



1. Introduction

L'objectif de ce TP est d'étudier le comportement réel d'un fluide (SF6) lors d'une compression isotherme. Il s'agit de :

- Mettre en évidence le phénomène de transition de phase (liquéfaction).
- Tracer les isothermes d'Andrews dans le diagramme de Clapeyron (P,V).
- Identifier les domaines d'existence des phases (gaz, liquide, équilibre liquide-vapeur).
- Observer l'influence de la température sur l'étendue du palier de liquéfaction.

2. Protocole

2.1. Matériel

- manomètre
- Enceinte transparente contenant du SF6 et du mercure donc le volume de ce dernier est réglable
- Enceinte contenant la première remplie d'eau
- Régulateur de température de l'eau

2.2. Description du montage expérimental

Le dispositif utilise une cellule contenant une masse fixe de SF6. Le tube est plongé dans un bain thermostaté (eau) pour maintenir une température T constante.

Un volant permet d'élever une colonne de mercure qui agit comme un piston, réduisant ainsi le volume V du gaz. On relève la pression P via un manomètre pour chaque volume V imposé (graduations sur le tube).

On attend 2 à 3 minutes après chaque changement de volume pour que l'équilibre thermique soit atteint.

2.3. Mesures à effectuer

On effectue 2 séries de mesure, l'une avec $T=25^{\circ}\text{C}$ et l'autre avec $T=35^{\circ}\text{C}$. Dans les 2 cas, le protocole est le même :

1. Placer le volume à 4 cm^3
2. Attendre 2min.
3. Relever la pression, ainsi que l'état du fluide.
4. Par pas de 0.5 cm^3 , refaire les étapes 2 et 3 jusqu'à atteindre une pression de 50 bar.
5. Refaire les mesures pour un volume inférieur de 0.25 au volume de changement d'état du fluide, cette fois par pas de 0.1 jusqu'à observer le changement d'état.
6. Replacer le volume à 4 cm^3 .

3. Mesures

3.1. Données

Volume V (cm ³)	Série 1 : 25°C		Série 2 : 30°C	
	P (10 ⁵ Pa)	Liq ?	P (10 ⁵ Pa)	Liq ?
4,00	14,0	Non	14,0	Non
3,75	14,0	Non	14,5	Non
3,50	15,5	Non	15,5	Non
3,25	16,0	Non	–	–
3,00	17,0	Non	18,0	Non
2,75	18,0	Non	–	–
2,50	19,5	Non	20,0	Non
2,25	21,0	Non	22,0	Non
2,00	22,5	Non	23,5	Non
1,95	23,0	Non	–	–
1,90	23,0	Non	–	–
1,85	23,5	Oui	–	–
1,80	23,5	Oui	–	–
1,75	23,5	Oui	25,5	Non
1,70	–	–	25,5	Non
1,60	–	–	26,0	Non
1,55	–	–	26,0	Oui
1,50	23,5	Oui	26,5	Oui
1,25	24,0	Oui	–	–
1,00	24,0	Oui	27,0	Oui
0,75	24,5	Oui	–	–
0,50	25,0	Oui	28,0	Oui
0,35	48,0	Oui	48,0	Oui

TABLEAU 1 – Évolution de la pression en fonction du volume pour une température fixée à 25° C et 30° C.

3.2. Incertitudes

L'évaluation des incertitudes de mesure sur la pression P et le volume V est réalisée en considérant que l'erreur de lecture est liée à la graduation minimale des instruments.

Le tube gradué présente une division tous les 0,05 cm³. En considérant une erreur de lecture égale à une demi-graduation, l'incertitude-type $u(V)$ est donnée par :

$$u(V) = \frac{0,05}{\sqrt{3}} \approx 0,03 \text{ cm}^3 \quad (1)$$

Le manomètre est gradué tous les 1 bar (soit 1×10^5 Pa). De la même manière, l'incertitude-type $u(P)$ liée à la lecture est :

$$u(P) = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,6 \text{ bar} \quad (2)$$

Bien que les incertitudes de lecture soient prédominantes, d'autres facteurs peuvent influencer la précision des résultats :

- Un temps d'attente insuffisant après la compression peut entraîner une surestimation de la pression (échauffement adiabatique).
- Une fluctuation de la température du bain marie impacte la pression de vapeur saturante.

