

À rendre le jeudi 1^{er} octobre 2026

Physique – Devoir Maison n°2

Consignes

- Indiquez les numéros des exercices et des questions et numérotez les pages.
- Soignez la rédaction.
- Toute réponse doit être justifiée.
- Les résultats doivent être encadrés.
- Les applications numériques doivent être suivies d'une unité.

Conseils

- Traiter le DM avec le cours et les TD ouverts sous les yeux.
- N'hésitez pas à me poser toutes les questions que vous voulez à la fin d'un cours, par cahier-de-prepa , ou par mail : nadine.valade@ac-dijon.fr.

Exercice n°1 Résolution interférométrique d'un doublet spectral

Les moyens spectroscopiques conventionnels (spectroscopie à prisme ou à réseau) peuvent se révéler insuffisants quand il s'agit de résoudre un doublet à très faible écart spectral. On peut alors avoir recours à des méthodes interférométriques. Il est question dans cette partie de l'utilisation de l'interféromètre de Michelson.

La figure 1 page 2 donne le schéma de principe d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air. On note Ox et Oy deux axes perpendiculaires définissant les directions des deux bras de l'interféromètre. S est une source lumineuse ponctuelle située sur Ox . M_1 et M_2 sont deux miroirs plans parfaitement réfléchissants, disposés perpendiculairement à Ox en H_1 et respectivement à Oy en H_2 . Le trait incliné à 45° , noté L_s , schématise un groupe de deux lames semi-réfléchissantes à faces parallèles. Ce groupe est supposé n'introduire aucune différence de marche sur les trajets lumineux. L_p désigne une lentille mince convergente placée à la sortie de l'interféromètre de manière à ce que son axe optique soit confondu avec l'axe Oy . Un écran E est placé dans le plan focal image de L_p . On note C le foyer image de L_p .

- Q1. Nommer les lames qui composent L_s . Qu'est-ce qui les distingue ? Expliquer la nécessité pratique d'utiliser deux lames.
- Q2. Un rayon lumineux, noté (r) , émis par S , a été représenté.
Reproduire le schéma ci-dessous sur la copie avec $SO = OH_1 = 2OH_2$ et le compléter en faisant un tracé soigné des deux rayons (r_1) et (r_2) qui émergent de l'interféromètre après division de (r) .
On laissera apparent tout élément de construction (traits, prolongements de rayons, points remarquables, etc.) justifiant d'un tracé raisonné sans utilisation d'aucun rapporteur d'angle. Tout élément explicatif (noms, positions des points, constructions réalisées...) sera également mentionné.
- Q3. Sur ce même schéma positionner le miroir fictif M'_1 justifiant de la dénomination « lame d'air » en faisant apparaître le point Q_1 intersection de M'_1 avec les deux prolongements fictifs ad hoc de (r_1) et de (r_2) .
Enfin, terminer le tracé des rayons (r_1) et (r_2) après la lentille L_p jusqu'à l'écran E (on demande comme ci-dessus un tracé raisonné).
- Q4. Indiquer quelle est la forme des franges d'interférences observées sur l'écran (aucune justification n'est demandée). Comment nomme-t-on ces franges ?
- Q5. En appelant e l'épaisseur de la lame d'air et en prenant l'indice optique de l'air égal à 1, exprimer la différence de marche δ au centre C de l'écran.

