



2024-2025

Master « Chimie Physique et Analytique »

UE « Fondamentaux de l'Analyse »

**Quelques exercices concernant des
fondamentaux utilisés en Génie des
Procédés**

Christian Jallut
Département « Génie Electrique et des Procédés »
Laboratoire d'Automatique, de Génie des Procédés et de Génie
Pharmaceutique
LAGEPP, UMR CNRS-UCBL 5007

Manipulation de quelques variables

1. Un réservoir de volume $V = 10 \text{ m}^3$ contient de l'eau pure à l'état de vapeur. L'état de cette vapeur est uniforme, c'est-à-dire que sa masse volumique est la même dans tout le volume.

a) A l'aide des données fournies dans le paragraphe **Propriétés de l'eau**, calculer M , la masse d'eau contenue dans le réservoir pour :

- $P = 100 \text{ bar}$, $T = 700 \text{ K}$;
- $P = 1 \text{ bar}$, $T = 700 \text{ K}$.

b) Faire les mêmes calculs dans l'hypothèse où on pourrait considérer la vapeur d'eau comme un gaz parfait.

c) Conclusion

Rappel : constante universelle du gaz parfait $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Propriétés de l'eau:

- masse molaire de l'eau : 18 g.mol^{-1} ;
- propriétés de la vapeur d'eau (« steam » en anglais) : extrait de l'ouvrage Perry *et al.* (1997), Chemical Engineers Handbook, 7th edition, McGraw-Hill.

TABLE 2-354 Thermodynamic Properties of Compressed Steam*

Temperature, K	Pressure, bar										
	0.1	0.5	1	5	10	20	40	60	80	100	
350	v	16.12	1.027-3	1.027-3	1.027-3	1.027-3	1.026-3	1.025-3	1.024-3	1.023-3	1.023-3
	h	2644	321.7	231.8	322.1	322.5	323.3	324.9	326.4	328.1	329.7
400	v	18.44	3.67	1.827	1.067-3	1.067-3	1.066-3	1.065-3	1.064-3	1.063-3	1.061-3
	h	2739	2735	2730	533.1	533.4	534.1	535.4	536.8	538.2	539.6
450	v	20.75	4.14	2.063	0.410	1.124-3	1.123-3	1.121-3	1.119-3	1.118-3	1.116-3
	h	2835	2833	2830	2804	749.0	749.8	750.8	751.9	753.0	754.1
500	v	23.07	4.61	2.298	0.452	0.221	0.104	1.201-3	1.198-3	1.196-3	1.193-3
	h	2932	2931	2929	2912.4	2891.2	2839.4	975.9	976.3	976.8	977.3
600	v	27.7	5.53	2.76	0.548	0.271	0.133	0.0630	0.0396	0.0276	0.0201
	h	3131	3130	3129	3120	3109	3087	3036	2976	2906	2820
700	v	32.3	6.46	3.23	0.643	0.319	0.158	0.0769	0.0500	0.0346	0.0283
	h	3335	3335	3334	3328	3322	3307	3278	3247	3214	3179
800	v	36.9	7.38	3.69	0.736	0.367	0.182	0.0889	0.0589	0.0436	0.0343
	h	3547	3546	3546	3542	3537	3526	3506	3485	3464	3442
900	v	41.5	8.31	4.15	0.829	0.414	0.206	0.102	0.0674	0.0501	0.0398
	h	3765	3765	3764	3761	3757	3750	3737	3719	3704	3688
1000	v	46.2	9.23	4.615	0.921	0.460	0.229	0.114	0.0758	0.0564	0.0449
	h	3990	3990	3990	3987	3984	3978	3967	3955	3944	3935
1500	v	69.2	13.9	6.92	1.385	0.692	-0.341	0.1730	0.1153	0.0865	0.0692
	h	5231	5228	5227	5225	5224	5221	5217	5212	5207	5203
2000	v	93.0	18.6	9.26	1.850	0.925	0.462	0.231	0.1543	0.1157	0.0926
	h	6832	6734	6706	6662	6649	6639	6629	6623	6619	6616
2500	v	123.7	24.0	11.90	2.35	1.171	0.583	0.291	0.1942	0.1457	0.1166
	h	10417	9330	9046	8621	8504	8413	8342	8307	8285	8269
	s	13.95	12.73	12.28	11.35	10.80	10.62	10.26	10.06	9.920	9.810

* v = specific volume, m^3/kg ; h = specific enthalpy, kJ/kg ; s = specific entropy, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. The notation 1.027-3 signifies 1.027×10^{-3} .

