

Travail des forces pressantes

1 – Quelques rappels

- **Système thermodynamique** : ensemble de corps délimité par une surface de contrôle fermée, matérielle ou fictive, à travers laquelle peuvent s'opérer des transferts de matière et/ou d'énergie.

	Echanges de matière	Echanges d'énergie
Ouvert	Oui	Oui
Fermé	Non	Oui
Isolé	Non	Non

Une paroi **athermane** ou **calorifugée** empêche les transferts thermiques entre le système et le **milieu extérieur**.

- L'état du système peut être décrit au moyen de quelques grandeurs, appelées **paramètres d'état**.
 - Grandeur extensive : proportionnelle à la quantité de matière et par conséquent, additive : *volume, masse, énergie interne, entropie, etc.*
 - Grandeur intensive : définie localement, indépendante de la quantité de matière : température, pression, masse volumique, fraction molaire, concentration molaire, etc.
- Un système est à l'**équilibre thermodynamique** si ses paramètres d'état n'évoluent plus dans le temps. Cette situation impose plusieurs types d'équilibre parmi lesquels :
 - Equilibre thermique : *température uniforme de part et d'autre d'une paroi diathermane.*
 - Equilibre mécanique : *compensation des actions mécaniques de part et d'autre de parois mobiles.*
- Une **transformation** caractérise l'évolution, spontanée ou provoquée, du système d'un état initial vers un état final.

<ul style="list-style-type: none"> ○ Isotherme : $T = \text{cte}$ ○ Isobare : $P = \text{cte}$ ○ Isochore : $V = \text{cte}$ 		<ul style="list-style-type: none"> ○ Monotherme : $T_{\text{ext}} = \text{cte}$ ○ Monobare : $P_{\text{ext}} = \text{cte}$ ○ Adiabatique : absence de transfert thermique
---	--	---
- **Modèle de la transformation infiniment lente** :
 - Une transformation est infiniment lente lorsqu'un opérateur contrôle l'évolution du système d'un état initial vers un état final, tout en s'assurant qu'à chaque instant, le système est à l'équilibre thermodynamique avec le milieu extérieur.
 - A chaque instant d'une transformation infiniment lente, les grandeurs intensives (T, P, \dots) sont définies et homogènes au sein du système.
 - Par abus de langage, les termes de « réversible » ou « quasi-statique » sont parfois confondus avec celui de transformation infiniment lente.
- Toute transformation réelle d'un système (= évolution non contrôlée infiniment lentement par un opérateur) est **irréversible**. Pendant la transformation, les grandeurs intensives ne sont pas définies, car non homogènes au sein du système. Elles ne sont définies que dans les états d'équilibre initial et final.

- **Modèles classiques de description des états physiques d'un système :**
 - **Etat liquide ou solide** décrit généralement comme **incompressible et indilatable**.
 - Hypothèses : Le système a un volume propre qui reste constant même suite à modification de T ou P.
 - Validité : assez bonne tant que les variations de pression et de température restent raisonnables.
 - **Etat gazeux** décrit généralement par le modèle du **gaz parfait**.
 - Hypothèses : les entités constituant le gaz sont considérées :
 - Ponctuelles (sans volume propre)
 - Sans interaction
 - Validité : assez bonne pour de nombreux gaz à basse pression.
 - Equation d'état :

2 – Forces pressantes

2.1. Définition

- Les entités (selon le cas, atomes ou molécules) qui constituent un fluide ne sont pas immobiles. Les chocs répétés de ces entités sur les parois qui contiennent le fluide contribuent à créer une **force dite pressante**.

A des fins de modélisation, la paroi contenant le fluide est découpée en surfaces élémentaires dS .

