

*Formation* : **La diversité des écosystèmes forestiers expliquée par la disponibilité en eau des sols : gestion et diagnostic** *moulins, mars 2010*

# Réservoir en eau du sol

**Yves Lefèvre UMR Ecologie et Ecophysiologie  
Forestières  
INRA Champenoux**



# plan

- Rappel de fondamentaux
- Eau dans le sol
- Estimation de la réserve utile

# Le sol est un milieu organisé complexe ou trois phases coexistent

- **Gaz** (air + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + N<sub>2</sub>O + ...)
- **Eau** (libre, liée)
- **Matière solide** :
  - Constituants organiques
  - Constituants minéraux

Organisation volumique

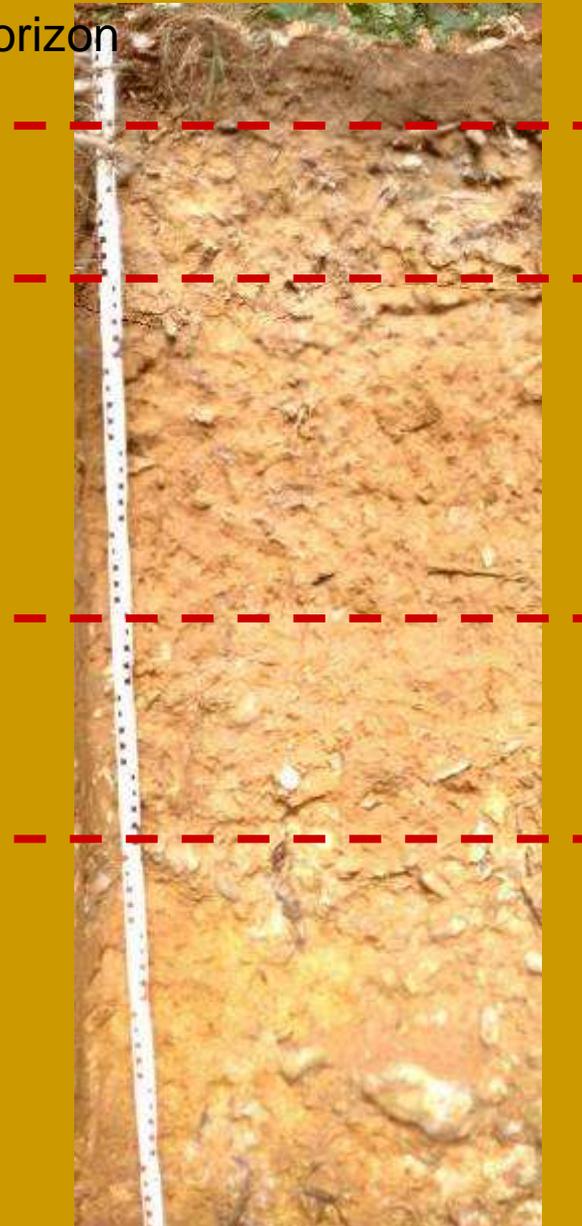


# les horizons

à chaque changement de descripteur on note un horizon



horizons contrastés,  
limites nettes ou diffuses



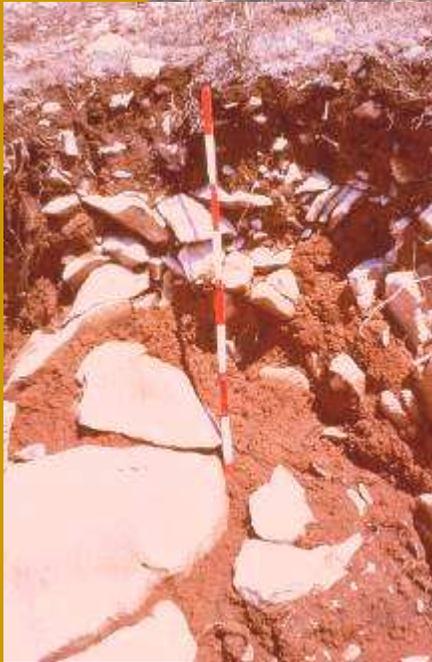
horizons peu contrastés .... à l'oeil

## les horizons origine, dénomination

	RP (1992)	CPCS (1967)
holorganiques :	O (L, F, H)	(A <sub>00</sub> , A <sub>0</sub> )
organo-minéraux :	A	A <sub>1</sub>
éluvial :	E	A <sub>2</sub>
illuvial :	B : BP, BT	B
structural :	S	(B)
roche altérée :	C	C
roche en place :	R, M	R

RP : environ 25 horizons de référence principaux  
lettres minuscules : ca, ci, g, ....

# Couleur des horizons



# Couleur des horizons : origine

**matière organique**

**fer**

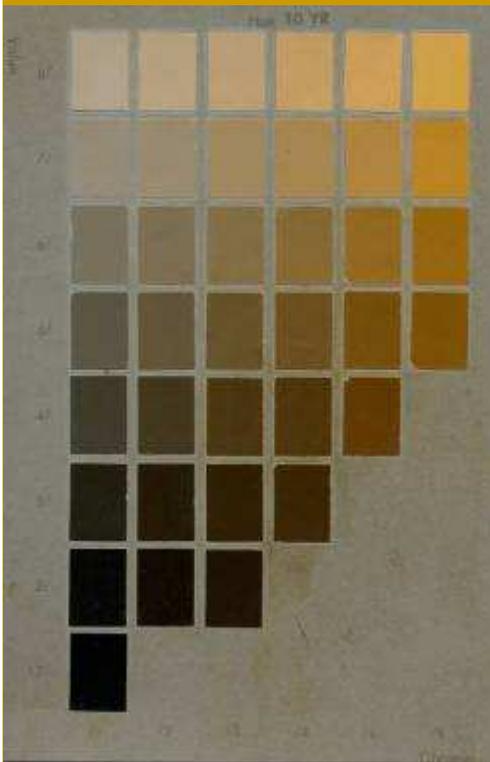
- quantité

- état : oxydé, réduit

- forme : amorphe, lié aux argiles, cristallisé

oxydes (ex.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  hématite)

oxy-hydroxydes ex.  $\text{FeO}(\text{OH})$



- héritée de la roche (lithochrome)

- conditions de formation du sol

## approches macromorphologiques qualitatives formes d'humus

(Brêthes *et al.* 1992, Jabiol *et al.* 1995)

définies par une succession d'horizons



OLn

A

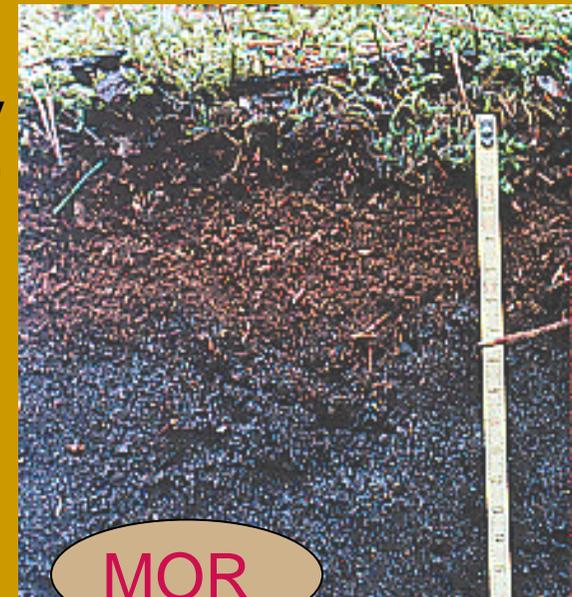
EUMULL

OLn , OLv

OF

OH

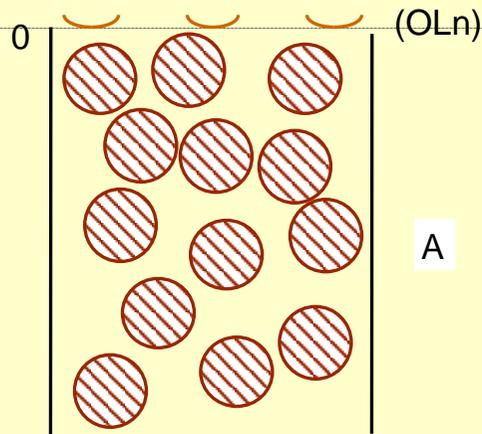
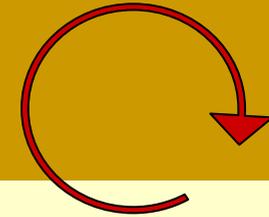
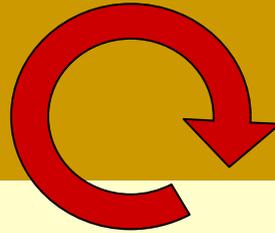
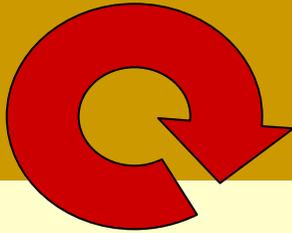
A



MOR

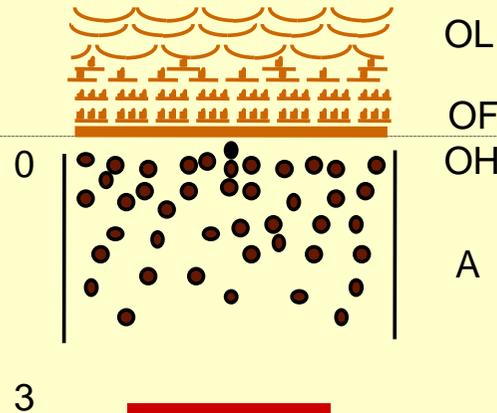
La morphologie des humus est un indicateur très précieux car synthétique du fonctionnement de l'écosystème

# classification autour de **trois types majeurs**



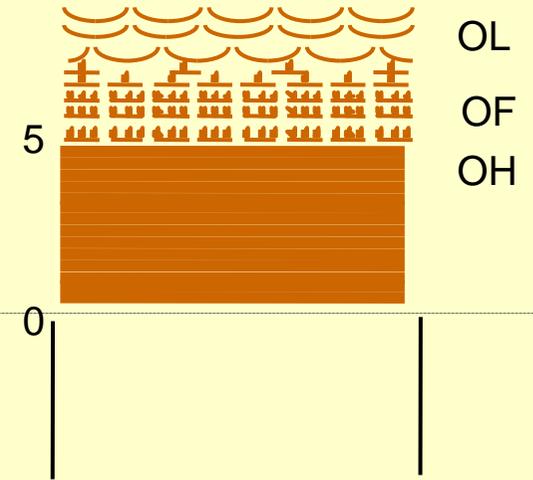
**mull**

haute technologie



**moder**

artisanat



**mor**

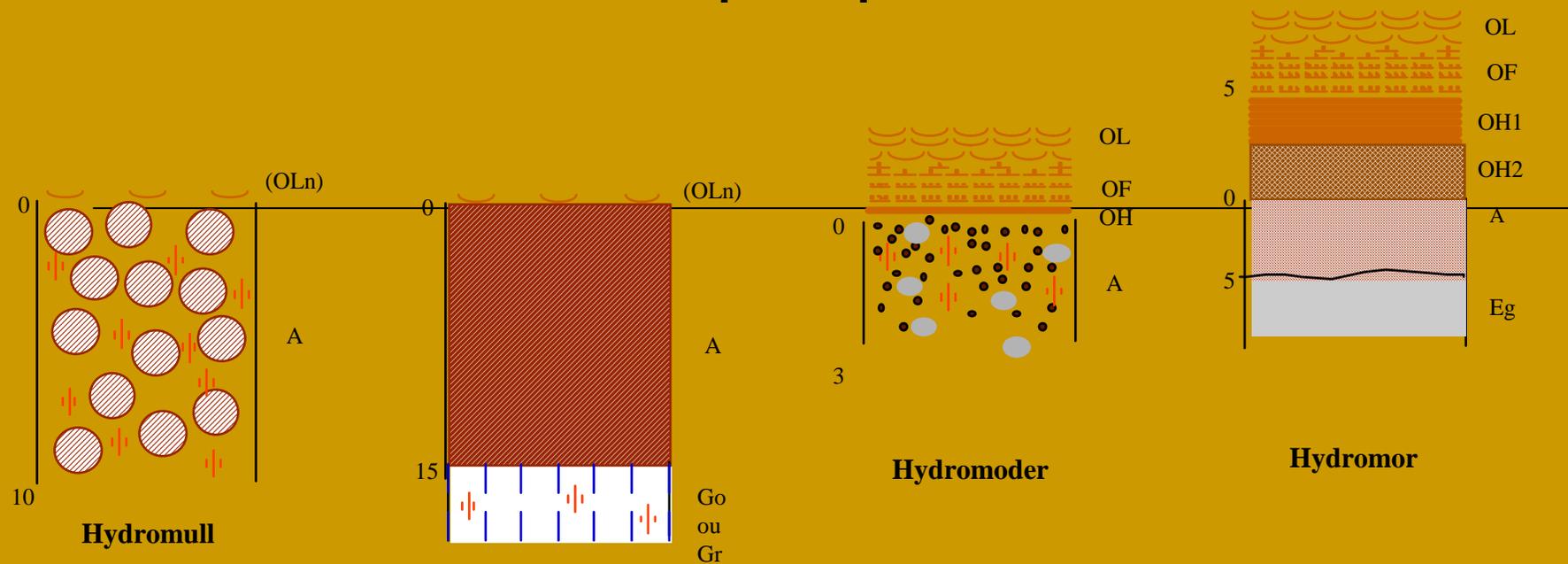
âge de pierre

# Humus Hydromorphes

engorgement => asphyxie => modification des activités biologiques



formes spécifiques d'humus



→ héritages croissants

## L'analyse granulométrique et la texture

L'analyse granulométrique est la mesure de la dimension des particules minérales individuelles du sol.

