



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Cours de physique du sol

Propriétés de base du sol et de la phase liquide

Copie des transparents

Version provisoire

Prof. A. Mermoud

Janvier 2006

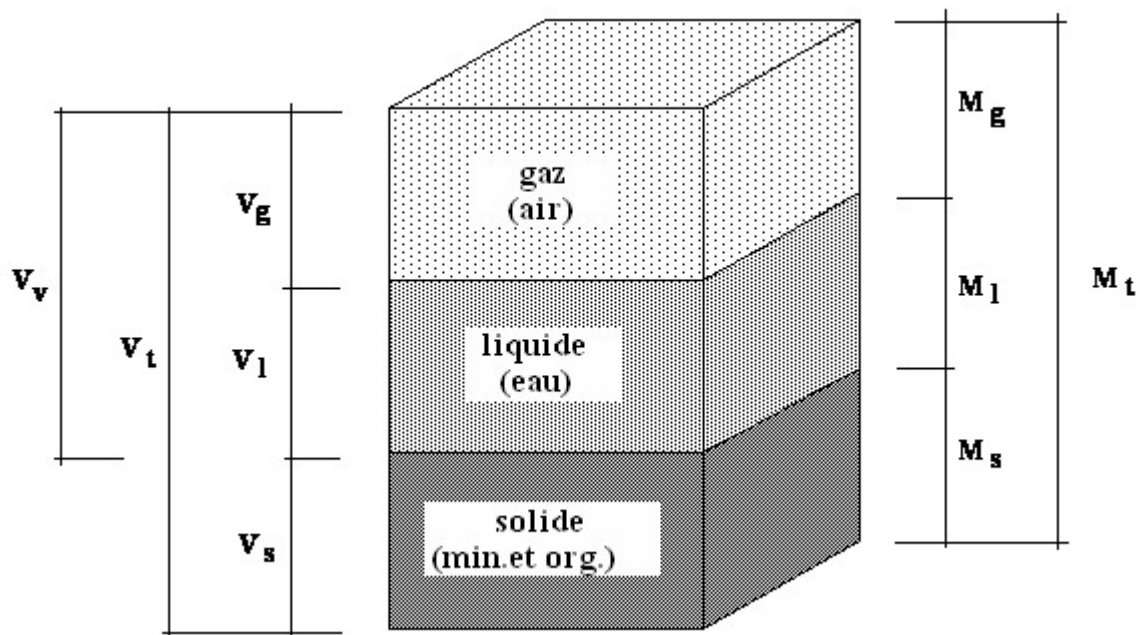


Propriétés de base de la phase solide du sol



Relations volumiques

Relations massiques



V_t : volume total de l'élément considéré

V_s : volume des particules solides

V_l : volume de la phase liquide

V_g : volume de la phase gazeuse (air)

V_v : volume des vides

M_t : masse totale

M_s : masse de la phase solide

M_l : masse de la phase liquide

M_g : masse de la phase gazeuse (air)

Principales propriétés physiques des sols

- **Texture***

- **Structure****

- **Masse volumique réelle du sol ρ_s**

$$\rho_s = \frac{\text{masse des particules de sol sec}}{\text{volume des particules de sol sec}} = \frac{M_s}{V_s}$$

- **Masse volumique sèche ρ_d**

$$\rho_d = \frac{\text{masse sèche du sol}}{\text{volume total de sol}} = \frac{M_s}{V_t}$$

- **Porosité totale**

- **Porosité de drainage**

- **Fractions volumiques**

- **Surface spécifique**

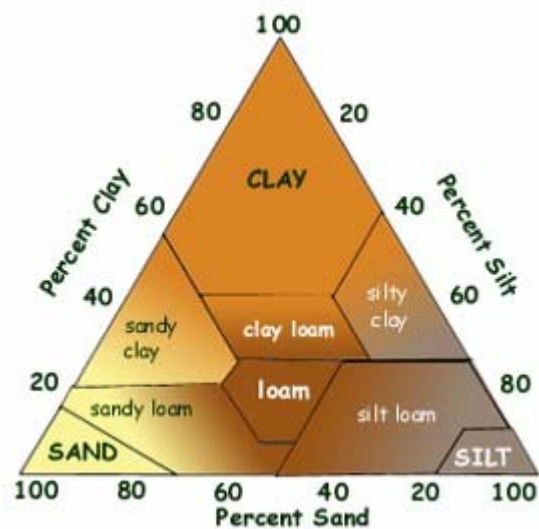
* Soil texture refers to the relative proportion of the different soil mineral constituents (separates) : sand, silt and clay. Soil separates refers to mineral particles ranging between specified size limits.

