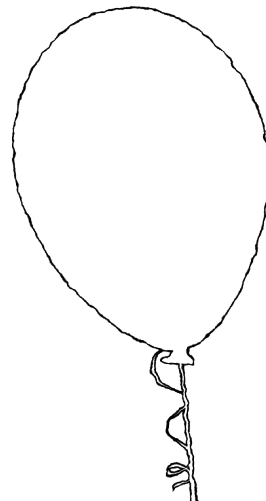


Thermodynamique de l'ingénieur
Olivier Cleynen – Février 2014

Cours 2
Les systèmes fermés



~ nota bene ~

- Ces diapositives servent de support en classe ; elles n'ont pas vocation de remplacer un polycopié (ou un bon livre!)
- Certaines diapositives paraîtront inévitablement ambiguës ; attention à ne pas les interpréter sans l'aide des documents de cours.

Vos retours d'opinion sont les bienvenus :

olivier.cleynen@ariadacapo.net

Ces documents de cours sont téléchargeables
à l'adresse

<http://thermo.ariadacapo.net/>

Ce document est publié
sous licence Creative Commons.



Certains documents sont le fruit du travail des auteurs indiqués
au bas des diapositives, et publiés sous licence compatible.

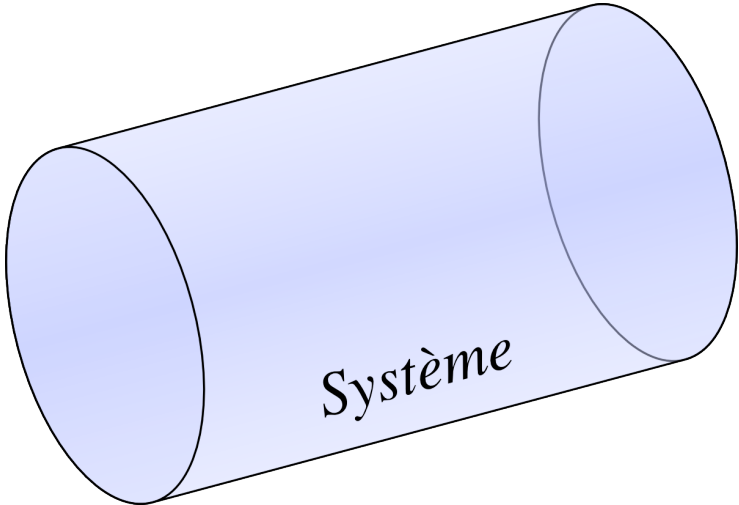
Le reste est ©2009-2014 CC by-sa Olivier Cleynen

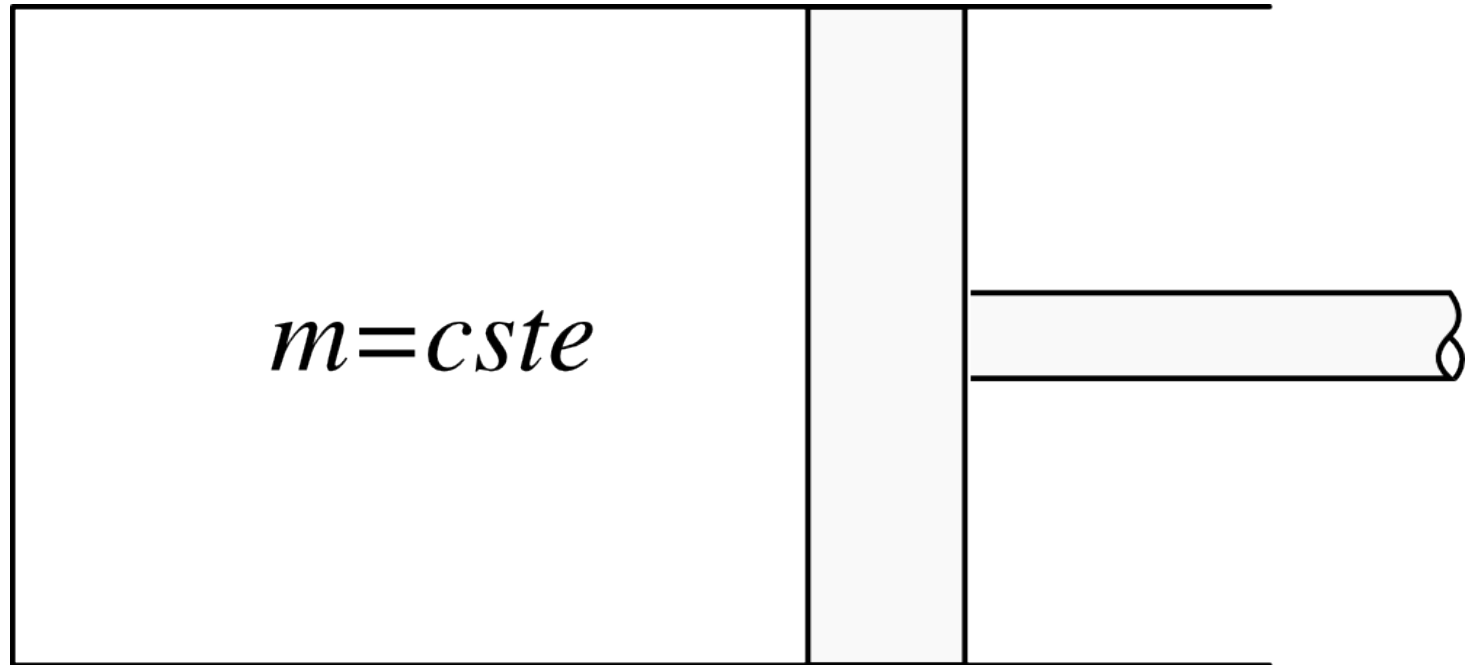
Vous êtes invité/es à copier, modifier, et ré-utiliser ce
document sous quelques conditions simples :

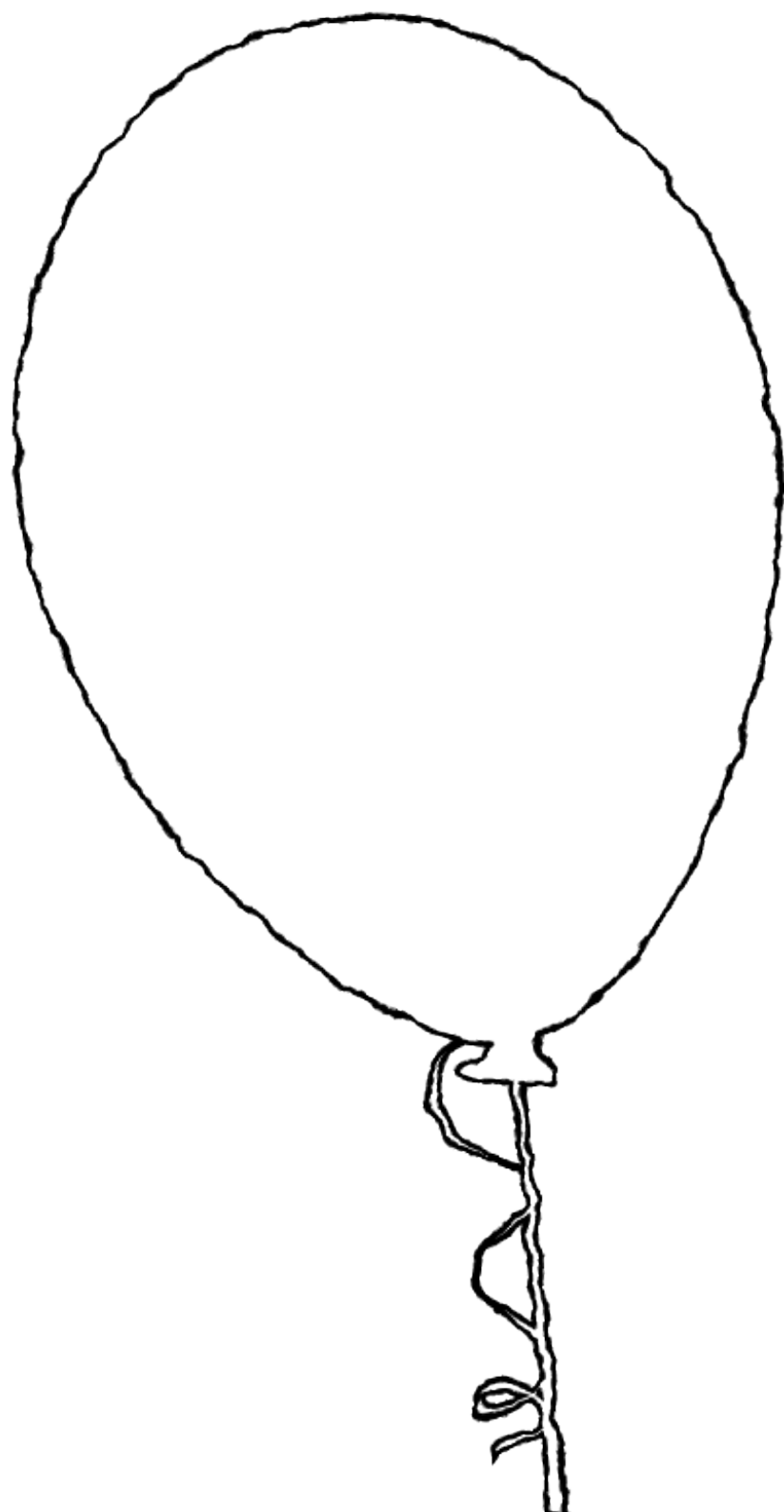
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.fr>