4. Graphiques

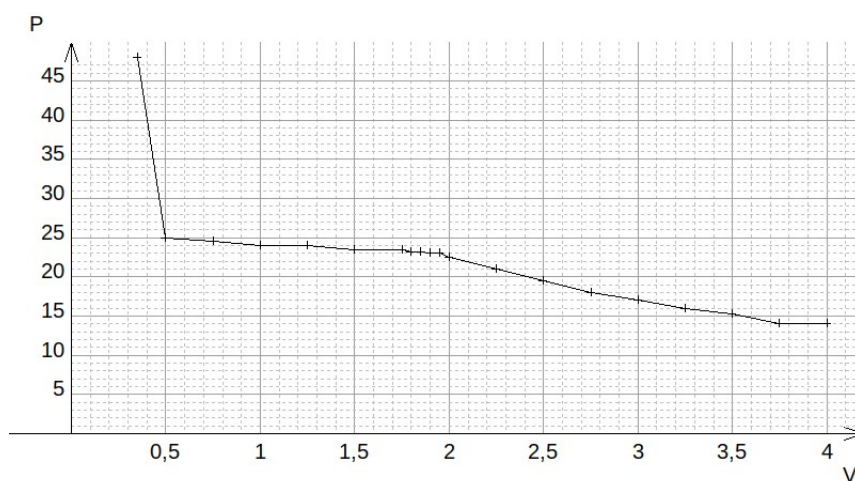


FIGURE 1 – Évolution de la pression en fonction du volume pour une température xée à 25°C .

