

DM9 : Thermodynamique

Exercice 1 : SÉQUESTRATION DU CO₂

Les activités humaines ont accru sensiblement le taux de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère : autour de 280 ppm il y a 250 ans, il est actuellement de 387 ppm (soit une augmentation de 38 %). Afin de ne pas dépasser la limite de 450 ppm au-delà de laquelle les conséquences les plus dramatiques du réchauffement climatique seront inévitables de nombreuses options sont envisagées afin de limiter les rejets de CO₂ dans l'atmosphère.

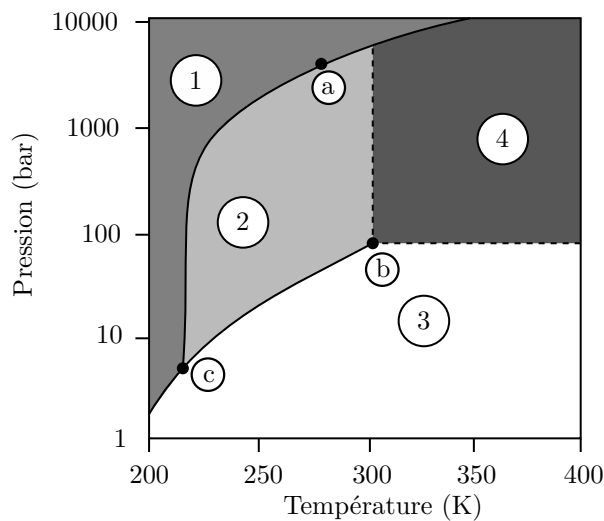
Masse volumique de l'océan	$\rho_0 = 1,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Température de l'océan	$T_0 = 280 \text{ K}$
Pression à la surface de l'océan	$P_0 = 1 \text{ bar}$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
Masse molaire du CO ₂	$M_{\text{CO}_2} = 44,0 \text{ g mol}^{-1}$

TABLE 1 – Données thermodynamiques relatives au problème

Une première proposition un peu simple 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).

On donne ci-dessous le diagramme de phases de CO₂.



Caractéristiques des points a, b, c :

Point a, $T_a = 280 \text{ K}$, $P_a = 4 \times 10^3 \text{ bar}$;

Point b, $T_b = 304 \text{ K}$, $P_b = 70,4 \text{ bar}$;

Point c, $T_c = 216 \text{ K}$, $P_c = 5,11 \text{ bar}$.

FIGURE 1 – Diagramme du phases du CO₂.

1. Donner le nom de l'état physique dans chacune des quatre zones 1, 2, 3 et 4.
2. Donner les noms des points c et b et préciser leur particularité.
3. Un morceau de dioxyde de carbone solide est laissé sur une table dans un laboratoire. Ce solide est-il stable ou au contraire observe-t-on un changement d'état (préciser alors son nom) ?
4. Quelle doit être la pression minimale de l'eau pour que le CO₂ reste solide dans son emplacement de stockage ?
5. On note z la profondeur du point considéré avec $z = 0$ correspondant à la surface de l'océan. Sachant que dans le cas d'un fluide au repos, la pression à une profondeur z est $P(z) = P(0) + \rho g z$. Quelle devrait être la profondeur minimale de la fosse marine pour que le bloc de CO₂ reste solide ? Commenter le résultat.

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 plus raisonnable est de réinjecter le CO₂ dans le sous-sol et de le piéger dans un aquifère salin (réserve souterraine d'eau salée).

Le CO₂ gazeux est capté, il subit des 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 l'eau de l'aquifère, il monte puis s'accumule sous un piège structural (une roche composée par exemple d'argile).

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 $p_0 = 1 \text{ bar}$.

