

# CHM 103 Transformation de la matière

## Examen final

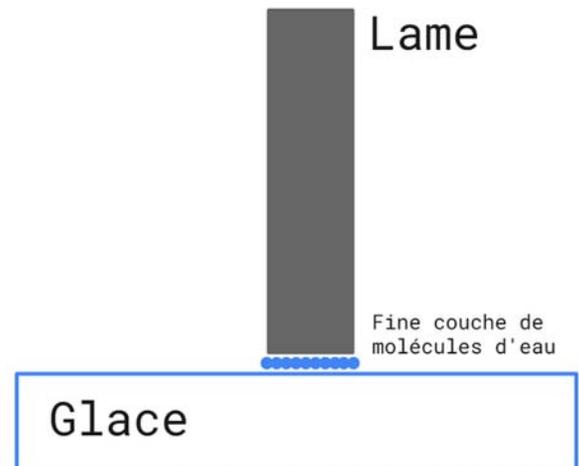
Date : 20 avril 2023  
Responsable : Pedro A. Segura

Local : D3-2031  
Heure : 9h00-12h00

Consignes :

- Seulement les résumés des notes de cours, **écrits à la main**, sont permis.
- L'annexe se trouve aux pages 7 à 8.
- Répondez aux questions sur les feuilles de réponses.

1. (25 points) Le patinage sur glace a été développé en Scandinavie il y a 3000 à 4000 ans. Les premiers sports de compétition organisés utilisant des patins ont été rapportés depuis le XIX<sup>e</sup> siècle en Europe et en 1924 le hockey sur glace a été joué lors des premiers Jeux olympiques d'hiver en Chamonix, France. Aujourd'hui, le patinage sur glace est pratiqué autour de la planète. Malgré sa popularité, les phénomènes physico-chimiques responsables du patinage sur glace ne sont pas encore très bien compris. Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer pourquoi les patins glissent sur la glace. Une des premières hypothèses, formulée séparément par Joly et Reynolds vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, propose que la pression générée par le contact de lame du patin sur la glace cause la formation d'une fine couche d'eau entre ces deux surfaces, permettant ainsi de glissement qui fait possible le patinage sur glace (Figure 1).

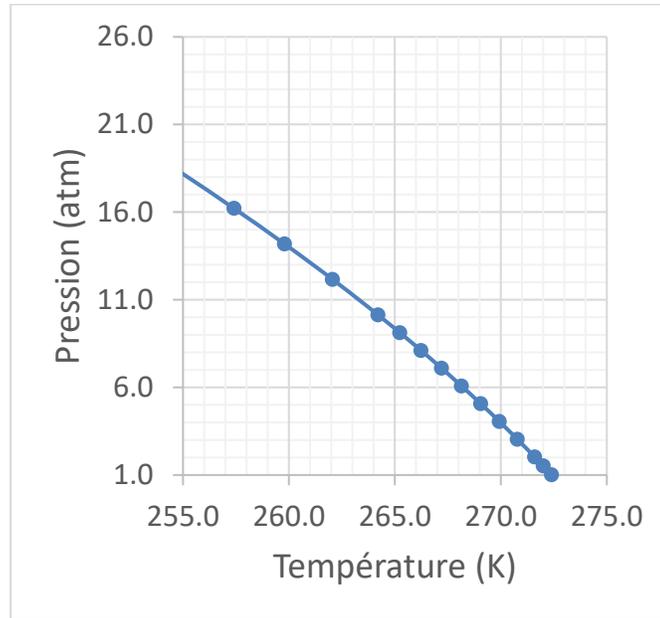


**Figure 1.** À gauche : Lames de patinage sur glace de vitesse. À droite : Vue en coupe de la lame. Source de la photographie : Cádomotus. Speedskating blades and parts. Disponible sur : <https://www.cadomotus.com/en/ice-speed-skating/blades/> (dernière visite 2023-04-07).

- a. (5 points) Calculez la pression, en atmosphères, exercée sur la glace par une personne de 70 kg qui patine avec des patins similaires à ceux de la Figure 1. Supposez que la lame a une longueur de 38 cm et une épaisseur de 1 mm. Supposez qu'en patinant tout le poids est supporté par un seul patin à la fois.
- b. (10 points) À l'aide de la Figure 2, estimez si l'hypothèse de Joly et Reynolds est plausible. Supposez que la température de la glace est de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  et la pression ambiante de 1 atm. Expliquez votre réponse.

