

TP N°13

Pression de vapeur
saturante : tracé et étude
de la courbe de saturation.

PRESSION DE VAPEUR SATURANTE D'UN LIQUIDE

1. PRINCIPE

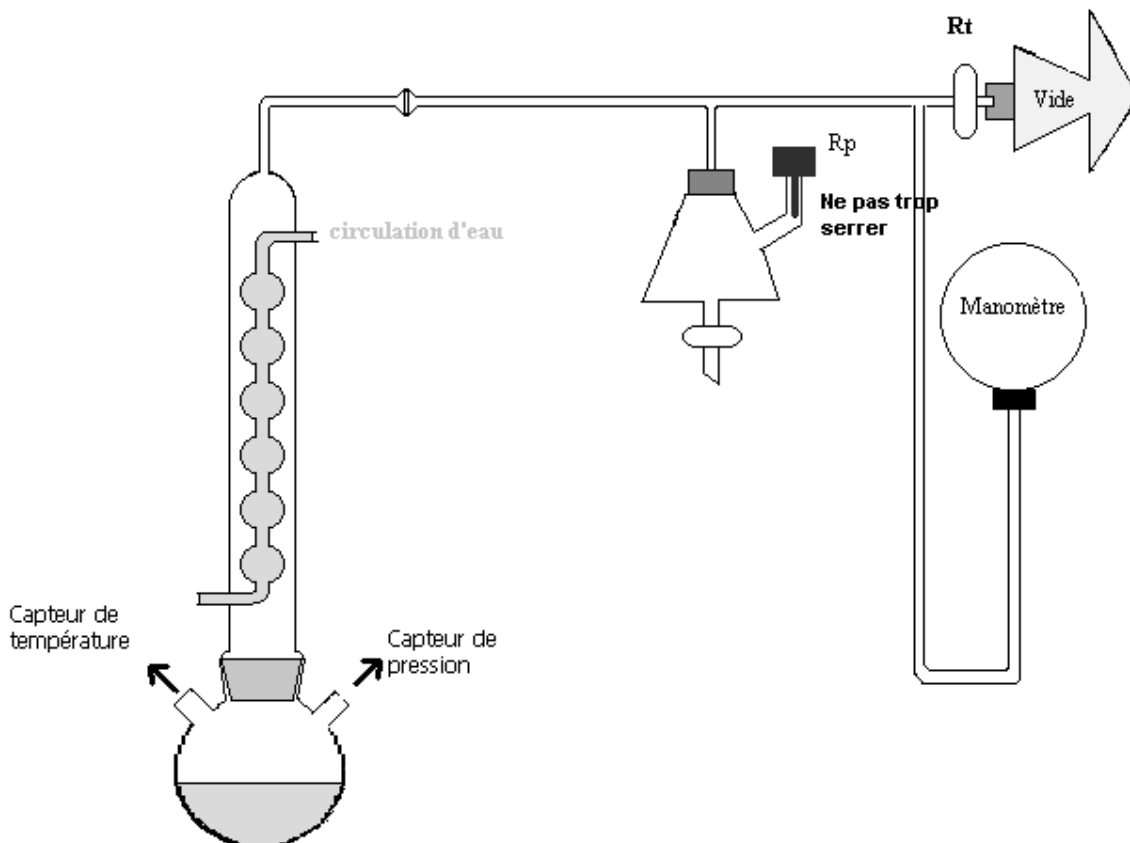
Il s'agit de tracer la courbe de pression de vapeur saturante ou courbe d'ébullition d'un liquide $p = f(\theta)$, où θ désigne la température.

Partant d'une pression aussi faible que possible, on réalisera une série d'équilibres liquide vapeur à des pressions croissantes. Lorsque chaque équilibre sera bien établi, on relèvera le couple de valeurs pression température correspondant.

L'ensemble de ces couples sera acquis par l'intermédiaire de l'interface ORPHY-G.T.I : on programmera une acquisition en XY avec la *température en abscisse et la pression en ordonnées*.

2. MANIPULATION

2.1. Dispositif expérimental

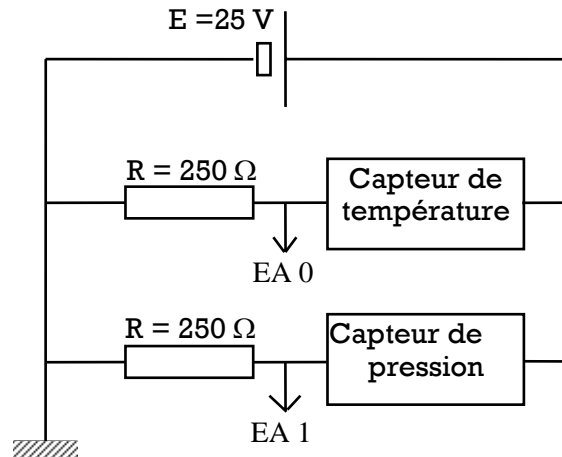


2.2. Préparation

Introduire environ 150 cm³ de liquide dans le tricol en veillant à ce que la sonde de température soit à environ un centimètre au-dessus de la surface libre du liquide. Ajouter quelques grains de ponce sulfurique. Bien replacer le tricol (graisse silicone).