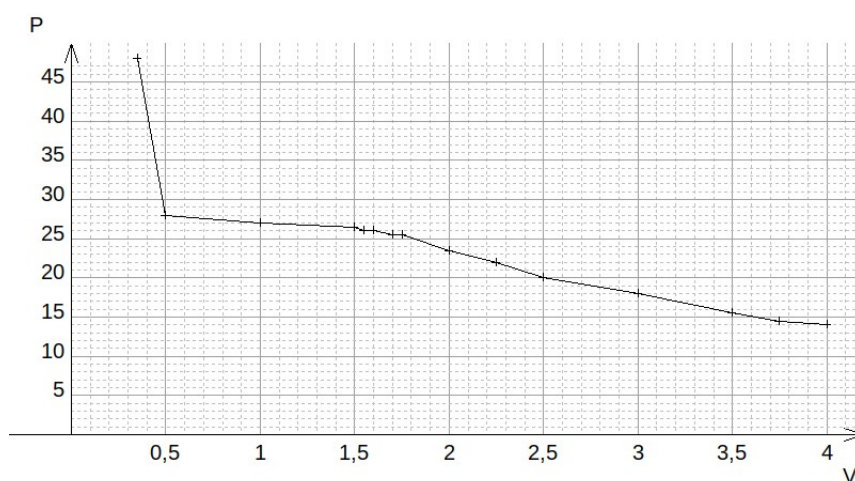
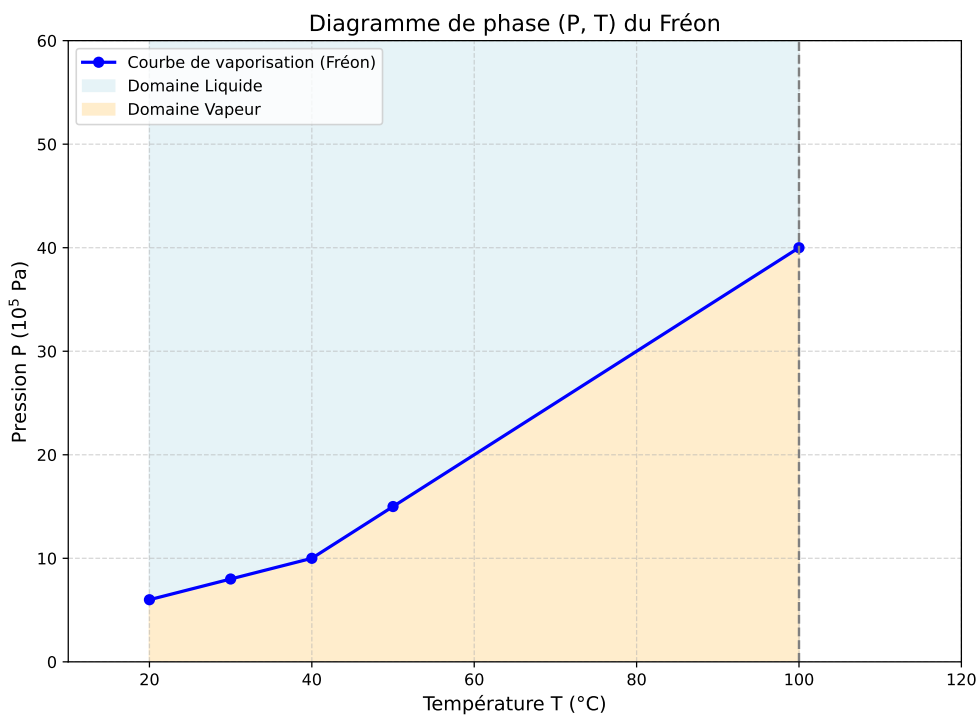
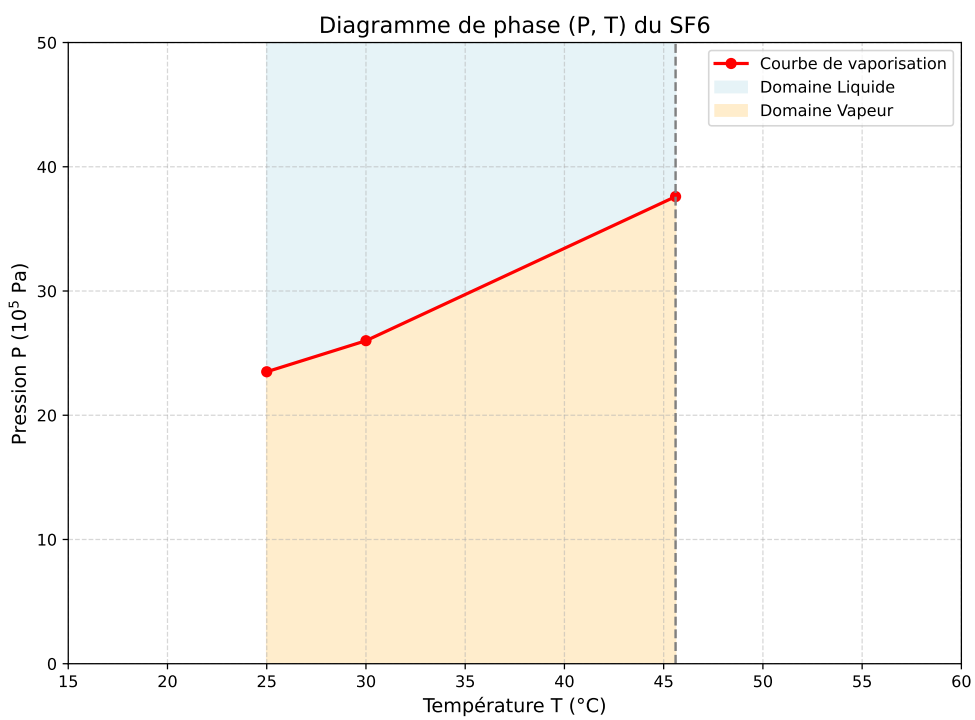


FIGURE 2 – Évolution de la pression en fonction du volume pour une température xée à 30°C .



V (cm ³)	P (10 ⁵ Pa)	PV (Unité arbitraire)
4,00	14,0	56,0
3,00	17,0	51,0
2,00	22,5	45,0
1,90	23,0	43,7

5. Exploitation des résultats

5.1. Étude de l'isotherme

On observe 3 parties distinctes sur le graphique : une augmentation progressive de la pression, un plateau et une augmentation brutale de la pression. Ces trois zones sont à mettre en relation avec l'état du fluide observé. Lors de l'augmentation progressive, ce dernier est à l'état gazeux, puis à partir de l'état saturant et durant tout le plateau, il est en transition de phase. Enfin, quand il ne reste plus du fluide à l'état liquide, la pression augmente brutalement.

