

Thème : jeux et
sports

2023-2024

PELLECUER

Aurélien
N°27880

La science des balles de tennis : étude des
différentes propriétés physico-chimiques et
interprétations des performances des balles.

SOMMAIRE

PROBLÉMATIQUE

En quoi la pression intérieure, le feutre et le caoutchouc d'une balle de tennis sont des facteurs déterminants de son comportement lors d'un jeu ?

- I. Introduction : présentation du sujet et enjeux
- II. Une approche physique de la balle de tennis
- III. La balle de tennis : un concentré de chimie
- IV. Conclusion vis-à-vis des performances des balles de tennis

I. INTRODUCTION : PRÉSENTATION DU SUJET ET ENJEUX

Constitution d'une balle		Objectifs de l'étude	
Diamètre : 6,54-6,86 cm Poids : 56-59,4 g Hauteur du premier rebond : 135-147 cm	draps sable	Perte de pression	Étude chimique du caoutchouc
	feutre caoutchouc air	Écoulement de l'air	Perte d'énergie des balles

Balles sans pression



Artengo

Masse : 49,30 g
Diamètre : 6,54 cm



Masse : 57,67 g
Diamètre : 6,54 cm

Balles avec pression initiale à 1600 hPa



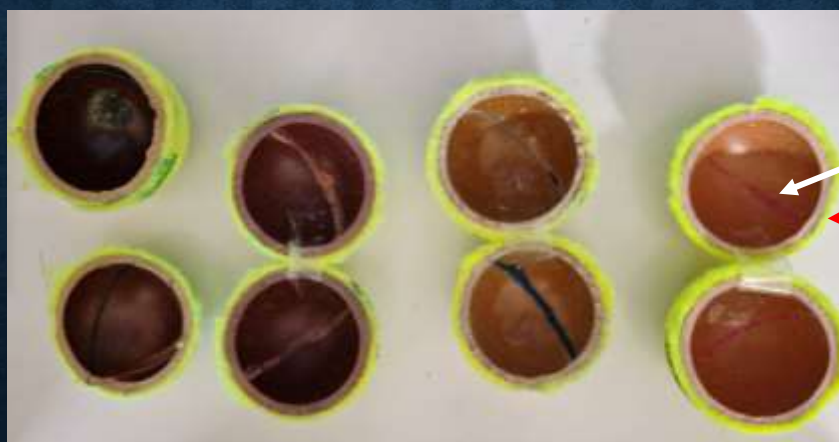
Wilson

Masse : 57,88 g
Diamètre : 6,60 cm



Artengo

Masse : 56,97 g
Diamètre : 6,52 cm



caoutchouc

feutre

Balles coupées

II. UNE APPROCHE PHYSIQUE DE LA BALLE DE TENNIS

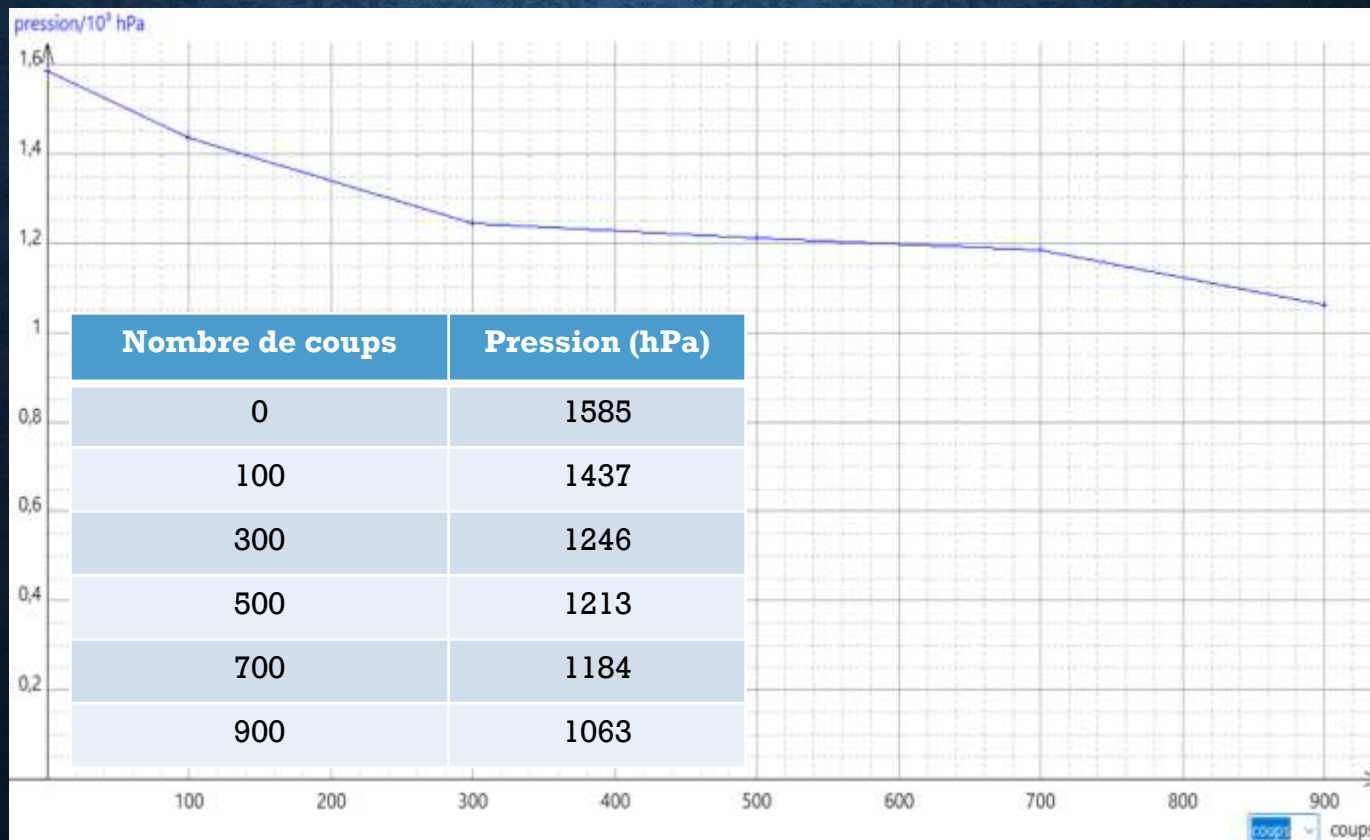
Lancé sans vitesse
à $H = 2,54$ m sur
du béton



Mesure de la hauteur de rebond

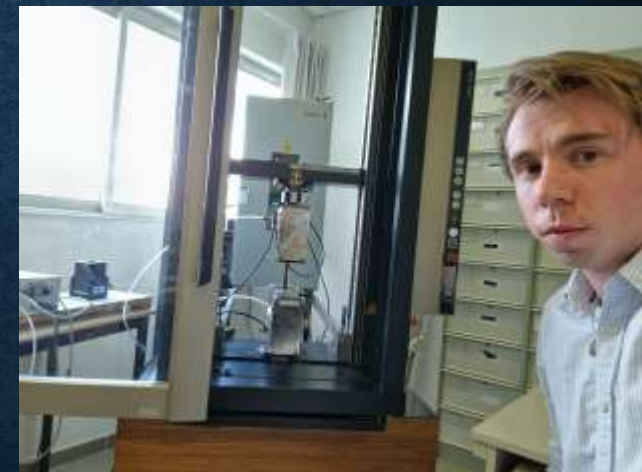
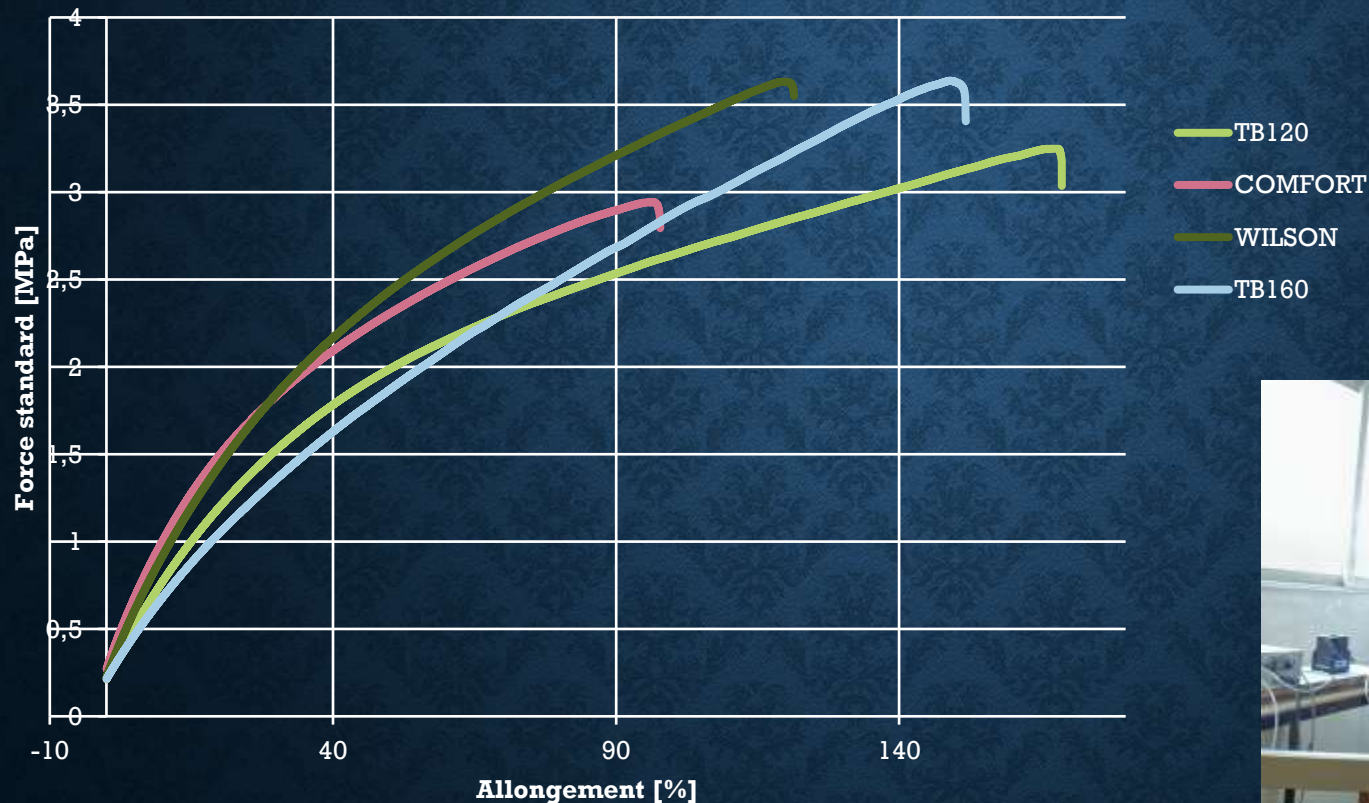
Essai numéro	Balle sans surpression	Balle avec surpression
1	149 cm	148 cm
2	161 cm	155 cm
3	163 cm	161 cm
4	163 cm	151 cm
5	160 cm	144 cm
6	163 cm	144 cm
7	154 cm	147 cm
Moyenne	$159,0 \pm 2,1$ cm	$144,0 \pm 2,4$ cm

