Leçon 2 : transformations et transferts d'énergie

E. Capitaine

MP2I - Lycée Charles Coëffin

21 février 2025

Plan

1. Transformation thermodynamique
   - Définition
   - Différents types de transformations
   - Un exemple d'étude d'une transformation
2. Travail des forces de pression
   - Expression générale
   - Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible
   - Quelques transformations mécaniques
3. Transfert thermique
   - Définitions
   - Flux thermique et résistance thermique
   - Loi de Newton

Introduction

Dans cette leçon nous allons nous **déterminer l'état final d'un système** à partir de la connaissance de **son état initial**, de **sa fonction d'état** et **des différents types de transformations** qu'il peut subir et que nous allons définir.

Ces transformations témoignent d'échanges de deux types d'énergie entre le système et le milieu extérieur : **le travail et le transfert thermique**.

Carte mentale :

- Transformation thermodynamique

Carte mentale :

- Transformation thermodynamique
- **Passage** d'un système thermodynamique **d'un état d'équilibre initial à un état d'équilibre final**.

  Le passage d'un état d'équilibre à un autre est appelé **chemin de transformation**. Il en existe une infinités entre deux états.

  En général, le système est **hors équilibre** au cours d'une transformation : les grandeurs d'états ne sont pas définies (par exemple température ou pression différente en différents points du système).

Transformation thermodynamique

Définition

Comment réaliser une étude thermodynamique ?

- On considérera toujours un **système fermé**.

Transformation thermodynamique

Définition

Comment réaliser une étude thermodynamique ?

- On considérera toujours un **système fermé**.
- On définit **le système**. “Est ce qu’on considère le gaz dans le piston seulement ou le gaz ET le piston ?”

Transformation thermodynamique

Définition

Comment réaliser une étude thermodynamique ?

- On considérera toujours un **système fermé**.
- On définit **le système**. “Est ce qu’on considère le gaz dans le piston seulement ou le gaz ET le piston ?”
- On rassemble toutes les informations concernant **l’état initial** : pression, température, volume, quantité de matière etc.

Transformation thermodynamique

Définition

Comment réaliser une étude thermodynamique ?

- On considérera toujours un **système fermé**.
- On définit **le système**. “Est ce qu’on considère le gaz dans le piston seulement ou le gaz ET le piston ?”
- On rassemble toutes les informations concernant **l’état initial** : pression, température, volume, quantité de matière etc.
- On obtient des informations sur **l’état final** à partir de

Transformation thermodynamique

Définition

Comment réaliser une étude thermodynamique ?

- On considérera toujours un **système fermé**.
- On définit **le système**. “Est ce qu’on considère le gaz dans le piston seulement ou le gaz ET le piston ?”
- On rassemble toutes les informations concernant **l’état initial** : pression, température, volume, quantité de matière etc.
- On obtient des informations sur **l’état final** à partir de
  - **l’équation d’état** (GP ou PC2I ; si différent l’éq. d’état sera fournie dans l’énoncé)

Transformation thermodynamique

Définition

Comment réaliser une étude thermodynamique ?

- On considérera toujours un **système fermé**.
- On définit **le système**. “Est ce qu’on considère le gaz dans le piston seulement ou le gaz ET le piston ?”
- On rassemble toutes les informations concernant **l’état initial** : pression, température, volume, quantité de matière etc.
- On obtient des informations sur **l’état final** à partir de
  - **l’équation d’état** (GP ou PC2I ; si différent l’éq. d’état sera fournie dans l’énoncé)
  - le **type de transformation** qu’on identifiera

Transformation thermodynamique

Définition

Comment réaliser une étude thermodynamique ?

- On considérera toujours un **système fermé**.
- On définit **le système**. "Est ce qu'on considère le gaz dans le piston seulement ou le gaz ET le piston ?"
- On rassemble toutes les informations concernant **l'état initial** : pression, température, volume, quantité de matière etc.
- On obtient des informations sur **l'état final** à partir de
  - **l'équation d'état** (GP ou PC2I ; si différent l'éq. d'état sera fournie dans l'énoncé)
  - le **type de transformation** qu'on identifiera
  - les conditions d'**équilibre thermique** (même température que ?) et d'**équilibre mécanique** (PDF).

Carte mentale :

- Transformations iso et mono

Carte mentale :

- Transformations iso et mono
- Une transformation est dite **iso-quelque chose** quand une grandeur d'état du système est constante tout au long de la transformation.
  Isotherme : température du système constante.
  Isobare : pression du système constante.
  Isochore : volume du système constante.

  Une transformation est dite **mono-quelque chose** quand un paramètre extérieur est constant tout au long de la transformation.
  Monotherme : température extérieure constante.
  Monobare : pression extérieure constante.

Carte mentale :

- Transformation quasistatique

Carte mentale :

- Transformation quasistatique
- Modèle théorique correspondant à une transformation suffisamment lente pour que **toutes les variables d'état du système soient définies et connues à chaque instant de la transformation**.
  On laisse assez de temps au système pour que sa température soit partout la même : équilibre thermique du système atteint.
  On laisse assez de temps pour que la pression soit partout la même dans le système : équilibre mécanique du système atteint.
  Le système n'est pas forcément en équilibre avec le milieu extérieur.

Carte mentale :

- Transformation réversible

Carte mentale :

- Transformation réversible
- Modèle théorique correspondant à **une transformation quasistatique au cours de laquelle les système est en équilibre thermodynamique avec l'extérieur**. C'est une succession d'état d'équilibre avec l'extérieur.
  - Si la paroi du système permet les échanges thermiques (permet l'équilibre thermique avec l'extérieur) ET si la transformation est quasistatique, on parle de **réversibilité thermique**.
  - Si la paroi du système peut se déformer ou est mobile (permet l'équilibre mécanique avec l'extérieur) ET si la transformation est quasistatique, on parle de **réversibilité mécanique**.

Si la transformation est réversible elle est forcément quasistatique (la réciproque n'est pas vraie).

Transformation thermodynamique

Différents types de transformations

- La transformation réversible est **paradoxale**.

Transformation thermodynamique

Différents types de transformations

- La transformation réversible est **paradoxale**. Si le système est à l'équilibre avec l'extérieur alors la transformation s'arrête. Ce n'est pas le cas pour une transformation réversible : la transformation continue malgré le fait que le système ait atteint l'équilibre.
- Pourquoi le terme **réversible** ?

Transformation thermodynamique

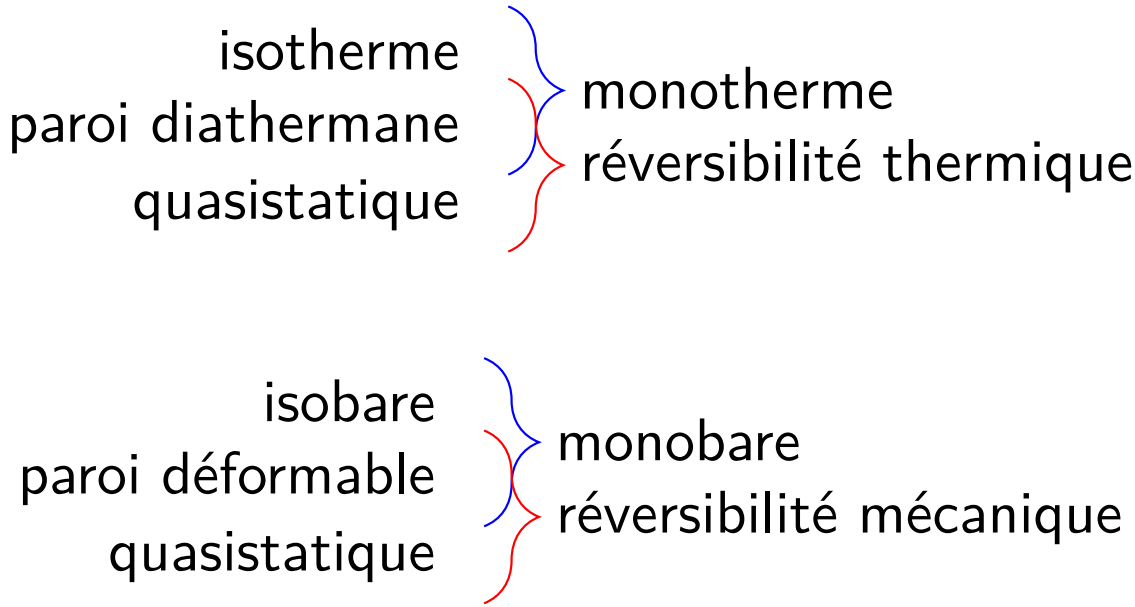
Différents types de transformations

- La transformation réversible est **paradoxale**. Si le système est à l'équilibre avec l'extérieur alors la transformation s'arrête. Ce n'est pas le cas pour une transformation réversible : la transformation continue malgré le fait que le système ait atteint l'équilibre.
- Pourquoi le terme **réversible** ? Si on inverse la perturbation pour faire revenir le système à son état initial, alors **le système repassera exactement par le même chemin de transformation** (par les mêmes états d'équilibres mais dans l'ordre inverse). Une transformation irréversible, elle, présentera une chemin de transformation inverse différent.

