

COMPTE RENDU

DU TP 2 :

JAUGES DE CONTRAINTES

I- But de la manipulation :

Le but de cette manipulation est l'étude d'une chaîne de mesure à base de jauges de contraintes et l'application des différents montages du pont de Wheatstone.

II- Partie théorique :

A- Principe de fonctionnement d'une jauge de contrainte :

Une jauge de déformation est basée sur la propriété que la conductibilité de certains matériaux varie lorsqu'ils sont soumis à des contraintes, pressions ou déformations. Elle permet de fabriquer des capteurs de pression dont la résistance varie avec la force appliquée. Elle convertit force, pression, tension et poids, en changement de résistance électrique qui peut ensuite être mesuré.

Le but des extensomètres à fils résistants ou jauges de déformation sous une autre appellation est de traduire la déformation d'une pièce en variation de résistance électrique, plus les extensomètres s'étirent, plus leurs résistances augmentent.

Les jauges de déformation permettent de mesurer de faibles déformations.

D'un point de vue macroscopique, on définit la déformation conventionnelle, appelée « extension » et notée ϵ , par :

$$\epsilon l = \frac{\Delta L}{L}$$

Où :

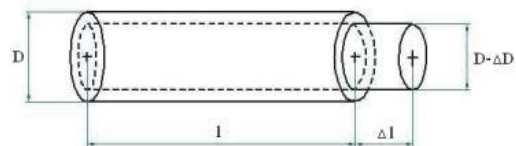
- l_0 est la longueur initiale de la pièce, ou ici de la jauge ;
- Δl est la variation de la longueur sous charge, $\Delta l = (l - l_0)$.

La mesure est basée sur la piézorésistance qui est le changement de conductibilité d'un matériau dû à une contrainte. La résistance électrique d'une jauge de cylindrique est donné par :

$$R = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{4L}{D^2 \cdot \pi}$$

ρ : résistivité du fil qui dépend du matériau utilisé et de la température.

L : longueur du fil en « m »



- S : section du fil en « m² »
- D : le diamètre de la section

Donc après déformation de la jauge, on obtient :

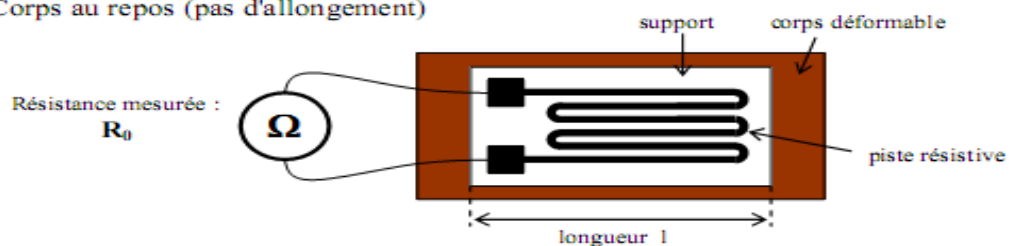
$$R_0 + \Delta R = (\rho + \Delta\rho) \frac{4(l + \Delta l)}{(D - \Delta D)^2 \pi}.$$

On peut alors exprimer la variation relative de la résistance par :

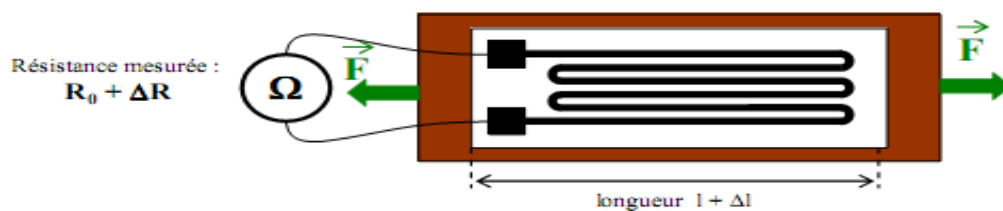
$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = k \cdot \varepsilon_l$$

- k, la sensibilité d'un appareil piézorésistant, dépend principalement du constituant de la jauge ;
- $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$ la variation relative de longueur ;
- R la résistance.