2.1 Définition

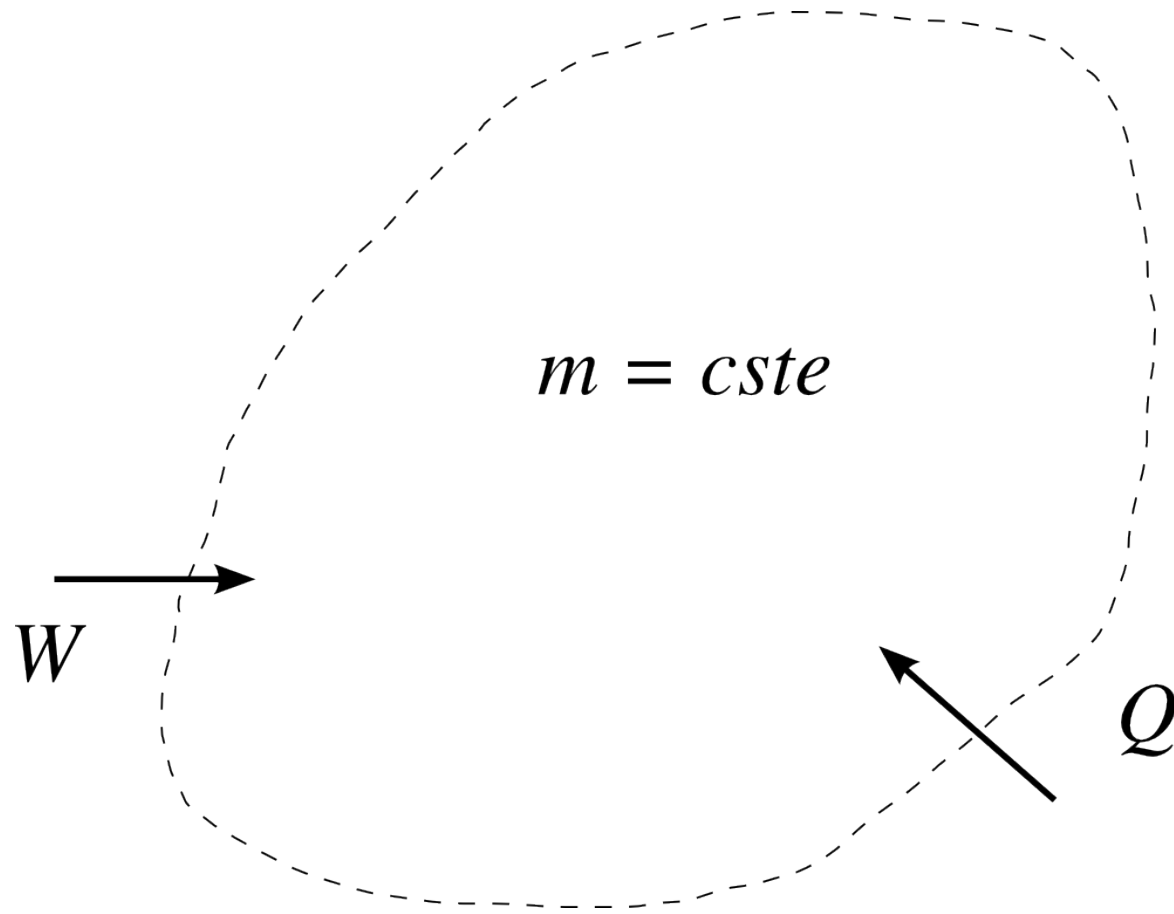
d'un système fermé

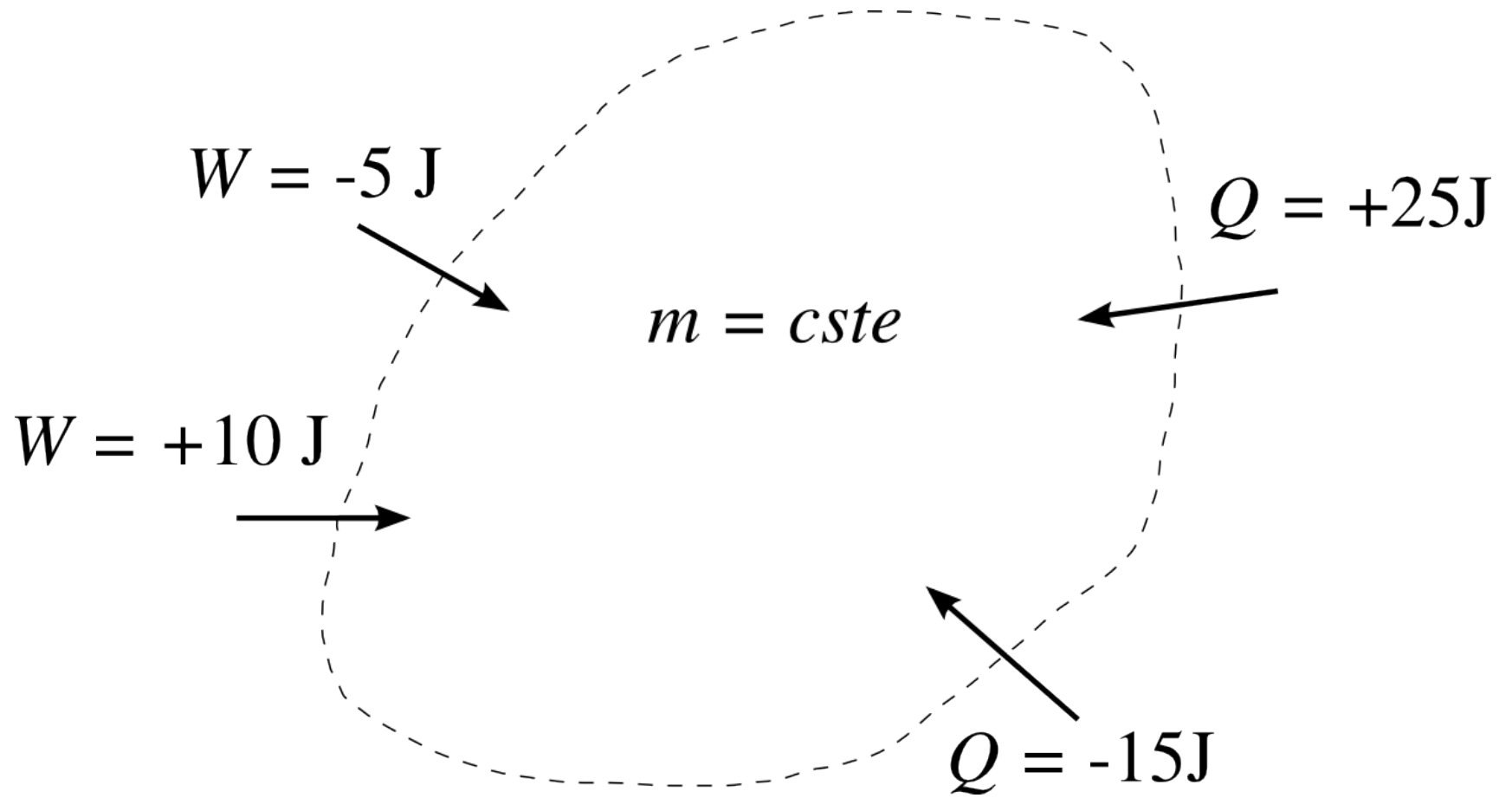






2.1.1 Conventions de signe

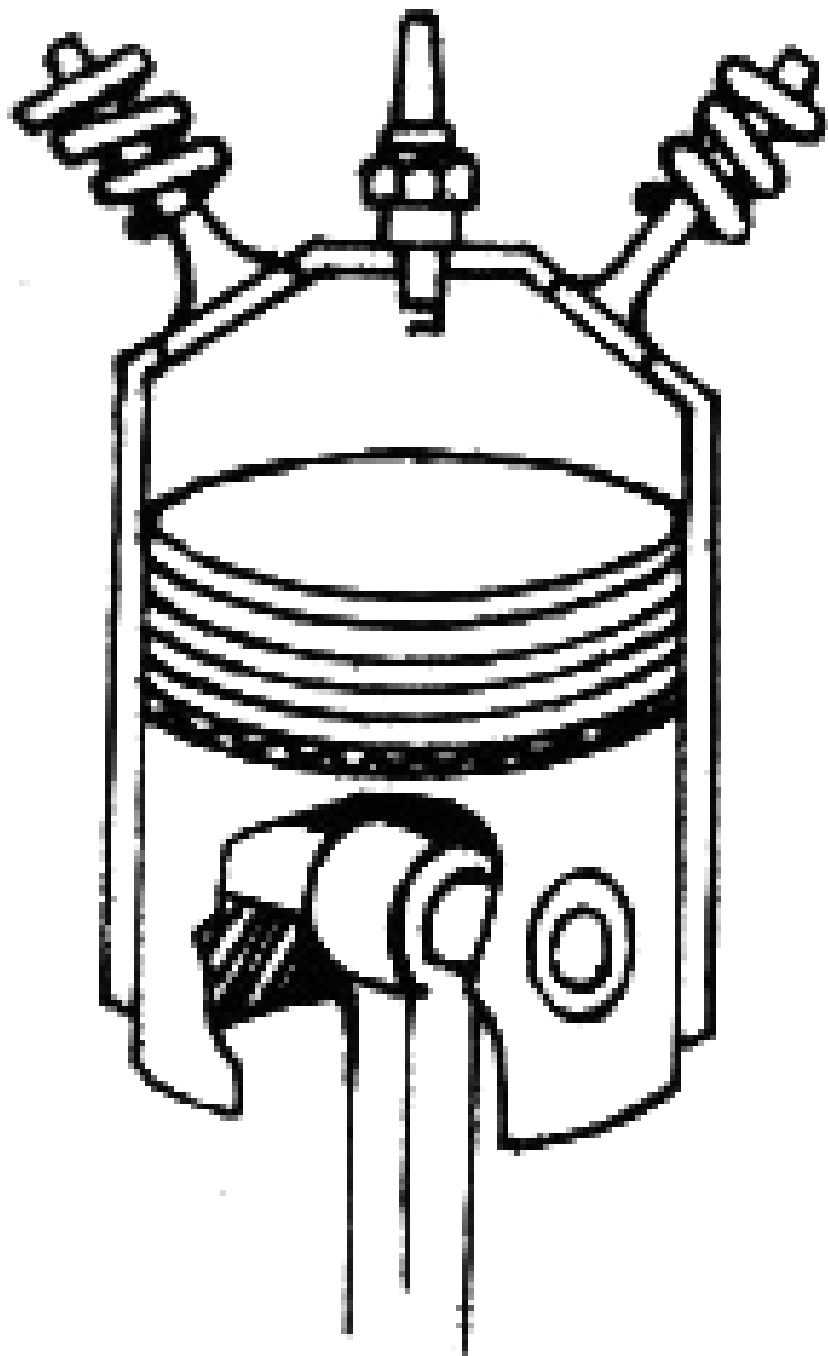


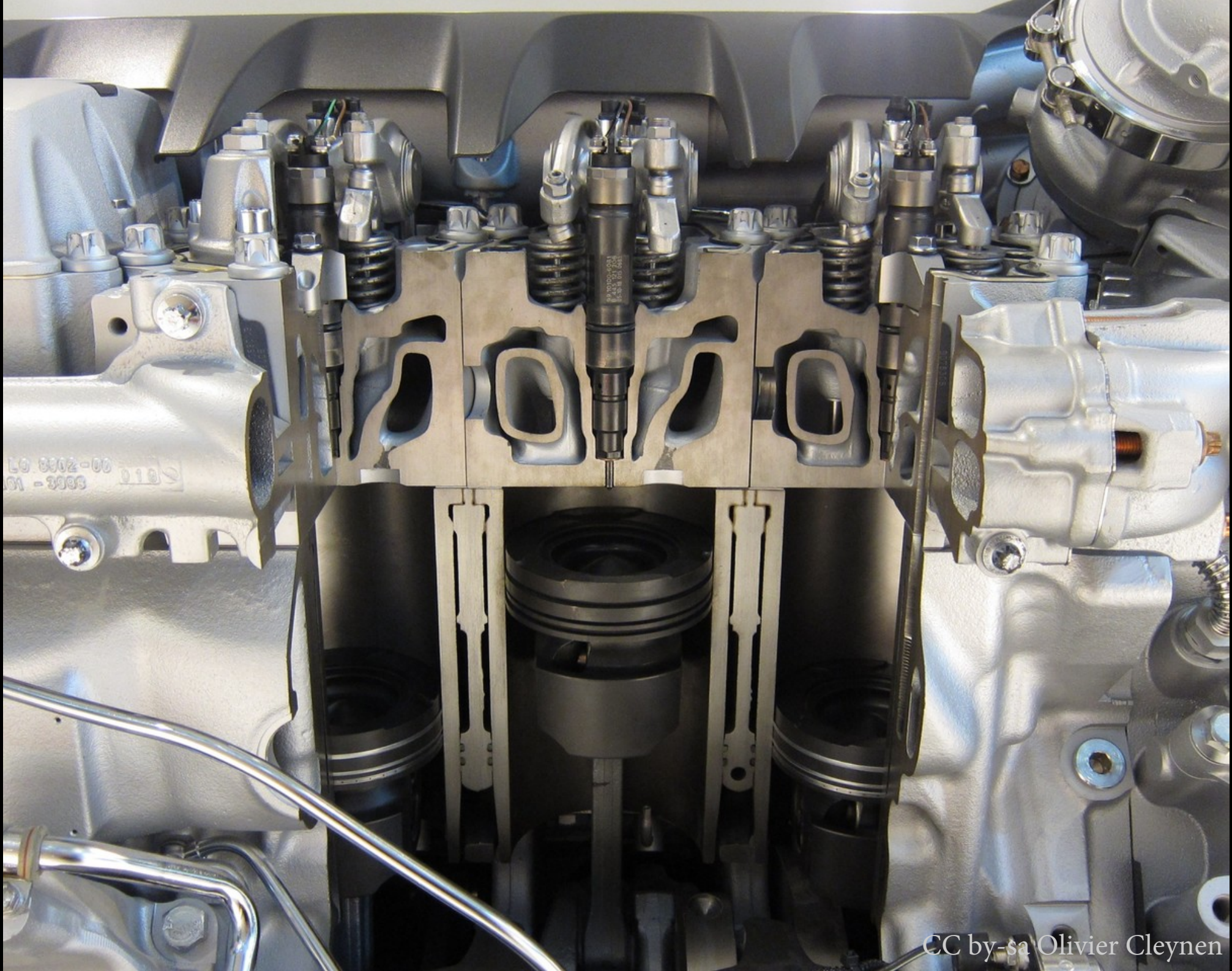


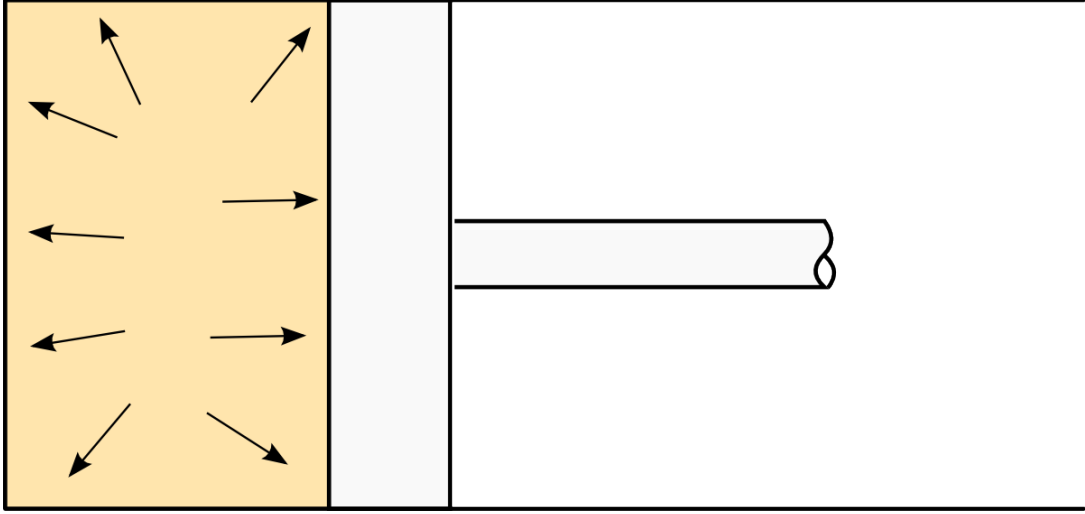
Conventions de signe

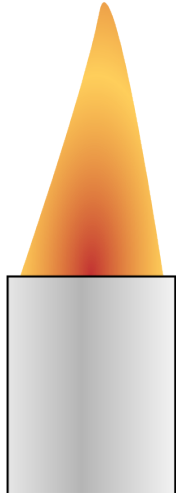
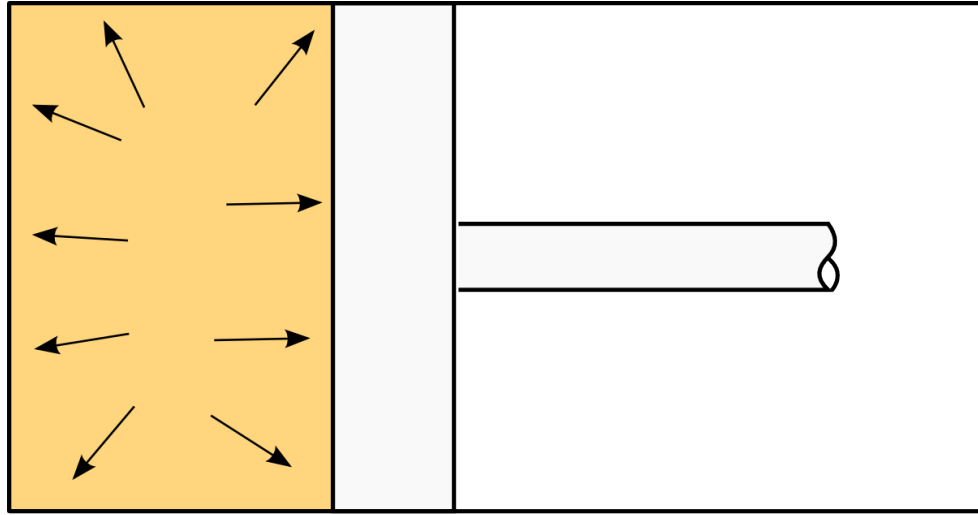
- Toujours *du point de vue du fluide*
- Comme un compte en banque :
 - Positif : entrant
 - Négatif : sortant
- Quelques livres avec conventions différentes