2. On considère un barreau cylindrique de Fer dont les dimensions sont les suivantes :

- longueur : $L = 10 \text{ m}$;
- diamètre : $D = 5 \text{ cm}$.

La température dans ce barreau n'est pas uniforme : elle varie selon l'axe du cylindre selon la relation : $T(x) = ax + b = -50x + 800 \text{ (K)}$ (figure 1).

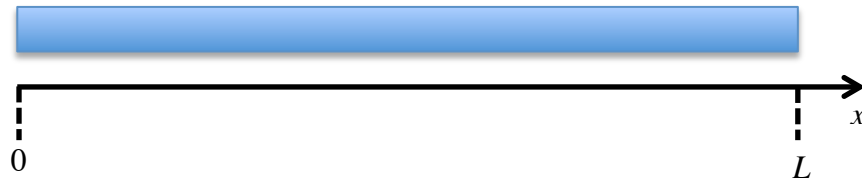


Figure 1

- Exprimer M , la masse du barreau de Fer.
- A l'aide des données fournies dans le Tableau 1 et la figure 2 (voir le paragraphe **Propriétés du Fer solide**), proposer une équation permettant de calculer la masse volumique du Fer solide en fonction de la température entre 300 et 800 K.
- Vérifier sur quelques points la validité de l'équation proposée.
- Calculer M , la masse du barreau de Fer.

Propriétés du Fer solide : le Tableau 1 contient les valeurs de la masse volumique du Fer en fonction de la température.

TABLE 2-119 Density (kg/m³) of Selected Elements as a Function of Temperature

Temperature, K*	Element symbol												
	Al	Be†	Cr	Cu	Au	Ir	Fe	Pb	Mo	Ni	Pt	Ag	Zn†
50	2736	3650	7160	9019	19,490	22,600	7910	11,570	10,260	8960	21,570	10,620	7280
100	2732	3640	7155	9009	19,460	22,580	7900	11,520	10,260	8950	21,550	10,600	7260
150	2726	3630	7150	8992	19,420	22,560	7890	11,470	10,250	8940	21,530	10,575	7230
200	2719	3620	7145	8973	19,380	22,540	7880	11,430	10,250	8930	21,500	10,550	7200
250	2710	3610	7140	8951	19,340	22,520	7870	11,380	10,250	8910	21,470	10,520	7170
300	2701	3600	7135	8930	19,300	22,500	7860	11,330	10,240	8900	21,450	10,490	7135
400	2681	3580	7120	8885	19,210	22,450	7830	11,230	10,220	8860	21,380	10,430	7070
500	2661	3555	7110	8837	19,130	22,410	7800	11,130	10,210	8820	21,330	10,360	7000
600	2639	3530	7080	8787	19,040	22,360	7760	11,010	10,190	8780	21,270	10,300	6935
800	2591		7040	8686	18,860	22,250	7690	10,430	10,160	8690	21,140	10,160	6430
1000	2365		7000	8568	18,660	22,140	7650	10,190	10,120	8610	21,010	10,010	6260
1200	2305		6945	8458	18,440	22,030	7620	9,940	10,080	8510	20,870	9,850	
1400	2255		6890	7920	17,230	21,920	7520		10,040	8410	20,720	9,170	
1600			6760	7750	16,950	21,790	7420		10,000	8320	20,570	8,980	
1800			6700	7600		21,660	7320		9,950	7690	20,400		
2000				7460		21,510	7030		9,900	7450	20,220		

NOTE: Above the horizontal line the condensed phase is solid; below the line, it is liquid.

