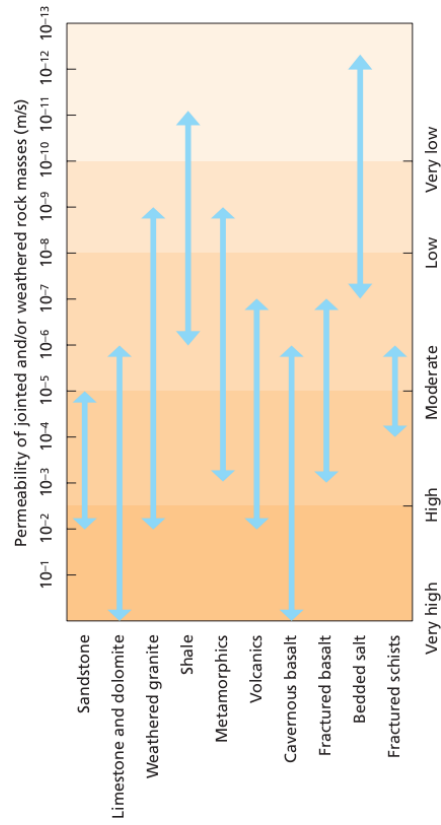
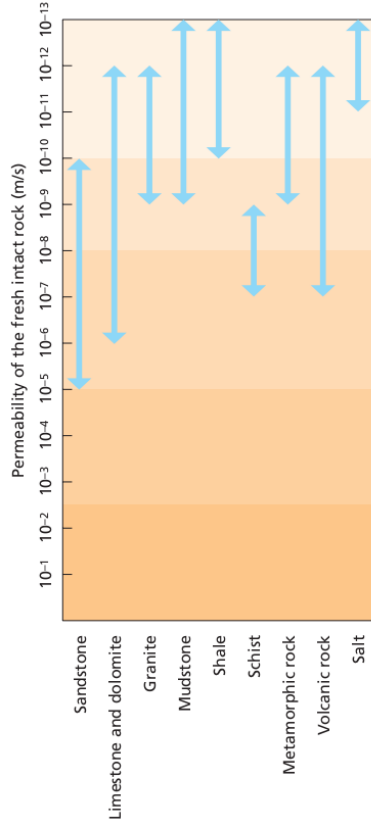
Source: Mathewson 1981

# Caractérisation des formations géologiques/propriétés globales/ perméabilité-porosité-conductivité électrique en roche consolidée

Comparatif des porosités, perméabilités et résistivités électriques de différents roches consolidées

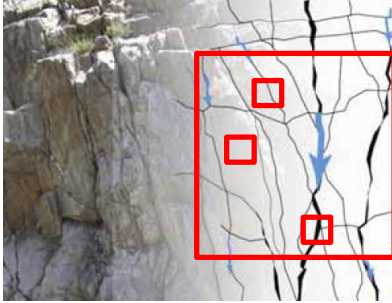
Roche	Porosité totale (%)	Perméabilité basse (m/s)	Perméabilité haute (m/s)	Résistivité él. basse (ohm.m)	Résistivité él. haute (ohm.m)
Argilite	35	1E-10	1E-11	70	200
Craie	35	1.E-07	1.E-07	30	300
Tuf volcanique	32	1.E-07	1.E-07	20	300
Marnes	27	1.E-09	1E-11	20	100
Grès	3-35	1.E-05	1.E-08	30	800
Dolomite	1-12	1.E-07	1.E-09	200	10000
Calcaires	3	1.E-12	1.E-14	200	10000
Métaschistes	2.5	1.E-06	1E-11	300	800
Gneiss	1.5	1E-10	1E-10	1000	20000
Quartzite	<1	1E-12	1E-12	1000	10000
Granite	1	1E-11	1E-12	1000	15000
Gabbro	1-3	1.E-06	1.E-11	6000	10000
basalte	1.5	1.E-08	1.E-10	800	15000

# Caractérisation des formations géologiques/propriétés globales/perméabilité en roche consolidée

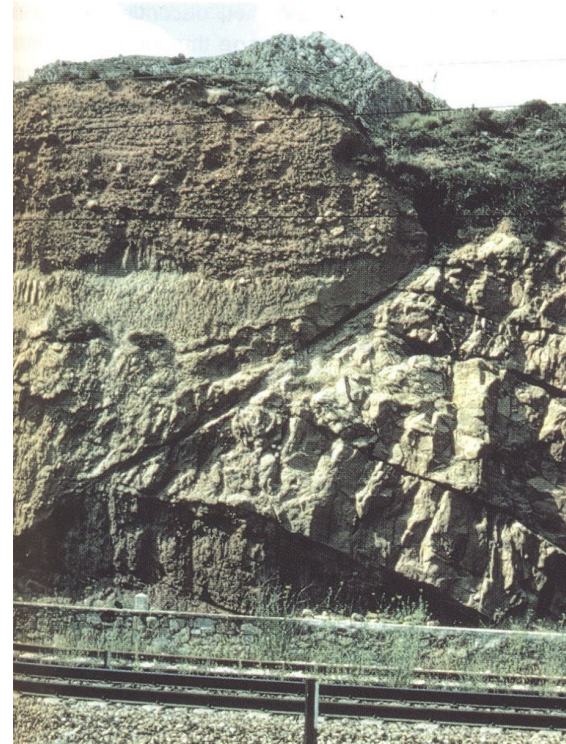


Source: Vallejo & Ferrer, 2011

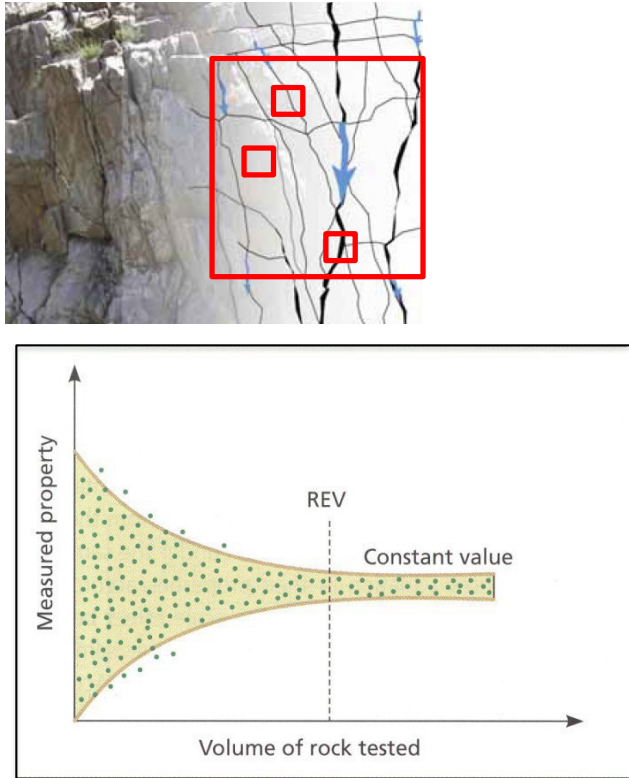
**EPFL** Caractérisation des formations géologiques/propriétés globales/  
perméabilité en roche consolidée/effet d'échelle



*Zone d'exutoire d'un massif calcaire (BE, CH)*



*Photo\_ Vallejo & Ferrer*



Source: Vallejo & Ferrer, 2011

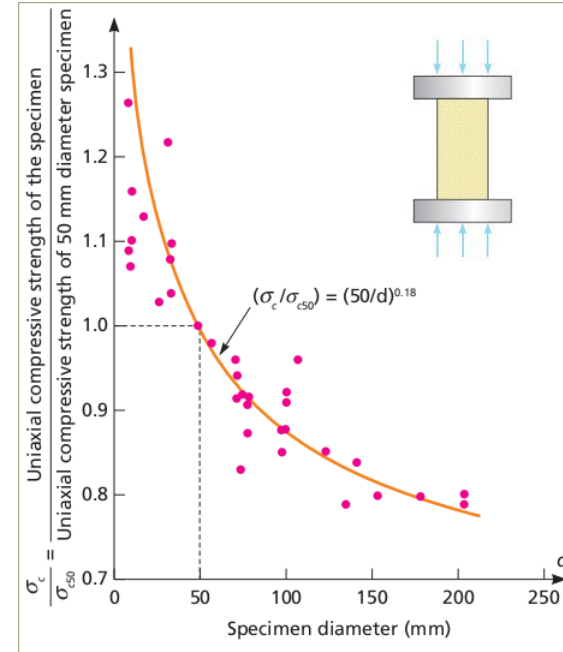
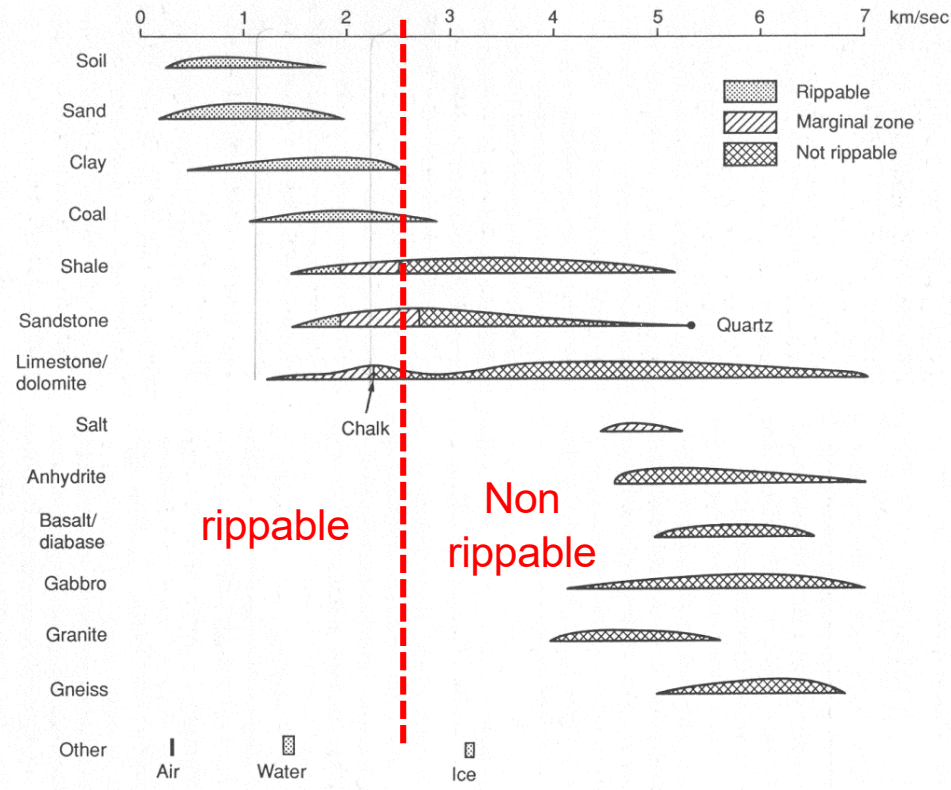


Figure 3.106 Variation of uniaxial compressive strength with sample size for several types of rock. Strength values normalised to a 50 mm diameter sample to eliminate the influence of variation in test characteristics (Hoek and Brown, 1980).