① Corps au repos (pas d'allongement)



② Corps ayant subi un étirement (effort de traction)



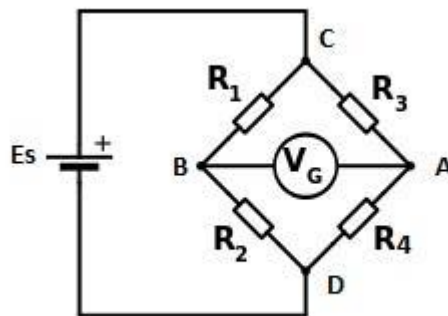
Une jauge de déformation est basée sur la propriété que la conductibilité de certains matériaux varie lorsqu'ils sont soumis à des contraintes, pressions ou déformations. Elle permet de fabriquer des capteurs de pression.

La mesure ne peut pas s'effectuer directement car les variations de conductibilité de la jauge sont trop faibles pour être mesurées directement avec un ohmmètre. Il est donc nécessaire de faire un montage en pont de Wheatstone.

B- Pont de Wheatstone :

Un pont de Wheatstone est un instrument de mesure, utilisé pour mesurer une résistance électrique inconnue par équilibrage de deux branches d'un circuit en pont, avec une branche contenant le composant inconnu.

Le montage en pont est considéré comme un double montage potentiométrique d'où la nécessité des méthodes de linéarisation et de compensation des grandeurs d'influence. La mesure en pont le rend moins sensible aux bruits et aux dérives de la source, et c'est ce qui rend le montage en pont plus intéressant que le montage direct, en particulier pour le pont résistif.



1- Montage en ¼ de pont :

Dans le montage en quart de pont, on ne dispose que d'une jauge et trois résistances viennent en complément avec l'électronique associée. Ce montage est le plus simple et le moins cher mais présente certains inconvénients.

Les résistances : $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ Et $R_4 = R_0 + \Delta R_c$ qui est notre capteur.

La tension de déséquilibre a pour expression :

$$V_m = \frac{E_s}{4} \frac{\Delta R}{R_0} \frac{1}{\frac{\Delta R_c}{2R_0} + 1}$$

On voit bien que V_m n'est pas linéaire. Donc pour de faibles variations de la résistance :

$$\Delta R_c \ll R_0$$

En effectuant un développement limité d'ordre 1 de l'expression $\frac{1}{\frac{\Delta R_c}{R_0} + 1}$, l'expression de V_m devient :

$$V_m = \frac{\Delta R_c}{4R_0} E_s$$

2- Montage en $\frac{1}{2}$ pont :

Dans le montage en demi-pont, on ne dispose de deux jauges et de deux résistances qui viennent en complément avec l'électronique associée. Les deux jauges fonctionnent en Push-Pull, c'est-à-dire que les variations de leurs résistances sont opposées.

Pour ce cas, les deux résistances R_3 et R_4 fonctionnent en Push Pull.

On travaille avec :

- $R_1 = R_2 = R_0$
- $R_3 = R_0 + \Delta R_c$
- $R_4 = R_0 - \Delta R_c$

La tension de déséquilibre est :

En alimentation tension :
$$V_m = \frac{E_s}{2} \frac{\Delta R_c}{R_0}$$

En alimentation courant :
$$V_m = \frac{I_s}{2} \Delta R_c$$

On voit bien que V_m est une fonction linéaire de ΔR_c et que la sensibilité est deux fois meilleure que dans le cas du pont simple.

3- Montage en pont complet :

Dans le montage en pont complet, on travaille avec les 4 jauges. Telles que :

$$R1 = R0 - \Delta R_c$$

$$R3 = R0 + \Delta R_c$$

Et

$$R2 = R0 + \Delta R_c$$

$$R4 = R0 - \Delta R_c$$

L'expression de la tension de déséquilibre dans ce cas, est :

$$V_m = E_s \frac{\Delta R_c}{R_0}$$

On voit clairement que V_m est une fonction linéaire de ΔR_c et que la sensibilité est 4 fois plus meilleure avec 4 jauges qu'avec une seule que dans le premier cas.