**CHM 103 Transformation de la matière**  
**Examen final**

---



**Figure 2.** Diagramme de phase de l'eau. La ligne bleue indique la frontière de phase entre la phase solide (glace I<sub>h</sub>, au-dessous de la ligne) et l'eau liquide (au-dessus de la ligne). Source: Haynes, W. M. (Ed.). (2016). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 97<sup>th</sup> Edition. Melting Point of Ice as a Function of Pressure. CRC Press LLC: Boca Raton, FL.

- c. (10 points) Quelle est la variation de l'énergie de Gibbs pour la transition de phase de la glace en eau, dans les conditions de pression et de température indiquées par la frontière de phase ? Expliquez selon les concepts vus en classe.
2. (25 points) Les besoins actuels pour diminuer l'émission des gaz à effet de serre nécessitent des moyens plus efficaces de chauffer les habitations au Canada. Un moyen moins énergivore à ces fins est l'utilisation des thermopompes. Selon Statistiques Canada, les ventes de thermopompes augmentent depuis l'an 2000 et plus de 700 000 thermopompes ont été installées dans le secteur résidentiel au pays. Le fonctionnement d'une thermopompe est illustré à la Figure 3. Les thermopompes sont des dispositifs électriques permettant de transférer la chaleur entre deux endroits à des températures différentes. Ce transfert de chaleur est possible grâce à un cycle de circulation d'un fluide réfrigérant qui transporte la chaleur d'un endroit froid vers un endroit plus chaud.

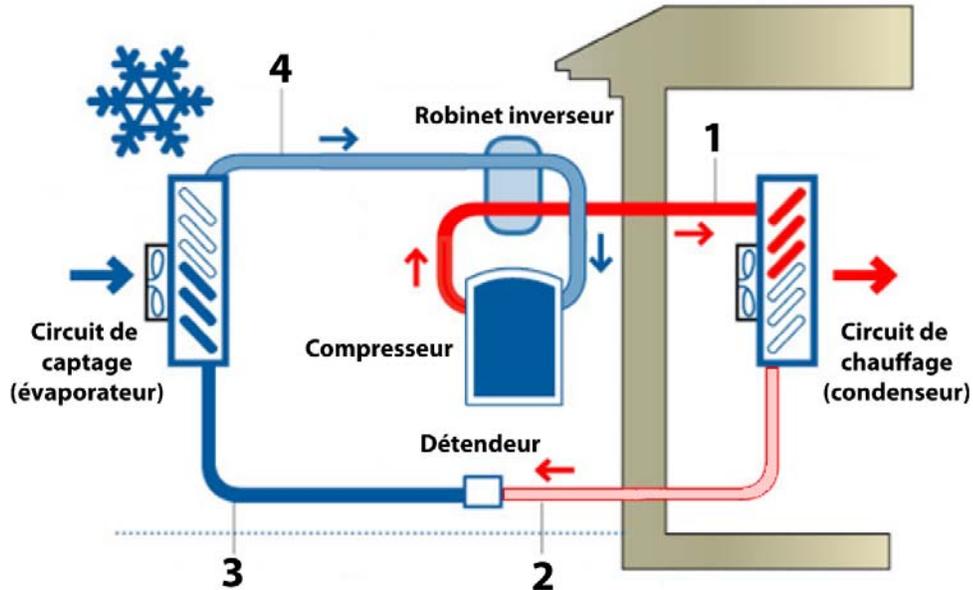
Ce cycle se fait en quatre étapes. D'abord (point 1, Figure 3), le réfrigérant sort du compresseur à l'état gazeux à haute pression et à une haute température (p. ex. 45°C). Ensuite, il est dirigé vers le condenseur (circuit de chauffage) où le réfrigérant chaud dégage une partie de sa chaleur dans un pièce à l'intérieur d'une habitation qui se trouve une température plus froide que le réfrigérant, p. ex., 20 °C. Cette perte de chaleur donne lieu à une condensation du réfrigérant qui se trouve alors dans la phase liquide à la sortie du condenseur.