Source: Vallejo & Ferrer, 2011

# EPFL Caractérisation des formations géologiques/propriétés globales/rippabilité et vitesse sismique



ripper (Caterpillar)

Source: Milsom j, 1989

# EPFL Caractérisation des formations géologiques/propriétés globales/rippabilité et vitesse sismique

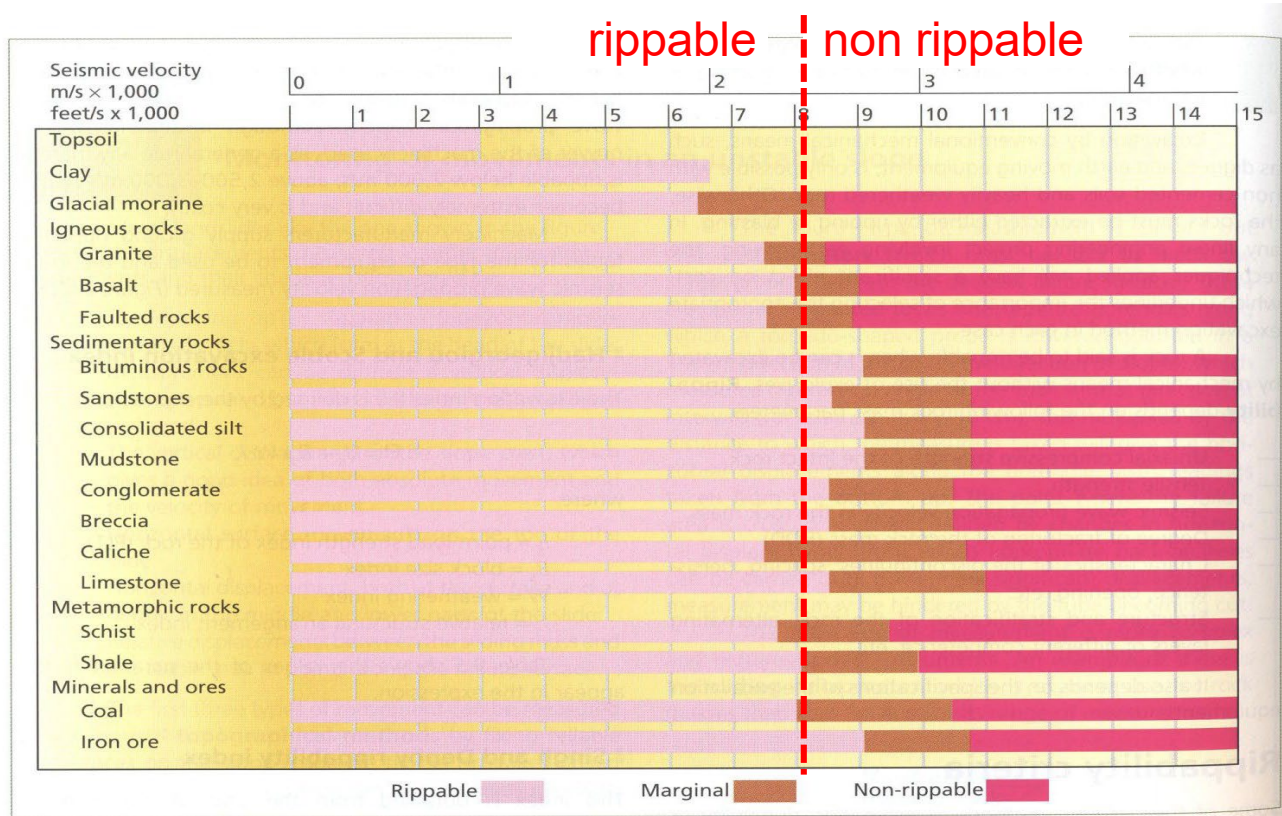


Figure 9.71 Ripability of different rocks for a D10R-type Caterpillar ripper.

Source: Vallejo & Ferrer, 2011

## Classes de matériaux (SIA 199)

- Classe de matériau 1: matériau utilisable comme matière première pour la production de ciment, concassé ou agrégats.
- Classe de matériau 2: matériau utilisable pour les agrégats de béton ou pour les remblais à haute exigence (grave selon SN 670 120).
- Classe de matériau 3: matériau utilisable pour les remblais sans exigence particulière, les remplissages ou remblayages.
- Classe de matériau 4: matériau non réutilisable (par ex. matériau contaminé, boues).

### Composition du ciment artificiel:

Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ): 77 à 83 % => calcite

Silice ( $\text{SiO}_2$ ): 13 à 14 % => quartz

Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): 2 à 4 % => corindon

Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : 1.5 à 3% => hématite



Clinker (wikipedia)

**Ciment naturel:** calcaire (75-80%) et argiles (20-25%) => cuisson à 1450°C => clinker

# Caractérisation des roches non consolidées (roches meubles, « sols »)



Ressource en matériaux/espace



Fondations



Stabilité/dangers naturels



Ressource en énergie

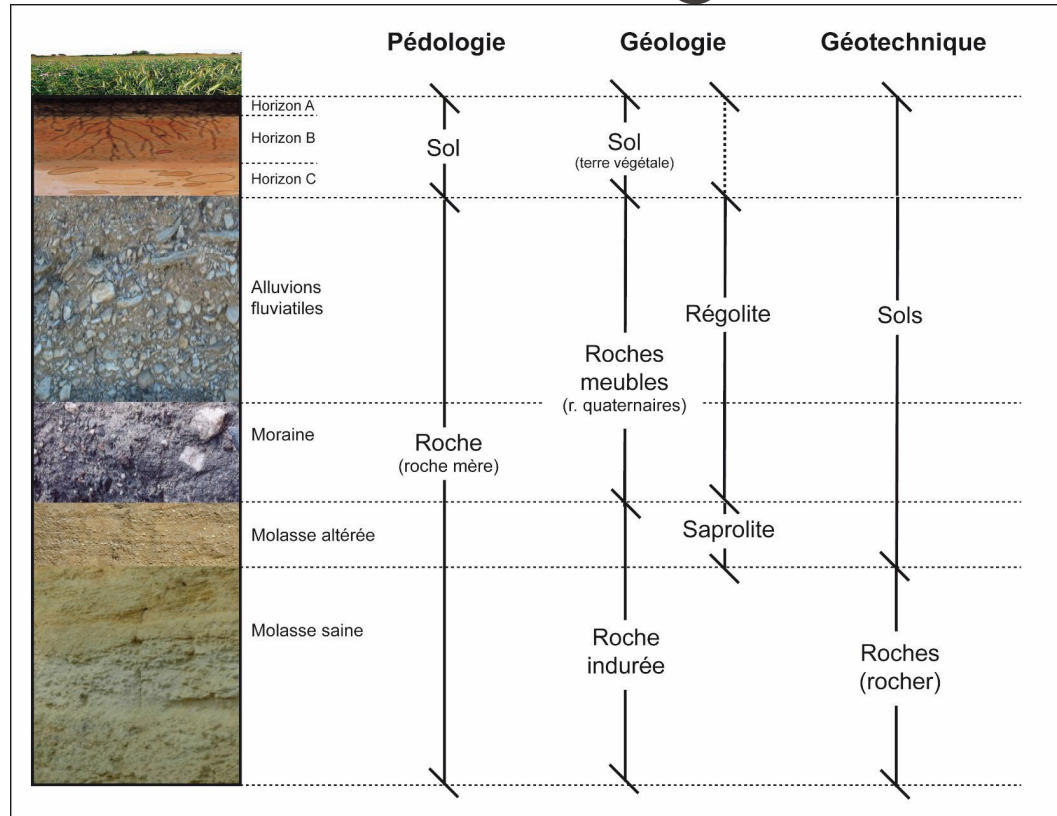


Ressource en eau (aquifère)



Protection des eaux

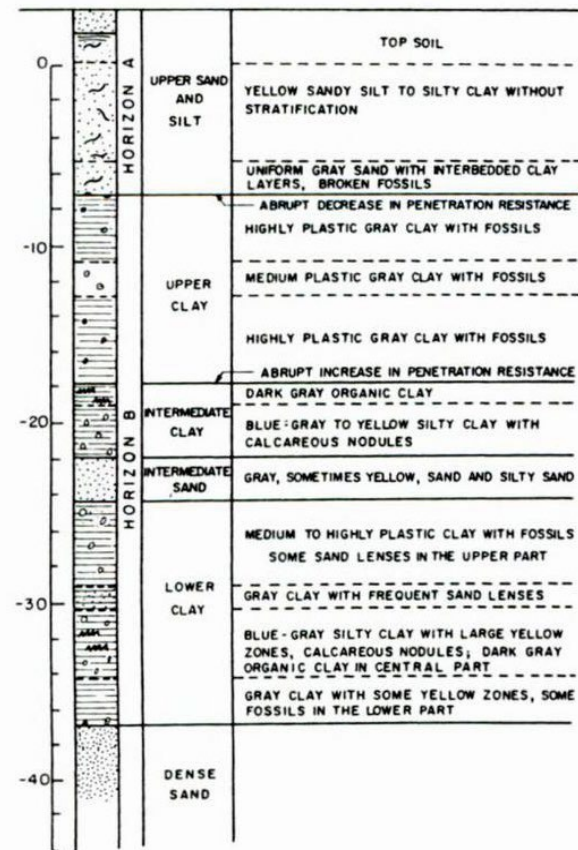
# Caractérisation des roches non consolidées/terminologie



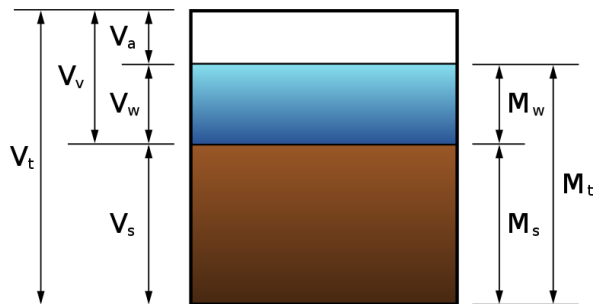
# Caractérisation des roches non consolidées/paramètres

## Propriétés physiques et techniques des sols, classification

- Porosité
- Grains
- Propriétés physiques
  - Densité, masse volumique, etc.
  - Granulométrie
  - Limites d'Atterberg, plasticité, liquidité, consistance
- Classification
  - Sols grenus
  - Sols fins



