Feuille d'exercices n°1 : Etude thermodynamique des systèmes fermés de composition constante

Donnée :
$R = 8{,}31\ J.K^{-1}.mol^{-1}$

Pour maîtriser le cours :
Travail des forces pressantes, 1er Principe et 2ème Principe

Exercice 1 : Equivalence travail - chaleur

Une voiture de 1 tonne roule à 108 km/h et s'arrête brusquement. On suppose que toute l'énergie se dissipe dans ses quatre disques de 3 kg chacun. Quelle est l'élévation de température des disques, sachant que leur capacité thermique vaut $c = 0{,}4\ J.g^{-1}.K^{-1}$?

Exercice 2 : Chutes du Niagara

Les chutes du Niagara sont produites par une dénivellation de :
$h = 50$ m.

Pour l'eau :
$c_{eau} = 4{,}18\ J.g^{-1}.K^{-1}$

Calculer la variation de température de l'eau du fait de cette chute, c'est à dire avant qu'elle n'ait échangé un transfert thermique avec l'extérieur.

Exercice 3 : 1er Principe et 2ème Principe

1) Un radiateur fournit une puissance thermique de 100 W à un gaz. Si le gaz produit un transfert mécanique au taux de 75 J par seconde pendant sa détente, de combien l'énergie interne augmente-t-elle par unité de temps ?

2) On chauffe à puissance constante un gaz placé dans un cylindre vertical fermé par un piston mobile. Dans quelles conditions l'énergie interne de ce gaz augmente-t-elle le plus rapidement, lorsque le piston est maintenu fixe ou lorsqu'il est libre de se déplacer vers le haut ? Expliquez votre raisonnement.

3) Le second principe de la thermodynamique déclare que le désordre de l'univers est soit constant soit en augmentation. Comment ceci peut être compatible avec le fait que le développement des plantes et des animaux tend vers des états plus ordonnés ?

4) Un ballon rempli d'hélium est percé et se dégonfle très lentement. Le gaz se répand uniformément dans la pièce.
   a- Le processus est-il réversible ? Expliquer.
   b- L'entropie de l'ensemble {hélium + air de la pièce} a-t-elle augmenté ou diminué ? Expliquer.

Exercice 4 : Travail des forces pressantes, influence du chemin de transformation

Une mole de dioxygène, supposé gaz parfait, se détend d'un volume de 10 litres à 25°C à un volume de 50 litres à 100°C.
Représenter la transformation dans le diagramme de Clapeyron et calculer le transfert mécanique reçu par le dioxygène si la détente s'effectue :
a) par un chauffage isochore suivi d'une détente isotherme ;
b) par une détente isotherme suivie d'un chauffage isochore.
Conclure.

Exercice 5 : Représentation graphique du travail des forces de pression

Une mole de gaz parfait, dans les conditions P_0, V_0, $T_0 = 300$ K, subit deux transformations réversibles ; la première est une compression isotherme qui fait doubler sa pression. La deuxième l'amène du même état initial au même état final que la première par une transformation représentée par un segment de droite dans le diagramme de Clapeyron.
Dessiner ce diagramme. Comparer les transferts mécaniques reçus par le gaz au cours de ces deux transformations.
Calculer le plus astucieusement possible ce transfert mécanique ainsi que le transfert thermique reçus par le gaz au cours de ces deux transformations.

Exercice 6 : Chauffage isobare d'un solide

Un cube d'aluminium de 20 cm de côté (de masse *m* = 21,6 kg), est chauffé de 50°C à 150°C dans une enceinte, sous la pression atmosphérique constante égale à 1,0 bar. Déterminer le travail des forces extérieures de pression reçu par ce solide sachant qu'il se dilate de 58 cm^3. Calculer le transfert thermique qu'il reçoit ainsi que la variation de son énergie interne sachant que sa capacité thermique à pression constante est $c_P = 0{,}90\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$.
Commenter.

Exercice 7 : Chauffage isochore d'un gaz réel

On considère 2 moles de monoxyde de carbone CO, gaz réel de capacité thermique molaire à volume constant $C_{v,m}$:
$C_{v,m}$ / $J.K^{-1}.mol^{-1} = 20{,}41 + 3{,}10.10^{-3}\ T/K - 0{,}46.10^{-5}\ (T/K)^{-2}$.

