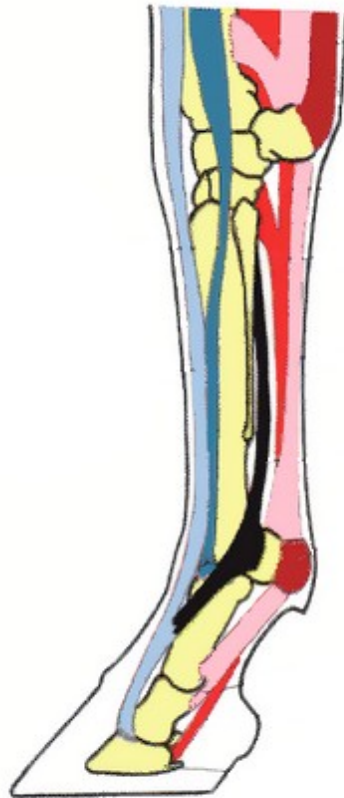


Etude de l'amortissement de différents sols et de leur impact sur les articulations des équidés.

BOCHE Coline

N° : 20325



Sommaire

Quelle est l'influence des différents sols sur les articulations des équidés ?
Quel sol est alors le plus adapté à la pratique de l'équitation ?

- I- Mesure de la force appliquée lors de l'appui au sol.
- II- Modélisation physique et caractéristiques du tendon.
- III- Modélisation d'un tendon à partir de collagène.

1- Amortissement et élasticité d'un sol.

Définition : L'élasticité du sol est la caractéristique qui mesure le degré de compression (tassement) et qui détermine la capacité d'amortissement.

$$K = \frac{1}{S_t}$$

Où K = élasticité en N/m³
S_t = tassement du sol

Type de sol	K en MN/m ³	S _t en MN ⁻¹ /m ⁻³
Béton	8 000 – 15 000	6,7.10 ⁻⁵ – 1,25.10 ⁻⁴
Argile	50 - 100	0,01 – 0,02
Sable	5 - 50	0,02 – 0,2

2- Mesures expérimentales.



Figure 1 : Accéléromètre Witmotion

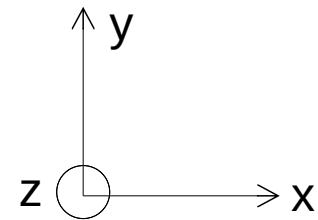


Figure 2 : Puce électronique Witmotion

2- Mesures expérimentales.



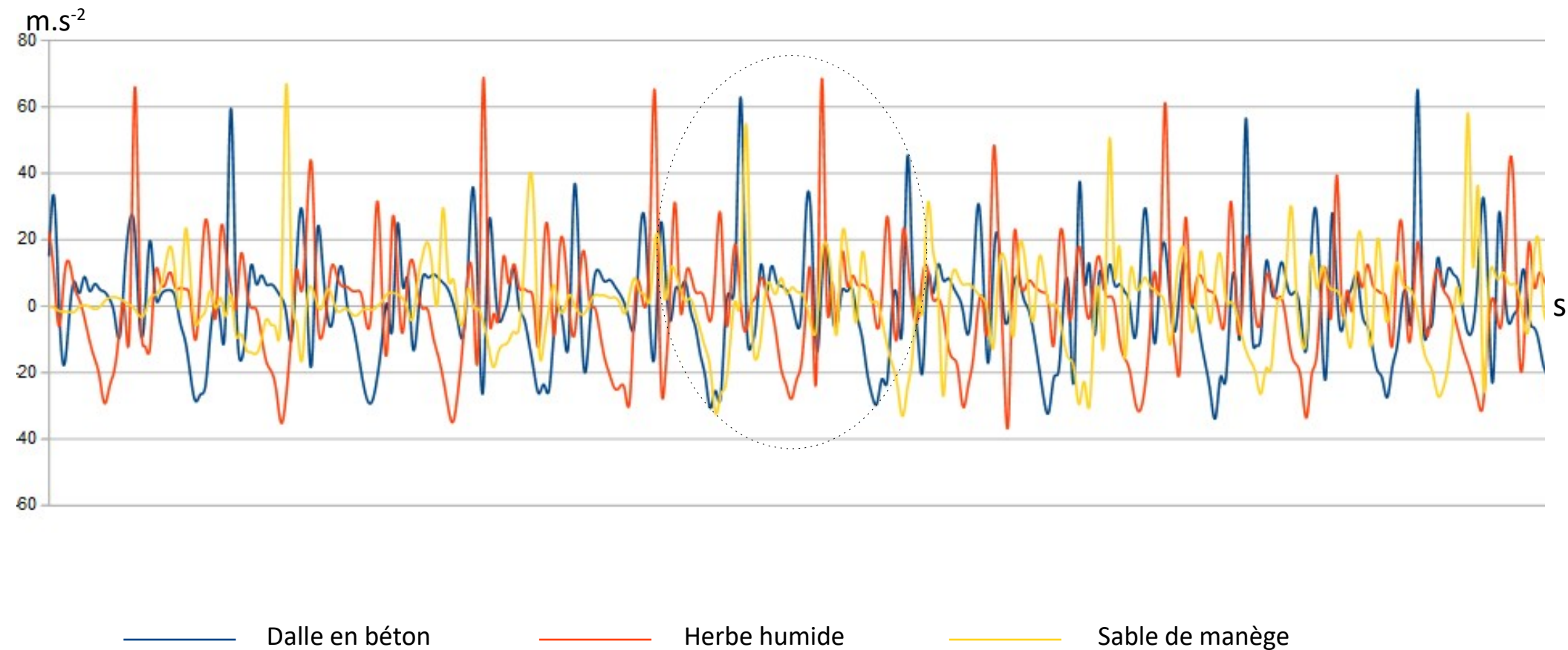
Figure 3 : Montage expérimental



50 acquisitions par seconde
1 acquisition toutes les 0,02s

2- Mesures expérimentales.

Figure 4 : Mesure de l'accélération verticale selon le temps pour différents sols



2- Mesures expérimentales.