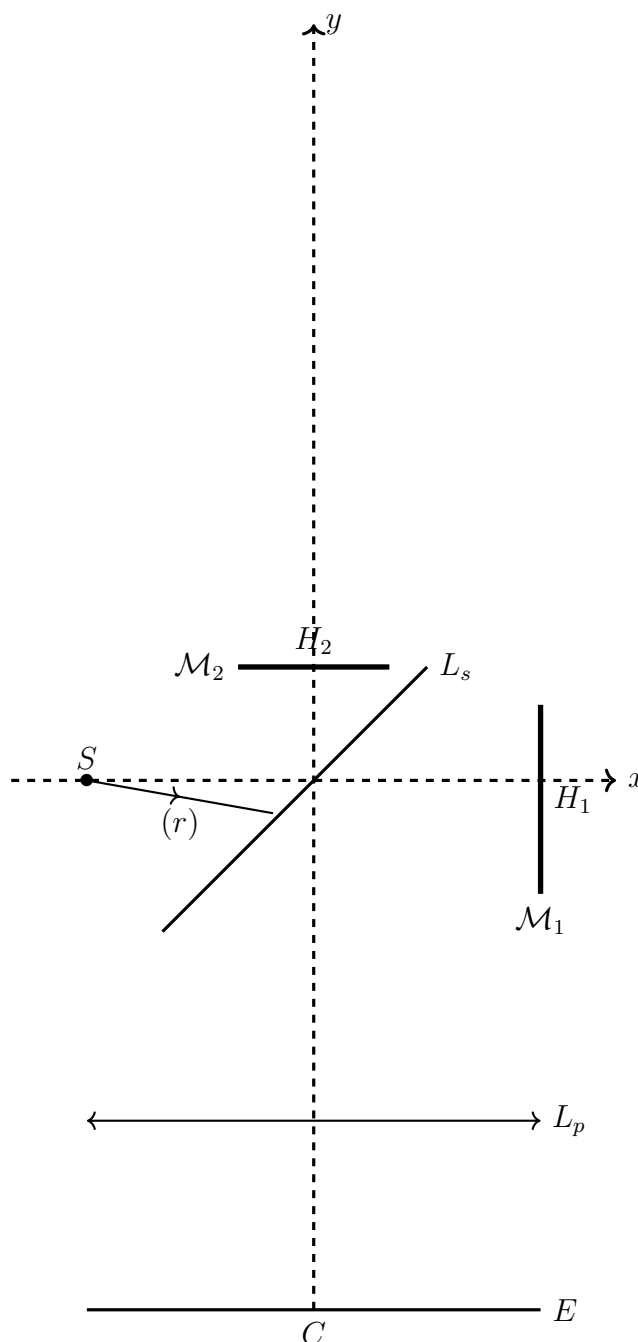


FIGURE 1 – Interféromètre de Michelson

- Q6. On étudie le cas où la source de lumière utilisée présente un doublet spectral de nombres d'ondes* σ_1 et σ_2 . Donner l'expression des ordres d'interférence p_1 et p_2 en C pour chaque radiation du doublet en fonction de δ , σ_1 et σ_2 .
- Q7. Pour quelles valeurs de la différence $p_1 - p_2$ y-a-t-il brouillage en C ?
En pratique la totalité de la figure d'interférences est affectée et on perd la visibilité des franges partout sur l'écran. En déduire, en fonction de l'écart spectral $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$, la variation D_δ de la différence de marche entre deux situations consécutives de brouillage. Comment nomme-t-on ces situations ?
- Q8. Application numérique : dans le cas du doublet H_α (écart spectral $\Delta\sigma_{\text{exp}} = 0,360 \text{ cm}^{-1}$), calculer la variation D_e de l'épaisseur de la lame d'air pour passer d'une situation de brouillage à la situation de brouillage directement consécutive.

*. le nombre d'onde est la fréquence spatiale, c'est l'inverse de la longueur d'onde.