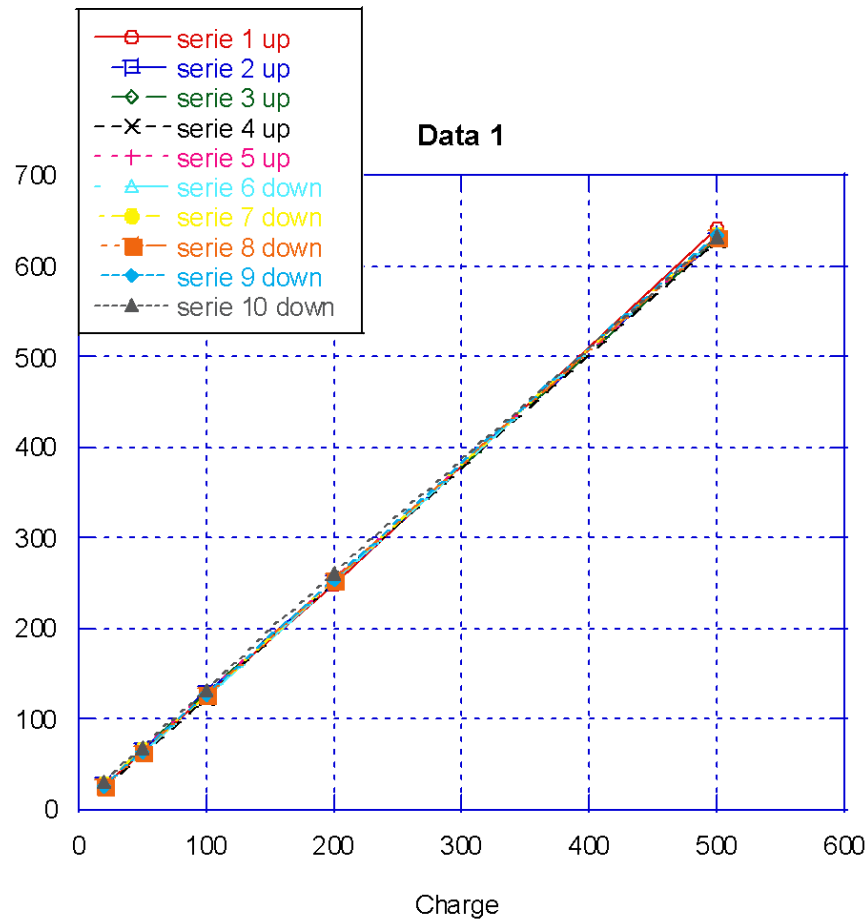
III- Partie pratique :

A- Montage en ¼ de pont :

1- Tableau de mesure :

Charge (en g)	Série 1 UP	Série 2 UP	Série 3 UP	Série 4 UP	Série 5 UP
20	26,4	27,8	26,4	23,5	27,1
50	62,9	65,1	65,7	61,8	65,6
100	125,8	128,7	128,8	123,2	128,8
200	250	252	253	252	254
500	642	630	630	628	632
Charge (en g)	Série 6 DOWN	Série 7 DOWN	Série 8 DOWN	Série 9 DOWN	Série 10 DOWN
20	25,8	27,3	26	26	30
50	63,3	65,3	63	63	68
100	125	128	126	126	131
200	252	254	253	254	260
500	631	634	632	634	633

2- Courbes :



Courbes des séries de charges croissantes et décroissantes

$$y = -2,0717 + 1,2844x \quad R = 0,99993$$

$$y = 2,4683 + 1,2543x \quad R = 0,99999$$

$$y = 2,3448 + 1,2554x \quad R = 0,99999$$

$$y = -1,5007 + 1,2598x \quad R = 0,99999$$

$$y = 2,3957 + 1,2592x \quad R = 1$$

$$y = -0,13052 + 1,2618x \quad R = 1$$

$$y = 1,7917 + 1,264x \quad R = 1$$

$$y = 0,12289 + 1,2637x \quad R = 1$$

$$y = -0,055702 + 1,2681x \quad R = 1$$

$$y = 5,7838 + 1,2564x \quad R = 0,99998$$

Notre meilleure droite est celle qui correspond au coefficient de corrélation le plus proche de la valeur 1, et puisque on a obtenu plusieurs droites à $R = 1$, on choisit une et on effectue les calculs nécessaires :

$$y = 2,3957 + 1,2592 x$$

L'estimation de la sensibilité alors est :

$$S = 1,2592 \text{ mV /g}$$

3- Calcul des erreurs :

Erreur d'hystérésis :

Calcul des écarts :

Charge	20	50	100	200	500
Ecart UP	1,3397	1,1357	1,2557	2,0357	-0,40427
Ecart DOWN	0,5597	0,8357	1,1157	-0,3643	-0,80427
Différence	0,78	0,3	0,14	2,4	0,4

L'erreur d'hystérésis est la plus grande différence, elle est égale à 2,4 mV divisée par la sensibilité 1,2592 mV /g pour une charge de 200g.

