

Jean-Luc Battaglia
Andrzej Kusiak
Christophe Pradere

Introduction aux transferts thermiques

Cours et exercices corrigés

3^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : © borislav15 – adobestock.com

© Dunod, 2020
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-081641-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	IX
Nomenclature	XI
Chapitre 1 Introduction à l'énergétique et aux transferts	1
1. Le système thermodynamique	1
1.1 Définitions	1
1.2 Changements de phase	4
2. L'énergie	5
2.1 Travail et chaleur	5
2.2 Transport, stockage, transfert et conversion de l'énergie	9
3. La notion de température	12
3.1 Définition	12
3.2 L'équilibre thermique (principe zéro de la thermodynamique)	12
3.3 L'étalonnage	13
3.4 Diagramme d'équilibre	14
4. Le premier principe de la thermodynamique	15
4.1 Équivalence chaleur-travail	15
4.2 Énoncé du premier principe	16
5. Chaleurs spécifiques et chaleurs latentes	18
5.1 Chaleurs spécifiques	18
5.2 Utilisation de la chaleur spécifique	20
5.3 Chaleur latente de changement de phase	23
5.4 Utilisation de la chaleur latente	25
6. Les différents modes de transfert thermique	27
6.1 La nécessaire complémentarité entre thermodynamique et thermique	27
6.2 Conduction	28
6.3 Convection	28
6.4 Rayonnement	29

7. Bilans	30
7.1 Introduction	30
7.2 Le volume de contrôle	30
7.3 Régime transitoire et permanent	31
7.4 Écriture des bilans	31
8. Les principales notations et grandeurs du transfert thermique	35
8.1 Paramètres relatifs au transfert de la chaleur	35
8.2 Coefficient de transfert	36
9. Les échangeurs de chaleur	38
Entraînez-vous	42
Solutions	47

Chapitre 2 Conduction de la chaleur 57

1. La conduction à l'échelle atomique	57
1.1 Structure des matériaux solides et des fluides au repos	57
1.2 Équilibre thermique et température dans les solides et les fluides au repos	58
1.3 Diffusion de la chaleur dans les structures solides et les fluides au repos	62
2. Modélisation de la diffusion	64
2.1 Loi de Fourier	64
2.2 Conductivité thermique	66
2.3 Lien entre chaleur spécifique, conductivité thermique et l_{pm}	69
2.4 Expression de la loi de Fourier dans diverses configurations matérielles	70
3. La diffusivité thermique	72
4. Équation de diffusion de la chaleur	73
5. Notion de régime permanent et transitoire	75
6. Conditions initiales et conditions aux limites	77
6.1 Conditions initiales	77
6.2 Conditions aux limites	78

7. L'accommodation thermique	79
7.1 Nombre de Biot	79
7.2 Ailette de section constante	81
7.3 Accommodation thermique partielle en géométrie variable	85
7.4 Accommodation thermique totale	88
8. Résolution de problèmes 1D en régime permanent par analogie électrique	90
9. Transfert de chaleur aux interfaces solide - solide	94
10. Résolution de problèmes 1D en régime transitoire	97
10.1 Introduction	97
10.2 Transformée de Laplace	98
10.3 Principe de superposition	99
10.4 Transformée inverse de Laplace	100
10.5 Cas des fonctions périodiques	100
11. Méthode des quadripôles	105
11.1 Quadripôle thermique en transfert 1D	105
11.2 Impédances thermiques	110
11.3 Comportements asymptotiques	113
11.4 Modèles simplifiés	115
11.5 Réponse impulsionnelle dans des configurations de référence	116
12. Sources de chaleur mobiles dans les solides	119
Entraînez-vous	124
Solutions	130
 Chapitre 3 Transfert de chaleur par convection	 141
1. Introduction	141
1.1 Description du phénomène de convection	141
1.2 Modélisation du transfert de chaleur par convection	142
2. Couches limites en transfert par convection	144
2.1 Couche limite hydrodynamique	145
2.2 Couche limite thermique	146
2.3 Écoulement laminaire et turbulent	147