# Caractérisation des roches non consolidées/porosité & saturation



$V_t$  = Volume total

$V_v$  = Volume vide

$V_a$  = Volume d'air

$V_w$  = Volume d'eau

$V_s$  = Volume de solide

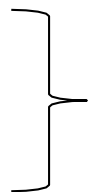
$M_w$  = Masse d'eau

$M_s$  = Masse de solide

$M_t$  = Masse totale

▪ Porosité  $n$  (%):  $n = \frac{V_v}{V_t}$

▪ Indices des vides  $e$  (-):  $e = \frac{V_v}{V_s}$



$$n = \frac{e}{1 + e} \quad \text{ou} \quad e = \frac{n}{1 - n}$$

▪ Saturation ou degré de saturation  $S_r$  (%):  $S_r = \frac{V_w}{V_v}$

▪ Teneur en eau  $w$  (%):  $w = \frac{M_w}{M_s}$

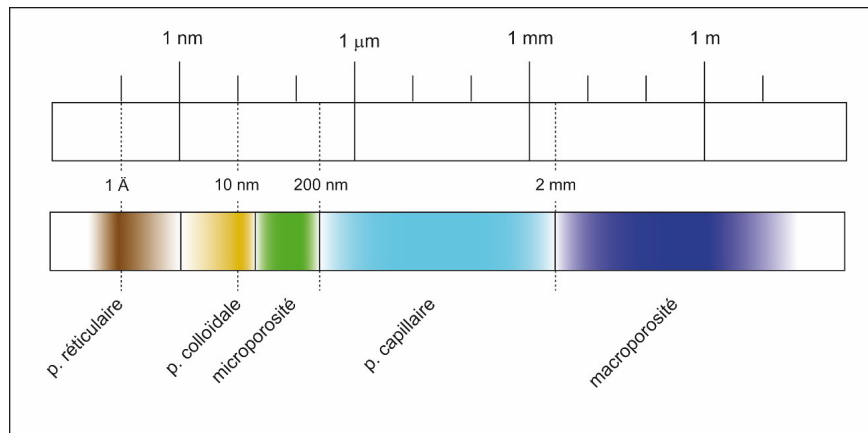
▪ Teneur en eau volumique  $\theta$  (%):  $\theta = \frac{V_w}{V_t}$

# Caractérisation des roches non consolidées/typologie selon taille de pores

- **Porosité réticulaire:** env. 1 Å (0.1 nm). L'eau de ces vides est mobilisable par vaporisation.
- **Porosité colloïdale:** vides d'env. 100 Å (10 nm). Vides des agrégats colloïdaux. Porosité importante dans les argiles. Mobilisable par compaction naturelle ou provoquée (centrifugation, filtration sous presse ou sous vide)
- **Microporosité:** jusqu'à 2E-7 m (200 nm)
- **Porosité capillaire:** entre 2E-7 m et 2E-3 m (200 nm à 2 mm)
- **Macroporosité:** > 2 mm

Extraction difficile de l'eau des pores

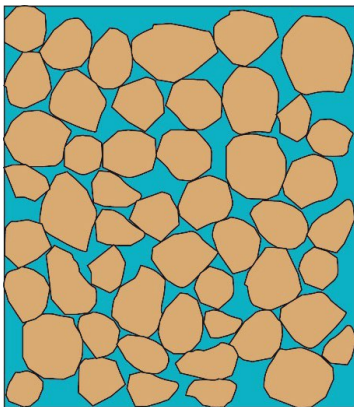
Extraction possible de l'eau des pores



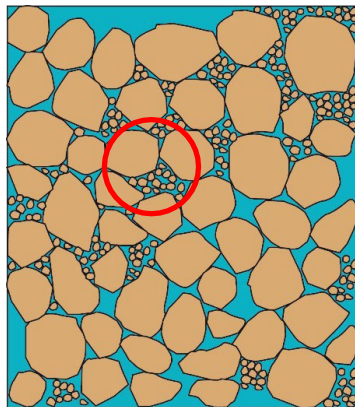
NB: ces différents types de porosité peuvent coexister au sein d'un même sol

# Caractérisation des roches non consolidées/types de porosité d'interstices

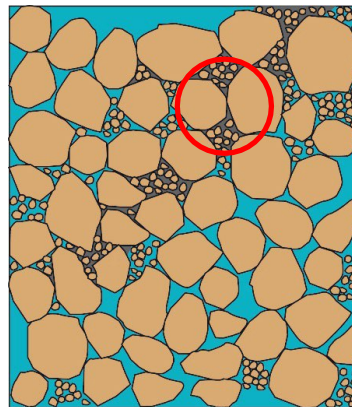
**Porosité d'interstices:** vides compris entre les différentes particules (granulaires) d'un sol.



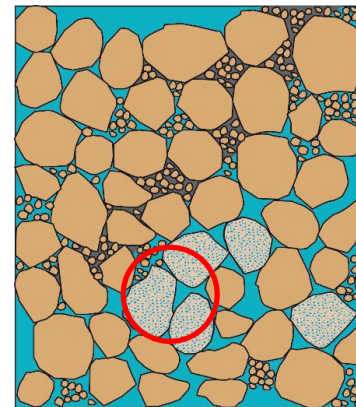
**Porosité d'interstices simple :** vides d'interstices entre grains bien classés non remplis de grains de plus petite taille.



**Porosité d'interstices restreinte:** vides d'interstices entre grains mal classés, avec remplissage des interstices majeurs avec des grains de plus petite taille.



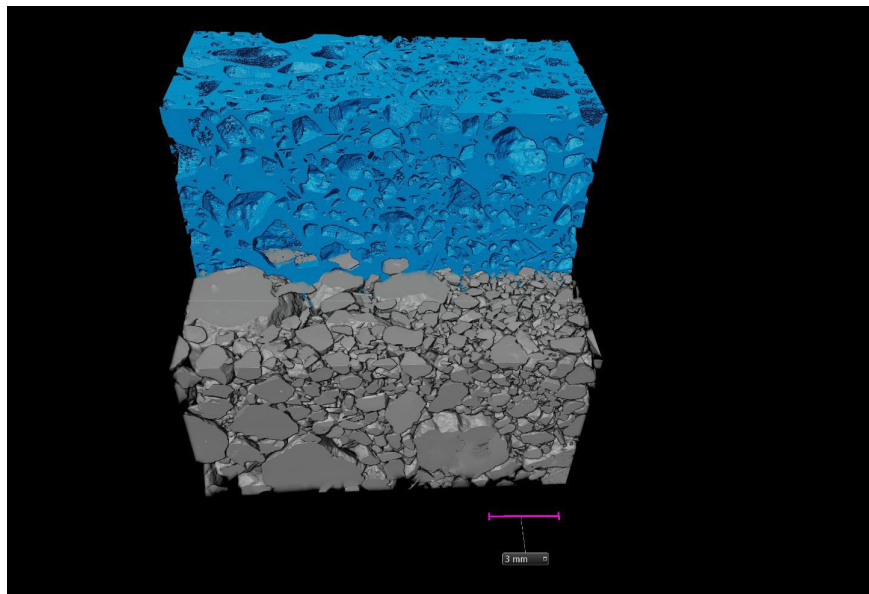
**Porosité d'interstices réduite:** volume des vides réduit par des dépôts minéraux secondaires (carbonates de Ca, hydroxydes de fer, silice, ...) à la surface des grains.



**Porosité d'interstices double:** les grains du sol sont eux-mêmes composés de grains et de pores plus petits que les vides créés par les grains du sol.

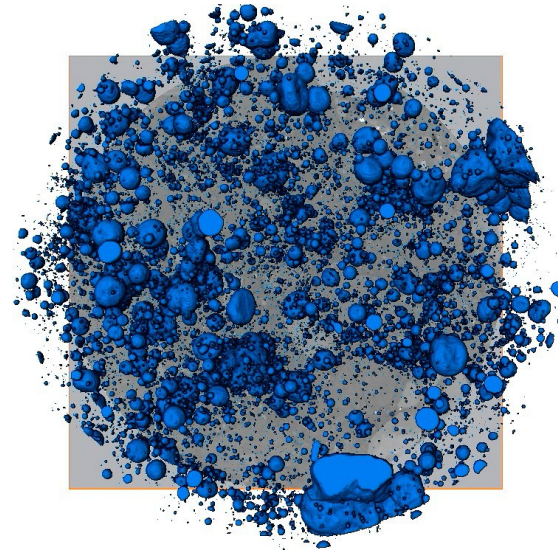
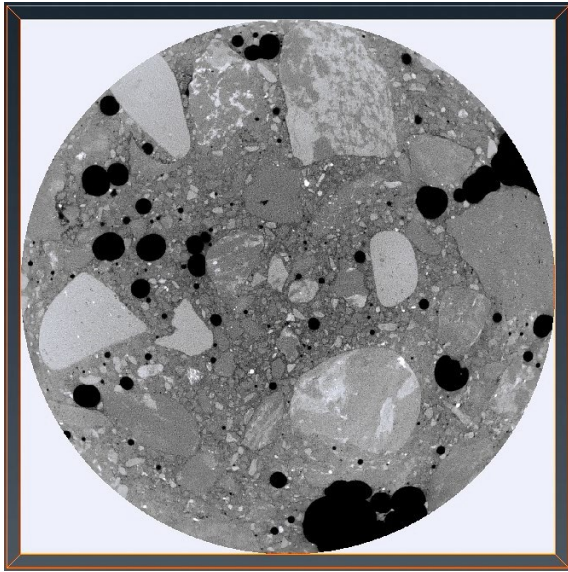
# Caractérisation des roches non consolidées/types de porosité d'interstices

**Porosité d'un géomatériau:** formes et distribution spatiale des vides d'un sable volcanique (analyse par micro-CT)



# Caractérisation des roches non consolidées/types de porosité d'interstices/porosité vacuolaire

**Porosité d'un géomatériau:** formes et distribution spatiale des vides d'une éprouvette de béton (analyse par micro-CT)

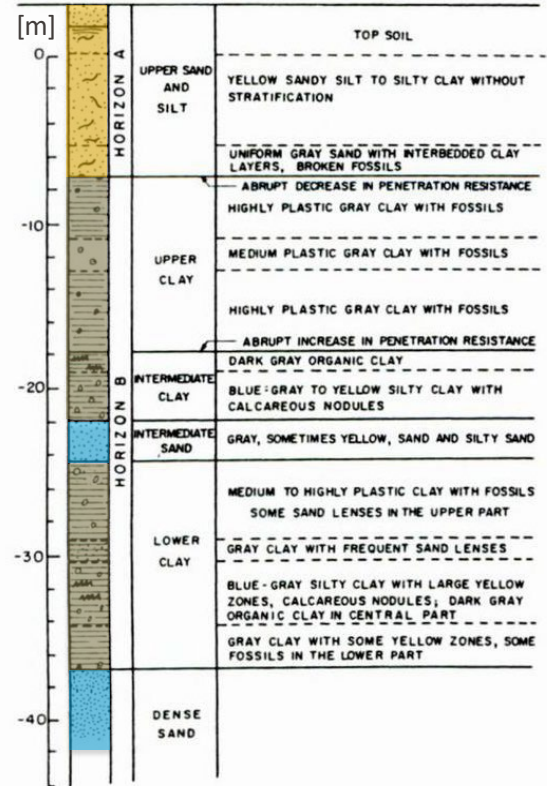


# Caractérisation des roches non consolidées/porosité/ordres de grandeur dans les sols (et roches indurées)

## Porosité totale de quelques sols

- Sols argileux et silteux 40-60%
- Sables fins 40-50%
- Sables moyens 35-40%
- Sables grossiers 25-35%
- Gravier 20-30%
- Sols tourbeux 80-85%