Tableau 1 : extrait de l'ouvrage Perry *et al.* (1997), Chemical Engineers Handbook, 7th edition, McGraw-Hill.

La figure 2 représente les valeurs de la masse volumique du Fer solide entre 300 et 800 K.

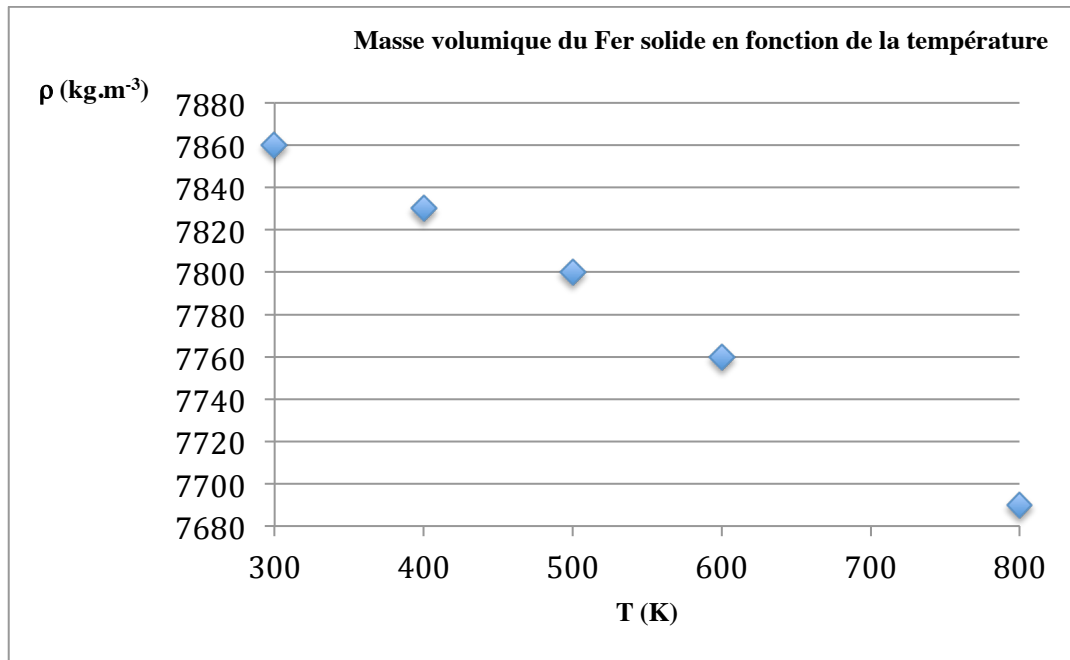


Figure 2 : masse volumique du Fer solide entre 300 et 800 K

3. De l'eau liquide à une température de 20 °C et à la pression atmosphérique circule dans une canalisation cylindrique de diamètre $D = 5$ cm à la vitesse supposée uniforme de $w = 2$ m.s⁻¹ orientée selon l'axe du tube.

- Calculer le flux ou débit volumique d'eau liquide.
- Calculer le flux ou débit massique d'eau liquide.

4. Dans les mêmes conditions de pression et de température, l'eau liquide circule cette fois dans une canalisation cylindrique de diamètre $D = 1$ cm. Dans ce cas, on ne peut plus considérer la vitesse selon l'axe du tube comme uniforme mais fonction de la position radiale selon la relation dite de Poiseuille :

$$w(r) = w^{\max} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)$$

La vitesse du liquide est nulle au contact de la paroi ($r = R$, le rayon de la canalisation) et maximum au centre du tube ($r = 0$). On prendra $w^{\max} = 0,4$ m.s⁻¹. L'établissement de ce profil de vitesse reflète l'influence de la viscosité du liquide.

- Calculer le flux ou débit volumique d'eau liquide. En déduire l'expression d'une vitesse moyenne qui donnerait le même débit volumique.
- Calculer le flux ou débit massique d'eau liquide.

