

Effets thermiques

L'objectif de ce TP est de regarder précisément quelques effets de la température. La première partie sera consacrée à l'étude de pertes thermiques à travers deux matériaux différents et permettra, au passage, de déterminer l'effet de dilatation du cuivre. La 2^e partie sera consacrée aux changements d'état que subit un corps pur suivant les changements de température et de pression.

.....

I) Pertes thermiques

1°) Présentation

i. Description du montage

Ce montage représente à échelle réduite les phénomènes qui ont lieu lorsque de l'eau chaude circule à travers les tuyaux de cuivre qui parcourent nos habitations.

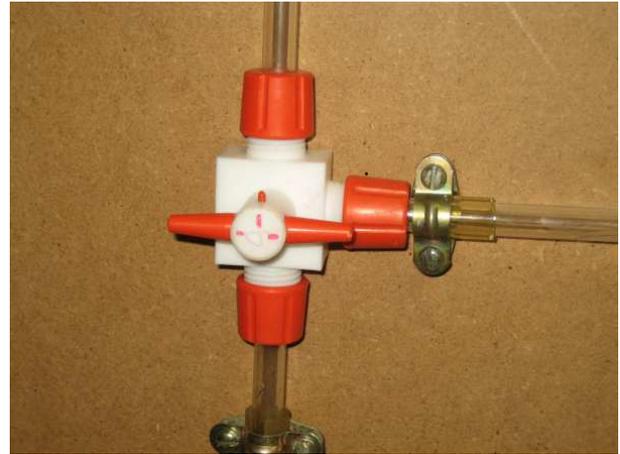
Vous disposez d'un tuyau de cuivre d'une longueur $\ell = 2,0$ m relié à des tuyaux en plastiques, le tout formant un circuit hydraulique entraîné par une pompe thermostatée.

Dans le tuyau qui est devant vous, lorsque vous le regardez de manière usuelle, l'eau arrive par la gauche et ressort par la droite.



Avant de commencer les manipulations regardez le montage et identifiez les différents éléments qui seront importants plus tard :

- le bain thermostaté (qui **doit** toujours être en marche) ainsi que le bouton de réglage de température (le **seul** que vous manipulerez sur cette machine) ;
- la vanne 3 voies située à l'arrivée de l'eau qui permet d'envoyer l'eau thermostatée soit dans le tuyau de cuivre soit dans le tuyau de plastique ;
- les 3 thermomètres permettant de repérer la température au début de la canalisation, à la fin de la canalisation et au sein du bain thermostaté ;
- les 2 palpeurs situés de chaque côté du tuyau de cuivre permettant de mesurer précisément ses variations de longueurs (un tour de cadran représente une variation de longueur de 1,00 mm ;
- le chronomètre permettant... de mesurer le temps qui passe (si vous n'avez pas de chronomètre, servez-vous de celui qu'il y a sur votre portable ou sur votre montre ou sur votre iPod).



Dans les manipulations qui suivent, vous allez :

- déterminer la capacité thermique de l'ensemble du circuit hydraulique ;
- évaluer la puissance thermique perdue dans le circuit de tuyau plastique ;
- évaluer la puissance thermique perdue dans le circuit de tuyau de cuivre ;
- évaluer le coefficient de dilatation isobare du cuivre.

ii. Modélisation et résultats théoriques

- Justifiez très succinctement que l'ensemble des échanges thermiques δQ durant dt entre le réseau hydraulique de température T et le milieu ambiant de température T_0 s'écrit en première approximation :

$$\delta Q = \pm h (T_0 - T) dt$$

h est un coefficient phénoménologique lié au matériau utilisé, à la vitesse de circulation de l'air autour du solide et à la surface du solide.

¿ ? Quelle est la dimension de h ? Comment choisir le signe ?

- En prenant comme système l'ensemble du réseau hydraulique, montrez que la température de l'eau obéit à l'équation différentielle suivante :

$$C \frac{dT(t)}{dt} = \mathcal{P}_{th} + h (T_0 - T(t)) \quad \rightsquigarrow \quad \frac{dT(t)}{dt} + \frac{h}{C} T(t) = \frac{h}{C} T_0 + \frac{\mathcal{P}_{th}}{C} \quad \text{où :}$$

- $T(t)$ est la température du bain ;
- C est la capacité thermique totale ;
- \mathcal{P}_{th} est la puissance thermique apportée par le bain thermostaté ;
- T_0 est la température de l'air ambiant.