Cailloux et graviers ( $d > 2 \text{ mm}$ ) : ils sont classés à part (EG), la granulométrie proprement dite concerne la terre fine ( $d < 2 \text{ mm}$ )

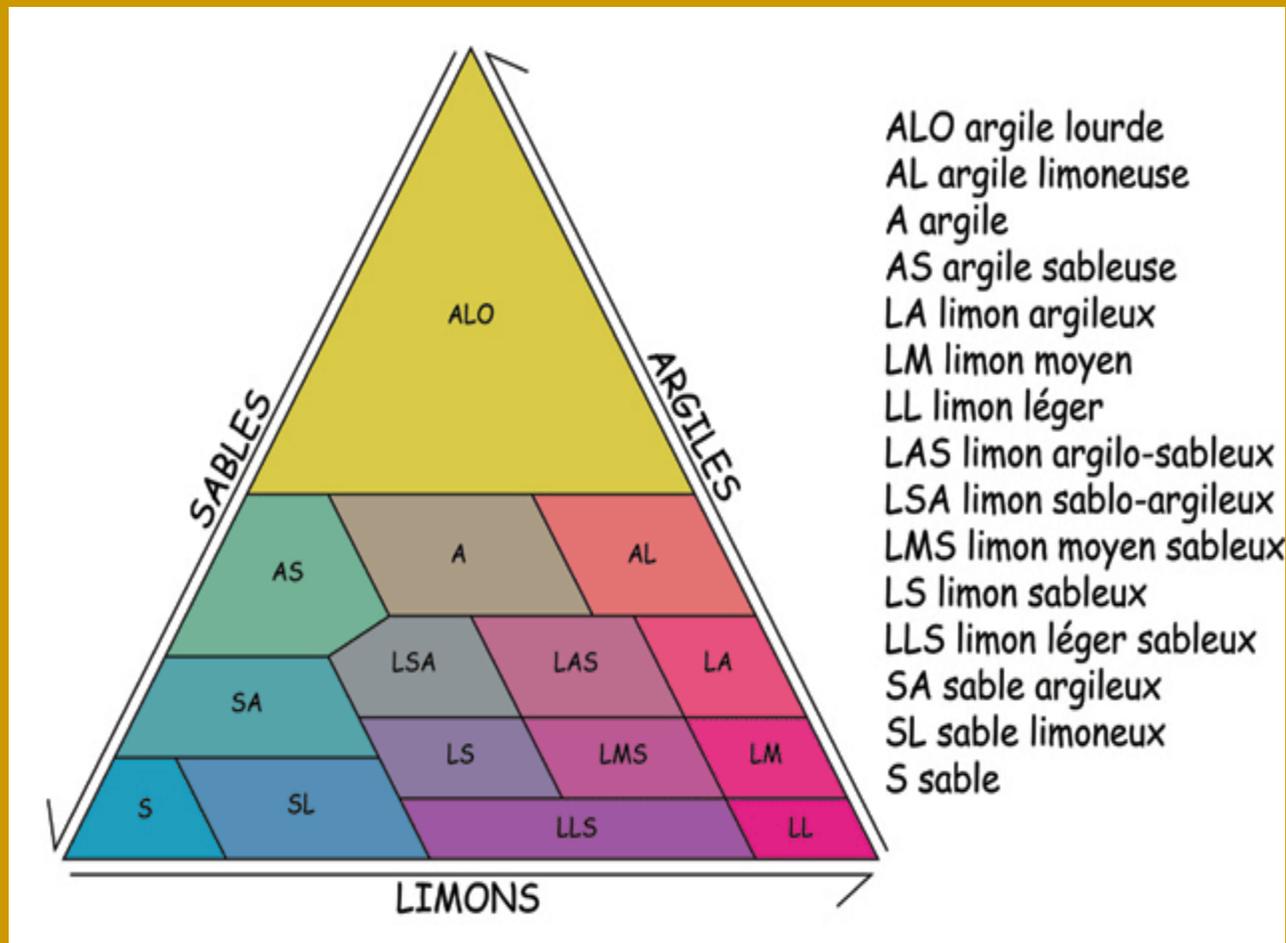
Sables : de  $2 \text{ mm}$  à  $50 \mu\text{m}$  ;

Limons (ou silts) : de  $50 \mu\text{m}$  à  $2 \mu\text{m}$  ;

Fraction fine :  $< 2 \mu\text{m}$ , communément appelée « argile » bien qu'elle ne soit pas exclusivement constituée d'argiles minéralogiques .

# La texture

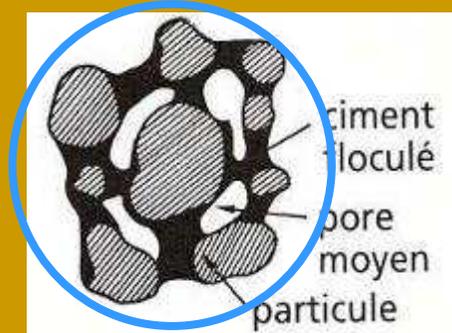
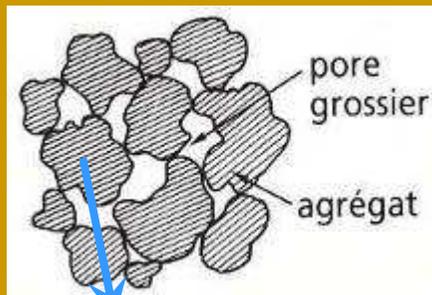
la représentation globale de l'analyse granulométrique en diagrammes définit la notion de texture (Hénin, 1976).



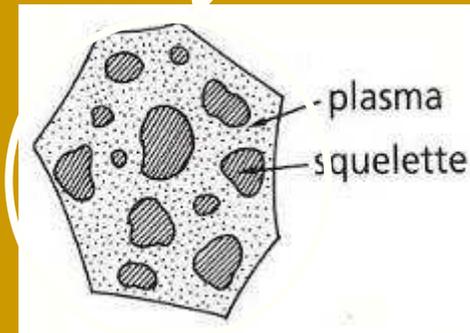
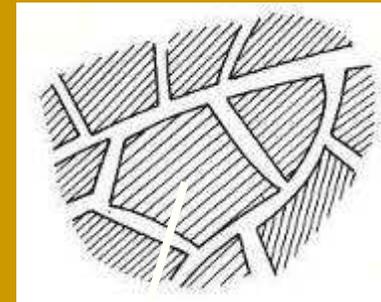
# La structure du sol

L'assemblage des constituants du sol détermine sa structure.

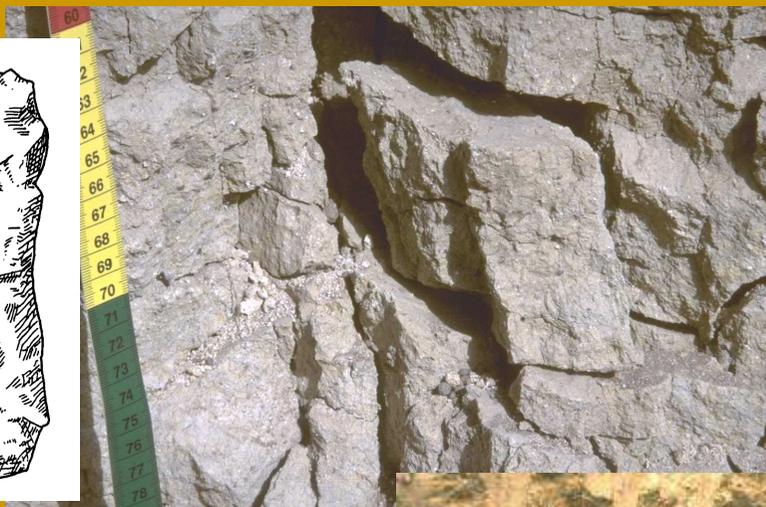
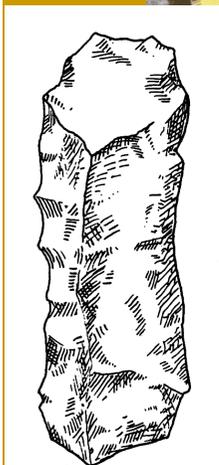
Structure construite  
d'origine biologique



Structure fragmentaire  
origine mécanique



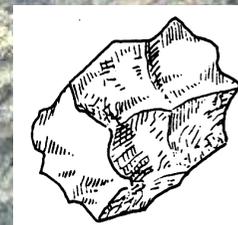
# Organisation structurale des horizons



**agrégats :**

→ taille

→ forme



**pas  
d'agrégats :**

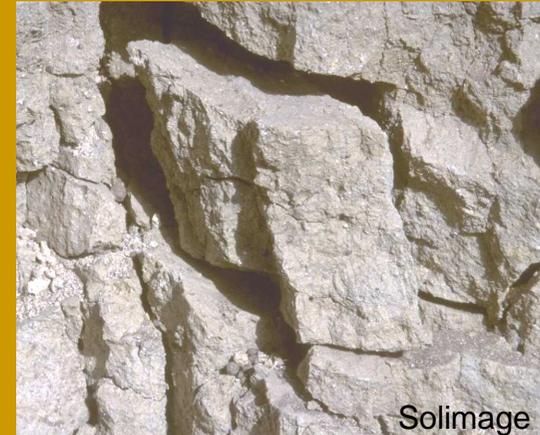
→ structures  
massives  
ou  
particulaires



# la porosité

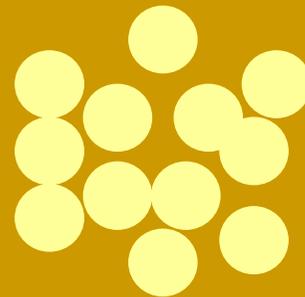
porosité structurale :

→ macroporosité uniquement

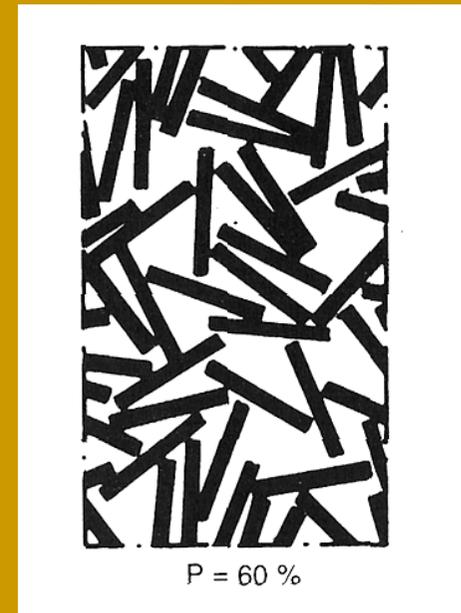
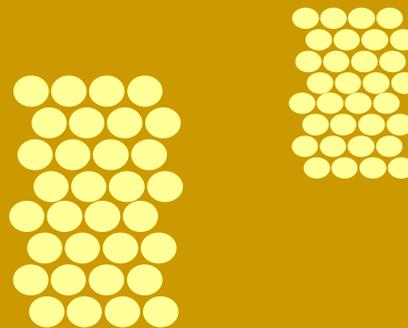


porosité texturale :