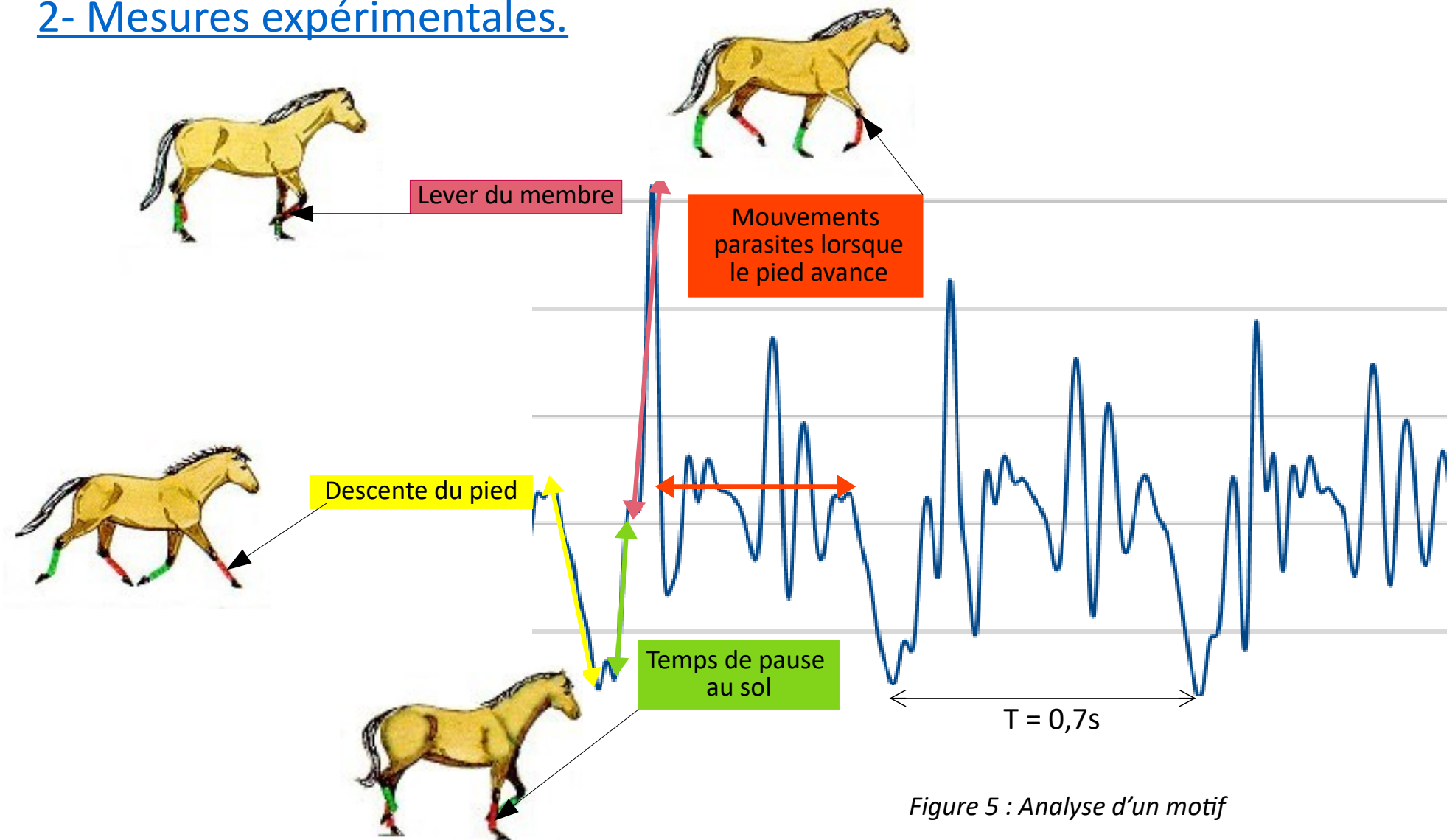


Figure 5 : Analyse d'un motif

3- Résultats des mesures

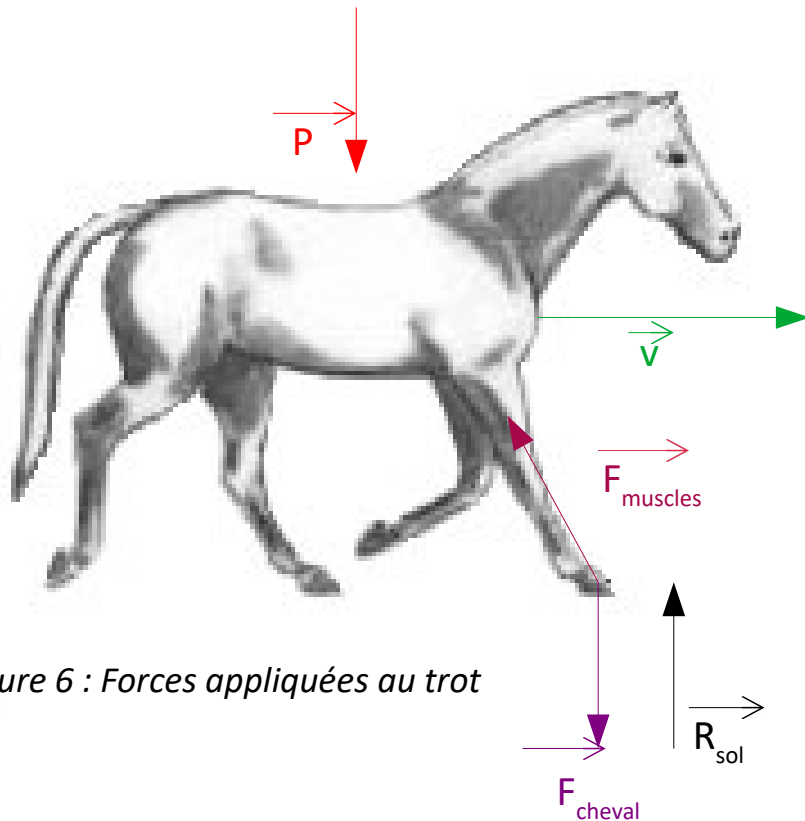


Figure 6 : Forces appliquées au trot

Forces appliquées :

- $\vec{Poids} = - m \cdot g \vec{u}_y$
- $\vec{F}_{\text{cheval}} = \pm F \vec{u}_y$
- $\vec{F}_{\text{muscles}} = F_{\text{muscles}} \vec{u}_y - F_{\text{muscles}} \vec{u}_x$
- $R_{\text{sol}} = \pm S_t \cdot |F_{\text{cheval}}| \vec{u}_y$

3- Résultats des mesures

	Accélération verticale lors du poser au sol	Poussée verticale lors du lever du pied	Force appliquée lors du poser	Force appliquée lors du lever
Béton	- 25,06 m.s ⁻²	76,09 m.s ⁻²	3 203 N	18 041 N
Argile	- 26,02 m.s ⁻²	84,56 m.s ⁻²	3 456 N	20 119 N
Sable	- 26,80 m.s ⁻²	73,80 m.s ⁻²	4 009 N	19 728 N

1- Oscillateur Harmonique

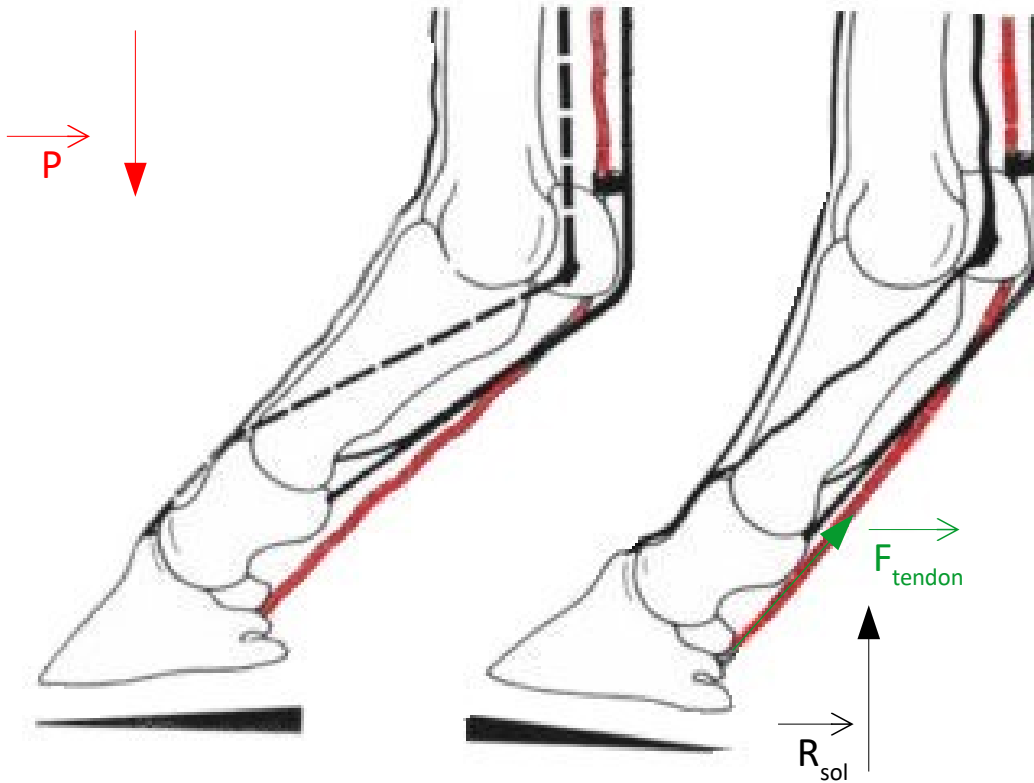


Figure 7 : Extension du tendon au poser du pied

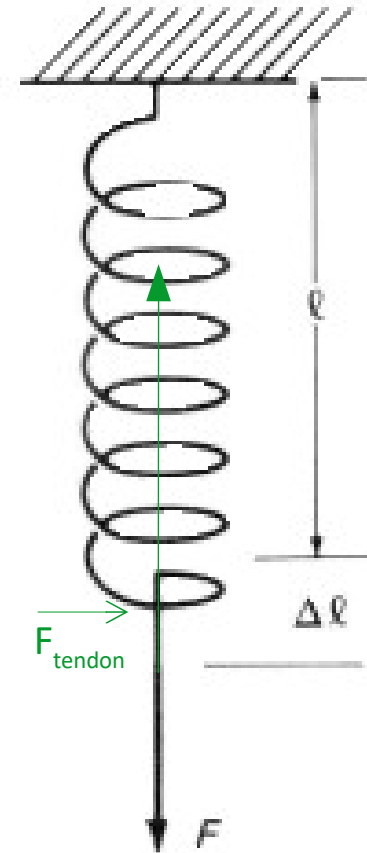


Figure 8 : Modèle de l'oscillateur harmonique

1- Oscillateur Harmonique

Forces appliquées :

