

ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC

SESSION DE NOVEMBRE 2021

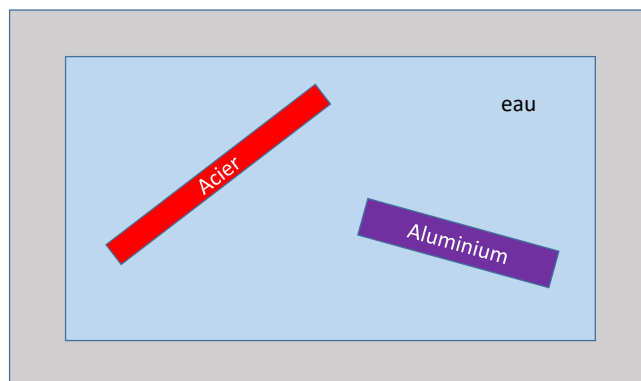
Toute documentation permise
Calculatrices : modèles autorisés seulement
Durée de l'examen : 3 heures

16-CH-A1 – BILAN DES TRANSFORMATIONS ET THERMODYNAMIQUE CHIMIQUE

Question #1 : Bilan d'énergie et d'entropie d'un système fermé – Substances pures (3 pts)

Un bassin d'eau parfaitement isolé et initialement à 25°C est utilisé pour refroidir rapidement une tige d'acier de 1kg traité thermiquement à 1050°C ainsi que d'une pièce d'aluminium de 3kg initialement à une température de 480°C.

Système isolé



En supposant que le bassin d'eau ne doit pas dépasser **50% de la température d'ébullition de l'eau à 225kPa**, répondez aux questions suivantes :

- Déterminez la température maximale acceptable de l'eau du bassin (Annexe 1).
- Définissez l'équation permettant de déterminer la masse d'eau du bassin m_{bassin} en supposant que le système est parfaitement isolé.
- Évaluez la quantité minimale d'eau dans le bassin permettant de respecter la contrainte de température.
- Évaluez la variation d'entropie totale de ce système.

Données utiles:

Substance	Cp
	kJ/kg/K
Acier	0.5
Aluminium	0.902
Eau liquide	4.18

Question #2 : Turbine (H₂O vs CO₂ super-critique) – Cycle de puissance

(6 pts)

Une firme d'ingénierie vous demande de comparer l'utilisation de deux fluides supercritiques distincts (à savoir le CO₂ et le H₂O supercritique) pour l'opération d'**une turbine** idéale permettant ultimement de générer un courant électrique.

Tableau 2.1: Caractéristiques d'opération et propriétés thermodynamiques d'une turbine opérée par le H₂O et le CO₂ supercritique

	H ₂ O	CO ₂
Débit massique	$\dot{m} = 363.3 \frac{kg}{heure}$	$\dot{m} = 363.3 \frac{kg}{heure}$
T _{entrée}	500°C	700°C
P _{entrée}	220.48 bar	220.48 bar
T _{sortie}	125°C	125°C
P _{sortie}	1 bar	1 bar
T _{critique}	647K	304.2K
P _{critique}	220.48 bar	73.76 bar
ω	0.344	0.225
Capacité calorifique (T en K)	$\frac{c_v^{ideal}}{R} = 2.470 + 1.45 \cdot 10^{-3} T + 0.121 \cdot 10^{-5} T^{-2}$	$\frac{c_v^{ideal}}{R} = 4.457 + 1.05 \cdot 10^{-3} T - 1.157 \cdot 10^{-5} T^{-2}$
Paramètre b		$4.29 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{mol}$

a) Définissez le bilan d'énergie pour cette turbine.

b) En utilisant les abaques d'enthalpies résiduelles (Annexe 2), évaluer la puissance mécanique générée par la turbine **lorsque le H₂O est utilisé**.

En supposant que le comportement thermodynamique du CO_2 peut être décrit par l'équation d'état suivante, $p = \frac{RT}{v-b}$ (avec b fourni au tableau 2.1), répondez à cette question :

- c) Déterminer la **proportion relative** de la **puissance mécanique** fournie par la variation de température ainsi que celle fournie par la variation de pression. (On suppose qu'une chute de pression à température constante est suivie par une chute de température à pression constante pour réaliser les calculs.)