Perte de pression par compression



Mise en contrainte du caoutchouc et module d'élasticité par DMA (analyse mécanique dynamique)

Courbe contrainte déformation simplifiée



Comportement
viscoélastique :
domaine élastique et
plastique

Interprétation courbes contrainte-déformation et module d'Young

TB160	Module d'élasticité
Moyenne	6,79

Allongement à rupture : 150%

TB120	Module d'élasticité
Moyenne	5,01

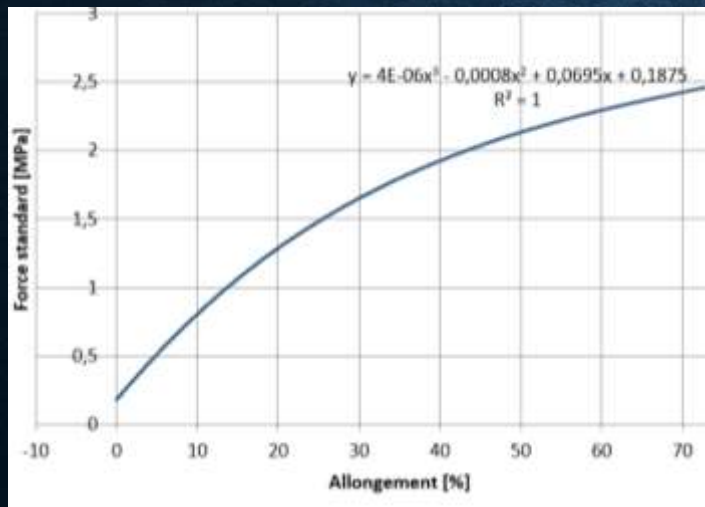
Allongement à rupture : 170%

Comfort	Module d'élasticité
Moyenne	8,40

Allongement à rupture : 100%

Wilson	Module d'élasticité
Moyenne	7,61

Allongement à rupture : 120%



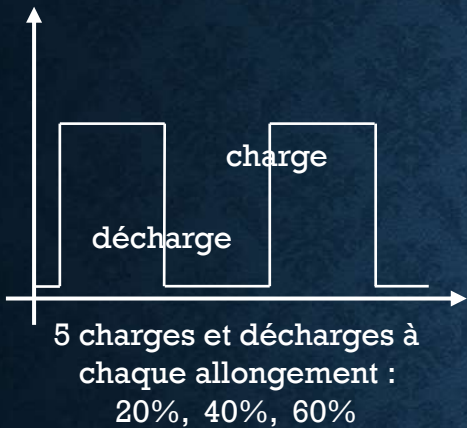
$$\sigma = E\varepsilon$$

σ : contrainte en MPa

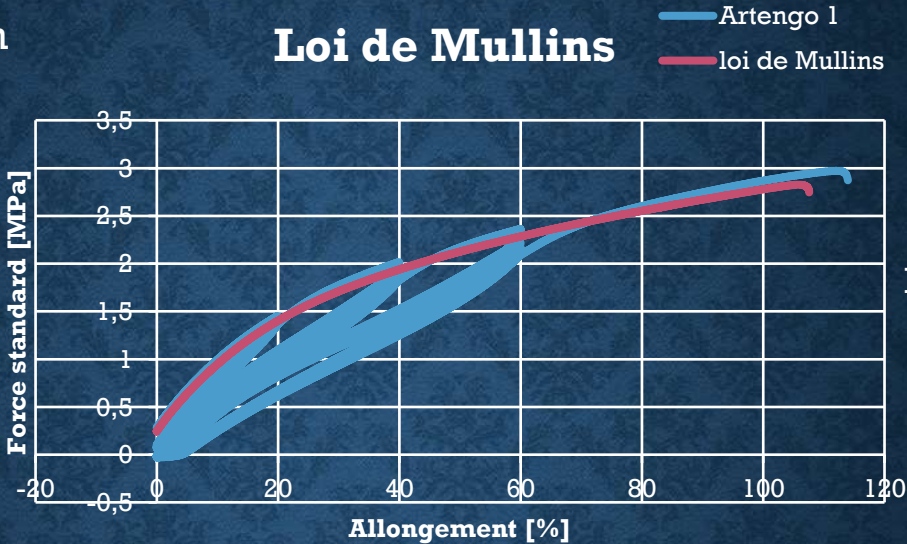
ε : déformation : $\frac{\Delta\rho}{l_0} \times 100$

E : module d'Young

Étude de la perte d'énergie par charge décharge et estimation de l'endommagement



Loi de Mullins

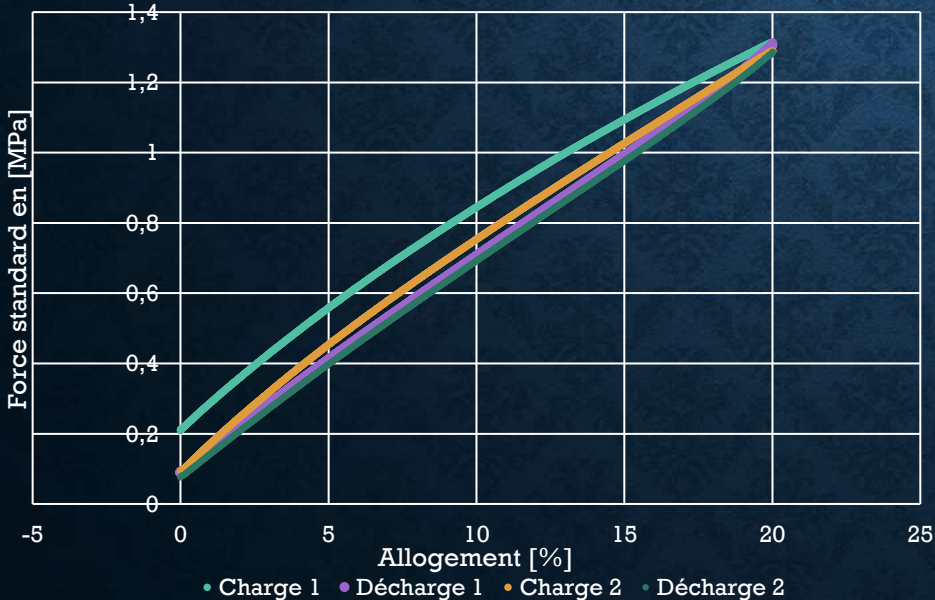


Accommodation sous charge cyclique

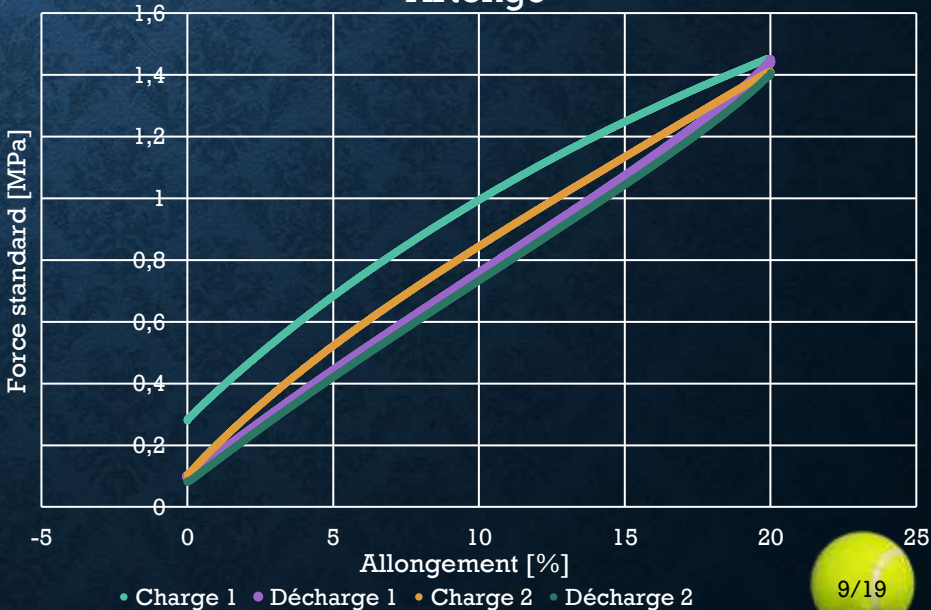
La courbe contrainte-déformation dépend de la charge maximale précédemment rencontrée