2.3. Montage et étalonnage des capteurs

Schéma de montage électrique des capteurs de température et de pression :



Programmer une acquisition en XY :

Suivant OX (Voie A), on captera la tension image de la température.

Suivant OY (Voie B), on captera la tension image de la pression.

Étalonnage des deux sondes :

☞ Pour la sonde de température :

Il s'agit d'une sonde Pt 100 prévue pour fonctionner entre 0°C et 100°C. On procédera à son étalonnage de façon manuelle :

- 1 V → 0°C
- 5 V → 100°C

☞ Pour la sonde de pression :

Le constructeur annonce qu'elle fonctionne en pression relative entre -1 et 0 bar. Nous pouvons donc considérer qu'elle permettra des mesures entre 0 et 1 bar en pression absolue.

Pour son étalonnage, nous prendrons les deux pressions extrêmes réalisables :

- la pression atmosphérique étant la plus forte ;
- la plus faible étant celle réalisée par le dispositif de pompage.

Réalisation de l'étalonnage :

1- Étalonnage de la pression maximale p_{\max} :

- Lire sur un baromètre la pression atmosphérique du jour : H en mm Hg.
- La pression à l'intérieur du dispositif étant égale à la pression atmosphérique H en mm Hg. Convertir cette valeur en pascals pour obtenir p_{\max} et étalonner le premier point.

Il suffit de donner au logiciel la valeur de p_{\max} en **pascals**.

2- Étalonnage de la pression minimale p_{\min} :

- Vérifier que le robinet Rt (figure 1), reliant le montage à la trompe à eau, est fermé. Mettre alors la trompe à eau en marche en ouvrant le robinet d'eau au maximum.

- Ouvrir doucement le robinet Rt. La pression baisse dans le montage l'indication du vacuomètre doit au moins atteindre 720 mm Hg.
- Fermer alors le robinet Rt. La dénivellation dans le manomètre doit rester constante ; l'inverse indique la présence d'une fuite dans le montage. Chercher à la détecter sans jamais serrer à fond les joints. En cas d'impossibilité, on peut compenser les fuites en réglant l'ouverture du robinet Rt de façon à stabiliser la position de l'aiguille du vacuomètre.
- Lire l'indication du vacuomètre. Par différence, en déduire la pression régnant dans le montage ($\Delta p = p_{atm} - p$) et entrez dans le logiciel le second point d'étalonnage p_{min} , (en **pascals**).

2.4. Mesures et acquisitions

- ☞ Mettre en marche :
 - la circulation d'eau dans le doigt réfrigérant ;
 - la trompe à eau, le robinet Rt étant bien fermé.
- ☞ Ouvrir le robinet Rt de façon à ce que la dépression indiquée par le manomètre soit maximale (≈ 720 mm Hg). Vérifier l'étanchéité du montage comme précédemment.

Si l'eau ne bout pas quand la pression est minimale, il faut la chauffer légèrement. L'ébullition étant atteinte, s'assurer de la stabilité des deux indications affichées à l'écran (pression et température constantes (équilibre du système)). Nous pouvons alors *acquérir ce point de mesure en appuyant sur la barre d'espacement du clavier.*

Augmenter très légèrement la pression dans l'enceinte en faisant pénétrer un peu d'air à l'aide du robinet Rp. Dès que le liquide bout à nouveau et que les deux indications sont stabilisées, faire une nouvelle acquisition.

- ☞ Réaliser ainsi une quinzaine de mesures régulièrement réparties jusqu'à revenir à la pression atmosphérique.

Conseil : Procéder toujours dans le sens des températures croissantes et évaluer l'état d'ébullition de façon identique à chaque fois.

- ☞ En fin de manipulation, fermer le robinet Rt avant d'arrêter la trompe à eau.
- ☞ Quand l'acquisition est terminée, *enregistrer immédiatement les données.*

3. EXPLOITATION DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

3.1. Visualisation du graphe $p = f(\theta)$

- ☞ *Décrire la courbe obtenue. Il s'agit de la courbe d'ébullition du liquide étudié.*

3.2. Vérification de la formule de Rankine

Le but de cette exploitation est de confronter vos résultats expérimentaux avec un modèle empirique qui doit refléter le mieux possible le phénomène étudié.

- ☞ Créer deux nouvelles variables :

$$\begin{aligned} & \square \ln p \\ & \square x = \frac{1}{T} = \frac{1}{(\theta + 273,15)} \end{aligned}$$

- ☞ Visualiser le graphe $\ln p = f(x) = f(1/T)$

- ☞ Donner l'équation de la droite de régression sous la forme : $\ln p = \frac{a}{T} + b$. C'est la formule de Rankine.