- $\vec{F}_{\text{ressort}} = -k \cdot \Delta L \vec{u}_y$
- $\vec{F}_{\text{poussée}} = -F_{\text{poussée}} \vec{u}_y$
- $\vec{Poids} = -m \cdot g \vec{u}_y$

	Force subie par le tendon au poser du pied	Amortissement du sol
Béton	3 193 N	10 N
Argile	3 352 N	104 N
Sable	3 127 N	882 N

Longueur tendon = 18 cm

Allongement du tendon $\Delta L = 0,54$ cm

On en déduit la constante de raideur du tendon : $k_{\text{tendon}} = 196$ kN/m

Comme le tendon transmet l'intégralité des chocs subis à l'articulation du genou,

$$F_{\text{subie par l'articulation}} = F_{\text{ressort}}$$

2- Caractéristiques du tendon

Surface proximale S_{prox}	84,8 mm ²
Surface distale S_{dist}	107,2 mm ²
Contrainte maximale de traction σ_{max}	0,69.10 ⁸ N/m ²
Force proximale supportable $F_{\text{prox,max}}$	5851 N
Force distale supportable $F_{\text{dist,max}}$	7396 N

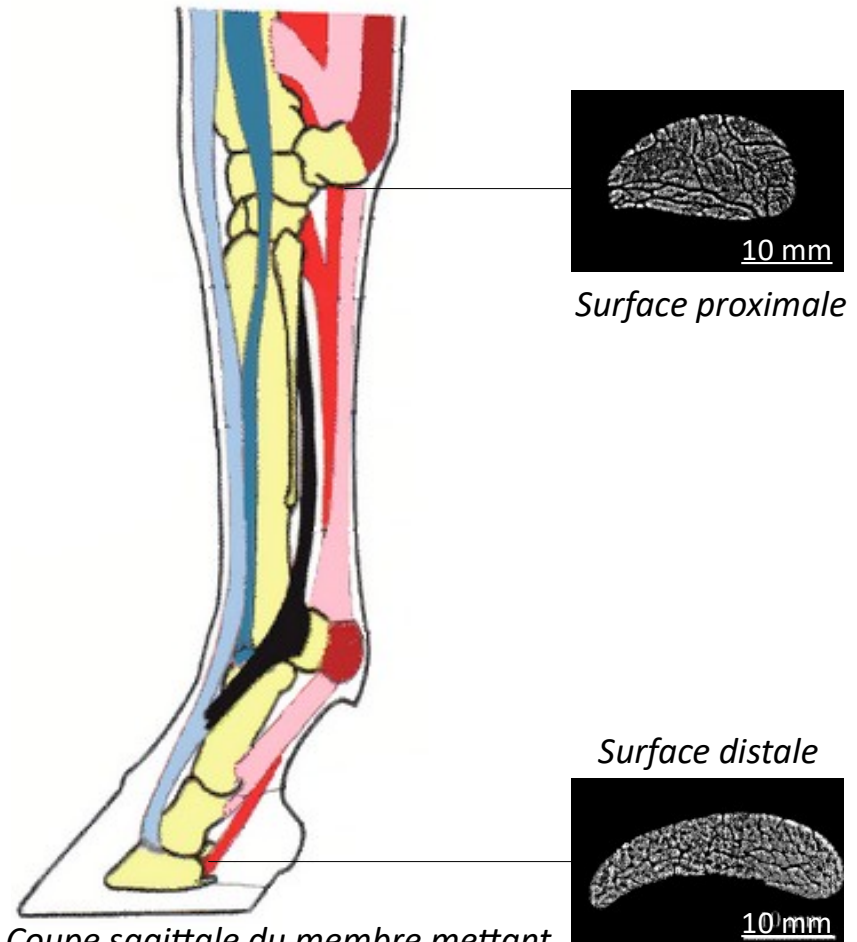


Figure 9 : Coupe sagittale du membre mettant en évidence le tendon perforant

1- Principe et expérience

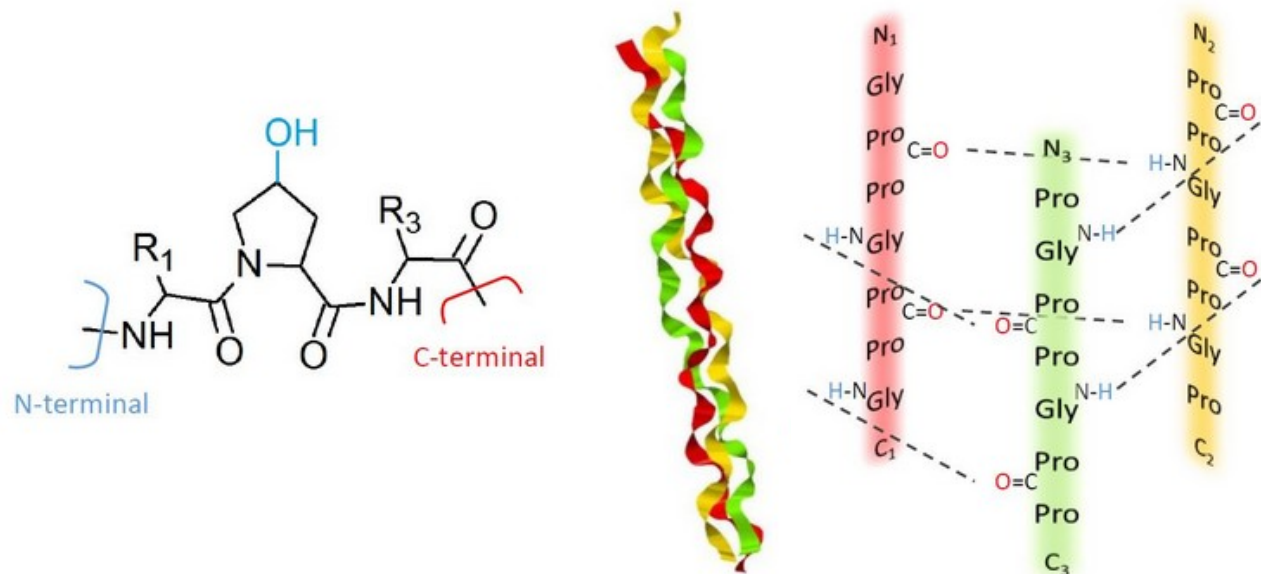


Figure 10 : Formation des brins de collagène

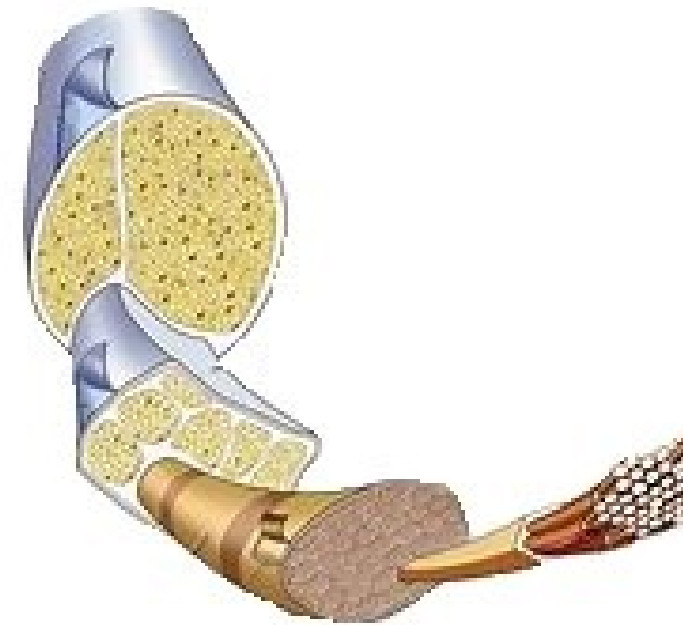


Figure 11 : Coupe d'un tendon

Collagène : polypeptide naturel biocompatible avec l'organisme humain et susceptible de former des liaisons H