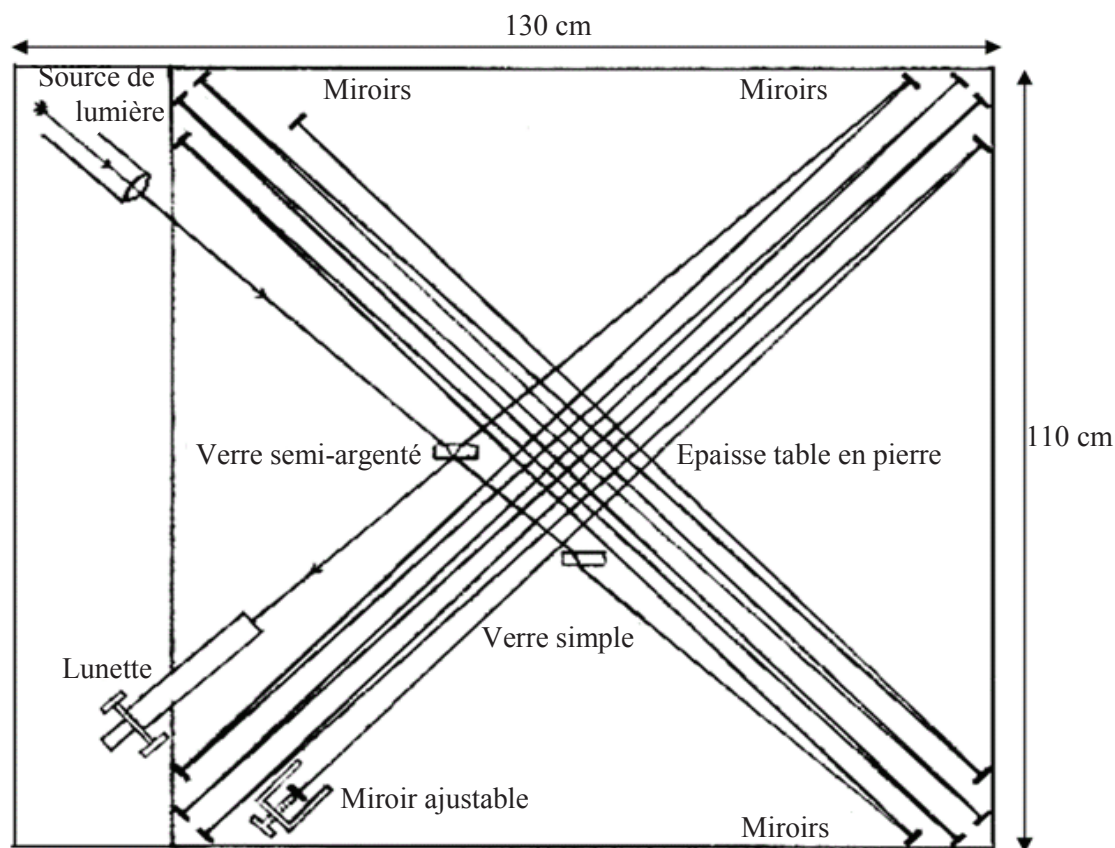


FIGURE 2 – Schéma des trajets lumineux dans l'interféromètre de Michelson et Morley de 1887 (source : http://ondes-relativite.info/DominiqueCabala/chap4_histo.htm)

- Q9. À l'entrée de leur interféromètre historique de 1887, Michelson et Morley ont utilisé un dispositif à prismes muni d'une fente pour sélectionner la raie H_{α} présente dans le spectre solaire. Ils ont observé des brouillages périodiques lors de la translation du miroir mobile de leur interféromètre. Partant du contact optique (bras de longueurs rigoureusement égales à L_0), ils ont compté un total de 6 brouillages de part et d'autre du contact optique (3 de chaque côté) pour un déplacement du miroir égal à $1/160^{\circ}$ de la longueur L_0 . Calculer la valeur de L_0 pour l'interféromètre de Michelson de 1887.
- Q10. L'interféromètre, construit dans un sous-sol du campus de l'Université de Cleveland aux États-Unis, était monté sur une table en granite rectangulaire posée sur un cylindre de bois flottant dans du mercure. La table faisait environ 130 cm $\times$ 110 cm de cotés. La longueur L_0 des bras de l'interféromètre était synthétisée grâce à deux groupes de miroirs permettant plusieurs allers-retours du faisceau sur chaque voie, comme représenté sur la figure 2. À partir de la figure 2, donner, en expliquant votre calcul, une estimation grossière de la longueur d'un bras de l'interféromètre. L'ordre de grandeur obtenu est-il en accord avec la valeur L_0 trouvée à la question précédente ?