1) Calculer le transfert thermique reçu par ce gaz lors d'un chauffage isochore de $T_1 = 273$ K à $T_2 = 373$ K.
2) On recommence le calcul en supposant la capacité thermique molaire du monoxyde de carbone constante et égale à 5R/2. Commenter.

Exercice 8 : Chauffage isobare d'un gaz réel

Un gaz réel de masse *m* = 10,0 g est contenu dans un cylindre fermé par un piston mobile, à la température de 100°C. On le chauffe pour augmenter sa température de 10°C sous la pression extérieure constante égale à 4,00 bar. Son volume augmente de 30,0 cm^3. Déterminer les transferts thermique et mécanique reçus par le gaz ainsi que la variation de son enthalpie et celle de son énergie interne.
Donnée : $c_P = 2{,}02\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$

Exercice 9 : Chauffage d'un gaz parfait

On enferme 0,1 mole de diazote, considéré ici comme un gaz parfait, dans un cylindre thermostaté à 27°C, fermé par un piston mobile sans frottement de section S = 100 cm^2. La pression totale qui règne au-dessus du gaz est P_0 = 1 bar. Le coefficient γ vaut 1,4.

a) Rappeler les définitions suivantes : capacité thermique à volume constant, capacité thermique à pression constante et coefficient γ.
b) Déterminer la hauteur initiale *h* occupée par le gaz dans le cylindre.

Le piston étant bloqué à l'altitude *h*, on élève la température du thermostat jusqu'à 50°C.
c) Qualifier la transformation subie par le gaz.
d) Calculer les transferts mécanique et thermique reçus par le gaz.

On répète cette opération en libérant le piston.
e) Qualifier à nouveau la transformation subie par le gaz.
f) Calculer à nouveau les transferts mécanique et thermiques reçu par le gaz jusqu'à l'état d'équilibre final. Comparer les deux transformations.

Exercice 10 : Détente Joule et Gay-Lussac et entropie

1) Rappeler ce qu'est une détente de Joule et Gay-Lussac. Quelle grandeur se conserve lors de cette transformation ?
2) On fait subir une détente de Joule et Gay-Lussac à une quantité de matière *n* d'un gaz parfait le faisant passer d'un volume V_1 à un volume plus grand V_2. Calculer la variation d'entropie du gaz et commenter le résultat obtenu.

Exercice 11 : Compression adiabatique réversible d'un gaz parfait

L'argon à l'état gazeux, supposé parfait de coefficient γ = 1,67, est comprimé très lentement et adiabatiquement, dans un cylindre bien isolé jusqu'à la moitié de son volume initial de 0,100 m^3. S'il était à la pression atmosphérique et à 27,0°C, quelles seront sa température et sa pression finales ?

Exercice 12 : Entropie d'un gaz parfait de capacité thermique $C_{v,m} = a + bT$

Le dioxyde de carbone a une capacité thermique molaire à volume constant entre 273 et 500 K donnée par : $C_{v,m} = 23{,}83 + 22{,}15.10^{-3}T$ ($J.K^{-1}.mol^{-1}$).

a) Etablir l'expression de l'entropie de ce gaz supposé parfait en fonction de T et V.
b) Calculer ΔS pour l'échauffement isochore de 5,0 mol de CO_2 de 298 à 400 K.

Exercice 13 : Gaz parfait en contact avec un thermostat

a) Une mole d'hélium ($C_{v,m}$ = 3/2 R) est enfermée dans un cylindre dont les parois sont perméables à la chaleur, lui-même plongé dans un thermostat à 273 K. Initialement le gaz est à la température de 300 K. On le laisse refroidir à volume constant. Quel est l'état d'équilibre ? Calculer la variation d'entropie du gaz, l'entropie échangée et l'entropie créée.

b) Partant de l'équilibre précédent, on réduit de moitié le volume du gaz de manière isotherme et réversible. Calculer la variation d'entropie du gaz, l'entropie échangée et l'entropie créée.

Exercice 14 : Variation d'entropie lors de la trempe d'un fer à cheval

Un fer à cheval de masse *m* = 400 g est porté au rouge, pour être martelé, à une température de 600°C. On le ramène après façon à la température ordinaire en le trempant dans un bassin à la température de 20°C. On donne la capacité thermique massique du fer c = 0,46 $J.g^{-1}.K^{-1}$.
Calculer :

a) La variation d'entropie du fer à cheval au cours de la trempe.

b) L'entropie échangée.

c) L'entropie créée. Conclure.