1- Principe et expérience

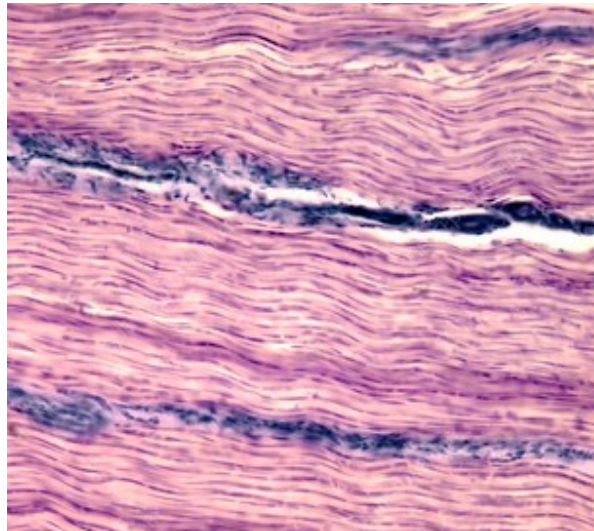
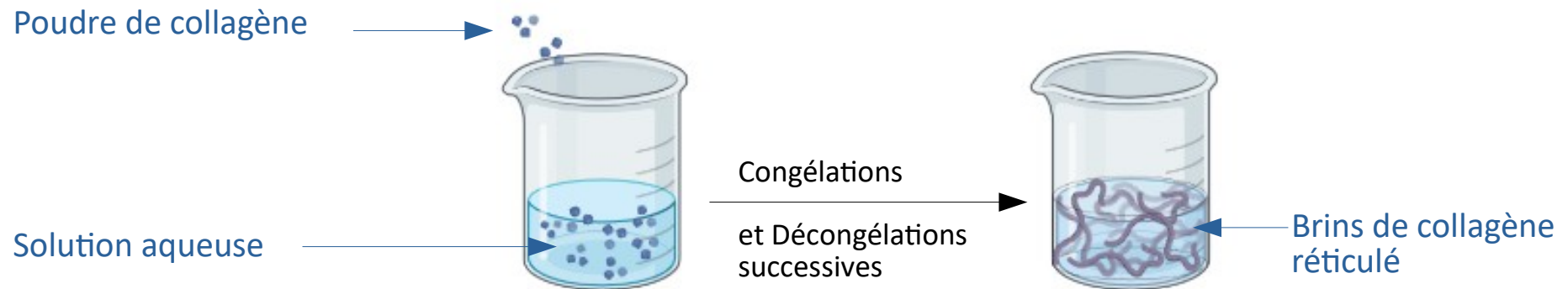


Figure 12 : Fibres de collagène dans un tendon

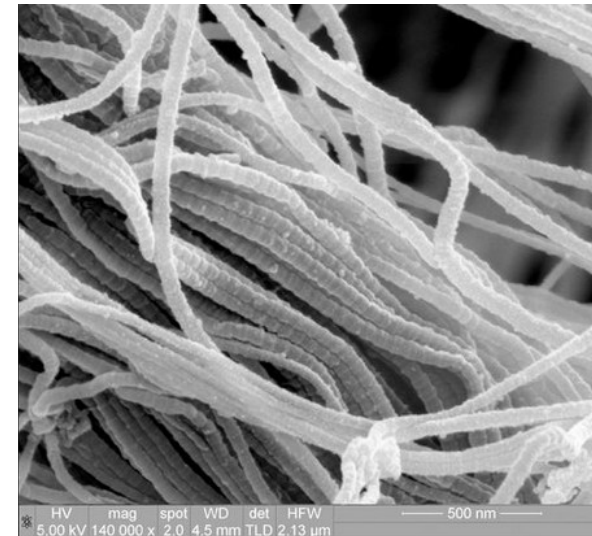


Figure 13 : Brins de collagène réticulé

2- Etude de la contrainte

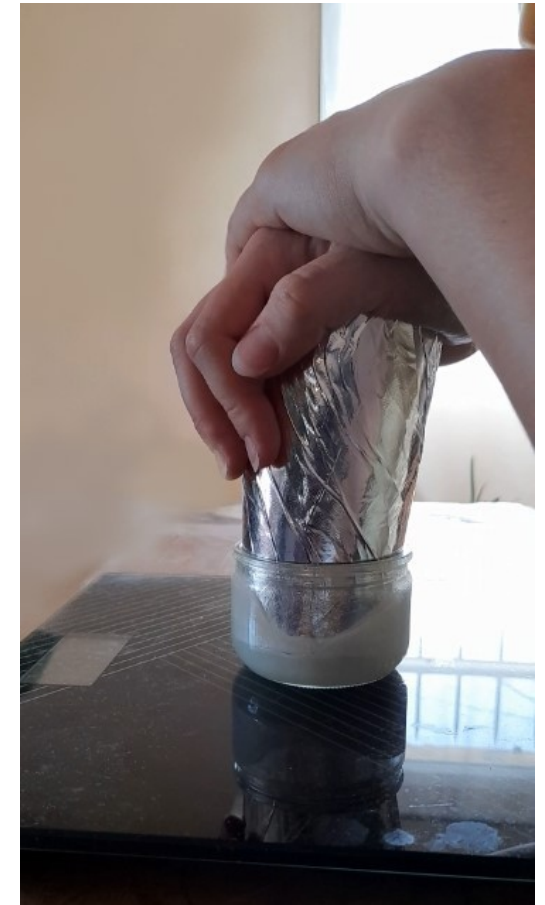
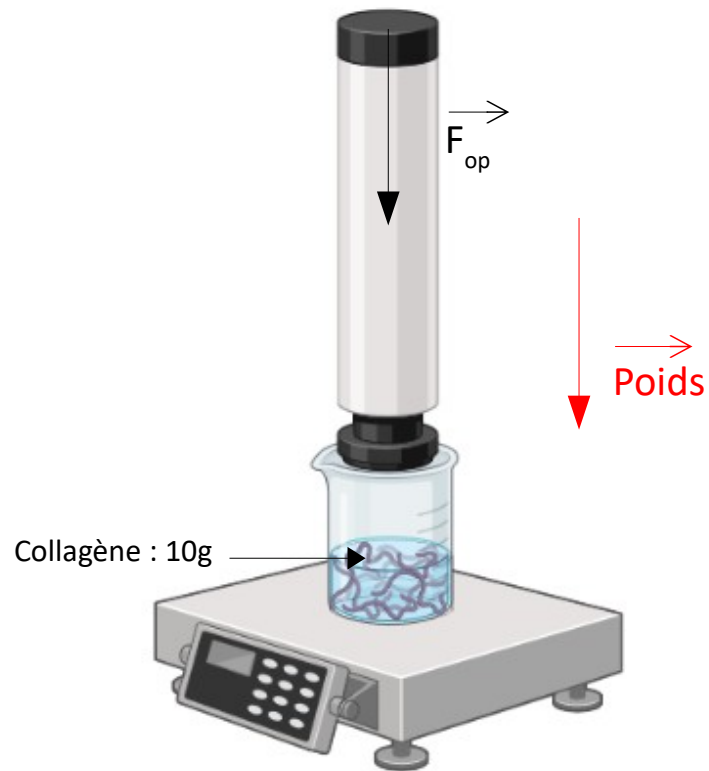