Transformation thermodynamique

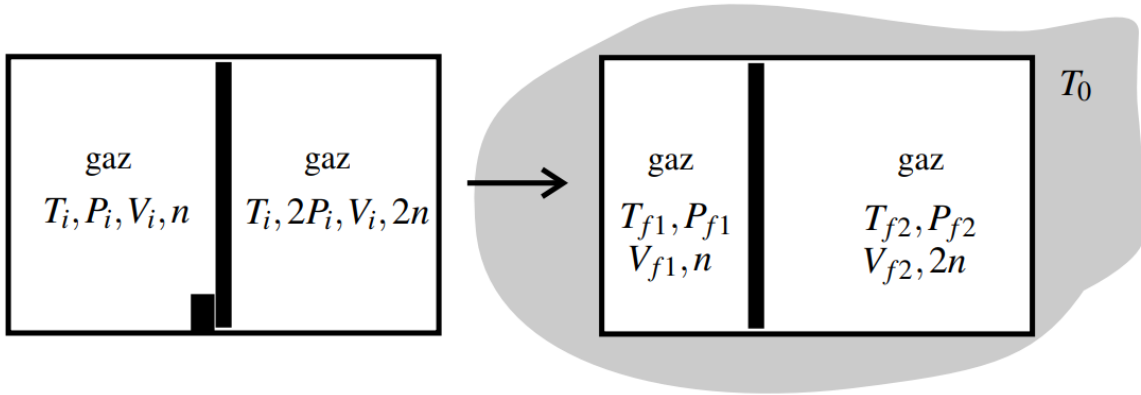
Différents types de transformations

Quelques relations entre des transformations.



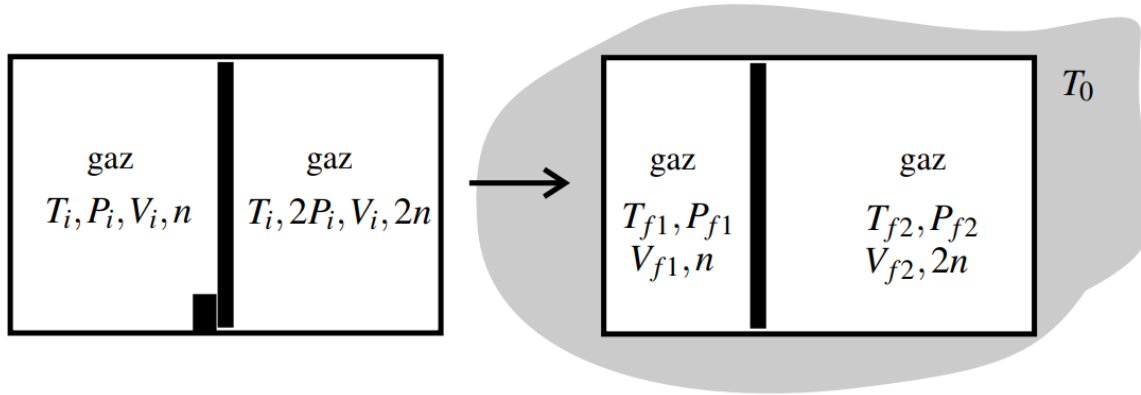
Attention : une transformation isotherme ou isobare n'est pas forcément quasistatique car toutes les grandeurs d'états ne sont pas forcément définies au cours de ces transformations.

Soit une enceinte indéformable séparée en 2 compartiments par une cloison étanche et mobile initialement bloquée par une cale. Le milieu extérieur a une température constante T_0. On retire la cale.



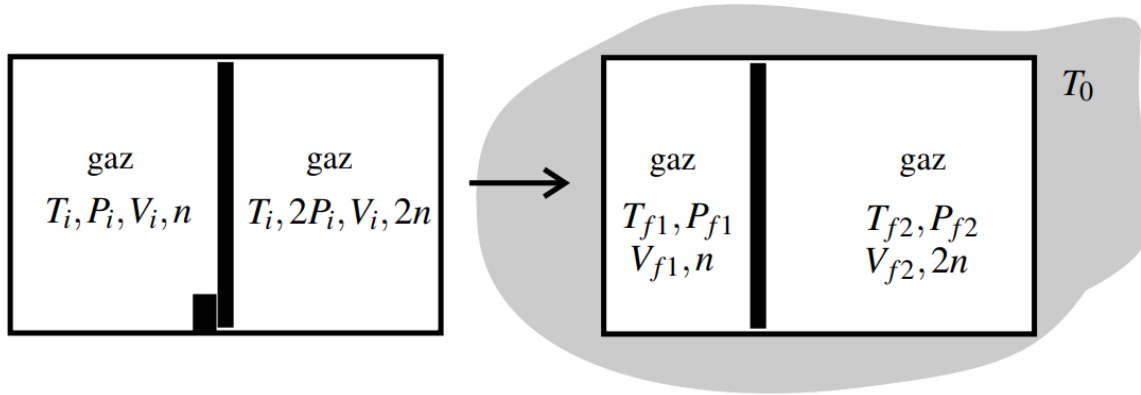
- Quelle transformation subit le compartiment de gauche Σ_1 ?

Soit une enceinte indéformable séparée en 2 compartiments par une cloison étanche et mobile initialement bloquée par une cale. Le milieu extérieur a une température constante T_0. On retire la cale.



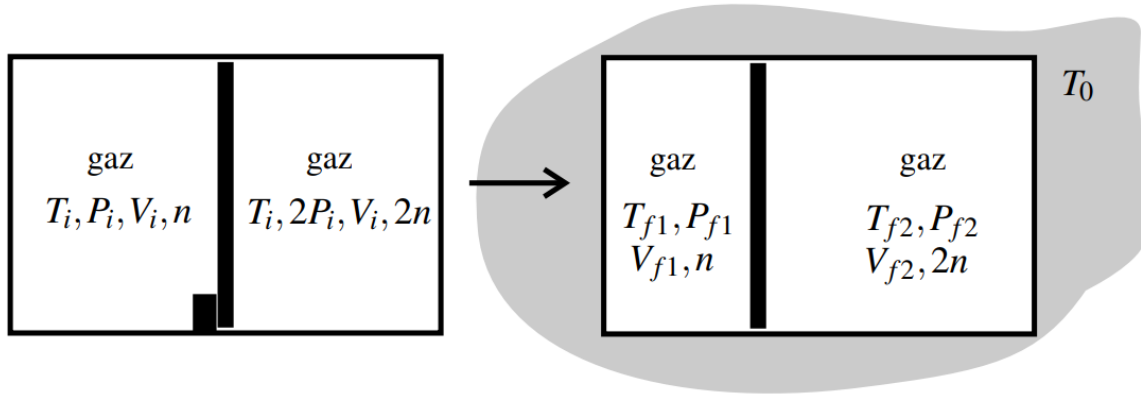
- Quelle transformation subit le compartiment de gauche Σ_1 ? Indéfinie (température extérieure T_0 constante mais T de compartiment droite pas forcément)
- le compartiment de droite Σ_2 ?

Soit une enceinte indéformable séparée en 2 compartiments par une cloison étanche et mobile initialement bloquée par une cale. Le milieu extérieur a une température constante T_0. On retire la cale.