Propriétés de l'eau liquide : à 20 °C et la pression atmosphérique, la masse volumique de l'eau liquide est de 998,2 kg.m⁻³ (Perry *et al.* (1997), Chemical Engineers Handbook, 7th edition, McGraw-Hill).

5. Un réservoir contient un mélange homogène fluide (liquide ou vapeur indifféremment) dont l'état est uniforme. Les quantités de constituants sont les suivantes : 30 kg de benzène (constituant 1), 50 kg de toluène (constituant 2), 40 kg de xylène (constituant 3) (exercice inspiré de Didier Ronze *et al.* (2013), Introduction au génie des procédés. Applications et développements, Lavoisier, Tec et Doc).

- Calculer ω_i les fractions massiques de chacun des constituants.
- Calculer x_i les fractions molaires de chacun des constituants.
- Calculer \bar{M} , la masse molaire de ce mélange.

A partir de l'instant $t = 0$, on prélève en sortie un flux massique constant de $q_{ms} = 0,6 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ (figure 3).

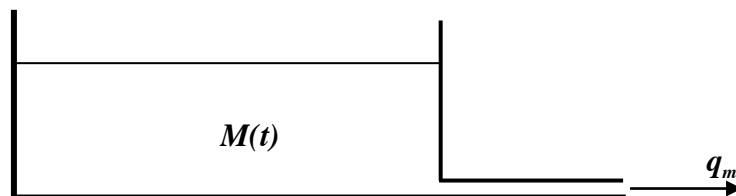


Figure 3

- Calculer $q_{ms,i}$, le flux massique de sortie de chacun des constituants en précisant l'hypothèse adoptée.
- Calculer $F_{s,i}$ le flux molaire de sortie de chacun des constituant.
- Calculer de deux façons le flux molaire total de sortie F_s .

Propriétés : masses molaires des constituants.

- Benzène : $\bar{M}_1 = 78 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- Toluène : $\bar{M}_2 = 92 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- Xylène : $\bar{M}_3 = 106 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

6. On considère une canalisation de diamètre $D = 5 \text{ cm}$ dans laquelle circule de la vapeur d'eau à une vitesse moyenne de $w = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Calculer le débit massique de vapeur d'eau pour les conditions suivantes :

- $P = 100 \text{ bar}$, $T = 700 \text{ K}$;
- $P = 1 \text{ bar}$, $T = 700 \text{ K}$.

On pourra se reporter aux résultats de l'exercice 1. On fera le calcul avec les propriétés réelles et en considérant l'approximation du gaz parfait.

7. Dans l'article D. Pecar, V. Dolecek (2005), Volumetric properties of ethanol-water mixtures under high temperatures and pressures, *Fluid Phase Equilibria*, 230, 36-44 sont reproduits des résultats de mesure de la masse volumique de mélanges liquides d'éthanol

(constituant 1) et d'eau (constituant 2). Les auteurs ont utilisé un densimètre à tube vibrant. Par exemple, pour une fraction molaire en éthanol de $z_1 = 0,35$, à $T = 75\text{ °C}$ et $P = 10\text{ MPa}$, les auteurs ont mesuré $\rho = 853,6\text{ kg.m}^{-3}$.

- a) Calculer \bar{M} , la masse molaire du mélange.
- b) Calculer la concentration molaire totale c .
- c) Calculer c_1 et c_2 , les concentrations molaires des constituants 1 et 2.
- d) Calculer ω_1 et ω_2 les fractions massiques des constituants 1 et 2.
- e) Calculer de deux façons différentes ρ_1 et ρ_2 , les concentrations massiques des constituants 1 et 2.

Propriétés : masses molaires des constituants.

- éthanol : $\bar{M}_1 = 46\text{ g.mol}^{-1}$;
- eau : $\bar{M}_2 = 18\text{ g.mol}^{-1}$.

La méthode des bilans

1. On trouve à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Accès_à_internet_à_haut_débit le tableau suivant concernant les temps de téléchargement sur Internet en fonction des tailles des contenus et des flux de transmission.