** Soil structure refers to the way soil particles are grouped together into larger aggregates

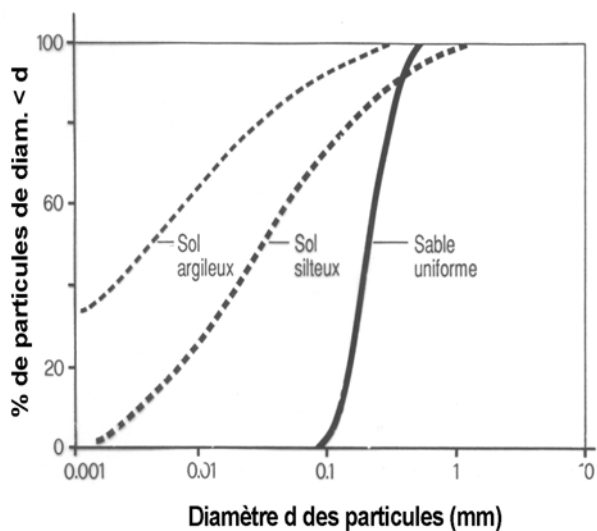
Texture du sol: proportion des particules minérales de différentes tailles qui composent le sol

Limites granulométriques fréquemment admises:

- Argile: $< 0.002 \text{ mm}$
- Silt: $0.002 - 0.05 \text{ mm}$
- Sable: $0.05 - 2 \text{ mm}$
- Gravier: $> 2 \text{ mm}$



Exemple de triangle textural



Courbes granulométriques

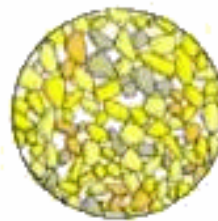
Structure du sol : mode d'assemblage des particules de sol



STRUCTURE COMPACTE

Eléments sableux noyés dans une masse d'argile

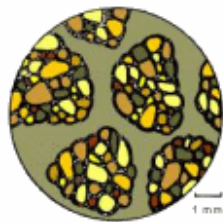
Sol **asphyxiant**



STRUCTURE PARTICULAIRE

Eléments sableux de taille variable sans liaison

Sol **filtrant**



STRUCTURE EN AGREGATS

Eléments sableux et silteux liés en agrégats par un ciment argilo-humique

Sol **perméable** assurant une bonne aération

Masse volumique réelle de quelques sols et constituants

Sols minéraux	2600	$< \rho_s < 2700$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Matière organique	1200	$< \rho_s < 1500$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Sols organiques (MO > 30 %)	1400	$< \rho_s < 2000$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Eau (4 °C)	$\cong$	1000	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Air	1	$< \rho_s < 1.5$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Masse volumique sèche de quelques sols

Sols tourbeux	200	$< \rho_d < 1000$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Sols silteux ou argileux bien structurés	1000	$< \rho_d < 1500$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Sols sableux	1400	$< \rho_d < 1700$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Porosité totale n

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

$$n = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

Valeurs indicatives de la porosité totale pour des sols meubles

- sols argileux et silteux	40 - 60%
- sables fins	40 - 50%
- sables moyens	35 - 40%
- sables grossiers	25 - 35%
- graviers	20 - 30%
- sols tourbeux	80 - 85%