Source: cours EPFL, A.Mermoud 2006



# Caractérisation des roches non consolidées/grains

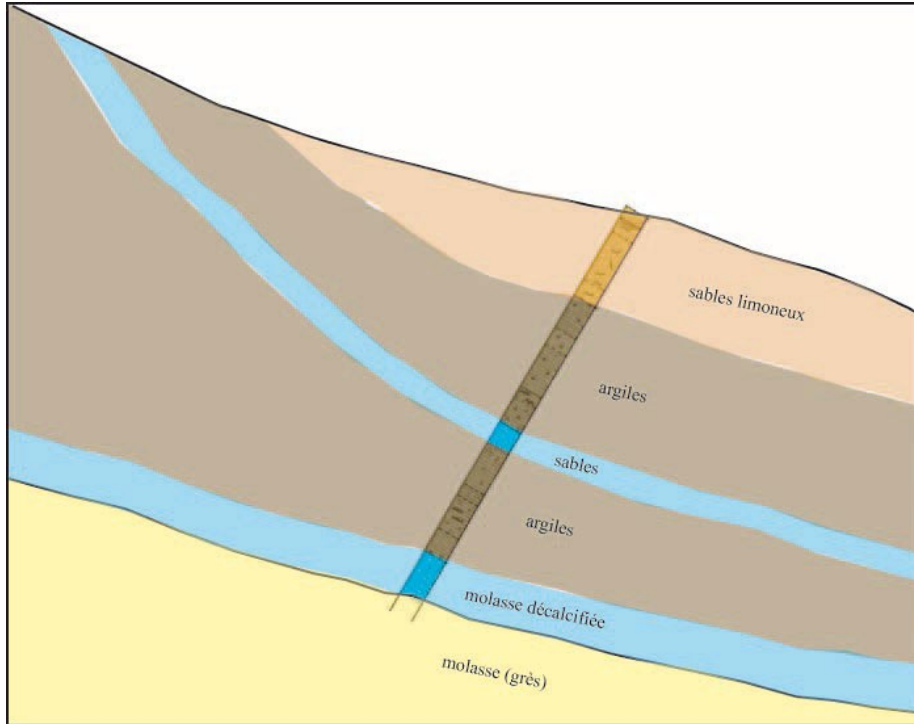
En géotechnique, le terme « grain » inclut l'ensemble des éléments minéraux (ou organique) d'une roche meuble, même ceux s'éloignant fortement d'une forme sphérique (p.ex. les argiles).

## Nature, minéralogie et forme des grains

- Analyse minéralogique/pétrographique (lame mince, RX) => origine mono- ou polygénique, assemblage minéralogique => comportement mécanique du sol (p.ex. moraine jurassienne vs moraine alpine).
- Composition de la fraction argileuse (RX) => types d'argiles => comportement mécanique ou hydraulique du sol (p.ex. montmorillonites vs. kaolinite).
- Teneur en carbonates (par décarbonatation à l'acide), en sulfates, etc. => origine du sol, cimentation => comportement mécanique, hydraulique ou chimique du sol (p.ex. ciment carbonaté vs. ciment siliceux).
- Morphologie des grains => origine, mode de transport => comportement mécanique du sol (grains arrondis vs. grains anguleux).

# Caractérisation des roches non consolidées/grains/ comportement mécanique ou hydraulique associé

Influence des types de grains sur le comportement des formations géologiques (exemple)



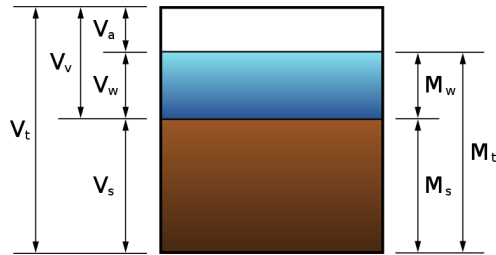
Influence des propriétés des grains (nature, minéralogie, forme, porosité), de la saturation en eau mais aussi de la structure des formations géologiques !

# Caractérisation des roches non consolidées/ comportement des sols



Glissement de terrain déclenché par le séisme d'El Salvador du 13 janvier 2001 associé à de fortes pluies. La roche mère est constituée de tuf volcanique. Elle est surmontée de dépôts de cendre volcanique et de lapilli. Ville de Santa Tecla, Nuevo San Salvador. Volume déplacé d'environ 90'000 m<sup>3</sup>.

# Caractérisation des roches non consolidées/porosité & saturation



$V_t$  = Volume total

$V_v$  = Volume vide

$V_a$  = Volume d'air

$V_w$  = Volume d'eau

$V_s$  = Volume de solide

$M_w$  = Masse d'eau

$M_s$  = Masse de solide

$M_t$  = Masse totale

- Masse volumique (anc. densité absolue, densité propre, masse spécifique) d'un sol,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>):  $\rho = \frac{M_t}{V_t}$
  - Densité (anc. densité relative) d'un sol,  $d$  (sans dim.) = Masse volumique unitaire des grains d'un sol/ masse du volume unitaire d'eau à 4°C:  $d = \frac{M_t}{M_w}$
  - Masse volumique du solide (=des grains),  $\rho_s$  (kg/m<sup>3</sup>):  $\rho = \frac{M_s}{V_s}$
  - Masse volumique du sol sec,  $\rho_d$  (kg/m<sup>3</sup>):  $\rho = \frac{M_s}{V_t}$
  - Poids volumique du solide,  $\gamma_s$  (kN/m<sup>3</sup>):  $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$  avec  $W_s = gM_s$
  - Densité du solide,  $d_s$  (sans dim.):  $d_s = \frac{M_s}{M_w}$
- Ou en utilisant le rapport des poids volumiques:  $d_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$  avec  $\gamma_s = 9.81 \text{ kN/m}^3 \approx 10 \text{ kN/m}^3$

# EPFL Caractérisation des roches non consolidées/ teneur en eau et indices des vides/exemple

## Échantillon de sol:

Masse du sol saturé: 150 g. Masse du sol sec : 90 g.

1) Quelle est sa teneur en eau  $w$  ? Rappel: teneur en eau  $w$  (%):  $w = \frac{M_w}{M_s}$

=> Teneur en eau :  $w = (150-90) / 90 = 0.667 = 66.7\%$

L'échantillon est utilisé pour un test triaxial (en compression). Il s'agit d'une éprouvette de 38 mm de diamètre et 76 mm de haut.

2) Quel est son indice des vides  $e$  ? Rappel: indice des vides  $e$  (-):  $e = \frac{V_v}{V_s}$

Avec les relations:  $n = \frac{e}{1+e}$   $e = \frac{n}{1-n}$

=> Volume de l'échantillon calculée:  $86.193 \text{ cm}^3$

=> Masse volumique de l'échantillon:  $\rho = 150/86.19 = 1.74 \text{ g/cm}^3$

=> Masse volumique du sol sec  $\rho_s = 90/86.19 = 1.04 \text{ g/cm}^3$

=>  $\rho = \rho_s + n\rho_w \Rightarrow n = (\rho - \rho_s)/\rho_w = (1.74-1.04)/1 = 0.696$

=> Indice de vide  $e = 0.696/(1 - 0.696) = 2.29$

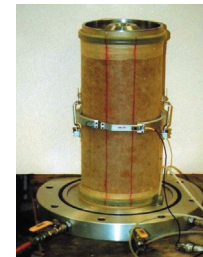
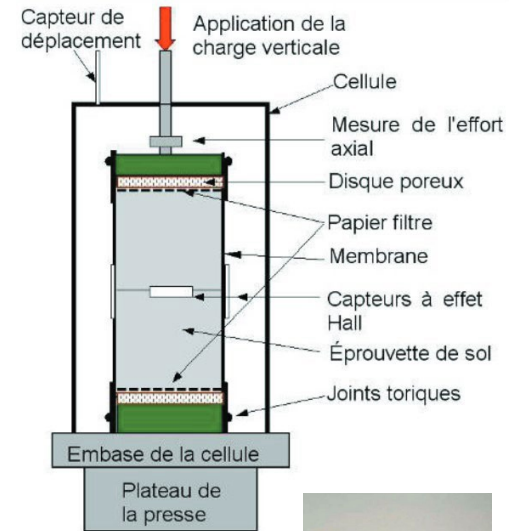
Autre méthode:

=> Volume de l'eau dans l'écht.  $V_w = M_w/\rho_w = 60/1 = 60 \text{ cm}^3$

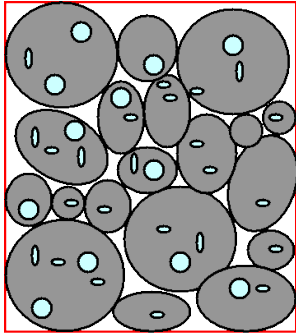
=> Volume du sol sec dans l'écht.  $V_s = V_{\text{tot}} - V_w = 86.193 - 60 = 26.193 \text{ cm}^3$

En considérant que tous les vides sont saturés en eau ( $V_v = V_w$ ):

=> Indice des vides  $e = V_v/V_s = 60/26.193 = 2.29$



# Caractérisation des roches non consolidées/masse volumique



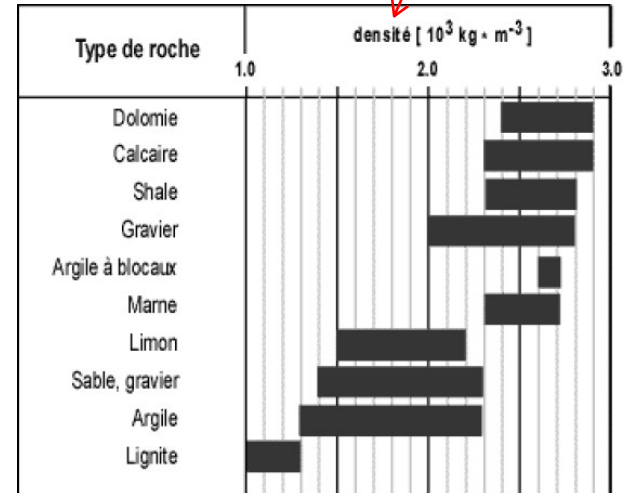
Volume apparent

Volume réel

Volume des pores

- Masse volumique apparente (ou en vrac),  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ):  $\rho_a = \frac{M_{mat}}{V_{app}}$
- Masse volumique réelle,  $\rho_r$  ( $\text{kg/m}^3$ ):  $\rho_r = \frac{M_{mat}}{V_r}$
- Masse volumique absolue,  $\rho_{abs}$  ( $\text{kg/m}^3$ ):  $\rho_r = \frac{M_{mat}}{V_r - V_{pore}}$

Masse volumique !