Question #3 : Grillage du ZnS - Réaction d'équilibre et bilan d'énergie (4 pts)

On désire réaliser le grillage de **30 tonnes par heure** de ZnS à partir d'**air** à 800°C selon la réaction suivante :



- 1) Évaluez le débit d'**air** (m^3/min STP) nécessaire pour réaliser cette réaction en utilisant le **ratio stœchiométrique** ZnS/O₂ de l'équation ci-haut.
- 2) Déterminez la constante d'équilibre K_{eq} de cette réaction à 800°C ainsi que le ΔS^0 à cette même température. Énoncez vos hypothèses et définissez clairement les unités de vos résultats.
- 3) Calculez la pression d'oxygène d'équilibre du système (réactifs et produits en équilibre) si ce dernier est à une température de 800°C et que le gaz est à une pression de 1 atm. Supposez que le gaz contient principalement du $\text{SO}_2(\text{g})$.
- 4) Évaluez l'interaction de chaleur \dot{Q}^* (MW) associée à ce réacteur si le ZnS et l'air entrent dans le système à 25°C .

Données utiles :

Substance	Masse molaire	$\Delta h_{\text{formation}}^0$	Cp
-----------	---------------	---------------------------------	----

	g/mol	kJ / mol	J/mol/K
ZnS	97.445	-205.18	50
ZnO	81.3794	-350.46	45
O ₂	31.9988	0	30
N ₂	28.0134	0	30
SO ₂	64.0638	-296.84	45

Question #4 : Fugacité, activité et enthalpie de mise en solution**(5pts)**

On désire mélanger 10 moles de NaCl liquide à 800°C avec 10 moles de MgCl₂ liquide également à 800°C pour obtenir une solution tel qu'illustré à la figure ci-dessous.



Sachant que le mélange de 0.7 mole de MgCl₂ à 800°C et de 0.3 mole de NaCl à 800°C mène à une valeur de $\Delta g_{mix.} = -11\text{kJ/mol}$ et que **l'entropie configurationnelle de mélange de cette solution est supposée idéale**, répondez aux questions suivantes :

- 1) Déterminer le coefficient de l'équation de Margules de type « two-suffix » aussi appelée solution régulière permettant de décrire g^E .
- 2) Évaluer l'activité ainsi que la fugacité du MgCl₂ et du NaCl dans la solution produite suite au mélange dans le réacteur présenté ci-haut.
- 3) En supposant que le réacteur permettant de réaliser le mélange est parfaitement isolé, évaluez la température de la solution à sa sortie. Supposer que $\Delta C_p^{mix.} = 0$ pour le mélange.

Données utiles

Tensions de vapeurs $P_{sat.}$ (en atm) :

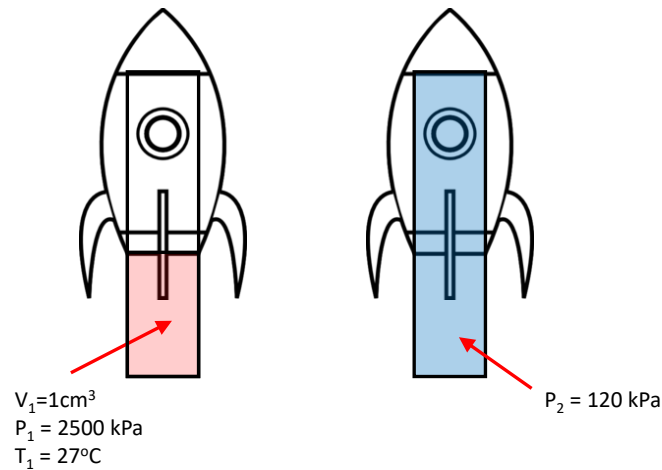
$$\ln(P_{sat.}^{MgCl_2}) = \frac{-23352}{T(K)} + 14.66 \quad \ln(P_{sat.}^{NaCl}) = \frac{-22935}{T(K)} + 13.33$$

Capacité calorifique

$$C_p(MgCl_2) = 90 \text{ J/mol/K}$$

$$C_p(NaCl) = 70 \text{ J/mol/K}$$

Question #5 : Lancement d'une fusée par détente adiabatique d'air comprimée (2 points)



On désire lancer une petite fusée tubulaire creuse propulsée par une détente adiabatique d'air comprimée initialement à 2500 kPa et 27°C . À ce moment, l'air comprimée occupe un volume d'un cm^3 .