Le réfrigérant passe ensuite au détendeur (point 2, Figure 3) où sa pression est réduite, ce qui fait vaporiser une partie de ce fluide. À la sortie du détendeur (point 3, Figure 3) le réfrigérant atteint la température la plus basse dans tout le cycle (p. ex. -15°C).

Le réfrigérant est ensuite dirigé vers le vaporiseur (circuit de captage) qui se trouve à l'extérieur de l'habitation. Dans l'évaporateur, le réfrigérant froid absorbe de la chaleur du milieu externe et se réchauffe. Dans cet exemple, le milieu externe se trouve à température de -5 °C

CHM 103 Transformation de la matière  
Examen final

À la sortie de l'évaporateur, au point 4 (Figure 3), le réfrigérant se trouve complètement à l'état vapeur. Finalement, le réfrigérant est dirigé vers le compresseur où le cycle débute encore une fois.



**Figure 3.** Fonctionnement d'une thermopompe dans le mode chauffage. Les petites flèches indiquent la circulation du réfrigérant et les grandes flèches la direction du transfert de chaleur. La circulation du réfrigérant est possible grâce à une différence de pression dans le dispositif. Le compresseur sert à augmenter la pression dans le système et le détendeur à la diminuer. Dans les circuits de captage et de chauffage, des ventilateurs permettent de maximiser le contact entre l'air (externe ou interne, respectivement) et le réfrigérant. Le robinet inverseur permet d'inverser le flux du réfrigérant pour utiliser la thermopompe en mode climatisation. Source : University of Waikato (2014) Heat Pumps and Energy Transfer. Disponible sur: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/241-heat-pumps-and-energy-transfer> (dernière visite 2023-04-08).

- (2 points) Un réfrigérant parmi les plus utilisés actuellement est le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane ( $\text{CF}_3\text{CFH}_2$ ), aussi appelé R-134a. La condensation est un phénomène exothermique ou endothermique? Expliquez l'origine du transfert de chaleur de cette transition de phase en fonction des forces intermoléculaires.
- (2 points) L'évaporation est un phénomène exothermique ou endothermique? Expliquez l'origine du transfert de chaleur de cette transition de phase en fonction des forces intermoléculaires.
- (6 points) Pourquoi les cycles de condensation (dans le circuit de chauffage) et de vaporisation (dans le circuit de captage) du réfrigérant sont-ils essentiels pour le fonctionnement de la thermopompe?
- (10 points) Le R-134a a une enthalpie de vaporisation standard relativement élevée de  $22.15 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Pourquoi cette propriété est-elle essentielle pour un fluide utilisé comme réfrigérant dans une thermopompe comme celle décrite?
- (5 points) Dans l'exemple donné, la thermopompe transporte la chaleur d'un endroit froid ( $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) vers un endroit plus chaud ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Cette direction du flux de la chaleur va à l'encontre des lois de la thermodynamique qui stipulent que le transfert de chaleur spontané se fait d'un endroit chaud vers un endroit froid. Expliquez cette contradiction apparente.

**CHM 103 Transformation de la matière**  
**Examen final**

---

3. (30 points) Vous décidez d'utiliser Chat GPT pour répondre à une question que vous avez trouvée dans le livre *Chimie physique – cours* (4<sup>e</sup> édition) de Paul Arnaud. Voici la requête que vous faites à Chat GPT :

*« Suppose que tu es une personne étudiante dans un examen final de chimie d'un cours de premier cycle universitaire et réponds à la question suivante:*

*Soumises à des températures de plus en plus élevées, les molécules finissent toutes par se dissocier en atomes; à très haute température, il n'existe pas de molécules. Justifiez cette observation en montrant que, pour une réaction de dissociation de type  $XY \rightarrow X + Y$ , il doit effectivement exister une température au-delà de laquelle la dissociation est spontanée. »*

Voici la première réponse de Chat GPT pour cette question :

*L'énergie de liaison est l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons entre les atomes dans une molécule et former des espèces dissociées, telles que des atomes ou des ions. À haute température, les molécules acquièrent de l'énergie cinétique supplémentaire, ce qui peut augmenter leur énergie de vibration, de rotation et de translation. Si cette énergie cinétique supplémentaire est suffisamment élevée pour surmonter l'énergie de liaison des molécules, alors les molécules peuvent se dissocier en atomes.*