Sur toute l'étendue de mesure :

$$\epsilon_h = \frac{\frac{2,4}{1,2592}}{480}$$

$$\epsilon_h = 0,39\%$$

Erreur de fidélité :

Calcul des écarts types :

Charge	20	50	100	200	500
Ecart type UP	1,638	1,7655	2,5116	1,4832	5,5498
Ecart type DOWN	1,7697	2,1696	2,3875	3,1305	1,3038

L'erreur de fidélité en tenant compte de la sensibilité est la valeur du plus grand écart type multipliée par 2 et divisée par la valeur de sensibilité, et sur toute l'étendue de mesure :

$$\epsilon_f = \frac{\frac{(2 \cdot 5,5498)}{1,2592}}{480}$$

$$\epsilon_f = 1,83 \%$$

L'erreur de linéarité :

Maintenant on va calculer séparément l'erreur de linéarité pour les séries de charges croissantes et charges décroissantes, dans ce cas on doit pour chaque cas déterminer la meilleure droite.

La meilleure droite UP : $y = 1,2592 x + 2,3957$

La meilleure droite DOWN : $y = 1,2637 x + 0,12289$

L'erreur de linéarité c'est le rapport de l'écart de linéarité entre les courbes réelles et la régression linéaire sur l'excursion de sortie.

Charge	20	50	100	200	500
ϵ_l	-0,311	-0,2912	0,2242	0,5089	0,02887
ϵ_l	0,38645	0,20242	0,13785	0,21714	0,2757

Ces valeurs sont très faibles devant les écarts types, donc on ne peut pas conclure qu'il ya une erreur de linéarité.

L'erreur de zéro :

L'erreur du zéro qui amène à une erreur de justesse peut être estimée grâce à la moyenne des deux régressions linéaires des séries de charges croissantes et décroissantes.

$$\epsilon_{\text{zéro}} = \frac{2,3957 + 0,12289}{2} = 1,26 \text{ mV}$$

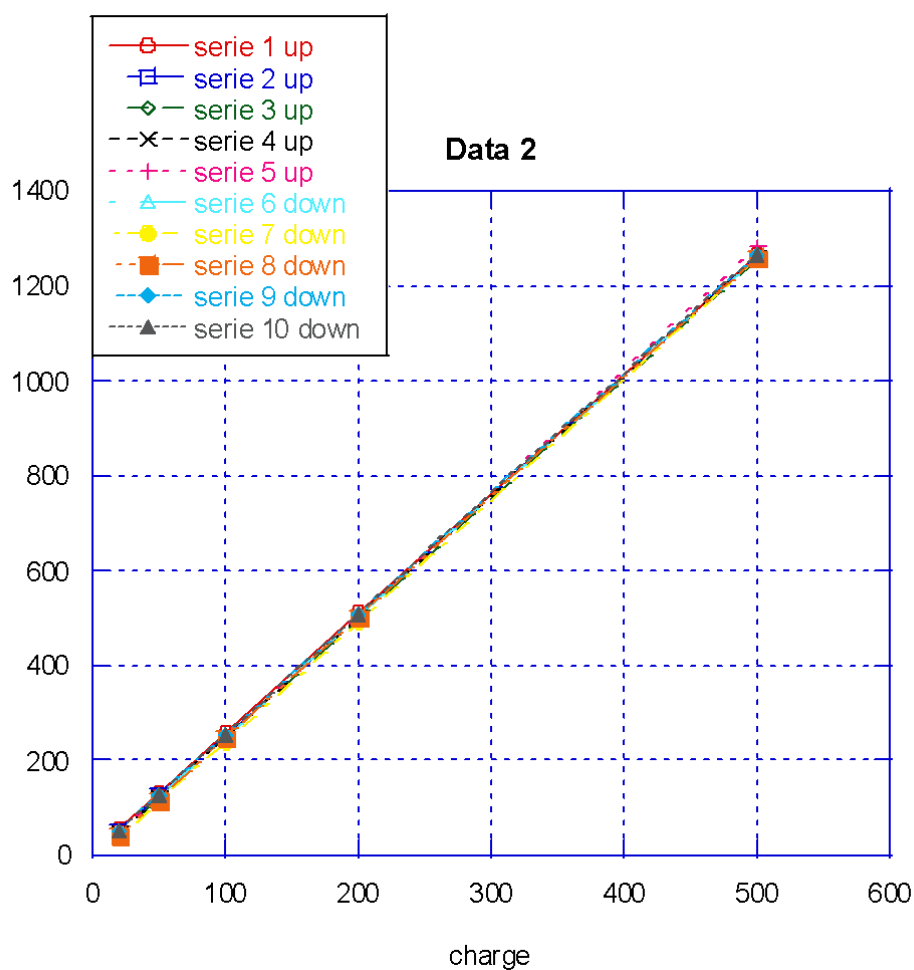
B- Montage en ½ de pont :