→ macroporosité



→ microporosité



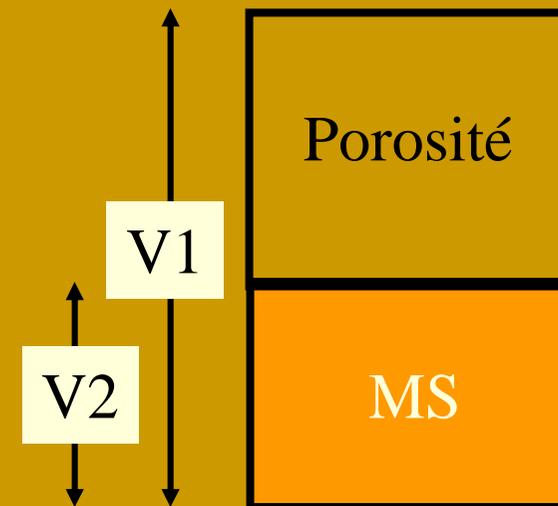
# la porosité :

$$P \text{ totale} = 100 \text{ Vol vides} / \text{Vol apparent}$$

valeurs

30 à 70 %

$$\text{Porosité totale} = 1 - \frac{V_2}{V_1}$$



## masse volumique apparente

$$\mu_a = \text{masse sol sec} / \text{vol sol}$$

si exprimée en  $\text{g/cm}^3$  masse vol app = densité apparente  $d_a$

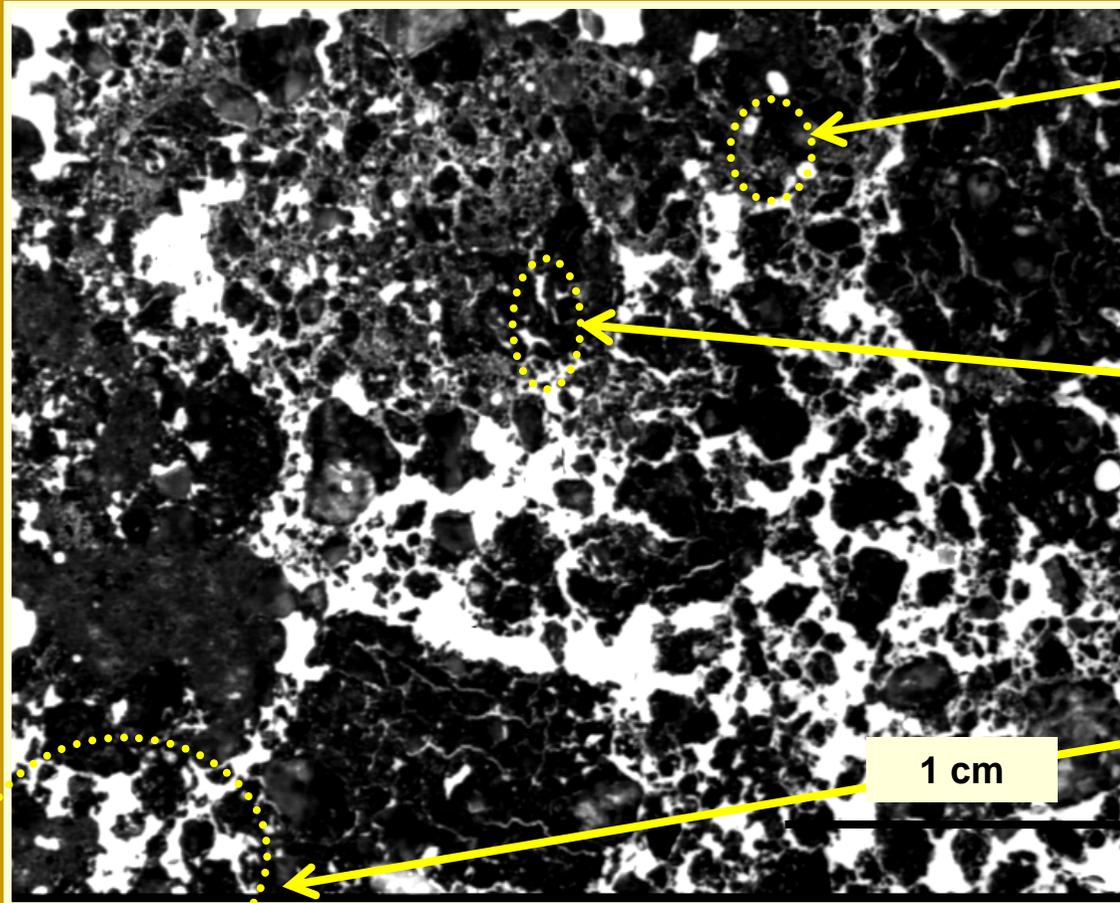
valeurs :

**1,2 à 1,7**

(horizons holorganiques 0,2 à 1)

ne pas confondre avec  $d_r$ , densité des constituants du sol

$$\text{Porosité} = 100 (d_r - d_a) / d_r$$



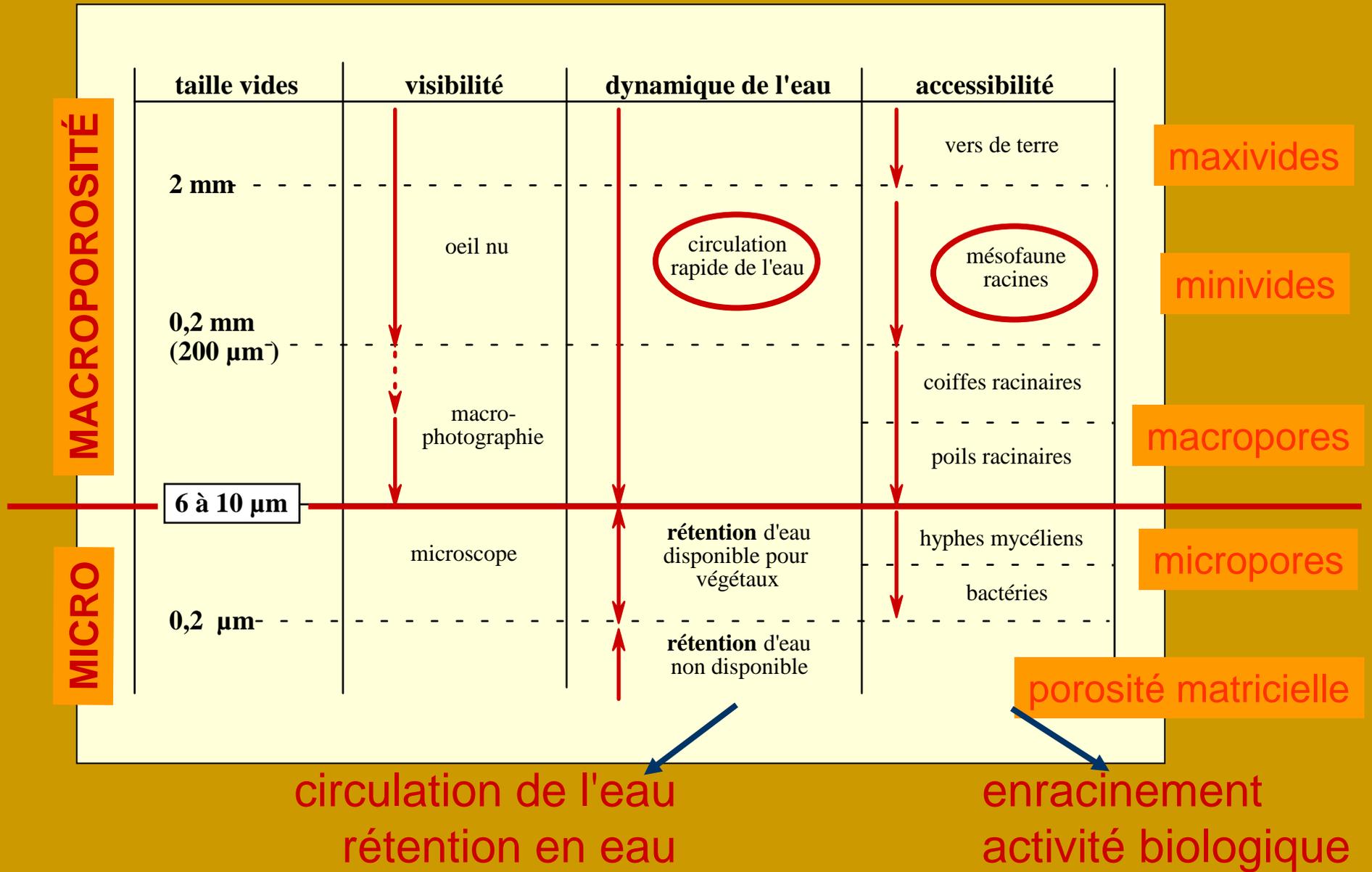
**Pores tubulaires**  
créés par la faune du  
sol et les racines.

**Fissures** produites  
par des contraintes  
mécaniques.

**Pores** résultant de  
l'**assemblage** des  
agrégats physiques  
et biologiques.

Certains sont occupés par l'eau, d'autres sont occupés par l'air.  
La taille, la forme, la continuité et la tortuosité des pores déterminent les  
propriétés de rétention et de transfert.

