

# Échanges d'énergie des transformations thermodynamiques

« You can't gain something, without giving something in return »

Hiromu ARAKAWA, *Fullmetal Alchemist*

## ✍ Sommaire

<b>I Moyens d'échange d'énergie</b> . . . . .	<b>3</b>
I/A Nécessité de la thermodynamique . . . . .	3
I/B Travail des forces de pression . . . . .	3
I/C Transfert thermique . . . . .	4
<b>II Types de transformations</b> . . . . .	<b>6</b>
II/A Condition sur l'évolution . . . . .	6
II/B Conditions sur le milieu extérieur . . . . .	6
II/C Conditions sur les grandeurs du système . . . . .	7
<b>III Cas particuliers</b> . . . . .	<b>10</b>
III/A Transformation cyclique . . . . .	10
III/B Condition sur les échanges thermiques . . . . .	11

## ✂ Capacités exigibles

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Définir un système adapté à une problématique donnée.</li> <li><input type="checkbox"/> Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équilibre final.</li> <li><input type="checkbox"/> Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans 1<sup>er</sup> cas d'une seule variable.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de WATT.</li> <li><input type="checkbox"/> Distinguer qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement.</li> <li><input type="checkbox"/> Identifier dans une situation expérimentale le ou les systèmes modélisables par un thermostat.</li> </ul> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

✓ L'essentiel

☰ Définitions

- T1.1 : Transformations thermodynamique 3
- T1.2 : Transfert thermique . . . . . 4
- T1.3 : Types de transferts thermiques . 5
- T1.4 : Thermostat . . . . . 5
- T1.5 : Notions de réversibilité . . . . . 6
- T1.6 : Transformation monobare . . . . . 6
- T1.7 : Transformation monotherme . . 7
- T1.8 : Transformation isochore . . . . . 7
- T1.9 : Transformation isobare . . . . . 7
- T1.10 : Transformation isotherme . . . 8
- T1.11 : Transformation cyclique . . . . 10
- T1.12 : Transformation adiabatique . . 11

⚙️ Propriétés

- T1.1 : Travail des forces de pression . . 3
- T1.2 :  $\mathcal{W}_p^{QS}$  . . . . . 6
- T1.3 :  $\mathcal{W}_p^{monoP}$  . . . . . 7
- T1.4 :  $\mathcal{W}_p^{isoV}$  . . . . . 7
- T1.5 :  $\mathcal{W}_p^{isoP}$  . . . . . 8
- T1.6 : Équation d'état et transformation 8
- T1.7 :  $\mathcal{W}_p^{isoT}$  . . . . . 8
- T1.8 :  $\mathcal{W}_p$  sur un cycle  $(P,V)$  . . . . . 10
- T1.9 :  $\mathcal{W}_p^{LAP}$  . . . . . 13

☰ Démonstrations

- T1.1 : Travail des forces de pression . . 4
- T1.2 :  $\mathcal{W}_p^{isoP}$  . . . . . 8
- T1.3 :  $\mathcal{W}_p$  isotherme . . . . . 9
- T1.4 :  $\mathcal{W}_p$  sur un cycle  $(P,V)$  . . . . . 10
- T1.5 : Couples de variables pour LAPLACE 13
- T1.6 :  $\mathcal{W}_p^{LAP}$  . . . . . 13

💡 Interprétations

- T1.1 : Trouver un état final . . . . . 3
- T1.2 : Thermostat . . . . . 5
- T1.3 : Comprendre les échanges thermiques 12

📝 Applications

- T1.1 : Choix d'un système . . . . . 9
- T1.2 : Cycle de LENOIR . . . . . 10

📌 Remarques

- T1.1 : Monobare avec équilibre IF . . . . 7

📖 Exemples

- T1.1 : Limites du TEM . . . . . 3
- T1.2 : Modes de transfert thermique . . 5
- T1.3 : Thermostats . . . . . 5
- T1.4 : Quelques travaux en  $(P,V)$  . . . . 6
- T1.5 : Transformation isochore . . . . . 7
- T1.6 : Transformation isobare . . . . . 8
- T1.7 : Transformation mono- vs. isotherme 9
- T1.8 : Transformation adiabatique . . . 11
- T1.9 : Adiabatique vs. isotherme . . . . 12

