

FONDEMENTS

ENERGETIQUES



DOCUMENT PEDAGOGIQUE

TP Changement de phase d'un corps pur et pression de vapeur saturante

PLATEFORME D'INGENIERIE EXPERIMENTALE
CAMPUS DE ST CYR L'ECOLE – BATIMENT 4

Table des matières

A.	Introduction	2
B.	Présentation du dispositif	2
1.	Manipulations	2
2.	Corps d'étude	2
3.	Système de contrôle.....	3
4.	Métrologie	3
C.	Considérations théoriques.....	3
1.	Chaleur latente.....	3
2.	Pression de vapeur saturante.....	4
3.	Relation de Clapeyron	4
4.	Mise en pratique	6
D.	Résultats	7
E.	Discussion.....	7



Cette séance de travaux pratiques a pour objectif essentiel l'étude d'un changement de phase d'un corps pur, à savoir la vaporisation de l'eau. En pratique, sous l'effet d'un apport de chaleur intense, une masse d'eau contenue dans un réservoir fermé se vaporise, créant une phase gazeuse formée exclusivement d'eau en équilibre avec la phase liquide. Les mesures de la température et de la pression dans la phase gazeuse permettent de proposer une loi comportementale de la pression de vapeur saturante en fonction de la température. Cette loi sera comparée aux lois de la littérature.



Mots-clés : changement de phase, corps pur, chaleur latente

A. Introduction

Le changement de phase est un phénomène mettant en jeu la création ou la destruction de liaisons intermoléculaires extrêmement fortes. De fait, un changement de phase permet notamment le stockage ou le déstockage d'importantes quantités d'énergie. La chaleur latente, grandeur quantifiant le niveau d'énergie mis en jeu au cours du changement de phase, représente donc un paramètre fondamental dans le cadre de l'optimisation des systèmes permettant la transmission et/ou le stockage d'énergie.

Le changement de phase est aujourd'hui -et depuis longtemps déjà- au cœur de la technologie qui nous entoure. A titre d'illustration, on peut citer la vaporisation/liquéfaction des fluides caloporteurs que met en œuvre tout réfrigérateur.

Les travaux ici proposés vous permettent d'appréhender de façon expérimentale le changement de phase d'un corps pur par l'intermédiaire de l'évolution avec la température de la pression de vapeur saturante de l'eau. Le dispositif permet en effet de chauffer un volume d'eau liquide en équilibre avec sa vapeur. La courbe obtenue expérimentalement est ensuite comparée aux lois fournies dans la littérature, puis utilisée afin d'évaluer l'enthalpie de vaporisation -encore appelée chaleur latente- de l'eau en fonction de la température.

Les parties surlignées attirent votre attention sur les moments-clés de la séance.

B. Présentation du dispositif

1. Manipulations

Les capteurs de température et de pression sont tout particulièrement fragiles. Il est donc important de maîtriser vos gestes si vous êtes amenés à manipuler les éléments se trouvant sur la face arrière du dispositif.

2. Corps d'étude

La figure 1 expose les différents organes du dispositif expérimental étudié. L'eau liquide déminéralisée est enfermée à l'intérieur du réservoir. Une résistance chauffante est insérée dans le volume d'eau par le fond du réservoir et permet l'éventuelle vaporisation.

La quantité d'eau initialement introduite (1,7 L) est telle que le niveau est immergé. La purge en air a été réalisée au travers de la vanne de purge, de sorte que le volume laissé à la phase gazeuse contienne quasi-exclusivement de l'eau sous forme vapeur.

Le conduit passant par le niveau n'a pas été thermiquement isolé comme le reste de l'installation, de sorte que la vapeur d'eau, contenue dans la partie haute du volume, s'y condense très partiellement. Sous l'effet de la gravité, l'eau condensée retourne vers le réservoir, créant ainsi un écoulement dans le sens horaire. Cet écoulement permet de

supposer qu'à tout instant, l'équilibre thermodynamique est établi dans le volume d'étude, pour peu que la puissance calorifique apportée par la résistance chauffante soit modérée.