Porosité de drainage μ

$$\mu = \frac{\text{Volume macroporosité}}{\text{Volume total de sol}}$$

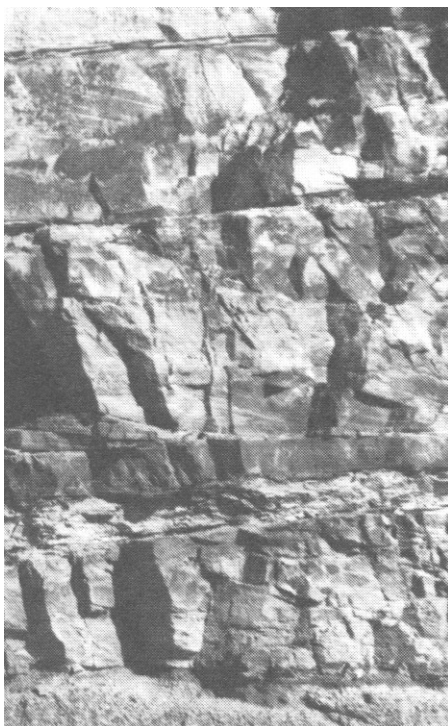
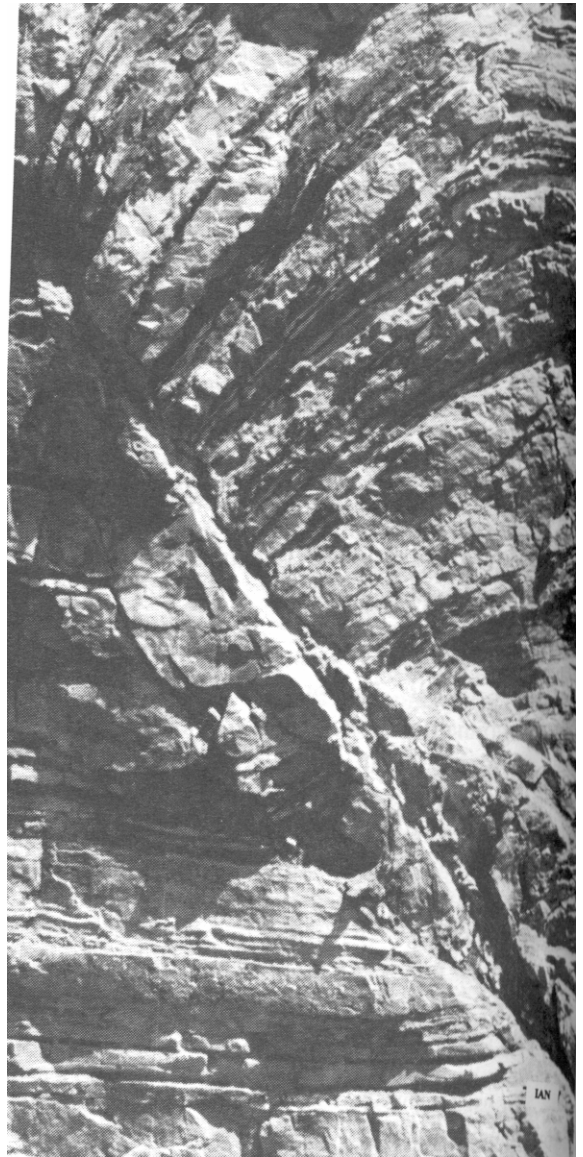
Valeurs indicatives de la porosité de drainage

- | | |
|--------------------------------------|----------|
| - gravier | 20 - 30% |
| - sable grossier | 25 - 30% |
| - sable moyen | 20 - 25% |
| - sable fin | 15 - 20% |
| - sable très fin | 10 - 15% |
| - sol argileux : moins de quelques % | |

Porosité des roches consolidées

En milieux compacts ou consolidées (roches diverses, granites, schistes, roches carbonatées,...), la porosité est liée à l'existence de *fissures*, *failles*, *fentes* ou *cheneaux* de dissolution

- ♦ milieux perméables en grand
- ♦ porosité très variable
 - ✓ porosité de fissures (roches compactes fissurées)
 - ✓ porosité de cheneaux (roches solubles)



**Roches consolidées
fissurées**

Fractions volumiques ε du sol

Exprime le rapport du volume de la phase considérée au volume total de sol:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume de la phase considérée}}{\text{Volume de sol}}$$

- ✓ Fraction vol. de la phase solide: $\varepsilon_s = V_s/V_t$
- ✓ Fraction vol. de la phase gazeuse: $\varepsilon_g = V_g/V_t$
- ✓ Fraction vol. de la phase liquide: $\varepsilon_l = V_l/V_t$

Surface spécifique s d'un sol

$$S = \frac{A}{M_s}$$

(m² · kg⁻¹)

A : surface totale d'une masse M_s de particules

A peut parfois se calculer (particules uniformes)

Plus généralement, A se détermine expérimentalement (mesure de l'adsorption d'un gaz ou de substances liquides polaires)

s : f (dimension et forme des particules)

La surface spécifique influence notamment:

- La capacité d'échange des cations (CEC)
- La sorption des éléments nutritifs
- La sorption des substances chimiques
- La rétention de l'eau aux faibles humidités
- Les phénomènes de gonflement et de retrait

Capacité d'échange et surface spécifique de quelques éléments colloïdaux ou non

Nature des colloïdes	CEC (meq·100g ⁻¹)	Surface spécifique (m ² ·g ⁻¹)
Matière organique	200 à 500	500 à 800
Vermiculite	100 à 150	600 à 800
Montmorillonite	80 à 150	600 à 800
Illite	10 à 40	60 à 100
Kaolinite	3 à 15	5 à 30
Oxydes et hydroxydes	2 à 6	100 à 800