1ère et 2ème charge-décharge sur deux balles et énergies associées

Wilson



Artengo



Effet de la présence d'un feutre sur la hauteur de rebond



Hauteur de lancer	Epi	Epf/Epi sans feutre	Epf /Epi avec feutre	Epf/Epi feutre abimé
210 cm	1188 mJ	0,75	0,64	0,46
200 cm	1131 mJ	0,78	0,64	0,47
175 cm	990 mJ	0,74	0,65	0,49
150 cm	849 mJ	0,75	0,65	0,50
125 cm	707 mJ	0,77	0,66	0,51
100 cm	566 mJ	0,79	0,69	0,51

Rapport de l'énergie finale sur l'énergie initiale en fonction de la hauteur initiale

Moyennes

Expérimentation
sur une balle
Artengo 160 sans
pression

Epf/Epi sans feutre	Epf /Epi avec feutre	Epf/Epi feutre abimé
$0,763 \pm 0,008$	$0,655 \pm 0,007$	$0,490 \pm 0,009$

$$\sigma = 0,020$$

$$\sigma = 0,019$$

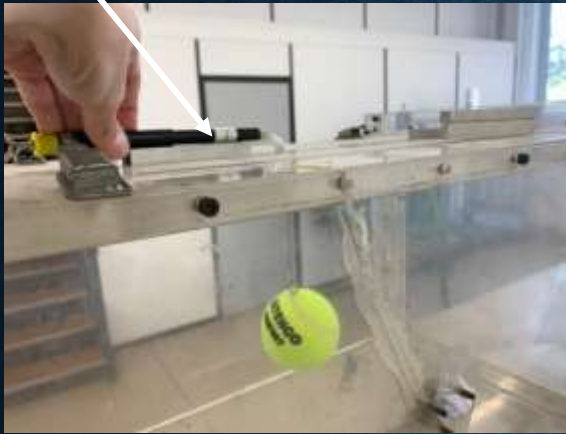
$$\sigma = 0,021$$

6/2
0



Écoulement de l'air autour de la balle

Dynamomètre



Mesures de 18 km/h à 81 km/h

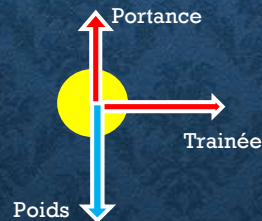
Soufflerie de type
Eiffel
Arts et Métiers d'Aix
en Provence



Écoulement
laminaire



Déplacement de
l'air

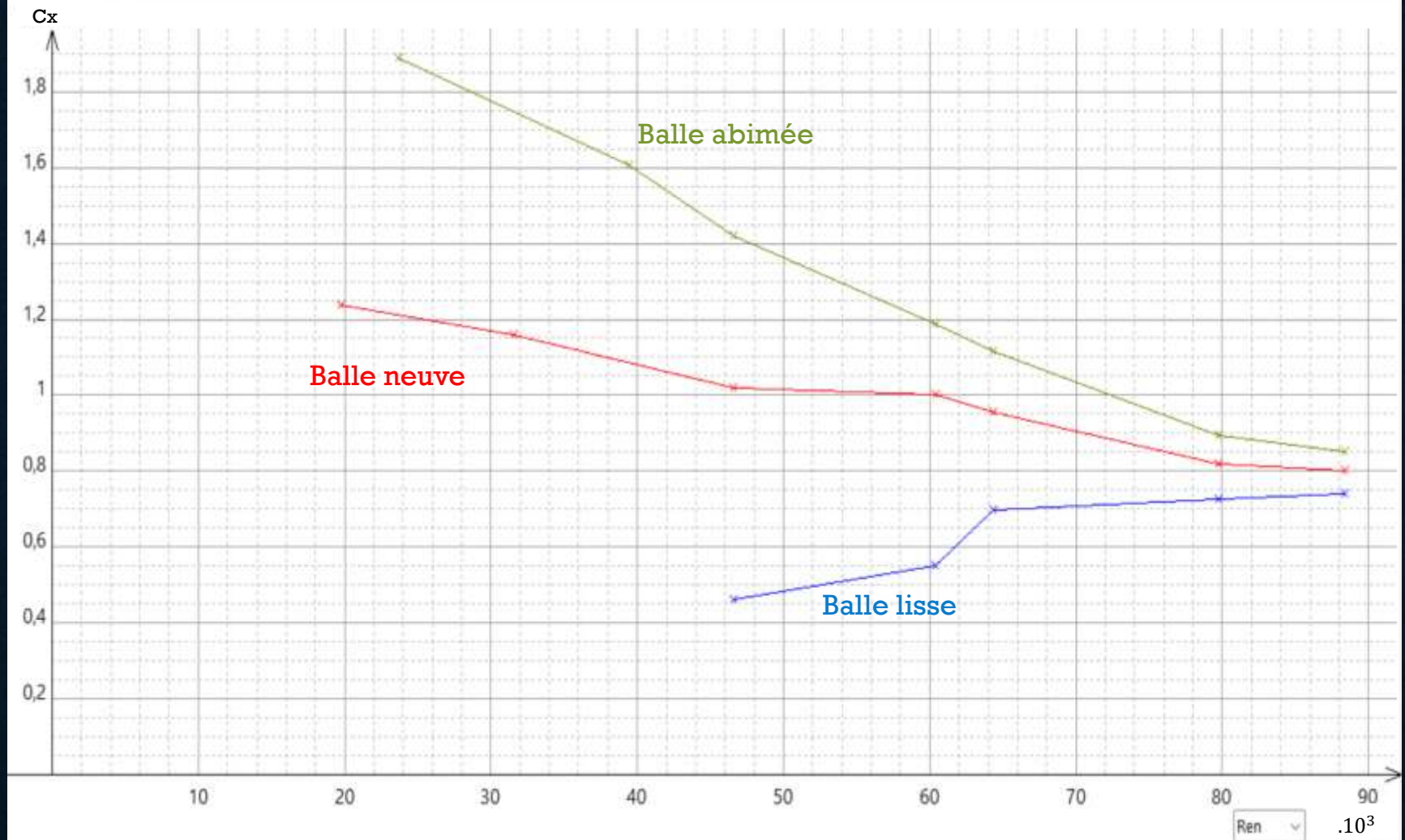


Forces appliquées



Mesure de
la vitesse

- Mesure de vitesse de la soufflerie avec le tube de Pitot
- Mesure de la force de trainée avec le dynamomètre
- Observation de l'écoulement de l'air avec de la fumée



Balle abimée

v	f	Ren	Cx
m/s	N		
6,000	0,1100	$2,368 \cdot 10^4$	1,888
10,00	0,2600	$3,947 \cdot 10^4$	1,607
11,80	0,3200	$4,658 \cdot 10^4$	1,420
15,30	0,4500	$6,039 \cdot 10^4$	1,188
16,30	0,4800	$6,434 \cdot 10^4$	1,116
20,20	0,5900	$7,973 \cdot 10^4$	0,8935
22,40	0,6900	$8,842 \cdot 10^4$	0,8498

Balle lisse

v	f	Ren	Cx
m/s	N		
11,80	0,1040	$4,658 \cdot 10^4$	0,4615
15,30	0,2080	$6,039 \cdot 10^4$	0,5491
16,30	0,3000	$6,434 \cdot 10^4$	0,6977
20,20	0,4800	$7,973 \cdot 10^4$	0,7269
22,40	0,6000	$8,842 \cdot 10^4$	0,7389

Balle neuve

v	f	Ren	Cx
m/s	N		
5,000	0,0500	$1,974 \cdot 10^4$	1,236
8,000	0,1200	$3,158 \cdot 10^4$	1,159
11,80	0,2300	$4,658 \cdot 10^4$	1,021
15,30	0,3800	$6,039 \cdot 10^4$	1,003
16,30	0,4100	$6,434 \cdot 10^4$	0,9536
20,20	0,5400	$7,973 \cdot 10^4$	0,8178
22,40	0,6500	$8,842 \cdot 10^4$	0,8005

Courbe C_x Reynold

Observation de l'écoulement de l'air et fonction du feutre

Balle lisse



Balle neuve

Couche limite
turbulente
Perte
d'énergie
faible



Écoulement
laminaire

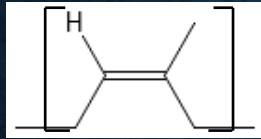


Couche limite
laminaire
Perte
d'énergie
importante



III. LA BALLE DE TENNIS : UN CONCENTRÉ DE CHIMIE

Caoutchouc, synthèse et propriétés



Monomère du
caoutchouc naturel
cis-1,4-polyisoprène

Élastomère contient 50 à
60% de polymères puis des
charges, des agents de
vulcanisation et des additifs