Pour aller un peu plus loin dans l'analyse de diverses transformations de gaz

Exercice 15 : Transformations d'un gaz parfait

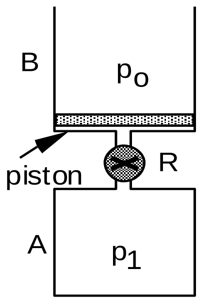
Un gaz parfait est enfermé dans un cylindre vertical de section circulaire S laissant passer la chaleur et placé dans un thermostat à T_0 ; le piston fermant ce récipient de masse négligeable est bloqué. Les paramètres du gaz à l'état initial sont : P_0, T_0 et $V_0 = h_0S$. On pose une masse m sur le piston, toujours bloqué.

1) Un opérateur débloque le piston tout en le maintenant et en le faisant coulisser très lentement.
   - Caractériser la transformation ;
   - Calculer les transferts mécanique et thermique reçus par le gaz en fonction de P_0, h_0, S, m et g ;
   - Calculer la variation d'entropie du gaz, l'entropie échangée et l'entropie créée. Conclure.

2) On envisage une autre opération : à partir du même état initial que précédemment un opérateur débloque le piston et le laisse tomber.
   - Caractériser la transformation ;
   - Calculer les transferts mécanique et thermique reçus par le gaz en fonction de P_0, h_0, S, m et g ;
   - Calculer la variation d'entropie du gaz, l'entropie échangée et l'entropie créée. Conclure.

Exercice 16 : Transformation brutale

On considère une mole d'un gaz parfait, contenue dans un récipient diathermane A, à la température T_0 = 20°C et à la pression $P_1 = 2.10^5$ Pa. Cette enceinte communique au moyen d'un robinet R, avec une autre enceinte B diathermane de volume variable initialement nul. L'une de ses parois est un piston de masse négligeable, mobile sans frottement. Au-dessus du piston règne en permanence la pression atmosphérique $P_0 = 1.10^5$ Pa exercée par l'air et la température T_0.



a) On ouvre le robinet, et on attend que l'équilibre thermique et mécanique s'établisse. Calculer la pression finale P_F du gaz et le volume total V_F.
b) Calculer les transferts mécanique et thermique reçus par le gaz au cours de la transformation.
c) Calculer la variation d'entropie du gaz, l'entropie échangée et l'entropie créée.

Exercice 17 : Transformation de deux gaz

Une enceinte aux parois calorifugées séparées en deux compartiments contenant deux gaz parfaits à la température T_0, les pressions de chaque compartiment sont différentes (P_1 et P_2 avec $P_1>P_2$). Les deux compartiments ont même volume initial V_0. On libère la paroi mobile diatherme qui peut coulisser librement dans l'enceinte.

1) Déterminer la température finale ainsi que la pression finale.
   A.N. : P_1 = 3 bar et P_2 = 1bar.
2) Calculer la variation d'entropie totale des gaz. A quoi correspond-t-elle ?

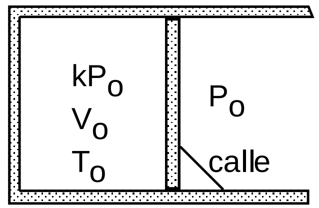
Exercice 18 : Compression isotherme

Un cylindre indilatable et indéformable, fermé par un piston de masse négligeable, et mobile sans frottement, renferme 0,1 m^3 de gaz à 27°C et sous une pression P_0 de 10^5 Pa.
Il est placé dans une atmosphère où la pression est constante et égale à 10^5 Pa et où $T = T_0$ = 27°C.
On supposera toutes les transformations quasi-statiques et le gaz parfait diatomique d'énergie interne $U = 5/2\, nRT$.

a) Calculer le travail <u>effectif</u> (travail fourni par l'opérateur, déduction faite de celui fourni par l'atmosphère) qu'il faut fournir au piston pour exécuter une compression isotherme réduisant le volume à 0,01 m^3. Quelle est le transfert thermique reçu par le gaz pendant cette compression?

b) La compression n'ayant pas été isotherme, on constate que la température finale du gaz à la fin de cette opération est 50°C. Sachant que le transfert thermique reçu par le milieu extérieur a été de 22,1 kJ, on demande le travail effectif qu'il a fallu fournir au piston.

