
BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

Étude de la thermoélasticité des gaz

par Alain ARBOUET
Lycée René Cassin - 64100 Bayonne
mél : ALAINARB@aol.com

RÉSUMÉ

Le but de cette manipulation est de vérifier que l'air se comporte comme un gaz parfait dans les conditions étudiées. On cherche donc à vérifier l'exactitude, aux incertitudes de mesure près, de l'équation d'état $pV = nRT$.

*Pour cela on étudie d'abord le comportement d'une certaine quantité d'air enfermée dans un piston lors d'une compression ou lors d'une détente en enregistrant les paramètres P , V et T . On étudie ensuite le comportement d'une certaine quantité d'air enfermée dans un tube lors d'un échauffement isochore en enregistrant les paramètres P et T . Ces mesures sont effectuées **sans utiliser de mercure**. On mesure des tensions U_P , U_V et U_T grâce à des capteurs, l'automatisation via une interface étant très facile évidemment.*

On trouvera ci-dessous :

- le texte de la manipulation tel qu'il est proposé aux élèves de PCSI ;
- des indication concernant la mise en œuvre ;
- des résultats et commentaires.

I - Texte proposé aux élèves

Première partie : Étude de la thermoélasticité des gaz

VÉRIFICATION DE LA LOI DE MARIOTTE : ÉTUDE DE P EN FONCTION DE V ET DE T

A - But de la manipulation

On veut vérifier que lorsque l'on fait varier la pression et le volume de l'air, celui-ci se comporte dans les conditions étudiées comme un gaz parfait : que l'équation d'état $pV = nRT$ est toujours vérifiée.

B - Montage expérimental

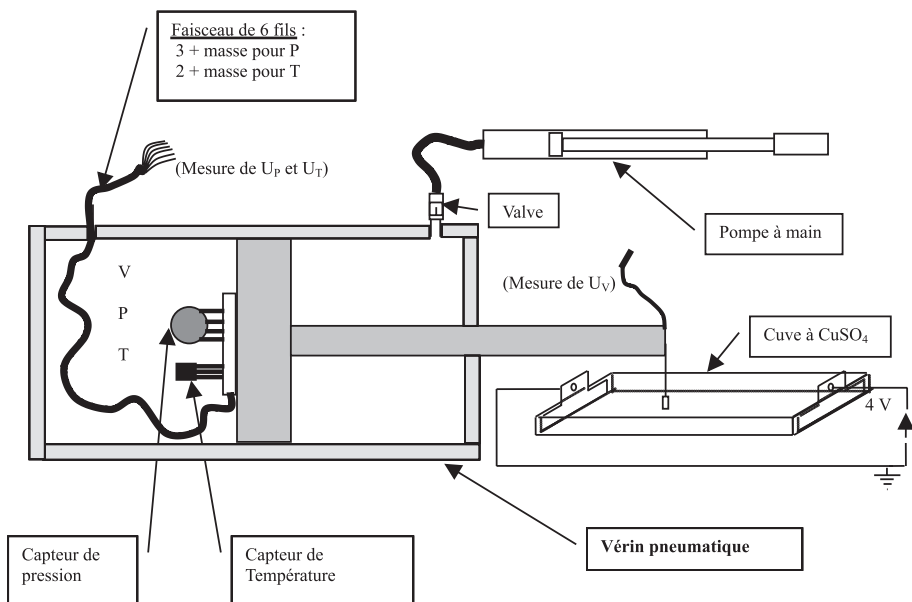


Figure 1

C - Manipulation

Réaliser le montage ci-dessus (cf. figure 1). Brancher la fiche DIN au boîtier des capteurs et brancher les voltmètres permettant d'obtenir U_P et U_T . Alimenter la cuve à sulfate de cuivre et brancher le voltmètre donnant U_V . Le volume V étant maximum noter les trois tensions et commencer lentement à pomper en notant les trois tensions après chaque surpression. La course maximale est de 8 cm, elle ne doit pas être dépassée pour ne pas détériorer les capteurs à l'intérieur du piston... Lorsqu'elle est atteinte laisser entrer l'air **lentement** à l'aide de la valve et enregistrer comme précédemment les trois tensions lors de la détente. Le piston ne revient pas à son état initial à cause des frottements, il faut donc le tirer pour finir.