3. Bilans de masse, de quantité de mouvement et de chaleur dans la couche limite	149
3.1 Définition d'un volume de contrôle	149
3.2 Bilan de masse	150
3.3 Bilan de quantité mouvement	151
3.4 Bilan thermique	154
4. Analyse dimensionnelle – Principe de la méthode	157
5. Convection forcée	158
5.1 Application de l'analyse dimensionnelle en convection forcée avec écoulement interne	159
5.2 Expressions du coefficient de convection h en convection forcée	162
6. Convection naturelle	170
6.1 Application de l'analyse dimensionnelle en convection naturelle	170
6.2 Régime turbulent en convection naturelle	172
6.3 Expressions du coefficient de convection h en convection naturelle	173
7. Méthodologie pour le calcul de transferts par convection en utilisant les corrélations expérimentales	180
8. Convection avec changement de phase	180
8.1 Convection lors de la condensation	180
8.2 Convection lors de l'ébullition	185
Entraînez-vous	192
Solutions	197

Chapitre 4 Rayonnement thermique	209
1. Notion de rayonnement thermique	209
1.1 Existence du rayonnement thermique	209
1.2 Découverte du rayonnement infrarouge	211
1.3 Explication physique simplifiée de l'interaction photon - matière	212
2. L'angle solide	222
3. Grandeurs physiques propres au rayonnement	223

3.1	Grandeurs liées à l'émission	223
3.2	Grandeurs liées au récepteur	225
4.	Rayonnement des corps noirs	226
4.1	Les corps noirs	226
4.2	Loi de Planck	227
4.3	Luminance des corps noirs	232
4.4	Lois de Wien	233
4.5	Loi de Stefan - Boltzmann	233
4.6	Émission spectrale du corps noir	234
5.	Rayonnement des corps réels	235
5.1	Émissivité des corps réels	235
5.2	Absorption, réflexion et transmission des corps réels	239
5.3	Lien entre propriétés radiatives et propriétés optiques	242
5.4	La loi de Kirchhoff	244
5.5	Les corps gris	246
	Entraînez-vous	248
	Solutions	251
Chapitre 5	Transfert par rayonnement entre corps	257
1.	Définitions des outils géométriques	257
1.1	Facteur de forme	257
1.2	Relation de réciprocité	259
1.3	Cas particulier de la cavité	261
1.4	Quelques valeurs du facteur de forme	261
2.	Échanges radiatifs entre corps noirs	265
2.1	Échanges entre deux corps noirs	265
2.2	Échanges entre corps noirs dans une cavité	267
3.	Échanges entre corps gris dans une cavité	268
3.1	Expression du flux net échangé	268
3.2	Utilisation de l'analogie électrique	270
3.3	Résolution numérique	273
3.4	Boucliers radiatifs	274

4. Influence d'un milieu participatif	275
Entraînez-vous	283
Solutions	287
Annexes mathématiques	298
Index	306

Avant-propos

Cet ouvrage met en avant les bases fondamentales nécessaires à l'acquisition de compétences dans le domaine des transferts de la chaleur et propose des liens et des ouvertures vers les disciplines fondamentales qui soutiennent leur compréhension. Il s'adresse à des étudiants à Bac +2, Bac +3 et Bac +4.