- Montrez que, dans ces conditions, la température suit la loi

$$T(t) = T_0 + \frac{\mathcal{P}_{th}}{h} + T_1 e^{-t/\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{C}{h} \quad T_1 \text{ qui dépend des conditions initiales}$$

Dans la suite, vous modifierez \mathcal{P}_{th} en mettant en route ou non le bain thermostaté et h en changeant la voie de circulation de l'eau (h sera noté h_0 dans le cas du plastique et H_{Cu} dans le cas du cuivre).

2°) Approche expérimentale

i. Première descente en température

Normalement la température du bain thermostaté devrait être de l'ordre de 60 °C (ou plus, la valeur exacte n'étant pas importante) et le bain thermostaté devrait avoir une température de commande minimale.

Conditions expérimentales :

- le bain thermostaté ne fonctionne qu'en mode de circulation d'eau $\mathcal{P}_{th} = 0$ (voyant jaune éteint) ;
- le circuit d'eau passe par les tuyaux en plastique ($h = h_0$).

Le but va être d'évaluer le rapport $\tau = \frac{C}{h_0}$.

- Suivez l'évolution de la température du bain pendant plusieurs minutes (une petite dizaine) à raison d'environ une ou deux mesures par par minutes.

¿ ? Compte-tenu de la forme attendue de l'évolution en température, vaut-il mieux prendre plus de mesures plutôt au début ou plutôt à la fin de l'expérience ?

En réécrivant la fonction température, il est possible de faire apparaître une relation linéaire :

$$T(t) - T_0 = T_1 e^{-t/\tau} \quad \rightsquigarrow \quad \ln(T - T_0) = \ln T_1 - \frac{t}{\tau} \quad \rightsquigarrow \quad y = \ln T_1 - \frac{x}{\tau}$$

- Mesurez T_0 avec un des thermomètres non utilisés.
- Faites une régression linéaire (comme en cinétique chimique) $y = \ln(T - T_0)$ en fonction de $x = t$ et déduisez-en $\frac{1}{\tau}$ (attention aux unités).

ii. Montée en température

Dans cette partie, vous allez évaluer le rapport $\frac{P_{th}}{h}$ pour pouvoir en déduire C .

Conditions expérimentales :

- le bain thermostaté fonctionnera en mode de chauffe $\mathcal{P}_{th} = 1,0$ kW ;
- le circuit d'eau passe par les tuyaux en plastique ($h = h_0$).
- Mettez en route le bain thermostaté (commande de température sur 80 °C) et suivez l'évolution pendant quelques minutes.



Ne pas prolonger outre mesure le chauffage, en particulier ne pas dépasser une température mesurée de 70 °C afin de garantir un apport thermique constant.

En réécrivant la fonction température, il est possible de faire apparaître une relation linéaire entre $y = T$ et $x = e^{-t/\tau}$

$$T(t) = T_0 + \frac{\mathcal{P}_{th}}{h_0} + T_1 e^{-t/\tau} \quad \rightsquigarrow \quad y = T_0 + \frac{\mathcal{P}_{th}}{h_0} + T_1 x$$

Rappelons que τ a été déterminé à la question précédente.

- À l'aide d'une régression linéaire, déduisez-en $T_0 + \frac{\mathcal{P}_{th}}{h_0}$.
- Déduisez-en h_0 puis C .

iii. Deuxième descente de température

Dans cette partie, vous allez évaluer H_{Cu} représentant les pertes thermiques à travers les tuyaux de cuivre.

Conditions expérimentales :

- le bain thermostaté ne fonctionne qu'en mode de circulation d'eau $\mathcal{P}_{\text{th}} = 0$;
- le circuit d'eau passe par le tuyau en cuivre ($h = H_{\text{Cu}}$).
- Changez la voie de circulation d'eau et attendez que l'eau recouvre une température à peu près uniforme (i.e. partout la même). Ce n'est pas grave si la température n'est pas constante.
- Arrêtez le chauffage du bain thermostaté (commande de température au minimum) et suivez non seulement la température mais aussi les indications sur les palpeurs sur les côtés (une certaine organisation et synchronisation du groupe de travail est plus qu'utile ici).
- Recopiez et remplissez le tableau suivant avec autant de colonnes que nécessaire.