*La spontanéité d'une réaction de dissociation peut être évaluée à l'aide de  $\Delta G$ . Pour une réaction de dissociation  $XY \rightarrow X + Y$ , si  $\Delta G$  est négatif, cela indique que la dissociation est spontanée et que la réaction est favorisée à cette température donnée.*

*Selon la relation thermodynamique  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ , à des températures élevées, l'entropie de la réaction de dissociation peut augmenter considérablement, car les atomes ont plus de degrés de liberté de mouvement par rapport aux molécules. Cela peut entraîner une augmentation de  $\Delta S$ , ce qui pourrait favoriser la spontanéité de la réaction de dissociation, même si  $\Delta H$  est positif.*

*En conséquence, à une température suffisamment élevée, l'augmentation de l'entropie peut l'emporter sur l'augmentation de l'enthalpie, rendant la réaction de dissociation spontanée et amenant les molécules à se dissocier en atomes. Il doit donc exister une température au-delà de laquelle la dissociation est spontanée, car l'augmentation de l'entropie à haute température peut compenser l'enthalpie requise pour rompre les liaisons chimiques dans les molécules.*

Vous décidez de reposer la même question et voici ce que Chat GPT vous répond cette fois-ci :

*Lorsqu'un système chimique est soumis à une augmentation de température, les molécules acquièrent de l'énergie cinétique supplémentaire, ce qui augmente leur agitation thermique. Les collisions entre les molécules deviennent plus fréquentes et plus énergétiques. À des températures suffisamment élevées, cette agitation thermique peut atteindre une valeur telle que l'énergie cinétique des molécules devient supérieure à l'énergie de liaison entre les atomes dans la molécule  $XY$ .*

## CHM 103 Transformation de la matière

### Examen final

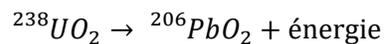
---

L'énergie de liaison est l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons chimiques et séparer les atomes constituant une molécule. Lorsque l'énergie cinétique des molécules dépasse l'énergie de liaison, les liaisons chimiques peuvent être rompues et les molécules se dissocient en atomes, formant ainsi de nouvelles espèces chimiques.

Cela peut être exprimé à l'aide de l'équation d'Arrhenius, qui relie la constante de vitesse ( $k$ ) d'une réaction chimique à la température ( $T$ ) :  $k = Ae^{(-Ea/RT)}$ . Lorsque la température augmente, la valeur de  $T$  dans l'équation d'Arrhenius augmente, ce qui entraîne une augmentation de  $k$ . À une certaine température, appelée température de seuil, la constante de vitesse atteint une valeur telle que la dissociation devient spontanée, c'est-à-dire que la réaction se produit de manière significative sans nécessiter l'apport d'énergie externe. Au-delà de cette température de seuil, les molécules se dissocient spontanément en atomes en raison de leur énergie cinétique élevée, conduisant à la disparition des molécules dans le système.

Donc, à des températures très élevées, toutes les molécules finissent par se dissocier en atomes en raison de l'augmentation de leur énergie cinétique, ce qui justifie l'observation que, à très haute température, il n'existe pas de molécules.

- a. (15 points) Est-ce que la première réponse Chat GPT est correcte? Justifiez votre réponse selon les concepts vus en classe.
  - b. (15 points) Est-ce que la deuxième réponse de Chat GPT est correcte? Justifiez votre réponse selon les concepts vus en classe.
4. (20 points) Dans la croûte terrestre, l'uranium peut se trouver sous la forme de pechblende ( $UO_2(s)$ , Figure 4). La désintégration de l'uranium 238 ( $^{238}U$ ), un des isotopes radioactifs de l'uranium, aboutit dans la formation du plomb 206 ( $^{206}Pb$ ), un isotope stable du plomb. Donc, cette réaction peut être exprimée de la façon suivante :



**Figure 4.** Roche de pechblende. Source : Wikipédia (2023). Uranite. Disponible sur <https://en.wikipedia.org/wiki/Uraninite> (dernière visite: 2024-04-07).