Évaluer le **volume final et la température finale de l'air**, ainsi que l'**interaction de travail** résultante si l'air atteint une pression finale de 120 kPa. Supposez que la **loi des gaz parfait s'applique pour toute cette évolution d'état**.

Données utiles:

$$C_p(\text{air}) = 1.004 \text{ kJ/kg/K}$$

$$\text{Masse molaire de l'air} = 28.97 \text{ g/mol}$$

$$C_p - C_v = R$$

Annexe 1 : Tables thermodynamiques à saturation de l'eau

TABLE B.1.2

Saturated Water Pressure Entry

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Specific Volume, m ³ /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
0.6113	0.01	0.001000	206.131	206.132	0	2375.3	2375.3
1	6.98	0.001000	129.20702	129.20802	29.29	2355.69	2384.98
1.5	13.03	0.001001	87.97913	87.98013	54.70	2338.63	2393.32
2	17.50	0.001001	67.00285	67.00385	73.47	2326.02	2399.48
2.5	21.08	0.001002	54.25285	54.25385	88.47	2315.93	2404.40
3	24.08	0.001003	45.66402	45.66502	101.03	2307.48	2408.51
4	28.96	0.001004	34.79915	34.80015	121.44	2293.73	2415.17
5	32.88	0.001005	28.19150	28.19251	137.79	2282.70	2420.49
7.5	40.29	0.001008	19.23674	19.23775	168.76	2261.74	2430.50
10	45.81	0.001010	14.67254	14.67355	191.79	2246.10	2437.89
15	53.97	0.001014	10.02117	10.02218	225.90	2222.83	2448.73
20	60.06	0.001017	7.64835	7.64937	251.35	2205.36	2456.71
25	64.97	0.001020	6.20322	6.20424	271.88	2191.21	2463.08
30	69.10	0.001022	5.22816	5.22918	289.18	2179.22	2468.40
40	75.87	0.001026	3.99243	3.99345	317.51	2159.49	2477.00
50	81.33	0.001030	3.23931	3.24034	340.42	2143.43	2483.85
75	91.77	0.001037	2.21607	2.21711	394.29	2112.39	2496.67
100	99.62	0.001043	1.69296	1.69400	417.33	2088.72	2506.06
125	105.99	0.001048	1.37385	1.37490	444.16	2069.32	2513.48
150	111.37	0.001053	1.15828	1.15933	466.92	2052.72	2519.64
175	116.06	0.001057	1.00257	1.00363	486.78	2038.12	2524.90
200	120.23	0.001061	0.88467	0.88573	504.47	2025.02	2529.49
225	124.00	0.001064	0.79219	0.79325	520.45	2013.10	2533.56
250	127.43	0.001067	0.71765	0.71871	535.08	2002.14	2537.21
275	130.60	0.001070	0.65624	0.65731	548.57	1991.95	2540.53
300	133.55	0.001073	0.60475	0.60582	561.13	1982.43	2543.55
325	136.30	0.001076	0.56093	0.56201	572.88	1973.46	2546.34
350	138.88	0.001079	0.52317	0.52425	583.93	1964.98	2548.92
375	141.32	0.001081	0.49029	0.49137	594.38	1956.93	2551.31
400	143.63	0.001084	0.46138	0.46246	604.29	1949.26	2553.55
450	147.93	0.001088	0.41289	0.41398	622.75	1934.87	2557.62
500	151.86	0.001093	0.37380	0.37489	639.66	1921.57	2561.23
550	155.48	0.001097	0.34159	0.34268	655.30	1909.17	2564.47
600	158.85	0.001101	0.31457	0.31567	669.88	1897.52	2567.40
650	162.01	0.001104	0.29158	0.29268	683.55	1886.51	2570.06
700	164.97	0.001108	0.27176	0.27286	696.43	1876.07	2572.49
750	167.77	0.001111	0.25449	0.25560	708.62	1866.11	2574.73
800	170.43	0.001115	0.23931	0.24043	720.20	1856.58	2576.79

Annexe 2 : Abaques d'enthalpies résiduelles