Figure 14 : Compression de l'hydrogel pour déterminer ses caractéristiques

2- Etude de la contrainte

	Expérience 1 : $V_{\text{eau}} = 50 \text{ mL}$	Expérience 2 : $V_{\text{eau}} = 30 \text{ mL}$
$F_{\text{op}} \text{ (N)}$	165	195
Poids (N)	6	4
$F_{\text{max}} \text{ (N)}$	171	199
$\sigma_{\text{max}} \text{ (N/m}^2\text{)}$	48900	56900

3- Comparaison avec le tendon

Contrainte maximale supportée par le tendon : $\sigma_{\max} = 0,69.10^8 \text{ N/m}^2$

Pourquoi une si grande différence de contrainte :

- Mauvaise solubilité du collagène dans l'eau
- Collagène commercial comportant acide hyaluronique vitamine C et excipients
- Concentration de collagène trop élevée pour la concentration en eau

4- Amélioration du modèle

- Concentration en collagène plus faible
- Chauffer l'eau initialement pour améliorer la solubilité
- Collagène d'origine animale pur
- Utiliser des collagènes modifiés chimiquement
- Explorer l'influence de la congélation sur la gélification ultérieure

Conclusion

- Meilleure locomotion sur le béton
- Force pour lever le pied du sable ou de l'argile plus importante
- Meilleur amortissement des chocs subis par les articulations sur du sable
- Modèle de tendon à partir de collagène pertinent mais on pourrait étudier l'influence de [c]



Annexe

On exprime K de diverses façons : $K = \frac{1}{S_t} = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \lambda + \frac{2}{3} \mu$

Avec ν défini par : $\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right)$

λ le coefficient primaire de Lamé

μ le module de cisaillement, noté parfois G

λ et μ sont définis par la loi de Hooke : $\sigma = \lambda \cdot \delta \cdot \theta + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon$

Annexe

Selon l'approche de Terzaghi, on exprime le tassement du sol :

$$S_t = S_i + S_c + S_s$$

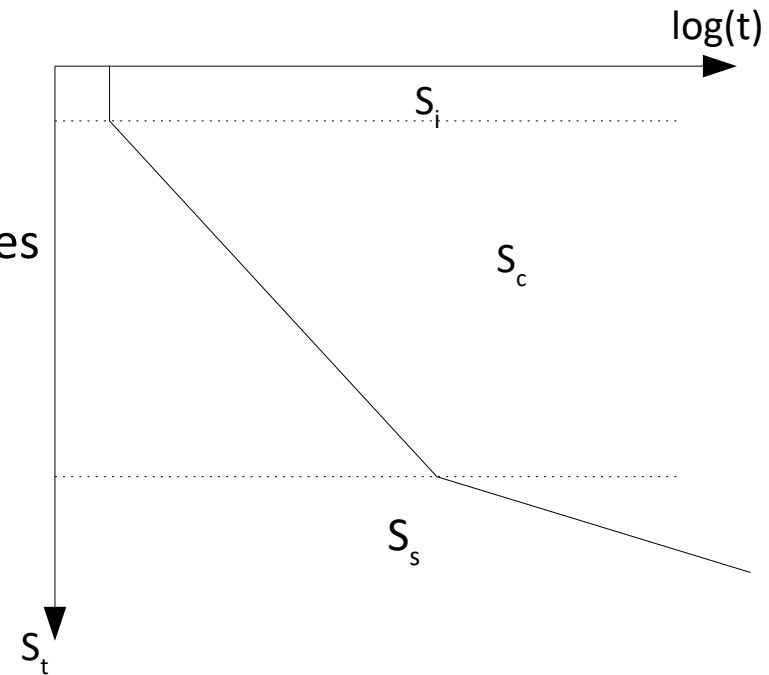
S_i : Tassement immédiat causé par le poids du sol

S_c : Tassement primaire dû à la surcharge

S_s : négligé car n'existe que pour des durées importantes

$$S_i = q \cdot B' \frac{1 - \nu^2}{E_s} m \cdot l_s \cdot l_f$$

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_0} H_0 \log \left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma_z}{\sigma_0} \right)$$



Annexe

q : charge extérieure en N/m^2

B' : $B/2$ la largeur de la semelle appliquée, ici $B' = 5,3 \text{ cm}$

ν : coefficient de Poisson du sol

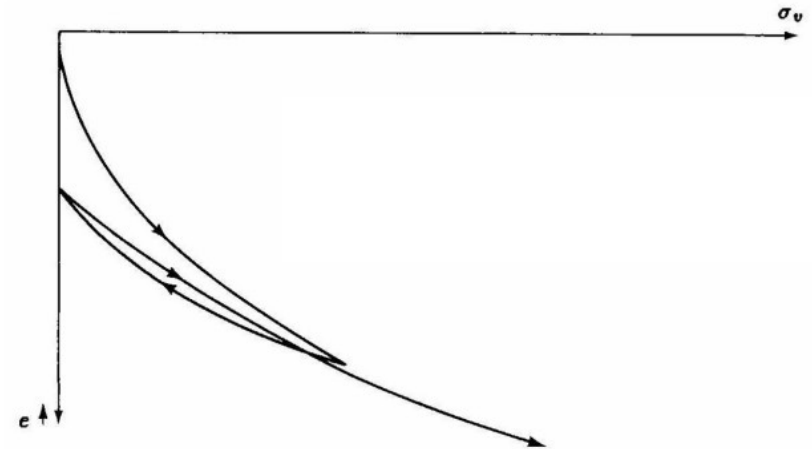
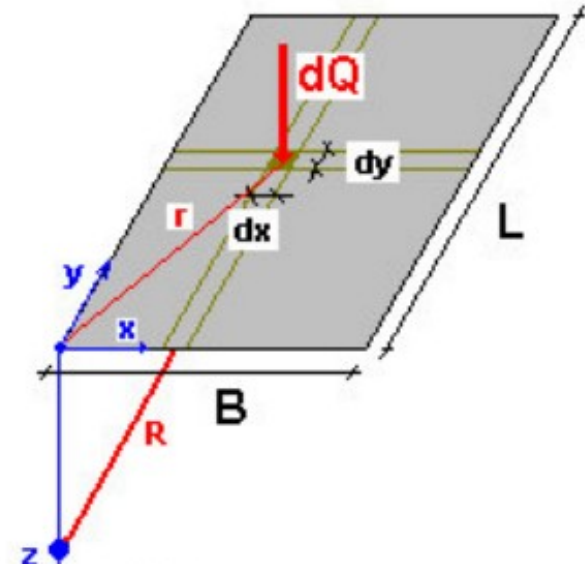
E_s : Module de déformation du sol valable jusqu'à $z = 5B$

m : tassement au centre, on prendra $m = 4$

I_s, I_f : sont calculées à partir de L/B et de ν , où L est la longueur de la semelle

C_c : coefficient de compression du sol,
avec $C_c \in]0,1[$ $C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta(\log(\sigma))}$

$e = f(\sigma)$ l'indice de déformation



Annexe



Approche de Terzaghi :

Analyse du tassement du sol selon des couches de sol d'épaisseur :

$$Z_n = 0,2\text{m}$$

Si $Z_n < 0,2\text{m}$, on calcule S_t pour toute la couche.