Source: Wohlenberg 1982

## Sables, graviers:

Masse volumique apparente : 1400 à 1600  $\text{kg/m}^3$

Masse volumique réelle : 2500 à 2650  $\text{kg/m}^3$

## Taille des particules du sol (granulométrie)

### Méthodes granulométriques:

- Sol dont les particules ont un diamètre moyen  $> 80 \mu$  : tamisage (tamis normalisés)
- Sol dont les particules ont un diamètre moyen  $< 80 \mu$  : sédimentation (loi de Stokes)

### Diamètres caractéristiques

- D60: diamètre de la maille laissant passer 60% du matériau (60% des grains ont un diamètre inférieur au D60)
- D30: diamètre de la maille laissant passer 30% du matériau
- D10: diamètre de la maille laissant passer 10% du matériau

### Coefficients caractéristiques:

Coefficient d'uniformité de Hazen,  $C_u$ :  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$  => indicateur de l'étalement de la courbe

- $C_u < 2$  : la granulométrie du sol est considérée comme uniforme
- $C_u > 2$  : la granulométrie du sol est considérée comme étalée

Coefficient de courbure,  $C_c$ :  $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} D_{10}}$  => indicateur de la forme de la courbe

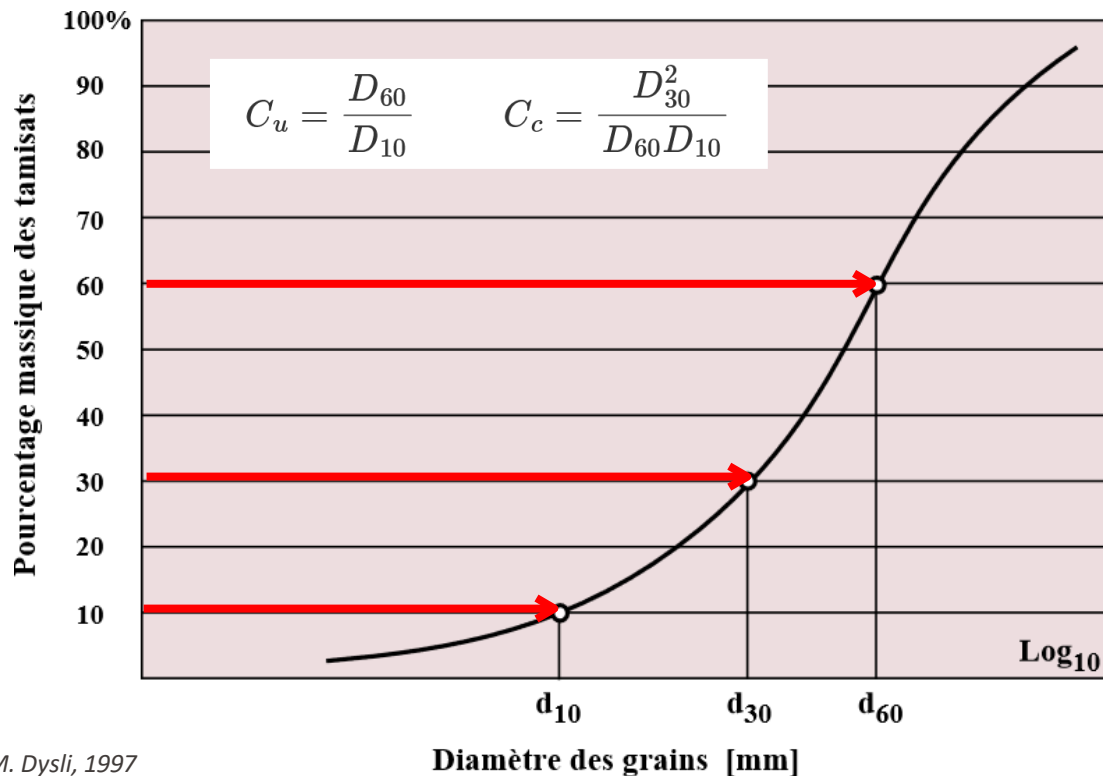
### Diamètres de référence:

Seuil des  $80 \mu$  : sépare les sols grenus des sols fins:

- Si plus de 50% des grains ont un diamètre supérieur à  $80 \mu$  => **sol grenu**
- Si plus de 50% des grains ont un diamètre inférieur à  $80 \mu$  => **sol fin**

# Caractérisation des roches non consolidées/granulométrie

Analyse de forme de la courbe granulométrique



# Caractérisation des roches non consolidées/granulométrie/ taille des particules/classification internationale

Différents types de classes de matériaux coexistent selon les domaines

Maxi	Appellation	Mini
200 mm	cailloux	20 mm
20 mm	graviers	2 mm
2 mm	sables grossiers	0,2 mm
0,2 mm	sables fins	20 µm
20 µm	limons	2 µm
2 µm	argiles	

Norme française NF P 18-560  
(domaine routier)

Taille (classes)	GB	F	Sous-classes	
200 mm	boulders (B)	cailloux		
60 mm	cobbles (Cb)	galets		
20 mm	gravel (G)	graviers	coarse gravel	graviers grossiers
6 mm			medium gravel	graviers moyens
2 mm			fine gravel	graviers fins
0.6 mm	sand (S)	sables	coarse sand	sables grossiers
0.2 mm			medium sand	sables moyens
0.06 mm			fine sand	sables fins
0.02	silt (M)	limons	coarse silt	limons grossiers
0.006			medium silt	limons moyens
0.002 mm			fine silt	limons fins
	clay (C)	argiles		

NON-COHÉSIFS

COHÉSIFS

≅ 80 µ

# Caractérisation des roches non consolidées/granulométrie/analyse/exemple

Question : A quel type de sol du modèle de sédimentation (péri-)glaciaire attribueriez-vous chacune de ces trois courbes granulométriques ?

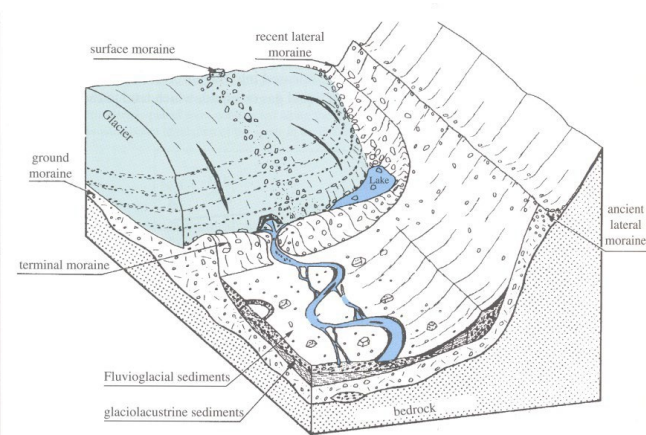
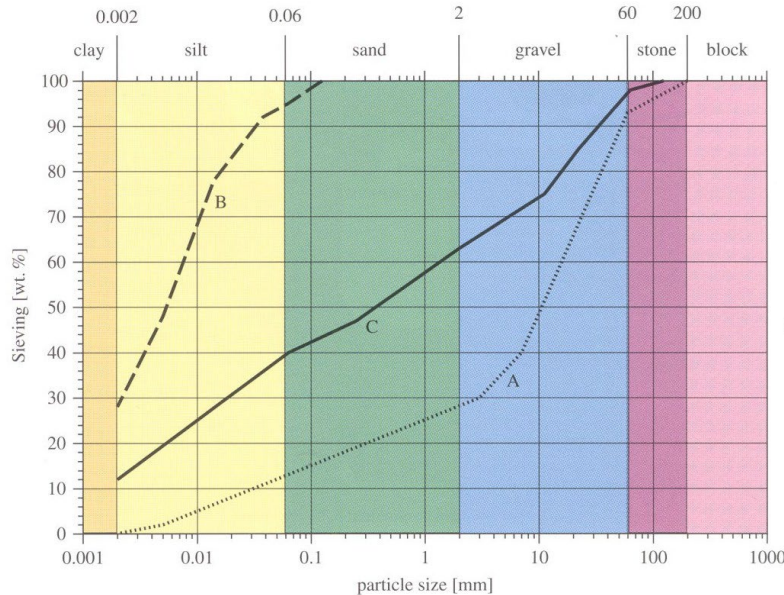


Fig. 8.55 The principal glacial and periglacial formations of a valley glacier.

Source: *Geology, Basics for engineers*,  
Parriaux 2009

# Caractérisation des roches non consolidées/granulométrie/ classification USCS (Unified Soil Classification System)

Major divisions (1)	Subdivisions (2)	USCS symbol (3)	Typical names (4)	Laboratory classification criteria (5)	
Coarse-grained soils (More than 50% retained on No. 200 sieve)	Gravels (More than 50% of coarse fraction retained on No. 4 sieve)	GW	Well-graded gravels or gravel-sand mixtures, little or no fines	Less than 5% fines*	$C_u \geq 4$ and $1 \leq C_c \leq 3$
		GP	Poorly graded gravels or gravelly sands, little or no fines	Less than 5% fines*	$C_u < 4$ and/or $1 > C_c > 3$
		GM	Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures	More than 12% fines*	Minus No. 40 soil plots below the A-line
		GC	Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures	More than 12% fines*	Minus No. 40 soil plots on or above the A-line
	Sands (50% or more of coarse fraction passes No. 4 sieve)	SW	Well-graded sands or gravelly sands, little or no fines	Less than 5% fines*	$C_u \geq 6$ and $1 \leq C_c \leq 3$
		SP	Poorly graded sands or gravelly sands, little or no fines	Less than 5% fines*	$C_u < 6$ and/or $1 > C_c > 3$
		SM	Silty sands, sand-silt mixtures	More than 12% fines*	Minus no. 40 soil plots below the A-line
		SC	Clayey sands, sand-clay mixtures	More than 12% fines*	Minus No. 40 soil plots on or above the A-line
Fine-grained soils (50% or more passes the No. 200 sieve)	Sils and clays (liquid limit less than 50)	ML	Inorganic silts, rock flour, silts of low plasticity	Inorganic soil	$PI < 4$ or plots below A-line**
		CL	Inorganic clays of low plasticity, gravelly clays, sandy clays, etc.	Inorganic soil	$PI > 7$ and plots on or above A-line**
		OL	Organic silts and organic clays of low plasticity	Organic soil	LL (oven dried)/LL (not dried) $< 0.75$
	Sils and clays (liquid limit 50 or more)	MH	Inorganic silts, micaceous silts, silts of high plasticity	Inorganic soil	Plots below A-line
		CH	Inorganic highly plastic clays, fat clays, silty clays, etc.	Inorganic soil	Plots on or above A-line
		OH	Organic silts and highly plastic organic clays	Organic soil	LL (oven dried)/LL (not dried) $< 0.75$
Peat	Highly organic	PT	Peat and other highly organic soils	Primarily organic matter, dark in colour, and organic odor	

## USCS key to symbol:

Préfixe: **G** = gravel size, **S** = sand size, **M** = silt size, **C** = clay size, **O** = organic material.

Suffixe: **W** = well graded coarse material, **P** = poorly graded coarse material, **M** = silt fines, **C** = clay fines, **L** = low plasticity, **H** = high plasticity.

NB: U.S. standard Sieves size and corresponding particle size are  $n^{\circ}4 = 4.75$  mm,  $n^{\circ}10 = 2.0$  mm,  $n^{\circ}40 = 0.42$  mm,  $n^{\circ}200 = 0.075$  mm

$C_u$  (coefficient of uniformity) =  $D_{60}/D_{10}$ ;  $C_c$  (coefficient of curvature) =  $(D_{30})^2/(D_{10} \times D_{60})$ .

\* "Fines" are those soil particles that pass the No. 200 sieve. For gravels and sands with between 5 and 12% fines, use of dual symbols is required (i.e., GW-GM, GW-GC, GP-GM, or GP-GC).