Longues chaînes moléculaires reliées par
des points de réticulations

Caractérise la rigidité
du matériau

Caoutchouc naturel

Extrait de l'hévéa

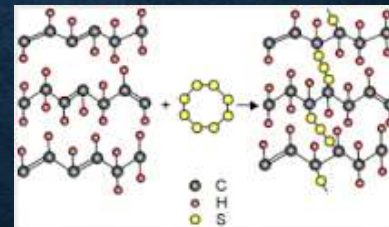
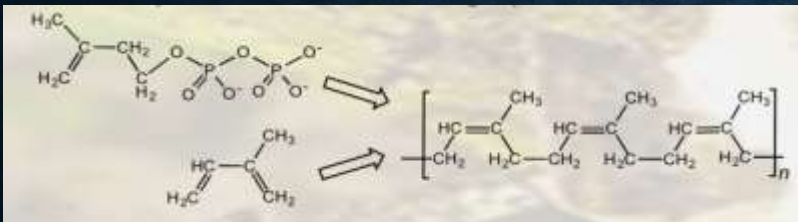
Caoutchouc synthétique

Issus du charbon
ou du pétrole

Vulcanisation 1839,
Charles Goodyear :
soufre et chauffage

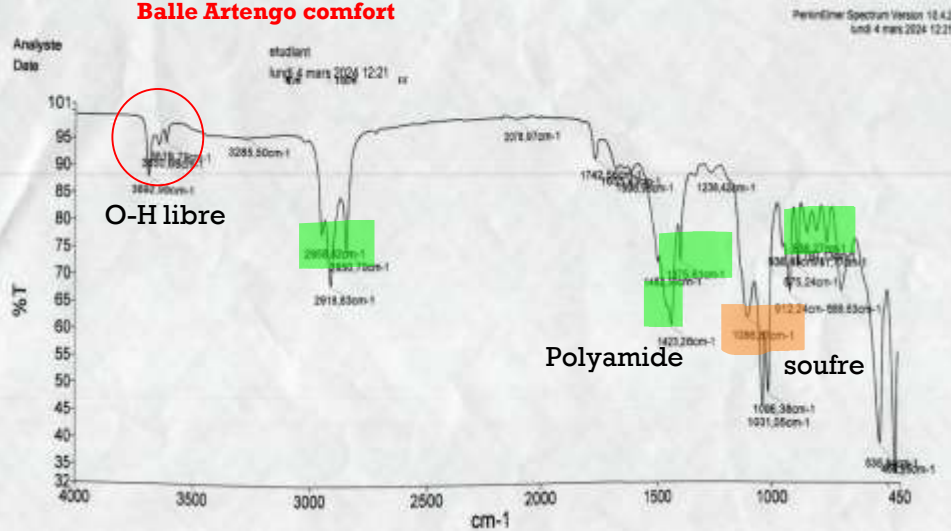
Produit un caoutchouc
élastique et stable