- ☞ Commenter le résultat.

3.3. Comparaison des enthalpies

a. Constante de l'équilibre liquide - vapeur

L'équilibre peut s'écrire : $X_{\text{liq}} \Leftrightarrow X_{\text{vap}}$ avec $K = \frac{P}{p_o \cdot a_{H_2O}} = p$ (bar)

- On peut utiliser la relation de Van't Hoff pour exprimer la quantité :

$$\ln K = f\left(\frac{1}{T}\right)$$

La relation de Van't Hoff s'écrit :

$$\frac{d(\ln K)}{dT} = \frac{\Delta H_m}{R \cdot T^2} \quad (\text{ici } K = p \text{ en bar})$$

où :

- K est la constante d'équilibre.
- ΔH_m est l'enthalpie de la vaporisation du liquide rapportée à une mole.

b. Détermination de l'enthalpie par la formule de Rankine

☞ À partir de l'expression ci-dessus et de la formule de Rankine établie au § 3.2., montrer que $\Delta H_m = -a R$.

☞ Calculer cette valeur.

c. Détermination de l'enthalpie à l'aide des mesures "effectives"

☞ Pour chaque pression mesurée, et en utilisant la relation de Van't Hoff, calculer ΔH_m . Vous utiliserez pour cela le logiciel de traitement des données en créant les variables nécessaires.

☞ Peut-on considérer l'enthalpie comme indépendante de la température sur l'intervalle de température étudié ?

☞ Tracer ΔH_m en fonction de la température peut s'avérer utile !

☞ Quoiqu'il en soit, donner la valeur moyenne de ΔH_m et la comparer avec la valeur trouvée précédemment.

☞ Dédurre de la valeur moyenne de $\overline{\Delta H_m}$ la chaleur latente massique moyenne de vaporisation $\Delta h = L_v$.

d. Conclusion

Le modèle empirique de Rankine est-il excellent, approché ou faut-il le rejeter ?

Connaissez vous d'autres modèles expérimentaux ?

3.4. Formule de Clapeyron

☞ Pour chacun des points étudiés, calculer la chaleur de vaporisation L_v à partir de la relation de Clapeyron en assimilant la vapeur à un gaz parfait :

$$L_v = T \cdot (v_v - v_l) \frac{dp}{dT}$$

où :

- v_v est le volume massique de la vapeur ;
- v_l est le volume massique du liquide.

Si l'on fait l'approximation que : $v_v \gg v_l$, la relation de Clapeyron s'écrit alors :

$$L_v = T \cdot v_v \cdot \frac{dp}{dT}$$

Notons de plus que l'équation d'état des gaz parfaits rapportée à l'unité de masse s'écrit :

$$v_v = \frac{RT}{Mp} \quad \text{où } M \text{ est la masse molaire du corps étudié en unité SI.}$$

☞ Compléter le tableau suivant :

θ (°C)	T (K)	p (Pa)	$\frac{dp}{d\theta}$ (Pa.°C ⁻¹)	v_v (m ³ .kg ⁻¹)	L_v (J.kg ⁻¹)

- ☞ Que peut-on conclure des résultats obtenus ?
- ☞ Que devient la formule de Clapeyron lorsqu'on remplace dp/dT par son expression issue du modèle de Rankine ?
- ☞ Ce résultat confirme-t-il la conclusion donnée au paragraphe 3.3.d. ?
- ☞ La Table de la vapeur d'eau donnée en annexe permet d'éviter les approximations. Comparer vos résultats à ceux de la table : pour le volume massique de la vapeur d'une part et pour la chaleur latente de vaporisation d'autre part.
- ☞ La vapeur d'eau peut-elle être raisonnablement assimilée à un gaz parfait ?

TABLES THERMODYNAMIQUES DE LA VAPEUR D'EAU
(La chaleur latente de vaporisation y est notée h_{fg} .)

Vapeur saturée : table de température

Temp. °C	Pression. kPa	Volume massique m ³ /kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie kJ/kg.K		
		Liquide saturée v_f	Vapeur saturée v_g	Liquide Saturé u_f	Vaporisation u_{fg}	Vapeur Saturée. u_g	Liquide Saturé. h_f	Vaporisation h_{fg}	Vapeur Saturée h_g	Liquide Saturé s_f	Vaporisation s_{fg}	Vapeur Saturée s_g
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	.245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2281.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
100	101.35	0.001 044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	120.82	0.001 048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	147.27	0.001 052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	169.06	0.001 056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	198.53	0.001 060	0.8919	501.50	2025.8	2529.3	501.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	232.1	0.001 065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	270.1	0.001 070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	313.0	0.001 075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	361.3	0.001 080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	415.4	0.001 085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	475.8	0.001 091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379