

SEMESTRE 5 – UE FONDEMENTS DE LA MÉCANIQUE

THERMODYNAMIQUE

LES CHANGEMENTS D'ÉTAT D'UN CORPS PUR

Gilles PERNOT

gilles.pernot@univ-lorraine.fr

Bureau 404.1 (4^{ème} étage ENSEM)



UE FONDEMENTS DE LA MÉCANIQUE

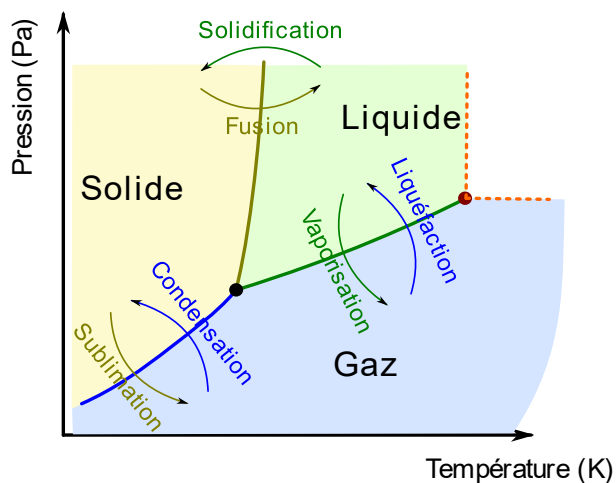
THERMODYNAMIQUE

INTRODUCTION



PARTIE N°1 –INTRODUCTION

Les différents changements de phase



PARTIE N°1 –INTRODUCTION

Règle des phases de Gibbs

- La règle des phases de Gibbs pour un corps pur à plusieurs phases:

$$D = 3 - p$$

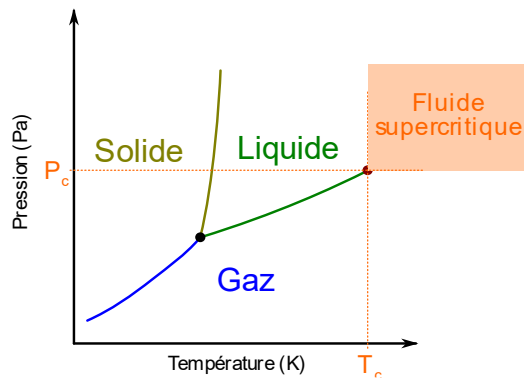
Degré de liberté du système ou
Nbre variables intensives indépendantes

Nombre de phases à
l'équilibre dans le système

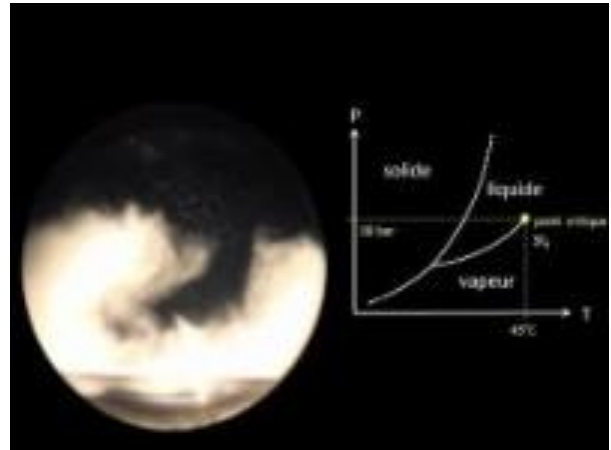
PARTIE N°1 –INTRODUCTION

Un 4^{ème} état de la matière: l'état supercritique

□ L'état supercritique:



□ Transition supercritique de l'hexafluorure de soufre SF_6



UE FONDEMENTS DE LA MÉCANIQUE

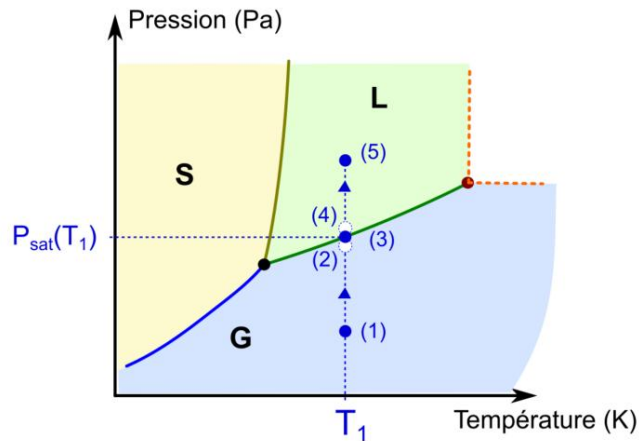
THERMODYNAMIQUE

CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À TEMPÉRATURE CONSTANTE

PARTIE N°2: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À TEMPÉRATURE CONSTANTE