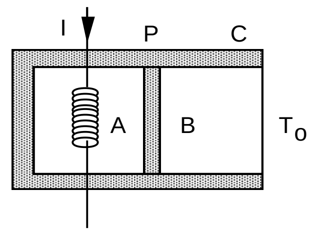
Exercice 19 : Transformation d'hélium



Une mole d'hélium ($C_{V,m}$ = 3/2 R) est enfermée dans un cylindre muni d'un piston mobile, adiabatique, soumis à la pression atmosphérique extérieure P_0.
Initialement le piston est bloqué, le volume est V_0, la température T_0 et la pression kP_0 avec $k > 1$.

On libère le piston et on laisse l'ensemble évoluer vers l'équilibre.
1) Caractériser cette transformation.
2) Calculer le volume et la température du gaz à l'équilibre, ainsi que ses variations d'énergie interne et d'enthalpie. Comparer le transfert thermique à la variation d'enthalpie.
3) Calculer la variation d'entropie du gaz, l'entropie échangée et l'entropie créée.
4) Reprendre toutes les questions précédentes dans le cas où le cylindre et le piston sont diathermes.

Exercice 20 : Gaz et résistance chauffante



Un cylindre C a des parois adiabatiques à l'exception de la base S, diathermane, qui le met en contact avec un thermostat à la température T_0 = 20°C.
Il est divisé par le piston P adiabatique et coulissant sans frottement en deux compartiments A et B initialement de même volume V_0 = 10 L.
Il contient un gaz parfait de coefficient isentropique $\gamma = 1{,}4$ indépendant de la température, initialement à la pression $P_0 = 10^5$ Pa et à la température T_0.
On fait passer dans la résistance chauffante un faible courant de façon que le système évolue de façon quasi-statique. On coupe le courant lorsque V_A = 12 L.

a) Calculer P_A, T_A, V_B, P_B, T_B et le transfert thermique Q fourni au gaz du compartiment A.
b) Mêmes questions lorsque l'ensemble du récipient est calorifugé.

Exercice 21 : Oscillations

Un récipient cylindrique de longueur $2l_0$ est séparé en 2 compartiments par un piston mobile vertical de section S et de masse m. Initialement les 2 compartiments contiennent la même quantité de gaz parfait dans les mêmes conditions de température et de pression T_0 et p_0.
On écarte le piston de sa position initiale, d'une longueur x_0 petite par rapport à l_0.
Les gaz dans les 2 compartiments subissent des transformations supposées adiabatiques réversibles.

a) Calculer en fonction de la distance x du piston à sa position initiale et du rapport γ des capacités thermiques, la pression dans chacun des 2 compartiments.

b) En déduire la force exercée sur le piston par le gaz.

c) Montrer que le mouvement du piston est pratiquement oscillatoire et déterminer la période des oscillations. (On donne $(1+\varepsilon)^n \approx 1+n\varepsilon$ lorsque $\varepsilon \ll 1$)

Transformations cycliques

Exercice 22 : Rendement d'un cycle

On fait subir à une mole de gaz parfait monoatomique d'énergie interne $U = 3/2\ nRT$ un cycle représenté en diagramme de Clapeyron $P = f(V)$ par un rectangle ABCDA.
On donne :
$V_0 = V_A = V_B = 22{,}4$ L, $V_C = V_D = 44{,}8$ L, $P_0 = P_A = P_D = 10^5$ Pa ;
$P_B = P_C = 5.10^5$ Pa.

a) Calculer la température $T_0 = T_A$. Exprimer les températures aux points B, C, D en fonction de T_0 puis les calculer numériquement.

b) Donner l'expression du travail total W_T reçu par le gaz au cours du cycle en fonction de V_0 et P_0 puis le calculer numériquement. Le cycle est-il globalement moteur ou récepteur ?

c) Au cours de quelles transformations le gaz reçoit-il effectivement un transfert thermique ? En déduire le rendement du cycle :

$$|W_T|/(\text{transfert thermique reçu})$$

Exercice 23 : Tracé d'un diagramme entropique

Une mole de gaz parfait subit un cycle de transformations composé d'une compression isotherme, d'un chauffage isobare, d'une détente adiabatique réversible et d'un refroidissement isochore. Représenter ce cycle dans le diagramme de Clapeyron et dans le diagramme entropique. Comparer les surfaces des deux cycles.