t								
T								
δl_1								
δl_2								

- À l'aide d'une méthode similaire à celle utilisée lors de la première descente de température, déduire la nouvelle constante de temps $\tau' = \frac{C}{H_{\text{Cu}}}$.
- Déduire H_{Cu} .
- En admettant que le tuyau de cuivre augmente de volume essentiellement dans sa longueur, nous pouvons écrire celle-ci sous la forme :

$$\chi_T = \frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_P = \frac{1}{\ell} \left. \frac{\partial \ell}{\partial T} \right|_P = \text{C}^{\text{te}} \quad \rightsquigarrow \quad \ell(T) = \ell_0 + \chi_T \ell_0 (T - T_0)$$

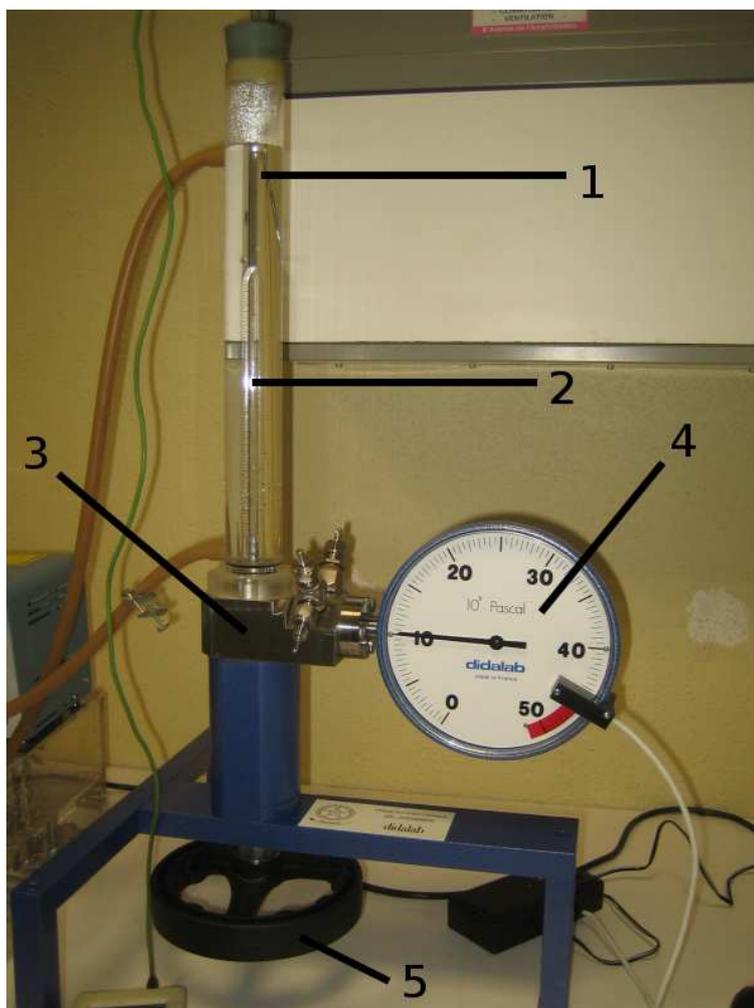
- À l'aide des mesures précédentes, calculer le coefficient de dilatation isobare du cuivre χ_T à la pression atmosphérique.
 - Comparez avec la valeur tabulée : $\chi_T = 16,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.
- ¿ ? Pourquoi la valeur de χ_T est-elle parfois écrite $\chi_T = 1,64 \text{ mm/m/100K}$?

II) Changement d'état liquide – vapeur

1°) Description du matériel

i. le SF₆

L'appareil contient du SF₆ dans une éprouvette de verre épais (2). Il est possible de faire varier le volume disponible au SF₆ en tournant en volant (5) qui introduira plus ou moins de mercure dans l'éprouvette. La pression est indiquée par le manomètre (4) et le volume se lit directement sur l'éprouvette. L'hexafluorure de soufre est thermostaté grâce à la circulation d'eau dans la cuve transparente (1).



Légende :

- (1) cuve transparente ;
- (2) éprouvette en verre épais, graduée de 0 à 4 mL ;
- (3) chambre de pression, contenant du mercure dont le fond est fermé par une membrane étanche ;
- (4) manomètre donnant la pression en bar ;
- (5) volant permettant de faire varier le volume disponible au SF_6 .