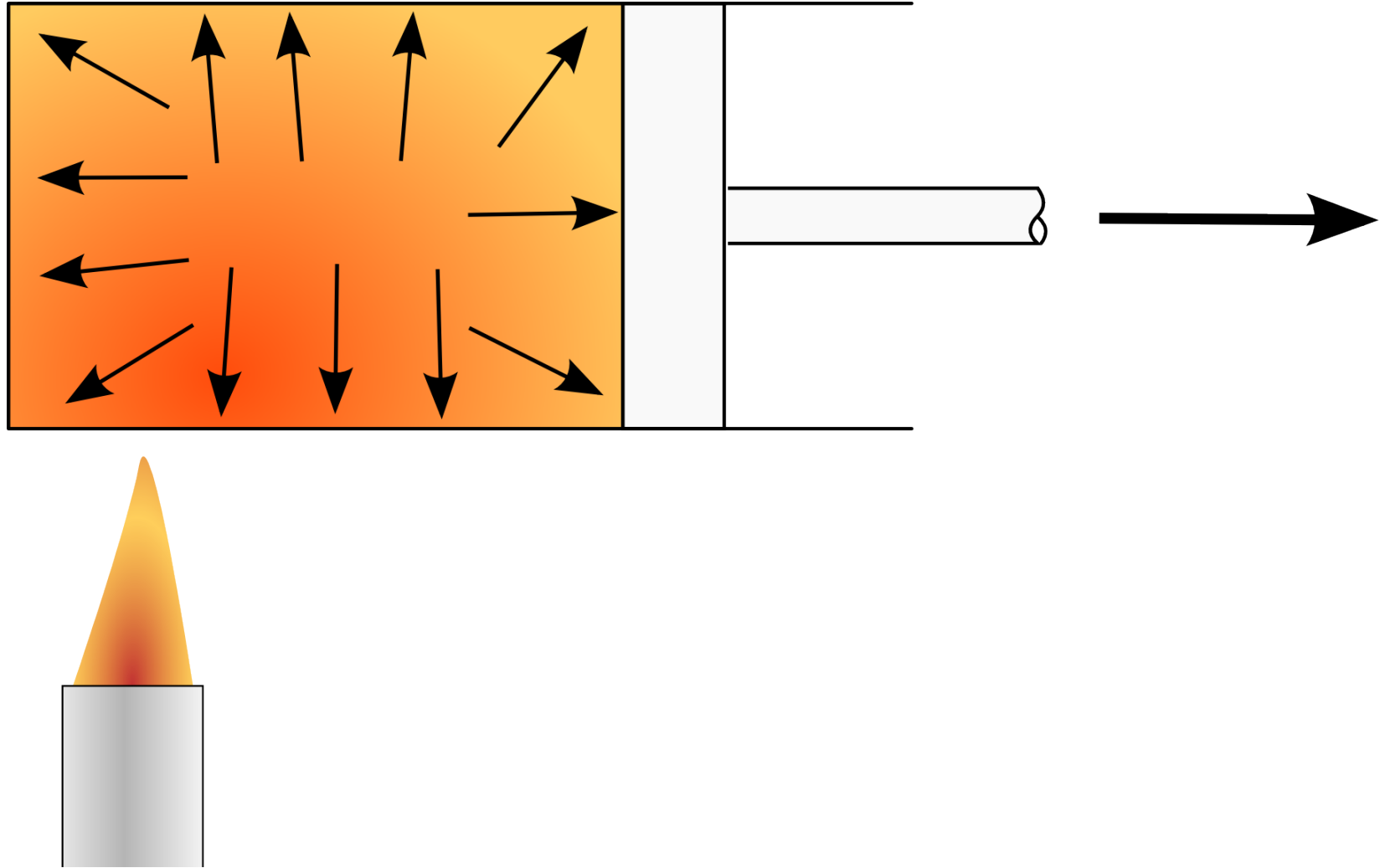
2.1.2 Intérêt











Combien de travail obtenu ?

Combien de chaleur faut-il donner ?

Peut-on tout convertir ?

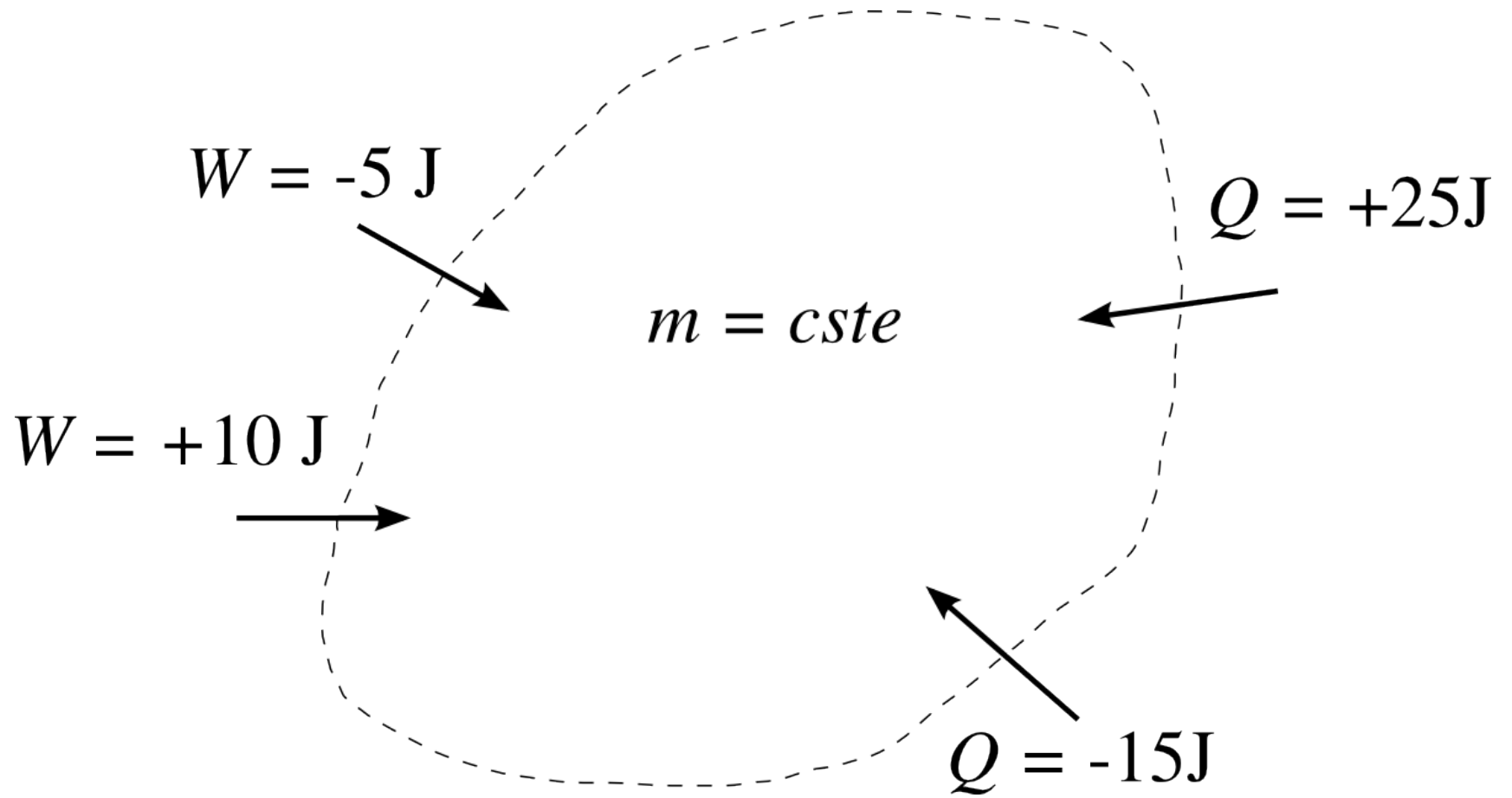
2.2 Le premier principe dans un système fermé

~ va-t-il s'en sortir ? ~

Le premier principe :



L'énergie est indestructible !



Le premier principe dans un système fermé :

$$Q_{1 \rightarrow 2} + W_{1 \rightarrow 2} = \Delta U$$

(pas de variation d'énergie mécanique)

(pas de réaction nucléaire)

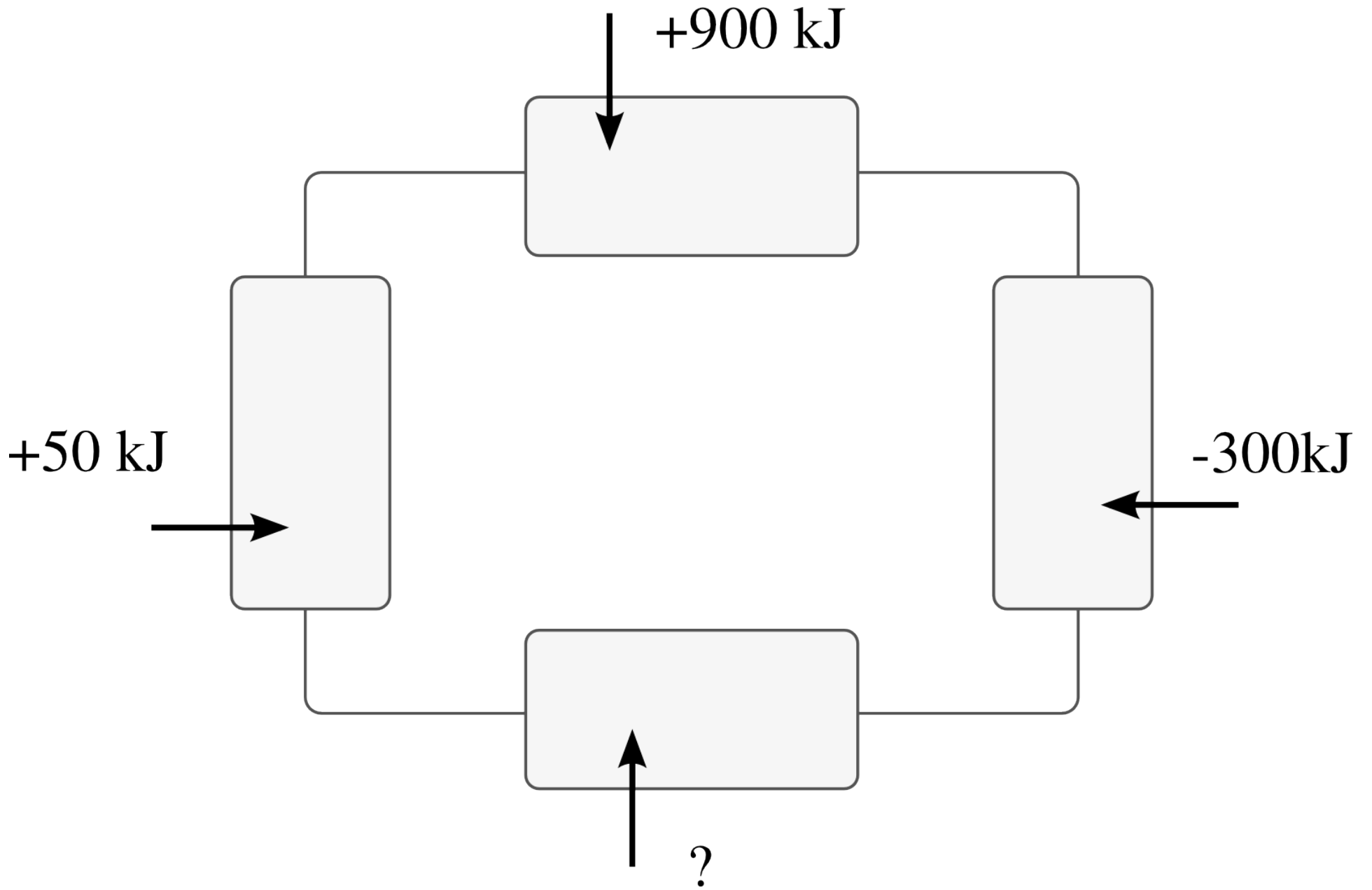
$$m(q_{1 \rightarrow 2} + w_{1 \rightarrow 2}) = m(\Delta u)$$

Le premier principe dans un système fermé :



$$q_{1 \rightarrow 2} + w_{1 \rightarrow 2} = \Delta u$$

« tout ce qui rentre et sort fait varier le montant total »



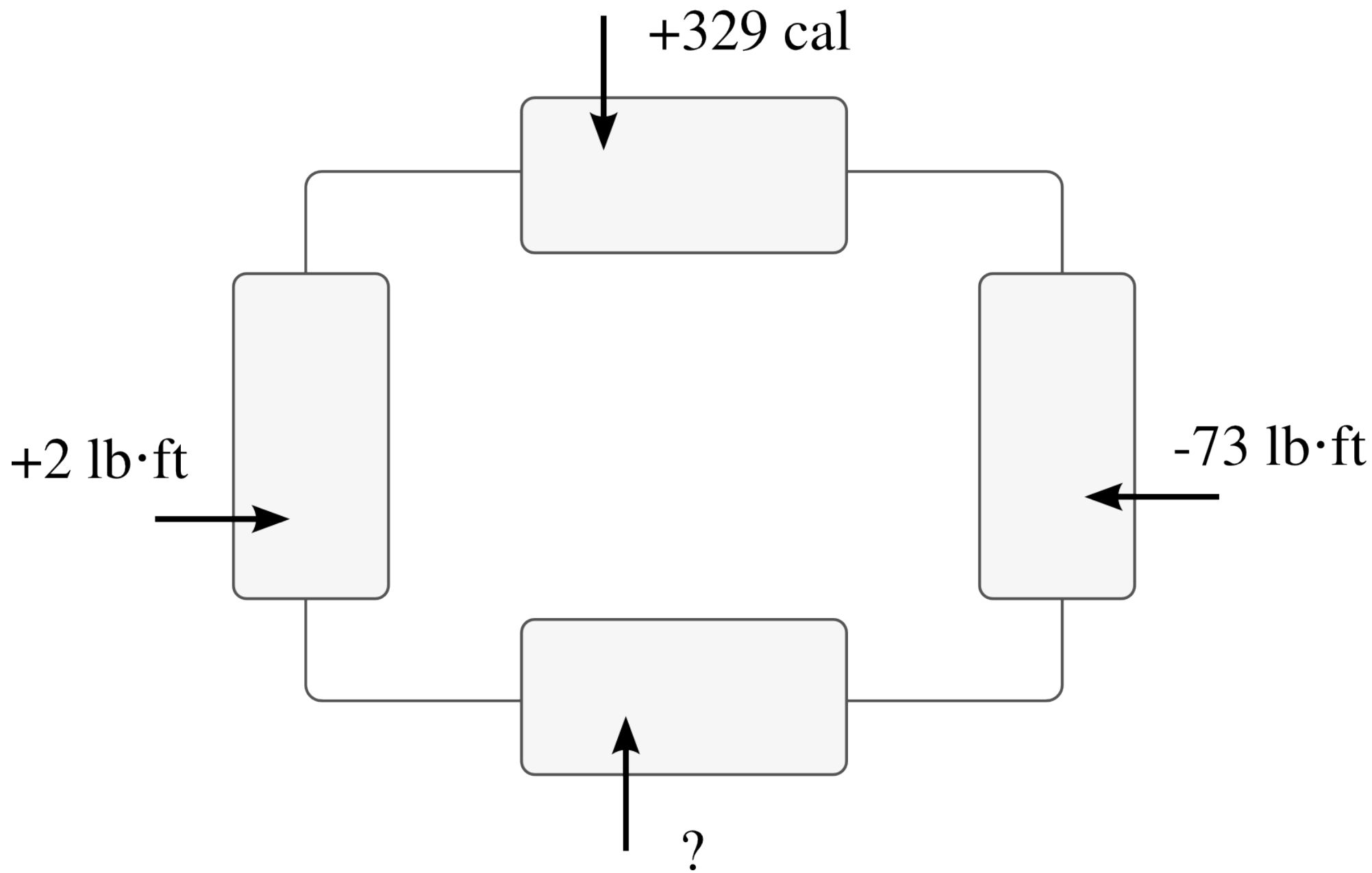
Le premier principe dans un cycle

$$q_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1} + w_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1} = 0$$

$$q_{cycle} + w_{cycle} = 0$$

(cycle : fonctionnement en continu)