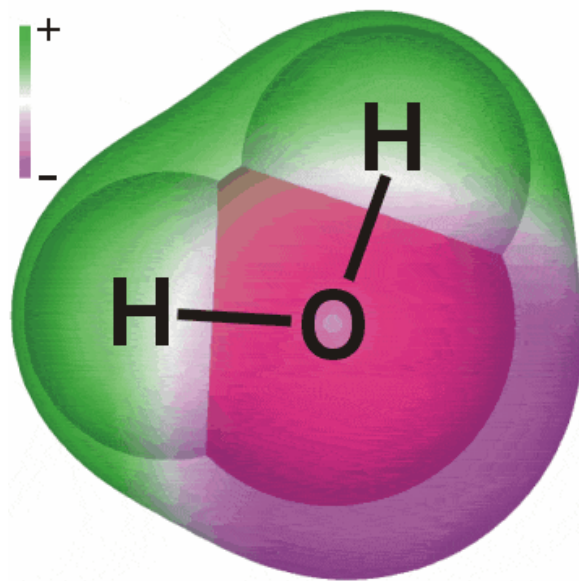
Silt

env. 1

Sable

env. 0.05

Propriétés de base de la phase liquide du sol



<http://www.lsbu.ac.uk/water/molecule.html>

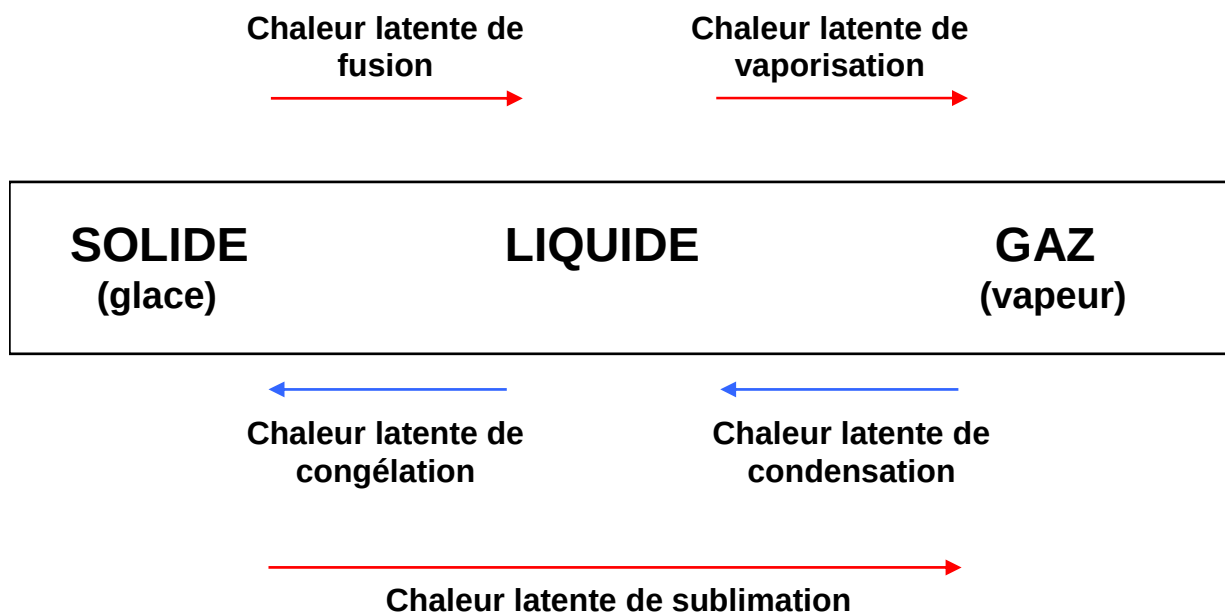
Représentation schématique et répartition des charges de la molécule d'eau

L'arrangement asymétrique des atomes de la molécule et la différence d'électronégativité génèrent une **polarisation de la molécule**

Ceci explique, en particulier:

- sa capacité à être adsorbée sur les surfaces solides
- sa faculté d'hydratation des ions et des colloïdes
- sa chaleur latente de vaporisation et son point d'ébullition élevés
- sa constante diélectrique très élevée (env. 80)
- ses remarquables propriétés de solvant