D - Exploitation des résultats expérimentaux

Utiliser le logiciel REGRESSI-WIN. Entrer les résultats dans l'ordre en les numérotant (variable de tri) pour pouvoir étudier séparément la compression et la détente.

Dans la partie *expressions* enregistrer les trois formules donnant P , T et V :

$$P = 50 \times U_P \quad (U_P \text{ en mV et } P \text{ en hPa})$$

$$T = 100 \times U_T \quad (T \text{ en K et } U_T \text{ en V})$$

et
$$V = a + b \times U_V \quad (V \text{ en cm}^3 \text{ et } U_V \text{ en V})$$

Les deux premières formules sont données par les fabricants des capteurs, la troisième est obtenue à partir de l'étalonnage du déplacement du piston et de la section du cylindre (cf. doc. en salle).

- Calculer pour chaque point nR en **J/K**.
- En déduire nR moyen ($\text{moy}(nR)$) et l'écart type ($\text{stdev}(nR)$).
- Tracer $P = f(T/V)$. Conclusion ?
- Modéliser et comparer avec les résultats ci-dessus.
- Étudier la compression et la détente dans le diagramme de Clapeyron.
- Comparer les deux courbes avec les courbes théoriques des détentes (resp : compressions) isotherme et isentropique. Pour cela tracer en plus de $P(V)$ les courbes $P_3(V)$ et $P_4(V)$ théoriques correspondant aux détentes (resp : compressions) isotherme et isentropique à partir de l'état $P_{\max}(\max(P))$ et $V_{\min}(\min(V))$, γ étant égal à 1,4.

A partir de la pression finale dans le cylindre lors de l'arrêt du déplacement du piston, évaluer la force de frottement dynamique due au contact piston/cylindre (le diamètre du piston étant donné en salle).

E - Conclusion

Faire une analyse des résultats expérimentaux.

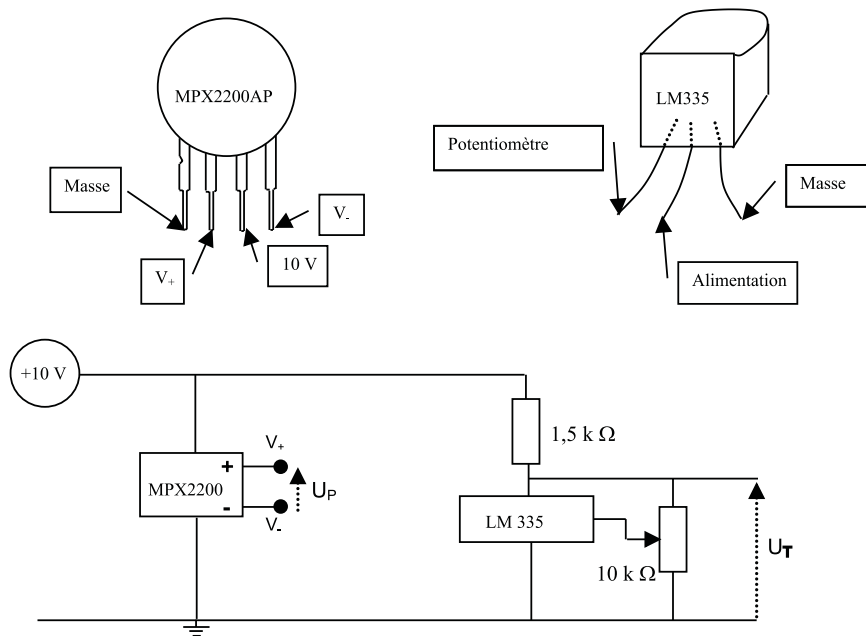
Annexe : Branchement des capteurs

Figure 2

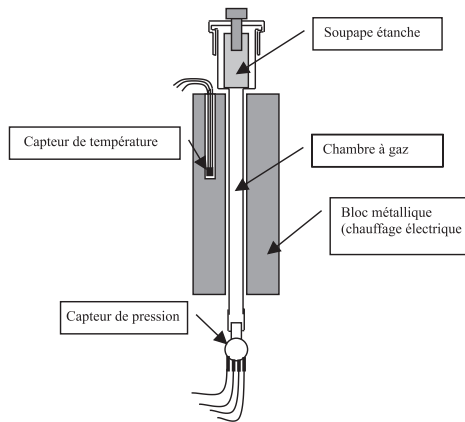
Deuxième partie

Étude de la thermoélasticité des gaz

VÉRIFICATION DE LA LOI DE CHARLES : ÉTUDE DE P EN FONCTION DE T À VOLUME CONSTANT

A - But de la manipulation

On étudie dans ce cas comment varie la pression quand on augmente la température d'une certaine quantité d'air dont le volume est constant.