La résistance chauffante est alimentée par le module de contrôle reproduit en figure 2.

3. Système de contrôle

Le module de contrôle (cf Fig.2) est alimenté électriquement par le secteur (220V). L'interrupteur général permet de l'allumer et de l'éteindre. L'intensité électrique fournie à la résistance chauffante peut être réglée par le biais du potentiomètre situé en bas à droite du module. Deux afficheurs localisés au-dessus de ce potentiomètre permettent d'évaluer l'intensité et la tension d'alimentation de la résistance chauffante et d'ainsi accéder à la puissance libérée par effet Joule au sein de cette résistance.

Le signal émis par les deux thermocouples est lu par ce module, qui le convertit en terme de température sur l'afficheur central.

4. Métrologie

Deux capteurs permettent les mesures simultanées de la pression et de la température dans la phase vapeur. Le troisième capteur (thermocouple 2) n'est pas utilisé au cours de cette séance.

Le thermocouple 1 produit une tension dont le signal est une application affine de la température. Cette tension est lue par le système de contrôle, qui réalise la conversion lue sur l'afficheur (cf Fig.2).

C. Considérations théoriques

On rappelle ici des éléments d'analyse théorique liés à l'équilibre d'un corps pur sous deux phases.

1. Chaleur latente

La chaleur latente massique l_{12} d'un corps pur est l'enthalpie massique, notée Δh_{12} , de transition de phase entre l'état du corps intégralement sous la phase 1 et l'état du corps intégralement sous la phase 2. C'est la quantité de chaleur nécessaire pour réaliser de façon réversible, à température et pression constantes, la transition de phase de l'unité de masse du corps, depuis la phase 1 vers la phase 2 :

$$l_{12} = \int_1^2 \delta Q_p \quad (1)$$

D'après le premier principe de la thermodynamique appliqué à cette unité de masse, on montre que :

$$\delta Q_p = dU + pdV = dU + d(pV) = dH \quad (2)$$

d'où :

$$l_{12} = \Delta h_{12} \quad (3)$$

D'après le second principe de la thermodynamique, toujours appliqué à cette unité de masse, on montre également que :

$$\delta Q_p = T dS \quad (4)$$

d'où :

$$l_{12} = T \Delta s_{12} \quad (5)$$

2. Pression de vapeur saturante

Nous considérons ici un système thermodynamique constitué d'un corps pur de masse m , à l'équilibre thermodynamique caractérisé par la température T et la pression p .

Supposons que dans ces conditions, le corps soit susceptible de se trouver en équilibre sous les phases 1 et 2. Par extensivité de la fonction d'état enthalpie libre, l'enthalpie libre totale G du système est la somme des enthalpies libres massiques $g_1(T, p)$ et $g_2(T, p)$ de chacune des phases, pondérées par leur masse respective m_1 et m_2 :

$$G = m_1 g_1(T, p) + m_2 g_2(T, p) \quad (6)$$

soit, en notant $x = m_1/m$ la fraction massique de la phase 1 dans l'ensemble du système et en remarquant que $m_2 = m - m_1$:

$$g(T, p, x) = \frac{G}{m} = x[g_1(T, p) - g_2(T, p)] + g_2 \quad (7)$$

L'équilibre du système nécessite alors en particulier :

$$\frac{dg}{dx} = 0 \quad (8)$$

D'où la relation à l'équilibre :

$$g_1(T, p) = g_2(T, p) \quad (9)$$

Cette dernière égalité implique l'existence de la relation $p(T)$ liant la pression à la température du système au cours du changement de phase. Dans le cas d'une vaporisation, la pression de la phase vapeur en équilibre avec la phase liquide est appelé pression de vapeur saturante et notée $p_s(T)$.