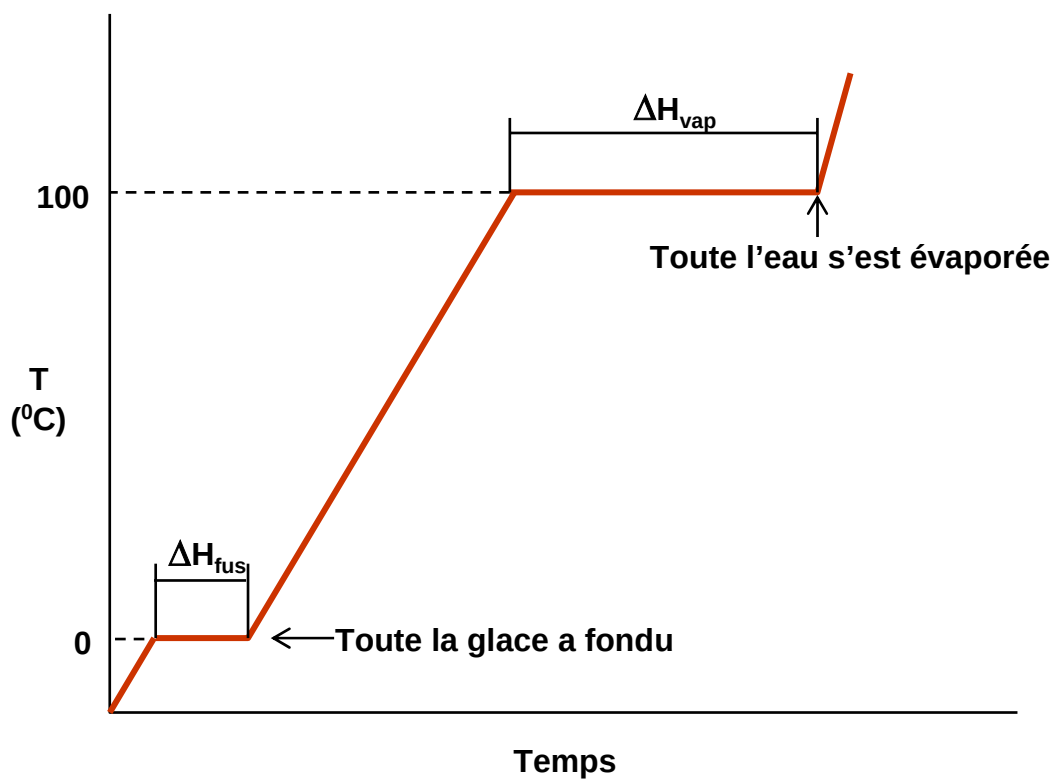
Changements d'état de l'eau



→ rupture de ponts hydrogène → consommation d'énergie

← reconstitution de ponts hydrogène → libération d'énergie

Courbe d'échauffement de l'eau



Echauffement d'un volume donné d'eau, initialement à -10°C , soumis à un apport constant de chaleur (J/min)

ΔH_{fus} : chaleur latente ou enthalpie de fusion (> 0 car la fusion absorbe de l'énergie).

Viscosité dynamique

Caractérise la résistance offerte par un fluide à l'écoulement. Si la distribution des vitesses n'est pas uniforme (cas général), des efforts tangentiels (contraintes de cisaillement) se manifestent entre couches d'eau adjacentes.

Soit deux lames d'eau adjacentes de surface S , distantes de dz et glissant l'une sur l'autre. Si l'on veut maintenir un gradient de vitesse dv/dz entre les deux couches, il faut appliquer une force F telle que:

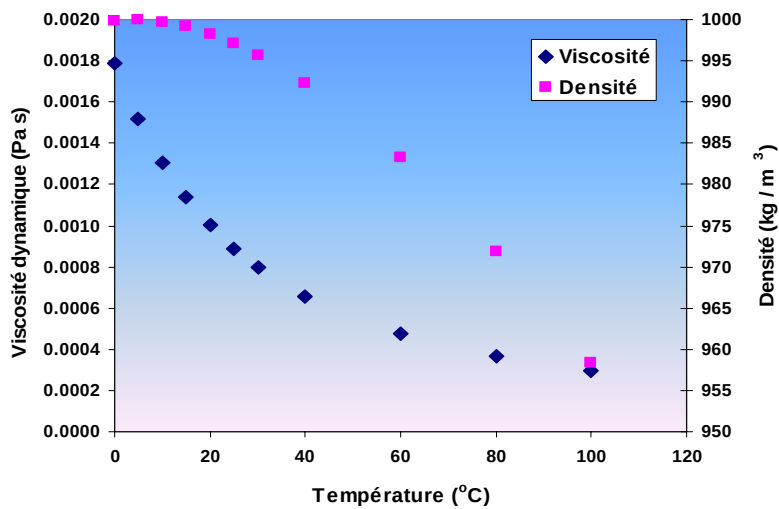
$$\left. \begin{array}{l} F \approx S \\ F \approx dv/dz \end{array} \right\} \quad F = \mu S \frac{dv}{dz}$$

$$\text{soit:} \quad \mu = \frac{F}{S \, dv/dz} \quad (\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}), (\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}) \text{ ou } (\text{Pa}\cdot\text{s})$$

μ : coefficient de viscosité dynamique

Le rapport F/S exprime la **contrainte de cisaillement** τ :

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{dv}{dz} \quad (\text{Pa})$$



Relation température de l'eau - viscosité dynamique et densité

Viscosité cinématique ν

Donnée par le rapport entre la viscosité dynamique μ et la masse volumique du fluide ρ , elle exprime la viscosité d'un fluide indépendamment de sa masse volumique et traduit mieux globalement son comportement visqueux:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$$

	Eau	Air
$\rho \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$	999.1	1.225
$\mu \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$	$1.14 \cdot 10^{-3}$	$1.78 \cdot 10^{-5}$
$\nu \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$1.14 \cdot 10^{-6}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$

Masse volumique ρ , viscosité dynamique μ et viscosité cinématique ν ($T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 1 \text{ bar}$)

Capacité thermique (chaleur spécifique)

Quantité de chaleur qu'il faut fournir à une substance pour élever sa température de 1 °C. Selon qu'on rapporte cette énergie à la masse ou au volume, on définit:

- la capacité thermique massique c_F (J kg⁻¹ K⁻¹)
- la capacité thermique volumique C_F (J m⁻³ K⁻¹)

	c_F (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Eau	4200
Sol sec	env. 800
Air	966

Valeurs indicatives de la capacité thermique massique c_F

On observe que la capacité thermique massique de l'eau est environ 5 fois plus élevée que celle d'un sol sec.