B - Montage expérimental**Figure 3****C - Manipulation**

- Réaliser le montage ci-dessus (cf. figure 3).
- Brancher la fiche DIN au boîtier des capteurs et brancher les voltmètres permettant d'obtenir U_p et U_T .
- Brancher la résistance chauffante **sur le secteur 220 V (!)**.
- Manœuvrer l'interrupteur pour mettre la résistance sous tension (le chauffage du gaz est électrique), puis couper au bout de 45 secondes. La température continue d'augmenter. Quand la température n'augmente plus noter U_p et U_T . Recommencer ainsi cinq ou six fois jusqu'à atteindre une température de l'ordre de 90°C .

D - Exploitation des résultats expérimentaux

- Utiliser le logiciel REGRESSI-WIN.
- Enregistrer les résultats expérimentaux. Dans la partie *expressions* enregistrer les formules donnant P , T . (cf. première partie).
- Tracer $P = f(T)$. Conclusion ?
- Modéliser et conclure.

Fin du texte proposé aux élèves

II - Réalisation pratique

PREMIÈRE MANIPULATION

J'utilise des vérins pneumatiques qu'un ami fabriquant de sandales m'a donné. Ce sont des pièces détachées d'anciennes machines-outils. J'ai monté la manipulation en deux exemplaires en utilisant deux vérins différents et j'en présente un démonté pour que les élèves voient le piston.

Ces vérins sont maintenant commercialisés sous la marque BOSCH :

BP 37 - ZI Les Fourmis - 74131 BONNEVILLE Cedex
<http://www.bosch.de./at>

- Le premier à un diamètre intérieur de 9,5 cm et une course de 100 cm, il correspond au modèle (réf. : 822.011.068) et vaut 916 F HT pièce.
- Le deuxième à un diamètre intérieur de 6,5 cm et une course de 150 cm, il correspond au modèle (réf. : 822.011.042) et vaut 636 F HT pièce.

Mais si on doit les acheter neufs, il existe d'autres modèles en aluminium, plus légers et moins chers.

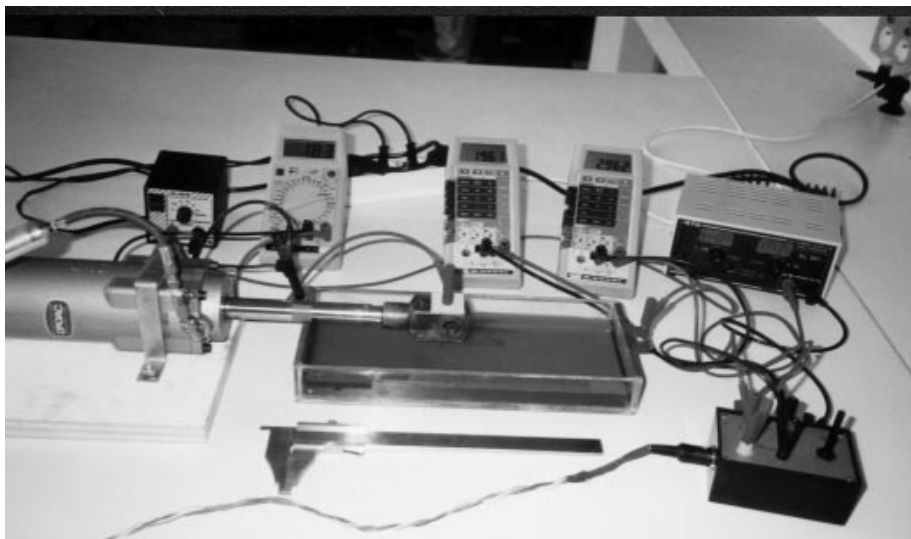


Photo 1 : Enregistrement de $p = f(V, T)$ avec le petit piston.