# types de porosité et conséquences



# L'EAU DANS LE SOL

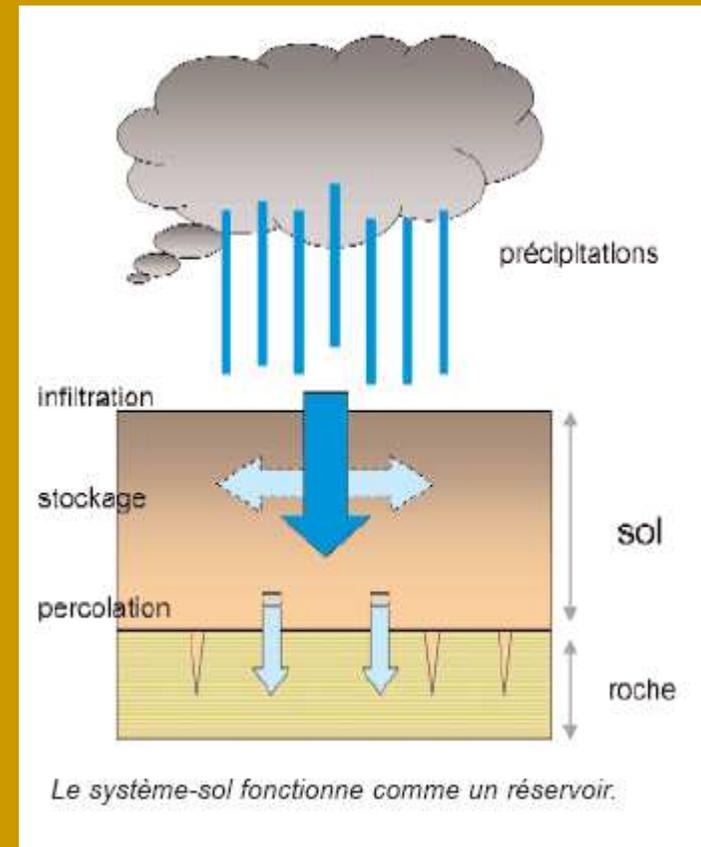
## Le bilan d'eau

Fonction de ce qui arrive et de ce qui part

- états d'humidité variables

- transferts de l'eau

- stockage de l'eau :  
quelles quantités, quelle disponibilité



# Statut hydrique dans le sol

## (1) Quantités d'eau

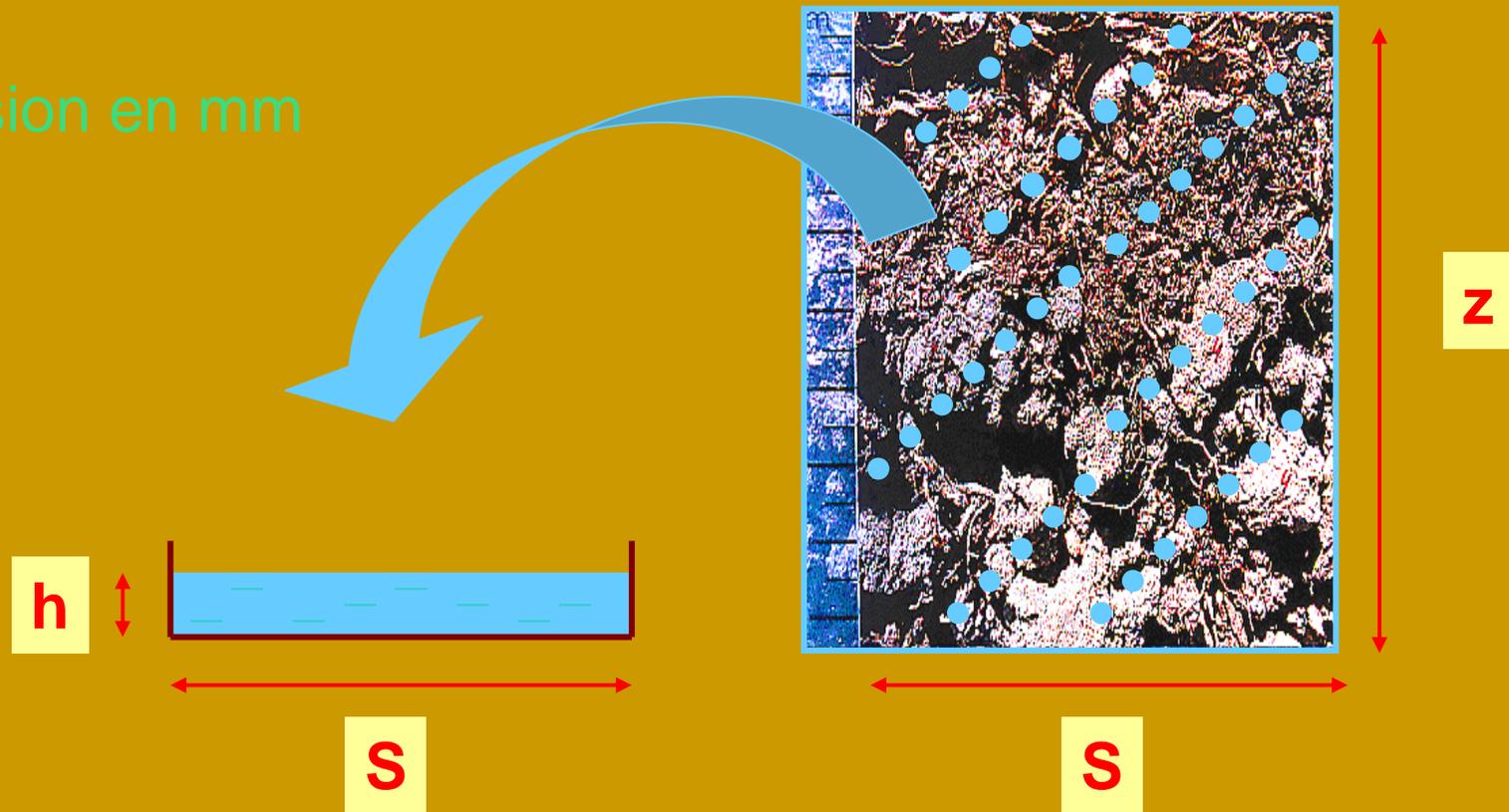
- définition de l'humidité du sol :

$$\text{massique :} \quad H_m = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse de sol sec}} \times 100$$

$$\text{volumique :} \quad H_v = \frac{\text{volume d'eau}}{\text{volume de sol sec}} \times 100$$

$$H_v = H_m * d_a$$

- expression en mm



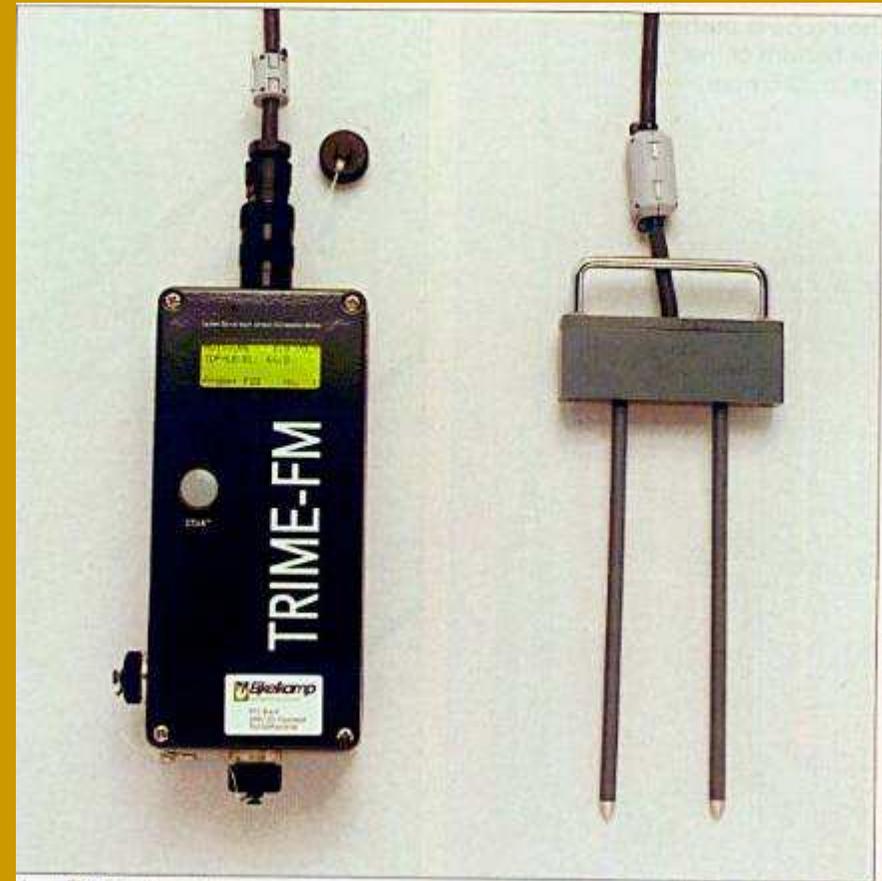
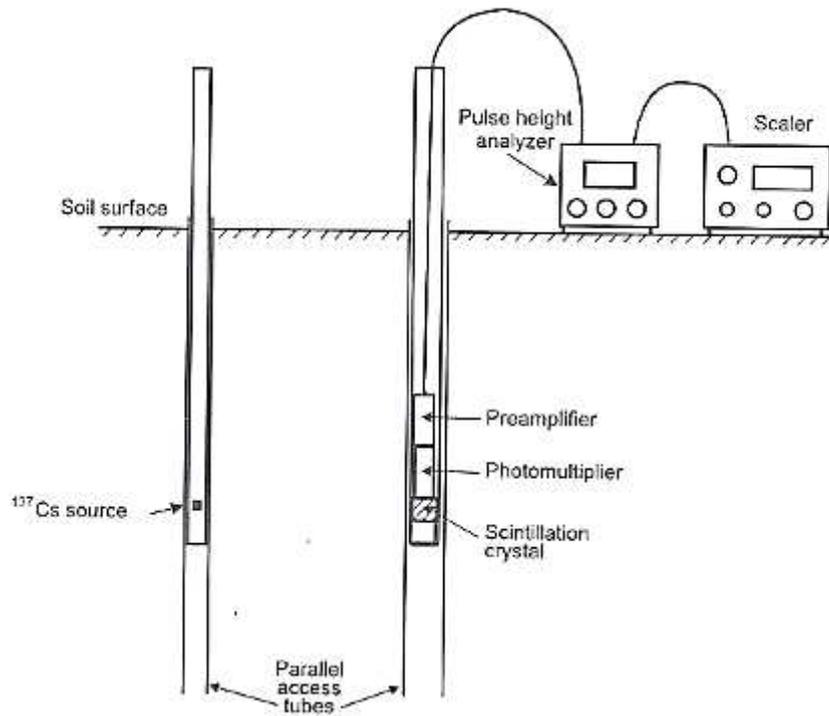
$$h_{mm} = Hm_{\%} z_{dm} da$$

$$h_{mm} = Hv_{\%} z_{dm}$$

# Quantités d'eau

- mesure de l'humidité

1- séchage en étuve 105°C



3 -sondes TDR

2- sondes neutroniques,  
sondes gamma

## (2) Etat énergétique de l'eau du sol : deux composantes principales

**potentiel gravitaire :**

présède à l'infiltration des eaux de pluies par gravité

**potentiel matriciel :**

définit la force de rétention de l'eau dans le sol

**$\Psi$  : potentiel matriciel**

en valeur absolue : succion

expression : Pa, MPa, bars, cm : 1 à  $10^6$  kPa

ou :  $pF = \log |Hp|$  : 1 à 7

**rétention forte = potentiel matriciel bas**

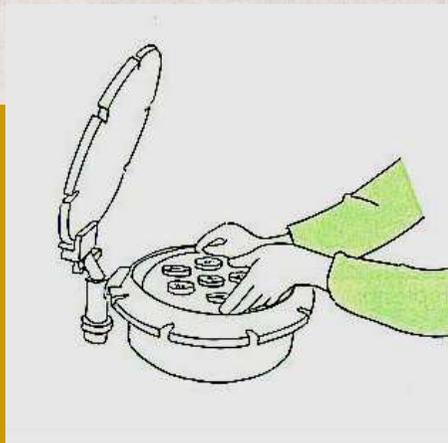
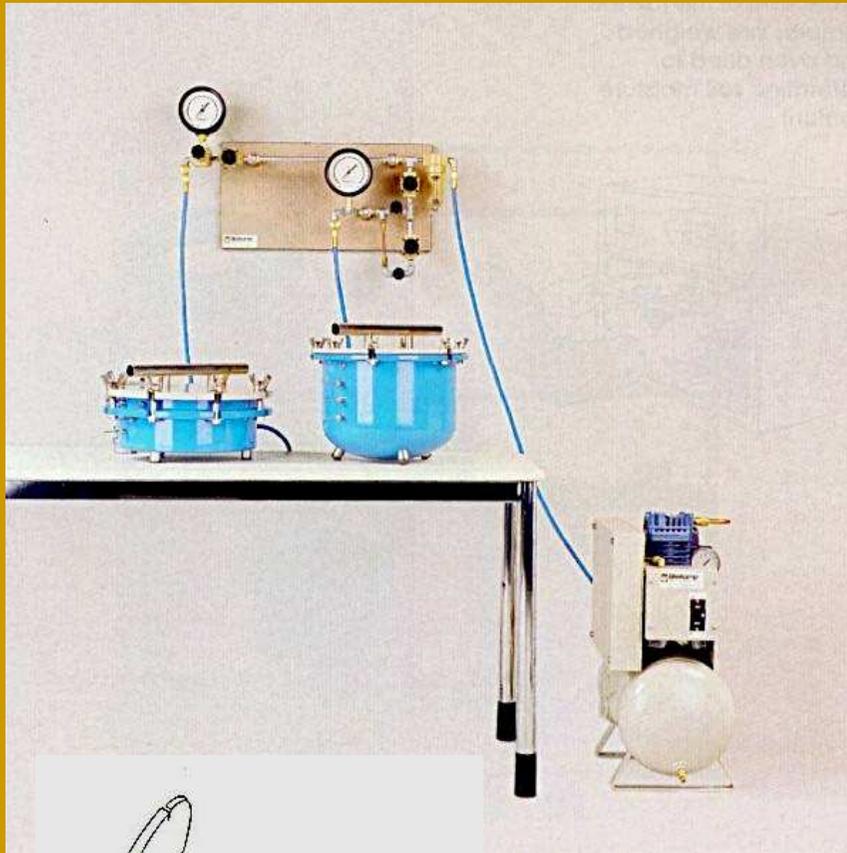
**= succion forte**