Contenu	Connexion 256 kbit/s	Connexion 2 Mbit/s	Connexion 10 Mbit/s	Connexion 100 Mbit/s
Page d'accueil de Google (160 kO)	00 h 00 min 05 s	00 h 00 min 01 s	00 h 00 min 00 s	00 h 00 min 00 s
Piste de musique (5 MO)	00 h 02 min 36 s	00 h 00 min 20 s	00 h 00 min 04 s	00 h 00 min 00 s
Clip vidéo (20 MO)	00 h 10 min 25 s	00 h 01 min 20 s	00 h 00 min 16 s	00 h 00 min 02 s
CD/ film en basse définition (700 MO)	06 h 04 min 35 s	00 h 46 min 40 s	00 h 09 min 20 s	00 h 00 min 56 s
DVD/ film en haute définition (4 GO)	34 h 43 min 20 s	04 h 26 min 40 s	00 h 53 min 20 s	00 h 05 min 20

Expliquer comment ces valeurs ont été obtenues. L'information est stockée dans les ordinateurs à l'aide de dispositifs électroniques pouvant prendre deux positions, conventionnellement 0 ou 1 : c'est le Bit ou BInary digiT. Un ensemble de 8 Bits est un Octet (O).

2. En début de journée, un parking contient 245 voitures. Grâce à un système de comptage, on a compté à un instant donné 872 entrées et 774 sorties depuis le début de la journée. Le parking disposant de 500 places, combien de places libres s'affichent à cet instant à l'entrée du parking ?

3. On considère le dispositif schématisé figure 1 ci-dessous : un récipient est rempli d'eau liquide à l'aide d'une canalisation fournissant un débit volumique de liquide $q_{ve}(t)$ variant dans le temps selon la courbe donnée figure 2.

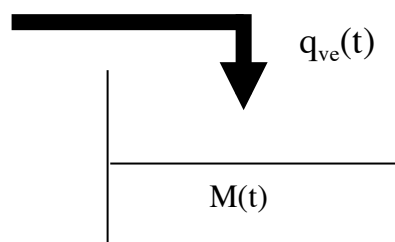
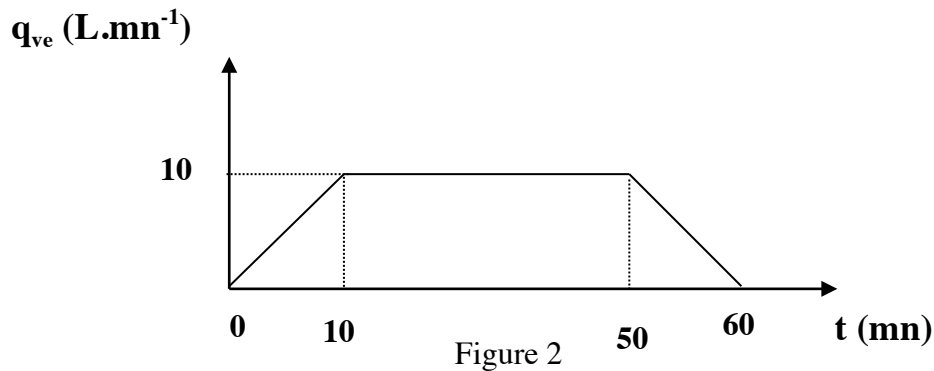


Figure 1



Le récipient étant initialement vide, déterminer la masse qu'il contient au bout des 60 minutes.

Propriété : masse volumique de l'eau liquide supposée constante $\rho = 998,2 \text{ kg.m}^{-3}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. On considère le dispositif schématisé figure 3 : il s'agit d'un mélangeur fonctionnant à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ en régime stationnaire. Il reçoit en entrée deux flux de matière a et b et on soutire le flux s. Les flux d'entrée sont définis comme :

- Flux a : eau liquide pure selon le débit volumique $q_{v,a} = 1,2 \text{ l.s}^{-1}$;
- Flux b : solution aqueuse de NaCl selon le débit volumique $q_{v,b} = 0,5 \text{ l.s}^{-1}$ et la fraction massique de sel $\omega_b = 22,48 \%$.

a) Calculer $q_{m,s}$, le débit massique du liquide en sortie s.

b) Calculer ω_s , la fraction massique de NaCl dans le flux de sortie s.

c) Calculer $q_{v,s}$, le débit volumique du liquide en sortie.

