

Compréhension et
amélioration des
impédancemètres pour
un usage quotidien :

Nil Michel

2023/2024

n°44503

Sommaire :

- 1 Introduction
- 2 Etude théorique
- 3 Conception d'un impédancemètre
- 4 Expérience
- 5 Analyse des résultats
- 6 Conclusion et discussion

Introduction :



(a) cadre professionnel



(b) cadre amateur

Introduction :



(a) impédancemètre personnel

- 20-50 €
- Taux d'erreur : 7 %
- Segmentaire (jambe)



(b) impédancemètre professionnel

- $\approx 7\ 100$ €
- Taux d'erreur : 1,5 %
- Corps complet

Introduction :

Problématique :

Comment pouvons-nous modifier les impédancemètres actuels afin de populariser leurs utilisations et faciliter ainsi l'accès à nos données biométriques ?

Sommaire :

- 1 Introduction
- 2 Etude théorique
- 3 Conception d'un impédancemètre
- 4 Expérience
- 5 Analyse des résultats
- 6 Conclusion et discussion

Etude théorique :

Objectif : Compréhension du contexte :



(a) masse grasseuse

- Gras viscérale
- Graisse sous cutanée
(90% de notre graisse)

(b) masse maigre

- Os
- Viscère
- Muscle

Etude théorique :

Objectif : Compréhension des appareils utilisés

impédancemètre à multifréquence :

- 5 kHz, 50 kHz et 250 kHz

- $f > 100$ kHz → traversé de la membrane cellulaire
→ étude interne de la cellule

- $f < 100$ kHz → contour de la membrane cellulaire
→ étude du milieu extracellulaire



Etude théorique :

Objectif: Étude de l'appareil utilisé

impédancemètre segmentaire :

- Possède 4 à 8 électrodes
- Forte précision locale
- Évite les viscères



Etude théorique :

Objectif : Étude de l'appareil utilisé

circuit étudié :

- Contact :

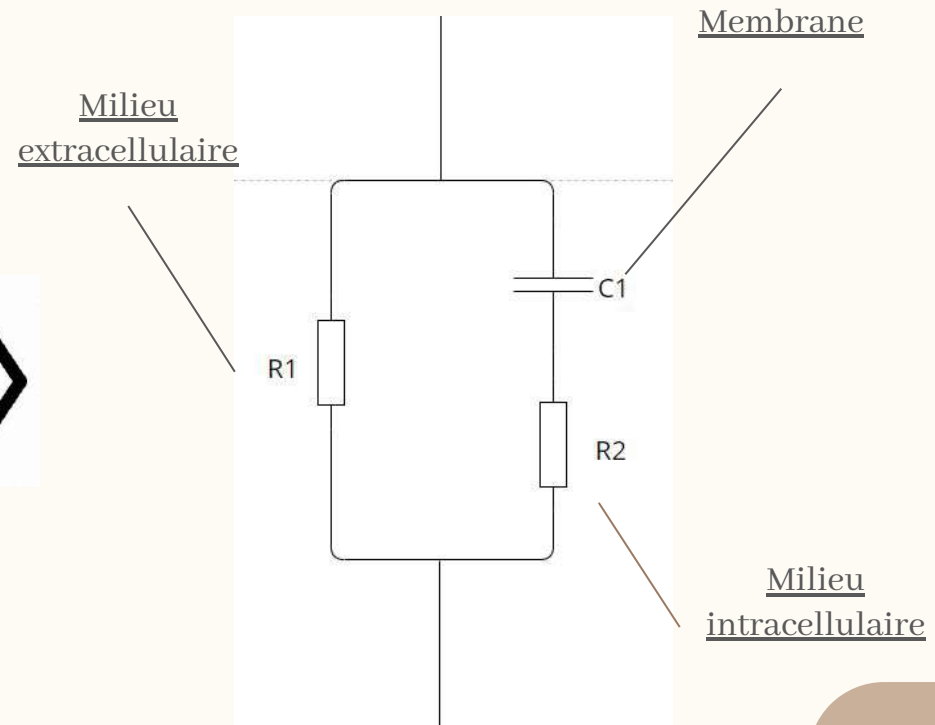
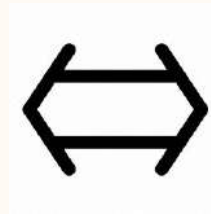
Fabien Veillon (assistant ingénieur du laboratoire CRISMAT du CNRS)



Etude théorique :

Objectif: Étude du comportement électrique des cellules

schéma équivalent d'une cellule :



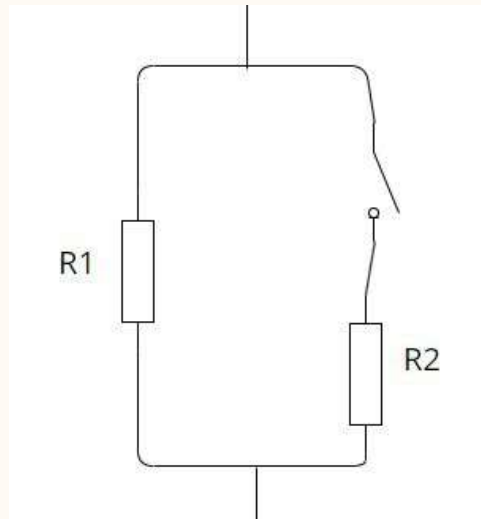
Etude théorique :

Objectif : Étude du comportement électrique des cellules

schéma équivalent d'une cellule :

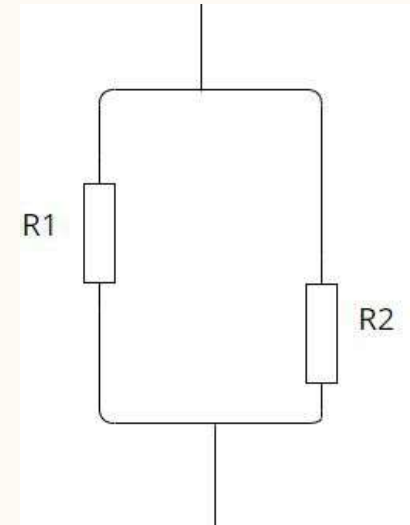
Basse fréquence :

-Mesure de R_1



-Mesure de R_2

Haute fréquence :