3. Relation de Clapeyron

Considérons à présent l'équilibre des deux phases en des conditions thermodynamiques infiniment voisines $(T + dT, p + dp)$. De la même façon que précédemment, on peut démontrer l'égalité suivante :

$$g_1(T + dT, p + dp) = g_2(T + dT, p + dp) \quad (10)$$

soit par différenciation au premier ordre :

$$g_1(T, p) + dg_1 = g_2(T, p) + dg_2 \quad (11)$$

En soustrayant membre à membre l'équation (9) à l'équation (11), on prouve que :

$$dg_1 = dg_2 \quad (12)$$

On peut alors expliciter cette dernière relation :

$$\left(\frac{\partial g_1}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial g_1}{\partial p}\right)_T dp = \left(\frac{\partial g_2}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial g_2}{\partial p}\right)_T dp \quad (13)$$

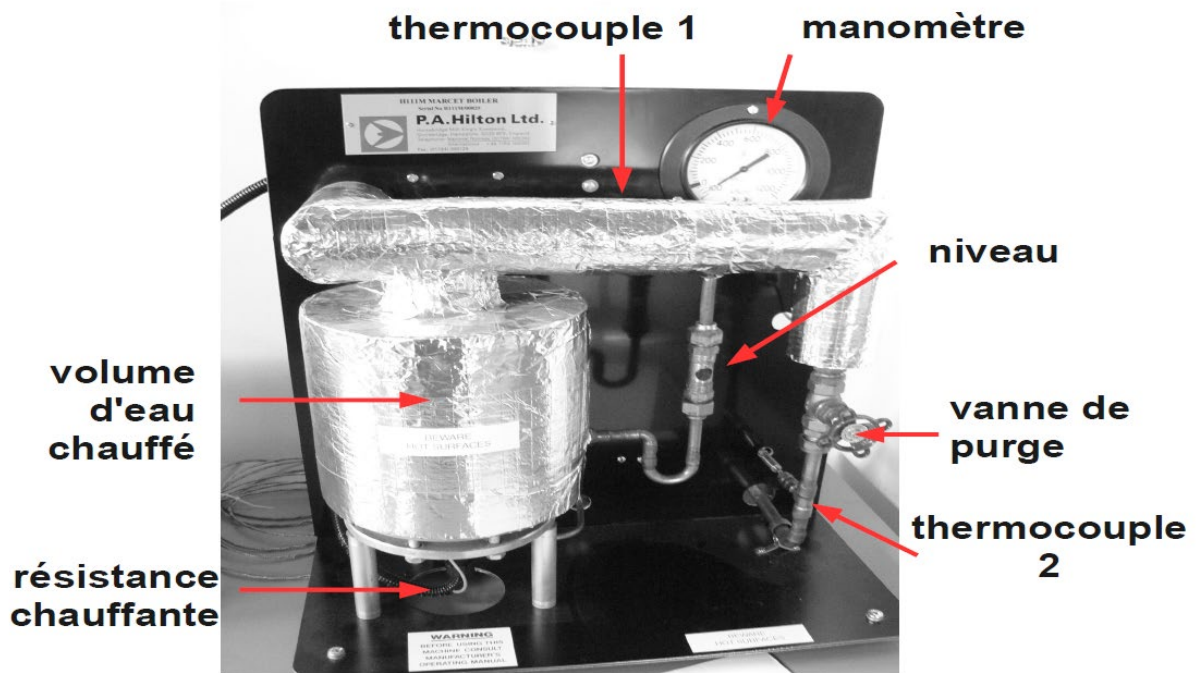


Figure 1 : Dispositif d'étude

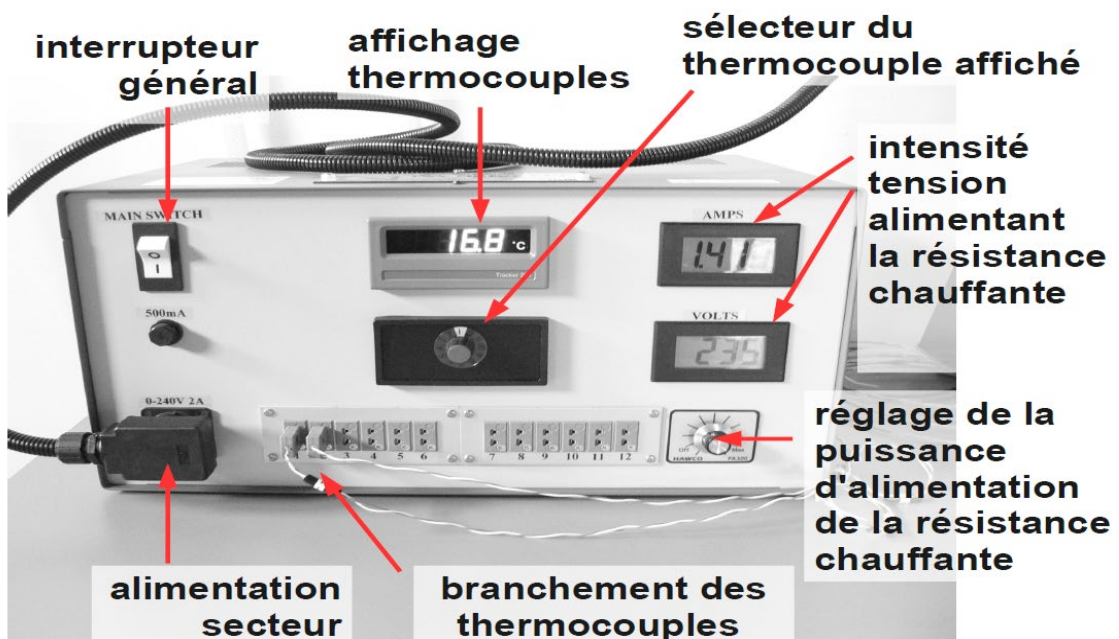


Figure 2 : Module de contrôle

On rappelle ici la formulation de la différentielle totale exacte de l'enthalpie libre massique g issue des premiers et seconds principes de la thermodynamique appliqué à un système fermé :

$$dg = -s dT + v dp \quad (14)$$

où s est l'entropie massique et v le volume massique du système considéré.

Ainsi par identification :

$$\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T = v \quad (15)$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p = -s \quad (16)$$