Diagramme de Clapeyron $P(v)$

❑ Expérience de changement de phase à température constante:



7

PARTIE N°2: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À TEMPÉRATURE CONSTANTE

Exemple: pression d'un liquide saturé dans un réservoir

Un réservoir rigide renferme 50 kg d'eau liquide saturée à 90°C.

- ❖ Quelle est la pression dans le réservoir ?
- ❖ Quel est le volume du réservoir ?

8

PARTIE N°2: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À TEMPÉRATURE CONSTANTE

Table de la vapeur d'eau saturée

Caractéristiques physiques de la vapeur d'eau saturée							
Température	Pression	Volume massique		Enthalpie massique		Entropie massique	
		liquide	vapeur	liquide	vapeur	liquide	vapeur
°C	bar	m3/kg	m3/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg-K	kJ/kg-K
0,01	0,006106	0,0010002	206,3	0	2501	0	9,1544
5	0,005719	0,0010001	147,2	21,05	2510	0,0762	9,0241
10	0,012277	0,0010004	106,42	42,04	2519	0,161	8,8914
15	0,017041	0,001001	77,97	62,97	2528	0,2244	8,7806
20	0,02337	0,0010018	57,84	83,9	2537	0,2964	8,6665
25	0,03168	0,001003	43,4	104,81	2547	0,3672	8,557
30	0,04241	0,0010044	32,93	125,71	2556	0,4366	8,4523
35	0,05622	0,0010061	25,24	146,6	2565	0,5049	8,3519
40	0,07375	0,0010079	19,55	167,5	2574	0,5723	8,2559
45	0,09584	0,0010099	15,28	188,4	2582	0,6384	8,1638
50	0,12335	0,0010121	12,04	209,3	2592	0,7038	8,0753
55	0,1574	0,0010145	9,578	230,2	2600	0,7679	7,9901
60	0,19917	0,0010171	7,678	251,1	2609	0,8311	7,9084
65	0,2501	0,0010199	6,201	272,1	2617	0,8934	7,8297
70	0,3117	0,0010228	5,045	293	2626	0,9549	7,7544
75	0,3855	0,0010258	4,133	314	2635	1,0157	7,6815
80	0,4736	0,001029	3,408	334,9	2643	1,0753	7,6116
85	0,5781	0,0010324	2,828	355,9	2651	1,1342	7,5438
90	0,7011	0,0010359	2,361	377	2659	1,1925	7,4787
95	0,8451	0,0010396	1,982	398	2668	1,2502	7,4155
100	1,0131	0,0010435	1,673	419,1	2676	1,3071	7,3547
105	1,2079	0,0010474	1,419	440,2	2683	1,3132	7,2959
110	1,4326	0,0010515	1,21	461,3	2691	1,4184	7,2387
115	1,6905	0,0010559	1,036	482,5	2696	1,4733	7,1832
120	1,9654	0,0010603	0,8917	503,7	2706	1,5277	7,1298
125	2,3208	0,0010649	0,7704	525	2713	1,5814	7,0777
130	2,7011	0,0010697	0,6683	546,3	2721	1,6354	7,0272
135	3,13	0,0010747	0,582	567,5	2727	1,6569	6,9781
140	3,614	0,0010798	0,5087	589	2734	1,7392	6,9304
145	4,155	0,0010651	0,4481	610,5	2740	1,7907	6,8839
150	4,78	0,0010906	0,3926	632,2	2746	1,8418	6,8383

9

PARTIE N°2: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À TEMPÉRATURE CONSTANTE

Exemple: pression d'un liquide saturé dans un réservoir

Un réservoir rigide renferme 50 kg d'eau liquide saturée à 90°C.

- ❖ Quelle est la pression dans le réservoir ?
- ❖ Quel est le volume du réservoir ?