1- Tableau de mesure :

Charge	Série 1 UP	Série 2 UP	Série 3 UP	Série 4 UP	Série 5 UP
20	56	50	46	48	51
50	131	125	121	124	126
100	258	250	248	249	252
200	511	503	500	503	507
500	1263	1257	1253	1258	1281

Charge	Série 1 UP	Série 2 UP	Série 3 UP	Série 4 UP	Série 5 UP
20	46	38	44	51	50
50	123	112	120	126	126
100	250	241	247	255	253
200	504	492	501	507	506
500	1260	1258	1259	1263	1263

2- Courbes :



Courbes des séries de charges croissantes et décroissantes

$$\begin{aligned} & \text{—} y = 6,2001 + 2,5149x \quad R=1 \\ & \text{--} y = -0,71014 + 2,5156x \quad R=1 \\ & \text{— —} y = -3,97 + 2,5148x \quad R=1 \\ & \text{-----} y = -2,2656 + 2,5211x \quad R=1 \\ & \text{- - - - -} y = -2,9252 + 2,5651x \quad R=0,99999 \\ & \text{- —} y = -3,2553 + 2,5279x \quad R=1 \\ & \text{-----} y = -14,294 + 2,5431x \quad R=1 \\ & \text{-----} y = -6,2272 + 2,5312x \quad R=1 \\ & \text{-----} y = 1,0684 + 2,5249x \quad R=1 \\ & \text{-----} y = -0,048574 + 2,5267x \quad R=1 \end{aligned}$$

L'équation de régression linéaire d'après les équations au dessus est celle qui a un coefficient de corrélation $R=1$, et puisque il en a plusieurs, on choisit une équation :

$$Y = 2,5149 x + 6,2001$$

La première estimation de la sensibilité :

$$S = 2,5149 \text{ mV /g}$$

3- Calcul des erreurs :

Erreur d'hystérésis :

Calcul des écarts

Charge	20	50	100	200	500
Ecart UP	6,298	6,55	6,29	4,38	1,3
Ecart DOWN	10,698	10,55	8,49	7,18	3,1
Différence	4,4	4	2,61	2,8	1,8

L'erreur d'hystérésis est la plus grande différence, elle est égale à 4,4 mV divisée par la sensibilité 2,5149 mV /g pour une charge de 20g.

Sur toute l'étendue de mesure : $\epsilon_h = \frac{\frac{4,4}{2,5149}}{480}$

$$\epsilon_h = 0,36\%$$

Erreur de fidélité :

Calcul des écarts types :

Charge	20	50	100	200	500
Ecart type UP	3,7683	3,6469	3,9749	4,2661	10,991
Ecart type DOWN	5,2154	5,8138	5,4955	6,0415	2,3022

L'erreur de fidélité en tenant compte de la sensibilité est la valeur du plus grand écart type multipliée par 2 et divisée par la valeur de sensibilité, et sur toute l'étendue de mesure :

$$\epsilon_f = \frac{\frac{(2 \cdot 10,991)}{2,5149}}{480}$$

$$\epsilon_f = 1,82 \%$$

L'erreur de linéarité :

Maintenant on va calculer séparément l'erreur de linéarité pour les séries de charges croissantes et charges décroissantes, dans ce cas on doit pour chaque cas déterminer la meilleure droite.