Exercice n°2 Stockage du CO₂ dans les aquifères salins

A Stockage au fond des océans

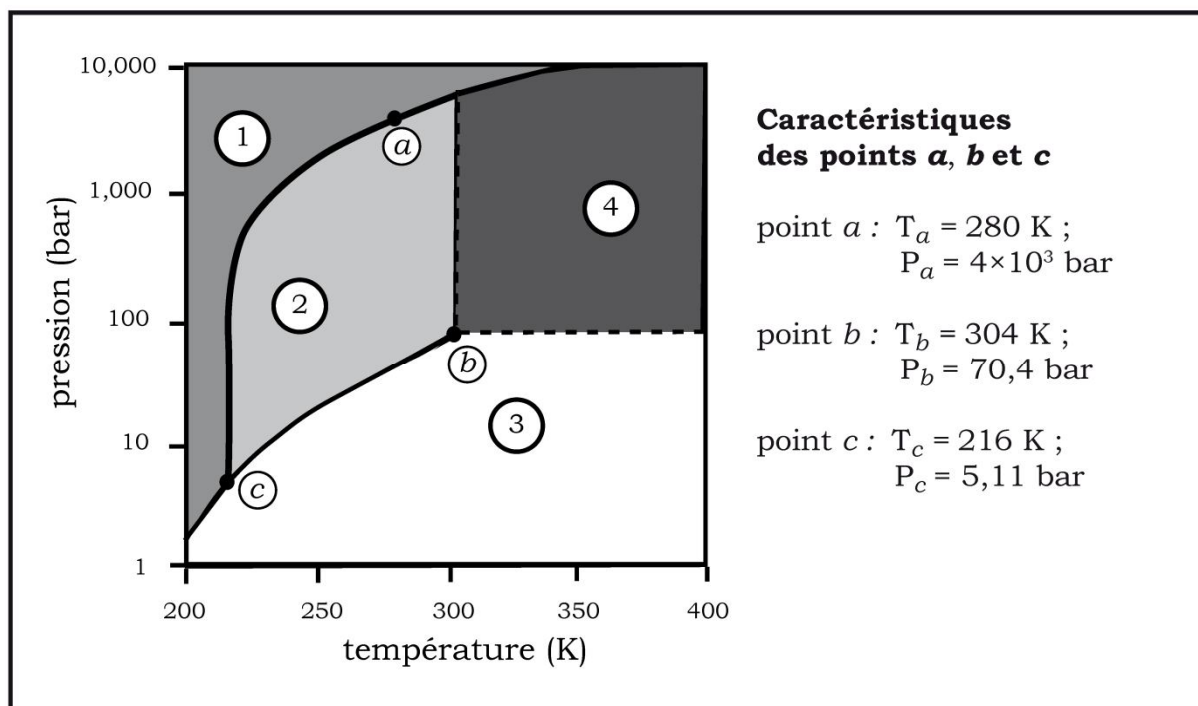
Une première proposition un peu simple (simpliste?) consiste à former des blocs de CO₂ solide à l'aide d'installations frigorifiques puis de les laisser tomber dans des fosses marines.

On effectue les approximations suivantes :

- L'océan est un fluide homogène au repos, de température constante, incompressible et indilatable.
- Les blocs de CO₂ sont incompressibles et indilatables. Ils ont de plus une masse constante tout au long de la descente dans la fosse (approximation forte).

A.1 Condition de séquestration du CO₂ solide

On propose le diagramme de phases du CO₂ :

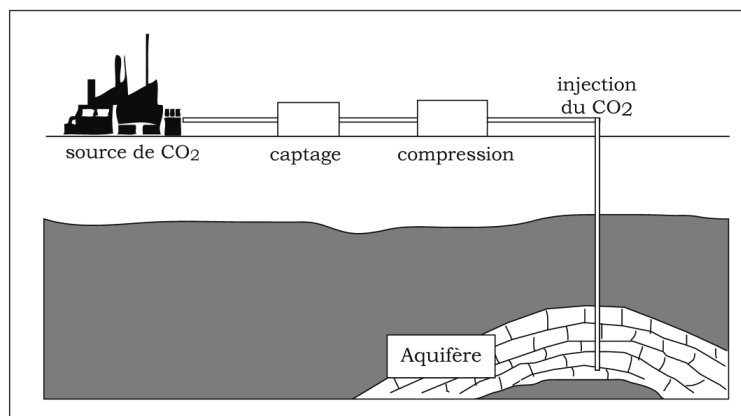


- Q1. Donner le nom de l'état physique dans chacune des quatre zones 1, 2, 3 et 4.
- Q2. Donner les noms des points b et c et préciser leur particularité.
- Q3. Un morceau de dioxyde de carbone solide est laissé sur une paillasse dans un laboratoire. Ce solide est-il stable ou au contraire observe-t-on un changement d'état (préciser alors son nom) ?
- Q4. Quelle doit être la pression minimale de l'eau pour que le CO₂ reste solide dans son emplacement de stockage ?
- Q5. Établir l'expression de la pression à la profondeur z dans l'océan ($z = 0$ correspond à la surface de l'océan).
- Q6. Quelle doit être la profondeur minimale de la fosse marine pour que le bloc de CO₂ solide soit dans un état stable ? Commenter le résultat.

B Stockage du CO₂ dans les aquifères salins

La méthode précédente de séquestration présente de nombreux inconvénients : perte partielle du CO₂ lors de la chute du bloc, dissolution du CO₂ dans l'eau de mer (et donc modification de son pH) et risque de libération brutale du CO₂ piégé.