- **Etude locale** : la force pressante subie par une surface élémentaire dS de paroi, centrée sur le point M, vérifie :
 - Direction :
 - Sens :
 - Norme :

- **Etude globale** : La force pressante subie par l'ensemble de la paroi de surface S s'obtient en intégrant les forces élémentaires subies par les éléments de surface dS :

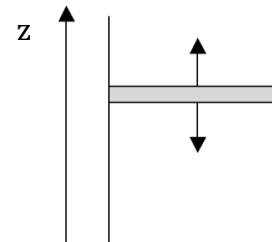
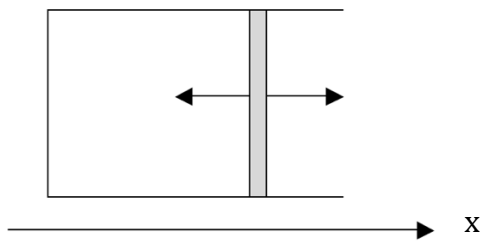
- **Conséquence** : *Expression de la force pressante exercée sur une surface par un fluide*
 - Au sein d'un gaz, la pression est généralement considérée comme homogène :

- Au sein d'un liquide, la pression dépend de l'altitude z (*loi fondamentale de la statique des fluides*) :
 - Si la surface en contact avec le fluide est horizontale, tous les points de la surface sont à la même altitude : ils sont donc soumis à la même pression.

 - Si la surface en contact avec le fluide n'est pas horizontale, tous les points de la surface ne sont pas soumis à la même pression. Il faut donc découper la surface en bandes d'épaisseur dz , exprimer la force élémentaire subie par chaque bande, puis intégrer.

2.2. Exemples de bilans de forces pressantes

- *Ecrire la condition d'équilibre d'un piston soumis à l'extérieur à la pression atmosphérique P_0 et à la pression intérieure P , selon l'orientation horizontale ou verticale de son axe.*



3 – Travail des forces pressantes

3.1. Travail d'une force

- Soit un système mécanique en mouvement soumis à une force \vec{F} .
- **Etude locale** : Le mouvement est décomposé en déplacements élémentaires $d\vec{\ell}$.

Travail élémentaire de la force \vec{F} sur le déplacement élémentaire $d\vec{\ell}$

Unité :

- **Etude globale** : Le travail global de la force \vec{F} sur le déplacement \overline{AB} s'obtient en « sommant » les travaux élémentaires :

Attention : le travail s'identifie au produit scalaire $\vec{F} \cdot \overline{AB}$ seulement si le vecteur force \vec{F} est constant (direction, norme, sens) pendant tout le déplacement.

Exemple :

- **Signe** :

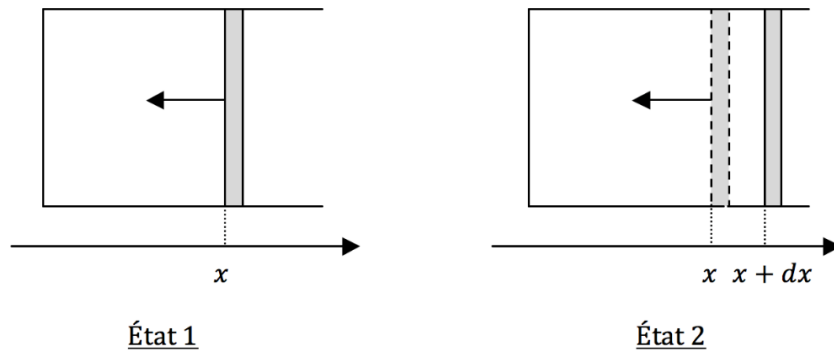
- **Nullité du travail** :
A quelle(s) condition(s) une force ne travaille-t-elle pas ?

3.2. Travail d'une force pressante appliquée à un piston

- **Cadre de l'étude :**

- Un fluide est enfermé dans un cylindre horizontal rigide limité par un piston mobile,
- La pression extérieure notée P_{ext} est constante.
- L'équilibre de pression n'est pas établi entre l'intérieur et l'extérieur ce qui entraîne un mouvement du piston sur une distance dx .

- **Schéma :** Pour éviter les problèmes de signes ultérieurs, le schéma est construit en considérant dx positif.



- **Objectif :** Exprimer le travail élémentaire reçu par le système {fluide intérieur + piston} de la part du fluide extérieur.