2,3-diméthylbuta-1,3-diène

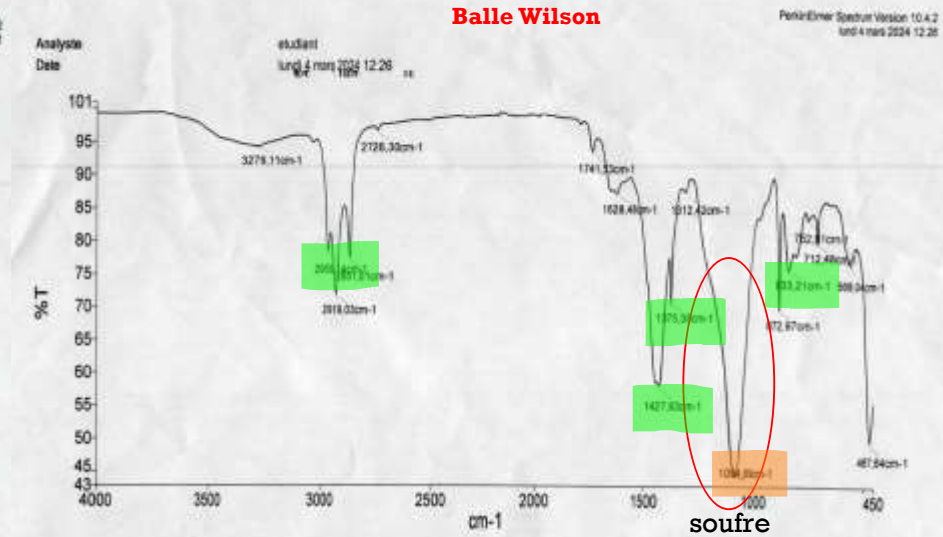


Analyse infrarouge

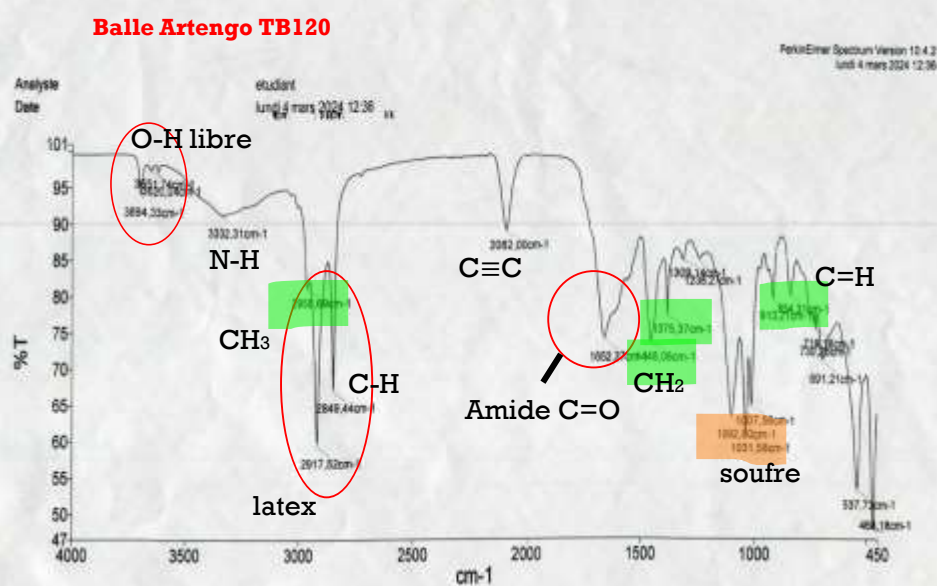
Balle Artengo comfort



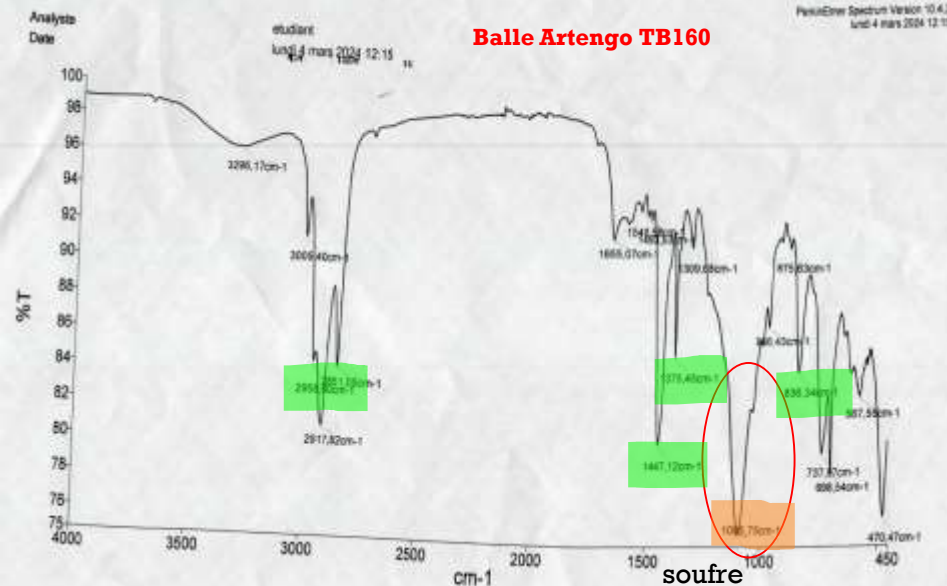
Balle Wilson



Balle Artengo TB120



Balle Artengo TB160



Spectres infrarouges des différents caoutchoucs composant les balles

Observations au microscope

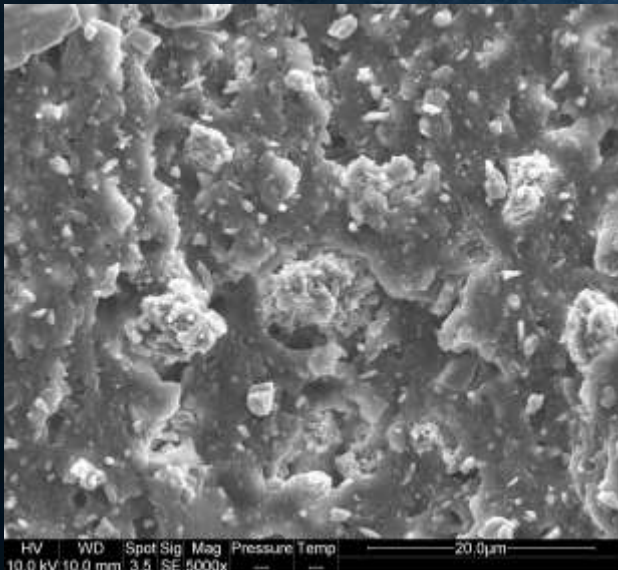


Échantillons des 4 balles avec dépôts de carbone

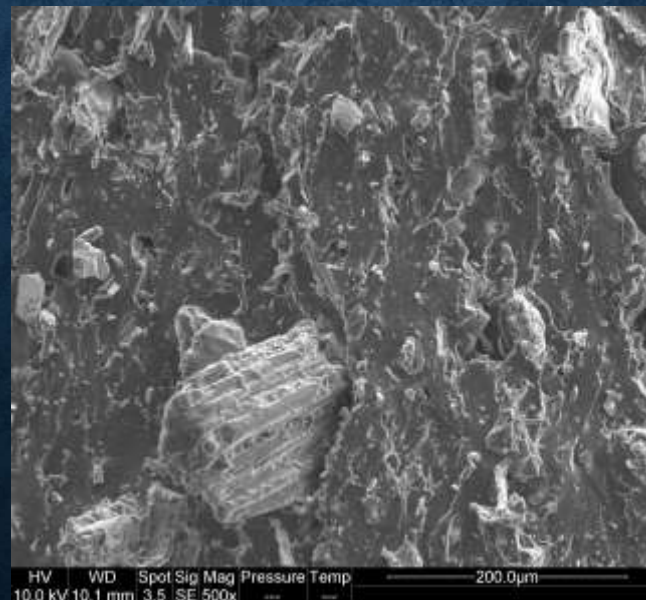


Microscope électronique à balayage
Mines d'Alès

13/20



Structure Wilson

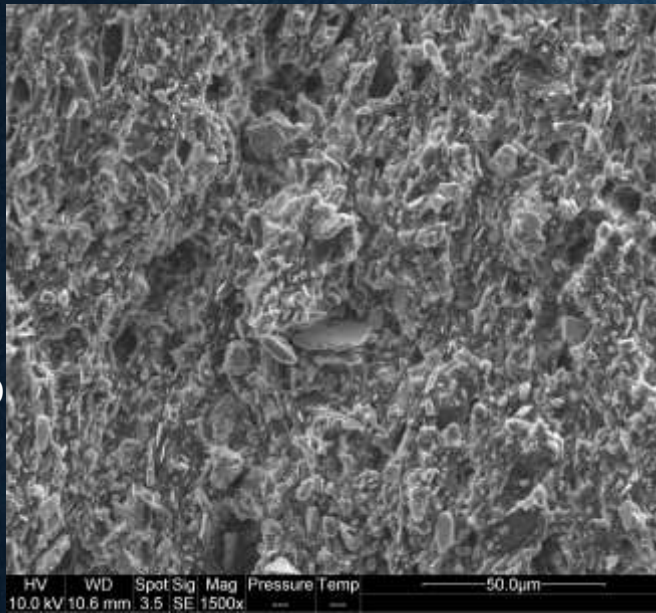


Structure TB160

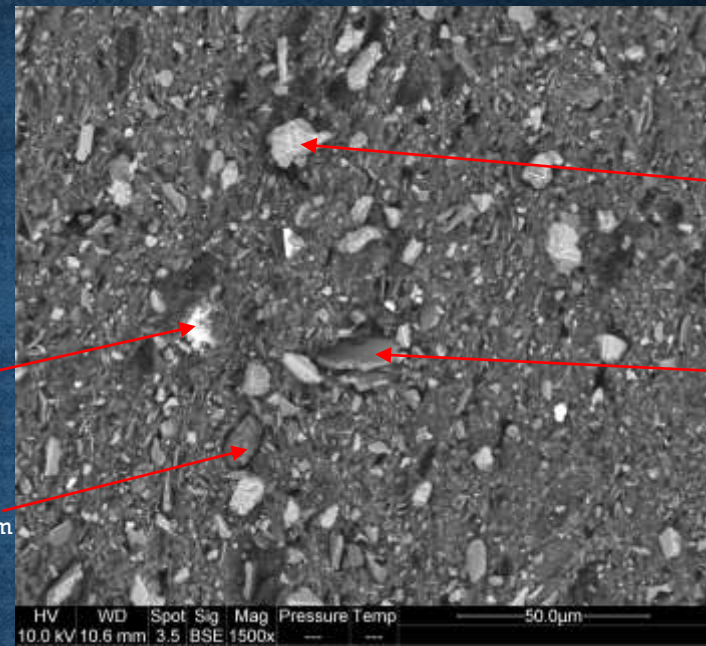
16/19

Artengo comfort

Calcium
Soufre
Silicium
Aluminium
Magnésium
Zinc (traces)
Baryum



Soufre
Baryum
Magnésium

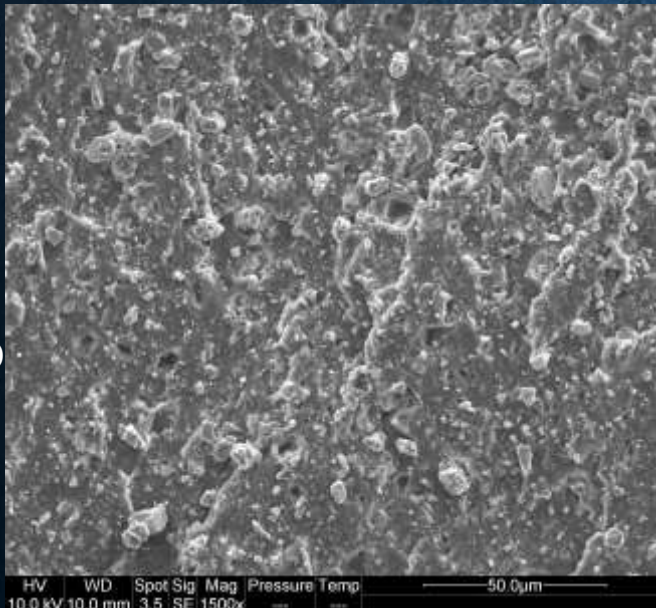


Calcium

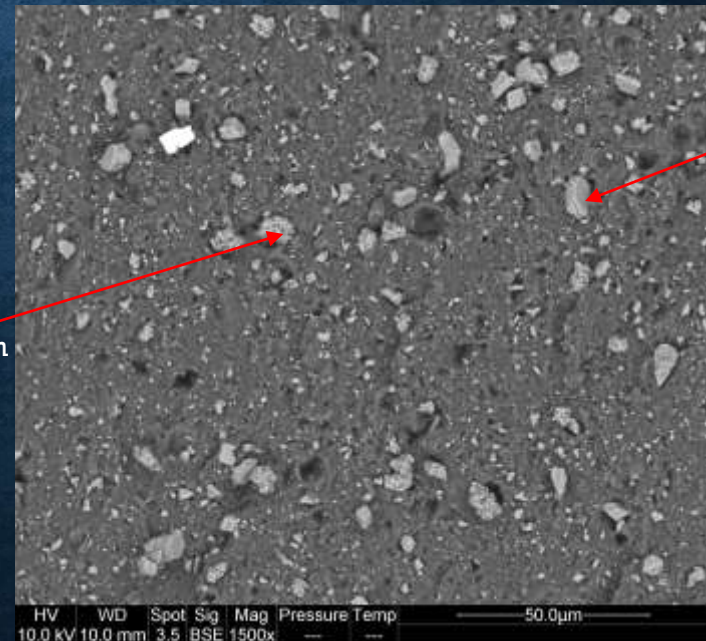
Aluminium
Silicium

Wilson

Calcium
Soufre
Silicium
Magnésium
Zinc (traces)