**= pF élevé**

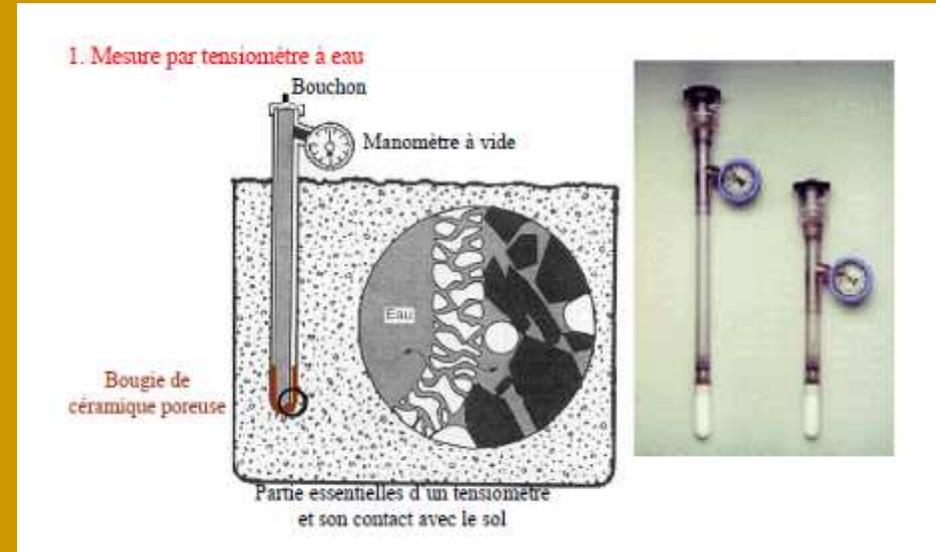
**-> Sol sec**

## 2 - Etats énergétiques de l'eau du sol

- mesure du potentiel matriciel au labo ou *in situ*



tensiomètre



Equi-tensiomètre

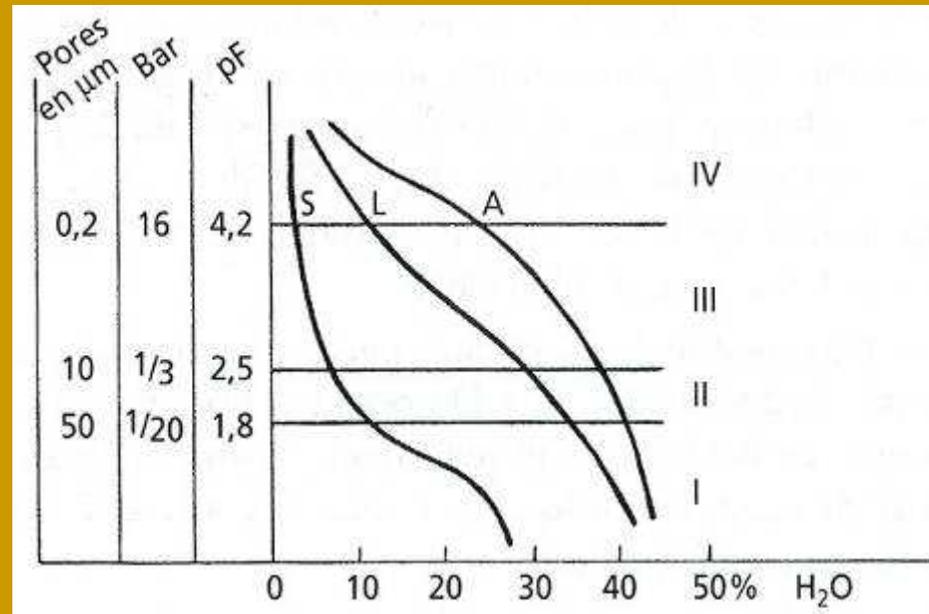


Micropsychromètre



## Rétention de l'eau en fonction de la texture du sol (Duchaufour, 1995)

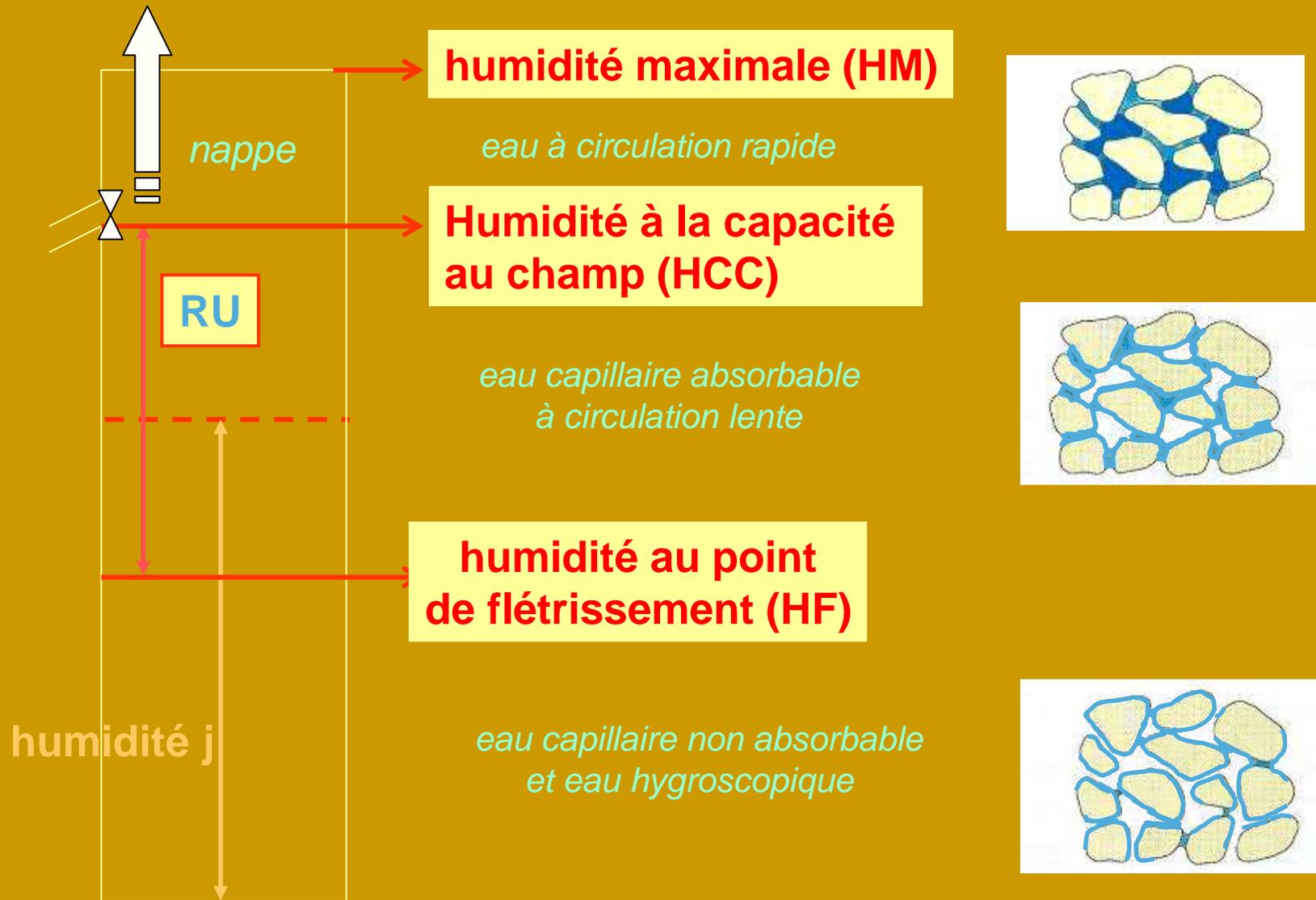
Bar	hPa = cm eau	pF
0,01	10	1
0,1	100	2
1	1000	3
10	10 000	4
15	15 000	4,2



*Courbes du potentiel matriciel.  
S : sable ; L : limon ; A : argile.*

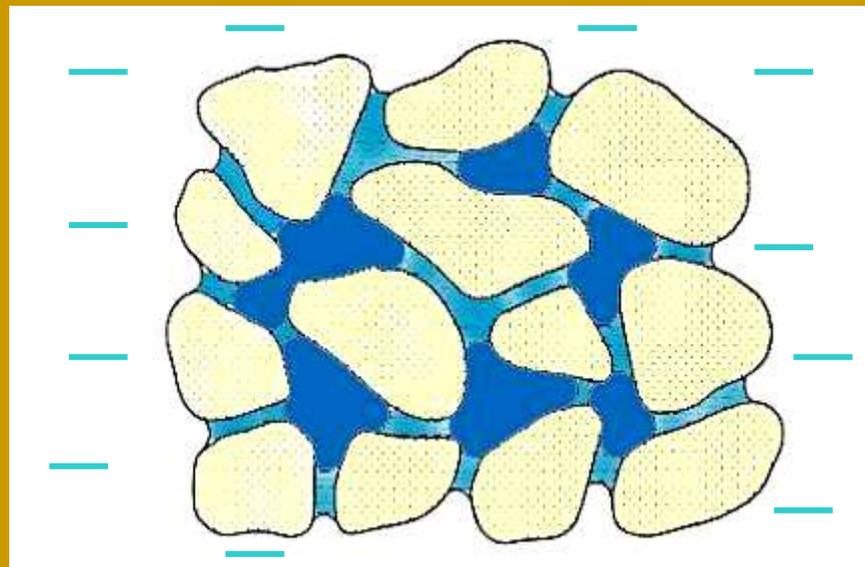
- |                                      |              |
|--------------------------------------|--------------|
| I Eau de gravité écoulement rapide : | pF < 1,8     |
| II Eau de gravité écoulement lent :  | pF 1,8 à 2,5 |
| III Eau capillaire :                 | pF 2,5 à 4,2 |
| IV Eau <i>liée</i> :                 | pF > 4,2     |

# Humidités caractéristiques



- humidité maximale : HM

souvent 15 à 50 %  
sols organiques et tourbes : > 100%

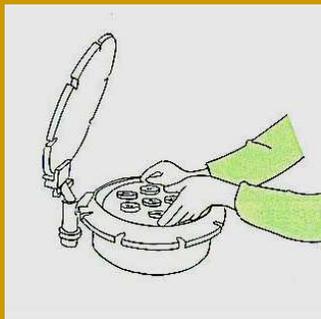


- humidité à la capacité au champ : problèmes d'estimation

. par mesure de l'humidité à un pF donné :  
lequel ?

sur échantillons remaniés ou mottes

ou :

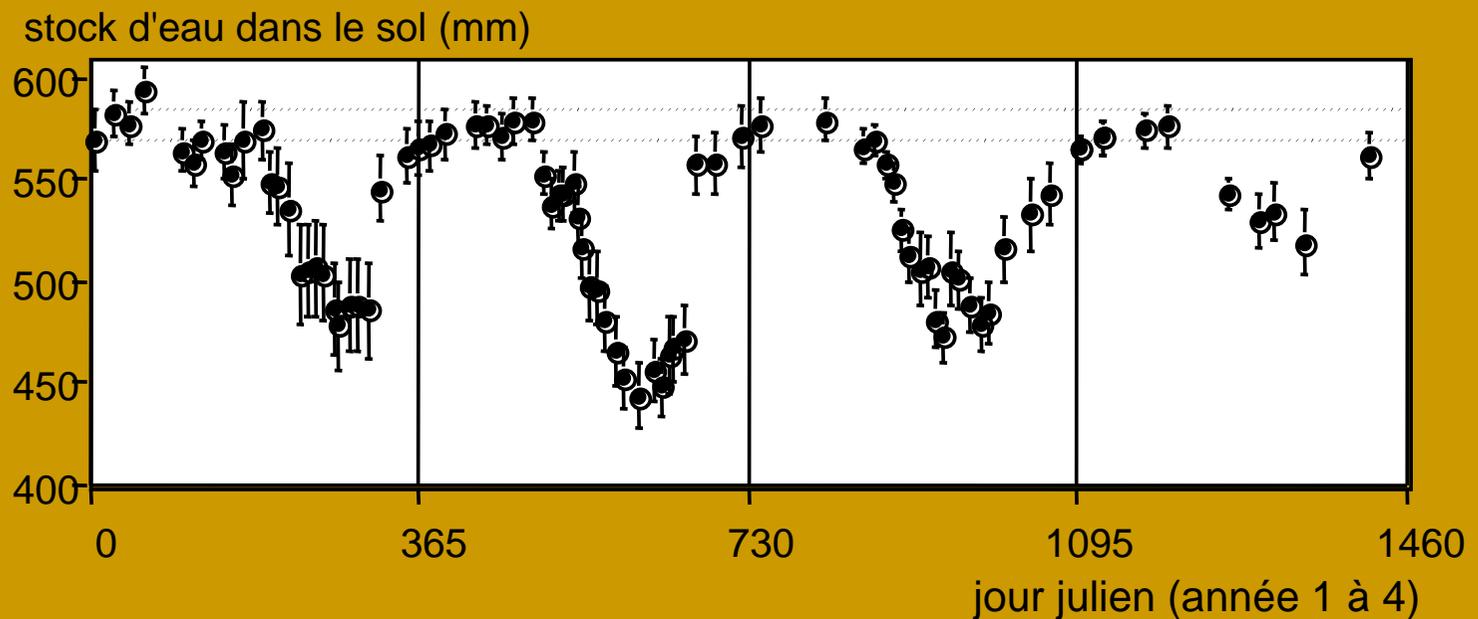


à pF 2,5 (Jamagne)

ou à : pF 3 pour l'argile  
pF 2,5 pour les limons  
pF 2 pour les sables

## - humidité à la capacité au champ : CC

Détermination de la teneur en eau du sol à la capacité au champ : en forêt ...