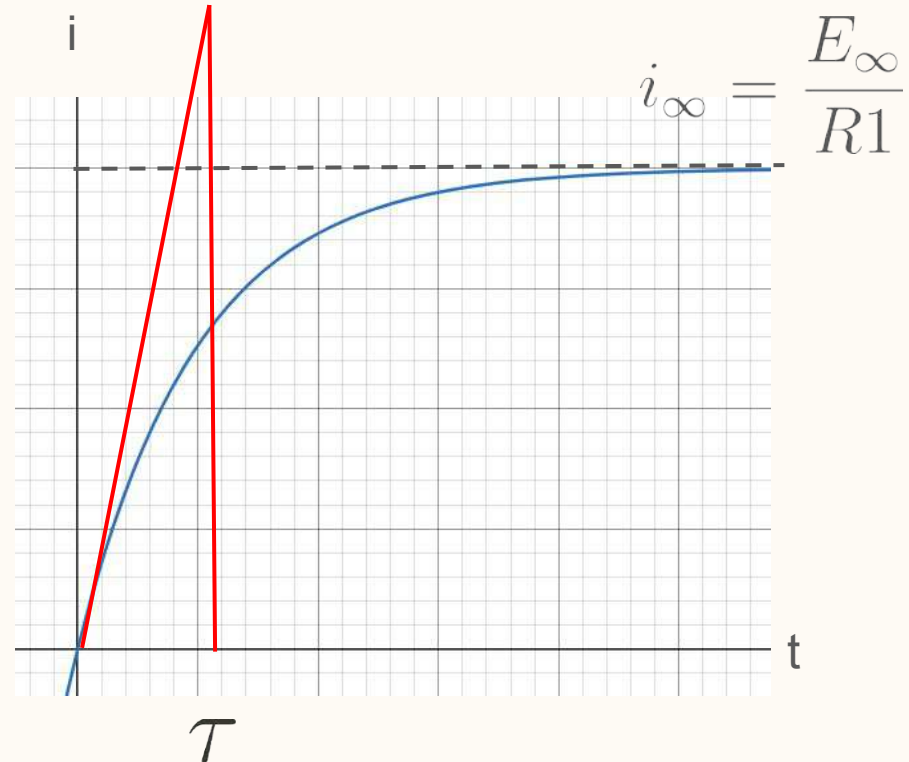


Etude théorique :

Objectif : Étude de la surface analysée

Etablissement de l'équation différentielle :

$$R_2 C \frac{di_1}{dt} + i_1 = \frac{E}{R_1}$$



Solution :

$$i_1(t) = \frac{E}{R_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Etude théorique :

Objectif : Étude de la surface analysée

Alors :

$$\lim_{f \rightarrow +\infty} |H| = G_{\infty} = r \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

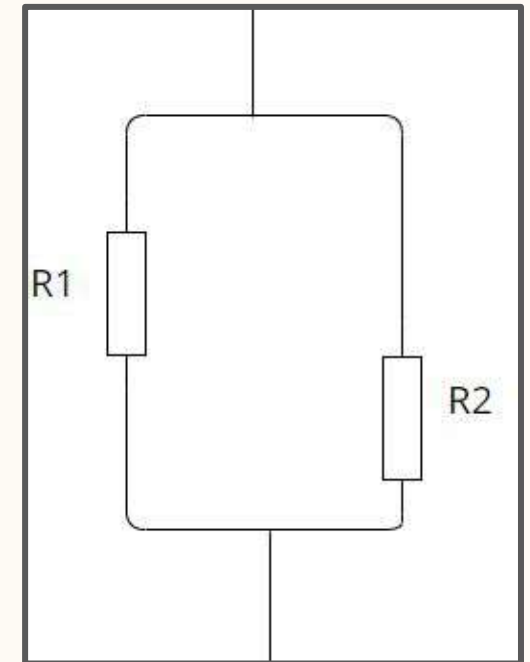
Soit :

$$R_2 = \frac{r R_1}{G_{\infty} R_1 - r}$$

Puis :

$$C = \frac{\tau}{R_2}$$

Haute fréquence :

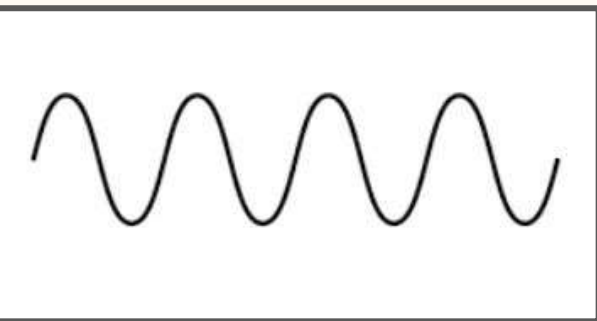


Etude théorique :

Objectif : Mise en place d'une stratégie de mesure

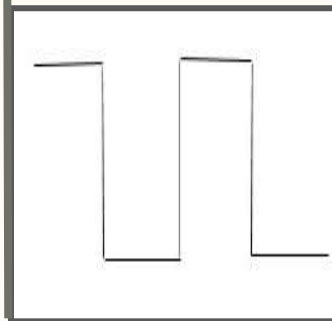
A) Utilisation d'un signal sinusoïdal :

- Analyse des comportement fréquentiels des viandes
- Mesure de R_1
- Tracage du diagramme de bode
- Choix d'une fréquence adaptée à nos recherche



B) Utilisation d'un signal créneau :

- Étude du milieu extracellulaire avec la réponse à un échelon
- Calcul du milieu intracellulaire en haute fréquence
- Calcul de R_2 et C