De nombreux ajouts ont été faits dans cette troisième édition par rapport à la précédente. Le chapitre 1 rappelle les notions élémentaires de thermodynamique des systèmes. Les notions de bilans, incontournables pour la résolution de problèmes en énergétique, sont présentées de manière détaillée. La notion de transfert sous forme de chaleur est introduite dans ce chapitre de manière synthétique et imagée. Des applications à des systèmes mettant en œuvre des changements de phase et de la génération de chaleur par combustion sont présentées. Enfin, des applications spécifiques au dimensionnement des échangeurs sont aussi proposées. Le chapitre est aussi complété par de nombreuses données utiles pour l'ingénieur, que ce soit en ce qui concerne les matériaux que les systèmes classiquement rencontrés dans l'industrie. Les différents types de transfert sont alors abordés dans les chapitres suivants. Le transfert par conduction dans les matériaux solides ou les fluides au repos fait l'objet du chapitre 2. Par rapport à l'édition précédente, de nombreux compléments ont été apportés notamment pour le traitement de problèmes impliquant des sources de chaleur fixes ou mobiles. Le transfert de chaleur par convection, obligatoirement associé à du transfert de masse est détaillé dans le chapitre 3. Dans cette nouvelle version nous avons introduit de nouvelles données concernant les transferts par convection impliquant du changement de phase. Enfin, le transfert de chaleur par rayonnement fait l'objet des deux derniers chapitres. Ces deux chapitres ont aussi été remaniés par rapport à la précédente édition et le transfert par rayonnement dans les milieux semi-transparentes est présenté au travers d'une approche accessible et utilisable par l'ingénieur. Le choix de cette organisation tient finalement bien plus d'un contexte historique que d'une formulation mathématique des modèles ou bien de pré requis à la lecture et à la compréhension d'un chapitre. En effet, chaque chapitre peut être pratiquement lu indépendamment des autres. Cependant, nous conseillons fortement au lecteur de lire en premier lieu le chapitre 1 afin de se familiariser avec les notations utilisées en thermique ainsi qu'avec la notion de bilan thermique très utile pour la suite. Nous avons donc choisi de présenter chaque type de transfert en fonction de l'ordre chronologique de sa formulation mathématique.

Le contenu de chaque chapitre constitue des connaissances de base en thermique telle qu'elle est enseignée dans les filières Universitaires. Il n'y a donc pas de surprise ici. Toutefois, afin d'apporter des éclairages supplémentaires et de contextualiser les démarches, nous avons tenté de préciser à chaque fois que cela était possible la nature physique des phénomènes aux différentes échelles d'observation : du microscopique au macroscopique. Ceci apporte une certaine originalité à l'ouvrage, l'exposé tenant

compte du fait que les lecteurs ne sont pas tous familiers des nombreux domaines de la physique (mécanique quantique, mécanique statistique, thermodynamique). Nous avons donc essayé de nous restreindre à un exposé pédagogique, basé sur l'observation et le sens logique.

Chaque chapitre est accompagné de quelques exercices corrigés. Ces exercices sont censés couvrir l'ensemble des connaissances théoriques développées dans le cours. Par rapport à la précédente édition certains exercices ont été rajoutés et certains sont aussi présentés en termes d'illustration directe du cours dans les chapitres. Étant donné la place de plus en plus grande de la simulation numérique dans nos disciplines, nous proposons aussi des codes de calcul écrit sous le logiciel libre Octave en lien avec les applications proposées. Bien entendu, le lecteur pourra trouver dans d'autres livres un nombre plus important d'exercices qui lui permettront de s'assurer de la bonne compréhension du présent cours.

Nomenclature

Symboles romains

A	Section (m^2)
C_p, C_v	Chaleur massique à pression et volume constant ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
C_f	Coefficient de frottement
$c_0 = 2,999 \times 10^8$	Vitesse de la lumière dans le vide ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
D, D_h	Diamètre, diamètre hydraulique (m)
e	Énergie massique (ou spécifique) ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
E	Énergie (J), effusivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$), éclairement ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
E_c	Énergie cinétique (J)
E_p	Énergie potentielle (J)
$F, \bar{F}$	Force (N)
F_{ij}	Facteur de forme entre la surface (i) et la surface (j)
$\bar{g}$	Accélération de la pesanteur ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
$G_{0 \rightarrow \lambda}$	Fonction d'émission spectrale du corps noir sur la bande $[0, \lambda]$
h	Enthalpie massique (ou spécifique) ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), Coefficient d'échange ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ constante de Planck
J	Radiosité ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
$k_B = 1,381 \times 10^{-23}$	Constante de Boltzmann ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)
l, l_{pm}	Libre parcours moyen (m)
L	Luminance ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$)
$m, \dot{m}$	Masse (kg), débit masse ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
M	Émittance ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
(n, k)	Indice et coefficient d'extinction
$\bar{n}$	Normale à une surface
$\tilde{n}$	Indice complexe
P	Pression ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ou Pa)
p	Variable de Laplace
Q	Énergie sous forme de chaleur (J)
Q_w	Terme source (W)
$\dot{Q}$	Puissance calorifique (W)
$\dot{Q}_w$	Terme source volumique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)
Q_v, Q_m	Débit volume ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et débit masse ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
R_T	Résistance thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
r_e	Résistivité électrique ($\Omega \cdot \text{m}$)
S	Surface (m^2)
t	Temps (s)
T	Température (K)
u	Énergie interne spécifique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), composante de vitesse ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
U	Énergie interne (J)