D'un côté du piston sont placés les deux capteurs fixés sur un petit circuit imprimé. Le faisceau de fils passant par l'orifice d'entrée-sortie de l'air comprimé. Le capteur de pression est un MPX2200AP (le MPX2200A serait aussi valable), il coûte entre 150 et 200 F... Le capteur de température, un LM335Z coûte 12 F. Sur l'orifice de l'autre côté j'ai fixé une valve de chambre à air (vélo ou auto), ce qui me permet de pomper (pompe à vélo ordinaire) et donc de faire varier la pression dans le piston.

Pour mesurer V j'ai passé beaucoup de temps en essayant d'utiliser les capteurs à ultrasons (cf. SODAR) mais l'électronique associée étant trop lourde, je me suis rabattu sur la vieille méthode du CuSO_4 . Chaque poste dispose d'un petit boîtier électronique comportant en plus du schéma proposé aux élèves des amplificateurs opérationnels suiveurs (LM324) placées derrière U_T et U_P mais ces derniers ne sont pas indispensables ! L'étalonnage de V en fonction de U_V est très facile : pour chaque vérin, la section S est donnée ainsi que le volume maximal (que j'ai mesuré le plus précisément possible, en pesant le contenu en eau...). Les élèves n'ont plus qu'à mesurer la pente $\Delta d / \Delta U_V$ en étudiant la variation de d (déplacement de la cuve mesuré au pied à coulisse) en fonction de la tension U_V . Ils déterminent alors la fonction $V = a \times U_V + b$.

DEUXIÈME MANIPULATION

Le four est le four de l'appareil de Mariotte original (cf. Jeulin ou DMS Didalab) que l'on a démonté placé sur un support plat et protégé électriquement... Les capteurs

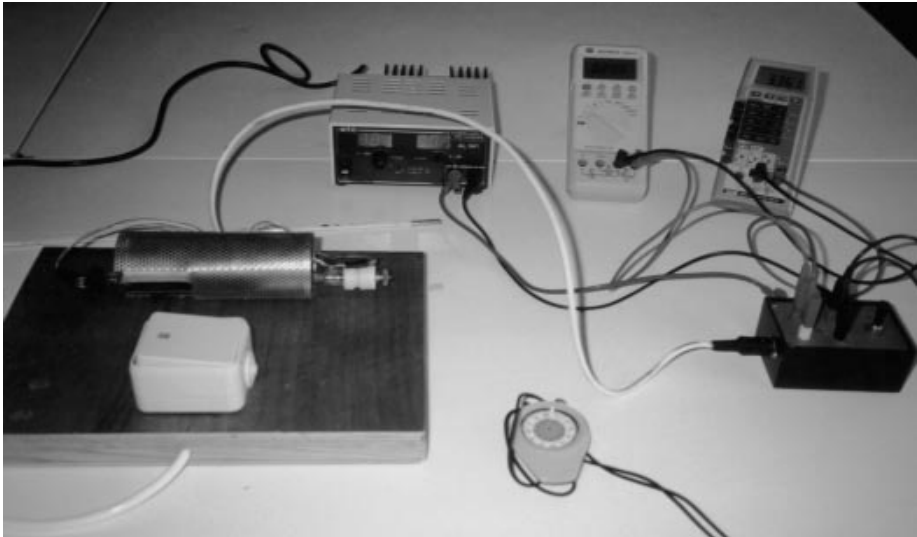
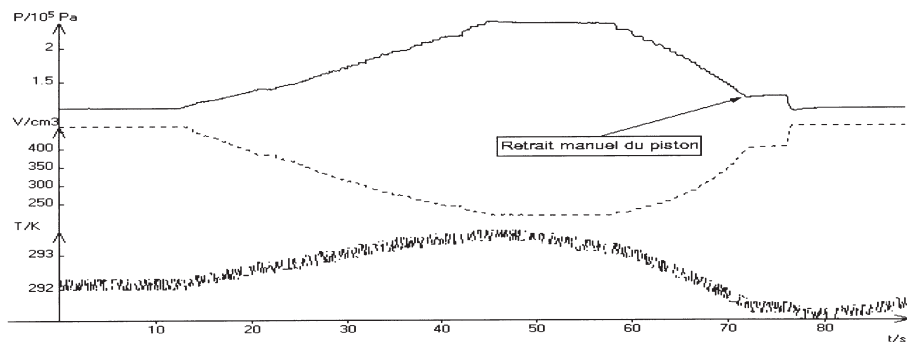