Expressions de la teneur en vapeur d'eau de l'air

- **Pression partielle de vapeur p_v**

En particulier, pression de vapeur saturante p_{vs} , fonction de:

- a) Température T (°C): $p_{vs} = 611 \exp\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right)$ (Pa)
- b) Pression du liquide
- c) Composition chimique du liquide

- **Humidité relative H_r**

$$H_r = \frac{p_v}{p_{vs}} 100 \quad (\%)$$

- **Densité de vapeur ρ_v ou conc. de vapeur C_v**

$$\rho_v = C_v = \frac{M_v}{V_a} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$$

Relation entre C_v et p_v :

$$C_v = \frac{m_v}{R T} p_v \quad m_v : \text{masse molaire de l'eau}$$

- **Température du point de rosée t_{pr}^***

* température à laquelle il faut abaisser une masse d'air donnée pour que débute la condensation

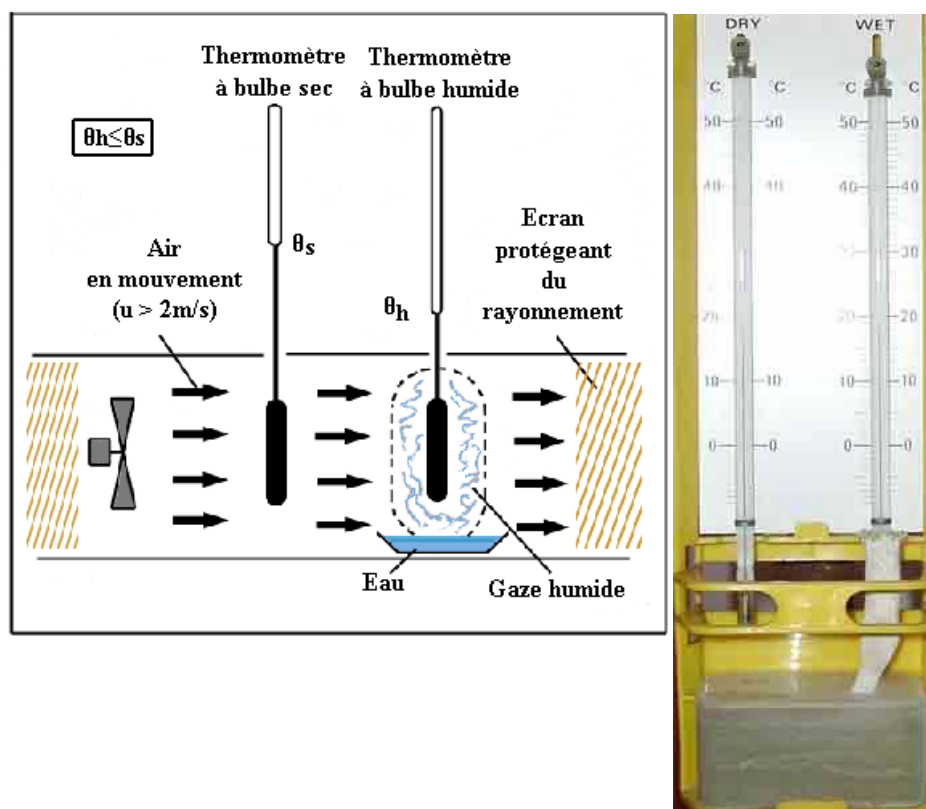
Méthodes de mesure de l'humidité de l'air