♥️ Points importants

- T1.1 : Sens de calcul des variations . . 3
- T1.2 : Adiabatique vs. isotherme . . . . 12
- T1.3 : Pente d'une adiabatique en  $(P,V)$  13
- T1.4 : Résumé des transformations . . . 14

⚠️ Erreurs communes

- T1.1 : Transformation et système . . . . 3
- T1.2 : Quasi-statique vs. isobare . . . . 8

# I Moyens d'échange d'énergie

## I/A Nécessité de la thermodynamique

### Exemple T1.1 : Limites du TEM

Le TEM de la mécanique,

ne permet pas de décrire des phénomènes pourtant très simples. Par exemple, en comprimant de l'air dans une seringue on apporte un travail non nul ( $F \cdot d \neq 0$ ). Pourtant, entre l'instant initial et l'instant final le gaz ne gagne ni vitesse ni énergie potentielle :

Comme discuté au chapitre précédent, il ne gagne pas d'énergie **macroscopique** mais **microscopique**, c'est-à-dire de l'**énergie interne**, *via* des transformations thermodynamiques.

### Définition T1.1 : Transformations thermodynamique

Une **transformation** est un phénomène physique ou chimique qui produit la **variation** d'au moins un **paramètre d'état** du système. L'état de départ est *l'état initial*, EI, celui d'arrivée *l'état final*, EF ; ce sont des **états d'équilibre** du système (sauf exceptions), c'est-à-dire que les paramètres d'état y sont **définis, homogènes et constants**.

### Interprétation T1.1 : Trouver un état final

On connaît toujours l'état initial, et on s'intéresse à l'état final ; pour ça, on applique les **conditions d'équilibre** mécanique et thermique (sauf si la transformation est trop rapide, voir plus loin), et les **caractéristiques de la transformations**.

### Important T1.1 : Sens de calcul des variations

Au cours d'une transformation, un système échange généralement de l'énergie avec l'extérieur. Il faut choisir un sens de comptage :

**Les échanges d'énergie d'un système sont toujours exprimés en valeur algébrique, et sont positifs lorsque le système choisi reçoit de l'énergie, négatifs lorsqu'il en cède.**

### Attention T1.1 : Transformation et système

Il sera donc d'autant plus important de **spécifier le système d'étude**  $\Sigma$  en thermodynamique, puisque l'on traite spécifiquement des échanges entre systèmes. **Il sera toujours fermé** pour appliquer les théorèmes de conservation.

## I/B Travail des forces de pression

### ♥ Propriété T1.1 : Travail des forces de pression

Le travail **reçu** des forces de pression extérieures pour une variation de volume  $dV$  est :

**Unité**

◇  $W_p > 0 \Rightarrow$

- ◇  $W_p < 0 \Rightarrow$
- ◇ Compression :

### Démonstration T1.1 : Travail des forces de pression

Prenons le cas extrêmement simple d'une seringue de section  $S$  avec un piston imperméable, pouvant glisser sans frottements et bouchée à son autre extrémité. Notons  $x$  la longueur de la cavité contenant de l'air.

- ◇ **Système** :
- ◇ **Repère/age** :
- ◇ **Force** :
- ◇ **Travail** :

## I/C Transfert thermique

### I/C) 1 Définition

#### Définition T1.2 : Transfert thermique

Un système thermodynamique peut recevoir de l'énergie sans l'intervention d'une action mécanique mesurable à l'échelle macroscopique. Ce transfert d'**énergie microscopique**, complémentaire du travail mécanique, s'appelle **transfert thermique**, noté  $Q$ .

Unité

#### ♥ Notation T1.1 : Variation des variables

##### Grandeur d'état

Une grandeur d'état ne dépend, par définition, que **des états, pas du chemin**. On peut donc parler de sa différentielle  $dX$  et de sa variation totale  $\Delta X$ .