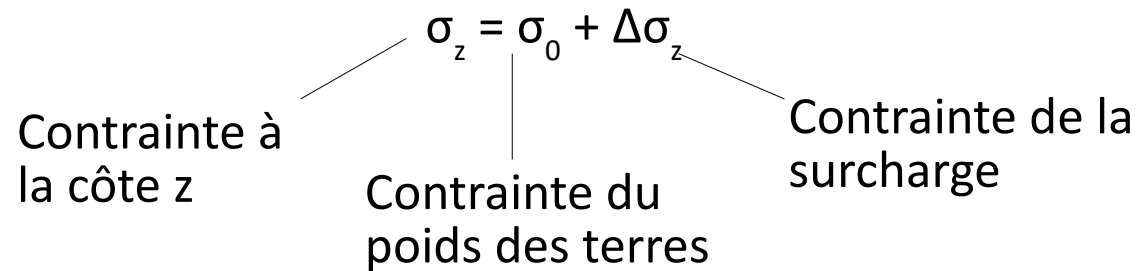
E_s défini jusqu'à $Z = 5B$

Z_n :

- $\in [1,10]$

- la surcharge représente moins de 25 % de la contrainte du sol

Annexe

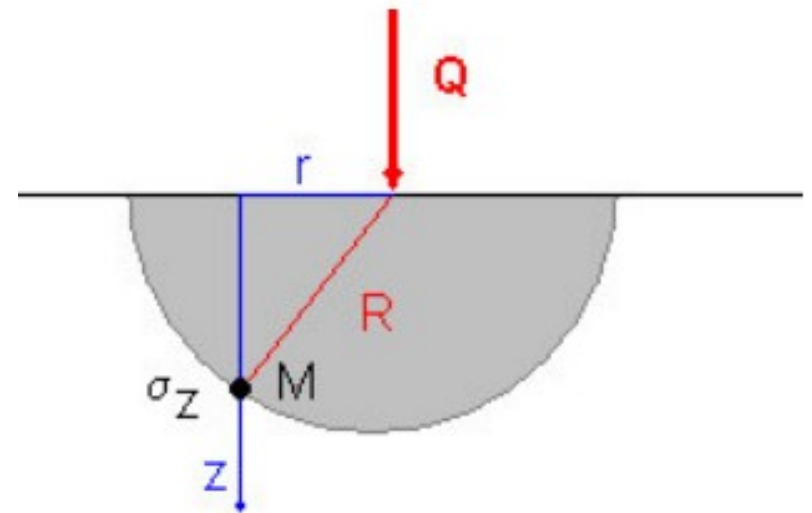


Pour un sol homogène : $\sigma_0 = \gamma \cdot Z$ où γ est l'indice de compression

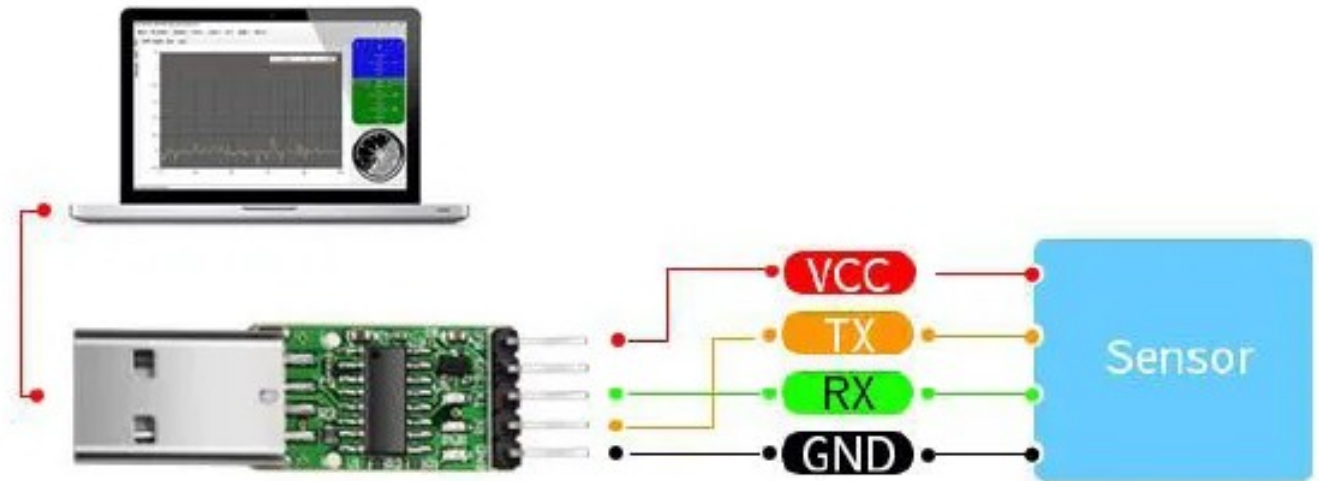
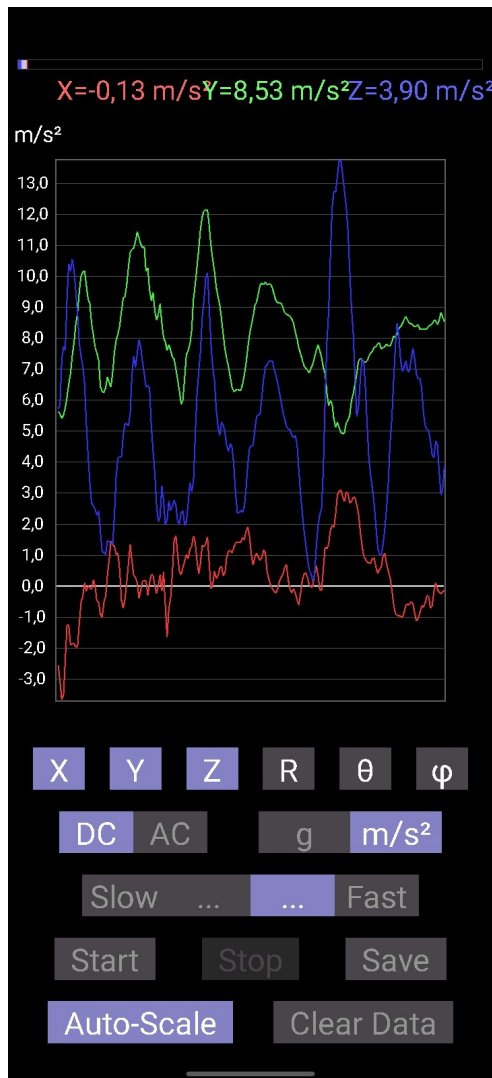
Pour une charge q uniforme : $\Delta\sigma_z = q$

Pour une charge non uniforme Q : $\Delta\sigma_z = \frac{3Q \cdot z^3}{2\pi(r^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}$

$\Leftrightarrow = \frac{3Q \cdot z^3}{2\pi \cdot R^5}$



Annexe

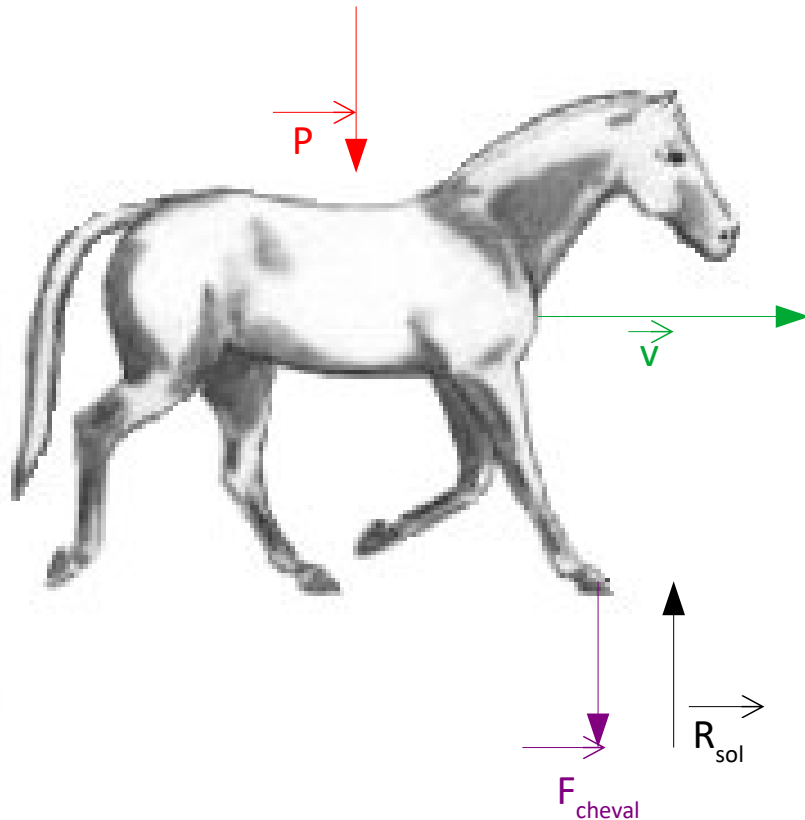


Résolution : 0,0023942017 m/s²

Accélération maximale : 78,4532 m/s²

Puissance : 1,9 mW

Annexe



Pour le poser du pied :