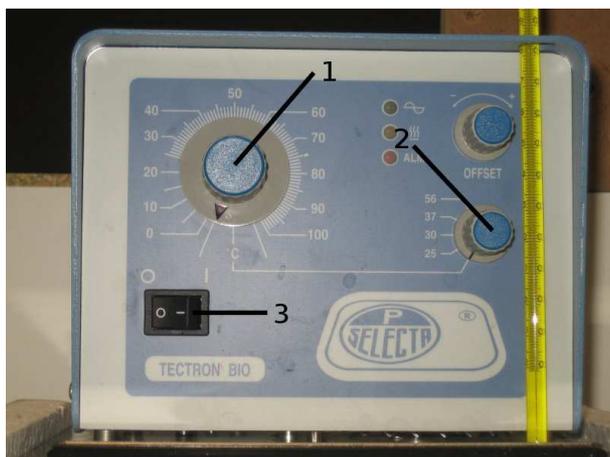
L'hexafluorure de soufre a été choisi en raison des valeurs facilement accessibles des paramètres critiques :

$$T_C = 45,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad P_C = 38 \text{ bar}$$

Les courbes expérimentales donnant la pression de vapeur saturante du SF_6 et le diagramme de CLAPEYRON sont données à la fin du sujet.

ii. Fonctionnement du bain thermostaté

Avant de mettre en marche le bain thermostaté avec le bouton (3), assurez-vous que le bouton de choix de thermostat (2) est positionné sur le trait qui renvoie au bouton (1) de choix manuel de température et que celui-ci est mis sur une température inférieure à celle de la salle de sorte qu'il ne chauffe pas.



→ Mettez le bain thermostaté en route, le niveau d'eau doit monter à un ou deux centimètres par seconde¹.

Si l'eau monte trop vite, étranglez le tuyau d'arrivée avec en tournant la vis prévue à cet effet (photo ci-dessus).

Lorsque le bain thermostaté est en mode de chauffe, un petit voyant jaune s'allume dans le coin supérieur droit de la façade. Le chauffage se fait alors par une résistance délivrant de manière constante une puissance d'environ 1 kW. Une fois la température de commande atteinte, le chauffage s'éteint et se rallume périodiquement de manière à compenser les pertes thermiques.

iii. Lecture des paramètres d'état du fluide

Le volume se lit directement à l'aide des graduations sur l'éprouvette. Faites bien attention de ne pas commettre d'erreur de paralaxe.

¿ ? Étant donné que la surface libre du mercure n'est pas plane, où faut-il lire le volume ?

La pression se lit sur le manomètre.



Ne pas dépasser 50 bar !

En cas de dépassement, un signal sonore est émis, il faut alors **impérativement** diminuer la pression en tournant le volant de manière à éviter tout risque d'explosion (et donc de projection de mercure).

La température se lit sur le thermomètre plongé dans le bain thermostatique.

¿ ? Dans quelles conditions est-il possible d'admettre que la température de l'eau dans le bain thermostaté est la même que celle de l'hexafluorure de soufre ?



Ne jamais faire varier pression, volume ou température si l'éprouvette n'est pas entièrement entourée d'eau.

iv. Première manipulation (env. 5 min)

Normalement la température du bain est modérée (près ou moins de 20 °C) et le volume disponible est de 4 mL. Dans ces conditions, le SF₆ est gazeux. Comme il est transparent et incolore, normalement vous ne devriez rien voir.

→ Diminuez le volume accessible de manière à augmenter la pression jusqu'à 40 bar.

1. Admirez au passage les conséquences optiques de la présence d'eau dans la cuve transparente, notamment au niveau de la façon dont est vue l'éprouvette graduée.

¿ ? Qu'observez-vous ? Expliquez succinctement

→ Repositionnez le volume à 4 mL.

2°) Mesures

i. Relevé de la pression de vapeur saturante (env 30 min)

Le but est de retrouver expérimentalement la courbe $P_s(T)$ donnée en fin de sujet. L'état initial du SF_6 doit être une température d'environ maximum 20 à 23 °C et le volume de 4 mL

- Diminuez le volume de manière à obtenir un équilibre liquide – vapeur.
- Notez la pression correspondante.
- Augmentez progressivement la température du bain thermostaté en manipulant le bouton de contrôle (1).
- Lorsque la température est stabilisée, notez la pression associée.
- Recopiez et remplissez le tableau ci-dessous avec autant de colonne que nécessaire.