Introduction aux transferts thermiques

$\vec{v}$	Vitesse ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
V	Volume (m^3)
W	Énergie sous forme de travail (J)
$\dot{W}$	Puissance mécanique (W)
Z	Impédance thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)

Symboles grecs

α	Diffusivité thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), coefficient d'absorption (absorptivité)
β	Coefficient de dilatation thermique à pression constante (K^{-1})
δ_{ij}	Symbole de Kronecker
$\Delta H, \Delta h$	Chaleur latente ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
ε	Coefficient d'émission (émissivité)
Γ	Surface du volume matériel
η	Efficacité, rendement
φ	Densité de flux ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
ϕ	Flux (W)
λ	Conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), longueur d'onde (m)
μ	Viscosité dynamique ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
θ	Transformée de Laplace de la température
σ	Conductivité électrique (Ω^{-1})
$\sigma_s = 5,670 \times 10^{-8}$	Constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
ρ	Masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), coefficient de réflexion (réflectivité)
τ	Coefficient de transmission (transmissivité), constante de temps (s)
Ω	Volume matériel, angle solide (Sr)
ψ	Transformée de Laplace du flux

Nombres sans dimension¹

Bi	Nombre de Biot
Fo	Nombre de Fourier
Gr	Nombre de Grashof
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
Ra	Nombre de Rayleigh
Re	Nombre de Reynolds

Opérateurs

δ, Δ	Variation infinitésimale
d	Différentielle
∂	Dérivée partielle
$L[]$	Transformée de Laplace
$\vec{\nabla}$	Gradient
$\vec{\nabla} \cdot$	Divergence
$\vec{\nabla} \wedge$	Rotationnel
∇^2, Δ	Laplacien

1. Un nombre sans dimension est généralement désigné par deux lettres, les deux premières du nom de celui qui, souvent le premier, a mis en évidence son intérêt.

Introduction à l'énergétique et aux transferts

Objectifs

Poser quelques définitions et des liens entre thermodynamique et thermique au travers des phénomènes de transfert de chaleur.

Construire une analyse énergétique au travers des bilans.

Traiter le cas des échangeurs.

Plan

- 1 Le système thermodynamique
- 2 L'énergie
- 3 La notion de température
- 4 Le premier principe de la thermodynamique
- 5 Chaleurs spécifiques et chaleurs latentes
- 6 Les différents modes de transfert thermique
- 7 Bilans
- 8 Les principales notations et grandeurs du transfert thermique
- 9 Les échangeurs de chaleur