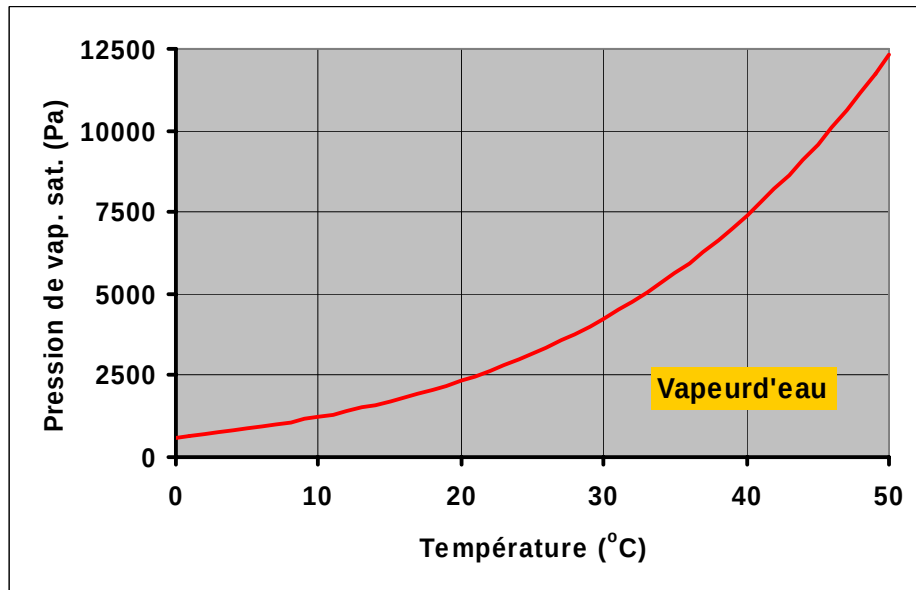
- **hygromètre à absorption** basé sur la propriété de certaines substances de changer de dimensions selon l'humidité ambiante
- **psychromètre**
- **hygromètre à condensation**: une surface métallique polie (miroir) est refroidie jusqu'au point où la buée s'y dépose, c. à d. jusqu'au point de rosée
- **hygromètre électrique**: basé sur les variations de résistance électrique de matériaux qui absorbent l'humidité.

Psychromètre

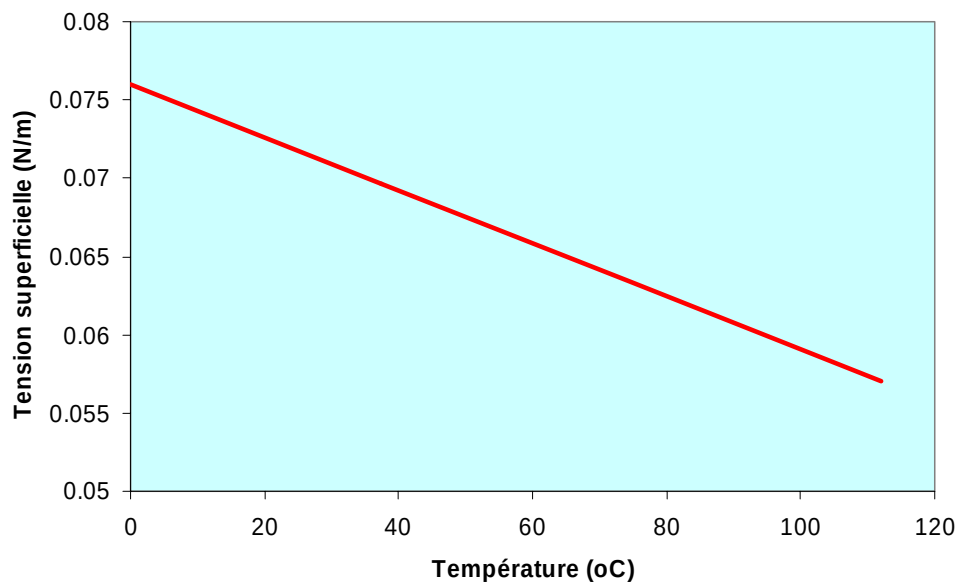
Basé sur la mesure du refroidissement produit par l'évaporation de l'eau (2500 J/g).

L'appareil comprend 2 thermomètres, le réservoir de l'un est sec (thermomètre sec) et le réservoir du second est entouré de gaze mouillée (thermomètre mouillé).





Relation pression de vapeur saturante - température



Relation tension superficielle – température de l'eau

Tension superficielle

- processus qui se manifeste aux interfaces fluide-fluide, notamment à l'interface liquide-gaz
- résulte des forces de liaison intermoléculaires (forces de cohésion qui caractérisent l'attraction mutuelle des molécules d'une même substance).

La tension superficielle σ est la force F par unité de longueur L nécessaire pour maintenir la cohésion de la surface liquide.

$$\sigma = \frac{F}{L}$$

σ dépend :

- **de la nature des fluides en présence:**
 - ✓ Contacts eau – air à 20°C: $\sigma = 0.0727 \text{ N/m}$
 - ✓ Contacts mercure-air: $\sigma = 0.43 \text{ N/m}$
- **de la température**
- **de la composition chimique**

Capillarité

- à la base des processus de rétention de l'eau dans le sol
- résulte de l'action simultanée des forces d'**adhésion** et de **cohésion**

*La forme de l'interface solide-liquide-gaz se caractérise par un **angle de contact φ** qui varie selon la nature des corps en présence*