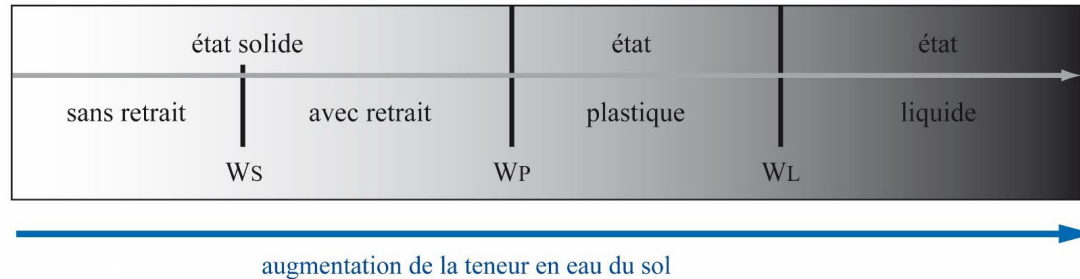
\*\* If  $4 \leq PI \leq 7$  and PI plots above A-line, then dual symbols (i.e., CL-ML) are required.

# EPFL Caractérisation des roches non consolidées/limites d'Atterberg et état d'un sol

## Les indicateurs pour les sols fins ou cohérents

- Influencent le comportement d'un sol fin: la composition minéralogique, la structure (arrangement des particules) et la teneur en eau.

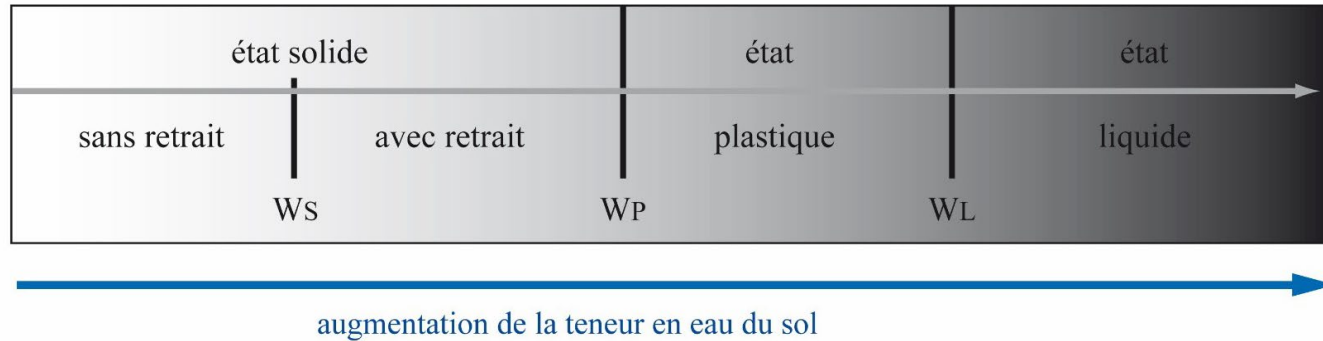
Les **essais spécifiques** sur la fraction inférieure à 400  $\mu\text{m}$  => caractérisation du sol et «prévision» de son comportement.



## Limites d'Atterberg

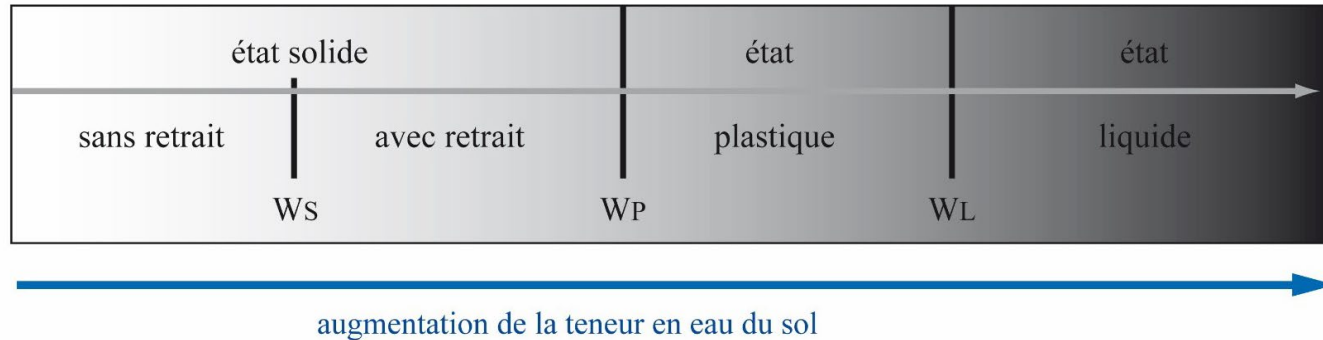
- $W_s$  : limite de retrait (entre un solide sans retrait (ne contenant plus d'eau adsorbée) et un solide avec retrait (présentant un changement de volume lié au départ d'eau adsorbée))
- $W_p$  : limite de plasticité (entre état solide et état plastique)
- $W_l$  : limite de liquidité (entre état plastique et état liquide)

# Caractérisation des roches non consolidées/limites d'Atterberg et état d'un sol



- **Etat solide:** le sol a le comportement d'un solide, l'application d'un effort n'entraîne que de faibles déformations.
- **Etat plastique:** le sol est stable naturellement mais, dès qu'un effort lui est appliqué, il est le siège de déformations importantes, en grande partie non réversibles, sans variation notable de volume et sans apparition de fissures.
- **Etat liquide à teneur en eau élevée:** le sol se comporte comme un liquide, sa résistance au cisaillement est nulle.

# EPFL Caractérisation des roches non consolidées/limites d'Atterberg et état d'un sol



- La **limite de plasticité** ( $W_p$  ou  $LP$ ) caractérise la transition entre un état solide et un état plastique. Cette limite indique la teneur en eau pondérale\*, en pourcentage, maximale pour travailler un sol et éviter la compaction.
- La **limite de liquidité** ( $W_l$  ou  $LL$ ) caractérise la transition entre un état plastique et un état liquide. C'est la teneur en eau pondérale\*, exprimée en pourcentage, au-dessus de laquelle le sol s'écoule comme un liquide visqueux sous l'influence de son propre poids.

\*Teneur en eau pondérale: = masse d'eau (g)/masse de sol sec (g)

**EPFL** Caractérisation des roches non consolidées/WL/Quick clay/exemple

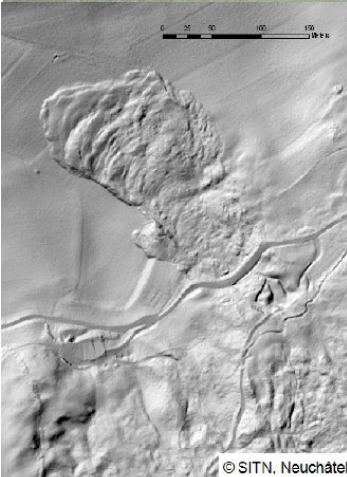
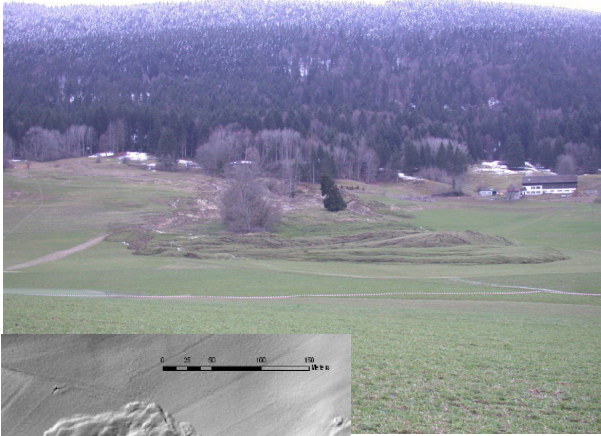


**EPFL** Caractérisation des roches non consolidées/WL/Quick  
clay/exemple, Alta, 06-2020, Norway

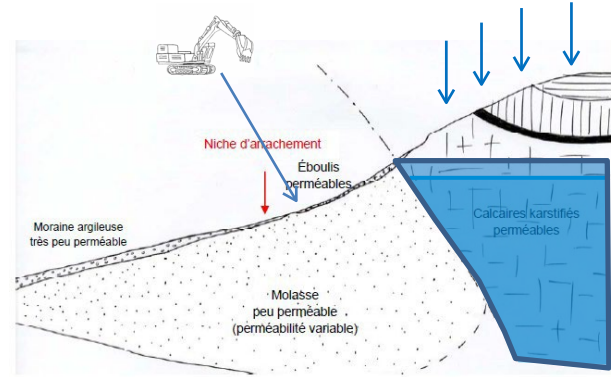


Alta landslide, Norway, 06-2020

# Caractérisation des roches non consolidées/Limites d'Atterberg et état d'un sol/exemple

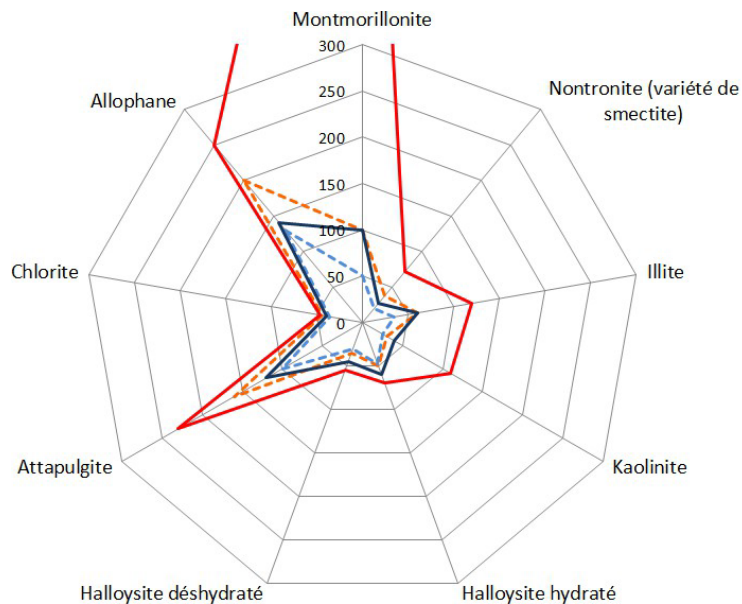


Glissement de terrain de Travers NE, CH (avril 2006)



Krähenbuehl, 2007



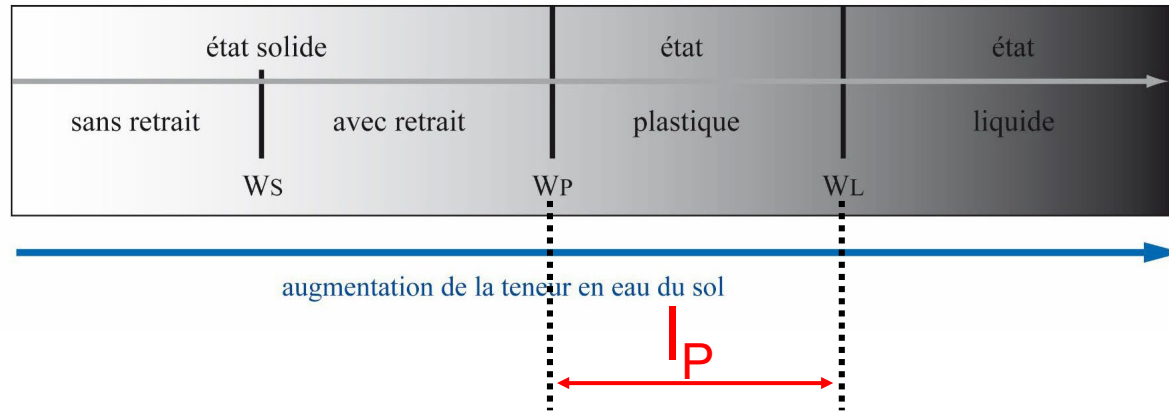


**Limites d'Atterberg pour les minéraux argileux**  
(d'après Merrien-Soukatchoff & al, 2003)

- Limite de liquidité WL min (%)
- Limite de liquidité WL max (%)
- Limite de plasticité Wp min (%)
- Limite de plasticité Wp max (%)