- $\vec{Poids} = - m.g \vec{u}_y$
- $\vec{F}_{cheval} = - F \vec{u}_y$
- $\vec{R}_{sol} = S_t \cdot F \vec{u}_y$

Loi de la dynamique :

$$\vec{Poids} + \vec{F}_{cheval} + \vec{R}_{sol} = m.a(sol) \vec{u}_y$$

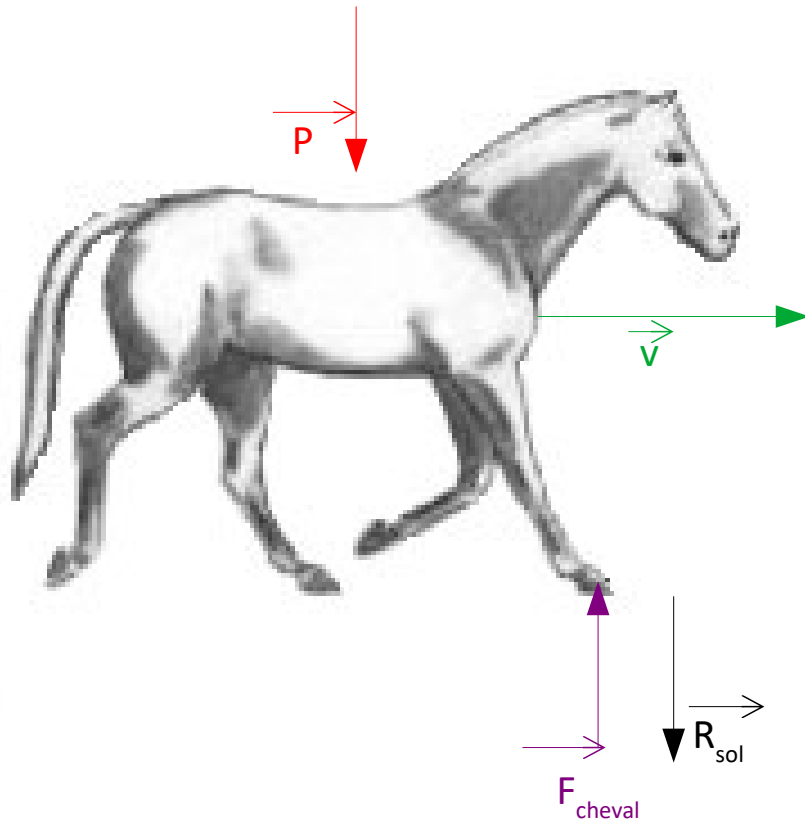
$$\Leftrightarrow - m.g \vec{u}_y + (S_t(sol) - 1) F \vec{u}_y = m.a(sol) \vec{u}_y$$

$$\Leftrightarrow m(a(sol) + g) + (1 - S_t(sol))F = 0$$

$$\Leftrightarrow F = \frac{m(a(sol) + g)}{(S_t(sol) - 1)}$$

$m = M_{cheval} \cdot 0,6$ car 60 % de la masse du cheval sur les antérieurs où $M_{cheval} = 350 \text{ kg}$

Annexe



Pour le lever du pied :

- $\vec{Poids} = - m.g \vec{u}_y$
- $\vec{F}_{cheval} = + F \vec{u}_y$
- $\vec{R}_{sol} = - S_t \cdot F \vec{u}_y$

Loi de la dynamique :

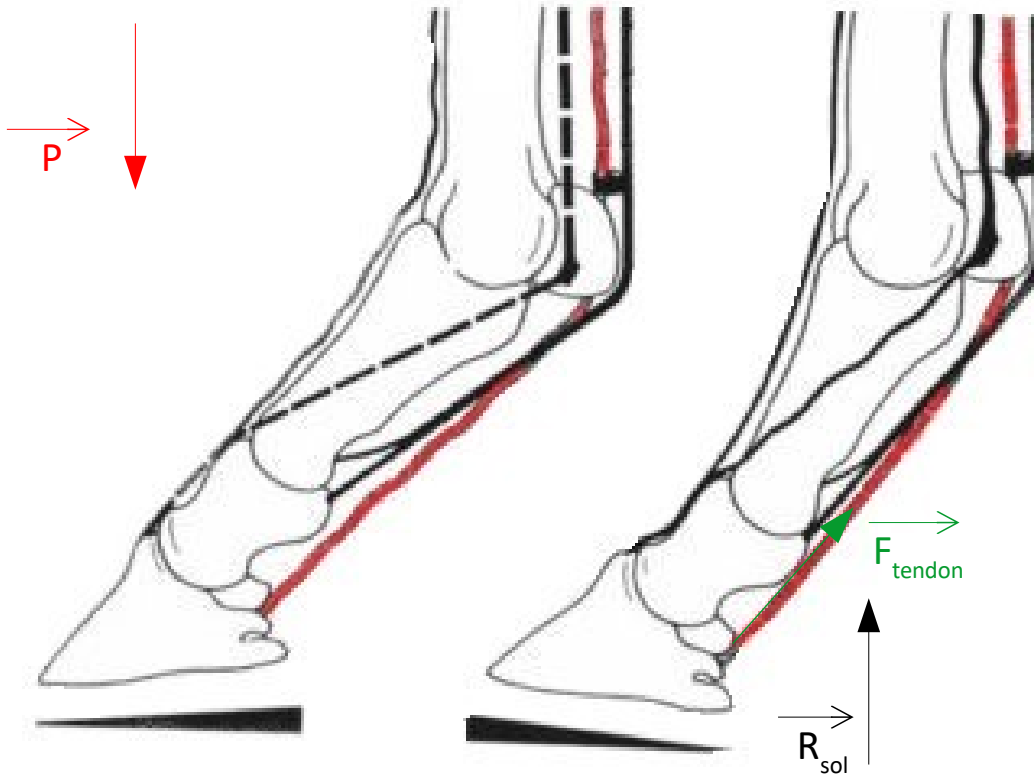
$$\vec{Poids} + \vec{F}_{cheval} + \vec{R}_{sol} = m.a(sol) \vec{u}_y$$

$$\Leftrightarrow - m.g \vec{u}_y + (1 - S_t(sol)) F \vec{u}_y = m.a(sol) \vec{u}_y$$

$$\Leftrightarrow m(a(sol) + g) = (1 - S_t(sol))F$$

$$\Leftrightarrow F = \frac{m(a(sol) + g)}{(1 - S_t(sol))}$$

Annexe



Pour le poser du pied :

- $\vec{Poids} = -m \cdot g \vec{u}_y$
- $\vec{F}_{tendon} = + F_{tendon} \vec{u}_y$
- $\vec{R}_{sol} = S_t \cdot F \vec{u}_y$

Equation du mouvement :

$$\vec{F}_{tendon} + \vec{R}_{sol} + \vec{Poids} = m \cdot a(sol) \vec{u}_y$$

$$\Leftrightarrow \vec{F}_{tendon} = m \cdot a(sol) \vec{u}_y - \vec{Poids} - \vec{R}_{sol}$$

$$\Leftrightarrow F_{tendon} = m(a(sol) + g) - S_t(sol) \cdot F$$

Annexe

Gel :