##### Échange d'énergie

Les **échanges** n'étant pas **des grandeurs d'état**<sup>1</sup>, on utilise la notation de petite variation quelconque  $\delta$ , puis on intègre pour une grande variation.

TABLEAU T1.1 – Notation de différence selon la grandeur physique

Variation	Grandeur d'état	Échanges entre états
Petite		
Grande		

1. On ne peut pas définir le « travail d'un état ».

**I/C) 2** Types de transferts thermiques

**Définition T1.3 : Types de transferts thermiques**

Convection

Diffusion

Rayonnement

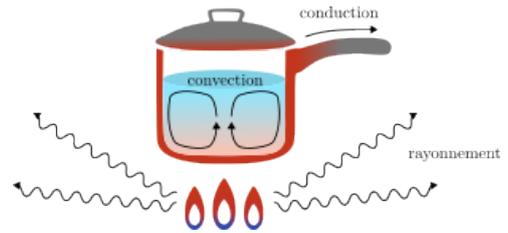
**Exemple T1.2 : Modes de transfert thermique**

On observe ces trois phénomènes en même temps en faisant bouillir de l'eau sur une gazinière :

◇ Convection :

◇ Conduction :

◇ Rayonnement :



Convection

Conduction

Rayonne<sup>t</sup>

- |   |   |   |
|---|---|---|
| ◇ | ◇ | ◇ |
| ◇ | ◇ | ◇ |
| ◇ | ◇ | ◇ |

**I/C) 3** Thermostat

**Définition T1.4 : Thermostat**

Un **thermostat** est un système thermodynamique dont la **température reste constante**, même s'il échange de l'énergie :

**Interprétation T1.2 : Thermostat**

On peut voir un thermostat comme un très grand volume, de capacité thermique infinie :

Ainsi, il faut lui apporter une énergie infinie pour élever sa température ne serait-ce que d'un degré : il peut transmettre de la chaleur, mais ne peut pas changer de température!

**Exemple T1.3 : Thermostats**

- |   |   |   |
|---|---|---|
| ◇ | ◇ | ◇ |
|---|---|---|

2. Dû à leur grande conductivité thermique.

## II Types de transformations

### II/A Condition sur l'évolution

#### Définition T1.5 : Notions de réversibilité

##### Quasi-statique

Elle est quasi-statique si elle est constituée d'états d'équilibre infiniment voisins ; dans la pratique, ce sont des **transformations lentes**.

##### Conséquence

##### Irréversible

Si seuls l'EI et l'EF sont à l'équilibre, alors la transformation est **irréversible**. Ceci est généralement causé par les **frottements** et les **inhomogénéités** d'une grandeur d'état.

##### Réversible

Une transformation est réversible si elle est **quasi-statique** et **sans cause d'irréversibilité** ; on peut alors inverser la transformation par une petite variation.

#### ♥ Propriété T1.2 : $\mathcal{W}_p^{QS}$

Dans ce cas, le travail de la pression extérieure s'écrit :

Alors,  $\mathcal{W}_p$  est l'aire sous la courbe  $(P,V)$ , et :

$$\diamond dV > 0 \Leftrightarrow \quad ; \quad \diamond dV < 0 \Leftrightarrow \quad .$$

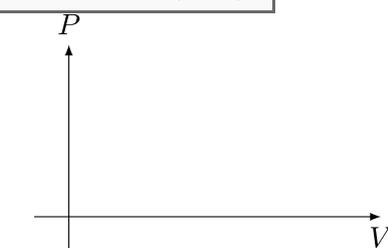


FIGURE T1.1 –  $\mathcal{W}_p$  quasi-statique en  $(P,V)$

#### Exemple T1.4 : Quelques travaux en $(P,V)$



Détente :  $\mathcal{W}_{p,1}$  0



Détente :  $|\mathcal{W}_{p,2}|$   $|\mathcal{W}_{p,1}|$



Compression :  $\mathcal{W}_{p,3}$  0

### II/B Conditions sur le milieu extérieur

#### Définition T1.6 : Transformation monobare

Une transformation est **monobare** quand la **pression extérieure totale** sur les parois mobiles est **constante** :

Elle est *a priori* quelconque, et peut être irréversible, quasi-statique ou même réversible.