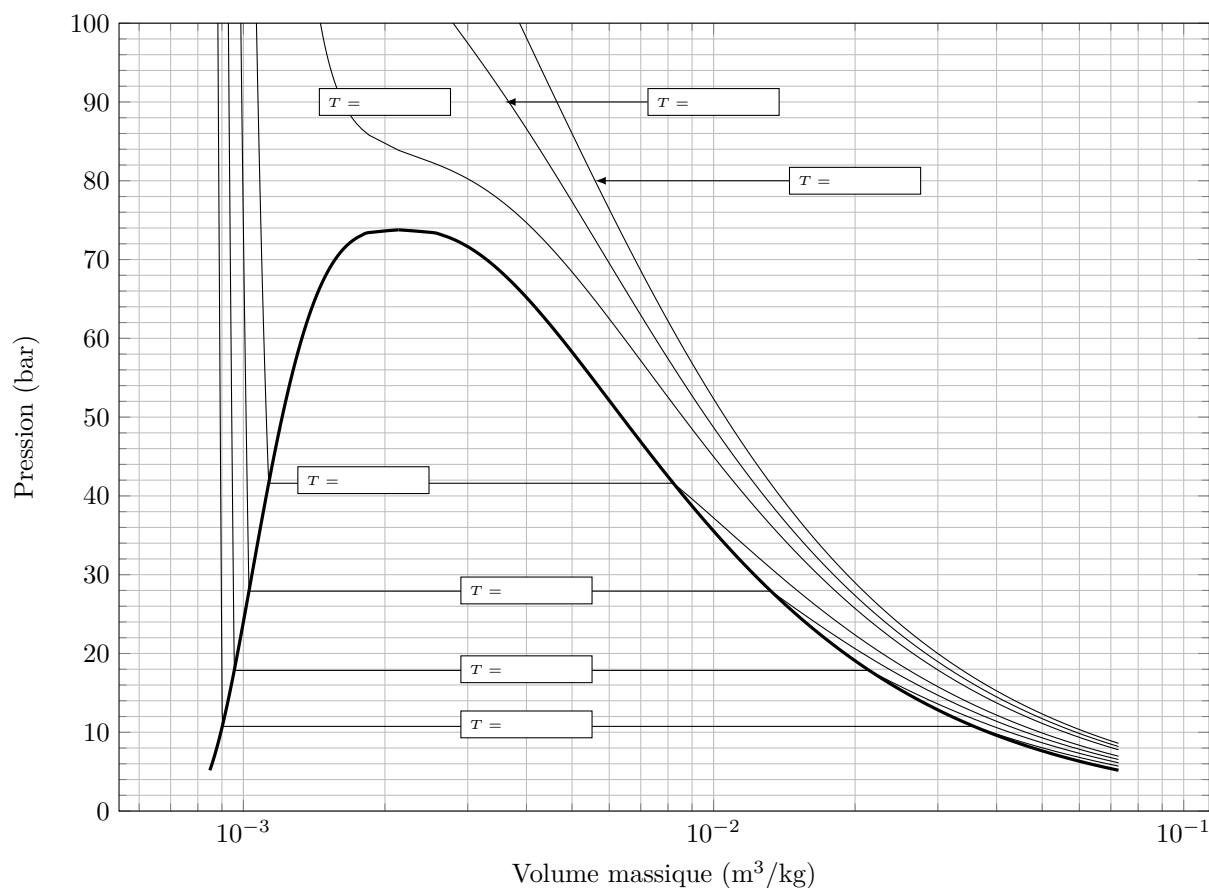
On désire vérifier la validité du modèle du gaz parfait appliqué au CO_2 gazeux. Pour un kilogramme de CO_2 gazeux à une température de 280 K, on obtient les résultats suivants :

P (bar)	0,804	0,868	0,968	1,060	1,130	1,179
V (m^3)	0,658	0,610	0,547	0,499	0,468	0,449

6. Rappeler les hypothèses du modèle du gaz parfait. Quelle relation lie P , V , n et T dans ce modèle.

7. Ce modèle est-il compatible avec les résultats expérimentaux ?

On donne ci-dessous le diagramme de Clapeyron et des données thermodynamiques relatives à CO_2 .



$T(\text{K})$	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 à l'ébullition en $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	$9,0 \times 10^{-4}$	$9,6 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$
v_v (volume massique de la vapeur saturante en $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	$3,6 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-3}$	$4,7 \times 10^{-3}$

TABLE 2 – Données thermodynamiques relatives au dioxyde de carbone. La vapeur saturante correspond à la vapeur en équilibre avec du liquide.

8. Compléter le diagramme de Clapeyron (températures) et tracer l'isotherme à 295 K.

9. Identifier sur le diagramme les courbes de rosée et d'ébullition.

10. À une température de 295 K et à la pression de 59 bar, le gaz peut-il être considéré comme parfait ?

La quantité n_0 de CO_2 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 :

Point	A	B	C	D
Température (K)	280	280	295	310
Volume (ℓ)	120	53	53	53

11. Placer les points A , B , C et D sur le diagramme de Clapeyron et préciser l'état physique du CO_2 pour chacun de ces états.

12. Préciser la pression pour chacun des états A , B , C et D .

13. Dans le cas de systèmes biphasiques, préciser la composition massique du mélange.

14. Déterminer le travail fourni par le compresseur pour effectuer la transformation $A \rightarrow B$