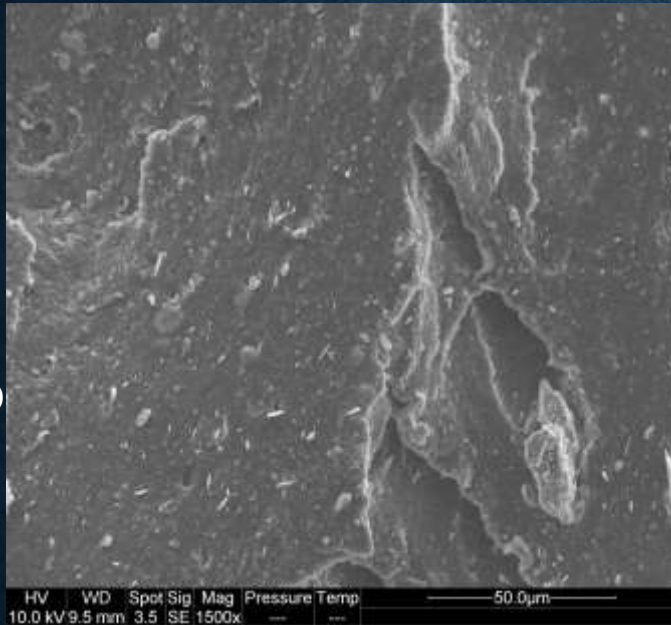
Calcium
Soufre



Calcium
Magnésium
Silicium

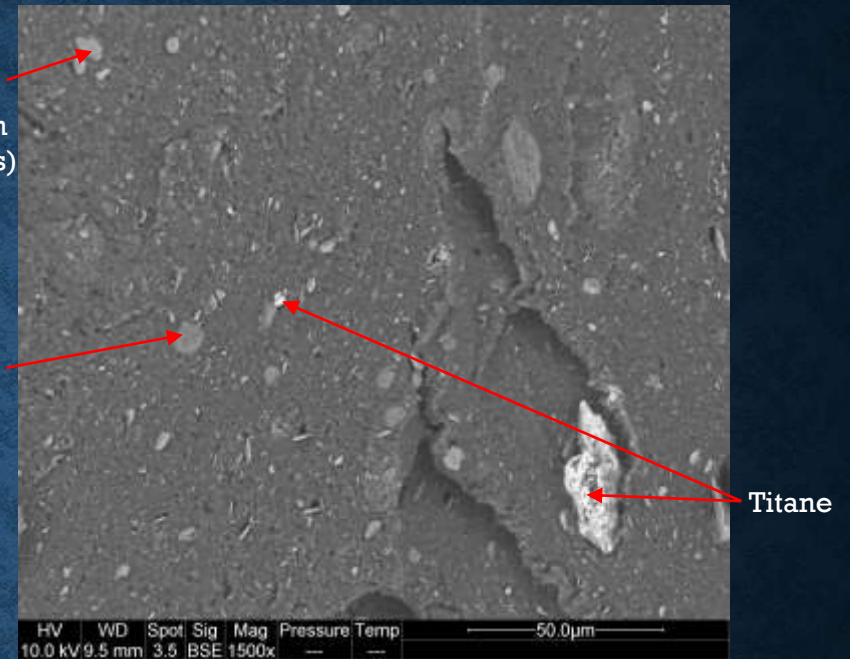
Artengo TB120

Soufre
Silicium
Aluminium
Zinc
Titane
Fer (traces)



Silicium
Aluminium
Fer (traces)

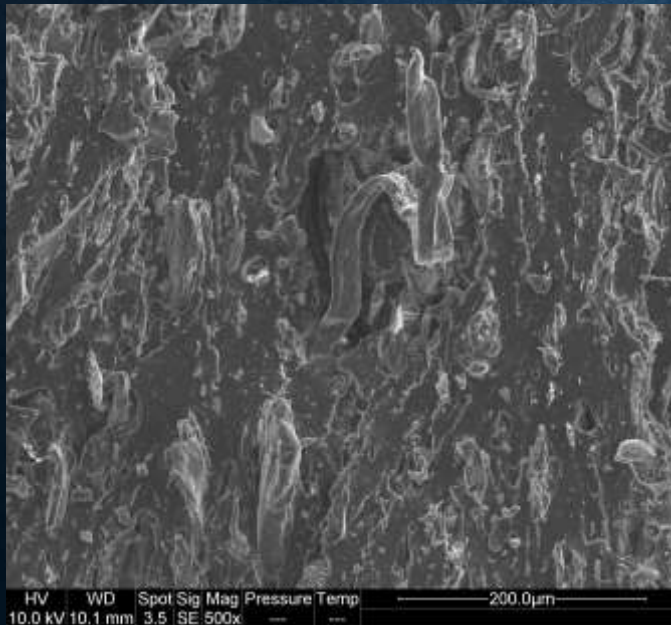
Silicium
Zinc
Soufre



Titane

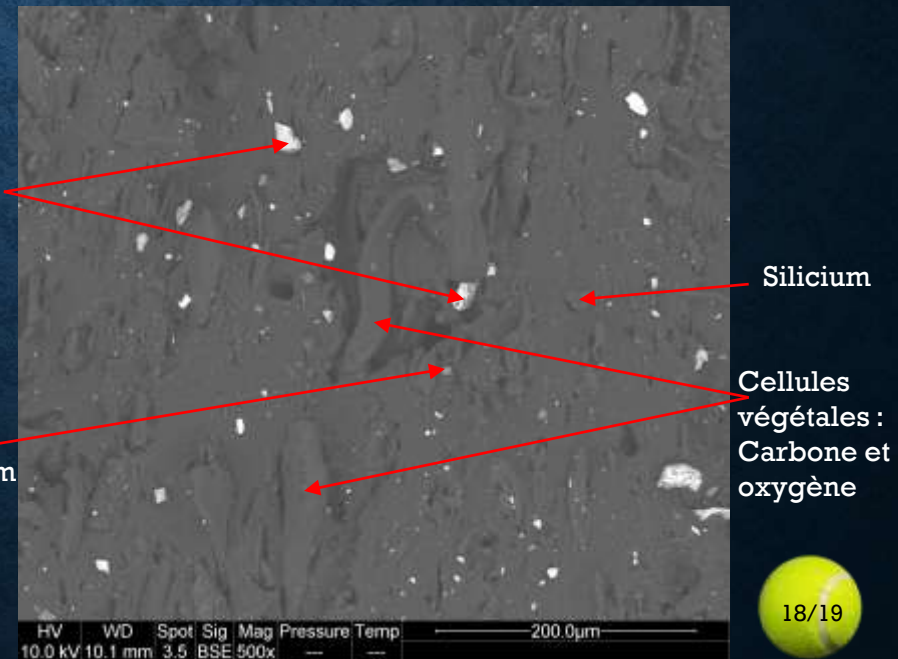
Artengo TB160

Soufre
Silicium
Aluminium
Calcium
Cellules végétales



Baryum
Soufre
(traces)

Silicium
Aluminium
Calcium



Silicium

Cellules végétales :
Carbone et oxygène

IV. CONCLUSION VIS-À-VIS DES PERFORMANCES DES BALLES DE TENNIS

- Feutre :**
- Cause perte d'énergie lors du rebond
 - Diminue la perte lors du déplacement dans l'air
 - Permet un meilleur contrôle

- Durabilité :**
- Caoutchouc naturel privilégié
 - Épaisseur plus épaisse : perte de pression moindre

- Pression :**
- Contrôle du rebond
 - Faibles pertes lors du jeu

- Caoutchouc :**
- Module d'élasticité maximal
 - Déformation importante
 - Endommagement faible

- Autres facteurs :**
- Température
 - Sols
 - Météo
 - Tension de la raquette

ANNEXES

Page 1

Prix de balles :

4 confort : 5,50 €

3 TB160 : 4,00 €

3 TB120 : 4,00€

4 Wilson : 8,50 €

Incertitude de type A

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}$$

$$u_A(x) = \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n}}$$

Page 5

Différence
d'énergie
entre les deux
balles :

$$\Delta E = m \cdot g \cdot \Delta z$$

Balle sans surpression :

$$\Delta E = 57,67 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (2,54 - 1,59)$$

$$\Delta E = 537 \text{ mJ}$$

Et

$$\frac{E_f}{E_i} = 0.62$$

Écart type : 5,45 cm

Balle avec surpression :

$$\Delta E = 57,88 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (2,54 - 1,44)$$

$$\Delta E = 625 \text{ mJ}$$

Et

$$\frac{E_f}{E_i} = 0.57$$

Écart type : 6,22 cm

l_0 : écart entre les mors : 60 mm

Mesure largeur et épaisseur
de l'éprouvette par pied à
coulisse

Précharge de 10 N
puis 50 mm/min

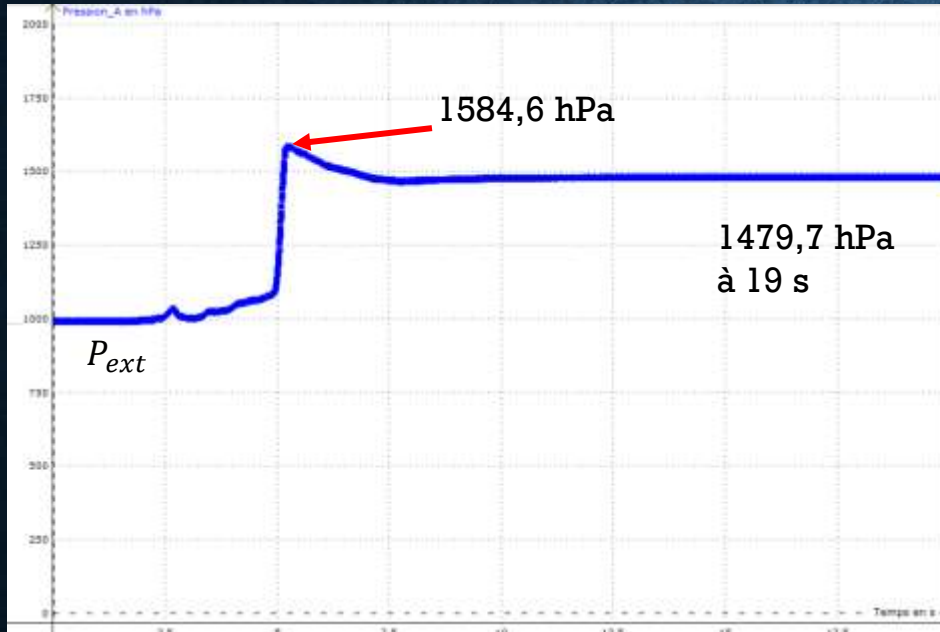
TB160	Module d'élasticité	TB120	Module d'élasticité
1	6,49	1	4,54
2	6,26	2	5,26
3	6,95	3	5,12
4	8,08	4	4,44
5	7,42	5	5,41
6	7,29	6	5,09
7	6,15	7	5,50
8	5,64	8	4,74
Moyenne	6,79	Moyenne	5,01
Comfort	Module d'élasticité	Wilson	Module d'élasticité
1	8,44	1	7,93
2	9,12	2	7,49
3	8,31	3	7,42
4	7,79	4	7,61
5	8,37	Moyenne	7,61
6	8,37		
Moyenne	8,40		