Photo 2 : Enregistrement de $p = f(T)$ à volume constant.

sont placés comme indiqué sur la figure et les sept fils sont reliés par l'intermédiaire d'une fiche DIN au boîtier électronique (cf. annexe). Pour étudier le refroidissement on ventile.

III - Résultats et commentaires

PREMIÈRE MANIPULATION



Courbe 1 : Exemple d'enregistrement automatique via Orphy-gti et Regressi-win.

Le piston se bloque en fin de détente à cause des frottements d'où le retrait manuel nécessaire si on veut revenir à l'état initial. La température varie très peu. Le temps de réponse des capteurs est imperceptible dans la mesure où la compression et la détente sont lentes.

Enregistrement manuel des mesures

a - Expressions :

$$P = 50 \times UP \quad \text{en hPa}$$

$$T = 100 \times UT \quad \text{en K}$$

$$V = 31,5 + 215 \times UV \quad \text{en cm}^3$$

$$nR = (10^{-4} \times P \times V) / T \quad \text{en J/K}$$

$$x = T / V \quad \text{en K/cm}^3$$

Tracé des isothermes :

$$P1 = (\min(P) \times \max(V)) / V$$

et :

$$P3 = (\max(P) \times \min(V1)) / V1 \quad (V1 = V)$$

Tracé des isentropiques :

$$P2 = \min(P) \times (\max(V)) \wedge 1.4 / V \wedge 1.4$$

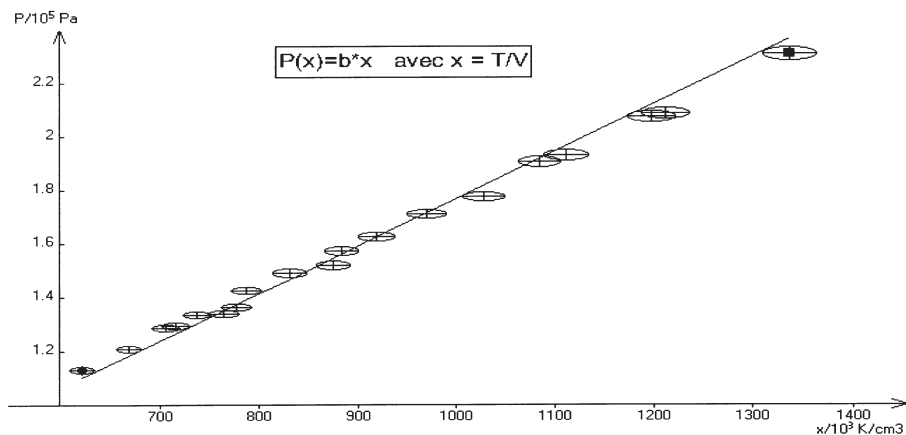
et :