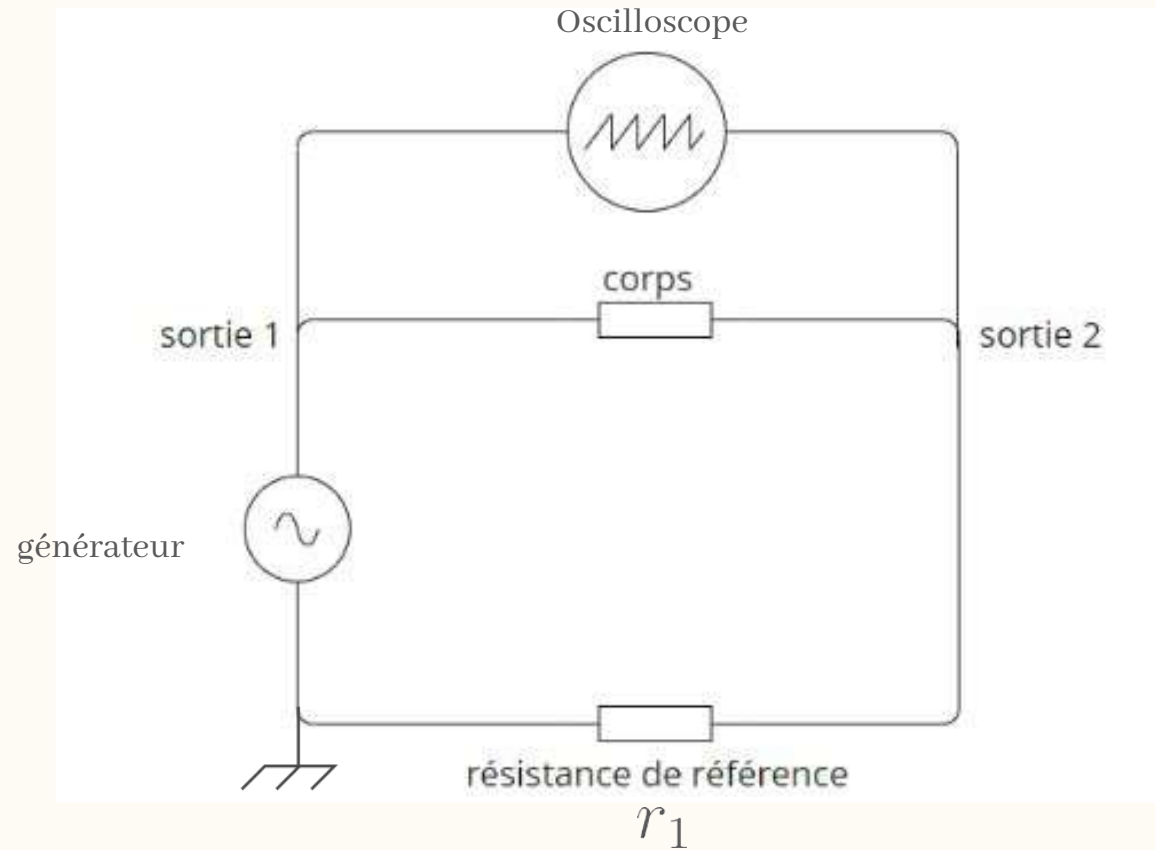
Sommaire :

- 1 Introduction
- 2 Etude théorique
- 3 Conception d'un impédancemètre
- 4 Expérience
- 5 Analyse des résultats
- 6 Conclusion et discussion

Conception d'un impédancemètre :

Objectif : Création d'un impédancemètre de laboratoire

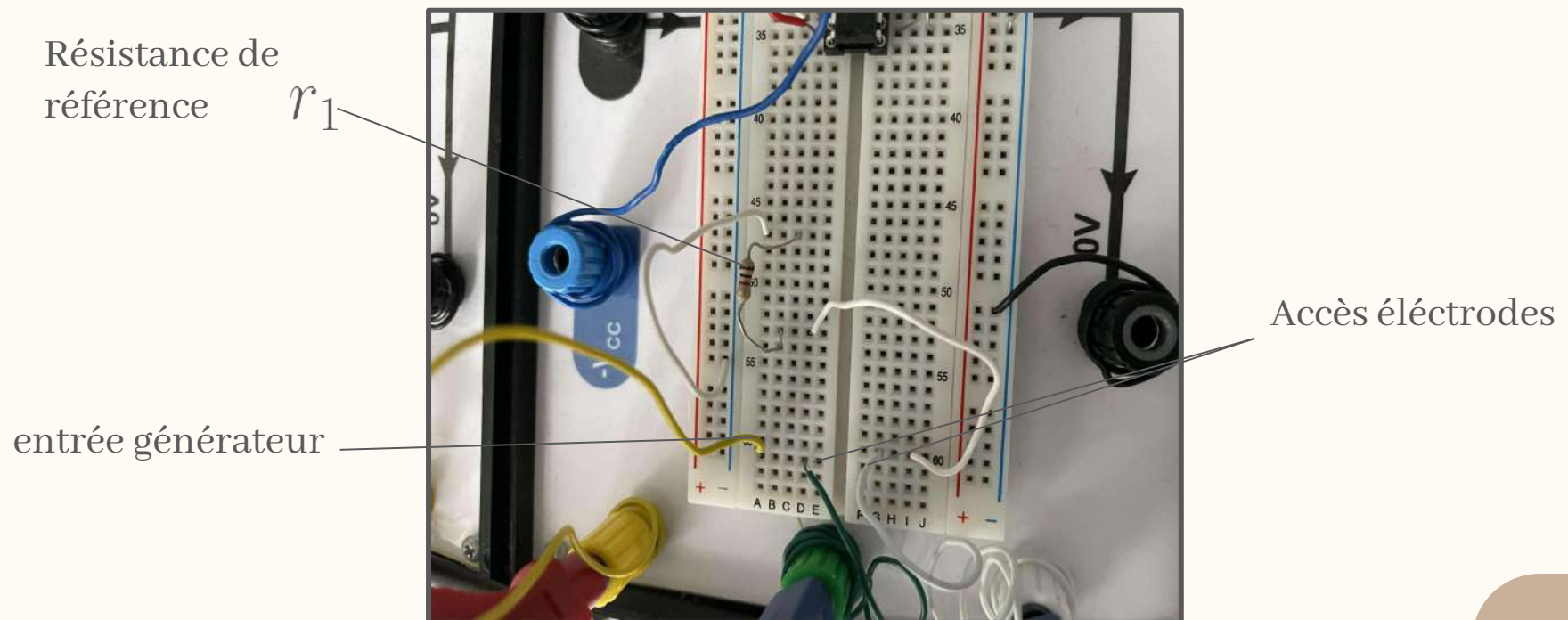
circuit conçu :



Conception d'un impédancemètre :

Objectif: Création d'un impédancemètre de laboratoire

Réalisation pratique :



Sommaire :

- 1 Introduction
- 2 Etude théorique
- 3 Conception d'un impédancemètre
- 4 Expérience
- 5 Analyse des résultats
- 6 Conclusion et discussion

Expérience :

Objectif : Création d'une base de données grâce à des viandes caractéristiques :

- Viande 1 : Viande sèche de boeuf
- Viande 2 : Viande de porc mi-grasse
- Viande 3 : Viande de porc grasse