Mesure de la pression et étude de la perte de pression

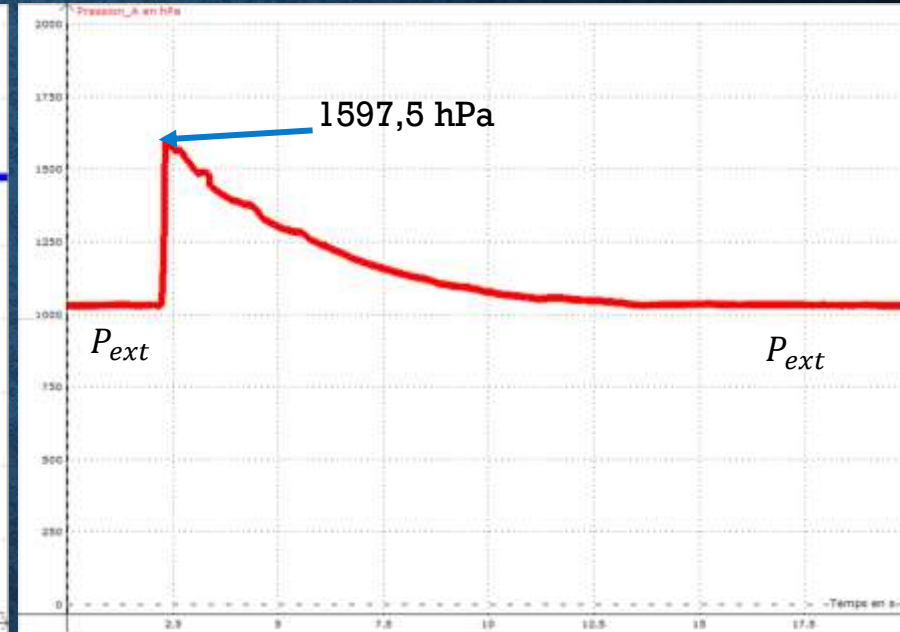
Pression initialement dans les balles

Pression tube : 1746,8 hPa

Wilson



Artengo confort



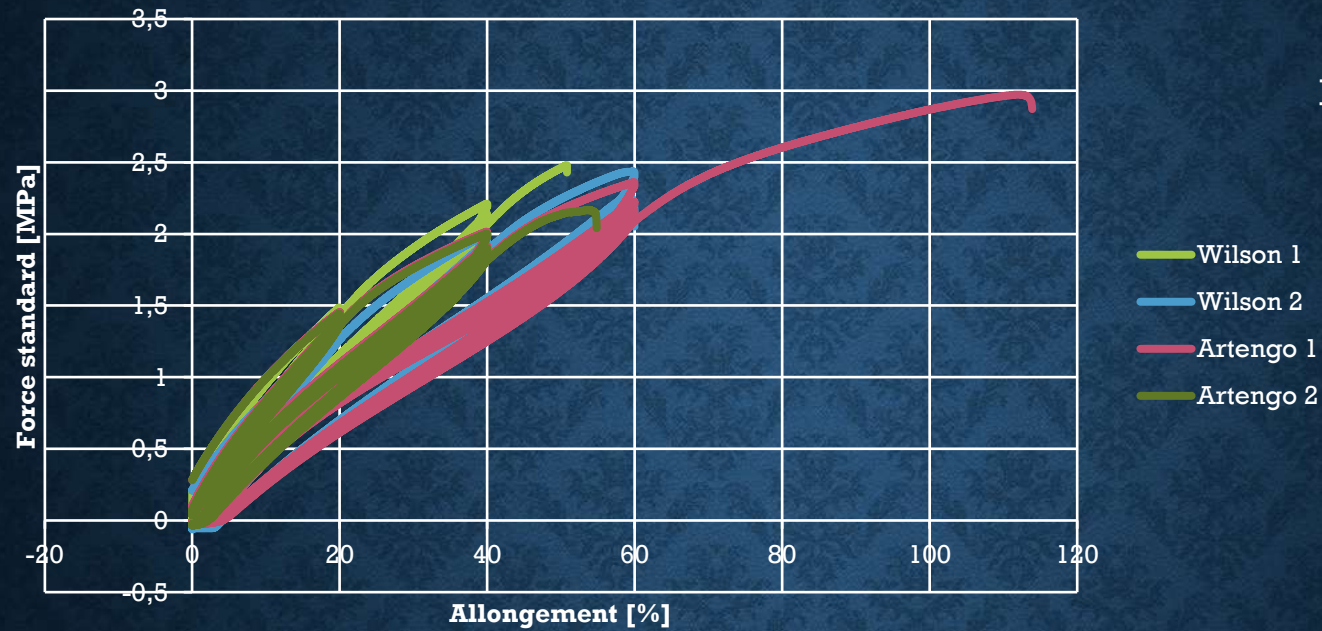
$$P_{ext} = 991 \text{ hPa}$$

Après 5 mins : pression à 1087 hPa

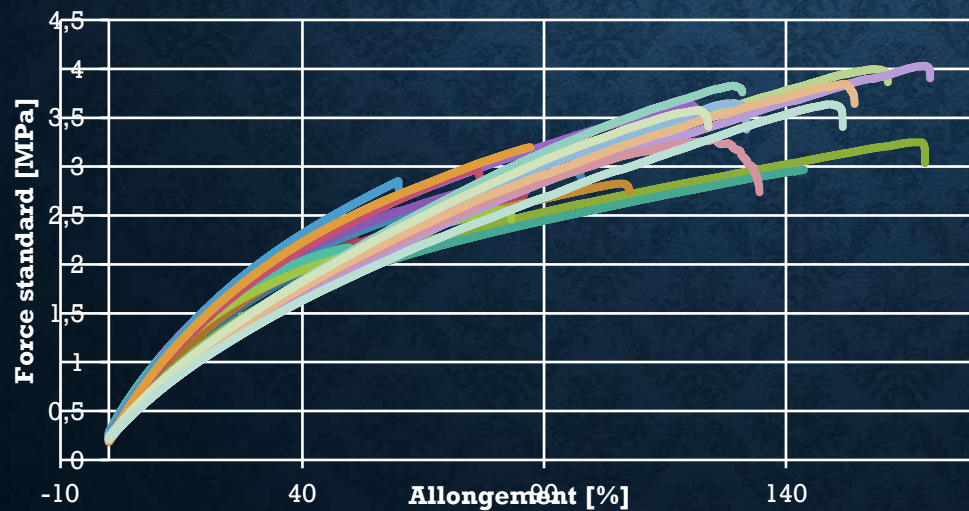


$$P_{ext} = 1030 \text{ hPa}$$

Charge décharge



Courbes contrainte déformation global



1910,53	1	20%	1904,12	1	20%	1639,74	1	20%	1831,17	1	20%
1511,22	2	0,791	1481,54	2	0,778	1401,61	2	0,855	1511,00	2	0,825
1640,82	3		1610,37	3		1470,65	3		1609,54	3	
1467,04	4	0,894	1439,24	4	0,894	1374,15	4	0,934	1478,03	4	0,918
1600,88	5		1571,48	5		1445,32	5		1577,51	5	
1445,94	6	0,903	1418,29	6	0,903	1359,36	6	0,941	1461,34	6	0,926
1579,75	7		1550,04	7		1430,80	7		1561,05	7	
1431,31	8	0,906	1404,48	8	0,906	1349,61	8	0,943	1450,49	8	0,929
1565,57	9		1536,12	9		1420,98	9		1550,30	9	
1420,79	10	0,908	1393,59	10	0,907	1342,57	10	0,945	1442,25	10	0,930
5052,52	11	40%	4998,29	11	40%	4761,37	11	40%	5295,02	11	40%
3767,32	12	0,746	3683,04	12	0,737	3876,73	12	0,814	4086,74	12	0,772
4226,18	13		4121,54	13		4167,48	13		4465,43	13	
3622,48	14	0,857	3544,92	14	0,860	3783,23	14	0,908	3978,76	14	0,891
4089,75	15		3989,74	15		4076,91	15		4351,81	15	
3551,83	16	0,868	3476,75	16	0,871	3733,68	16	0,916	3921,58	16	0,901
4017,76	17		3919,67	17		4027,59	17		4292,68	17	
3506,66	18	0,873	3433,91	18	0,876	3700,10	18	0,919	3884,49	18	0,905
3970,38	19		3873,73	19		3992,85	19		4252,98	19	
3472,80	20	0,875	3402,30	20	0,878	3674,39	20	0,920	3857,45	20	0,907
8224,46	21	60%	3717,66	21	rupture	8407,44	21	60%	4984,44	21	rupture
6166,99	22	0,750				6402,63	22	0,762			
7040,97	23					3978,28	23	rupture			
5896,69	24	0,837	Energie	Perte	Energie	Perte	Energie	Perte	Energie	Perte	
6784,83	25		$m J / m m^3$		$m J / m m^3$		$m J / m m^3$		$m J / m m^3$		
5765,18	26	0,850									
6646,25	27	rupture									