**Propriété T1.3 :  $W_p^{\text{monoP}}$** 

On a immédiatement

**Remarque T1.1 : Monobare avec équilibre IF**

Si les états initial et final sont des équilibres, c'est-à-dire  $P_i = P_f$ , et ce même si  $P(t) \neq P_i$ , alors on peut rentrer  $P$  dans la variation totale :

**Définition T1.7 : Transformation monotherme**

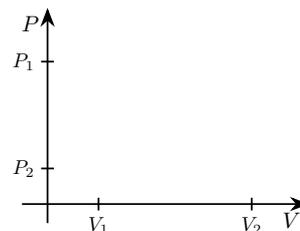
Une transformation est **monotherme** quand la **température extérieure** lors d'un transfert thermique est **constante** :

Elle est *a priori* quelconque, et peut être irréversible, quasi-statique ou même réversible.

**II/C Conditions sur les grandeurs du système****Définition T1.8 : Transformation isochore**

Une transformation est dite **isochore** quand le **volume** du système est **constant** au cours de la transformation :

S'applique aux **phases condensées** et **réipients indéformables**.

**Propriété T1.4 :  $W_p^{\text{isoV}}$** 

On a immédiatement

**Exemple T1.5 : Transformation isochore**

Le gaz d'une capsule à chantilly qu'on sort du frigo : le volume du gaz ne varie pas, mais il est hors équilibre thermique initialement.

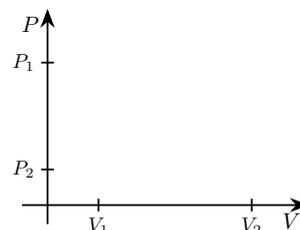
À l'état final,  $V_f = V_0$  et  $T_f = T_{\text{ext}}$ .

FIGURE T1.2 – Schéma

**Définition T1.9 : Transformation isobare**

Une transformation **monobare** et **quasi-statique** est **isobare** :

Ce sont des transformations **lentes**, avec des parois mobiles.





### ♥ Propriété T1.5 : $\mathcal{W}_p^{\text{isoP}}$

On a alors

### ♥ Démonstration T1.2 : $\mathcal{W}_p^{\text{isoP}}$



### ⚠ Attention T1.2 : Quasi-statique vs. isobare

Il faut différencier **quasi-statique** et **isobare**. On peut avoir une transformation quasi-statique qui n'est pas isobare, par exemple en ajoutant progressivement du sable sur la paroi d'un récipient.

### Exemple T1.6 : Transformation isobare

- ◇ Gaz dans un récipient avec un piston subissant une force constante, d'état initial  $T_i, P_i, V_i$ .
- ◇ On le place dans un milieu extérieur à la température  $T_{\text{ext}}$ .
- ◇ À l'état d'équilibre final,  $P_f = P = P_i$  par construction et  $T_f = T_{\text{ext}}$  puisque c'est un équilibre.

FIGURE T1.3 – Schéma

### Propriété T1.6 : Équation d'état et transformation

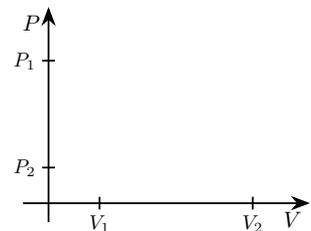
On peut déterminer les paramètres d'état de l'état final d'un gaz parfait subissant une transformation isochore ou isobare grâce à l'équation d'état du gaz parfait :

À partir de l'équilibre thermique par exemple, on détermine la pression finale pour une transformation isochore.

### ♥ Définition T1.10 : Transformation isotherme

Une transforma<sup>o</sup> **monotherme** et **quasi-statique** est **isotherme** :

Ce sont des transformations **très lentes**, car les échanges thermiques sont plus lents que les échanges mécaniques.