Portion : 6 cm

Expérience :

Objectif : Test sur viande 1

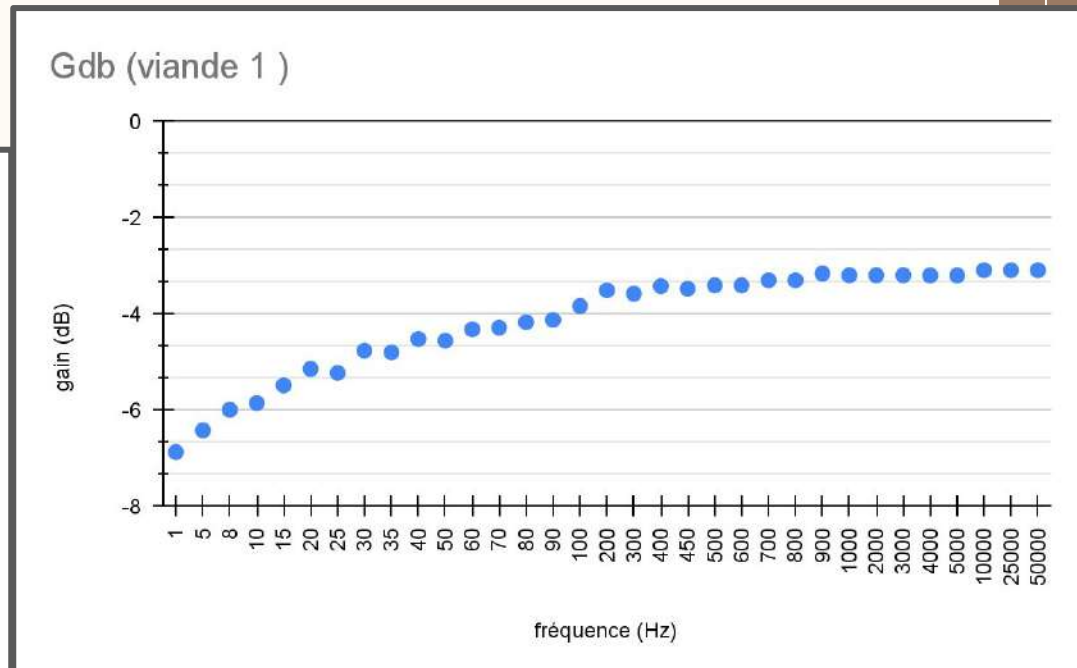
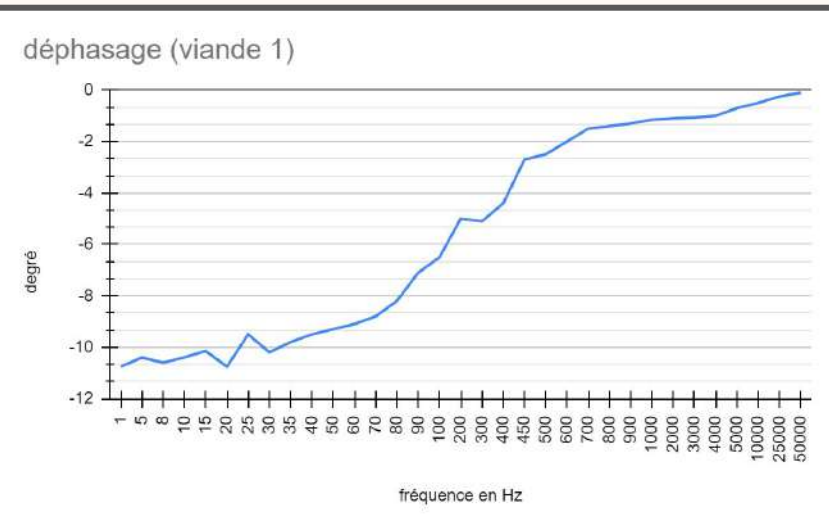


-Entrée -Sortie

Expérience :

Objectif : Viande 1

Diagramme de Bode :



Expérience :

Objectif : Viande 1

- Signal créneau à fréquence fixée $f=10$ Hz



-Entrée

-Sortie

Expérience :

Objectif : Viande 1

- Signal créneau à fréquence fixée
 $f=10 \text{ Hz}$

$$\tau = 0,8s$$



-Entrée

-Sortie

Expérience :

Objectif : Viande 1

- Signal créneau à fréquence fixée
 $f=10$ Hz

$$\tau = 0,8s$$

$$R_1 = 1,17\Omega$$



-Entrée

-Sortie

Expérience :

Objectif : Test sur viande 2



-Entrée

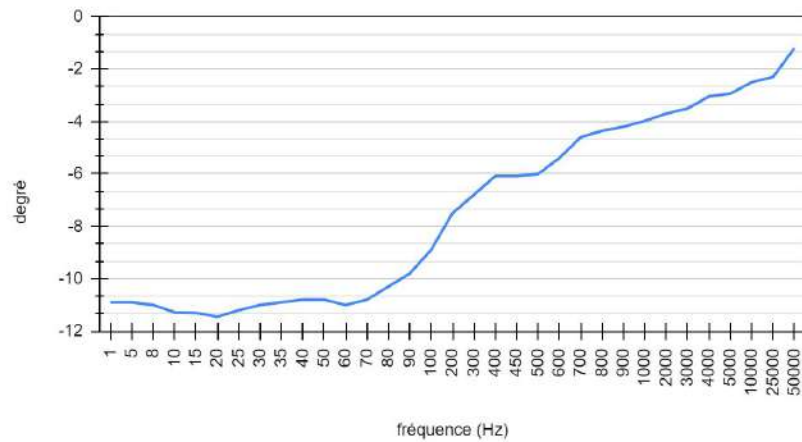
-Sortie

Expérience :