$$P4 = \max(P) \times (\min(V1)) \wedge 1.4 / V1 \wedge 1.4$$

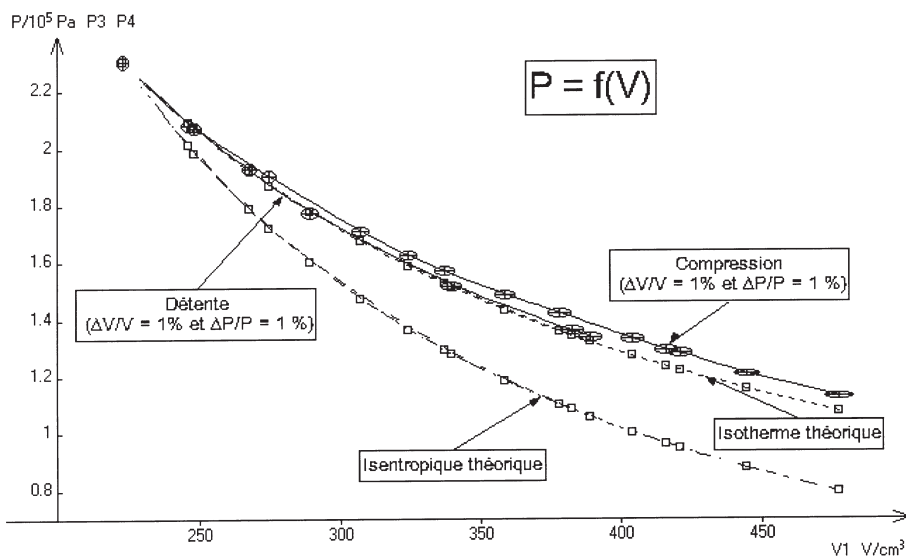
b - Mesures

N°	UV	UT	UP	T	V	P	nR	P1	P2	P3	P4	X
	V	V	mV	K	cm ³	hPa	J/mole	hPa	hPa	hPa	hPa	K/cm ³
1	2,07	2,97	22,6	297	477	1130	0,1815	1130	1130	1078	795,5	0,6226
2	1,92	2,975	24,2	297,5	444,7	1210	0,1809	1212	1247	1156	877,5	0,669
3	1,81	2,976	25,7	297,6	421	1285	0,1818	1280	1346	1221	947,4	0,7068
4	1,786	2,976	25,9	297,6	415,9	1295	0,181	1296	1369	1237	963,9	0,7156
5	1,73	2,976	26,7	297,6	403,8	1335	0,1812	1335	1427	1273	1004	0,737
6	1,61	2,977	28,5	297,7	378	1425	0,1809	1426	1565	1360	1102	0,7876
7	1,52	2,978	29,8	297,8	358,6	1490	0,1794	1503	1685	1434	1186	0,8304
8	1,42	2,978	31,4	297,8	337,1	1570	0,1777	1599	1837	1525	1293	0,8834
9	1,36	2,978	32,5	297,8	324,2	1625	0,1769	1663	1940	1586	1366	0,9186
10	1,28	2,978	34,2	297,8	307	1710	0,1763	1756	2094	1675	1474	0,9701
11	1,13	2,98	38,1	298	274,7	1905	0,1756	1962	2447	1872	1722	1,085
12	0,996	2,981	41,7	298,1	245,9	2085	0,172	2192	2858	2092	2012	1,212
13	0,89	2,982	46,1	298,2	223,1	2305	0,1724	2416	3275	2305	2306	1,337
14	1,007	2,975	41,5	297,5	248,2	2075	0,1731	2171	2820	2072	1985	1,198
15	1,096	2,973	38,6	297,3	267,4	1930	0,1736	2016	2541	1923	1789	1,112
16	1,197	2,972	35,5	297,2	289,1	1775	0,1727	1864	2278	1779	1603	1,028
17	1,43	2,969	30,4	296,9	339,3	1520	0,1737	1589	1821	1516	1282	0,8751
18	1,63	2,969	27,3	296,9	382,3	1365	0,1758	1410	1540	1345	1084	0,7766
19	1,66	2,972	26,8	297,2	388,8	1340	0,1753	1386	1505	1323	1059	0,7645

Tableau 1

c - Courbes

Courbe 2



Courbe 3

d - Résultats

- Modélisation de $P = f(T/V)$:

Écart relatif sur $P(x) = 2\%$; Coefficient corrélation = 1 ; $b = (1,77 \pm 0,02)$ dJ/K

Les zones d'incertitudes correspondent à 1 % pour les trois paramètres P , T et V donc à 2 % pour x . La relation $pV = nRT$ est donc bien vérifiée.

- Le diagramme de Clapeyron permet de vérifier que la compression et la détente correspondent bien à l'isotherme théorique. On peut en enregistrement automatique enregistrer une détente rapide en ouvrant la valve en grand, la courbe correspondante (détente) se rapproche alors de l'isentropique mais que dire alors du temps de réponse des capteurs ? Surtout du capteur de température... On peut le montrer aux élèves en étant critique évidemment mais de là à le publier...

- Moyenne de nR (cf. Tableau de mesures)

nRmoy	nRtype	$\Delta R/R$
J/mole	J/mole	10^{-3}
0,1769	0,003516	19,87

Tableau 2

Regressi donne le coefficient b en dJ... il faut lire décijoules ; on peut donc conclure que l'équation d'état $pV = nRT$ est bien vérifiée.