1 Le système thermodynamique

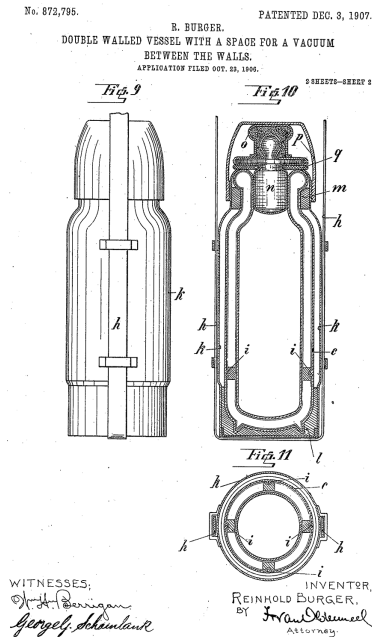
1.1 Définitions

La thermodynamique s'intéresse à la quantification des variations spatiales et temporelles de l'énergie au sein d'un système. La notion de système est très large : un ensemble de quelques milliers d'atomes ou une centrale thermonucléaire sont des systèmes thermodynamiques. Les dimensions caractéristiques de ces systèmes varient pourtant respectivement du nanomètre à la centaine de mètres. Néanmoins, dans ces deux systèmes, de l'énergie est mise en jeu et elle peut fluctuer au cours du temps selon les perturbations extérieures qui sont appliquées. La description thermodynamique d'un système a donc comme premier impératif de préciser deux régions : le système étudié et ce qui lui est extérieur qui définit son environnement. On définit alors la frontière Γ , comme une surface fermée de l'espace entourant le volume Ω (Figure 1.1). Les échanges entre le système et son environnement s'effectuent au travers de cette frontière. Ainsi,

les systèmes thermodynamiques sont classés en trois catégories que se distinguent par la nature des échanges avec l'extérieur :

- les systèmes *isolés* n'échangent ni matière ni aucune forme d'énergie ;
- les systèmes *fermés* échangent de l'énergie, mais pas de matière ;
- les systèmes *ouverts* échangent matière et énergie.

Exemple de système isolé : le vase Dewar



Le vase de Dewar est un récipient conçu pour fournir une très bonne isolation thermique. Ce vase doit son nom au physicien écossais James Dewar. Ce vase se présente sous la forme d'une bouteille en verre ou en métal, en double couche. Il peut être vu comme deux bouteilles à paroi mince imbriquées l'une dans l'autre. L'espace étroit entre ces deux bouteilles est presque entièrement dépourvu d'air, le quasi vide empêche les échanges de chaleur. La surface intérieure de la bouteille externe et la surface externe de la bouteille intérieure, ont un enduit réfléchissant métallique (de l'argent par exemple) pour limiter le transfert de la chaleur par rayonnement. Ce système fonctionne sur le principe des boucliers radiatifs qui seront étudiés au chapitre 5.

Exemple de système fermé : la bouilloire



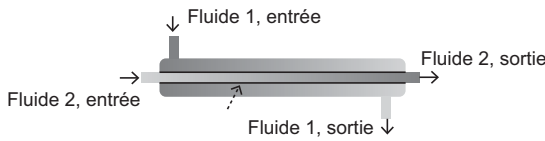
Les bouilloires traditionnelles sont des récipients métalliques destinées à être posées sur une gazinière ou sur une plaque électrique afin de réchauffer le liquide contenu (photographie de droite). Les bouilloires élec-

triques sont souvent munies d'une résistance chauffante, généralement immergée, qui se présente sous la forme d'un tube en anneau (photographie de gauche). Dans les deux cas, le liquide reste confiné dans le récipient, il n'y a pas de transfert de masse mais seulement un apport de chaleur par conduction essentiellement, phénomène de transfert qui sera étudié au chapitre 2. Lorsque la température du liquide devient supérieure ou égale à la température d'ébullition, on observe un changement de phase

au travers de la formation de bulles de vapeur au sein du liquide (bien visible sur la photographie). Les échanges de chaleur entre la bouilloire et l'extérieur reposent sur les phénomènes de convection et de rayonnement qui seront étudiés aux chapitres 3 et 4 respectivement.

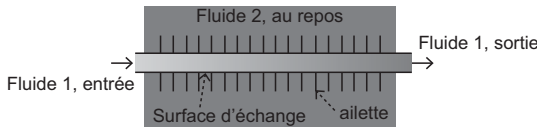
Exemple de système ouvert : l'échangeur

- Un échangeur tubulaire peut être considéré comme l'échangeur de chaleur le plus simple : il consiste en deux tubes imbriqués l'un dans l'autre. Un fluide circule dans le tube interne (fluide chaud sur la figure) alors que le second (fluide froid) passe dans l'espace entre les deux tubes. Les deux fluides transportent la chaleur par convection alors que le transfert de chaleur entre ces deux fluides, au niveau



de la paroi interne, s'effectue par conduction. La circulation du fluide entre l'entrée et la sortie est du *transfert de masse*.