- **Signe :**

- Si le fluide intérieur est comprimé :

- Si le fluide intérieur subit une détente :

Généralisation : Travail des forces pressantes extérieures	
Travail élémentaire des forces pressantes extérieures	$\delta W_p = -P_{ext} \cdot dV$
Travail global des forces pressantes extérieures	$W_p = \int_A^B \delta W_p = \int_{V_A}^{V_B} -P_{ext} \cdot dV$

4 – Etude de transformations particulières



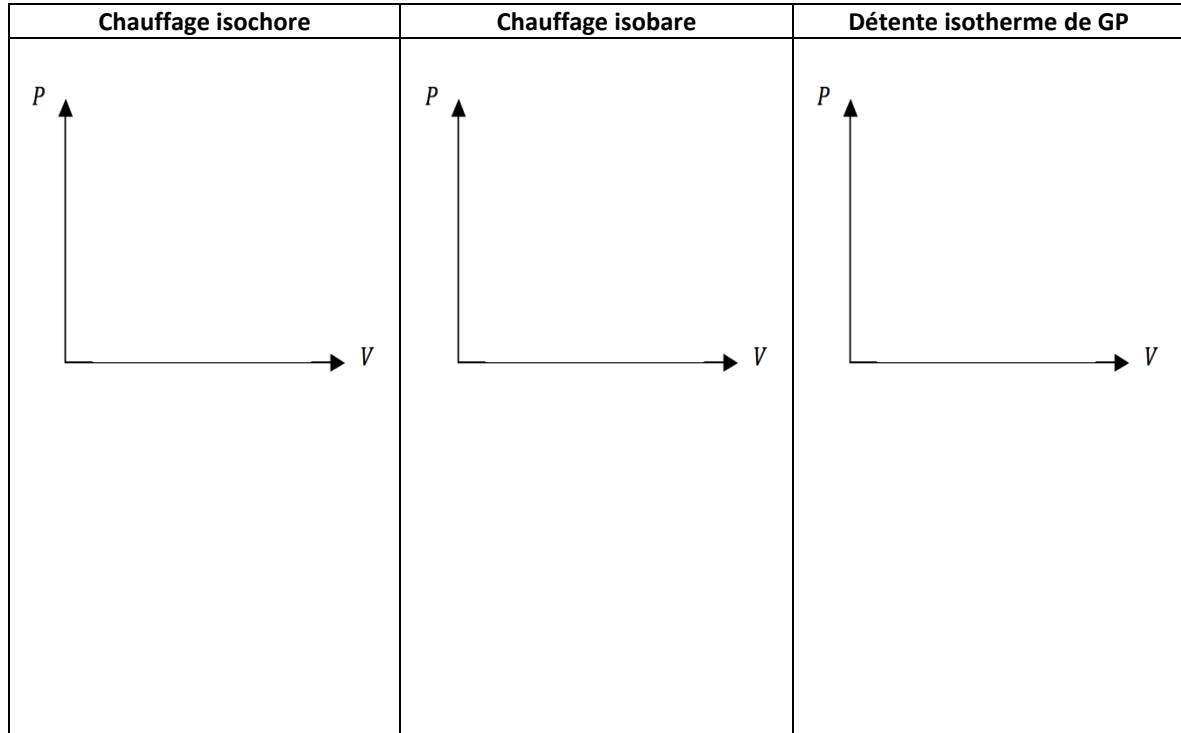
- *Analyse de différents cas classiques rencontrés dans les exercices.*
- *Les formules ne sont pas à connaître par cœur, mais la méthodologie doit être maîtrisée.*

	<i>Relations adaptées</i>	<i>Calcul du travail des forces pressantes</i>
<i>Transformation isochore</i>		
<i>Transformation monobare</i>		
<i>Transformations infiniment lentes (« réversibles »)</i>	<i>Cas général :</i>	
	<i>Sous-cas : Transformation isotherme d'un gaz parfait</i>	