Une solution raisonnable est de réinjecter le CO₂ dans le sous sol et de le piéger dans un aquifère salin.



Le CO₂ gazeux est capté à la sortie, par exemple, d'une usine. Il subit alors une série de compressions successives jusqu'à obtention d'un fluide. Ce dernier est ensuite injecté dans un aquifère salin dont la profondeur est nécessairement supérieure à 800 m. Dans de telles conditions de température et de pression le CO₂ est supercritique. Moins dense que la saumure de l'aquifère, il monte puis s'accumule sous un piège structural (une roche composée par exemple d'argile).

B.1 Première compression du dioxyde de carbone gazeux

On considère une quantité n_0 de CO₂ occupant un volume $V_0 = 10 \text{ m}^3$ à une température $T_0 = 298 \text{ K}$ et une pression $P_0 = 1,0 \text{ bar}$. Ce gaz, que l'on considérera comme parfait, et subit les transformations suivantes :

1. mis au contact d'un thermostat à la température $T_1 = 280 \text{ K}$ et à volume constant,
2. comprimé très lentement (tout en restant au contact du thermostat) de façon à réduire son volume à $V_1 = 2,5 \text{ m}^3$.

Toutes les grandeurs demandées dans la suite devront être exprimées uniquement en fonction des données de l'énoncé : P_0 , V_0 , T_0 , T_1 , V_1 .

Q7. Représenter schématiquement sur un diagramme de Clapeyron ces deux transformations. L'allure et le sens de parcours des transformations devront être justifiées.

Q8. Pour la première transformation, exprimer le travail et le transfert thermique reçu par le gaz. Faire les applications numériques.

Q9. Pour la première transformation, exprimer puis calculer l'entropie échangée par le gaz.

Q10. Calculer l'entropie créée lors de la première transformation. Commenter brièvement les signes des valeurs trouvées aux questions Q9 et Q10.

Q11. Pour la deuxième transformation, calculer le travail et le transfert thermique reçus par le gaz.

Q12. Pour la deuxième transformation, calculer l'entropie échangée par le gaz.

Q13. Calculer l'entropie créée lors de la deuxième transformation. Commenter brièvement.

B.2 Compressions suivantes du CO₂

Le diagramme de CLAPEYRON et des données thermodynamiques sont disponibles sur le **document réponse (Figure A)**.

Q14. Compléter le diagramme en indiquant les températures, et les états à l'équilibre. Tracer l'isotherme à $T = 295 \text{ K}$.

La quantité n_0 de CO_2 gazeux (de la B.1) est à présent soumise à diverses transformations la faisant passer par les états A, B, C et D caractérisés par leur température et leur volume :