### Propriété T1.7 : $\mathcal{W}_p^{\text{isoT}}$

On trouve alors



### ♥ Démonstration T1.3 : $\mathcal{W}_p$ isotherme



### Exemple T1.7 : Transformation mono- vs. isotherme

Les deux exemples précédents sont monothermes, mais **pas isothermes** : au cours de ces transformations, la température du système n'est *a priori* pas définie dans les états intermédiaires qui ne sont pas des états d'équilibre, elle est seulement définie dans l'état final.



### Application T1.1 : Choix d'un système

Soit une enceinte indéformable, séparée en deux compartiments par une cloison étanche et mobile. Le premier a pour état initial  $(T_i, P_i, V_i, n)$ , le second  $(T_i, 2P_i, V_i, 2n)$ . Une cale bloque initialement la cloison mobile. On enlève la cale et on place l'enceinte dans un environnement à température  $T_0$ .

FIGURE T1.4 – Schéma.

- 1) Quelles sont les variables d'état des gaz dans l'état d'équilibre final ?
- 2) Qualifier la transformation selon le système étudié.

1) ◇ **Température** :

◇ **Pression** :

◇ **Volume** :

▷

▷

▷

D'où

2) On a systèmes :

◇

◇

### III Cas particuliers

#### III/A Transformation cyclique

##### Définition T1.11 : Transformation cyclique

Elle **cyclique** une transformation qui passe d'un état  $A$  à un autre état  $B$ , puis revient à l'état initial par un autre chemin :  $A \rightarrow B \rightarrow A$ . Pour une grandeur d'état  $X$ , on a alors :

##### Propriété T1.8 : $\mathcal{W}_p$ sur un cycle $(P,V)$

Lors d'une transformation cyclique, le travail total représente **l'aire encapsulée** par la courbe en diagramme  $(P,V)$ , et on a son signe avec la **règle de la main droite** :

- ◇ Sens direct  $\Rightarrow \mathcal{W}_{p,\text{cycle}} > 0$  et le cycle est \_\_\_\_\_
- ◇ Sens horaire  $\Rightarrow \mathcal{W}_{p,\text{cycle}} < 0$  et le cycle est \_\_\_\_\_

##### Démonstration T1.4 : $\mathcal{W}_p$ sur un cycle $(P,V)$

On suppose pour fixer les idées que  $V_B > V_A$ .

$A \rightarrow B$  :

$B \rightarrow A$  :

- ◇ Sur le cycle :
- ◇ Conclusion :

FIGURE T1.5 – Schémas.

##### Application T1.2 : Cycle de LENOIR

On fait subir à 1 mol de gaz parfait le cycle suivant :

- (A)  $P_A = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$  et  $V_A = 14 \text{ L}$  ;
- (B) Chauffage isochore,  $P_B = 2P_A = 4 \times 10^5 \text{ Pa}$  ;
- (C) Détente isotherme quasi-statique,  $V_C = 2V_B = 28 \text{ L}$  ;
- (4) Refroidissement isobare, on retourne à l'état initial.



FIGURE T1.6 – Cycle LENOIR.

- 1 Tracer ce cycle dans le diagramme de WATT. Déterminer la nature du cycle (moteur ou récepteur).
- 2 Calculer la pression, le volume et la température pour chacun des états  $A$ ,  $B$  et  $C$ .
- 3 Calculer les travaux associés à chaque transformation puis celui du cycle. Vérifier sa nature.

1 Voir la figure ci-dessus. Pour la nature, on voit que

2 (A) On a déjà  $P_A$  et  $V_A$ , on cherche  $T_A$  :

(B) On connaît  $P_B$  et transformation isochore donc , on cherche  $T_B$  :

(C) On connaît  $V_C = 2V_B$  et transformation isotherme donc , on cherche  $P_C$  :

- 3 On a déjà démontré les formules utiles, mais **il faudrait les redémontrer** pour ne pas se tromper de signe.
- ◇
  - ◇
  - ◇
  - ◇

### III/B Condition sur les échanges thermiques

#### ♥ Définition T1.12 : Transformation adiabatique

##### Condition(s)

- ◇ Parois **athermanes** (opposé = *diathermane*), soit système **calorifugé**, et/ou :
- ◇ Transformation **brusque**, telle que  $\Delta t_{\text{transfo}} \ll \Delta t_{\text{éch.Q}}$

##### Conséquence

Il n'y a **pas de transfert thermique** :

C'est une **rupture d'équilibre**.