Minéral	Limite de liquidité WL (%)	Limite de plasticité WP (%)
Montmorillonite	100-900	50-100
Nontronite (variété de smectite)	37-72	19-27
Illite	60-120	35-60
Kaolinite	30-110	25-40
Halloysite hydraté	50-70	47-60
Halloysite déshydraté	35-55	30-45
Attapulgite	160-230	100-120
Chlorite	44-47	36-40
Allophane	200-250	130-140

# EPFL Caractérisation des roches non consolidées/Limites d'Atterberg/indice de plasticité



L'indice de plasticité ( $I_p$ ) mesure l'étendue de la plage de teneur en eau dans laquelle le sol se trouve à l'état plastique

indice de plasticité,  $I_p = W_L - W_P$

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

# EPFL Caractérisation des roches non consolidées/Limites d'Atterberg/indice de plasticité/exemple

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

## La plasticité d'un sol dépend :

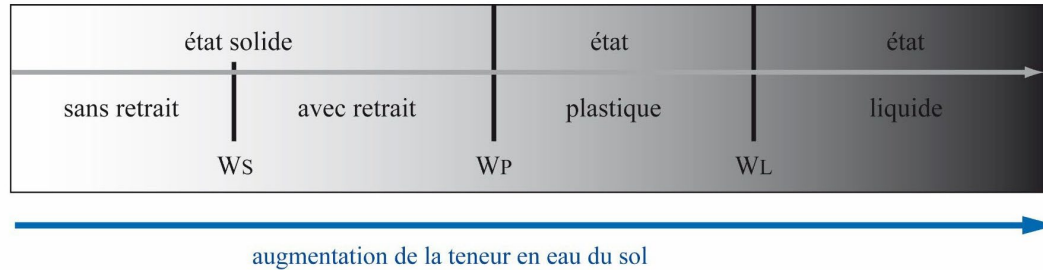
- de l'importance de la fraction argileuse
- de la nature des argiles (p.ex. montmorillonite)
- De la nature des cations adsorbés sur les argiles (p.ex. Na<sup>+</sup>)

**Exemple:** molasse du Lauragais (molasse marneuse) , Garonne (F) – LPC-Toulouse

	Molasse saine	Molasse altérée
Aspect macroscopique	bariolée souvent bleutée et ocre	concrétions calcaires filonnets de calcite pas de bleu mais du brun
Poids vol. $\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	2,15 à 2,5	1,98 à 2,07
Poids vol. sec $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	1,85 à 2,2	1,52 à 1,80
CaCo <sup>3</sup> (%)	30 à 60	4 à 17
Angle de frottement $\varphi'$	26° à 34°	12° à 20°
Cohésion effective $c'$ (k Pa)	50 à 160	0 à 40
Célérité $V_s$ (m/s)	1 400 à 2 300	1 000 à 1 400
Module pressiométrique $E$ (MPa)	100 à 410	30 à 70
Indice de plasticité $I_p$	10 à 25	20 à 45
Limite de liquidité $w_L$	30 à 40	44 à 90

Figure 10 : Chute des caractéristiques entre molasse saine et altérée

# EPFL Caractérisation des roches non consolidées/Limites d'Atterberg/consistance



La consistance du sol désigne à la fois la force qui retient ensemble les divers matériaux du sol ou la résistance des sols à la déformation et à la rupture.

L'indice de consistance ( $I_C$ ) est un indicateur dérivé:

$$I_C = (W_L - W) / I_p$$

Avec:  $w$  = teneur en eau normale de l'échantillon,  
 $W_L$  = limite de liquidité,  $I_p$  = indice de plasticité  $W_L - W_p$

Indice de consistance $I_c$	Consistance
$I_c < 0$	Liquide
$0 < I_c < 0.25$	Pâteuse ou très molle
$0.25 < I_c < 0.5$	Molle
$0.5 < I_c < 0.75$	Ferme
$0.75 < I_c < 1$	Très ferme
$I_c > 1$	Dure

Généralement, plus la consistance d'un sol augmente, plus sa compressibilité diminue.

# EPFL Caractérisation des roches non consolidées/Limites d'Atterberg/compressibilité

**Définition:** diminution du volume d'une masse de sol lorsque cette masse supporte une charge  
Cette diminution de volume procède par diminution de l'air et de l'eau du sol (consolidation du sol)

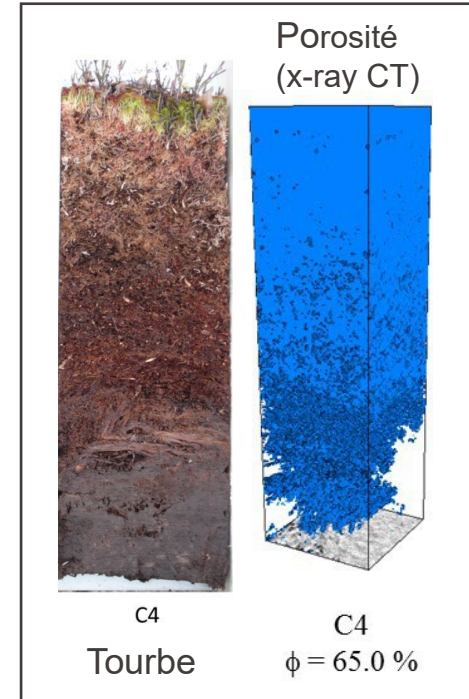
Cette diminution est relativement faible dans les sols grossiers, relativement élevée dans les sols fins et organiques.

Dans les sols fins, la compressibilité peut être catégorisée selon la limite de liquidité (LL) du sol:

- $LL < 30$  : compressibilité faible
- $30 < LL < 50$  : compressibilité moyenne
- $LL > 50$  : compressibilité forte

En général la compressibilité est proportionnelle à l'indice de plasticité (IP)

NB: Mesure de compressibilité: test oedométrique



# EPFL Caractérisation des roches non consolidées/Limites d'Atterberg/méthodes de mesure

## Détermination des limites d'Atterberg

L'essai s'effectue sur le mortier du sol (fraction inférieure à 400  $\mu\text{m}$ ).

**Limite de liquidité** : Le sol est mélangé à une quantité d'eau. La pâte obtenue est placée dans une coupelle de 100 mm de diamètre environ. On trace sur la pâte lissée une rainure normalisée avec un outil spécial. A l'aide d'une came, on fait subir une série de chocs à la coupelle. On observe en fin d'expérience le contact des deux lèvres de la rainure. La limite de liquidité est la teneur en eau en % qui correspond à une fermeture en 25 chocs.

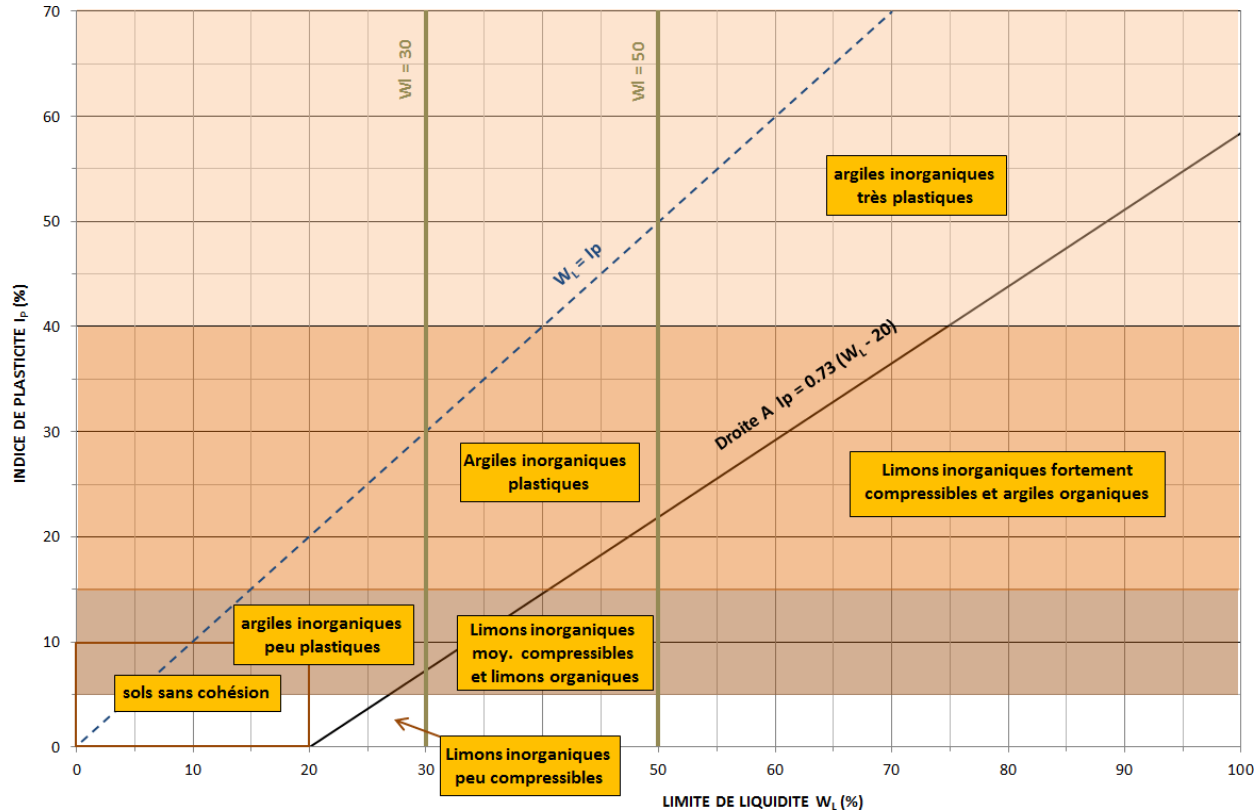
**Limite de plasticité** : On mélange l'échantillon avec des quantités variables d'eau; on façonne avec la pâte un rouleau de 6 mm de diamètre pour une centaine de mm de longueur. Puis on atteint 3mm de diamètre en le roulant (souvent avec les doigts), après 5 à 10 aller-retour maximum. La limite de plasticité est la teneur en eau en % du rouleau qui se fissure et se brise lorsqu'il atteint un diamètre de 3 mm.

La précision de l'essai est de l'ordre du demi-point de teneur en eau pour la détermination de la limite de liquidité et du point de teneur en eau pour la détermination de la limite de plasticité.