Solution: dans la table pour l'eau saturée, on lit:

- ❖ À $T = 90^{\circ}\text{C} \Rightarrow P_{\text{sat}} = 70,183 \times 10^3 \text{ Pa}$
- ❖ Et le volume massique de liquide saturé $v_L = 1,036 \times 10^{-3} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$
- ❖ Donc pour 50 kg d'eau $V_{\text{eau}} = 50 \times 1,036 \times 10^{-3} = 0,0518 \text{ m}^3$

10

PARTIE N°2: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À TEMPÉRATURE CONSTANTE

La règle des moments

□ Titre X_M : fraction molaire ou massique de la phase gazeuse d'un mélange au point d'équilibre M

$$X_M = \frac{n_g(M)}{n_T} \text{ ou } X_M = \frac{m_g(M)}{m_T}$$

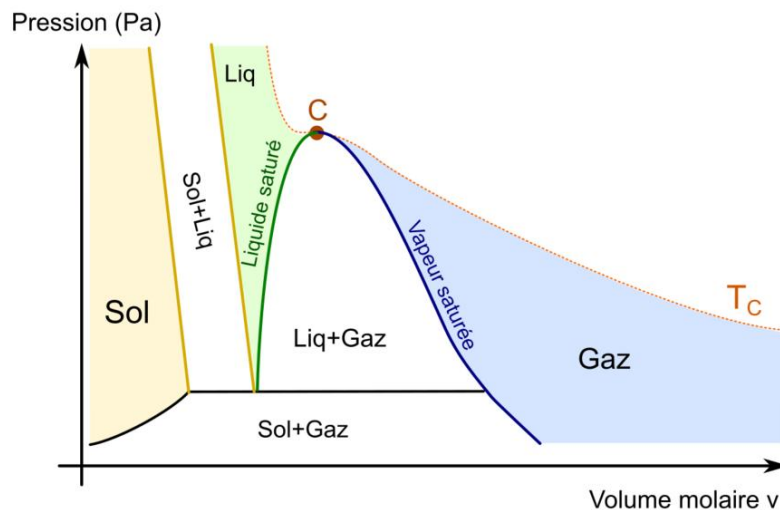
□ Règle des moments:

$$X_M = \frac{v_M - v_L}{v_G - v_L} = \frac{\overline{LM}}{\overline{LG}}$$

11

PARTIE N°2: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À TEMPÉRATURE CONSTANTE

Diagramme de Clapeyron P(v)



12

PARTIE N°2: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À TEMPÉRATURE CONSTANTE

Exemple: Réfrigérant R-134a

Un réservoir de 80 L contient 4 kg de réfrigérant à la pression de 160 kPa.

- ❖ Quelle est la température dans le réservoir ?
- ❖ Quel est le titre ?
- ❖ L'enthalpie du réfrigérant ?
- ❖ Le volume occupé par la phase vapeur ?

13

PARTIE N°2: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À TEMPÉRATURE CONSTANTE

TABLE A-11 Properties of Saturated Refrigerant 134a (Liquid–Vapor): Pressure Table

Pressure Conversions: 1 bar = 0.1 MPa = 10 ² kPa		Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
Press. bar	Temp. °C	Sat. Liquid v _f × 10 ³	Sat. Vapor v _g	Sat. Liquid u _f	Sat. Vapor u _g	Sat. Liquid h _f	Evap. h _{fg}	Sat. Vapor h _g	Sat. Liquid s _f	Sat. Vapor s _g	
0.6	−37.07	0.7097	0.3100	3.41	206.12	3.46	221.27	224.72	0.0147	0.9520	0.6
0.8	−31.21	0.7184	0.2366	10.41	209.46	10.47	217.92	228.39	0.0440	0.9447	0.8
1.0	−26.43	0.7258	0.1917	16.22	212.18	16.29	215.06	231.35	0.0678	0.9395	1.0
1.2	−22.36	0.7323	0.1614	21.23	214.50	21.32	212.54	233.86	0.0879	0.9354	1.2
1.4	−18.80	0.7381	0.1395	25.66	216.52	25.77	210.27	236.04	0.1055	0.9322	1.4
1.6	−15.62	0.7435	0.1229	29.66	218.32	29.78	208.19	237.97	0.1211	0.9295	1.6
1.8	−12.73	0.7485	0.1098	33.31	219.94	33.45	206.26	239.71	0.1352	0.9273	1.8
2.0	−10.09	0.7532	0.0993	36.69	221.43	36.84	204.46	241.30	0.1481	0.9253	2.0
2.4	−5.37	0.7618	0.0834	42.77	224.07	42.95	201.14	244.09	0.1710	0.9222	2.4
2.8	−1.23	0.7697	0.0719	48.18	226.38	48.39	198.13	246.52	0.1911	0.9197	2.8
3.2	2.48	0.7770	0.0632	53.06	228.43	53.31	195.35	248.66	0.2089	0.9177	3.2
3.6	5.84	0.7839	0.0564	57.54	230.28	57.82	192.76	250.58	0.2251	0.9160	3.6
4.0	8.93	0.7904	0.0509	61.69	231.97	62.00	190.32	252.32	0.2399	0.9145	4.0
5.0	15.74	0.8056	0.0409	70.93	235.64	71.33	184.74	256.07	0.2723	0.9117	5.0
6.0	21.58	0.8196	0.0341	78.99	238.74	79.48	179.71	259.19	0.2999	0.9097	6.0
7.0	26.72	0.8328	0.0292	86.19	241.42	86.78	175.07	261.85	0.3242	0.9080	7.0
8.0	31.33	0.8454	0.0255	92.75	243.78	93.42	170.73	264.15	0.3459	0.9066	8.0
9.0	35.53	0.8576	0.0226	98.79	245.88	99.56	166.62	266.18	0.3656	0.9054	9.0
10.0	39.39	0.8695	0.0202	104.42	247.77	105.29	162.68	267.97	0.3838	0.9043	10.0
12.0	46.32	0.8928	0.0166	114.69	251.03	115.76	155.23	270.99	0.4164	0.9023	12.0