T								
P								

- Continuez à augmenter la température de 2 à 3 °C à chaque fois jusqu'à environ 43 °C.
- ¿ ? Pourquoi ne pas aller plus haut en température sachant que le bain thermostaté peut monter jusqu'à près de 100 °C ?
- Comparez vos résultats à la courbe donnée en fin de sujet en traçant vos points expérimentaux dessus.
- ¿ ? Quelles sont les principales causes d'erreur ou d'incertitude sur cette manipulation ?

ii. Autour d'une isotherme

Le but de cette manipulation est de tracer et d'exploiter une isotherme.

Refroidissement de la cuve

La cuve est à près de 45 °C et cela prendrait trop de temps d'attendre que l'eau se refroidisse naturellement. Pour cela vous allez faire quelques manipulations hydrauliques. L'expérience montre alors qu'inévitablement de l'eau se répand sur la paillasse, en plus ou moins grande quantité suivant l'habileté des manipulateurs. C'est pourquoi, avant de commencer à manipuler :

- éloignez tout objet craintif de l'eau (feuille écrite à l'encre, calculatrice, morceau de sodium et autres Pod...);
- trouvez un torchon pour essuyer (si, si, il servira);
- réfléchissez avant de manipuler.

Après, dites-vous bien qu'au pire c'est de l'eau.

- Arrêtez la pompe.
- Siphonnez partiellement la cuve du bain thermostaté en débranchant le tuyau envoyant l'eau dans le dispositif. Recueillez l'eau siphonné dans le gros bidon rouge (ou le seau vert, suivant disponibilité).
- Refaites le niveau d'eau à l'aide d'un seau rempli au robinet.
- Rebranchez le tout et mettez en marche la pompe avec une température de commande de 25 °C.

Vous aurez deux fois à refroidir la cuve. La première fois, vous pourrez demander l'aide soit des techniciens soit du professeur. Observez-les bien car la deuxième fois, ça sera tout seul!

Diagramme de CLAPEYRON Maintenant que la cuve est prête, vous allez pouvoir tracer une isotherme.

→ Attendez que la température se stabilise et réglez la de la manière suivante suivant votre numéro de binôme :

- groupe n°1 : 15 °C
- groupe n°2 : 20 °C
- groupe n°3 : 25 °C
- groupe i : $10 + 5i$ °C

Si la température du bain n'est pas tout à fait la bonne, ce n'est pas grave. Notez simplement la valeur que vous avez atteint. Essayez seulement de vous rapprocher autant que possible de la valeur demander, mais sans y passer trop de temps.

- Fixez le volume de SF_6 à 4 mL et relevez la pression associée.
- Modifiez le volume disponible et attendez la stabilisation en pression avant de noter la valeur associée.
- Diminuez le volume de 0,2 en 0,2 mL au début et plus lentement sur la fin (de 0,1 mL en 0,1 mL voire de 0,05 mL en 0,05 mL. Le but étant d'explorer le plus grand domaine possible en volume et en pression **sans** dépasser 50 bar.
- Recopiez et remplissez le tableau ci-dessous avec autant de colonnes que nécessaire.

V								
P								

- Tracez le tout sur une courbe en indiquant bien à chaque fois l'état du SF_6 .
- Mesurez les volumes du liquide juste saturant et de la vapeur juste saturante.

Diagramme d'AMAGAT

Afin de tester le caractère parfait de la vapeur sèche, il est possible de tracer de multiples diagrammes. L'un d'eux est le diagramme d'AMAGAT : $PV = f(P)$ à $T = C^{te}$.

¿ ? Quelle est l'allure de ce diagramme pour un gaz parfait ?

→ Tracez dans le diagramme d'AMAGAT l'isotherme $T = 25$ °C à l'aide des mesures que vous venez d'effectuer.

¿ ? La vapeur sèche peut-elle être considérée comme parfaite ?

¿ ? À quelle condition sur la pression le comportement de tout gaz tend-il vers celui d'un gaz parfait ?

→ Déduisez de la réponse précédente, une méthode pour obtenir un ordre de grandeur de la quantité de gaz présente dans l'éprouvette.