- Un échangeur à ailettes consiste en un conduit cylindrique ou rectangulaire sur lequel sont fixées des lames métalliques de différentes formes qui sont les ailettes. La chaleur est transférée du fluide circulant dans le conduit vers le fluide extérieur au travers des ailettes par conduction de la chaleur. On utilise par exemple ce type d'installation pour refroidir les moteurs de voiture ou les composants



électroniques (microprocesseurs...). Les ailettes ont pour but d'augmenter la surface d'échange.

Relation entre thermodynamique et transferts

Au travers des différents exemples proposés ci-dessus, on voit que l'énergie au sein d'un système thermodynamique fluctue en fonction des transferts de chaleur et de masse qui s'y développent.

Un système thermodynamique, délimité par le volume Ω entouré par la frontière Γ , doit pouvoir être repéré dans l'espace à partir d'un référentiel $\mathcal{R}$ et une horloge doit permettre de le repérer vis-à-vis de ses évolutions dans le temps (Figure 1.1). On pourra alors définir une position $\vec{r}(M, t)$ et une vitesse $\vec{v}(M, t)$ en tout point M de $(\Omega \cup \Gamma)$ et à chaque instant t . Les *échanges de masse et d'énergie* entre le système thermodynamique et son environnement s'effectuent au travers de Γ .

Un système complexe pourra être décomposé en sous-systèmes plus simples et il conviendra de préciser la nature des flux échangés entre les sous-systèmes élémentaires (Figure 1.2).

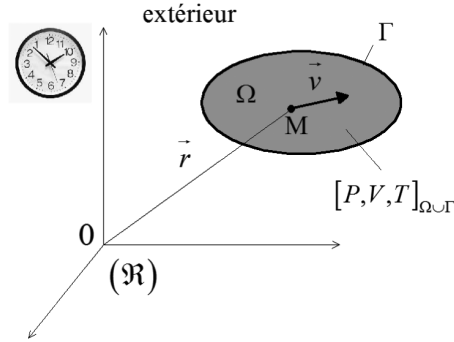


Figure 1.1 – Le système thermodynamique est défini par une surface Γ entourant un volume Ω et révélant l'interface avec le milieu extérieur. Il est repéré dans l'espace et le temps au cours de son évolution. Son état est caractérisé à chaque instant par des variables telles que $[P, V, T]$, i.e., pression, volume et température.

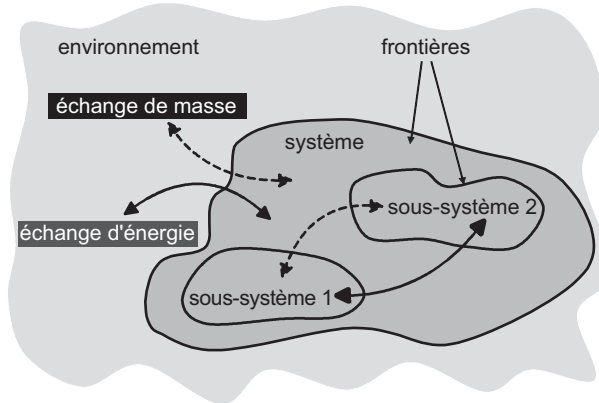


Figure 1.2 – Un système thermodynamique complexe et son environnement. Le système est lui-même composé de sous-systèmes qui peuvent être traités indépendamment les uns des autres.

1.2 Changements de phase

Un système thermodynamique peut se présenter sous différents états ou phases en fonction des conditions de pression et de température auxquelles il se trouve. En fonction de ces valeurs la matière constitutive du système pourra être dans l'état solide, liquide ou gazeux ou bien encore sous la forme d'une coexistence de deux ou trois de ces états à la fois. Il y a un changement de phase lorsque le système passe d'une phase à l'autre c'est-à-dire change d'état physique. La Figure 1.3 présente les principaux changements de phase.

À titre d'illustration, à pression atmosphérique $P = P_{\text{atm}}$, l'eau est liquide entre 0°C et 100°C , au-delà de 100°C , l'eau existe sous forme de vapeur d'eau. En dessous de 0°C il y a une solidification et l'eau existe sous forme de glace.