14

PARTIE N°2: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À TEMPÉRATURE CONSTANTE

Exemple: Réfrigérant R-134a

Un réservoir de 80 L contient 4 kg de réfrigérant à la pression de 160 kPa.

- ❖ Quelle est la température dans le réservoir ?
- ❖ Quel est le titre ?
- ❖ L'enthalpie du réfrigérant ?
- ❖ Le volume occupé par la phase vapeur ?

❖ $T_{\text{sat}} = -15,62^{\circ}\text{C} = 257,53 \text{ K}$

❖ $X_M = 0,158$

❖ L'enthalpie du mélange $H_M = 250,7 \text{ kJ}$

❖ Le volume occupé par la vapeur est 77,7 L et les 2,3 L restant sont occupés par le liquide

15

UE FONDEMENTS DE LA MÉCANIQUE

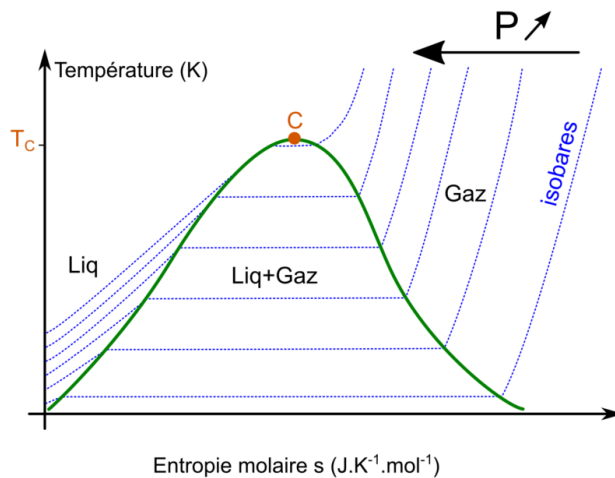
THERMODYNAMIQUE

CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À PRESSION CONSTANTE

PARTIE N°3: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À PRESSION CONSTANTE

Diagramme entropique T(s)

- ❑ On peut raisonner sur les variables T et s pour une transformation réversible à pression constante.
- ❑ En faisant varier les pressions, on reconstruit la courbe de saturation (vert).



17

PARTIE N°3: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À PRESSION CONSTANTE

Equation de Clapeyron

- ❑ Équation permettant de déterminer l'enthalpie massique de changement de phase à partir de la mesure d'une pression, d'une température et d'une variation de volume

$$L_{i \rightarrow j}(T) = T_{sat} \cdot (v_j - v_i) \cdot \left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat}$$

Chaleur latente de changement de phase
en J.kg⁻¹ ou J.mol⁻¹
(de la phase i vers la phase j)

Volume molaire ou
massique

Pente de la ligne de
coexistence du
diagramme P-T

18

PARTIE N°3: CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE VAPEUR À PRESSION CONSTANTE

Exemple: Enthalpie de vaporisation du réfrigérant R-134a

Déterminez l'enthalpie de vaporisation du R-134a à 20°C à l'aide de l'équation de Clapeyron
Comparez la valeur à celle de la valeur tabulée de 182,27 kJ/kg