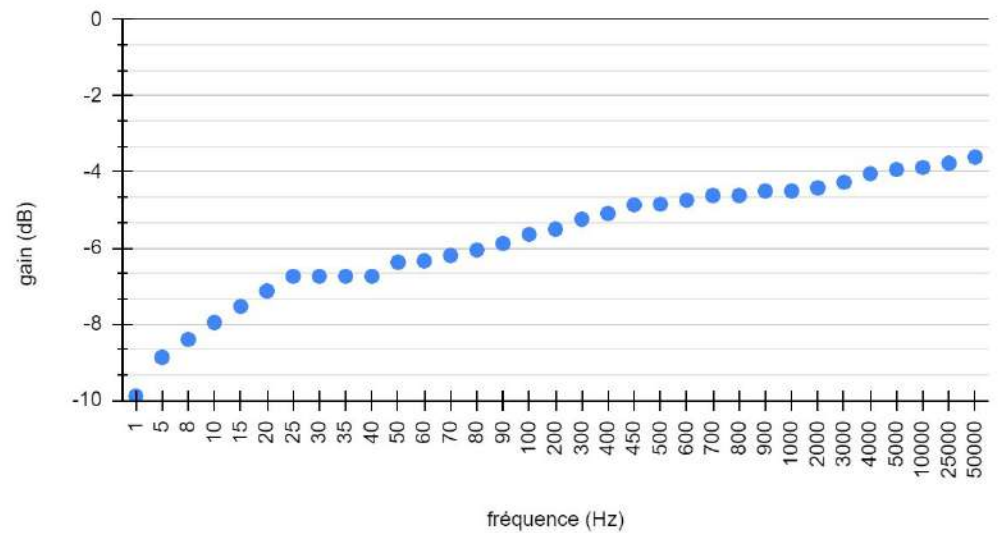
Objectif : Test sur viande 2

Diagramme de bode :

déphasage (viande 2)



Gdb (viande 2)



Expérience :

Objectif : Test sur viande 2

- Signal créneau à fréquence fixée
 $f=10$ Hz

$$\tau' = 2,8s$$



-Entrée

-Sortie

Expérience :

Objectif : Test sur viande 2

- Signal créneau à fréquence fixée
 $f=10$ Hz

$$\tau' = 2,8s$$

$$R'_1 = 1,48\Omega$$

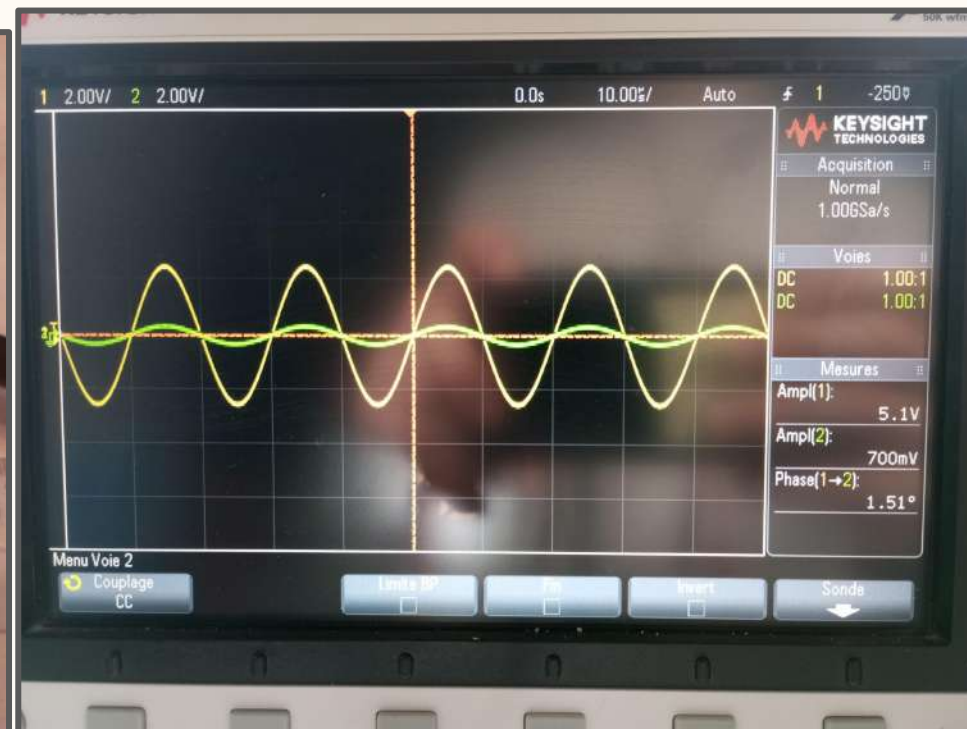


-Entrée

-Sortie

Expérience :

Objectif : Test sur viande 3



-Entrée

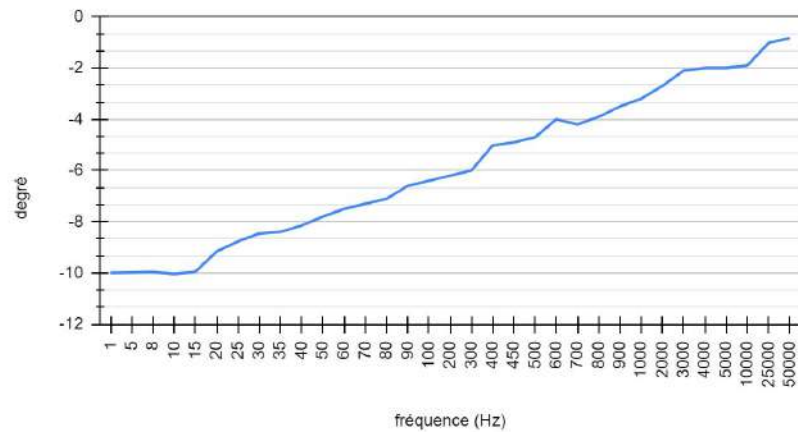
-Sortie

Expérience :

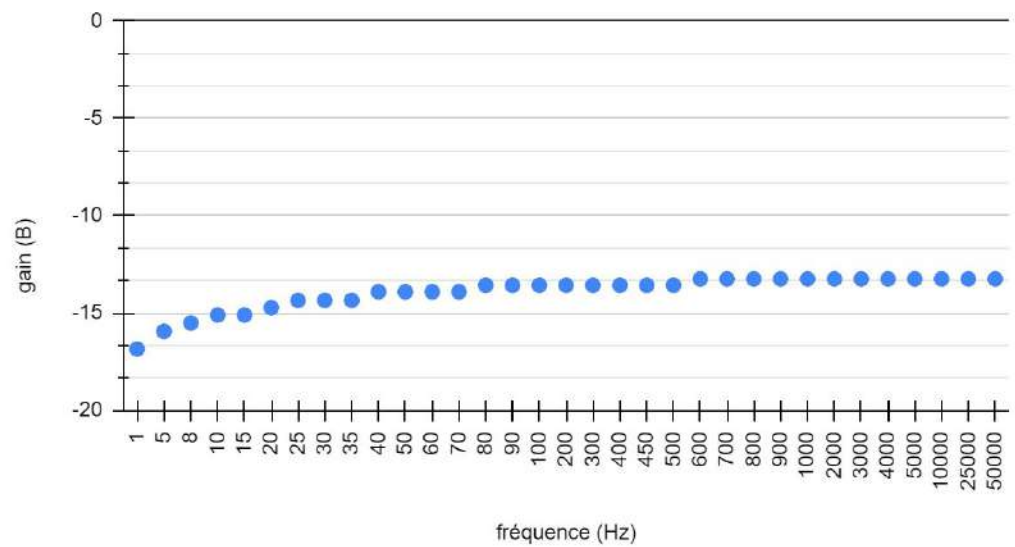
Objectif : Test sur viande 3

Diagramme de Bode :

déphasage (viande 3)