**CHM 103 Transformation de la matière**  
**Examen final**

---

Le temps de demi-vie de cette réaction est de 4.5 milliards d'années. Cette désintégration nucléaire est accompagnée de l'émission des rayons alpha et bêta. La désintégration radioactive d'un élément est une réaction d'ordre 1 qui peut être utilisée pour la datation des roches.

- a. (2 points) Écrivez la loi de vitesse ainsi que la loi de vitesse intégrée de la transformation de la pechblende en oxyde de plomb.
- b. (5 points) Que veut dire qu'une réaction est d'ordre 1? Expliquez selon les concepts vus en classe.
- c. (3 points) Donnez deux approches expérimentales différentes pour déterminer l'ordre d'une réaction.
- d. (10 points) Vous faites un stage d'été dans une compagnie d'extraction minière et on vous demande de calculer l'âge d'une roche de pechblende récemment trouvée. Une analyse chimique a révélé que cette roche contenait un pourcentage massique de 17.8 % ( $m/m$ ) de  $PbO_2$  et le reste était de  $UO_{2(s)}$ . Déterminez l'âge de cette roche en supposant que tout le  $PbO_{2(s)}$  dans la roche provient exclusivement de  $UO_{2(s)}$ .  
*Note : la concentration des minéraux dans les roches s'exprime sous forme de pourcentage massique, donc un pourcentage massique de 10% ( $m/m$ ) correspond à une masse 10 g de minerai par une masse de 100 g de roche.*

# CHM 103 Transformation de la matière

## Examen final

### Annexe

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																
		Pnictogènes    Chalcogènes    Halogènes																																	
1	<b>H</b> Hydrogène 1,008	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">C</div> Solide           <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Hg</div> Liquide           <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">H</div> Gaz           <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Rf</div> Inconnu           <div style="margin-left: 20px;"> <table border="1" style="font-size: x-small;"> <tr><th colspan="2">Métaux</th><th colspan="2">Non-métaux</th></tr> <tr><td>Métaux alcalins</td><td>Métaux alcalino-terreux</td><td>Lanthanides</td><td>Actinides</td></tr> <tr><td>Métaux de transition</td><td>Post-transition</td><td>Métalloïdes</td><td>Non-métaux</td></tr> <tr><td colspan="2"></td><td colspan="2">Gaz rares</td></tr> </table> </div> <div style="margin-left: 20px;"> <table border="1" style="font-size: x-small;"> <tr><td>273</td></tr> </table> </div> </div>																	Métaux		Non-métaux		Métaux alcalins	Métaux alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Post-transition	Métalloïdes	Non-métaux			Gaz rares		273
Métaux		Non-métaux																																	
Métaux alcalins	Métaux alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides																																
Métaux de transition	Post-transition	Métalloïdes	Non-métaux																																
		Gaz rares																																	
273																																			
2	<b>Li</b> Lithium 6,94	<b>Be</b> Béryllium 9,0122																	<b>He</b> Hélium 4,0026																
3	<b>Na</b> Sodium 22,990	<b>Mg</b> Magnésium 24,305																	<b>Ne</b> Néon 20,180																
4	<b>K</b> Potassium 39,098	<b>Ca</b> Calcium 40,078	<b>Sc</b> Scandium 44,956	<b>Ti</b> Titane 47,867	<b>V</b> Vanadium 50,942	<b>Cr</b> Chrome 51,996	<b>Mn</b> Manganèse 54,938	<b>Fe</b> Fer 55,845	<b>Co</b> Cobalt 58,933	<b>Ni</b> Nickel 58,693	<b>Cu</b> Cuivre 63,546	<b>Zn</b> Zinc 65,38	<b>Ga</b> Gallium 69,723	<b>Ge</b> Germanium 72,630	<b>As</b> Arsenic 74,922	<b>Se</b> Sélénium 78,971	<b>Br</b> Brome 79,904	<b>Kr</b> Krypton 83,798																	
5	<b>Rb</b> Rubidium 85,468	<b>Sr</b> Strontium 87,62	<b>Y</b> Yttrium 88,906	<b>Zr</b> Zirconium 91,224	<b>Nb</b> Niobium 92,906	<b>Mo</b> Molybdène 95,95	<b>Tc</b> Technétium (98)	<b>Ru</b> Ruthénium 101,07	<b>Rh</b> Rhodium 102,91	<b>Pd</b> Palladium 106,42	<b>Ag</b> Argent 107,87	<b>Cd</b> Cadmium 112,41	<b>In</b> Indium 114,82	<b>Sn</b> Étain 118,71	<b>Sb</b> Antimoine 121,76	<b>Te</b> Tellure 127,60	<b>I</b> Iode 126,90	<b>Xe</b> Xénon 131,29																	
6	<b>Cs</b> Césium 132,91	<b>Ba</b> Baryum 137,33	57-71	<b>Hf</b> Hafnium 178,49	<b>Ta</b> Tantale 180,95	<b>W</b> Tungstène 183,84	<b>Re</b> Rhenium 186,21	<b>Os</b> Osmium 190,23	<b>Ir</b> Iridium 192,22	<b>Pt</b> Platine 195,08	<b>Au</b> Or 196,97	<b>Hg</b> Mercure 200,59	<b>Tl</b> Thallium 204,38	<b>Pb</b> Plomb 207,2	<b>Bi</b> Bismuth 208,98	<b>Po</b> Polonium (209)	<b>At</b> Astate (210)	<b>Rn</b> Radon (222)																	
7	<b>Fr</b> Francium (223)	<b>Ra</b> Radium (226)	89-103	<b>Rf</b> Rutherfordium (267)	<b>Db</b> Dubnium (268)	<b>Sg</b> Seaborgium (269)	<b>Bh</b> Bohrium (270)	<b>Hs</b> Hassium (277)	<b>Mt</b> Meitnérium (278)	<b>Ds</b> Darmstadtium (281)	<b>Rg</b> Roentgenium (282)	<b>Cn</b> Copernicium (285)	<b>Nh</b> Nihonium (286)	<b>Fl</b> Flerovium (289)	<b>Mc</b> Moscovium (290)	<b>Lv</b> Livermorium (293)	<b>Ts</b> Tennessine (294)	<b>Og</b> Oganesson (294)																	