L'évolution de la pression durant l'intervalle de changement de phase est la somme de deux phénomènes. Nous diminuons le volume, donc la pression augmente. Cela provoque la condensation du fluide, qui prend alors moins de place. La pression diminue donc. Il y a donc un équilibre entre le volume et le titre en vapeur qui permet de maintenir la pression constante.

Concernant la première phase où le fluide est gaz, on peut tenter de la modéliser comme si il se comportait comme un gaz parfait. On a alors

$$PV = nRT = Cst \quad (3)$$

On peut vérifier la relation avec quelques valeurs obtenues :

Pour vérifier si l'écart à la loi des gaz parfaits est significatif, on calcule l'incertitude relative sur le produit PV :

$$\frac{u(PV)}{PV} = \sqrt{\left(\frac{u(P)}{P}\right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2} \quad (4)$$

Pour le point à 4,00 cm³ ($P = 14,0$ bar) :

$$- \frac{u(P)}{P} = \frac{0,29}{14} \approx 2,1\%$$

$$- \frac{u(V)}{V} = \frac{0,014}{4} \approx 0,35\%$$

On obtient une incertitude élargie $U(PV) = 2 \times u(PV) \approx 2,4$.

La chute de la valeur de PV (de 56,0 à 43,7, soit un écart de 12,3) est très largement supérieure à l'incertitude de mesure (2,4). On en conclut que le SF_6 s'écarte de manière indiscutable du modèle du gaz parfait dans ces conditions de pression.

La pression réelle est plus faible que celle prédite par la loi des gaz parfaits ; ce n'est donc pas un gaz parfait.

5.2. Effet de l'augmentation de la température

La comparaison des deux séries de mesures permet de mettre en évidence l'influence de la température sur l'équilibre liquide-vapeur.

À 25°C, le palier de liquéfaction (transition de phase) se situe environ à $23,5 \times 10^5$ Pa.

À 30°C, ce palier remonte à environ $26,0 \times 10^5$ Pa. La pression de saturation est donc une fonction croissante de la température.

Le début de la condensation se produit à un volume plus faible lorsque la température augmente (passage de 1,90 cm³ à 1,60 cm³ environ). Le gaz doit être davantage comprimé pour amorcer la transition à haute température.

De plus, On observe que l'étendue du volume sur lequel on observe un état diphasique diminue avec l'augmentation de la température.

La donnée à $T_c = 45,6^\circ\text{C}$ indique l'existence d'une température critique. À cette température précise, le palier de transition de phase disparaît totalement. De plus, la distinction physique entre la phase liquide et la phase vapeur s'estompe : les masses volumiques des deux phases deviennent identiques.

5.3. Représentation dans un diagramme

On a représenté les points de transition de phase des 2 séries de mesures.

Pour le fréon, avec le diagramme de Mollier, on trouve les couples (p,T), pour la transition de phase vapeur/liquide : (6,20), (8,30), (10,40), (15,50) et (40,100) environ pour le point critique. On le représente de la même façon.

On remarque que pour une température ambiante de 30°C , la pression de vapeur saturante du SF_6 ($26 \times 10^5 \text{ Pa}$) est plus de trois fois supérieure à celle du Fréon ($8 \times 10^5 \text{ Pa}$). Le SF_6 est donc un fluide beaucoup plus volatil.

La température critique du Fréon (100°C) est nettement supérieure à celle du SF_6 ($45,6^{\circ}\text{C}$). En conséquence, le Fréon permet des cycles de changement de phase sur une plage thermique plus large, ce qui peut justifier son utilisation comme fluide frigorigène dans le TP IV.

6. Conclusion

Ce TP a permis de caractériser expérimentalement le comportement réel du SF_6 à travers l'étude des isothermes d'Andrews dans le diagramme de Clapeyron. L'observation du palier de pression constante lors de la compression a mis en évidence l'équilibre liquide-vapeur et a permis de vérifier que la pression de vapeur saturante est une fonction croissante de la température.

Par ailleurs, l'étude du produit PV a démontré que le modèle du gaz parfait est insuffisant pour décrire le fluide à haute pression, les interactions intermoléculaires devenant prédominantes à l'approche de la liquéfaction. Enfin, nous avons constaté que l'augmentation de la température réduit l'étendue du domaine diphasique, illustrant la convergence des phases liquide et vapeur vers le point critique.