$0 < \varphi < 90^\circ$	$90 < \varphi < 180^\circ$	$\varphi = 90^\circ$
Adh. > Coh.	Adh. < Coh.	Adh. = Coh.
$p_l < p_a$	$p_l > p_a$	$p_l = p_a$
Surface solide hydrophile	Surface solide hydrophobe	Ni attraction, ni répulsion

Différence de pression:
$$\Delta p = p_c = \frac{2\sigma}{R}$$

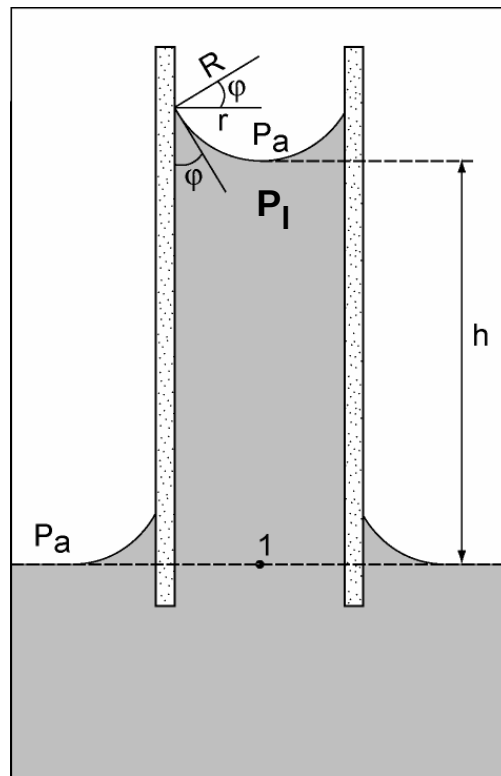
σ : tension superficielle; R : rayon de courbure du ménisque

Contacts sol-eau:
$$\varphi \cong 0$$

Hauteur d'asc. capillaire:
$$h = \frac{2 \sigma \cos \varphi}{\rho_w g r} \quad (\text{loi de Jurin})$$

r : rayon du capillaire

p_l : pression du liquide; p_a : pression atmosphérique



Capillaire hydrophile à l'équilibre

$$(\varphi < 90^\circ \quad p_l < p_a)$$

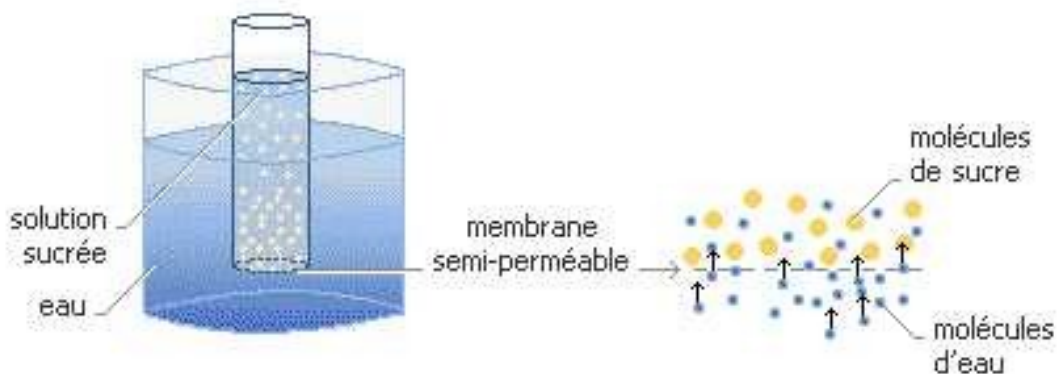
$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R} = \frac{2\sigma \cos \varphi}{r} \quad (\text{dépression à l'origine de l'ascension de l'eau})$$

$$p_w = \rho_w g h \quad (\text{pression hydrostatique exercée par la colonne d'eau dans le capillaire})$$

$$\text{A l'équilibre:} \quad \Delta p = p_w$$

$$\text{et donc:} \quad h = \frac{2\sigma \cos \varphi}{\rho_w g r} \quad (\text{loi de Jurin})$$

Pression osmotique



Une solution diluée ($C < 1 \text{ M}$) obéit à l'équation :

$$p_o V = n R T$$

Van't Hoff (1887)

$$p_o = \frac{n}{V} R T = C R T$$

p_o	: pression osmotique	(Pa)
V	: volume de solution	(m^3)
n	: quantité de soluté	(mol)
C	: concentration molaire de l'espèce ionique considérée	($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)
R	: constante universelle des gaz	$R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
T	: température absolue	(K)

En terme de charge de pression osmotique h_o (m):

$$h_o = \frac{p_o}{\rho_w g}$$

p_o et h_o caractérisent l'abaissement de potentiel qui résulte de la pression osmotique

Pour que la pression osmotique se manifeste concrètement, la présence d'une membrane semi-perméable est indispensable.