- Quelle transformation subit le compartiment de gauche Σ_1 ? Indéfinie (température extérieure T_0 constante mais T de compartiment droite pas forcément)
- le compartiment de droite Σ_2 ? Indéfinie (température extérieure T_0 constante mais T de compartiment gauche pas forcément)
- l'enceinte entière Σ ?

Soit une enceinte indéformable séparée en 2 compartiments par une cloison étanche et mobile initialement bloquée par une cale. Le milieu extérieur a une température constante T_0. On retire la cale.



- Quelle transformation subit le compartiment de gauche Σ_1 ? Indéfinie (température extérieure T_0 constante mais T de compartiment droite pas forcément)
- le compartiment de droite Σ_2 ? Indéfinie (température extérieure T_0 constante mais T de compartiment gauche pas forcément)
- l'enceinte entière Σ ? Transformation isochore $V_i = V_f = V$ et monotherme $T_i = T_f$. **On choisira ce système pour mener l'étude.**

e

Travail des forces de pression

On a vu que le **travail mécanique** reçu par le système, noté W, correspondait à la somme des travaux des forces extérieurs non conservatives. On considère ici que la pression est uniforme et que le système ne subit que la force de pression.

$$W = \sum_i W\left(\overrightarrow{F}_i^{NC}\right)$$

.

Travail des forces de pression

On a vu que le **travail mécanique** reçu par le système, noté W, correspondait à la somme des travaux des forces extérieurs non conservatives. On considère ici que la pression est uniforme et que le système ne subit que la force de pression.

$$W = \sum_i W\left(\overrightarrow{F}_i^{NC}\right) = W\left(\overrightarrow{F}_{\text{pression}}\right)$$

.

Travail des forces de pression

On a vu que le **travail mécanique** reçu par le système, noté W, correspondait à la somme des travaux des forces extérieurs non conservatives. On considère ici que la pression est uniforme et que le système ne subit que la force de pression.

$$W = \sum_i W\left(\overrightarrow{F}_i^{NC}\right) = W\left(\overrightarrow{F}_{\text{pression}}\right)$$
$$= \int \delta W\left(\overrightarrow{F}_{\text{pression}}\right) \quad .$$

Travail des forces de pression

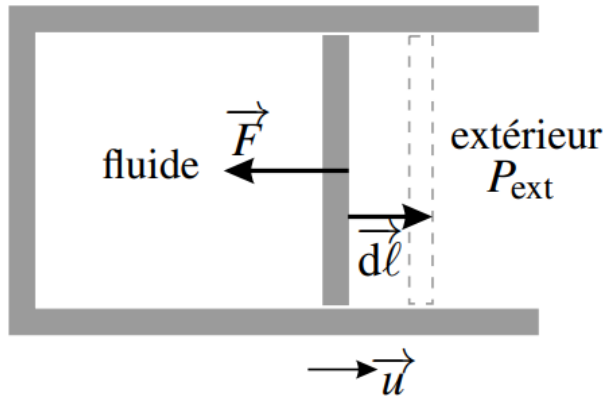
On a vu que le **travail mécanique** reçu par le système, noté W, correspondait à la somme des travaux des forces extérieurs non conservatives. On considère ici que la pression est uniforme et que le système ne subit que la force de pression.

$$W = \sum_i W\left(\overrightarrow{F}_i^{NC}\right) = W\left(\overrightarrow{F}_{\text{pression}}\right)$$
$$= \int \delta W\left(\overrightarrow{F}_{\text{pression}}\right) = \int \overrightarrow{F}_{\text{pression}} \cdot \overrightarrow{\mathrm{d}\ell}.$$

Travail des forces de pression

Expression générale

Considérons comme système Σ un fluide dans un cylindre indéformable ET un piston étanche soumis à une pression extérieure P_{ext}.



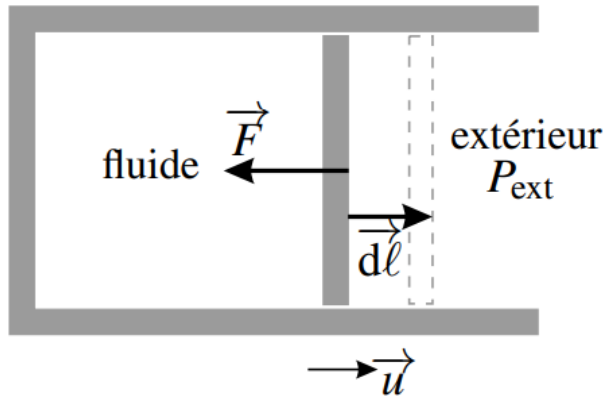
Le transfert mécanique reçu est

$$W = \int \vec{F}_{\text{pression}} \cdot \vec{\mathrm{d}\ell} = - \int F_{\text{pression}} \vec{u} \cdot \mathrm{d}\ell \vec{u}$$

Travail des forces de pression

Expression générale

Considérons comme système Σ un fluide dans un cylindre indéformable ET un piston étanche soumis à une pression extérieure P_{ext}.



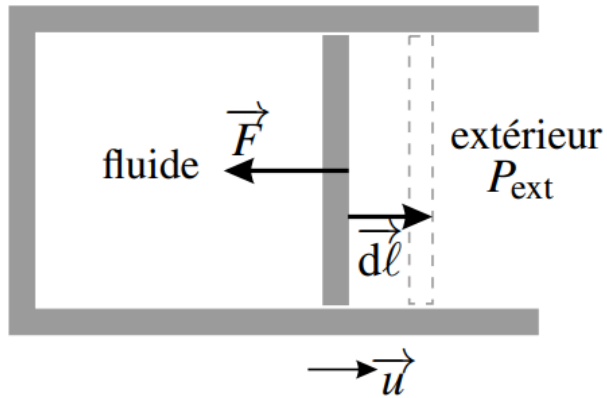
Le transfert mécanique reçu est

$$W = \int \vec{F}_{\text{pression}} \cdot \vec{\mathrm{d}\ell} = -\int F_{\text{pression}}\, \vec{u} \cdot \mathrm{d}\ell\, \vec{u} = -\int P_{\text{ext}} \mathrm{d}S \mathrm{d}\ell$$

Travail des forces de pression

Expression générale

Considérons comme système Σ un fluide dans un cylindre indéformable ET un piston étanche soumis à une pression extérieure P_{ext}.



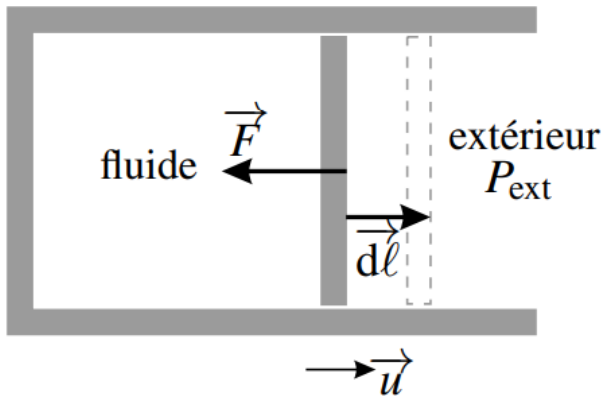
Le transfert mécanique reçu est

$$W = \int \vec{F}_{\text{pression}} \cdot \vec{\mathrm{d}\ell} = -\int F_{\text{pression}}\, \vec{u} \cdot \mathrm{d}\ell\, \vec{u} = -\int P_{\text{ext}} \mathrm{d}S \mathrm{d}\ell$$

$$W = -\int P_{\text{ext}} \mathrm{d}V.$$

Travail des forces de pression

Expression générale



Le transfert mécanique reçu est

$$W = -\int P_{\text{ext}} \mathrm{d}V$$

avec $\mathrm{d}V = S\mathrm{d}\ell$ **la variation algébrique de volume** V : quand $\mathrm{d}l > 0$, le volume du système augmente en variant de $\mathrm{d}V$, lorsque $\mathrm{d}l < 0$, le volume du système diminue en variant de $-\mathrm{d}V$.

Carte mentale :

- Travail des forces de pression extérieure

Carte mentale :

- Travail des forces de pression extérieure
- Au cours d'une transformation entre un état initial i et un état final f, **le travail des forces de pression extérieur à un système thermodynamique** est

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V.$$

Le système reçoit de l'énergie par transfert mécanique s'il est comprimé : $W > 0$ si $\Delta V < 0$.
Le système perd de l'énergie par transfert mécanique s'il est dilaté : $W < 0$ si $\Delta V > 0$.