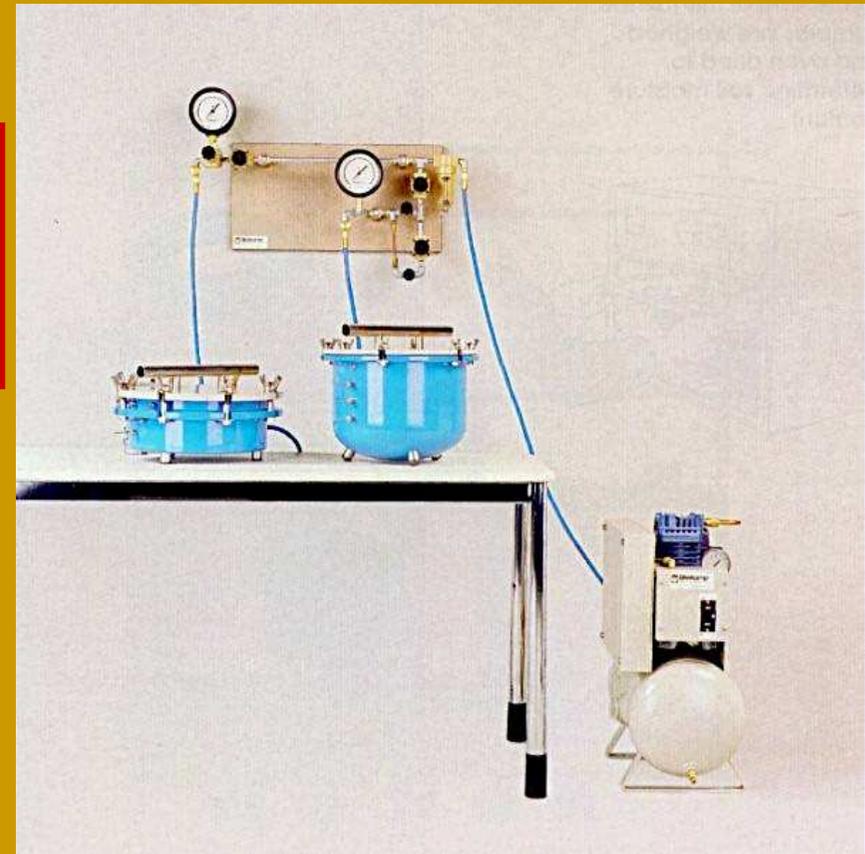


*d'après Bréda, 2001*

- humidité au point de flétrissement : HF

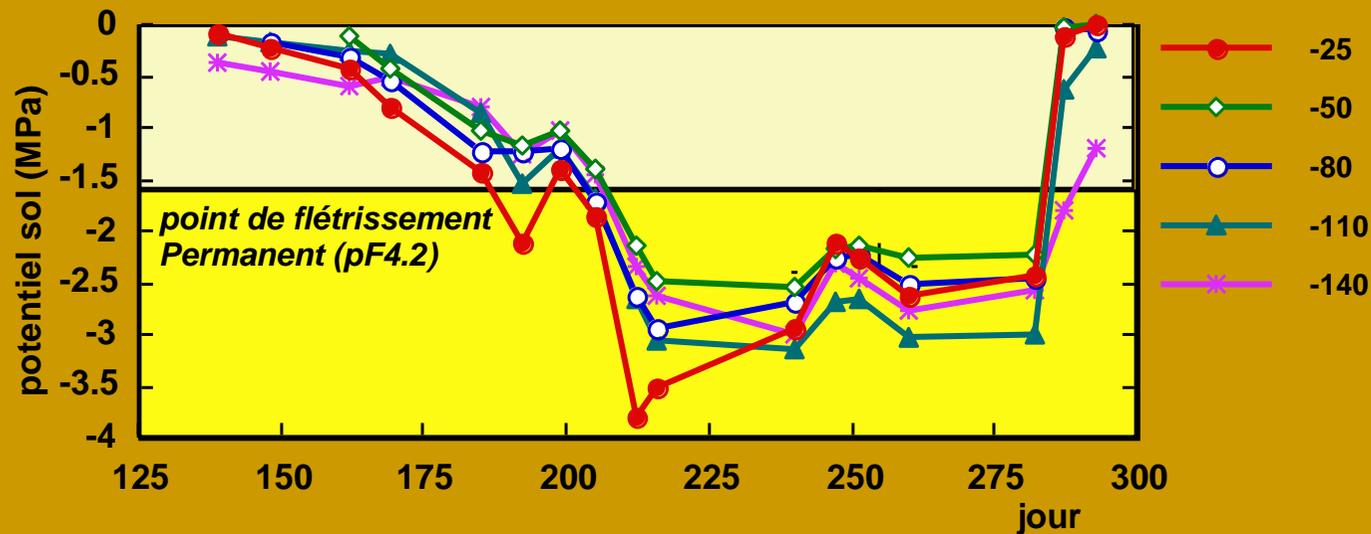
mesures sur échantillons à pF 4,2

**HF : humidité à  
-15 bars (ou -1,5 MPa ou pF  
4,2)**



# Potentiels hydriques sol et forêt

Le **potentiel hydrique** du sol sous forêt et des arbres atteint des **valeurs plus négatives** que le potentiel à point de flétrissement permanent



*Exemple en chênaie sur sol limono-argileux  
Bréda et al., 1995*

	RU mm	écart
<i>in situ</i>	170	
pF = 4.2	128	32%
CAPA	113	53%

# La réserve en eau utile du sol

- La *capacité au champ* correspond à l'eau retenue par le sol, après une période de pluie et un ressuyage de deux ou trois jours, le sol étant protégé contre l'évaporation : elle comprend donc l'eau capillaire augmentée d'une fraction variable d'eau gravitaire à écoulement lent
- Le *point de flétrissement permanent* correspond à la limite inférieure de l'eau faiblement à moyennement liée en deçà de laquelle l'eau n'est plus absorbable par les racines. La succion correspondante est de 1600 kPa (soit l'équivalent de 16 fois la pression atmosphérique : 16 bar). Cette succion est valable pour la plupart des plantes cultivées et forestières, elle est considérée comme valeur de base.
- L'*eau utile* est la quantité d'eau stockée dans le sol, donnée par la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement.

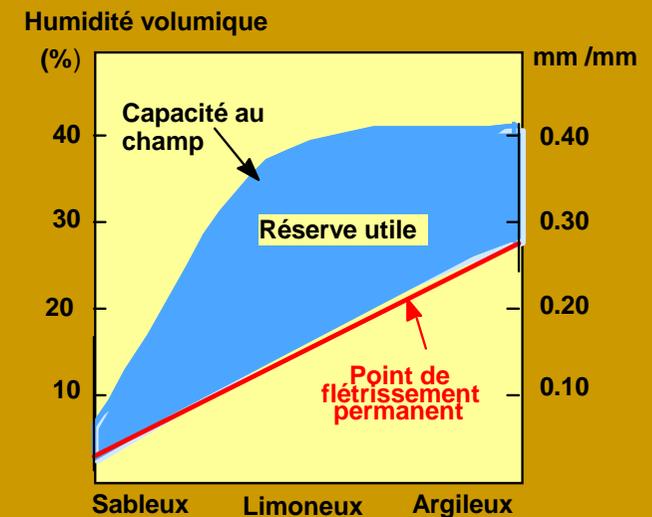
# Définition de réserve utile

pour un matériau homogène :

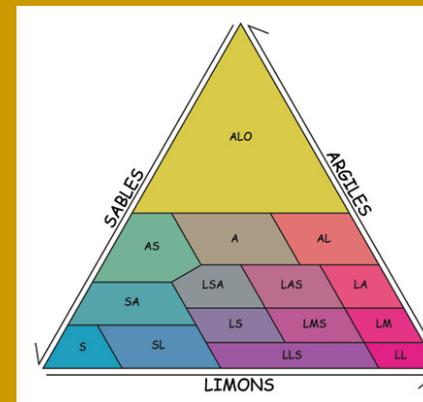
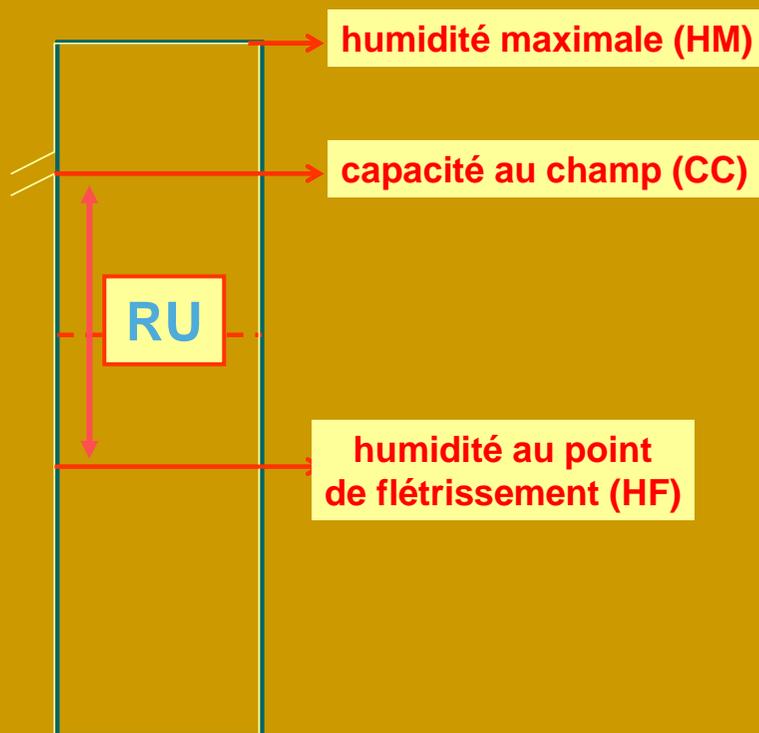
$$\text{réserve utile : } RU_{\%} = CC_{\%} - HF_{\%}$$

$$RU_{\text{mm}} = (CC_{\%} - HF_{\%}) z_{\text{mm}} \text{ da } 10^{-2}$$

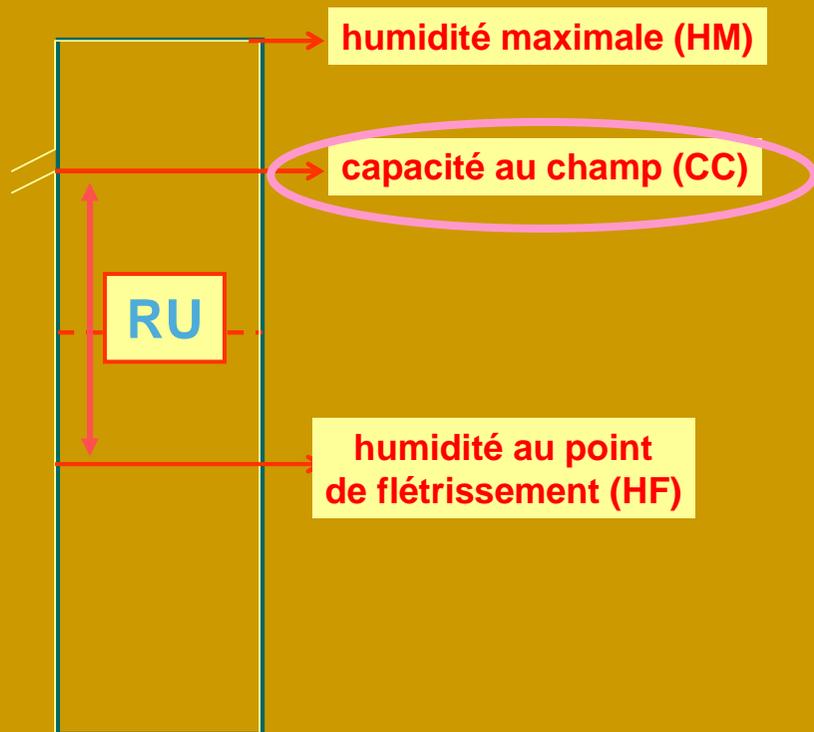
La texture conditionne ces valeurs d'humidité caractéristique