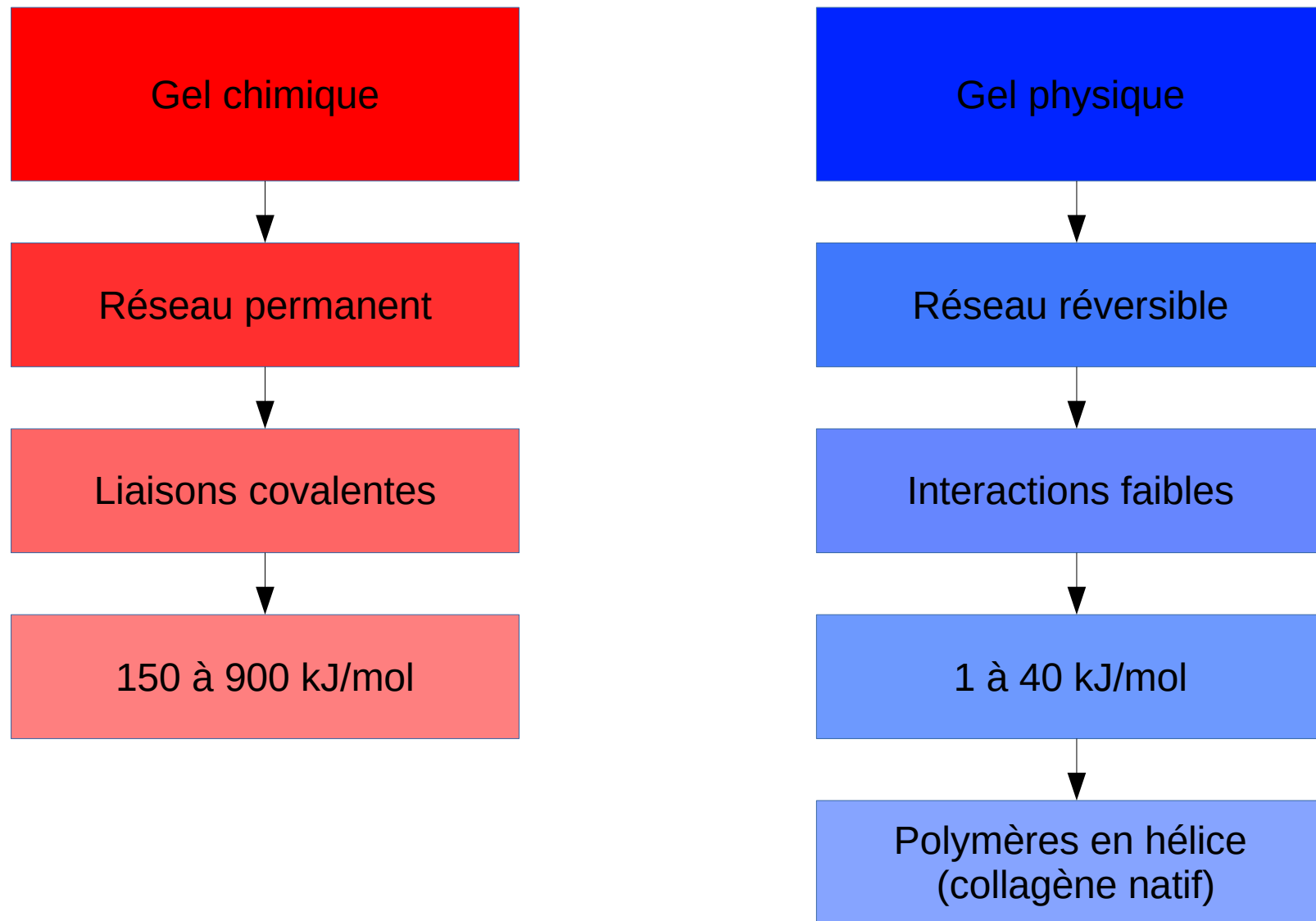
- liquide semi-solide capable de tenir sous son propre poids
- issu d'un réseau formé par des gouttes ou des macromolécules
- obtenu en solubilisant le composé (collagène) dans une phase dispersante
- différenciation par la nature du solvant (aqueux, organique, gazeux)

Un gel est caractérisé par rhéologie, par G' (module élastique) et G'' (module visqueux).

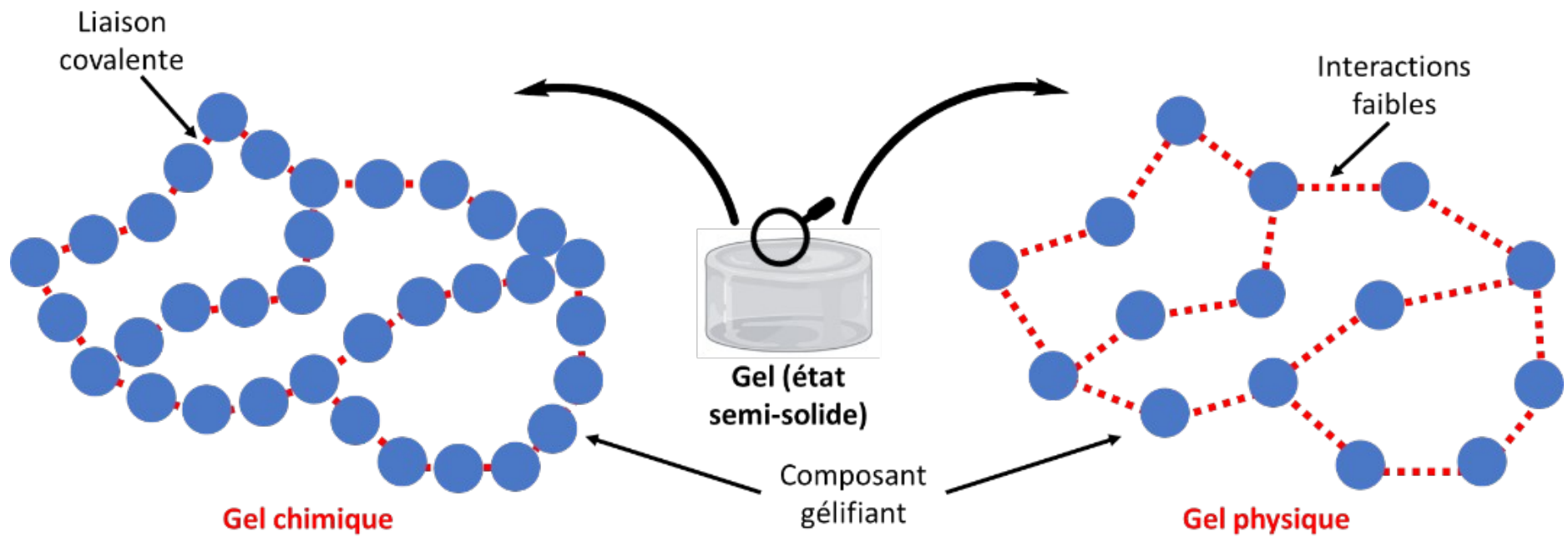
Sous une contrainte, $G' > G''$.

Gels thixotropes : gels qui sous l'effet d'une contrainte (compression) se déforment puis se reforment automatiquement.

Annexe



Annexe



On va pouvoir moduler, par des transformations chimiques, la force du gel et modifier ses propriétés physico-chimiques.

Annexe

Espèces présentes dans les comprimés de collagène commercial

Collagène marin	250 mg
Vitamine C	40 mg
Acide hyaluronique	32,5 mg

Hydrolysate de collagène	57,9 %
Agent de charge	6,3 %
Excipient	35,8 %

Annexe

- Incertitude sur les mesures d'accélération : $\pm 0,0023942017 \text{ m/s}^2$
- Incertitude sur les mesures de forces : $\pm 0,5 \text{ N}$
- Incertitude sur la mesure de la masse max collagène : $\pm 100\text{g}$
- Incertitude masse collagène et eau : $\pm 0,5 \text{ g}$