Gdb (viande 3)



Expérience :

Objectif : Test sur viande 3

- Signal créneau à fréquence fixée
 $f=10\text{ Hz}$

$$\tau'' = 5s$$



-Entrée

-Sortie

Expérience :

Objectif : Test sur viande 3

- Signal créneau à fréquence fixée
 $f=10\text{ Hz}$

$$\tau'' = 5s$$

$$R_1'' = 2,56\Omega$$



-Entrée

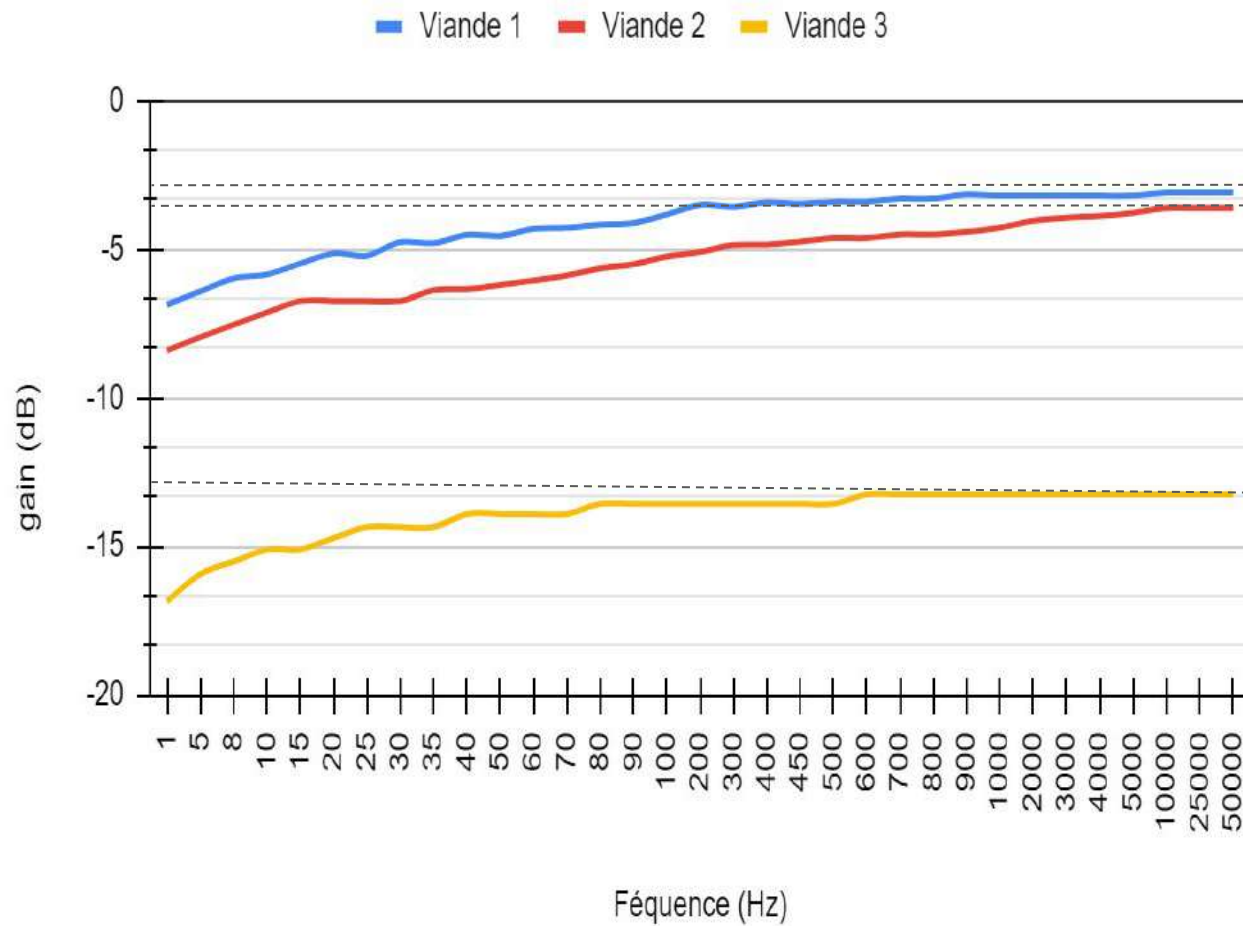
-Sortie

Sommaire :

- 1 Introduction
- 2 Etude théorique
- 3 Conception d'un impédancemètre
- 4 Expérience
- 5 Analyse des résultats
- 6 Conclusion et discussion

Bilan des diagrammes de Bode

Comparaison des diagrammes en gain



$$G_{\infty} = -3dB$$

$$G_{\infty} = -3,6dB$$

$$G_{\infty} = -13,2dB$$

Analyse des résultats

Récapitulatif:

	Viande 1 (maigre)	Viande 2 (mi-grasse)	Viande 3 (grasse)
Résistance 1	$R_1 = 1,17\Omega$	$R'_1 = 1,48\Omega$	$R''_1 = 2,56\Omega$
\mathcal{T}	$\tau = 0,8s$	$\tau' = 2,8s$	$\tau'' = 5s$
G_∞			
Résistance 2			
Capacité			

Analyse des résultats

Récapitulatif:

	Viande 1 (maigre)	Viande 2 (mi-grasse)	Viande 3 (grasse)
Résistance 1	$R_1 = 1,17\Omega$	$R'_1 = 1,48\Omega$	$R''_1 = 2,56\Omega$
\mathcal{T}	$\tau = 0,8s$	$\tau' = 2,8s$	$\tau'' = 5s$
G_∞	$G_\infty = 0,7dB$	$G'_\infty = 0,66dB$	$G''_\infty = 0,22dB$
Résistance 2			
Capacité			