Energie
 $m J / m m^3$

Perte

Charge décharge : quantification de l'énergie perdue

Page 10

Hauteur de lancer	Epi	Sans feutre	Avec feutre	Avec feutre abimé
210 cm	1188 mJ	157 cm	134 cm	97,4 cm
200 cm	1131 mJ	156 cm	128 cm	94,1 cm
175 cm	990 mJ	130 cm	113 cm	86,8 cm
150 cm	849 mJ	112 cm	97,0 cm	74,6 cm
125 cm	707 mJ	96,8 cm	82,3 cm	63,6 cm
100 cm	566 mJ	79,4 cm	69,0 cm	51,4 cm

Page 12



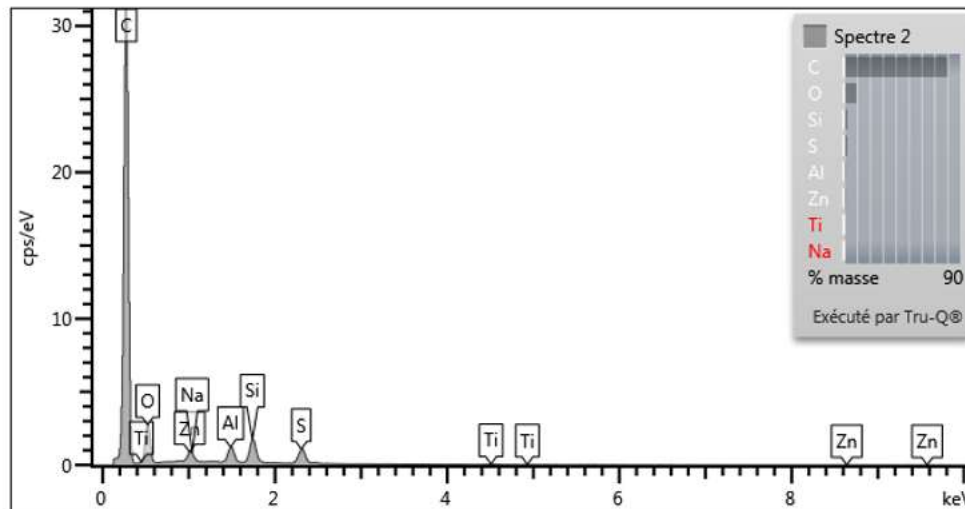
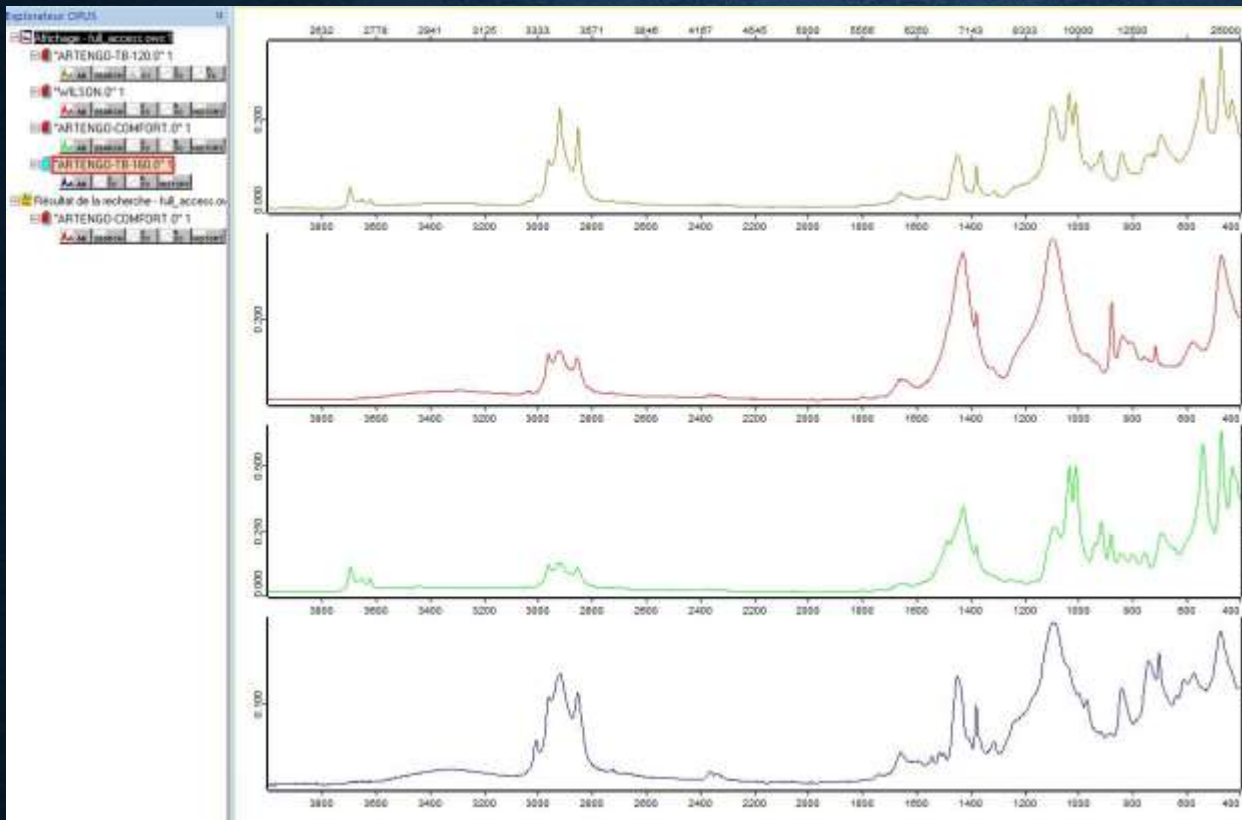
$$\Delta p = \rho_{eau} \cdot g \cdot \Delta h$$

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{air}}}$$

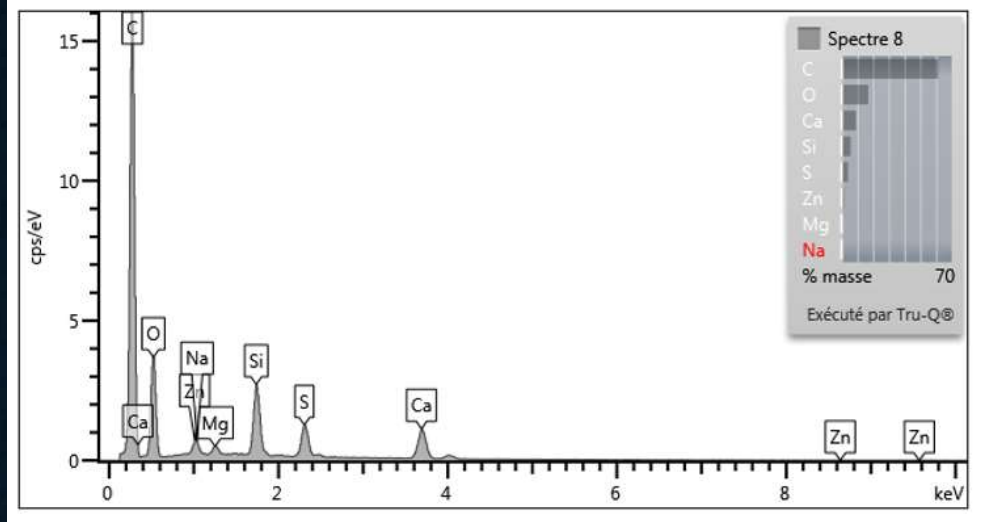
$$Ren = \frac{\mu \times v \times L}{\eta} = \frac{1,2 \times v \times 5,8 \times 10^{-2}}{1,8 \times 10^{-5}} \quad \eta \text{ en Pa/s}$$

$$C_x = \frac{2f}{\mu \times v^2 \times S} = \frac{2f}{1,2 \times v^2 \times 2\pi \times 2,9 \times 10^{-2}}$$

Infrarouge

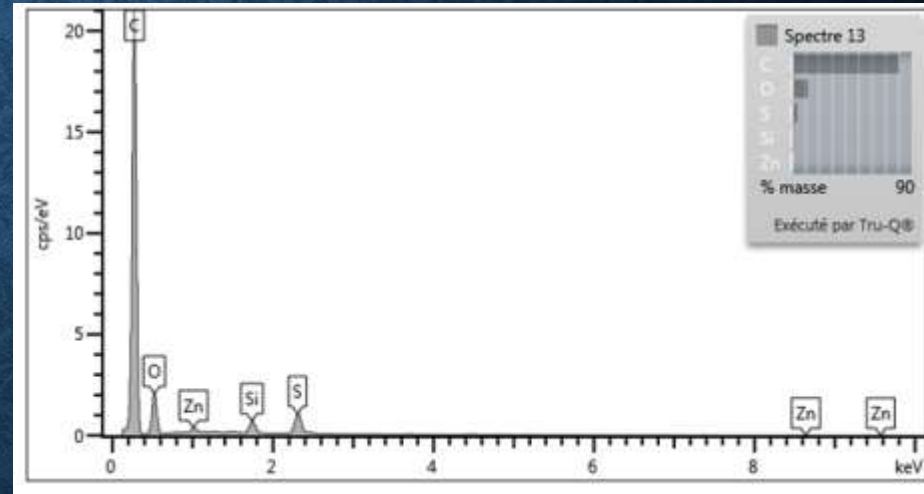


TB120 MEB



Wilson

TB160



Comfort