Ré-injectées dans l'équation (13), ces deux dernières identités permettent d'aboutir à l'expression de la variation de la pression lors du changement de phase en fonction de la température :

$$\frac{dp_{12}}{dT} = \frac{s_2 - s_1}{v_2 - v_1} = \frac{\Delta s_{12}}{v_2 - v_1} \quad (17)$$

En utilisant alors les relations (3) et (5), on aboutit à la relation de Clapeyron, liant l'enthalpie de changement de phase à la pente de la relation $p(T)$:

$$\Delta h_{12} = T(v_2 - v_1) \frac{dp_{12}}{dT} \quad (18)$$

Dans le cas particulier d'une vaporisation, cette dernière relation est notée comme suit

$$\Delta h_v = T(v_v - v_l) \frac{dp_s}{dT} \quad (19)$$

4. Mise en pratique

1. Rappeler l'équation d'état des gaz parfaits en y faisant apparaître le volume massique.
2. Calculer ainsi le volume massique de la vapeur d'eau à pression atmosphérique et à 373 K. Comparer cette valeur au volumique massique, généralement supposé constant, de l'eau liquide.
3. En supposant que l'enthalpie de vaporisation de l'eau est de la forme $\Delta h_v = l_0 - BT$ où B est une constante, montrer que l'intégration de la relation de Clapeyron permet d'écrire la formulation de la pression de vapeur saturante suivante :

$$\log p_s = C_1 - \frac{C_2}{T} - C_3 \log -T \quad (20)$$

D. Résultats

Les résultats demandés seront consignés dans un tableau rendant compte de la température relevée au thermocouple 1 en fonction de la pression lue au manomètre.