Analyse des résultats

Récapitulatif:

	Viande 1 (maigre)	Viande 2 (mi-grasse)	Viande 3 (grasse)
Résistance 1	$R_1 = 1,17\Omega$	$R'_1 = 1,48\Omega$	$R''_1 = 2,56\Omega$
\mathcal{T}	$\tau = 0,8s$	$\tau' = 2,8s$	$\tau'' = 5s$
G_∞	$G_\infty = 0,7dB$	$G'_\infty = 0,66dB$	$G''_\infty = 0,22dB$
Résistance 2			
Capacité			

Rappel:

$$R_2 = \frac{r R_1}{G_\infty R_1 - r}$$

Analyse des résultats

Récapitulatif:

	Viande 1 (maigre)	Viande 2 (mi-grasse)	Viande 3 (grasse)
Résistance 1	$R_1 = 1,17\Omega$	$R'_1 = 1,48\Omega$	$R''_1 = 2,56\Omega$
\mathcal{T}	$\tau = 0,8s$	$\tau' = 2,8s$	$\tau'' = 5s$
G_∞	$G_\infty = 0,7dB$	$G'_\infty = 0,66dB$	$G''_\infty = 0,22dB$
Résistance 2	$R_2 = 0,33\Omega$	$R'_2 = 0,27\Omega$	$R''_2 = 0,076\Omega$
Capacité			

Rappel:

$$R_2 = \frac{r R_1}{G_\infty R_1 - r}$$

Analyse des résultats

Récapitulatif:

	Viande 1 (maigre)	Viande 2 (mi-grasse)	Viande 3 (grasse)
Résistance 1	$R_1 = 1,17\Omega$	$R'_1 = 1,48\Omega$	$R''_1 = 2,56\Omega$
\mathcal{T}	$\tau = 0,8s$	$\tau' = 2,8s$	$\tau'' = 5s$
G_∞	$G_\infty = 0,7dB$	$G'_\infty = 0,66dB$	$G''_\infty = 0,22dB$
Résistance 2	$R_2 = 0,33\Omega$	$R'_2 = 0,27\Omega$	$R''_2 = 0,076\Omega$
Capacité			

Rappel:

$$R_2 = \frac{r R_1}{G_\infty R_1 - r}$$

$$C = \frac{\tau}{R_2}$$

Analyse des résultats

Récapitulatif:

	Viande 1 (maigre)	Viande 2 (mi-grasse)	Viande 3 (grasse)
Résistance 1	$R_1 = 1,17\Omega$	$R'_1 = 1,48\Omega$	$R''_1 = 2,56\Omega$
\mathcal{T}	$\tau = 0,8s$	$\tau' = 2,8s$	$\tau'' = 5s$
G_∞	$G_\infty = 0,7dB$	$G'_\infty = 0,66dB$	$G''_\infty = 0,22dB$
Résistance 2	$R_2 = 0,33\Omega$	$R'_2 = 0,27\Omega$	$R''_2 = 0,076\Omega$
Capacité	$C = 2,4F$	$C' = 10,4F$	$C'' = 65F$

Rappel:

$$R_2 = \frac{r R_1}{G_\infty R_1 - r}$$

$$C = \frac{\tau}{R_2}$$

Analyse des résultats

Récapitulatif:

	Viande 1 (maigre)	Viande 3 (grasse)
Résistance linéique 1 ($\Omega.m^{-1}$)		
Résistance linéique 2 ($\Omega.m^{-1}$)		
Capacité linéique ($F.m^{-1}$)		

Rappel: Les mesures étant faites pour une portion de 6 cm, on a alors :

$$R_{lineique} = \frac{R}{0,06} \quad \Bigg| \quad C_{lineique} = \frac{C}{0,06}$$

Analyse des résultats

Récapitulatif:

	Viande 1 (maigre)	Viande 3 (grasse)
Résistance linéique 1 ($\Omega.m^{-1}$)	$R_{1l} = 19,5\Omega.m^{-1}$	$R''_{1l} = 42,7\Omega.m^{-1}$
Résistance linéique 2 ($\Omega.m^{-1}$)	$R_{2l} = 5,5\Omega.m^{-1}$	$R''_{2l} = 1,26\Omega.m^{-1}$
Capacité linéique ($F.m^{-1}$)	$C = 40F.m^{-1}$	$C'' = 1083,3F.m^{-1}$

Rappel: Les mesures étant faites pour une portion de 6 cm, on a alors :

$$R_{lineique} = \frac{R}{0,06} \quad \Bigg| \quad C_{lineique} = \frac{C}{0,06}$$

Sommaire :

- 1 Introduction
- 2 Etude théorique
- 3 Conception d'un impédancemètre
- 4 Expérience
- 5 Analyse des résultats
- 6 Conclusion et discussion

Conclusion :

- Agrandissement de la base de données de manière empirique

U entrée (V)	U sortie (V)	f (Hz)	déphasage(1->2)	Gdb
4.96	2.25	1	-10.75	-6.865903168
4.96	2.37	5	-10.4	-6.41466661
4.96	2.49	8	-10.6	-5.985646588
4.96	2.53	10	-10.39	-5.847223106
4.90	2.65	15	-10.15	-5.479669376
4.86	2.69	20	-10.75	-5.137679785
4.90	2.73	25	-9.5	-5.221333914
4.86	2.81	30	-10.2	-4.758598987
4.88	2.81	35	-9.8	-4.794270042
4.86	2.89	40	-9.5	-4.51476853
4.88	2.89	50	-9.3	-4.550439585
4.88	2.97	60	-9.1	-4.313267454
4.86	2.97	70	-8.8	-4.277596399
4.88	3.02	80	-8.2	-4.168257581
4.90	3.1	90	-7.1	-4.117352979
4.88	3.14	100	-6.5	-3.829803479
4.88	3.26	200	-5	-3.504044439
4.98	3.3	300	-5.1	-3.574308058
4.86	3.28	400	-4.4	-3.415248511
4.98	3.34	450	-2.7	-3.469657519
4.94	3.34	500	-2.5	-3.399609642
4.94	3.34	600	-2	-3.399609642
4.94	3.38	700	-1.5	-3.296204973
4.94	3.38	800	-1.4	-3.296204973
4.86	3.38	900	-1.3	-3.15439138
4.88	3.38	1000	-1.15	-3.190062435
4.88	3.38	2000	-1.1	-3.190062435
4.88	3.38	3000	-1.07	-3.190062435
4.94	3.42	4000	-1	-3.194016857
4.94	3.42	5000	-0.7	-3.194016857
4.88	3.42	10000	-0.5	-3.087874319
4.88	3.42	25000	-0.25	-3.087874319