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Dans le cas d'une **transformation réversible** la pression du système est définie à tout instant et est égale à la pression extérieure $P = P_{\text{ext}}$.
Dans ce cas, le travail ou transfert mécanique W est

$$W =$$

Cette quantité d'énergie W échangée par le système peut être déterminée géométriquement à l'aide d'un diagramme : le **diagramme de Clapeyron** ou diagramme (P, V).

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Dans le cas d'une **transformation réversible** la pression du système est définie à tout instant et est égale à la pression extérieure $P = P_{\text{ext}}$.
Dans ce cas, le travail ou transfert mécanique W est

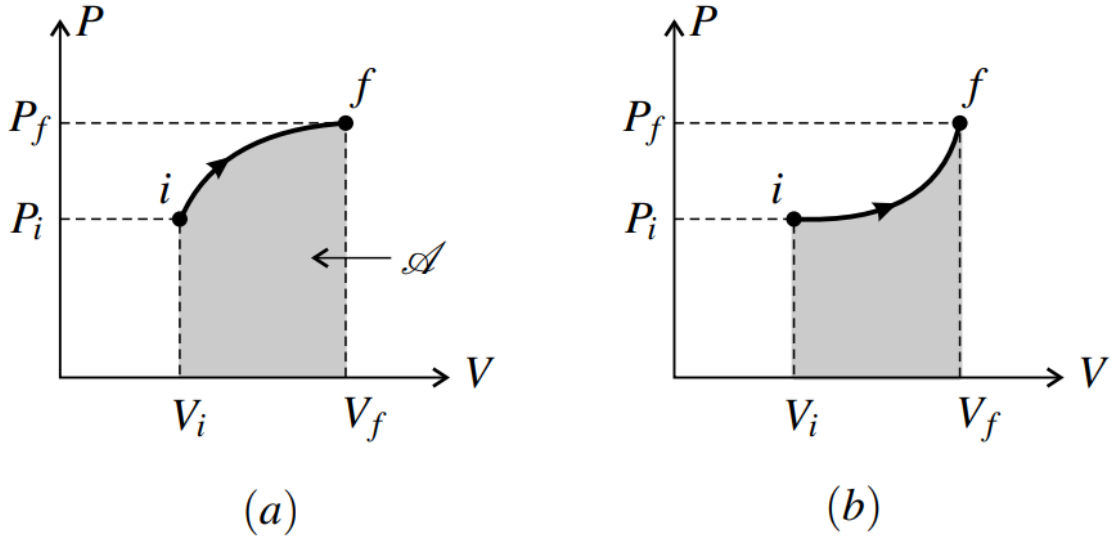
$$W = \int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V.$$

Cette quantité d'énergie W échangée par le système peut être déterminée géométriquement à l'aide d'un diagramme : le **diagramme de Clapeyron** ou diagramme (P, V).

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Diagramme de Clapeyron : tracé de la pression du système P en fonction de son volume V au cours d'une transformation.

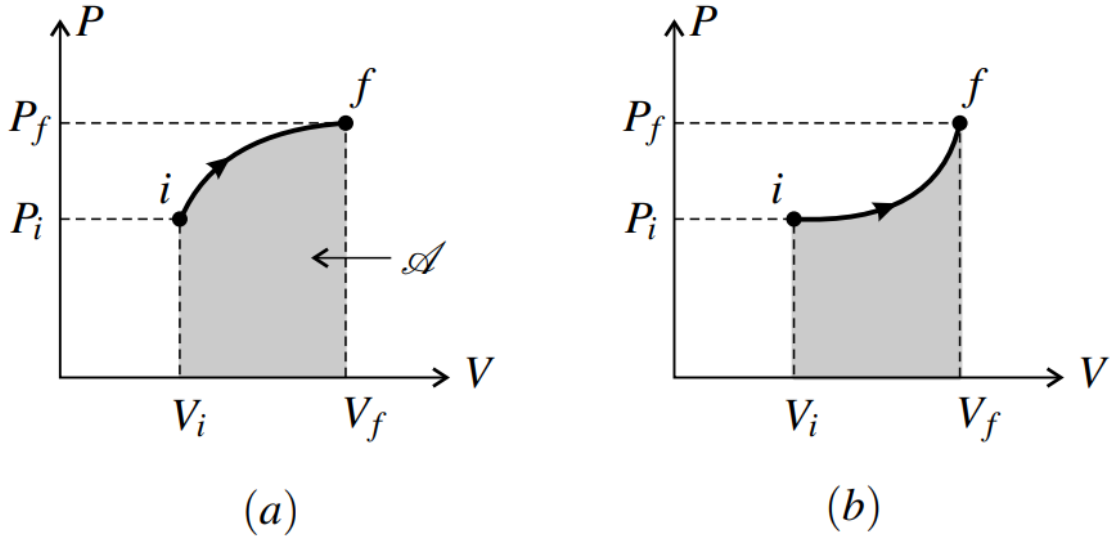


- Réalisable **seulement si**

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Diagramme de Clapeyron : tracé de la pression du système P en fonction de son volume V au cours d'une transformation.

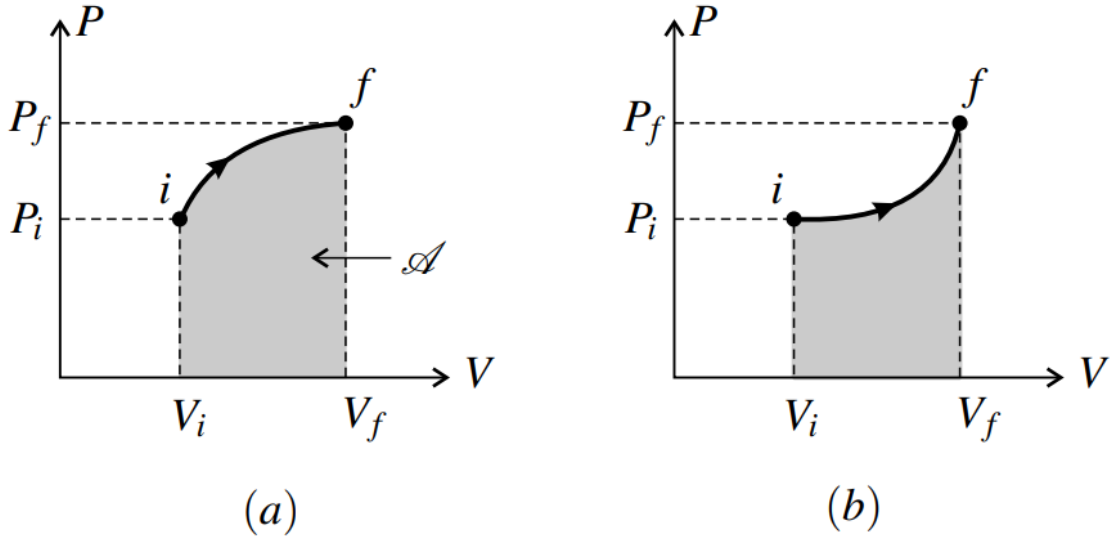


- Réalisable **seulement si transformation quasistatique** (P définie à tout instant).
- **Seulement pour une transformation réversible** W correspond à

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Diagramme de Clapeyron : tracé de la pression du système P en fonction de son volume V au cours d'une transformation.