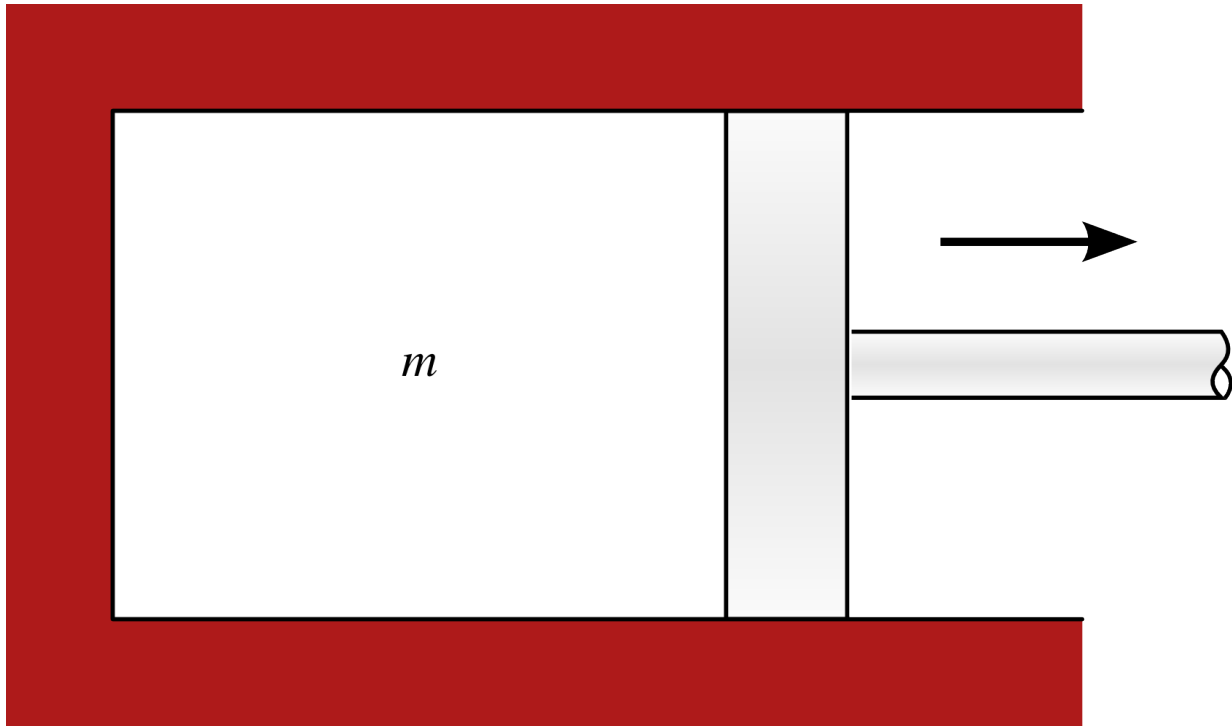
(équation aussi valide pour les systèmes ouverts)



2.3 Transferts de chaleur

2.3.1 Quantification des transferts

$$q_{A \rightarrow B} = c(T_B - T_A)$$



La capacité calorifique, oui mais :

- La capacité c varie avec la température
- La température ne varie pas qu'avec la chaleur !
- Attendons de pouvoir quantifier les échanges de chaleur...

Pour quantifier les échanges de chaleur,
il nous faut un modèle de température
→ chapitres 4 et 5

2.3.2 Les transformations adiabatiques

~ adiabatique? ~

spécifique

=

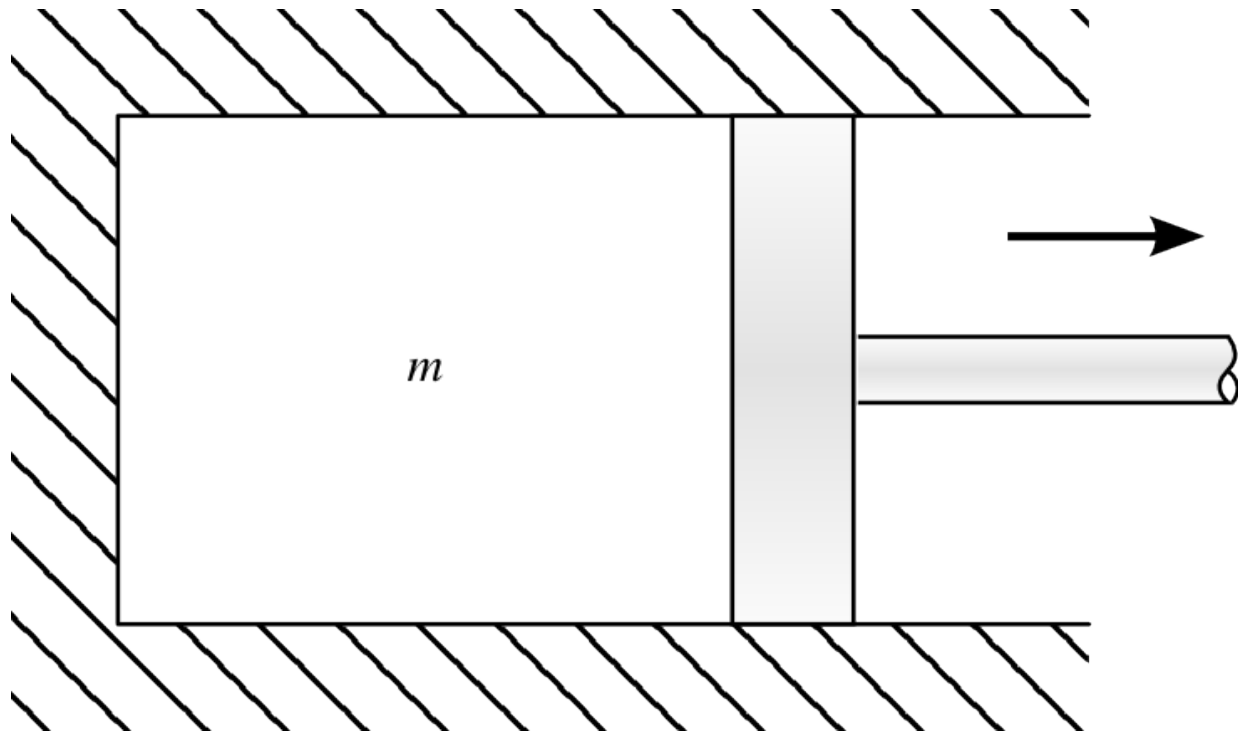
par kilo

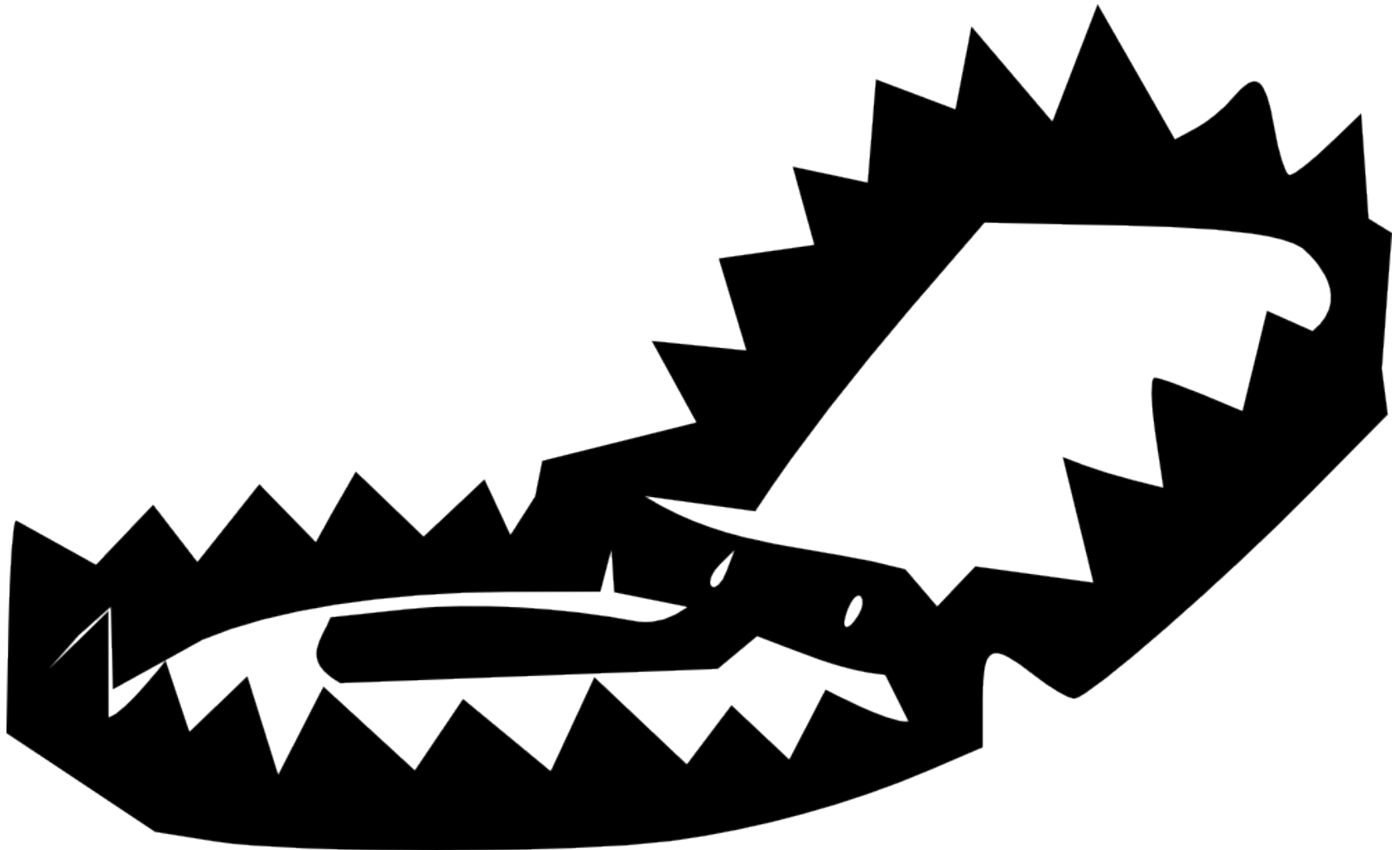
adiabatique

=

isolé







adiabatique

\neq

à température constante

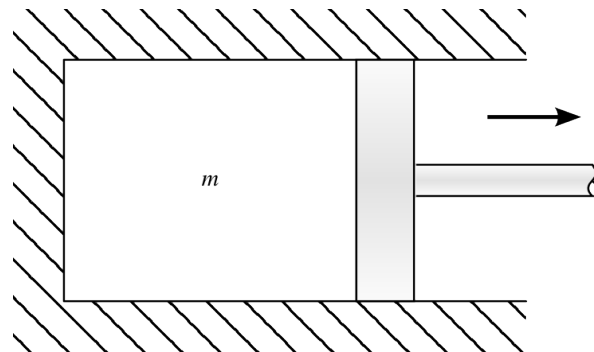
adiabatique

=

isolé

comment la température peut-elle varier si il n'y a pas de transfert de chaleur ?

→ avec un transfert de travail



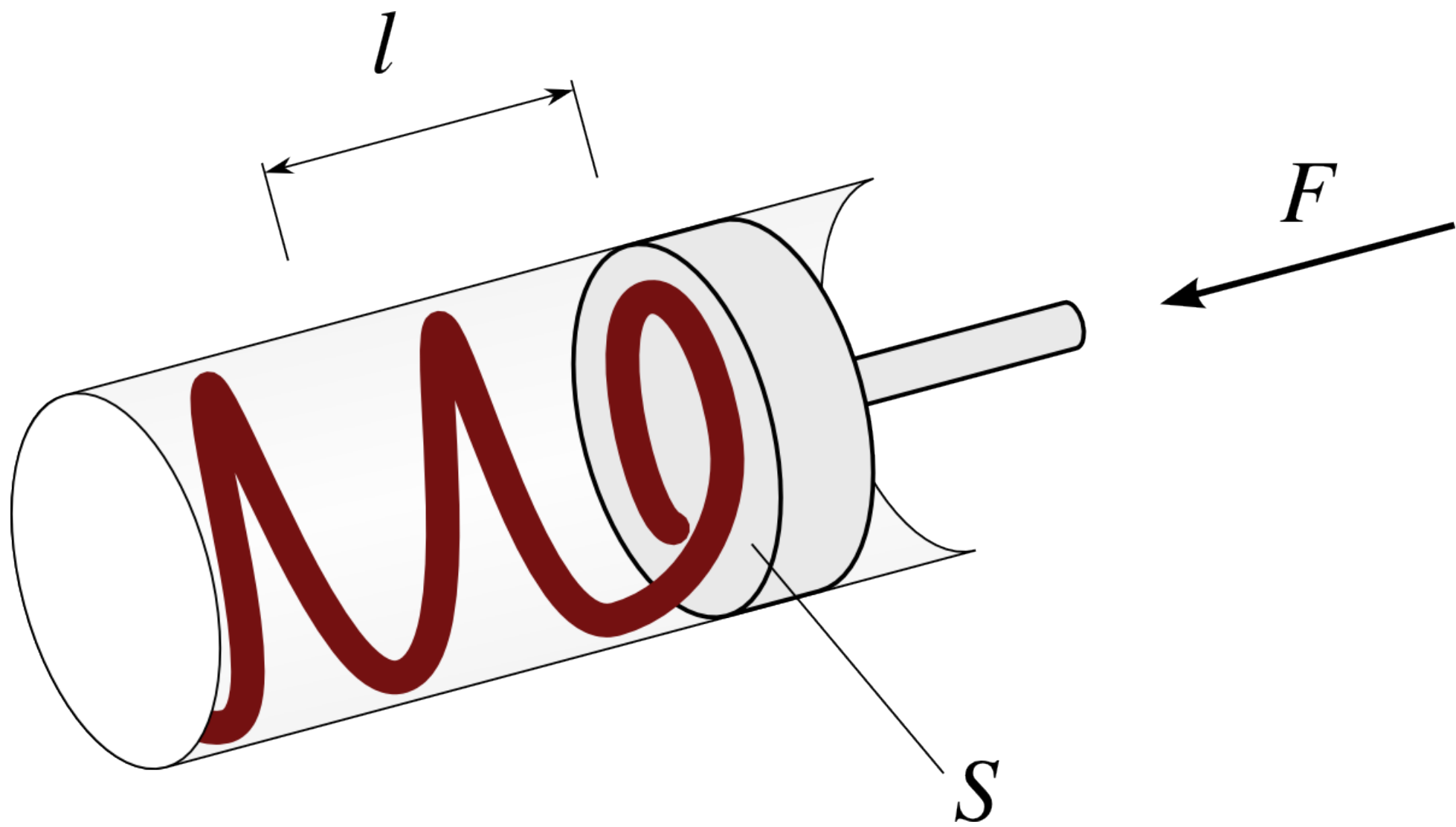


« adiabatique » veut uniquement dire :