DEUXIÈME MANIPULATION

Enregistrement manuel des mesures

a - Expressions

$$P = 50 \times UP \quad \text{en hPa}$$

$$T = 100 \times UT \quad \text{en K}$$

$$t = T - 273$$

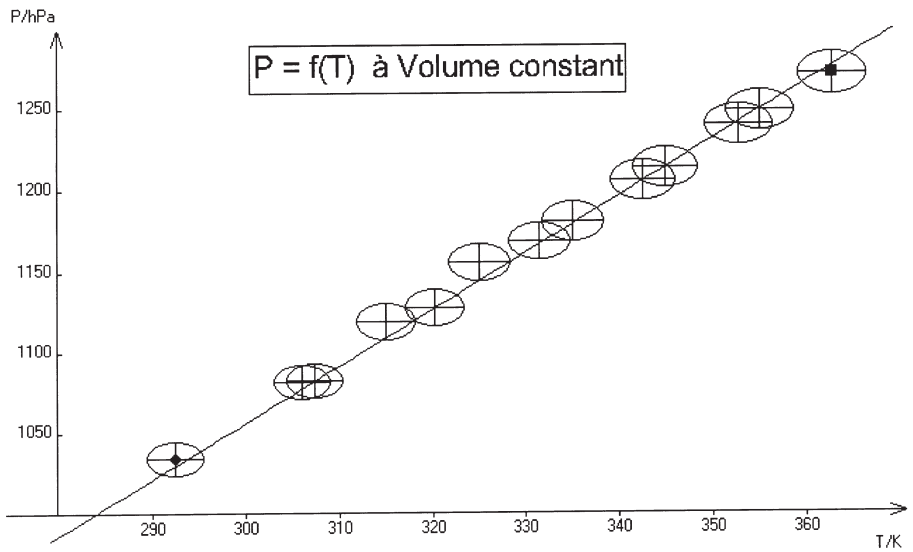
$$Y = P/T$$

b - Mesures

N°	Échauffement							Refroidissement					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
UP (mV)	20,68	21,64	22,55	23,38	24,13	24,81	25,44	24,98	24,29	23,62	23,12	22,38	21,62
UT (V)	2,925	3,073	3,202	3,315	3,426	3,528	3,626	3,55	3,45	3,35	3,25	3,15	3,06
T (K)	292,5	307,3	320,2	331,5	342,6	352,8	362,6	355	345	335	325	315	306
t (°C)	19,5	34,3	47,2	58,5	69,6	79,8	89,6	82	72	62	52	42	33
P (hPa)	1034	1082	1128	1169	1207	1241	1272	1249	1215	1181	1156	1119	1081
Y (hPa/K)	3,535	3,521	3,521	3,526	3,522	3,516	3,508	3,518	3,52	3,525	3,557	3,552	3,533

Tableau 3

c - Courbe



Courbe 4

d - Résultats

• Les mesures obtenues lors du refroidissement sont tout à fait conformes aux mesures correspondant à l'échauffement (cf. tableau 3).

• Modélisation de $P(T) = b \times T$:

Écart relatif sur $P(T) = 0,22 \%$; Coefficient corrélation = 1
 $b = 3,520 \pm 0,008 \text{ } 10^2 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (donné par Regressi)

L'équation d'état est donc là encore très bien vérifiée.

• Calcul de $Y = P/T$ (donné par Regressi) :

• Ymoy	• Ytype	• $\Delta Y/Y$
• hPa/K	10^{-3} hPa/K	• 10^{-3}
• 3,527	• 13,95	• 3,955

Tableau 4

Le résultat est évidemment comparable.

Conclusion

Les deux manipulations donnent donc des résultats très satisfaisants. Elles sont faciles à mettre en œuvre, faciles à automatiser et permettent d'éviter l'utilisation du mercure !

REMERCIEMENTS

Qu'il me soit permis de remercier Bernard CORBUN (sandales PAREGABIA) qui m'a donné les vérins nécessaires et le personnel du laboratoire de physique du lycée René Cassin qui a encore fait preuve de beaucoup de compétence et de patience...