Conclusion :

- Agrandissement de la base de données de manière empirique
- Application à des cas réels

U entrée (V)	U sortie (V)	f (Hz)	déphasage(1->2)	Gdb
4.96	2.25	1	-10.75	-6.865903168
4.96	2.37	5	-10.4	-6.41466661
4.96	2.49	8	-10.6	-5.985646588
4.96	2.53	10	-10.39	-5.847223106
4.90	2.65	15	-10.15	-5.479669376
4.86	2.69	20	-10.75	-5.137679785
4.90	2.73	25	-9.5	-5.221333914
4.86	2.81	30	-10.2	-4.758598987
4.88	2.81	35	-9.8	-4.794270042
4.86	2.89	40	-9.5	-4.51476853
4.88	2.89	50	-9.3	-4.550439585
4.88	2.97	60	-9.1	-4.313267454
4.86	2.97	70	-8.8	-4.277596399
4.88	3.02	80	-8.2	-4.168257581
4.98	3.1	90	-7.1	-4.117352979
4.88	3.14	100	-6.5	-3.829803479
4.88	3.26	200	-5	-3.504044439
4.98	3.3	300	-5.1	-3.574308058
4.86	3.28	400	-4.4	-3.415248511
4.98	3.34	450	-2.7	-3.469657519
4.94	3.34	500	-2.5	-3.399609642
4.94	3.34	600	-2	-3.399609642
4.94	3.38	700	-1.5	-3.296204973
4.94	3.38	800	-1.4	-3.296204973
4.86	3.38	900	-1.3	-3.15439138
4.88	3.38	1000	-1.15	-3.190062435
4.88	3.38	2000	-1.1	-3.190062435
4.88	3.38	3000	-1.07	-3.190062435
4.94	3.42	4000	-1	-3.194016857
4.94	3.42	5000	-0.7	-3.194016857
4.88	3.42	10000	-0.5	-3.087874319
4.88	3.42	25000	-0.25	-3.087874319

Conclusion :

- Agrandissement de la base de données de manière empirique
- Application à des cas réels

Remarque :

$$i_{utile} < i_{limite}$$

(5 mA) (30 mA)

U entrée (V)	U sortie (V)	f (Hz)	déphasage(1->2)	Gdb
4.96	2.25	1	-10.75	-6.865903168
4.96	2.37	5	-10.4	-6.41466661
4.96	2.49	8	-10.6	-5.985646588
4.96	2.53	10	-10.39	-5.847223106
4.90	2.65	15	-10.15	-5.479669376
4.86	2.69	20	-10.75	-5.137679785
4.90	2.73	25	-9.5	-5.221333914
4.86	2.81	30	-10.2	-4.758598987
4.80	2.81	35	-9.8	-4.794270042
4.86	2.89	40	-9.5	-4.51476853
4.80	2.89	50	-9.3	-4.550439585
4.80	2.97	60	-9.1	-4.313267454
4.86	2.97	70	-8.8	-4.277596399
4.80	3.02	80	-8.2	-4.168257581
4.90	3.1	90	-7.1	-4.117352979
4.80	3.14	100	-6.5	-3.829803479
4.80	3.26	200	-5	-3.504044439
4.90	3.3	300	-5.1	-3.574308058
4.86	3.28	400	-4.4	-3.415248511
4.90	3.34	450	-2.7	-3.469657519
4.94	3.34	500	-2.5	-3.399609642
4.94	3.34	600	-2	-3.399609642
4.94	3.38	700	-1.5	-3.296204973
4.94	3.38	800	-1.4	-3.296204973
4.86	3.38	900	-1.3	-3.15439138
4.80	3.38	1000	-1.15	-3.190062435
4.80	3.38	2000	-1.1	-3.190062435
4.80	3.38	3000	-1.07	-3.190062435
4.94	3.42	4000	-1	-3.194016857
4.94	3.42	5000	-0.7	-3.194016857
4.80	3.42	10000	-0.5	-3.087874319
4.80	3.42	25000	-0.25	-3.087874319

ANNEXE

Principe de mesure repose sur la loi d'Ohm :

Dans un matériau conducteur ; le courant qui le traverse est prop. à la tension selon $U = R \times I$

Avec U, la tension en volt (SI)

R, la résistance en ohm

I, le courant en ampère

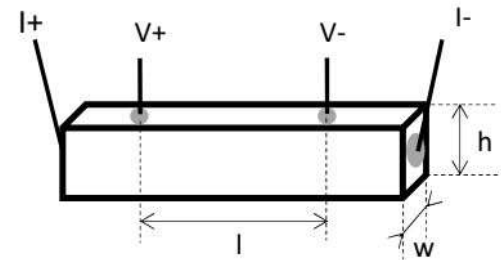
Résistivité ρ ($\Omega \cdot m$) :

$$\rho = \frac{R \times S}{l}$$

Avec R, la résistance en ohm

S, la section du matériau en m^2 ($w \times h$)

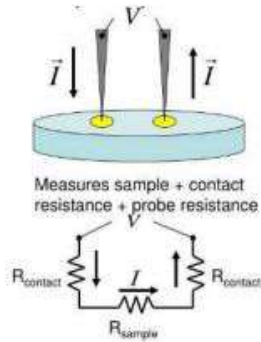
l, la distance entre électrodes en m



Méthodes de mesure

2 points

2 fils seulement pour faire passer I et mesurer U

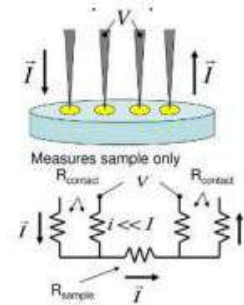


Très peu utilisée en pratique
Seulement pour les matériaux assez résistifs voire isolants (mesure diélectrique)

4 points

$$U = R \times I$$

2 fils pour faire passer I
2 fils pour mesurer U



Contacts en ligne

Avantage important : indépendant des résistances de contact
(i dans les fils du voltmètre $\ll I$ qui passe dans l'échantillon)