TABLE A-11 Properties of Saturated Refrigerant 134a

Pressure Conversions: 1 bar = 0.1 MPa = 10 ⁵ kPa		Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg	
Press. bar	Temp. °C	Sat. Liquid v _f × 10 ³	Sat. Vapor v _g	Sat. Liquid u _f	Sat. Vapor u _g
0.6	-37.07	0.7097	0.3100	3.41	206.12
0.8	-31.21	0.7184	0.2366	10.41	209.46
1.0	-26.43	0.7258	0.1917	16.22	212.18
1.2	-22.36	0.7323	0.1614	21.23	214.50
1.4	-18.80	0.7381	0.1395	25.66	216.52
1.6	-15.62	0.7435	0.1229	29.66	218.32
1.8	-12.73	0.7485	0.1098	33.31	219.94
2.0	-10.09	0.7532	0.0993	36.69	221.43
2.4	-5.37	0.7618	0.0834	42.77	224.07
2.8	-1.23	0.7697	0.0719	48.18	226.38
3.2	2.48	0.7770	0.0632	53.06	228.43
3.6	5.84	0.7839	0.0564	57.54	230.28
4.0	8.93	0.7904	0.0509	61.69	231.97
5.0	15.74	0.8056	0.0409	70.93	235.64
6.0	21.58	0.8196	0.0341	78.99	238.74
7.0	26.72	0.8328	0.0292	86.19	241.42
8.0	31.33	0.8454	0.0255	92.75	243.78
9.0	35.53	0.8576	0.0226	98.79	245.88
10.0	39.39	0.8695	0.0202	104.42	247.77
12.0	46.32	0.8928	0.0166	114.69	251.03

R-134a

19

UE FONDEMENTS DE LA MÉCANIQUE

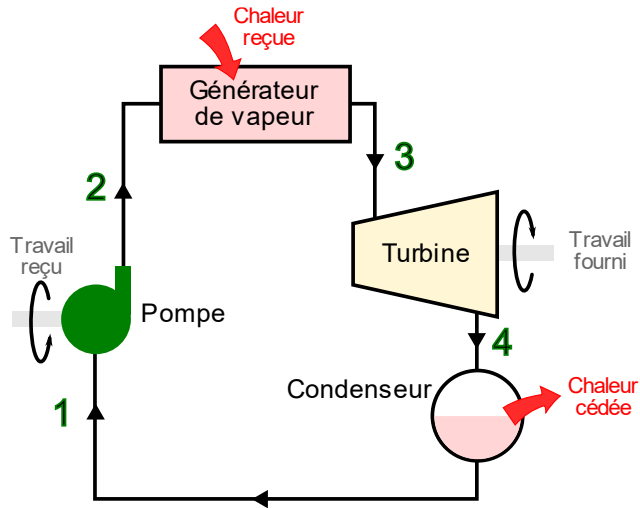
THERMODYNAMIQUE

LE CYCLE À VAPEUR — LE CYCLE DE RANKINE

PARTIE N°4: LE CYCLE À VAPEUR

Les cycles à vapeur – le cycle de Rankine

- Cycles faisant intervenir des changements de phase liquide → gaz

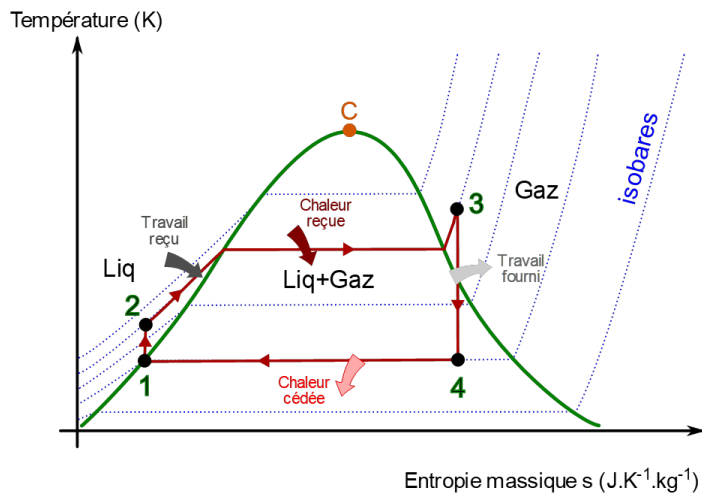


21

PARTIE N°4: LE CYCLE À VAPEUR

Les cycles à vapeur – le cycle de Rankine

- Diagramme T(s) d'un cycle de Rankine



22