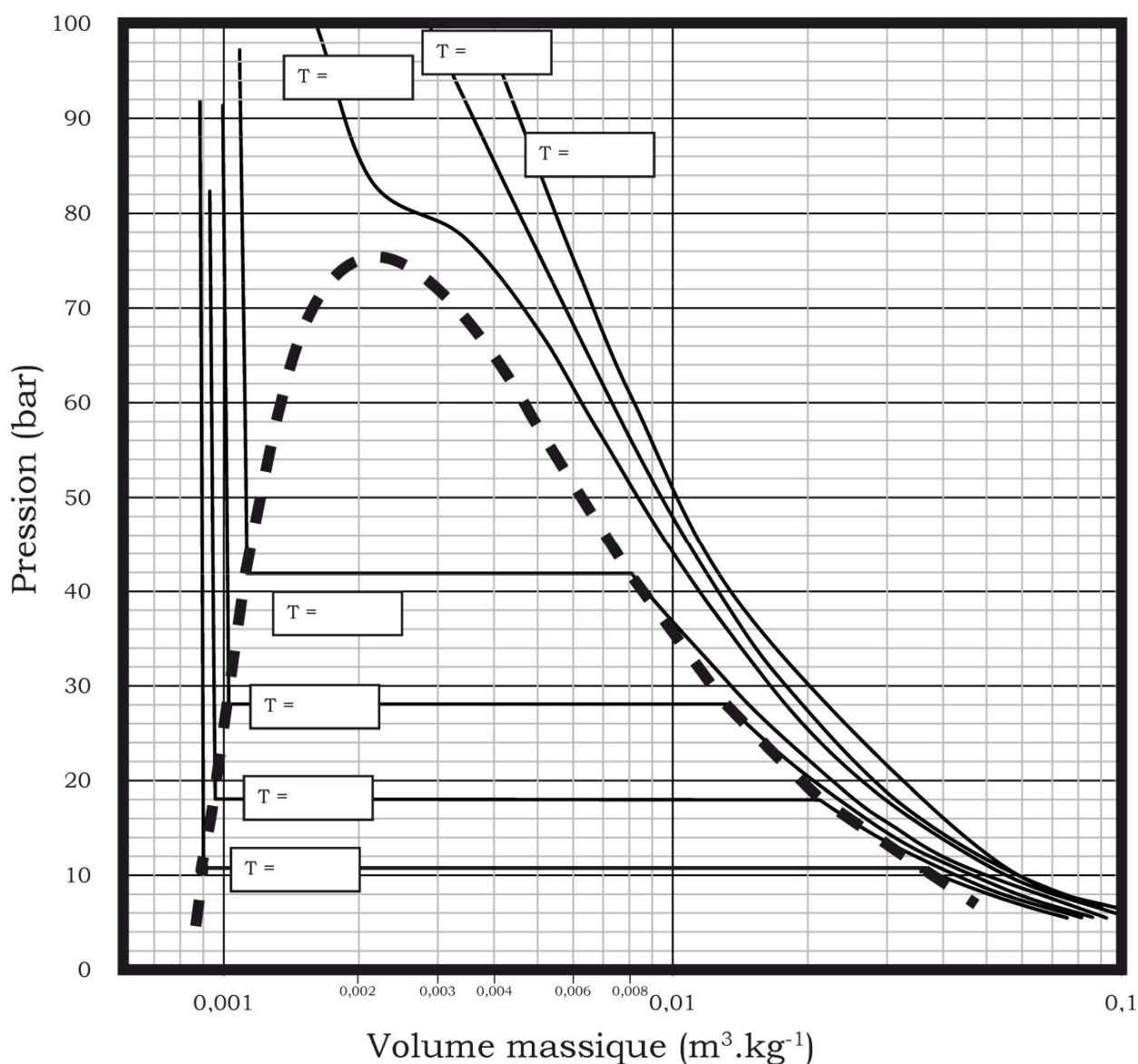
$$T_A = 280 \text{ K} ; V_A = 120 \text{ L} \quad T_B = 280 \text{ K} ; V_B = 53 \text{ L} \quad T_C = 295 \text{ K} ; V_C = 53 \text{ L} \quad T_D = 310 \text{ K} ; V_D = 53 \text{ L}$$

- Q15. Calculer la masse de CO_2 , correspondant à la quantité de matière n_0 de la B.1 (compte tenu des valeurs de V_0 , T_0 et P_0).
- Q16. Déterminer les volumes massiques du système à chaque état.
- Q17. Placer les points A, B, C et D sur le diagramme de CLAPEYRON (**Document réponse figure A**) et préciser l'état physique du CO_2 pour chacun de ces états.
- Q18. Préciser la pression pour chacun des états A, B, C et D.
- Q19. Dans le cas de systèmes biphasiques, déterminer la composition massique du mélange (titre massique en vapeur, puis masse en vapeur et masse en liquide). On utilisera le diagramme de Clapeyron et le tableau de données thermodynamiques.
- Q20. Calculer l'entropie échangée et l'entropie créée pour une transformation isotherme de A vers B.

DOCUMENT RÉPONSE À RENDRE

NOM : _____

Prénom : _____



L'abscisse est logarithmique : la pression est tracée en fonction de $\log(V_{\text{massique}})$

Sont représentées les isothermes pour les températures suivantes :
340 K ; 325 K ; 310 K ; 280 K ; 265 K ; 250 K et 235 K

T (K)	235	250	265	280	295
P_{sat} (pression de vapeur saturante en bar)	10,7	18,0	28,1	41,9	59,5
v_{ℓ} (volume massique du liquide saturant en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	$9,0 \times 10^{-4}$	$9,6 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$
v_v (volume massique de la vapeur saturante en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	$3,6 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-3}$	$4,7 \times 10^{-3}$

FIGURE A – Diagramme de CLAPEYRON du CO_2 et Données thermodynamiques relatives au CO_2