Exercice 24 : Cycle

On impose à une mole de gaz parfait les transformations quasi-statiques suivantes formant un cycle :
-isochore (1) de l'état A (V_1,T_1) à l'état B (V_1,T_2)
-isotherme (2) de l'état B (V_1,T_2) à l'état C (V_2,T_2)
-isochore (3) de l'état C (V_2,T_2) à l'état D (V_2,T_1)
-isotherme (4) de l'état D (V_2,T_1) à A (V_1,T_1).

On demande de calculer :
- La pression P_1 dans l'état A.
- La variation d'énergie interne au cours du cycle.
- Le transfert mécanique reçu par le gaz au cours des transformations (1) et (3).
- Les transferts mécanique et thermique reçus par le gaz au cours du cycle.

Représenter le cycle en diagramme de Clapeyron et en diagramme (S,T).
$V_1 = 1{,}00\ m^3$ $V_2 = 0{,}100\ m^3$ $T_1 = 273\ K$ $T_2 = 293\ K$

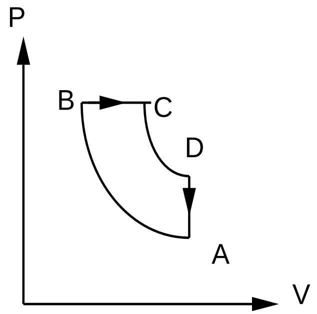
Exercice 25 : Transformation cyclique d'un gaz parfait

Une mole de gaz parfait diatomique ($\gamma = 1{,}4$) subit le cycle de transformations suivant :
-à partir des conditions normales $P_0 = 1$ bar, $T_0 = 273$ K, un chauffage isobare fait tripler son volume ; la température est alors T_1 ;
-une compression isotherme lui fait retrouver son volume initial ; sa pression est alors P_1 ;
-un refroidissement isochore le ramène à l'état initial.
Représenter ce cycle dans le diagramme de Clapeyron et exprimer au cours de chaque étape les variations d'énergie interne et d'enthalpie du gaz, ainsi que les transferts mécanique et thermique qu'il reçoit. Calculer ces mêmes quantités pour le cycle complet.

Exercice 26 : Cycle de Lenoir

On considère le cycle de Lenoir **moteur** constitué d'une isochore BC, d'une adiabatique réversible CD, d'une isobare DB.
a) Représenter le cycle en diagramme de Clapeyron.
b) Définir le rendement du cycle.
c) On donne a = $(P_B/P_C) < 1$ et le rapport γ des capacités thermiques. Déterminer le rendement du cycle en fonction de a et de γ.
d) Tracer le cycle dans le diagramme entropique.

Exercice 27 : Cycle diesel



Dans le cycle diesel, le premier temps (représenté par AB) est une compression adiabatique de l'air seul avec un rapport volumétrique assez élevé. Le carburant n'est injecté dans le cylindre qu'à partir de B. La température en B est suffisante pour que le mélange s'enflamme spontanément (sans l'aide de bougies).

Le taux d'injection est réglé de manière que la pression reste constante pendant la phase BC de la détente.
On arrête l'injection en C et on laisse le mélange se détendre adiabatiquement selon CD. En D le piston est alors au point mort bas. On suppose un refroidissement isochore DA et le gaz est considéré comme parfait.

a) Exprimer le rendement du cycle en fonction du rapport γ, supposé constant, des capacités thermiques et des quatre températures.
b) Montrer qu'il peut s'exprimer uniquement en fonction du rapport volumétrique à la compression $a = V_A / V_B$, du rapport volumétrique à la détente $b = V_D / V_C$ et du rapport γ.

Calorimétrie

Exercice 28 : Méthode des mélanges

a) Un calorimètre contient 95 g d'eau à 20°C. On ajoute 71 g d'eau à 50°C.
Quelle serait la température d'équilibre si l'on pouvait négliger la capacité thermique du vase et de ses accessoires ?
b) La température d'équilibre observée est 31,3°C. En déduire la capacité thermique du vase et de ses accessoires.
c) On appelle valeur en eau μ du calorimètre, la masse d'eau qui a la même capacité thermique que le calorimètre. Donner la valeur de μ.
d) Le même calorimètre contient maintenant 100 g d'eau à 15°C. On y plonge un échantillon métallique pesant 25 g sortant d'une étuve à 95°C. La température d'équilibre étant 16,7°C, calculer la capacité thermique massique du métal.
Pour l'eau $c_{eau} = 4{,}18\ J.g^{-1}.K^{-1}$.