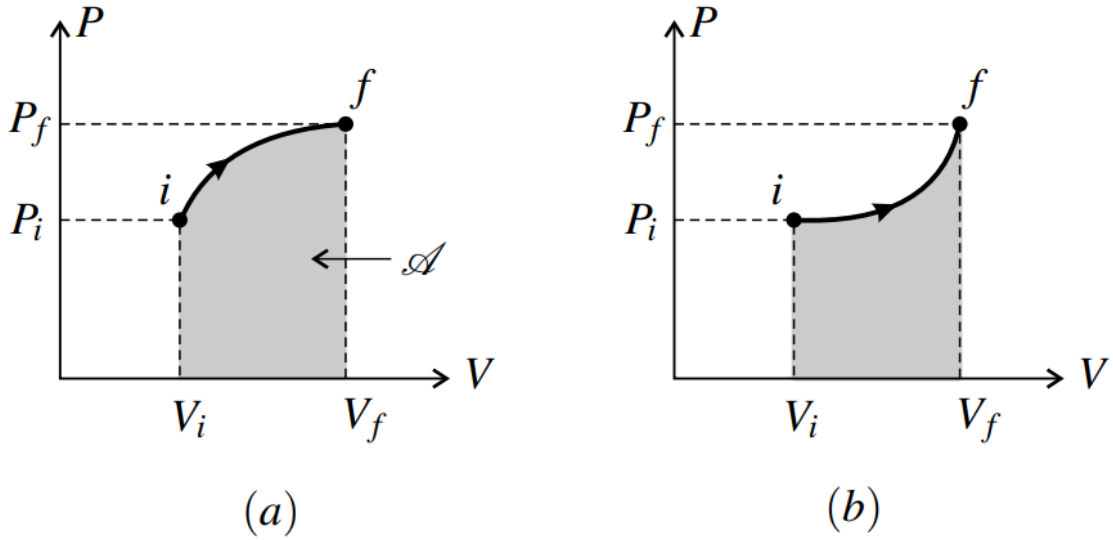


- Réalisable **seulement si transformation quasistatique** (P définie à tout instant).
- **Seulement pour une transformation réversible** W correspond à **l'opposée de l'aire $\mathscr{A}$ sous la courbe** $P(V)$.

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Transformation réversible $\quad W = -\int_{V_i}^{V_f} P\mathrm{d}V = -\mathscr{A}.$

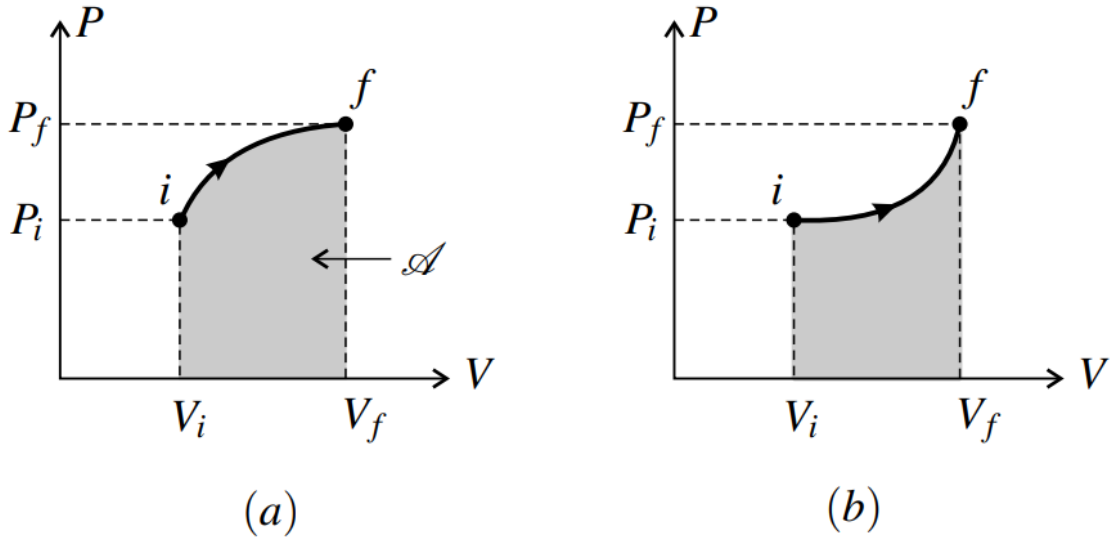


- Si $V_f > V_i$ alors

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Transformation réversible $\quad W = -\int_{V_i}^{V_f} P\mathrm{d}V = -\mathscr{A}.$

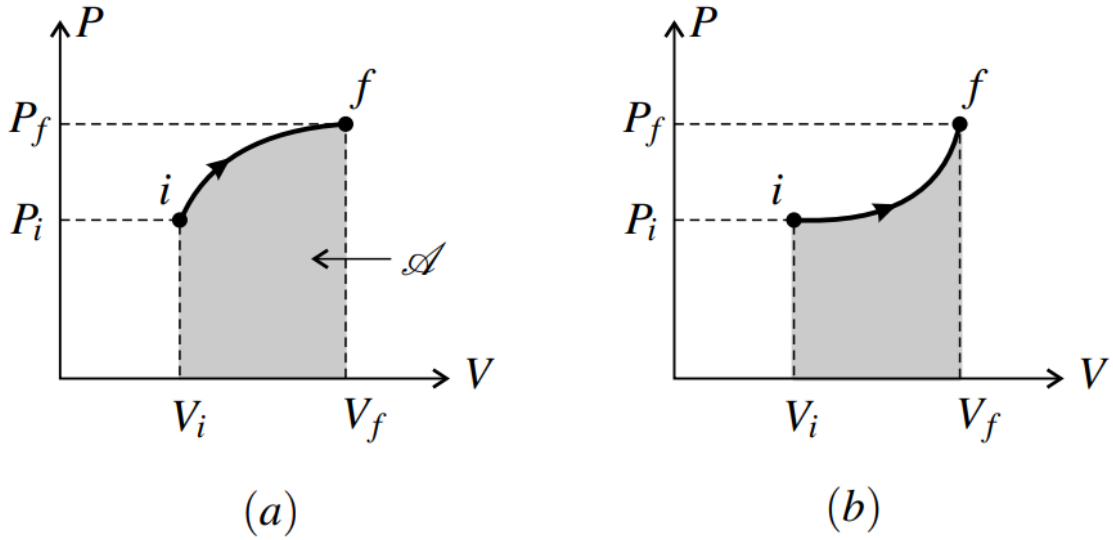


- Si $V_f > V_i$ alors $\mathscr{A} > 0$ donc

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Transformation réversible $\quad W = -\int_{V_i}^{V_f} P\mathrm{d}V = -\mathscr{A}.$

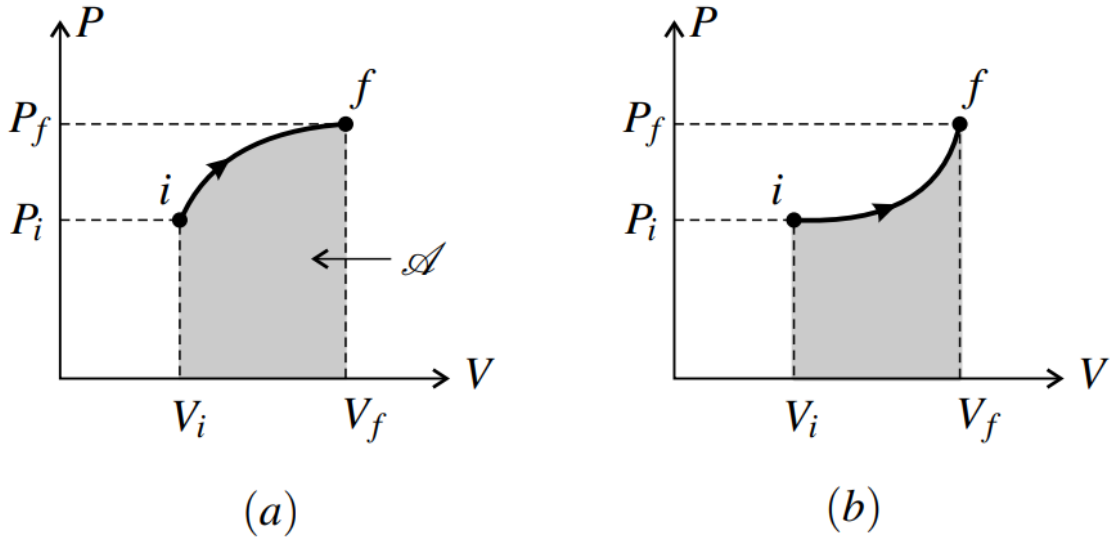


- Si $V_f > V_i$ alors $\mathscr{A} > 0$ donc $W < 0$: une dilatation du système correspond à une perte d'énergie.
- Si $V_f < V_i$ alors

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Transformation réversible $\quad W = -\int_{V_i}^{V_f} P\mathrm{d}V = -\mathscr{A}.$