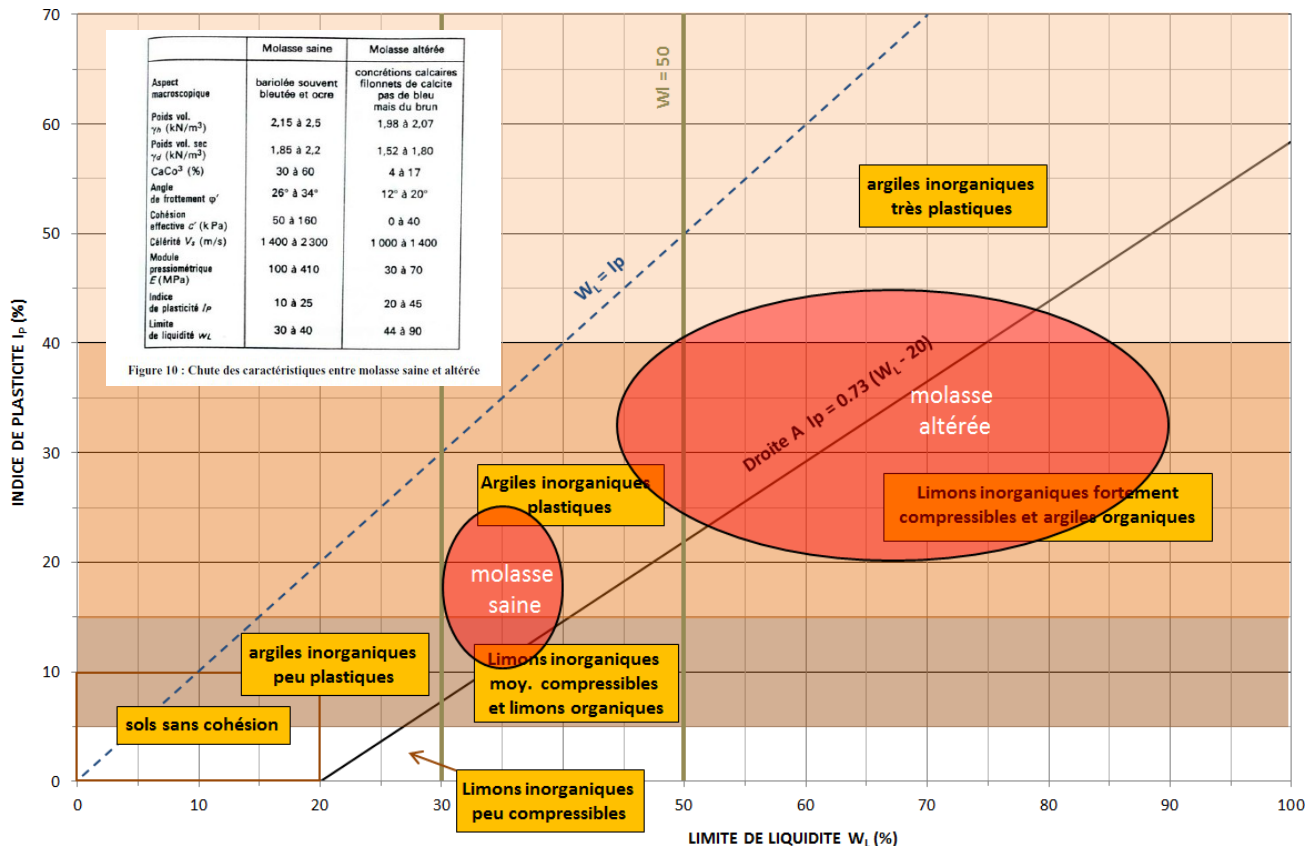
Plus d'info: [ftp://ftp.fao.org/FI/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706f/x6706f08.htm](ftp://ftp.fao.org/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f08.htm)



# Caractérisation des roches non consolidées/Limites d'Atterberg/diagramme de Casagrande



# Caractérisation des roches non consolidées/ Limites d'Atterberg/ diagramme de Casagrande/exemple de la molasse du Lauragais



SOLS GRENUS	Densité D (%)	Poids volumique du sol sec $\gamma_d$ ( $kN/m^3$ )	Teneur en eau w (%)	Indice de vide e -
Très lâche	0-15	< 14.0	> 16.0	> 0.9
Lâche	15-35	14.0-16.0	12.0-16.0	0.65-0.9
Moyennement serré	35-65	16.0-17.5	8.0-12.0	0.55-0.65
serré	65-85	17.5-18.5	6.0-8.0	0.4-0.55
Très serré	85-100	> 18.5	< 6.0	< 0.4

SOLS FINS	Indice de liquidité $I_L$ (-)	Poids volumique du sol sec $\gamma_d$ ( $kN/m^3$ )	Teneur en eau w (%)	Indice de vide e -
Très tendre	1.00-0.80	< 14.0	> 55	> 1.3
Tendre	0.80-0.65	14.0-16.0	40-55	1.0-1.3
Ferme	0.65-0.40	16.0-17.0	25-40	0.7-1.0
Rigide	0.40-0.25	17.0-18.0	15-25	0.5-0.7
Dur	< 0.25	> 18.0	< 15	< 0.5

Source: Valejo & Ferrer, 2011

# EPFL Caractérisation des roches non consolidées/Analyse/exercice

## ANALYSE DE SOL

### Echantillon #1

Tamisage		
Dimension	refus	[%] pondéral
[mm]	[%]	cumulé
63	0.0	100.0
31.5	19.8	80.2
16	11.8	68.5
8	8.6	59.9
4	6.9	53.0
2	5.2	47.8
0.5	9.9	37.9
0.09	8.4	29.5

Sédimentométrie	
Ø équiv.	[%] pondéral
[mm]	cumulé
0.0552	26.2
0.0407	24.4
0.0299	22.6
0.0197	20.6
0.0119	18.0
0.0072	15.5
0.0046	12.6
0.0030	10.1
0.0014	7.6

Masse totale de l'échantillon: 15'457 g

Observation:

Déduction d'une pierre lors du premier tamisage car trop grosse. ( L = 150mm ; d = 80mm ; Ms = 1759.04g)

Identification	
Fraction fine ( $\emptyset < 0.06$ mm) [%]	26.8
Uniformité $C_{ud}$ [-]	2768.0
Courbure $C_{cd}$ [-]	0.43
Diamètre à 10% $D_{10}$ [mm]	0.003
% < 0.02 mm [%]	20.6
Limite de liquidité $w_L$ [%]	21.9
Indice de plasticité $I_p$ [%]	6.3
Classification selon SN 670'004-2a (ou USCS)	?

Nature de l'échantillon:	?
--------------------------	---

## Résolution (échantillon #1)

- 1) > 50% (env. 72%) retenu sur tamis n° 200 => **coarse grained soil**
- 2) > 50% (env. 47% + galet 80mm non inclus ) retenu sur tamis n° 4 => **gravel** (mais proche de sand)
- 3) > 12% (env. 28) passent le tamis n° 200 =>
  - 1) **Silty gravel or gravel- sand-silt mixture (GM)**
  - 2) **Clayey gravel or gravel-sand-clay mixture (GC)**
- 4) Les fines (< 0.42 mm) se situent au dessus de la ligne A du diagramme de plasticité de Casagrande  
=> **GC**

**Résultat:** l'échantillon #1 est un **sol gravelo-argilo-sableux** , ou un **mélange gravelo-sablo-argileux** de type USCS « **GC** »

Dénomination visuelle: **gravier limono-sableux**

Classification selon norme SN 670-004-2a: **GC-GM**

# Caractérisation des roches non consolidées/caractérisation visuelle sur site lors des carottages



Source: Karakas & Français SA

# Caractérisation des roches non consolidées/ caractérisation visuelle sur site lors des carottages/ logs de forage (type géotechnique)

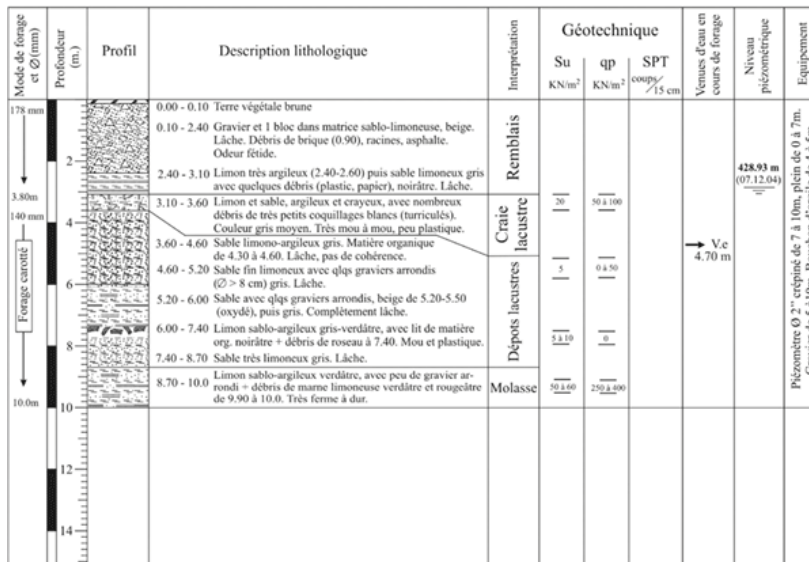
Méthode de forage Ø mm.		Observations  Essais in situ	Eau nappe → venue	COUPE DU SONDAGE				CARACT. ECHANT.				ESSAIS EXECUTES									
				Nomenclature et couleur des sols ①				Profondeur des limites des couches	Profondeur des échantillons	qu kg/cm <sup>3</sup>	γ /m <sup>3</sup>	w %	γ <sub>s</sub> /m <sup>3</sup>	e	Sr %	Granulométrie	Limites d'ATTERBERG	Cisaillement	Oedomètre	Proctor	Perméabilité
					Mat. org.																
					0.4	0.4	0.4														
					32.6	31.7	33.0	CL	31	16	1.94	1.94	34.6	2.76	0.956	100	X	X			
					32	31.7	33.0	CL	17	17	1.94	1.94	34.6	2.76	0.956	100	X	X			
					32	31.7	33.0	CL	18	18	1.94	1.94	34.6	2.76	0.956	100	X	X			
					33	31.7	33.0	CL	33	33	1.94	1.94	34.6	2.76	0.956	100	X	X			

Source: cadastre géol. Canton de VD

# Caractérisation des roches non consolidées/ caractérisation visuelle sur site lors des carottages/ logs de forage (type géologique/géotech.)

Annexe 17

<b>Bureau J.-F. Mages SA</b> GÉOLOGIE-HYDROGÉOLOGIE-ENVIRONNEMENT CH - 2520 LA NEUVEVILLE	<b>St-Joux, La Neuveville - Stabilisation de la zone</b> Phase d'avant-projet	<b>FORAGE: KB-01</b> Profondeur atteinte: <b>10.0 m</b> Date d'exécution: <b>23. 11. 2004</b>
	Mandat: 224-St-JOUX-PLAGE	Coordonnées: Y:213°033.14 X:575°983.78 Altitude (soif): 432.85 m Altitude (tube inclino): Altitude (tube piézo): 431.85 m
Maître d'ouvrage: Commune de La Neuveville		
Entreprise de forage: Tecfor SA - Collombey		



Figurent classiquement sur un levé (log) de forage:

- Données de réalisation
- Mode de forage
- Profondeur des couches
- Profil figuré
- Description lithologique
- Interprétation géologique
- Paramètres géotechniques
- Venues d'eau
- Niveaux piézométriques
- Équipement
- Dossier photo (annexe)

Extrait d'un relevé de forage carotté à but géotechnique.  
Source: Bureau J.-F. Mages SA