Les masses atomiques entre parenthèses sont celles de l'isotope le plus stable ou le plus commun.

Tableau Périodique Copyright du design et interface © 1997 Michael Dayah    Ptable.com Dernière mise à jour 16 juin 2017

57 <b>La</b> Lanthane 138,91	58 <b>Ce</b> Cérium 140,12	59 <b>Pr</b> Praséodyme 140,91	60 <b>Nd</b> Néodyme 144,24	61 <b>Pm</b> Prométhium (145)	62 <b>Sm</b> Samarium 150,36	63 <b>Eu</b> Europium 151,96	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157,25	65 <b>Tb</b> Terbium 158,93	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162,50	67 <b>Ho</b> Holmium 164,93	68 <b>Er</b> Erbium 167,26	69 <b>Tm</b> Thulium 168,93	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173,05	71 <b>Lu</b> Lutécium 174,97
89 <b>Ac</b> Actinium (227)	90 <b>Th</b> Thorium 232,04	91 <b>Pa</b> Protactinium 231,04	92 <b>U</b> Uranium 238,03	93 <b>Np</b> Neptunium (237)	94 <b>Pu</b> Plutonium (244)	95 <b>Am</b> Américium (243)	96 <b>Cm</b> Curium (247)	97 <b>Bk</b> Berkélium (247)	98 <b>Cf</b> Californium (251)	99 <b>Es</b> Einsteinium (252)	100 <b>Fm</b> Fermium (257)	101 <b>Md</b> Mendélévium (258)	102 <b>No</b> Nobélium (259)	103 <b>Lr</b> Lawrencium (266)

### Équations

$$Pression = \frac{Force}{Surface}$$

$$Force = masse \times accélération$$

$$a_{pesanteur} = 9.807 \text{ m/s}^2$$

**TABLEAU 3B.1** La constante des gaz,  $R^*$

$8,205\ 74 \times 10^{-2} \text{ L}\cdot\text{atm}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
$8,314\ 46 \times 10^{-2} \text{ L}\cdot\text{bar}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
$8,314\ 46 \text{ L}\cdot\text{kPa}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
$8,314\ 46 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
$62,364 \text{ L}\cdot\text{Torr}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

\* La constante des gaz est reliée à la constante de Boltzmann,  $k$ , par  $R = N_A k$ , où  $N_A$  est la constante d'Avogadro.