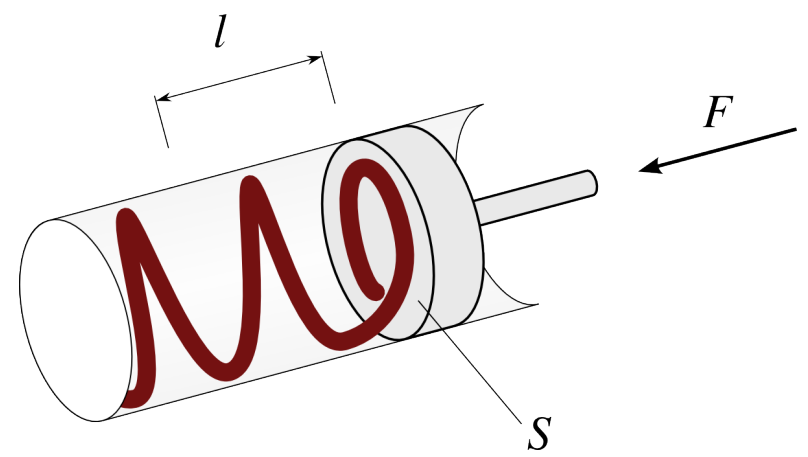
$$q = 0$$

2.4 Travail d'un système fermé

2.4.1 Le travail en fonction du volume, avec un ressort



Le travail reçu ou fourni par un ressort



$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B F \, dl$$

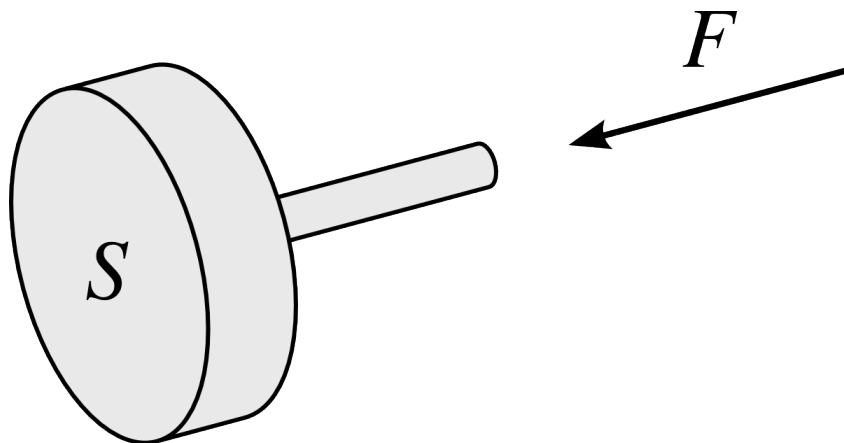
force-et-distance



pression-et-volume

La pression

$$p \equiv \frac{F}{S}$$



$$1 \text{ Pa} \equiv 1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$$

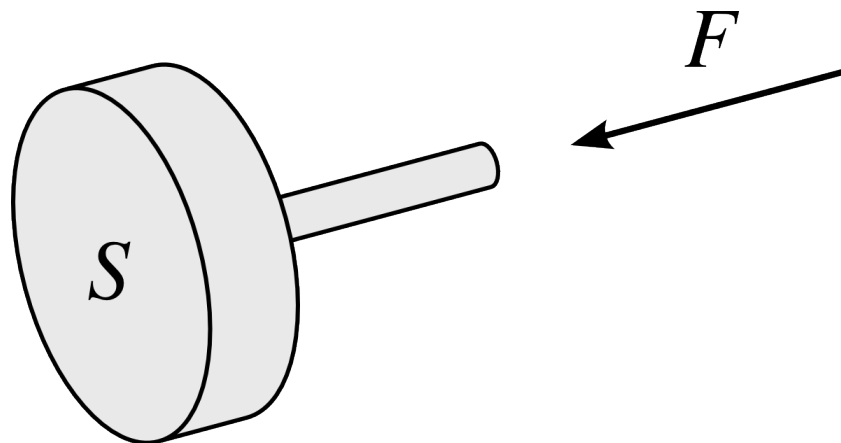
$$1 \text{ bar} \equiv 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} \equiv 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

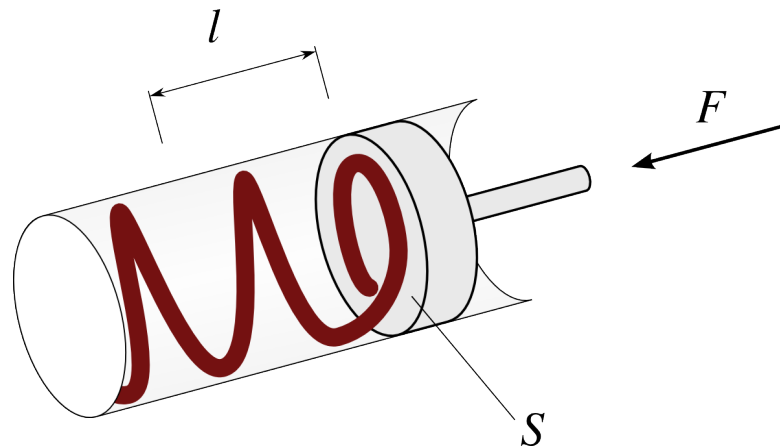
Le volume

la *variation* du volume

$$dV = S dl$$



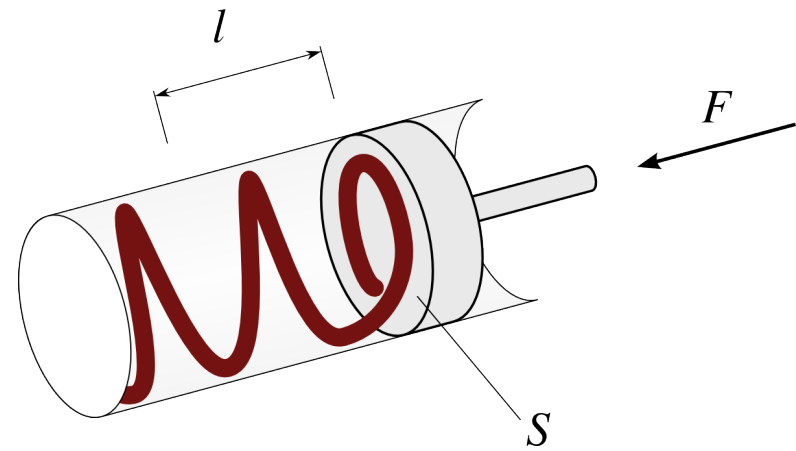
et donc enfin le travail,
en fonction du volume :