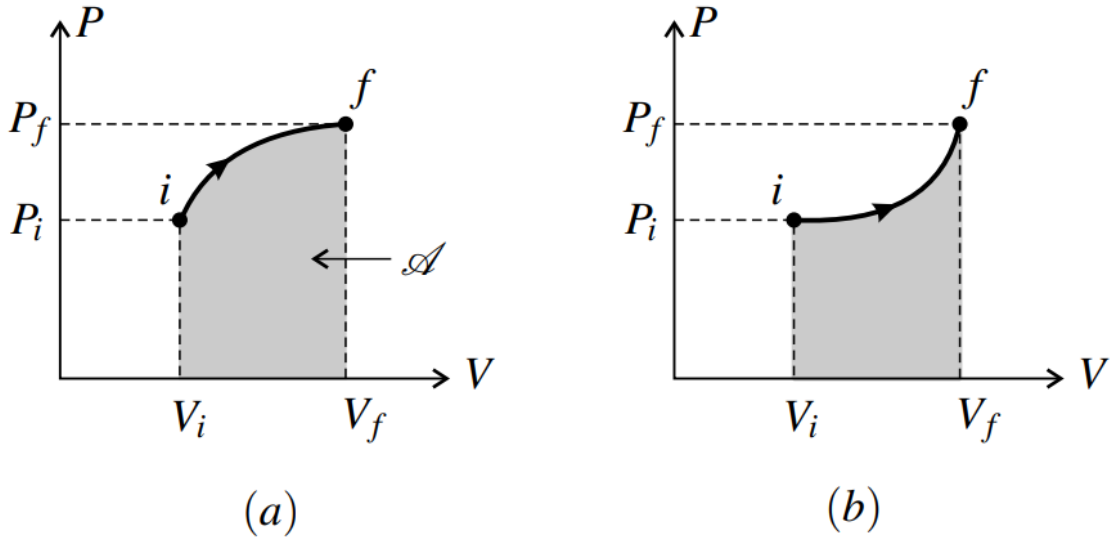


- Si $V_f > V_i$ alors $\mathscr{A} > 0$ donc $W < 0$: une dilatation du système correspond à une perte d'énergie.
- Si $V_f < V_i$ alors $\mathscr{A} < 0$ donc

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Transformation réversible $\quad W = -\int_{V_i}^{V_f} P\mathrm{d}V = -\mathscr{A}.$

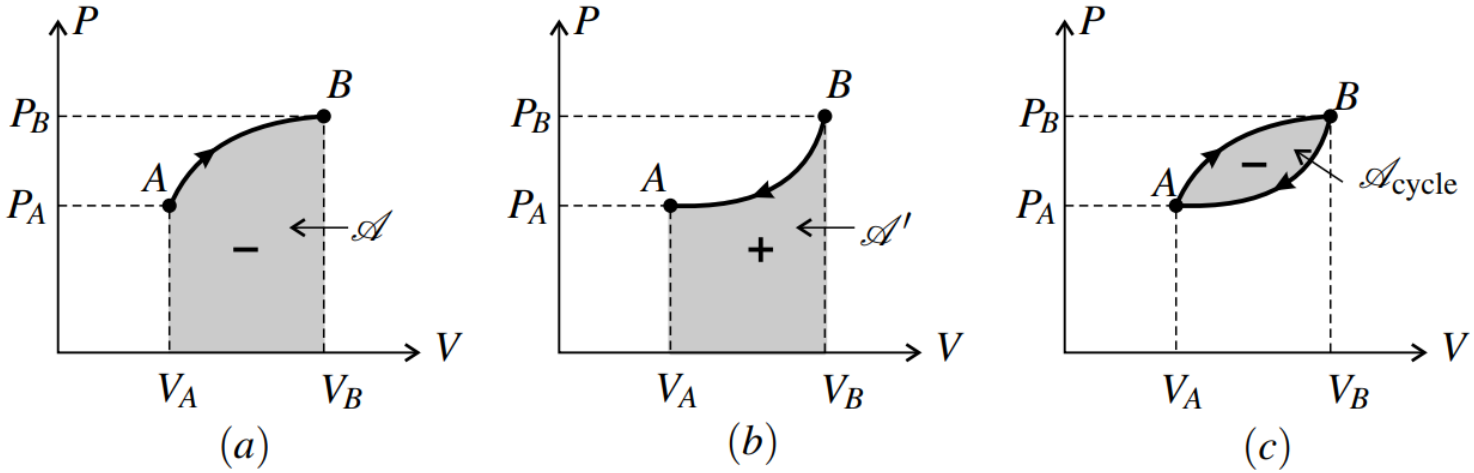


- Si $V_f > V_i$ alors $\mathscr{A} > 0$ donc $W < 0$: une dilatation du système correspond à une perte d'énergie.
- Si $V_f < V_i$ alors $\mathscr{A} < 0$ donc $W > 0$: une compression du système correspond à un gain d'énergie.

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Cas d'une transformation cyclique réversible mécaniquement mais pas thermiquement.

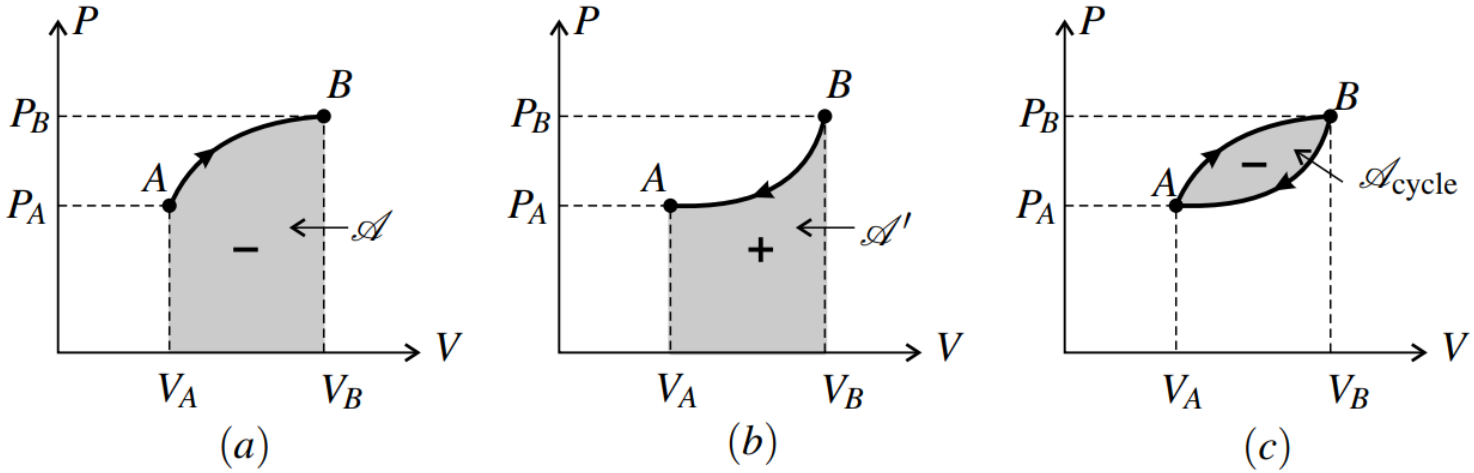


- De A vers B, $\mathscr{A} > 0$.

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Cas d'une transformation cyclique réversible mécaniquement mais pas thermiquement.