5 – Interprétation géométrique du travail des forces pressantes

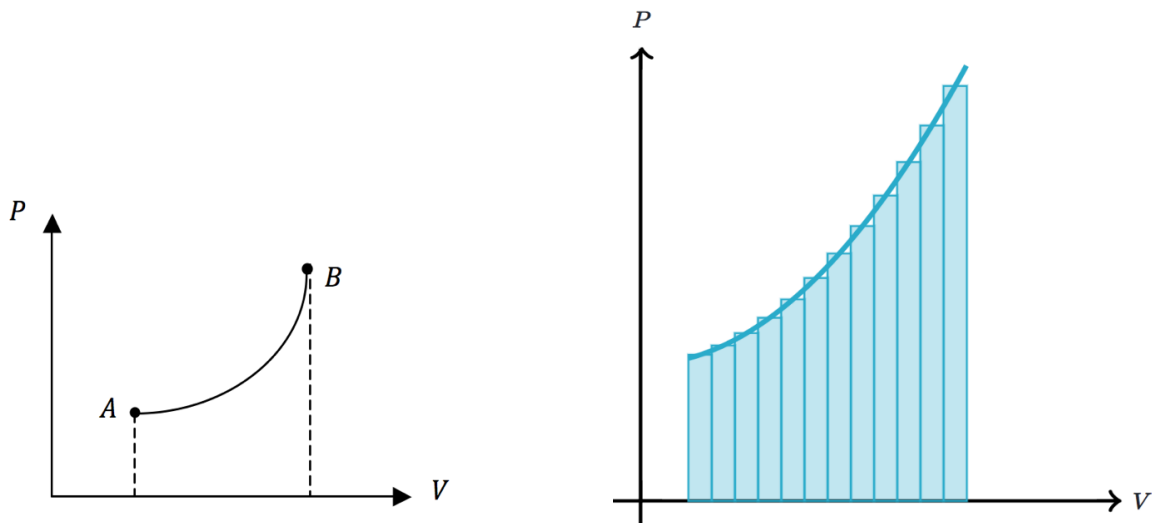
5.1. Rappel : diagramme de Clapeyron

- **Diagramme de Clapeyron :**
 - Abscisse : Volume massique v (en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)
 - Ordonnée : Pression P (en Pa)
- **Exemples de représentation de transformations :**



5.2. Interprétation géométrique du travail des forces pressantes

- **Cadre de l'étude :** Transformation quelconque d'une masse unité de fluide entre les états d'équilibre initial A et final B.

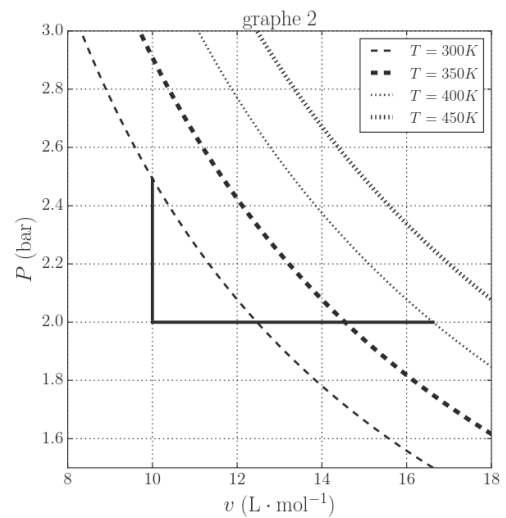
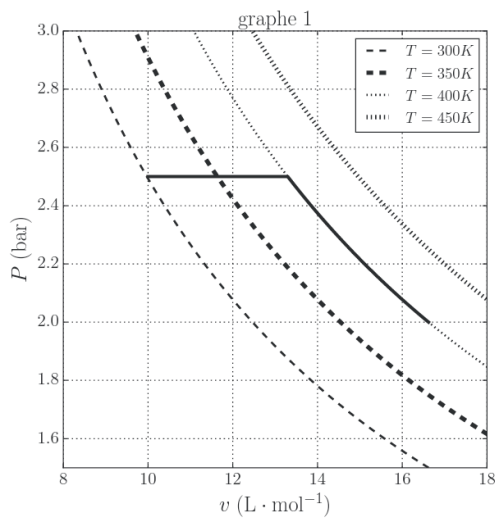


Travail des forces pressantes pour une transformation infiniment lente ($P = P_{ext}$)	
Expression mathématique	$W_p = \int_{V_A}^{V_B} -P_{ext} \cdot dV = \int_{V_A}^{V_B} -P \cdot dV$
Interprétation géométrique	
Signe	Si V augmente :
	Si V diminue :

5.3. Conséquences

- **Le travail dépend du chemin suivi !**

- Exemple : Deux transformations d'une mole d'un gaz parfait ont été représentées ci-dessous. L'état initial et l'état final sont identiques pour les deux transformations.



- Notation : impossible d'exprimer le travail comme la variation d'une grandeur entre l'état initial et l'état final !

- **Pour les transformations cycliques :**

- Variations des fonctions d'état nulles :
- Travail non nul sur le cycle :