Suivez le protocole suivant :

1. Relever la pression initiale et la température initiale.
2. Allumer le module de contrôle.
3. Alimenter la résistance chauffante à moitié de la pleine échelle.
4. Relever la température pour chaque pression par pas de 25 kN.m⁻² jusqu'à une pression de 4 bar.
5. Eteindre l'alimentation de la résistance chauffante.
6. Vérifier que pression et température commencent à diminuer avant d'éteindre le module de contrôle.

E. Discussion

La littérature fournit en particulier deux lois rendant compte de l'évolution de la pression de vapeur saturante en fonction de la température.

Formule de Dupré-Bertrand :

$$\log\left(\frac{p_s}{p_0}\right) = 17,443 - \frac{2795}{T} - 3,868 \log T \quad (21)$$

où p_0 est la pression atmosphérique. Cette formule est valide pour des températures comprises entre 273 K et 473 K.

Formule de Duperray :

$$p_s = p_0(T - 273,15)^4 \quad (22)$$

Superposez les évolutions $p_s(T)$ obtenues par ces 2 formules à votre courbe obtenue expérimentalement. Commentez.

SORBONNE UNIVERSITE

Faculté des Sciences et Ingénierie
Plateforme d'Ingénierie Expérimentale
Campus de Saint-Cyr-l'Ecole
2 Place de la Gare de Ceinture
78210 SAINT CYR L'ECOLE



Campus de St Cyr - Sorbonne Université

REJOINDRE LA PLATEFORME

Accès en **train**, arrêt Saint Cyr :

Depuis Montparnasse, ligne N

Depuis La Défense, ligne U

Depuis Saint Michel ND, RER C

Prévoir ensuite 10 mn de **marche**

Accès en **voiture** :

Coordonnées GPS

N 48.80217°

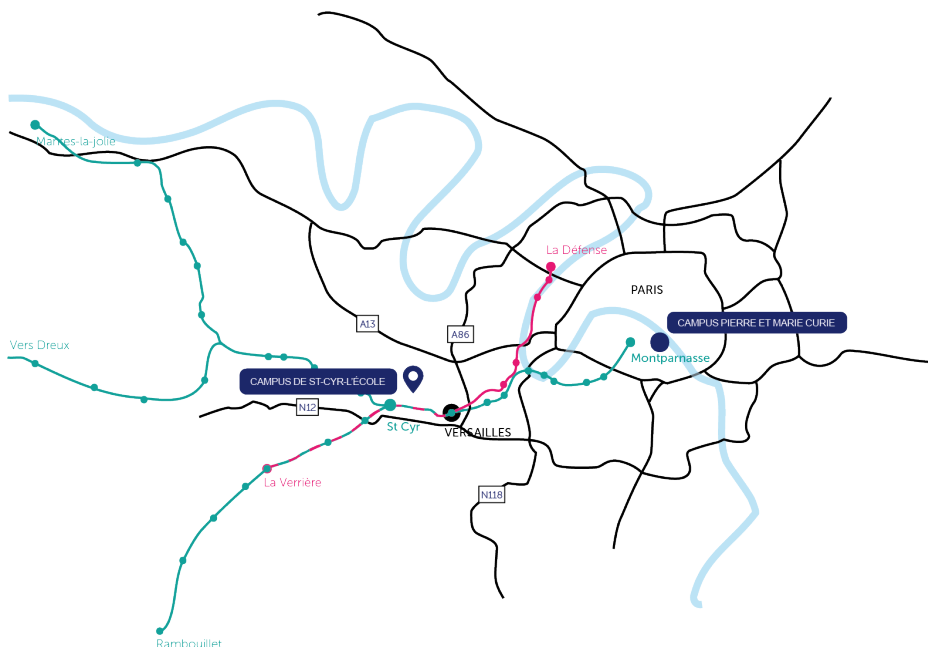
E 2.07639

Accueil campus

01.44.27.95.64

Informations et réservations TP

01.44.27.95.22



→ www.sorbonne-plateforme-ingenierie-experimentale.fr