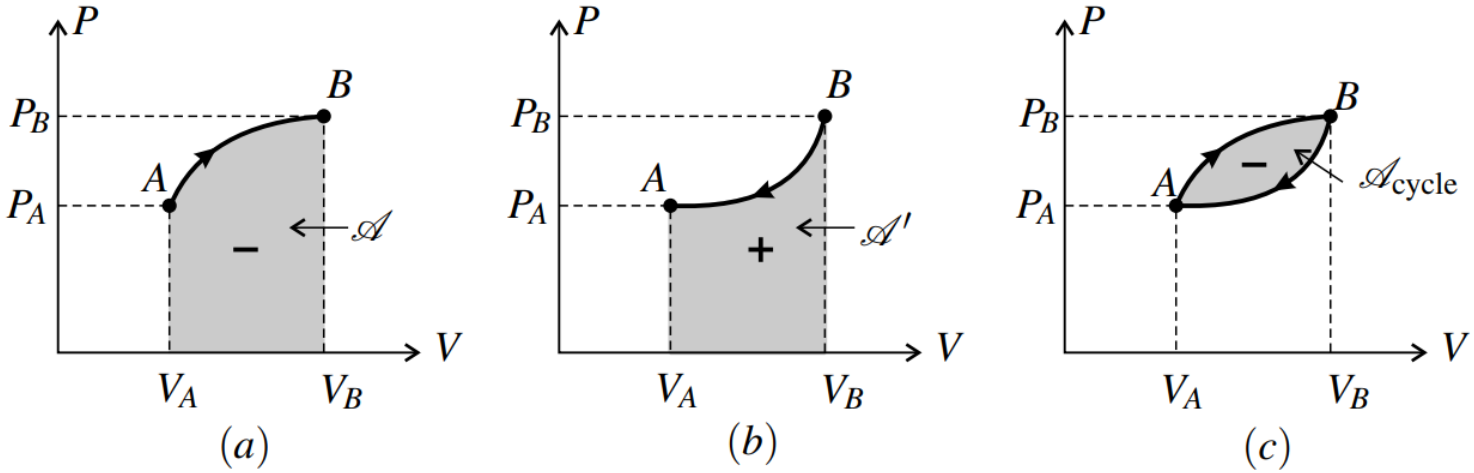


- De A vers B, $\mathscr{A} > 0$.
- De B vers A, $\mathscr{A}' < 0$ et $\mathscr{A} > |\mathscr{A}'|$.

Travail des forces de pression

Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

Cas d'une transformation cyclique réversible mécaniquement mais pas thermiquement.



- De A vers B, $\mathscr{A} > 0$.
- De B vers A, $\mathscr{A}' < 0$ et $\mathscr{A} > |\mathscr{A}'|$.
- Au final $\mathscr{A}_{\text{cycle}} = \mathscr{A} + \mathscr{A}' > 0$ donc $W < 0$: le transfert mécanique est négatif, le système fourni du travail, on parle d'un **cycle moteur**.

Carte mentale :

- Sens des cycles dans le diagramme de Clapeyron.

Carte mentale :

- Sens des cycles dans le diagramme de Clapeyron.
- Quelque soit le type de transformation, le sens d'un cycle dans le diagramme de Clapeyron (P, V) permet de déterminer type de cycle.
  - **Sens horaire** $W < 0$: le système cède du travail à l'extérieur, **le cycle est moteur** (*horaire* $=$ *montre* $=$ *moteur*).
  - **Sens direct** $W > 0$: le système reçoit du travail de l'extérieur, **le cycle est récepteur**.

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation isochore :**

$$\delta W =$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation isochore :**

$$\delta W = -P_{\text{ext}}\mathrm{d}V =$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation isochore :** pas de transfert mécanique

$$\delta W = -P_{\text{ext}}\mathrm{d}V = -P_{\text{ext}} \times 0 = 0.$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation isochore :** pas de transfert mécanique

$$\delta W = -P_{\text{ext}}\mathrm{d}V = -P_{\text{ext}} \times 0 = 0.$$

- **Transformation monobare :** $P_{\text{ext}} = \text{cst}$

$$W =$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation isochore :** pas de transfert mécanique

$$\delta W = -P_{\text{ext}}\mathrm{d}V = -P_{\text{ext}} \times 0 = 0.$$

- **Transformation monobare :** $P_{\text{ext}} = \text{cst}$

$$W = \int_i^f \delta W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}}\mathrm{d}V = -P_{\text{ext}} \int_{V_i}^{V_f} \mathrm{d}V = -P_{\text{ext}}\Delta V.$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation réversible et isotherme d'un GP :** $P_{\text{ext}} = P$ avec P défini à tout instant, et $T = \text{cst}$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V =$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation réversible et isotherme d'un GP :** $P_{\text{ext}} = P$ avec P défini à tout instant, et $T = \text{cst}$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V =$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation réversible et isotherme d'un GP :** $P_{\text{ext}} = P$ avec P défini à tout instant, et $T = \text{cst}$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} \mathrm{d}V$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation réversible et isotherme d'un GP :** $P_{\text{ext}} = P$ avec P défini à tout instant, et $T = \text{cst}$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} \mathrm{d}V$$

$$= -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{\mathrm{d}V}{V}$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation réversible et isotherme d'un GP :** $P_{\text{ext}} = P$ avec P défini à tout instant, et $T = \text{cst}$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} \mathrm{d}V$$

$$= -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{\mathrm{d}V}{V} = -nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation réversible et isotherme d'un GP :** $P_{\text{ext}} = P$ avec P défini à tout instant, et $T = \text{cst}$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} \mathrm{d}V$$
$$= -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{\mathrm{d}V}{V} = -nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) = -nRT \ln\left(\frac{P_i}{P_f}\right).$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation polytropique d'un GP :** polytropique = réversible + $PV^k = \text{cst}.$

$$PV^k = P_i V_i^k \quad \text{soit} \quad P = P_i V_i^k \frac{1}{V^k}$$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V =$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation polytropique d'un GP :** polytropique = réversible + $PV^k = \text{cst}.$

$$PV^k = P_i V_i^k \quad \text{soit} \quad P = P_i V_i^k \frac{1}{V^k}$$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V =$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation polytropique d'un GP :** polytropique = réversible + $PV^k = \text{cst}.$

$$PV^k = P_i V_i^k \quad \text{soit} \quad P = P_i V_i^k \frac{1}{V^k}$$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V = -P_i V_i^k \int_{V_i}^{V_f} \frac{\mathrm{d}V}{V^k}$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation polytropique d'un GP :** polytropique = réversible + $PV^k = \text{cst}.$

$$PV^k = P_i V_i^k \quad \text{soit} \quad P = P_i V_i^k \frac{1}{V^k}$$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V = -P_i V_i^k \int_{V_i}^{V_f} \frac{\mathrm{d}V}{V^k}$$

$$= -P_i V_i^k \left[\frac{V^{-k+1}}{-k+1} \right]_{V_i}^{V_f}$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation polytropique d'un GP :** polytropique = réversible + $PV^k = \text{cst}.$

$$PV^k = P_i V_i^k \quad \text{soit} \quad P = P_i V_i^k \frac{1}{V^k}$$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V = -P_i V_i^k \int_{V_i}^{V_f} \frac{\mathrm{d}V}{V^k}$$

$$= -P_i V_i^k \left[\frac{V^{-k+1}}{-k+1} \right]_{V_i}^{V_f} = \frac{1}{k-1} \left(P_i V_i^k V_f^{-k+1} - P_i V_i^k V_i^{-k+1} \right)$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation polytropique d'un GP :** polytropique = réversible + $PV^k = \text{cst}.$

$$PV^k = P_i V_i^k \quad \text{soit} \quad P = P_i V_i^k \frac{1}{V^k}$$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V = -P_i V_i^k \int_{V_i}^{V_f} \frac{\mathrm{d}V}{V^k}$$

$$= -P_i V_i^k \left[\frac{V^{-k+1}}{-k+1}\right]_{V_i}^{V_f} = \frac{1}{k-1}\left(P_i V_i^k V_f^{-k+1} - P_i V_i^k V_i^{-k+1}\right)$$

$$\text{or} \quad P_i V_i^k = P_f V_f^k \quad \text{donc}$$

Travail des forces de pression

Quelques transformations mécaniques

- **Transformation polytropique d'un GP :** polytropique = réversible + $PV^k = \text{cst}.$

$$PV^k = P_i V_i^k \quad \text{soit} \quad P = P_i V_i^k \frac{1}{V^k}$$

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} \mathrm{d}V = -\int_{V_i}^{V_f} P \mathrm{d}V = -P_i V_i^k \int_{V_i}^{V_f} \frac{\mathrm{d}V}{V^k}$$

$$= -P_i V_i^k \left[\frac{V^{-k+1}}{-k+1}\right]_{V_i}^{V_f} = \frac{1}{k-1}\left(P_i V_i^k V_f^{-k+1} - P_i V_i^k V_i^{-k+1}\right)$$

$$\text{or} \quad P_i V_i^k = P_f V_f^k \quad \text{donc}$$

$$W = \frac{1}{k-1}\left(P_f V_f - P_i V_i\right) = \frac{nR}{k-1}\left(T_f - T_i\right).$$

Carte mentale :

- Transfert thermique

Carte mentale :

- Transfert thermique
- Un système thermodynamique peut recevoir de l'**énergie sans intervention d'une action mécanique** mesurable à l'échelle macroscopique. Ce transfert d'énergie complémentaire du travail mécanique s'appelle transfert thermique. Il est noté Q, et on le nomme parfois **chaleur**.