$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B F \, dl$$

$$= - \int_A^B \frac{F}{S} S \, dl$$

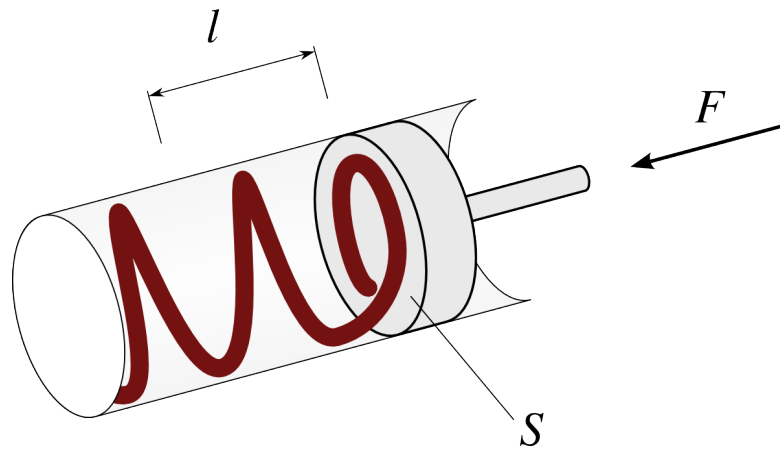
$$= - \int_A^B p \, dV$$

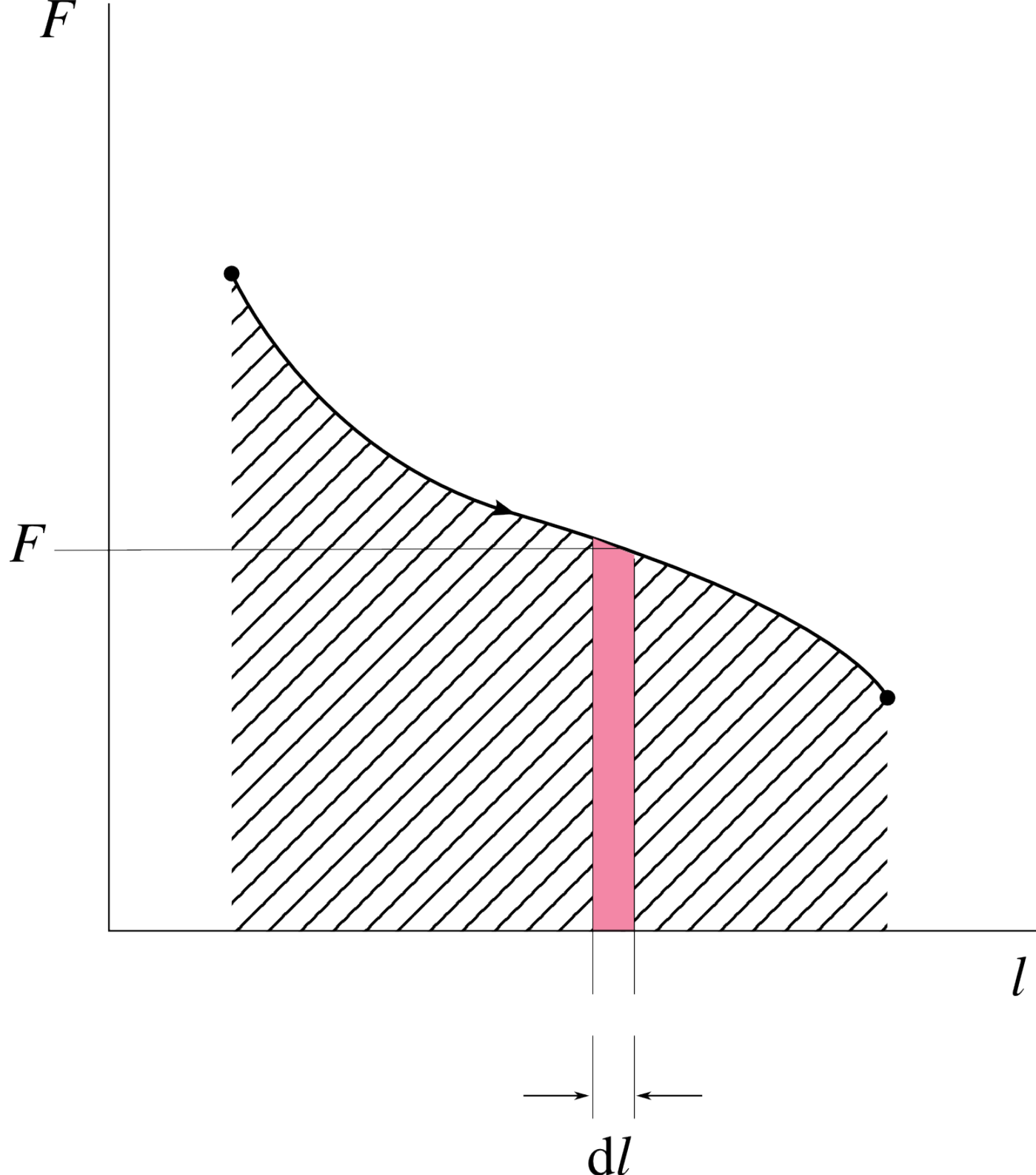


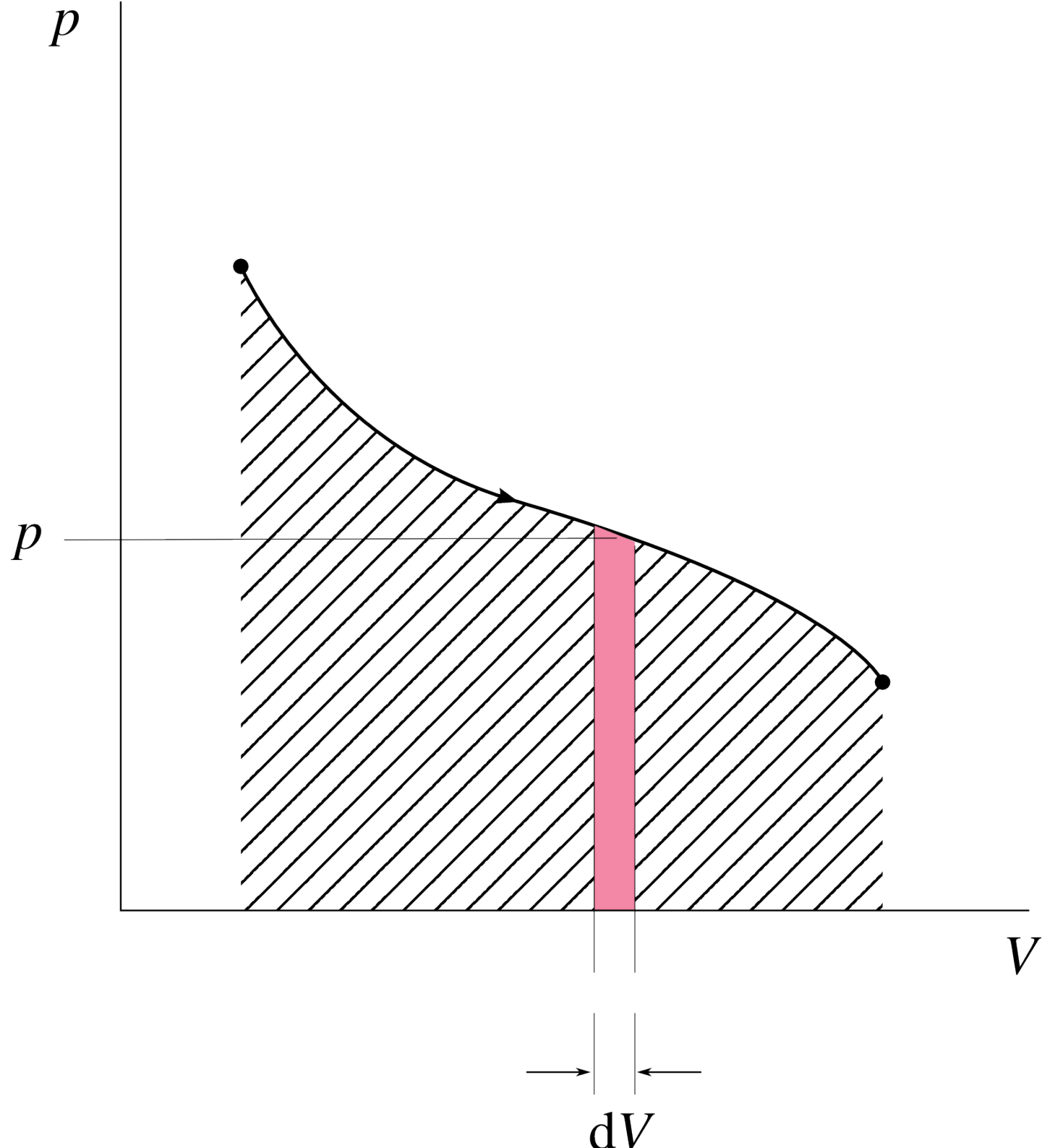
à retrouver

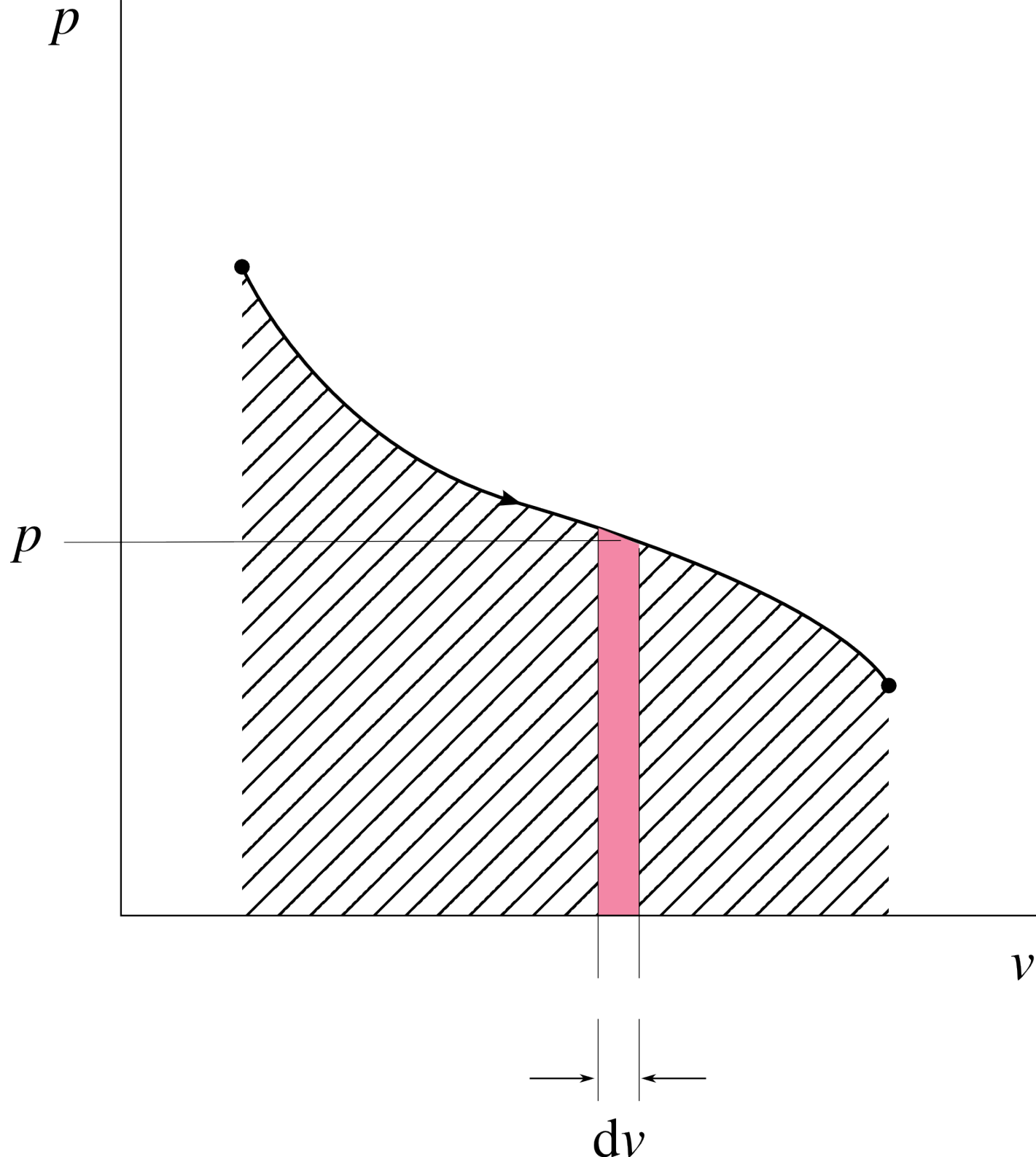
$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B p \, dV$$

pour un système modélisé par un ressort

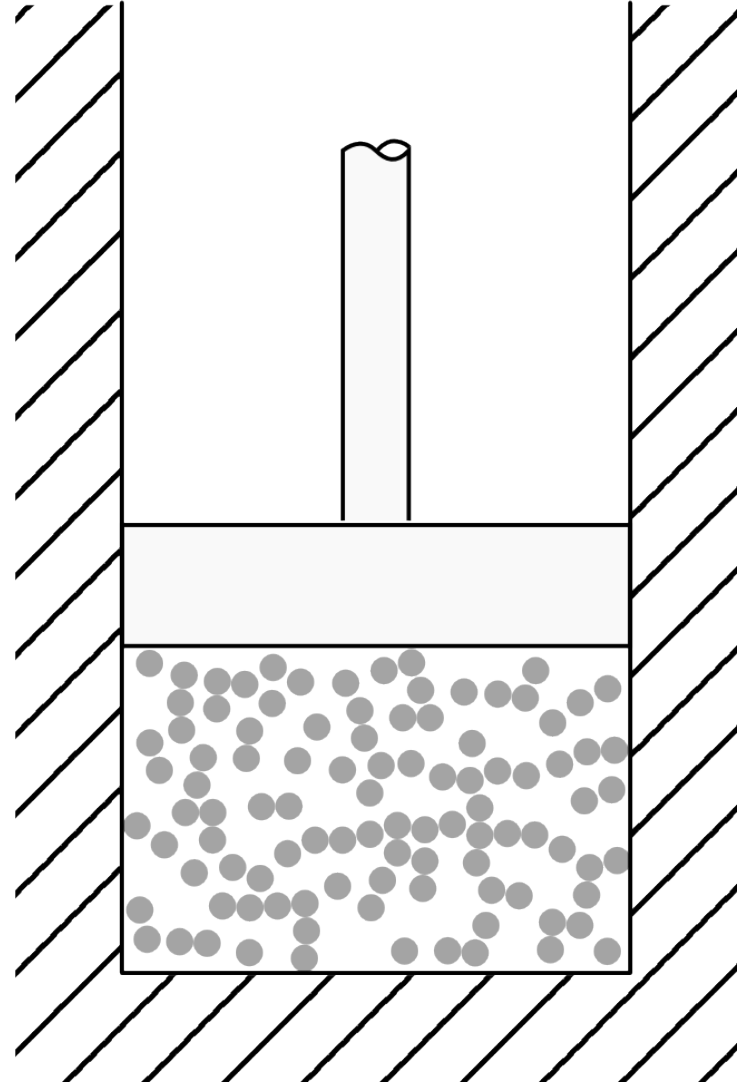
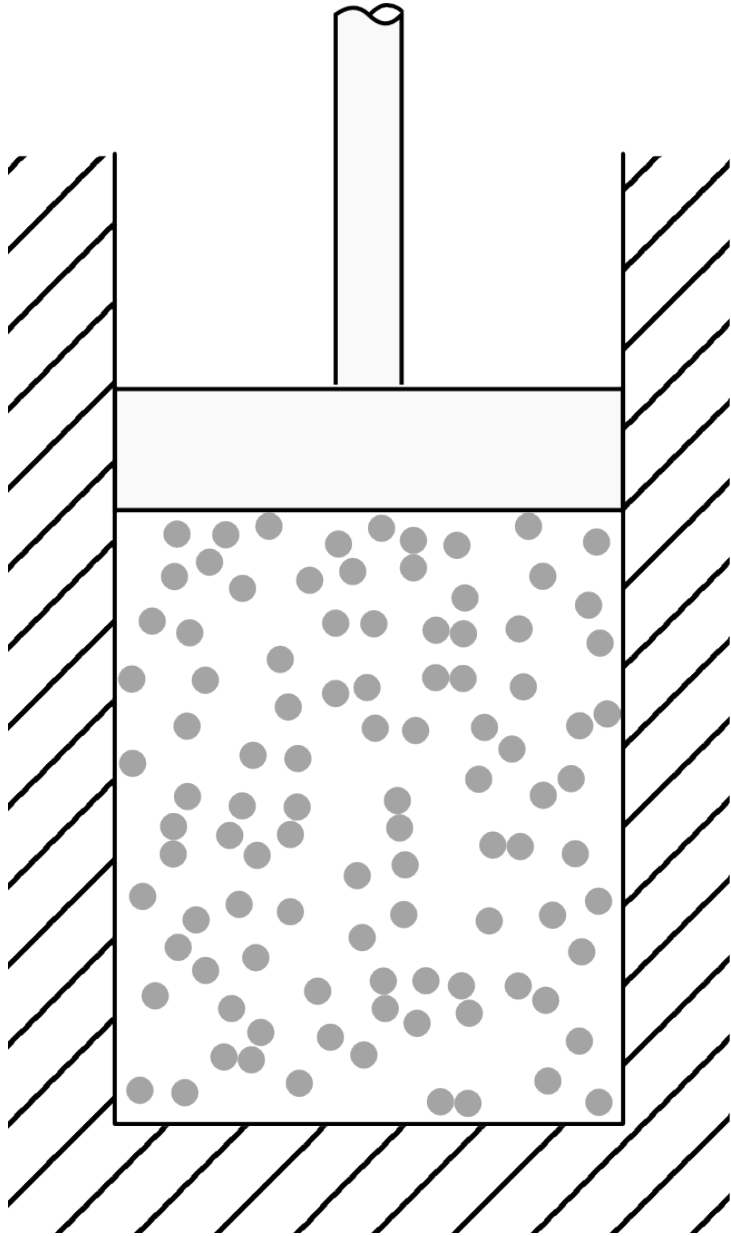