Exercice 29 : Méthode des mélanges et entropie

On mélange dans un calorimètre dont on néglige la valeur en eau 1 kg d'eau à 20°C et 0,4 kg d'eau à 90°C. Le calorimètre étant thermiquement isolé de façon parfaite, calculer la variation d'entropie au cours de l'opération.

Exercice 31 : Détermination expérimentale de la capacité thermique du cuivre.

On désire évaluer expérimentalement la capacité thermique massique c_{Cu} du cuivre solide grâce à un calorimètre.

Dans un premier temps, on introduit dans le calorimètre une masse m_e d'eau froide. On attend que l'équilibre thermodynamique s'établisse avec le calorimètre et on mesure la température θ_1, puis on additionne une masse identique m_e d'eau chaude à la température θ_2. Après une agitation pendant une dizaine de secondes, on mesure une température θ_f.

1) On appelle valeur en eau μ du calorimètre, la masse d'eau qui a la même capacité thermique que le calorimètre. Donner l'expression de μ en fonction des données de l'énoncé.

2) Calculer μ.

   Données : m_e = 100 g ; θ_1 = 20,0 °C ; θ_f = 28,8 °C ; θ_2 = 40,0 °C.

3) Pourquoi ne faut-il pas attendre trop longtemps avant de faire la mesure de la température finale ?

Dans un second temps, on introduit dans le calorimètre initialement vide une masse $2m_e$ et on attend l'équilibre thermique. La température est alors θ_1. On chauffe une masse m_{Cu} de cuivre en poudre à la température θ_3, et on l'ajoute dans le calorimètre. On attend que l'équilibre thermo-dynamique soit établi et on mesure une température finale θ'_f.

4) Donner l'expression de la capacité thermique massique du cuivre c_{Cu} en fonction des données de l'énoncé, de la masse en eau du calorimètre et de la capacité thermique massique de l'eau c_e.

5) Calculer c_{Cu}.

Données : m_{Cu} = 150 g ; θ_3 = 90,0 °C ; c_e= 4,18 $J.K^{-1}.g^{-1}$; θ'_f = 24,0°C

6) Y a-t-il une raison particulière pour choisir de faire l'expérience avec une masse d'eau de $2m_e$?

7) Pourquoi choisit-on du cuivre en poudre plutôt qu'un morceau de cuivre compact ?

On désire maintenant tenir compte des pertes thermiques du calorimètre : la transformation n'est pas tout à fait adiabatique. Le transfert d'énergie thermique reçu par le système thermodynamique n'est pas nul et a l'expression $Q_p = -P.\Delta t$ où P est la puissance de perte du calorimètre (prise constante) et t le temps.

Lors de la première expérience (mesure de la valeur en eau du calorimètre), la mesure de θ_f a eu lieu après une dizaine de secondes. Après Δt = 20,0 min, on mesure à nouveau la température et on relève θ_{20} = 26,0°C.

8) Donner l'expression de la capacité thermique du système C_{Syst} lorsque l'équilibre thermique du mélange est atteint et avant que les pertes thermiques ne commencent à se faire sentir. Tracer l'allure du graphe donnant l'évolution de la température du système en fonction du temps et en respectant une échelle linéaire en temps. Donner le coefficient directeur de la droite de décroissance en température due aux pertes, en fonction de C_{syst} et de P.

9) En déduire la puissance de perte P du calorimètre et faire l'application numérique.

Lors de la deuxième expérience, la mesure de θ'_f a été effectuée au bout de $\Delta t'$ = 2,00min et alors que la température passe par un maximum.

10) Tracer l'allure du graphe donnant l'évolution de la température du système en fonction du temps et en respectant une échelle linéaire en temps. Quelle est l'ordonnée à l'origine $\theta_{f,corr}$ de la portion droite de cette courbe ? Faire l'application numérique.

11) En déduire la nouvelle valeur expérimentale de c_{Cu}