# La méthode des textures de Jamagne



# Humidité à capacité au champ

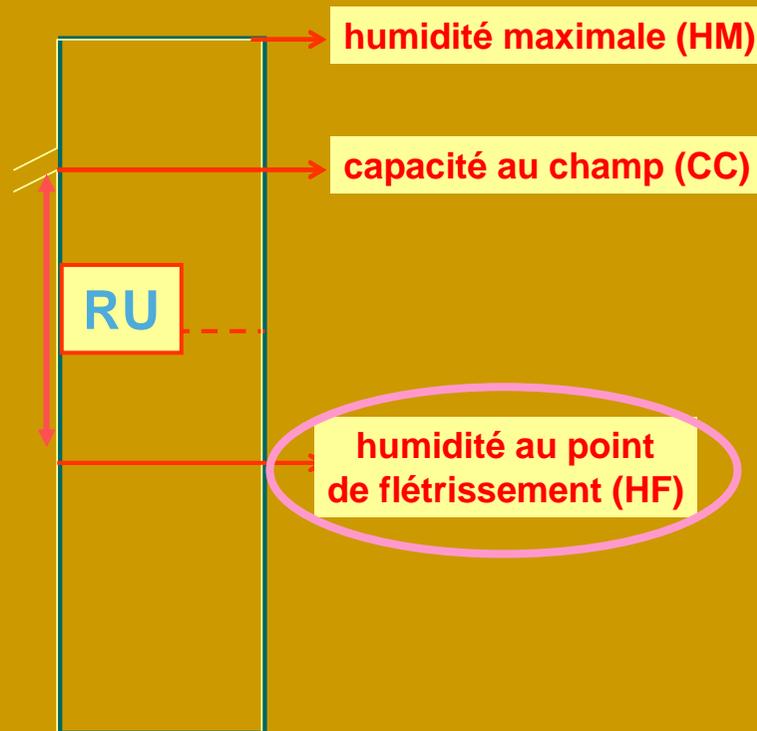


à pF 2,5 sur échantillons remaniés  
il existe une relation entre HCR et texture

	CC %
S	8
SL	12
SA	19
LIS	15
LS	19
LmS	20
LSA	22
LAS	24
LI	17
Lm	23
LA	27
AS	33
A	37
AL	32
Alo	29
Séd.	29
Al.	38

D 'après Jamagne et al.1 977

# Humidité au point de flétrissement permanent



		CC%	HF%
<b>S</b>		<b>8</b>	<b>3</b>
SL		12	5
SA		19	10
LIS		15	7
LS		19	9
LmS		20	9
LSA		22	11
LAS		24	12
LI		17	8
Lm		23	10
<b>LA</b>		<b>27</b>	<b>13</b>
AS		33	22
A		37	25
AL		32	19
<b>Alo</b>	<b>Séd.</b>	<b>29</b>	<b>18</b>
	<b>Alt.</b>	<b>38</b>	<b>25</b>

mesures sur échantillons remaniés à pF 4,2

D'après Jamagne et al. 1977

# En résumé :

Pour un horizon h sans EG :

$$RU_{mm} = (CC_{\%} - HF_{\%}) z_{mm} da \cdot 10^{-2}$$

Pour un horizon avec EG : retirer % volumique des EG :

$$RU_{mm} = (CC_{\%} - HF_{\%}) z_{mm} da \cdot 10^{-2} (100 - \%EG)/100$$

Pour i horizons prospectés : sommer la RU de chaque horizon

$$RU_{sol (mm)} = 10^{-2} \sum (CC_{\%} - HF_{\%})_i z_i (mm) da_i (100 - \%EG_i) / 100$$

Parfois : réserve propre aux EG

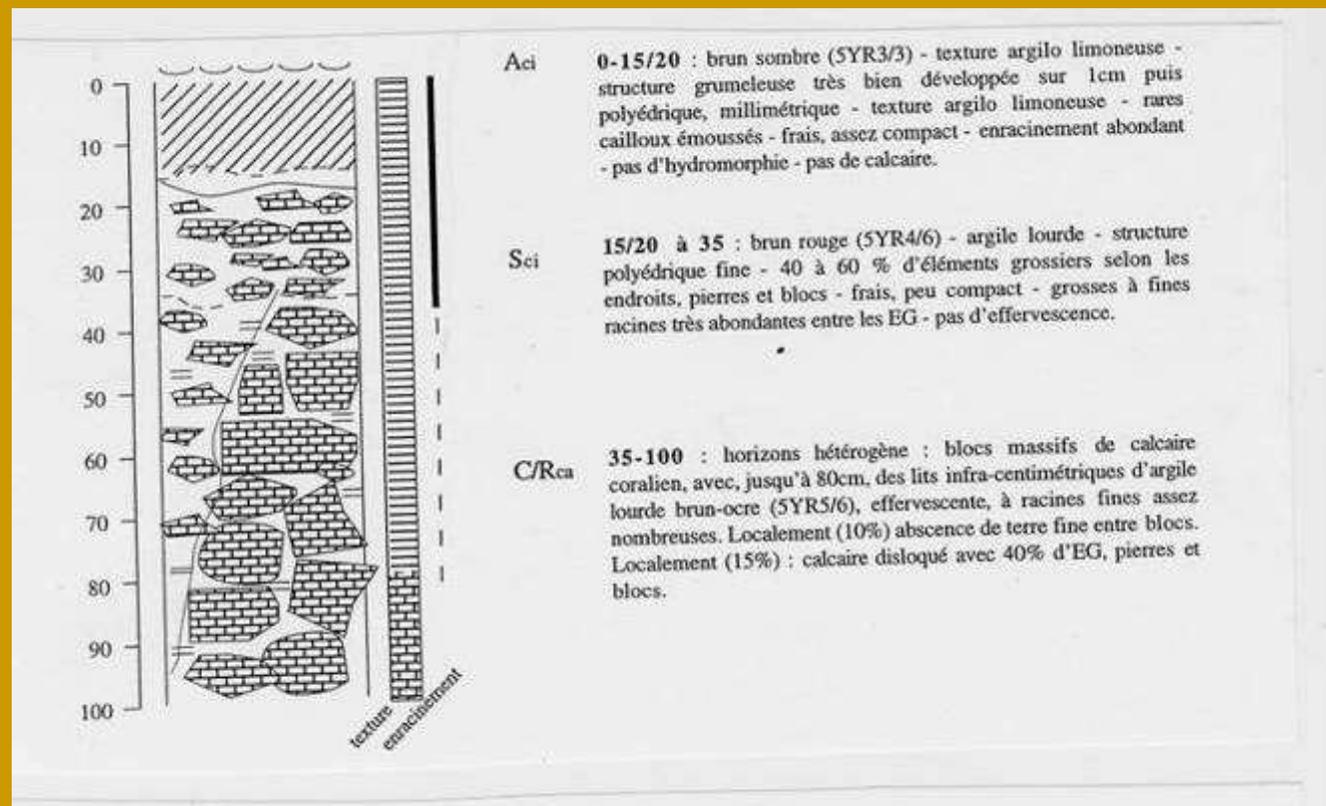
# Coefficients texturaux de réserve

Texture		CC %	HF %	RU %	da	RU mm/cm
Jamagne						
<b>S</b>		<b>8</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>1,35</b>	<b>0,70</b>
SL		12	5	7	1,40	1,00
SA		19	10	9	1,50	1,35
LIS		15	7	8	1,50	1,20
LS		19	9	10	1,45	1,45
LmS		20	9	11	1,45	1,60
LSA		22	11	11	1,50	1,65
LAS		24	12	12	1,45	1,75
LI		17	8	9	1,45	1,30
Lm		23	10	13	1,35	1,75
<b>LA</b>		<b>27</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>1,40</b>	<b>1,95</b>
AS		33	22	11	1,55	1,70
A		37	25	12	1,45	1,75
AL		32	19	13	1,40	1,80
<b>Alo</b>	<b>Séd.</b>	<b>29</b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>1,50</b>	<b>1,65</b>
	Alt□.	38	25	13	1,30	1,70

D 'après Jamagne et al.1 977

Exemple d'application : Estimer la  
RU de deux sols

# Calcisol, Bois du Chapitre, 54, Fosse1



*Description et schéma B.Jabiol, ENGREF*



# LUVISOL (forêt de Languimberg, 57)

**Placette 35 - Situation : parcelle 177, plateau, 2% de pente.**

- A 0-2cm            mésomull, brun limoneux, structure grumeleuse bien développée.
- E 2-19 cm        Brun clair, limoneux structure grumeleuse polyédrique unité de 5mm, infiltration de matière organique.
- Eg 19-36cm      beige, limon, structure polyédrique subanguleuse unité de 1 cm, 15% de taches d'oxydation de contraste moyen aux contours diffus.
- BTg1 36-61cm    Gris beige et brun rouille, argilo-limoneux structure polyédrique moyennement développée à unités de 2cm, 30 % de taches d'oxydation de contraste distinct et de contours irréguliers, 5 % concrétions ferro-manganiques
- BTg2 61-95cm    brun rouille, argileux, structure polyédrique moyennement développée à unités de 2 à 3cm, 40 % de taches d'oxydation de contraste distinct et de contours irréguliers, 30 % de taches grises
- C 95-124cm      Brun rouge, argile sableuse, très compact sans structure, 30% de gravier et cailloux gréseux, 15 % de taches grises de contraste distinct et de contours nets..
- IIC/M 124-220cm    Gris, argile lourde, structure lithique, carbonatée

*Enracinement : forte densité de racines jusqu'à 20cm, moyenne jusqu'au BTg2, présence en profondeur*

## granulométrie

53					
horizon	A %	LF %	LG %	SF %	SG %
A 0-2 cm					
E 2-19 cm	17,8	42,4	25,6	4,9	9,3
Eg 19-36cm	20,5	40,9	24,7	4,9	9,0
BTg1 36-61cm	31,0	38,0	22,8	3,9	4,3
BTg2 61-95cm	41,0	34,4	18,8	2,8	3,0
C 95-124cm					
IIC/M124-220cm	42,9	29,9	14,3	4,4	8,5

## Description YL



**luvisol rédoxisol sur limons moyennement épais sur marne**

# Exemple de calcul de réserve utile d'un luvisol

$$= \text{épaisseur} * \text{coef} * (100 - \text{cailloux})/100$$



Fosse 7 placette 35 languimberg parcelle luvisol rédoxique											
limite 1	limite 2	m_horiz	épaisseur	texture	HCC	HPF	d.a.	% cailloux	%glosse	RU /horizon	RU cumulée
0	2	A	2	LA	27	13	1.4	0	0	4	4
2	17	E	15	LA	27	13	1.4	0	0	29	33
17	36	Eg	19	LA	27	13	1.4	0	0	37	71
36	61	Btg1	25	AL	32	19	1.4	0	0	46	116
61	95	Btg2	34	AL	32	19	1.4	0	0	62	178
95	124	II Btg	29	AL	32	19	1.4	30	0	37	215
124	180	II C/M	56	AL	32	19	1.4	0	50	51	266