Carte mentale :

- Transformation adiabatique

Carte mentale :

- Transformation adiabatique
- Une transformation est dite adiabatique si elle ne donne lieu à **aucun échange de matière ni aucun échange de chaleur** entre le système et le milieu extérieur à aucun moment de la transformation, soit $Q = 0$.

  Cela peut correspondre à une transformation que subit un **système avec des parois diathermanes** (qui empêchent les transferts thermiques), ou une **transformation trop rapide** pour que les transferts thermiques aient lieu.

Carte mentale :

- Thermostat

Carte mentale :

- Thermostat
- Un thermostat est un système fermé n'échangeant aucun travail W avec l'extérieur mais qui est c**apable d'échanger un transfert thermique Q sans que sa température varie**.

  Comme $\partial T = 0$, les capacités thermiques d'un thermostat sont considérées infinies : $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \longrightarrow \infty$ et $C_P = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P \longrightarrow \infty$.

  En pratique, un système de taille très importante par rapport aux autres peut être considéré comme un thermostat (ex : l'atmosphère).

Transfert thermique

Définitions

Il existe 3 modes de transferts thermiques.

- **La conduction thermique.** Mode de transfert entre deux systèmes séparés par un milieu matériel immobile. Le transfert résulte de collisions entre les particules microscopiques constituants les systèmes et la paroi. Les particules du système le plus chaud cèdent de l'énergie cinétique aux particules du système le plus froid.
  Exemple : une casserole en acier permet la conduction thermique entre le feu et les aliments.

Transfert thermique

Définitions

Il existe 3 modes de transferts thermiques.

- **La conduction thermique.** Mode de transfert entre deux systèmes séparés par un milieu matériel immobile. Le transfert résulte de collisions entre les particules microscopiques constituants les systèmes et la paroi. Les particules du système le plus chaud cèdent de l'énergie cinétique aux particules du système le plus froid.
  Exemple : une casserole en acier permet la conduction thermique entre le feu et les aliments.
- **Convection thermique.** Ce mode met en jeu un fluide en mouvement. Le fluide passe d'un système à l'autre : il reçoit de l'énergie du système chaud et en cède au système froid.
  Exemple : un ventilateur provoque la convection de l'air.

Transfert thermique

Définitions

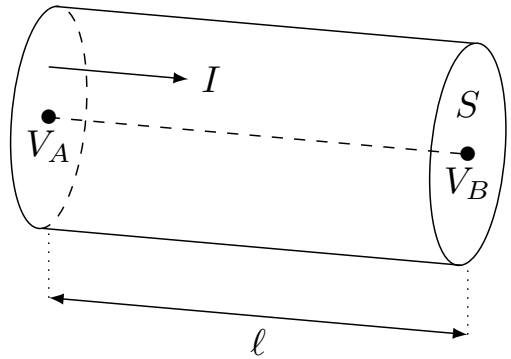
Il existe 3 modes de transferts thermiques.

- **La conduction thermique.** Mode de transfert entre deux systèmes séparés par un milieu matériel immobile. Le transfert résulte de collisions entre les particules microscopiques constituants les systèmes et la paroi. Les particules du système le plus chaud cèdent de l'énergie cinétique aux particules du système le plus froid.
  Exemple : une casserole en acier permet la conduction thermique entre le feu et les aliments.
- **Convection thermique.** Ce mode met en jeu un fluide en mouvement. Le fluide passe d'un système à l'autre : il reçoit de l'énergie du système chaud et en cède au système froid.
  Exemple : un ventilateur provoque la convection de l'air.
- **Rayonnement thermique.** Comme nous l'avons vu dans la leçon *Sources lumineuses*, un corps chaud émet un rayonnement thermique sous la forme d'ondes électromagnétiques.
  Exemple : la résistance d'un four génère un rayonnement thermique.

Transfert thermique

Flux thermique et résistance thermique

On utilise l'analogie avec la résistance électrique.



La circulation d'un **courant d'intensité** I dans un conducteur électrique cylindrique est due à **la différence de potentiels** $V_A - V_B$, ou tension $U = V_A - V_B$. D'après la loi d'Ohm

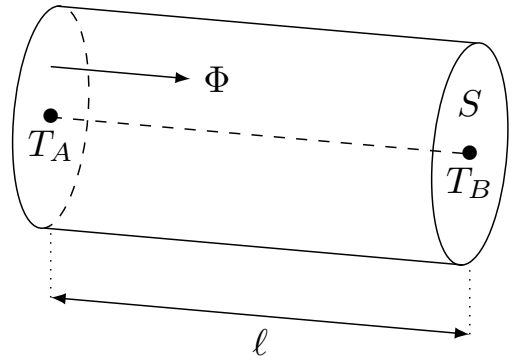
$$V_A - V_B = RI \quad \text{ou} \quad R = \frac{V_A - V_B}{I}.$$

Plus **la résistance électrique** d'un matériau est élevée et plus il faut une différence de potentiels importante pour permettre la circulation du courant.

Transfert thermique

Flux thermique et résistance thermique

On utilise l'analogie avec la résistance électrique.



La circulation d'une **puissance thermique** $\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$ (en W) dans un conducteur thermique cylindrique est due à **la différence de températures** $T_A - T_B$. Par analogie avec la loi d'Ohm

$$T_A - T_B = R_{\text{th}}\Phi \quad \text{ou} \quad R_{\text{th}} = \frac{T_A - T_B}{\Phi}.$$

Plus **la résistance thermique** (en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) d'un matériau est élevée et plus il faut une différence de températures importante pour permettre le transfert thermique.

Carte mentale :

- Résistance thermique

Carte mentale :

- Résistance thermique
- La résitance thermique d'un matériau R_{th} ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) correspond au rapport de la différence de températures $T_1 - T_2$ (K) entre deux thermostats en contact avec ce matériau, et de la puissance thermique $\Phi_{1\to 2}$ (W) passant au travers de ce matériau **du thermostat 1 au thermostat 2**

$$R_{\text{th}} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi_{1\to 2}}.$$

Carte mentale :

- Expression d'une résistance

Carte mentale :

- Expression d'une résistance
- On peut se rappeler de la dépendance de la résistance R (électrique ou thermique) en fonction de la longueur ℓ et de la surface S de son matériau constitutif en modélisant les variations de ces grandeurs par une association de résistances.
  - Une augmentation de la longueur d'une résistance de ℓ à 2ℓ correspond à la mise en série de deux résistances R, soit une résistance équivalente $R_{\text{éq}} = 2R$. **La résistance est proportionnelle à la longueur ℓ.**
  - Une augmentation de la surface d'une résistance de S à $2S$ correspond à la mise en parallèle de deux résistances R, soit une résistance équivalente $R_{\text{éq}} = \frac{1}{\frac{1}{R}+\frac{1}{R}} = \frac{R}{2}$. **La résistance est inversement proportionnelle à la surface S.**

  On peut écrire

$$R = \frac{\ell}{\gamma S}$$

avec γ la conductivité (électrique ou thermique) du matériau.

Carte mentale :

- Transfert thermique conducto-convectif : loi de Newton

Carte mentale :

- Transfert thermique conducto-convectif : loi de Newton
- À l'interface entre un solide et un fluide, les phénomènes de conduction et de convection sont indissociables. On peut décrire ce transfert thermique conducto-convectif par une loi phénoménologique : **la loi phénoménologique de Newton**

$$\Phi_{s\to f} = h\,(T_s - T_f)\,S$$

avec $\Phi_{s\to f}$ (W) la puissance thermique allant **du solide au fluide**, h **le coefficient de transfert thermique** ($\mathrm{W\cdot K^{-1}\cdot m^{-2}}$), T_s la température du solide, T_f la température du fluide et S la surface de contact entre le solide et le fluide.

On peut voir que la grandeur hS correspond à l'inverse du résistance thermique R_{th}

$$\frac{1}{hS} = \frac{T_s - T_f}{\Phi_{s\to f}} \quad \text{et} \quad R_{\text{th}} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi_{1\to 2}}.$$