La meilleure droite UP : $y = 2,5149 x + 6,2001$

La meilleure droite DOWN : $y = 2,5249 x + 1,0684$

Charge	20	50	100	200	500
ϵ_l	-0,6298	-0,655	-0,629	-0,398	-0,046
ϵ_l	-0,44	-0,42	-0,31	-0,27	-0,58

L'erreur de zéro :

Elle est estimée grâce à la moyenne des 2 régressions linéaire obtenues.

$$\epsilon_{\text{zéro}} = \frac{6,2001 + 1,0684}{2} = 3,63 \text{ mV}$$

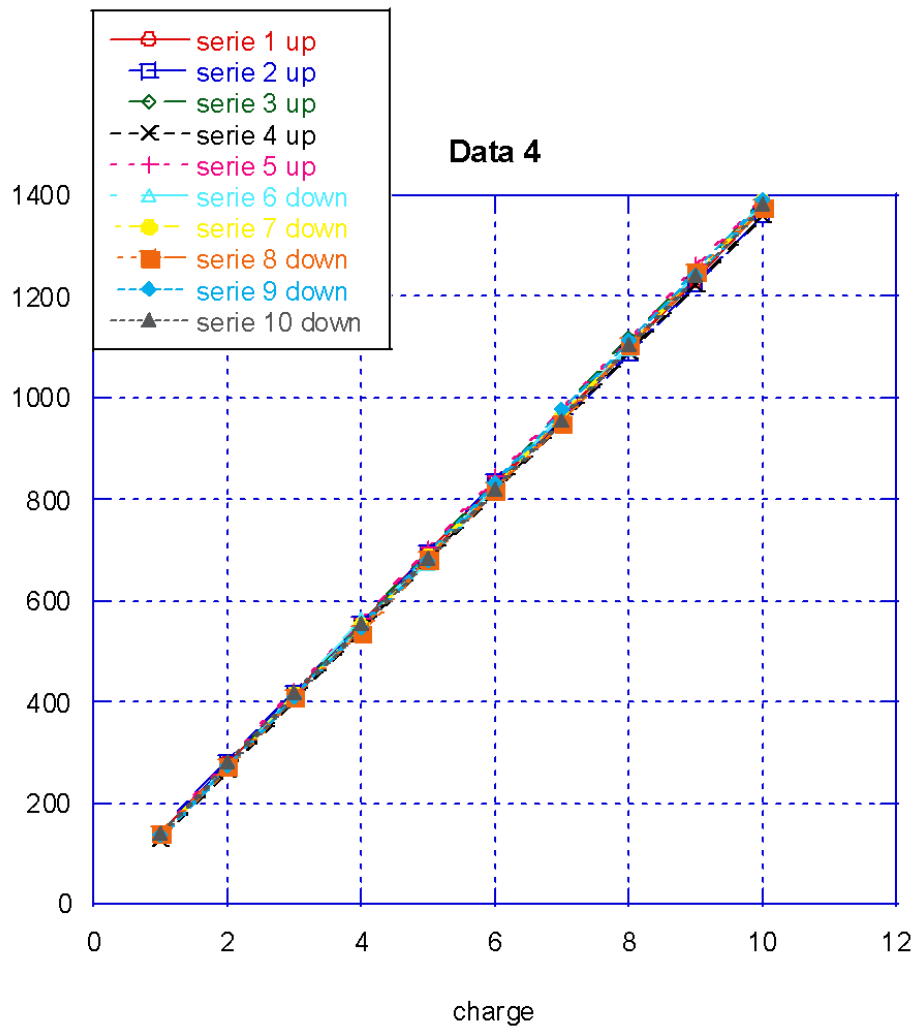
C- Montage en pont complet :

1- Tableau de mesure :

Charge (en Kg)	Série 1 UP	Série 2 UP	Série 3 UP	Série 4 UP	Série 5 UP
1	142,7	142	136	129	141
2	276	280	278	264	280
3	416	420	419	407	422
4	555	557	556	544	563
5	694	696	689	684	705
6	832	835	829	820	846
7	964	949	979	954	978
8	1100	1088	1117	1091	1114
9	1233	1223	1249	1226	1263
10	1377	1360	1385	1362	1385