**RU<sub>Jamagne</sub> = 265 mm sur 180 cm**



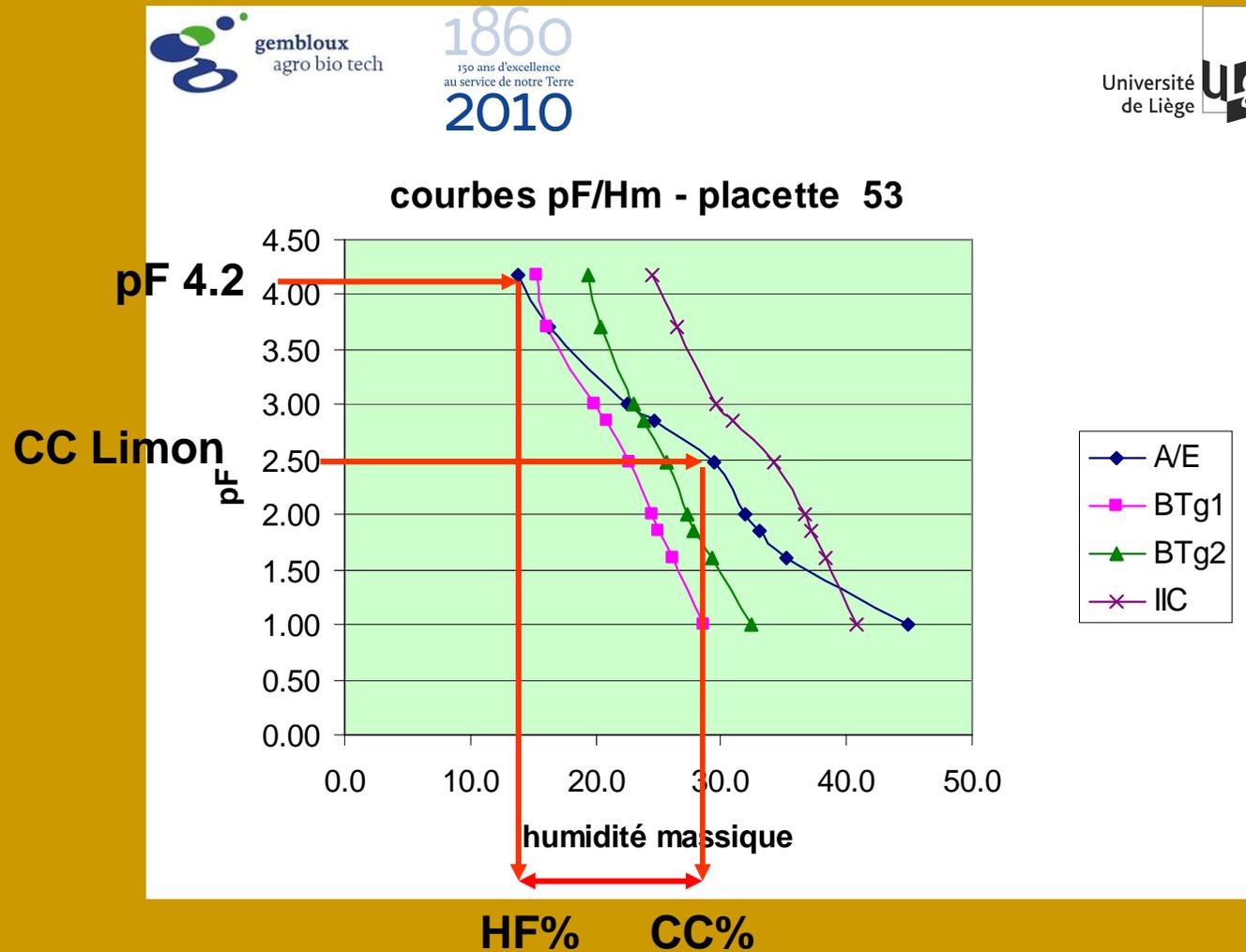
Texture	CC %	HF %	RUM %	da	RUM mm/cm
Jamagne					
<b>S</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>1,35</b>	<b>0,70</b>
SL	12	5	7	1,40	1,00
SA	19	10	9	1,50	1,35
LIS	15	7	8	1,50	1,20
LS	19	9	10	1,45	1,45
LmS	20	9	11	1,45	1,60
LSA	22	11	11	1,50	1,65
LAS	24	12	12	1,45	1,75
LI	17	8	9	1,45	1,30
Lm	23	10	13	1,35	1,75
<b>LA</b>	<b>27</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>1,40</b>	<b>1,95</b>
AS	33	22	11	1,55	1,70
A	37	25	12	1,45	1,75
AL	32	19	13	1,40	1,80
<b>Alo</b>	<b>Séd.</b>	<b>29</b>	<b>18</b>	<b>1,50</b>	<b>1,65</b>
	<b>Alt.Π.</b>	<b>38</b>	<b>25</b>	<b>1,30</b>	<b>1,70</b>

# Les imperfections de la méthode

Une méthode simple et rapide mais empreinte de nombreuses imprécisions

- Valeurs moyennes des humidités CC et HF
- Valeur moyenne de la densité apparente (sols agricoles)
- Echantillons remaniés (non prise en compte de la structure)
- Pour les horizons argileux, non prise en compte de la nature minéralogique
- Echantillons provenant, en grande partie, du seul département de l'Aisne
- Echantillons provenant, majoritairement, de sols agricoles

# Courbes de rétention - pF-humidité



# Exemple de calcul de réserve utile d'un luvisol à partir :

- (1) de courbes pF-humidité
- (2) de densités sols forestiers
- (3) sans correction « glosse »

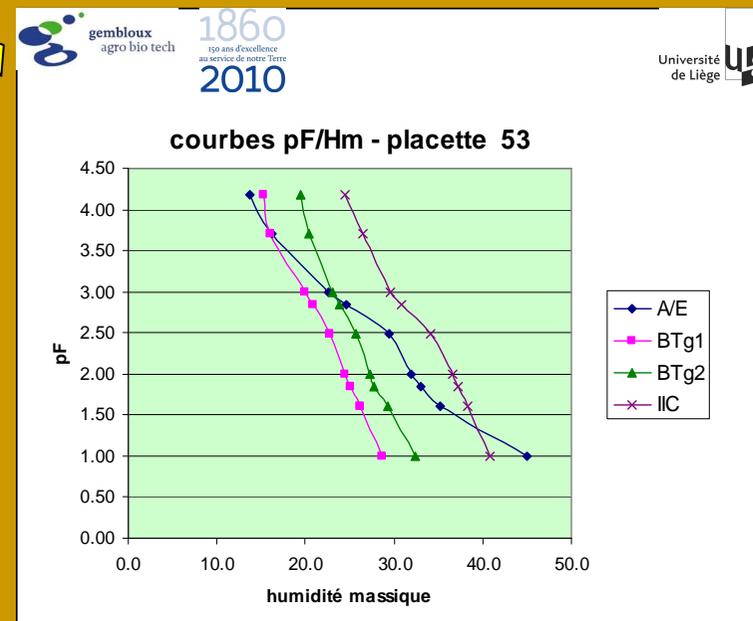
Fosse 7 placette 35 languimberg parcelle luvisol rédoxique										
limite 1	limite 2	m_horiz	épaisseur	texture	HCC	HPF	d.a.	% cailloux	RU /horiz	RU cumulée
0	2	A	2	LA	31.34	14.42	1	0	3.4	3
2	17	E	15	LA	31.34	14.42	1.2	0	30.5	34
17	36	Eg	19	LA	31.34	14.42	1.3	0	41.8	76
36	61	Btg1	25	AL	23.47	16.72	1.5	0	25.3	101
61	95	Btg2	34	AL	22.08	18.22	1.6	0	21.0	122
95	124	II Btg	29	AL	22.08	18.22	1.6	30	12.6	135
124	180	II C/M	56	AL	29.69	23.73	1.7	0	56.7	191

**Avec CC à pF 2.5 Limon  
à pF 3 Argile**

**RU pF/da = 191 mm sur 180 cm**

**RU<sub>Jamagne</sub> = 265 mm sur 180 cm**

**Soit 39% de moins avec pF + da**



# A propos de la densité apparente

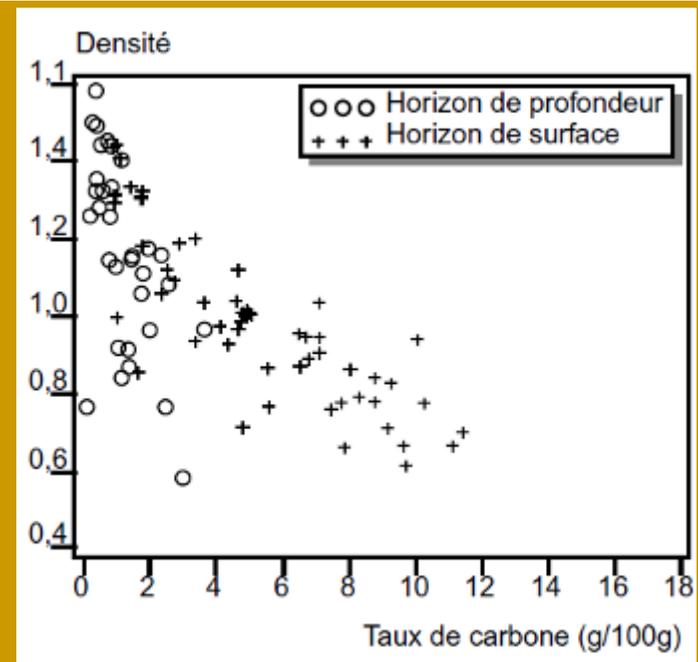
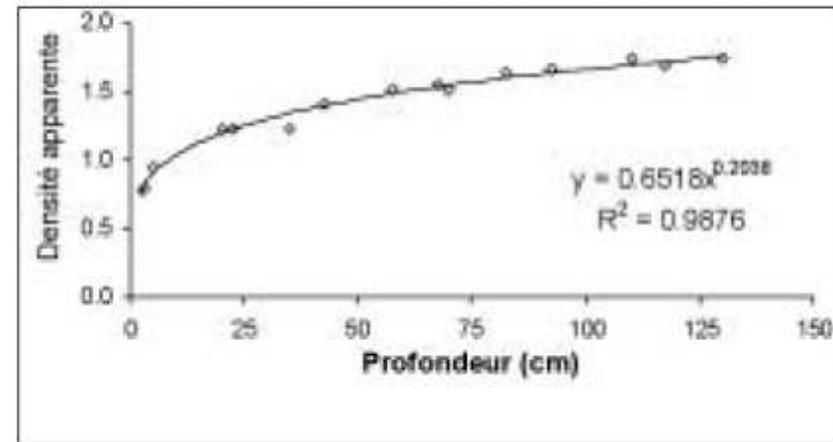
- Augmente avec la profondeur
- Dépend de la teneur en MO ou taux de carbone
- Dépend de la pierrosité
- Il existe des « modèles » adaptés aux sols forestiers
- Mais elle se mesure !



$$Da = 1.19 - 0.046 C(\text{g}/100\text{g}) + 0.53 \text{ Prof (m)} - 0.45 \text{ Pierrosité (0-1)}$$

*Dupouey et al., 1997, ESG*

Figure 7 - Relationship between depth and bulk density from



# Tests de sensibilité : importance relative des imprécisions

1. L'épaisseur de sol prise en compte (donc l'observation des racines)
2. La charge en éléments grossiers cailloux
3. Le choix de la succion pour la capacité au champ (selon la texture, devrait varier entre 2.0, 2.5 et 3)
4. La densité apparente (plus faible en surface que sols agricoles, plus forte en profondeur)

Tout cela ne produit pas un biais systématique, selon les horizons et leurs propriétés, les erreurs sur ou sous-estiment ...

# Rôle primordial de l'observation



- Limite d'horizon
- Les éléments grossiers
- Prospection racinaire



- Quelque soit le coefficient grande sensibilité sur l'estimation d'épaisseur, charge en éléments grossiers, ...



Fin