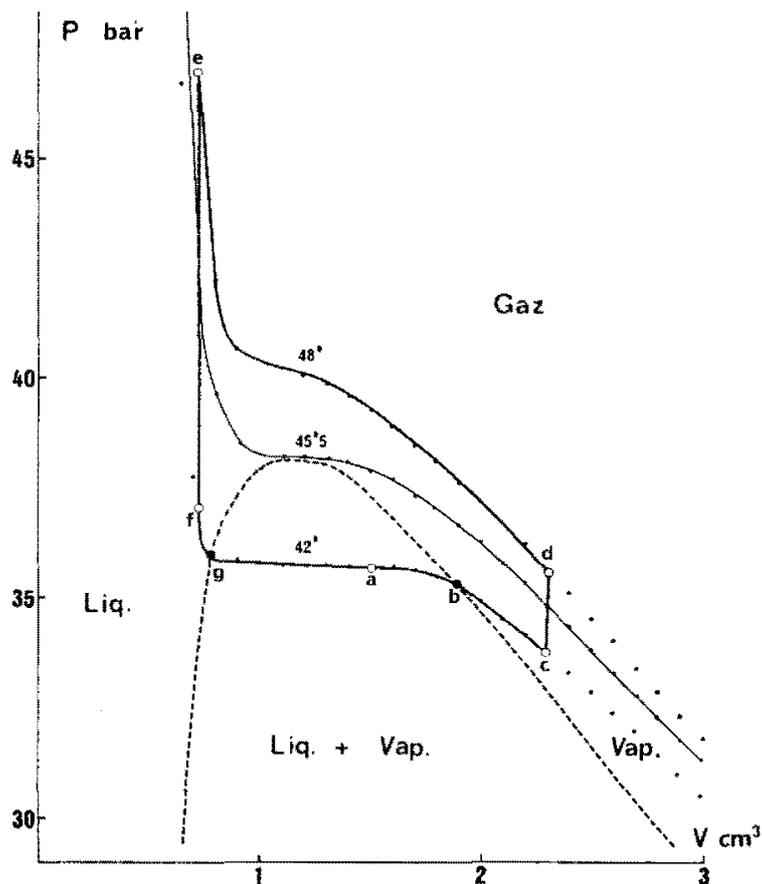
Chaleur latente

La formule de CLAPEYRON $L_{vap} = T(v_{vap} - v_{liq}) \frac{dP_s}{dT}$ permet de relier les différentes mesures effectuées dans ce TP avec la chaleur latente de vaporisation de SF_6 à $T = 25$ °C.

- Mesurez la pente $\frac{dP_s}{dT}$ sur la courbe tracée précédemment en i..
- Avec les mesures effectuées juste avant, déduisez les volumes massiques v_{vap} et v_{liq} de la vapeur juste saturante et du liquide juste saturant sachant que la masse molaire vaut $M_{SF_6} = 146$ g.mol⁻¹.
- Calculez alors la chaleur latente de vaporisation du SF_6 .
- Comparez avec la valeur tabulée $L_{vap} \simeq 61,6$ kJ.kg⁻¹.

3°) Contournement du point critique

Cette expérience est surtout manipulatoire et vise à observer qualitativement un phénomène. Pour cela vous allez réaliser le cycle suivant.



→ Placez-vous au point **a** : réglez le thermostat sur $43\text{ }^{\circ}\text{C}$, le volume sur $1,8\text{ mL}$ et attendez l'équilibre.

→ Trajet **a** – **b** – **c** : augmentez le volume lentement de manière à réaliser une détente le long d'une isotherme.

Le SF_6 est désormais dans l'état vapeur.

¿ ? Quand savez-vous que vous avez atteint le point **b** ?

→ Trajet **c** – **d** : augmentez la température du bain à environ $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ne **pas** dépasser $48\text{ }^{\circ}\text{C}$).

→ Trajet **d** – **e** : diminuez le volume lentement de manière à réaliser une compression isotherme (attention de ne pas dépasser 50 bar) jusqu'à $V \simeq 0,2$ à $0,25\text{ mL}$

→ Trajet **e** – **f** : rajoutez de l'eau froide dans la cuve de manière à réaliser un refroidissement isochore jusqu'à $43\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Le SF_6 est désormais dans l'état liquide.

*Le changement d'état de **c** à **f** s'est réalisé dans voir de liquéfaction !*

→ Trajet **f** – **g** – **a** : augmentez le volume de manière à faire réapparaître les deux phases liquide et vapeur.

¿ ? Que se passe-t-il en **g** ?