#### Exemple T1.8 : Transformation adiabatique

C'est le principe des bouteilles thermos et des calorimètres. Ils fonctionnent grâce à :

- ◇
- ◇

## ♥ Important T1.2 : Adiabatique vs. isotherme

Adiabatique

Isotherme

## ♥ Interprétation T1.3 : Comprendre les échanges thermiques

Isotherme

Pour qu'une transformation soit **isotherme** il faut que la **température** du système ne **varie pas**. Or dans la plupart des cas, tout apport d'énergie au système tend à faire varier sa température.

La réalisation d'une transformation isotherme nécessite donc un **contrôle** de la température que l'on obtient en mettant le système en contact avec un **thermostat**. Il **faut des échanges thermiques** entre le système et le thermostat *via* une **paroi diathermane**.

De plus, l'évolution du système doit être **suffisamment lente** pour que les échanges thermiques aient le temps de s'établir et assurent le maintien de la température  $T$  du système à la même valeur que la température  $T_0$  du thermostat.

Adiabatique

Pour qu'une transformation soit **adiabatique**, il faut que le système n'**échange pas de chaleur** avec l'extérieur. Typiquement, il doit être séparé d'une **paroi athermane** et que la transformation soit **suffisamment rapide** pour négliger les transferts ; alors, **sa température va forcément varier**, pour finir en rupture d'équilibre.

## Exemple T1.9 : Adiabatique vs. isotherme

Un gaz est contenu dans un récipient fermé par un piston de surface  $S$ , sur lequel on exerce une force  $\vec{F}$  variable, avec  $\vec{F}_i$  et  $\vec{F}_f$  dans l'état initial et final. On impose, par la condition d'équilibre mécanique du piston, une pression  $P = \frac{F}{S}$  au gaz.

Isotherme

- ◇ Parois fines, **diathermanes** dans un milieu extérieur **thermostaté** à  $T_{\text{ext}} = T_0$ .
- ◇ On augmente **lentement** la force  $\vec{F}$ , laissant le gaz **s'équilibrer thermiquement** à chaque instant : c'est une **compression isotherme**.

On obtient alors tous les paramètres d'état du gaz dans l'état final :

## Adiabatique

Le récipient a des **parois épaisses**. On augmente **rapidement** la force  $\vec{F}$ , l'échange **thermique n'a pas le temps** de se faire : c'est une **compression adiabatique**.

Dans ce cas, l'équation d'état ne suffit pas pour trouver l'état final, on n'a pas de renseignement sur  $T_f$ .

## ♥ Loi T1.1 : de LAPLACE

Pour une transformation **adiabatique** et **mécaniquement réversible** d'un **gaz parfait**, les paramètres d'état sont reliés par les relations suivantes :

où  $\gamma > 1$  est le coefficient adiabatique du fluide.

## Démonstration T1.5 : Couples de variables pour LAPLACE

Pour  $TV^{\gamma-1}$

Pour  $P^{1-\gamma}T^\gamma$

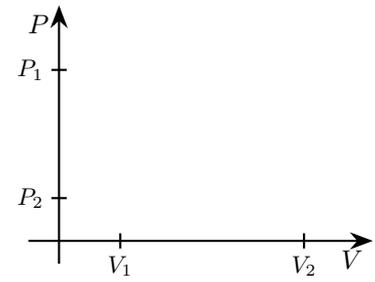
♥ Important T1.3 : Pente d'une adiabatique en  $(P,V)$ Propriété T1.9 :  $\mathcal{W}_p^{\text{LAP}}$ 

Avec LAPLACE

♥ Démonstration T1.6 :  $\mathcal{W}_p^{\text{LAP}}$

### Important T1.4 : Résumé des transformations

Transformation	Condition	Travail
Quasi-statique		
Isochore		
Monotherme		
Isotherme		
Monobare		
Isobare		
Adiabatique QS		



**FIGURE T1.7** –  
Représenta° en  $(P,V)$