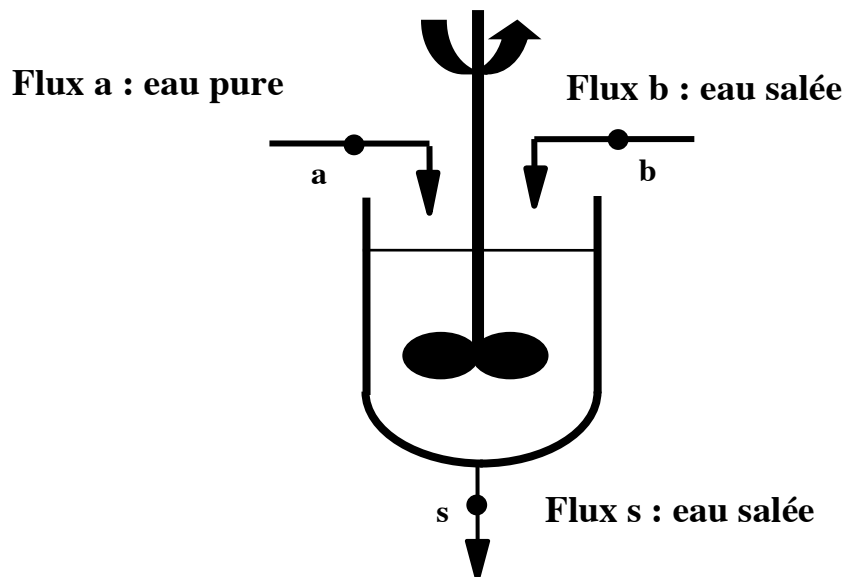


Figure 3

Propriétés :

- masse molaire de NaCl : 58 g.mol^{-1} ;
- les données ci-dessous sont extraites de Handbook of Physics and Chemistry, CRC Press. Il s'agit du volume massique d'une solution aqueuse de NaCl en fonction de la

température et de la molalité en NaCl. Pour l'eau pure liquide à 25 °C, on prendra une masse volumique de 997,045 kg.m⁻³.

Molality in mol NaCl/kg H ₂ O									
T (°C)	0.100	0.250	0.500	0.750	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
Specific volume v in cm ³ /g									
0	0.995732	0.989259	0.978889	0.968991	0.959525	0.925426	0.896292	0.870996	0.848646
10	0.995998	0.989781	0.979804	0.970256	0.961101	0.927905	0.899262	0.874201	0.851958
20	0.997620	0.991564	0.981833	0.972505	0.963544	0.930909	0.902565	0.877643	0.855469
25	0.998834	0.992832	0.983185	0.973932	0.965038	0.932590	0.904339	0.879457	0.857301
30	1.000279	0.994319	0.984735	0.975539	0.966694	0.934382	0.906194	0.881334	0.859185
40	1.003796	0.997883	0.988374	0.979243	0.970455	0.938287	0.910145	0.885276	0.863108
50	1.008064	1.002161	0.992668	0.983551	0.974772	0.942603	0.914411	0.889473	0.867241
60	1.0130	1.0071	0.9976	0.9885	0.9797	0.9474	0.9191	0.8940	0.8716
70	1.0186	1.0127	1.0031	0.9939	0.9851	0.9526	0.9240	0.8987	0.8762
80	1.0249	1.0188	1.0092	0.9999	0.9909	0.9581	0.9293	0.9037	0.8809
90	1.0317	1.0256	1.0157	1.0063	0.9972	0.9640	0.9348	0.9089	0.8858
100	1.0391	1.0329	1.0228	1.0133	1.0040	0.9703	0.9406	0.9144	0.8910

Tableau 1 : volume massique des solutions aqueuses de NaCl (extrait de CRC Handbook of Chemistry and Physics, 96th edition, 2015-2016, Taylor and Francis)