Charge (en Kg)	Série 6 DOWN	Série 7 DOWN	Série 8 DOWN	Série 9 DOWN	Série 10 DOWN
1	137	139	140	138	139
2	274	274	275	271	280
3	416	415	408	410	417
4	562	549	538	545	555
5	675	688	683	680	683
6	832	825	818	834	820
7	963	963	951	979	956
8	1097	1102	1105	1114	1105
9	1250	1250	1249	1243	1243
10	1386	1385	1378	1391	1382

2- Courbe :



Courbes des séries de charges croissantes et décroissantes

— $y = 5,88 + 136,93x$ $R = 0,99997$

- — $y = 14,4 + 134,65x$ $R = 0,99987$

- - $y = -0,86667 + 139,01x$ $R = 0,99995$

- - - - $y = -5,8 + 137,07x$ $R = 0,99998$

- $y = 5,6 + 138,93x$ $R = 0,99992$

- — — $y = -2,0667 + 138,41x$ $R = 0,99984$

- - - - $y = -3 + 138,55x$ $R = 0,99997$

- . . . — $y = -6,1333 + 138,3x$ $R = 0,99986$

- - - - - $y = -8,0667 + 139,74x$ $R = 0,99989$

- - - - - $y = 1,0667 + 137,62x$ $R = 0,99993$

L'équation de régression linéaire d'après les équations au dessus est celle qui a un coefficient de corrélation proche de $R=1$, donc la meilleure droite est :

$$Y = 137,07 x - 5,8$$

La première estimation de la sensibilité :

$$S = 137,07 \text{ mV /Kg}$$

3- Calcul des erreurs :

Erreur d'hystérésis :

Calcul des écarts

Charge	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ecart UP	6,87	7,26	11,39	12,52	14,05	15,78	11,11	11,2	11	19,5
Ecart DOWN	7,31	6,46	7,79	7,32	2,25	9,18	8,71	13,88	19,2	19,5
Différence	0,46	-0,8	-3,9	-5,2	-11,7	-1,93	-2,4	2,68	8,2	0

L'erreur d'hystérésis est la plus grande différence, elle est égale à 8,2 mV divisée par la sensibilité 137,07 mV /Kg pour une charge de 9 Kg.

Sur toute l'étendue de mesure :

$$\epsilon_h = \frac{\frac{8,2}{137,07}}{9}$$

$$\epsilon_h = 0,66\%$$

Erreur de fidélité :

Calcul des écarts types :

Charge	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ecart type UP	5,744	6,693	5,8907	6,892	7,893	9,449	13,627	13,134	16,85	12,153
Ecart type DOWN	1,14	3,2711	3,9623	9,2033	4,7645	7,085	2	10,574	3,674	4,827

L'erreur de fidélité en tenant compte de la sensibilité est la valeur du plus grand écart type multipliée par 2 et divisée par la valeur de sensibilité, et sur toute l'étendue de mesure :

$$\epsilon_f = \frac{\frac{(2 \cdot 16,858)}{137,07}}{9}$$

$$\epsilon_f = 1,36 \%$$

L'erreur de linéarité :

Maintenant on va calculer séparément l'erreur de linéarité pour les séries de charges croissantes et charges décroissantes, dans ce cas on doit pour chaque cas déterminer la meilleure droite.

La meilleure droite UP : $y = 137,07x - 5,8$

La meilleure droite DOWN : $y = 138,55x - 3$

Charge (en Kg)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϵI	0,52	0,45	0,75	0,65	0,66	0,6	0,22	0,43	0,275	0,356
ϵI	1,01	0,07	0,07	-0,05	-0,61	-0,17	-0,158	-0,06	0,44	0,146

L'erreur de zéro :

Elle est estimée grâce à la moyenne des 2 régressions linéaire obtenues.

$$\epsilon_{\text{zéro}} = \frac{-5,8-3}{2} = -4 \text{ mV}$$

IV- Conclusion :

Cette manipulation nous a permis de comprendre le fonctionnement des jauges de contraintes dans différents pont de Wheatstone et d'appliquer la théorie vue dans le cours.

Nous avons pu comprendre le conditionnement d'un capteur, la linéarisation et l'amélioration de la sensibilité de la mesure. Nous avons aussi appliqué le calcul des différentes erreurs.

On voit bien que la sensibilité a doublé pour le montage en demi-pont par rapport au pont simple et que la mesure a été linéarisée, et que le montage en pont complet présente un grand intérêt puisqu'il permet d'avoir la linéarité et une meilleure sensibilité.