**CHM 103 Transformation de la matière**  
**Examen final**

**RELATIONS ENTRE LES UNITÉS\***

Propriété	Unité courante	Unité SI
Masse	2,205 lb (lb = livre)	1,000 kg
	1,000 lb	453,6 g
	1,000 oz (oz = once)	28,35 g
	1,000 ton (= 2000 lb)	907,2 kg
	<b>1 t (t = tonne)</b>	<b>10<sup>3</sup> kg</b>
Longueur	1,094 yd (yd = yard)	1,000 m
	0,3937 in. (in. = inch)	1,000 cm
	0,6214 mi (mi = mile)	1,000 km
	<b>1 in.</b>	<b>2,54 cm</b>
	<b>1 ft (ft = pied)</b>	<b>30,48 cm</b>
	1,000 yd	0,9144 m
	<b>1 Å (Å = ångström)</b>	<b>10<sup>-10</sup> m</b>
Volume	<b>1 L (L = litre)</b>	<b>10<sup>3</sup> cm<sup>3</sup>, 1 dm<sup>3</sup></b>
	1,000 gal (gal = gallon) <sup>†</sup>	3,785 dm <sup>3</sup> (3,785 L)
	1,00 ft <sup>3</sup> (ft <sup>3</sup> = pied cube)	2,83 × 10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> (28,3 L)
	1,00 qt (qt = quart) <sup>†</sup>	9,46 × 10 <sup>2</sup> cm <sup>3</sup> (0,946 L)
Temps	<b>1 min (min = minute)</b>	<b>60 s</b>
	<b>1 h (h = heure)</b>	<b>3600 s</b>
	<b>1 jour</b>	<b>86 400 s</b>
Pression	<b>1 atm (atm = atmosphère)</b>	<b>1,013 25 × 10<sup>5</sup> Pa</b>
	1,000 Torr, soit 1,000 mmHg	133,3 Pa
	1,000 psi (psi = livre par pouce carré)	6,895 kPa
	<b>1 bar</b>	<b>10<sup>5</sup> Pa</b>
Énergie	<b>1 cal</b>	<b>4,184 J</b>
	1 eV	1,60218 × 10 <sup>-19</sup> J; 96,485 kJ·mol <sup>-1</sup>
	<b>1 C·V</b>	<b>1 J</b>
	<b>1 kWh (kWh = kilowatt-heure)</b>	<b>3,600 × 10<sup>3</sup> kJ</b>
	<b>1 L·atm</b>	<b>101,325 J</b>
Conversions de température	(Température Fahrenheit)/°F = $\frac{9}{5} \times$ (Température Celsius)/°C + 32	
	(Température Celsius)/°C = $\frac{5}{9} \times$ {(Température Fahrenheit)/°F - 32}	
	(Température Kelvin)/K = (Température Celsius)/°C + 273,15	

\*Les valeurs en caractères gras sont exactes.

<sup>†</sup>Le quart et le gallon européens et canadiens sont 1,201 fois plus grands.

**Tableau 4C.1 Enthalpies standard de changement d'état\***

Substance	Formule	Point de congélation (K)	$\Delta H_{\text{fus}}^{\circ}$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	Point d'ébullition (K)	$\Delta H_{\text{vap}}^{\circ}$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )
acétone	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	177,8	5,72	329,4	29,1
ammoniac	NH <sub>3</sub>	195,4	5,65	239,7	23,4
argon	Ar	83,8	1,2	87,3	6,5
benzène	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	278,6	10,59	353,2	30,8
éthanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	158,7	4,60	351,5	43,5
hélium	He	3,5	0,021	4,22	0,084
mercure	Hg	234,3	2,292	629,7	59,3
méthane	CH <sub>4</sub>	90,7	0,94	111,7	8,2
méthanol	CH <sub>3</sub> OH	175,2	3,16	337,8	35,3
eau	H <sub>2</sub> O	273,2	~	373,2	

(44,0 à 25 °C)