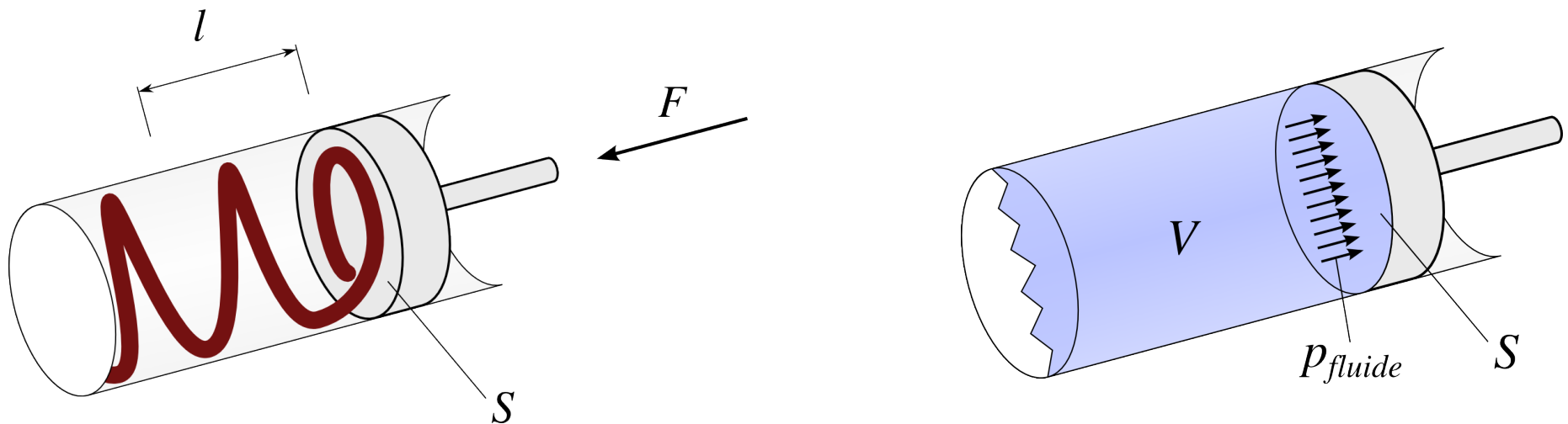


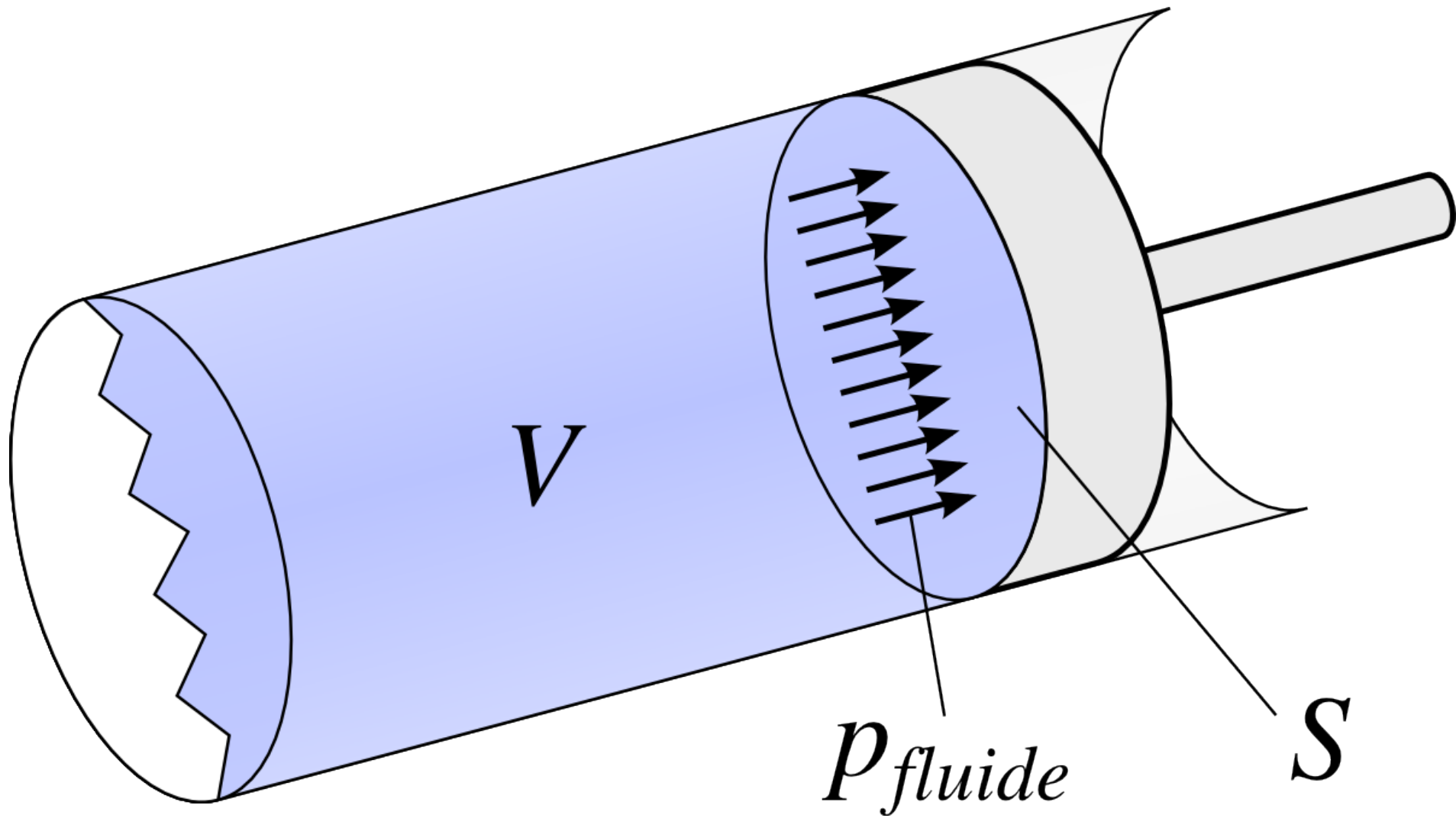
2.4.2 Travail infiniment lent d'un fluide



utile

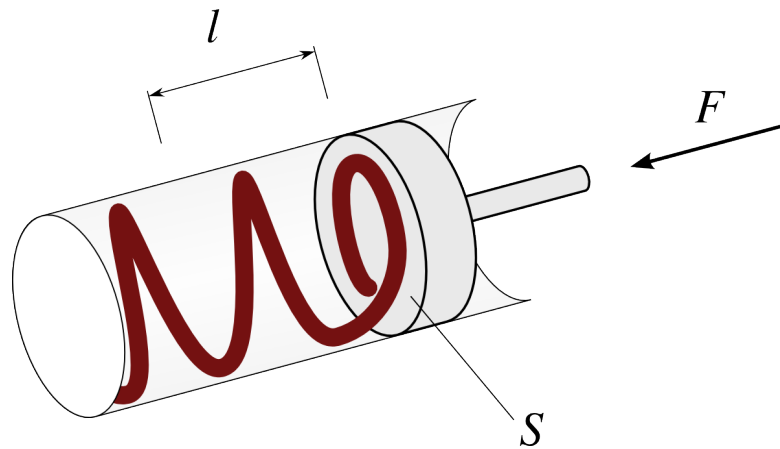
un fluide comprimé et détendu lentement
se comporte comme un ressort





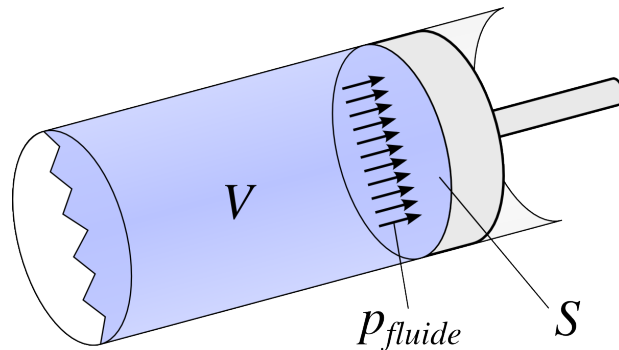
$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B p \, dV$$

pour un système modélisé par un ressort



$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B p \, dV$$

pour un fluide comprimé et détendu lentement

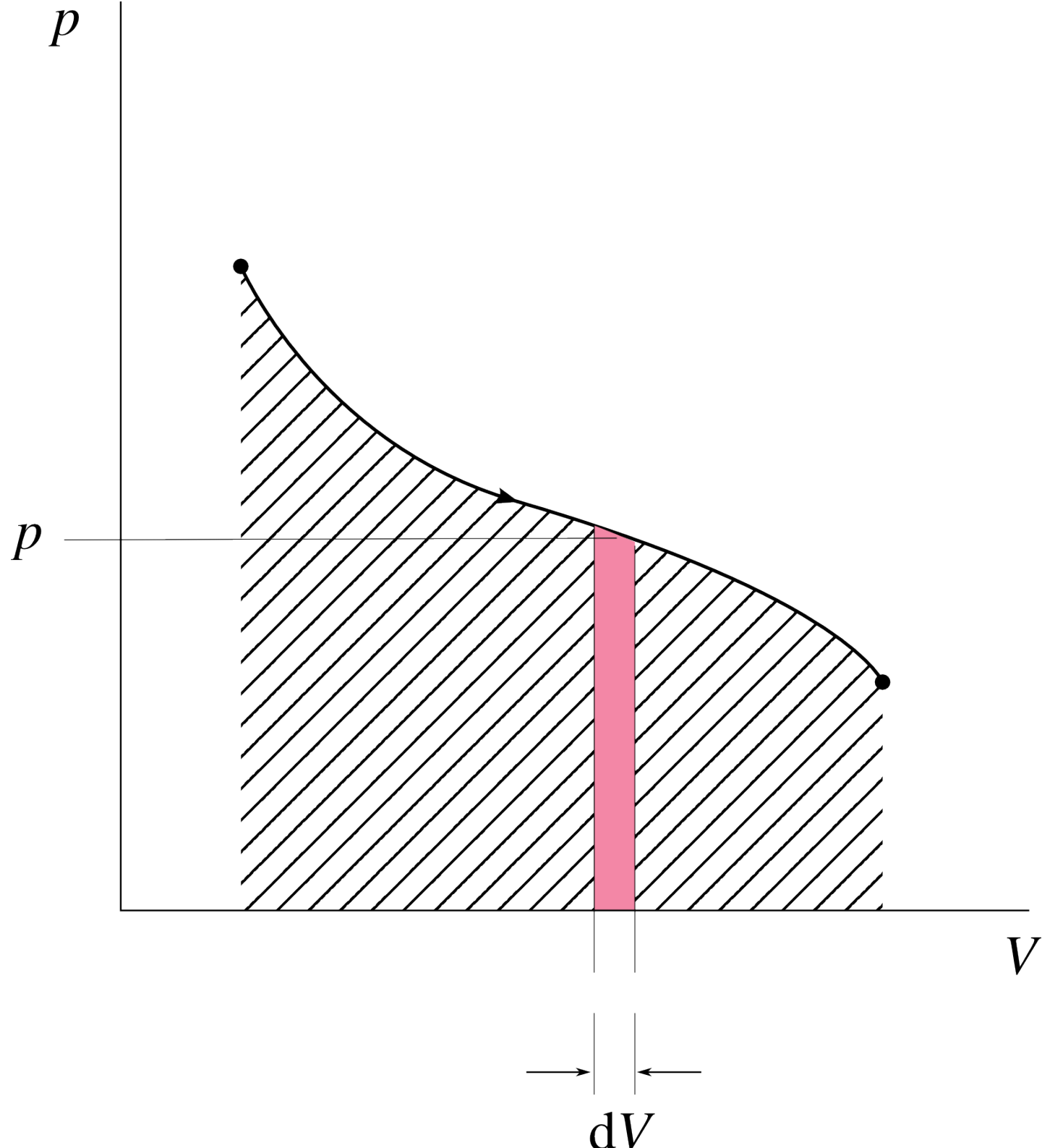


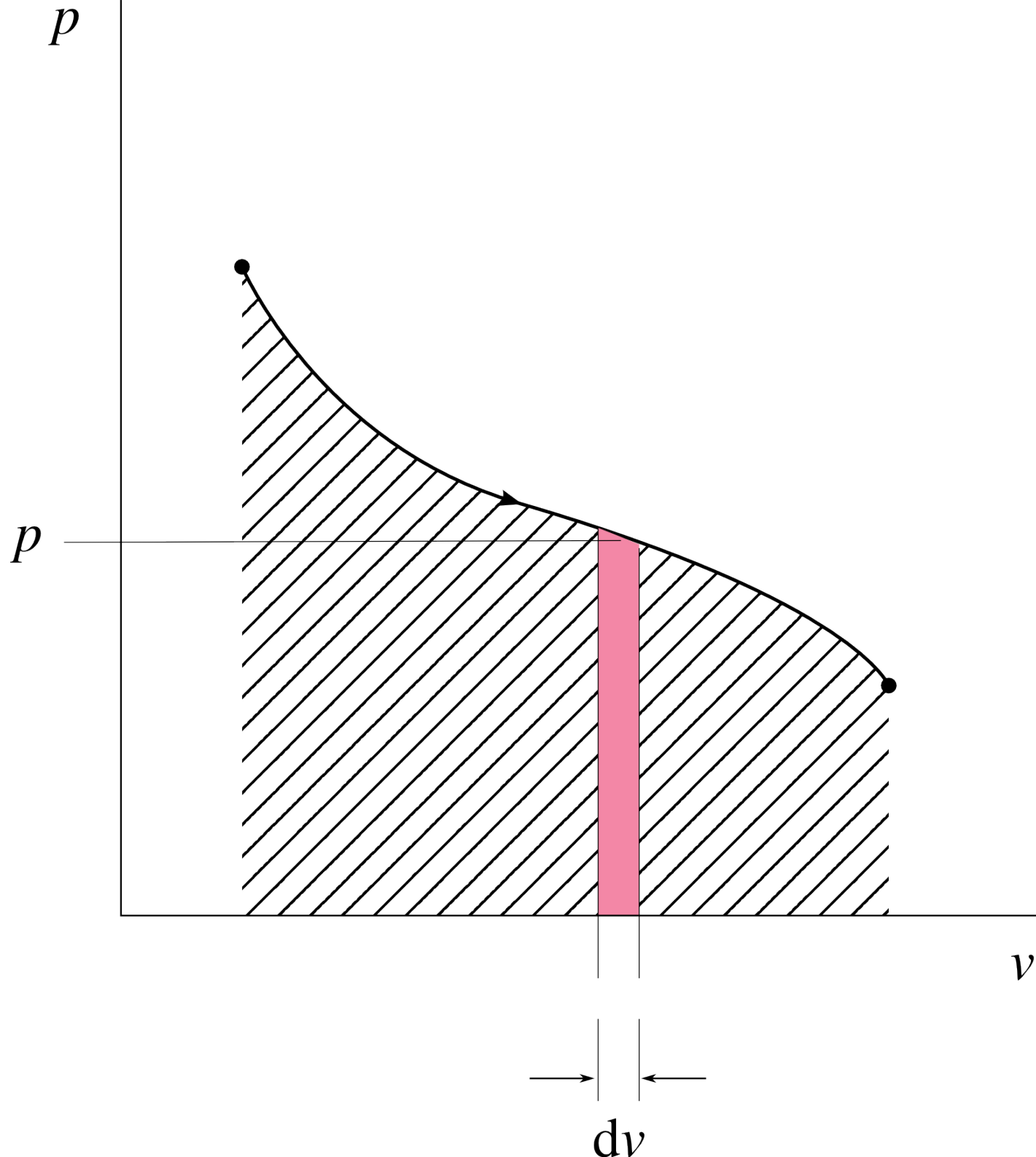
à retrouver

utile !

$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B p \, d v$$

Pour un fluide lorsque le mouvement est infiniment lent.

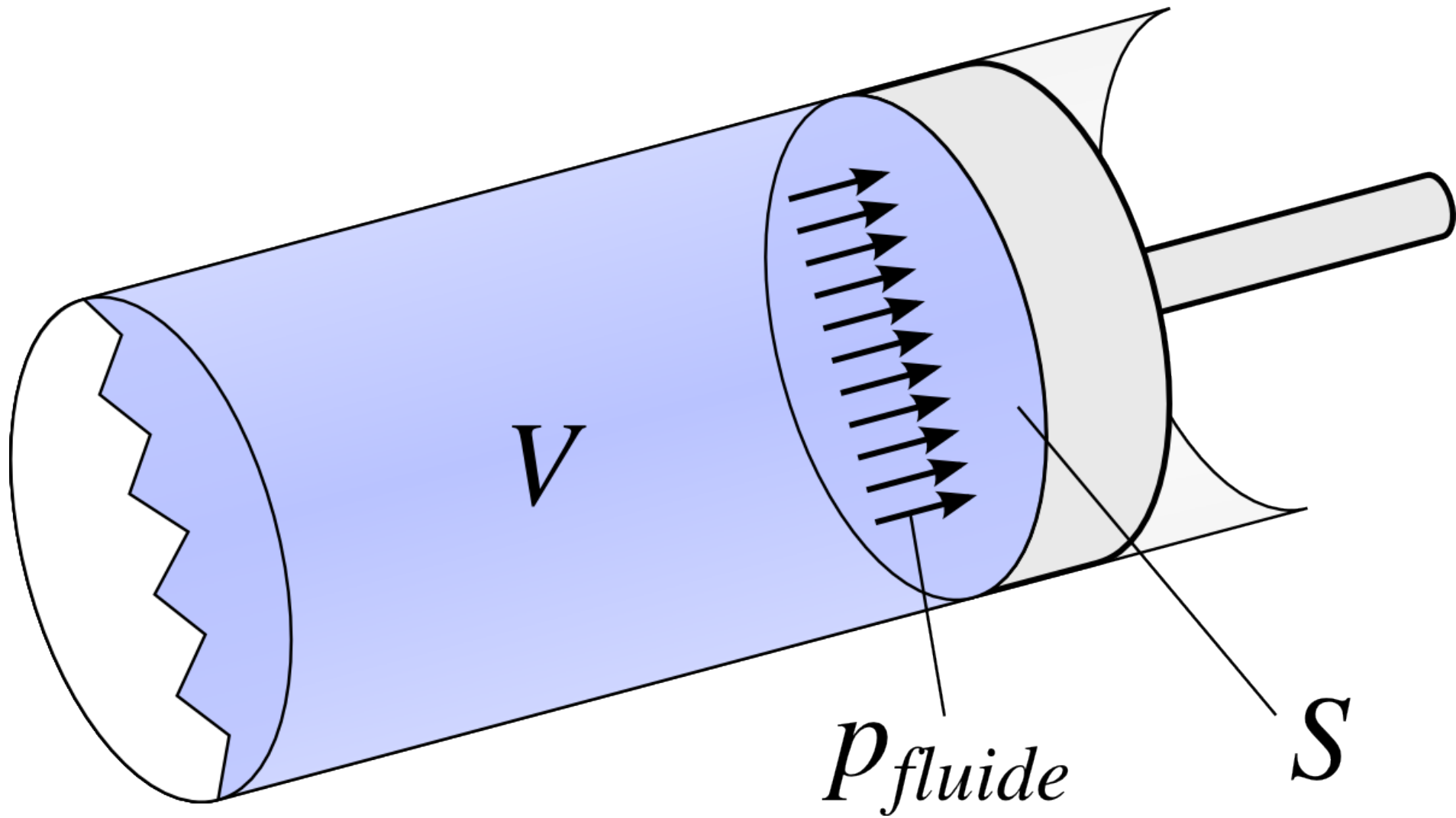




bouing-boing-boing

Comment un fluide se comporte-t-il
exactement ?

De quel « ressort » s'agit-il ?

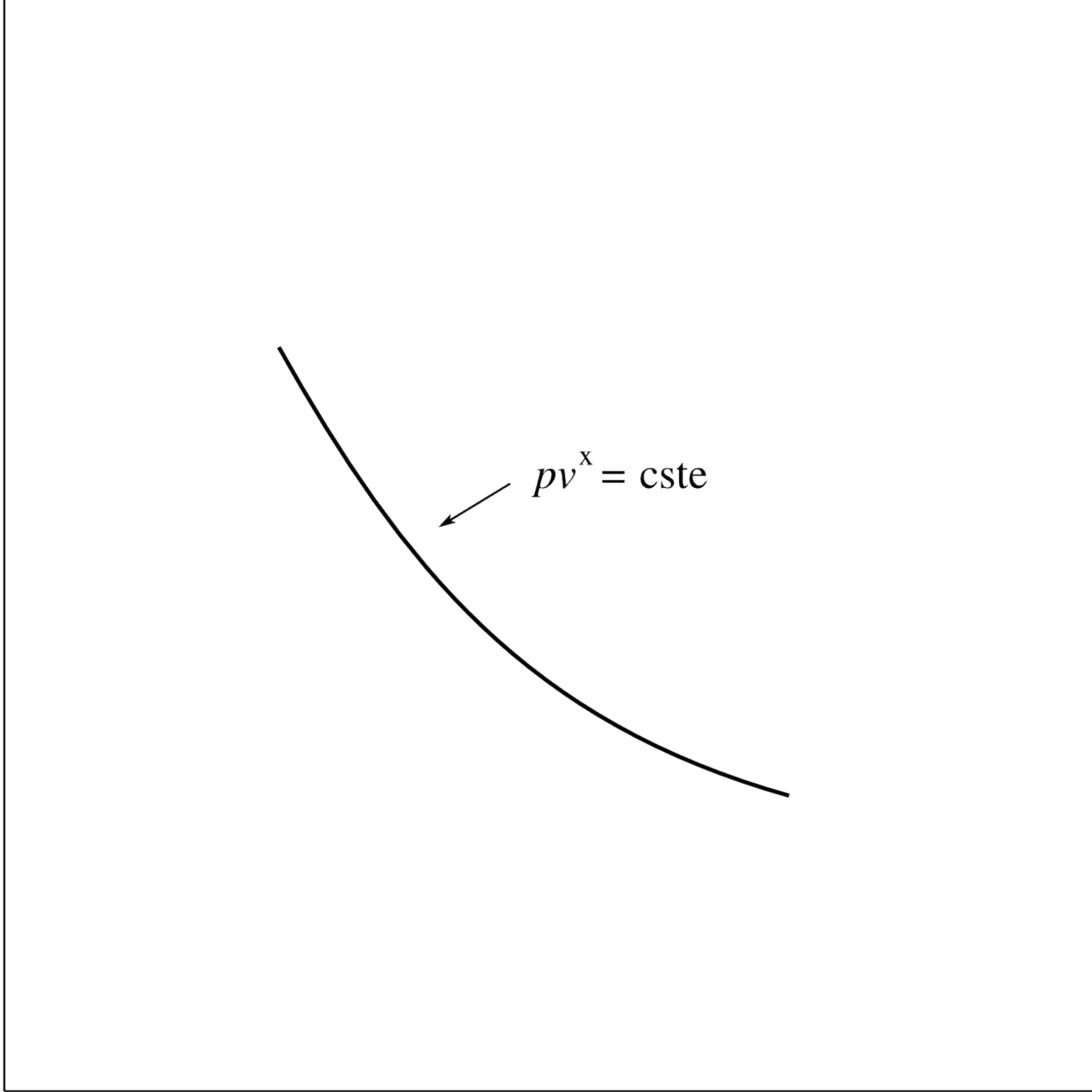


1

un gaz se comporte comme un ressort à
spires infiniment progressives

$$p v^x = k$$

p



$pv^x = \text{cste}$

v

2

plus le gaz reçoit de chaleur,

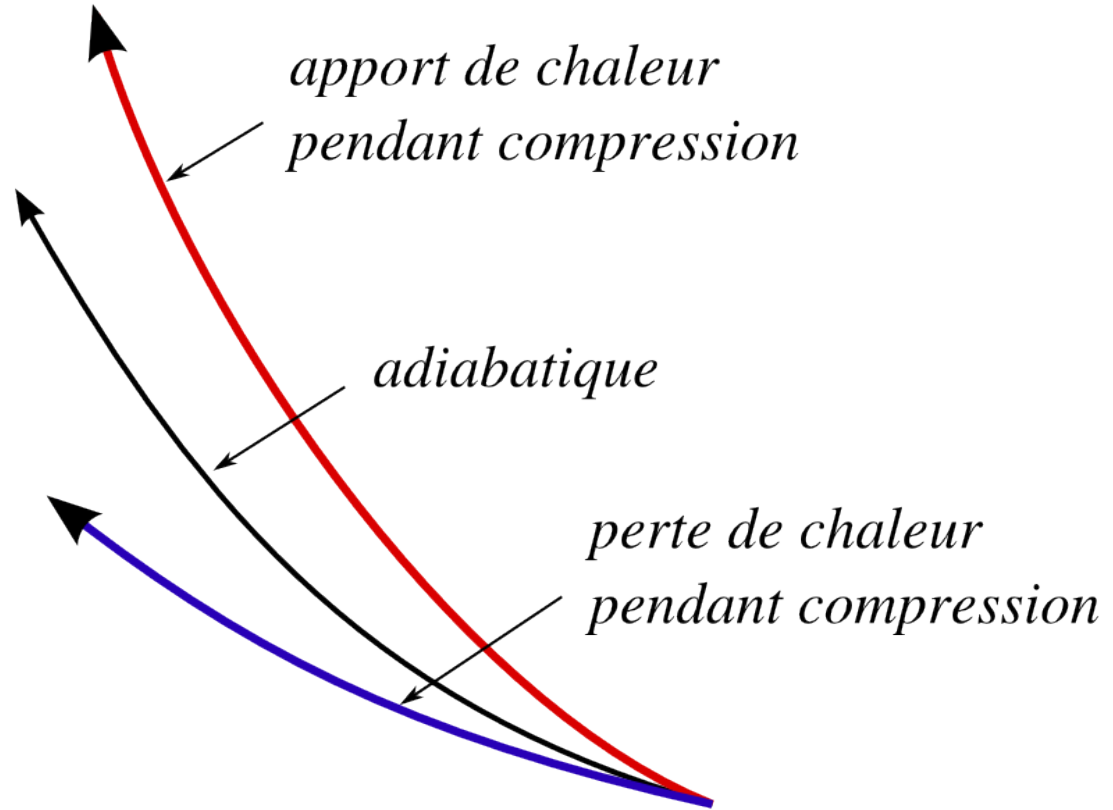
plus le ressort sera « dur »

→ augmentation du paramètre x

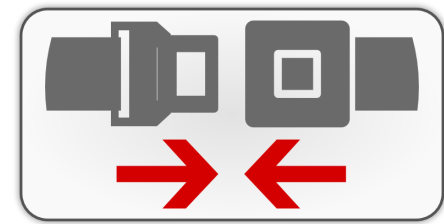
$$p v^x = k$$

p

évolutions infiniment lentes :



v

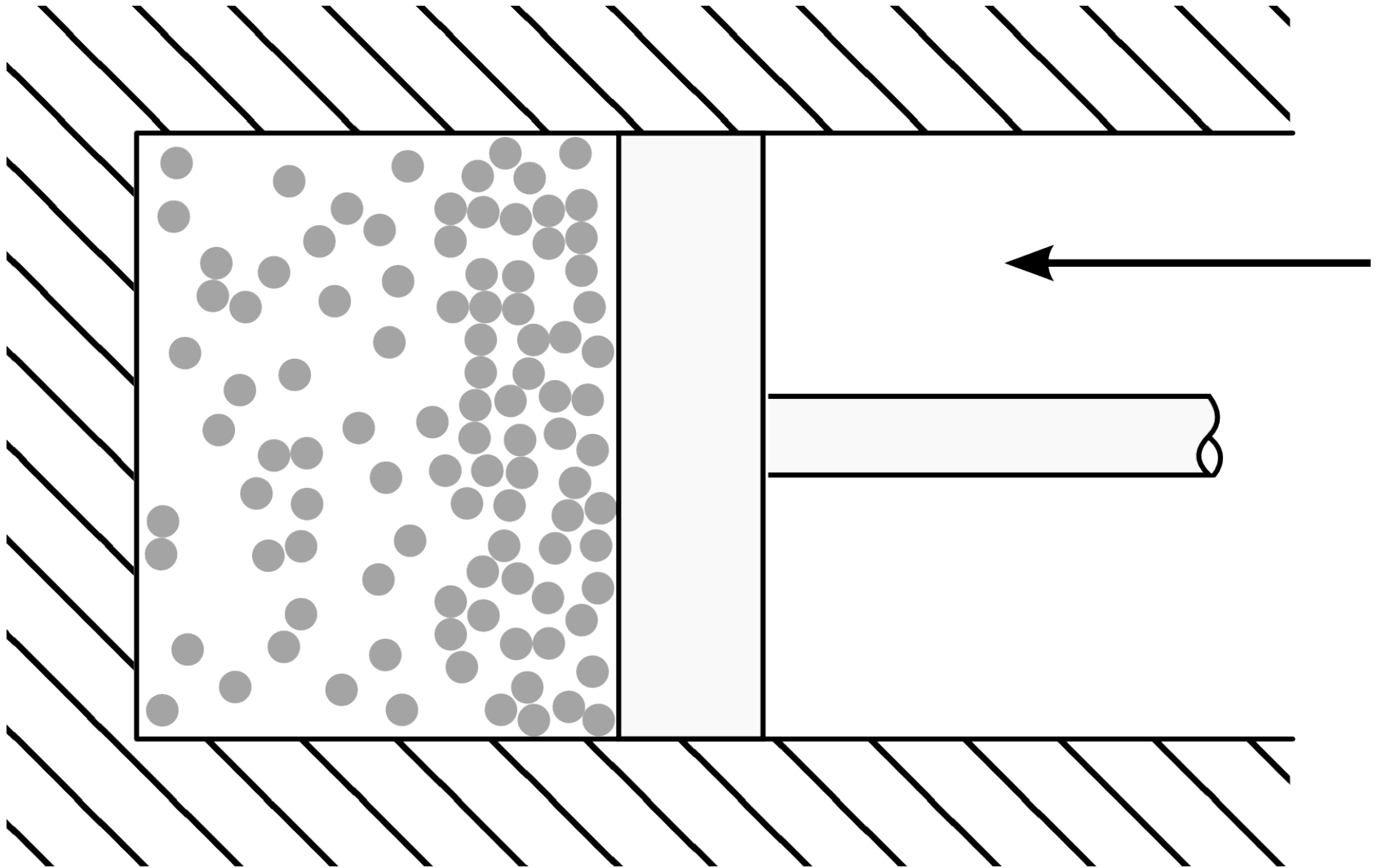


2.4.3 Travail rapide d'un fluide : l'irréversibilité

~ les choses ne sont plus ce qu'elles étaient ~

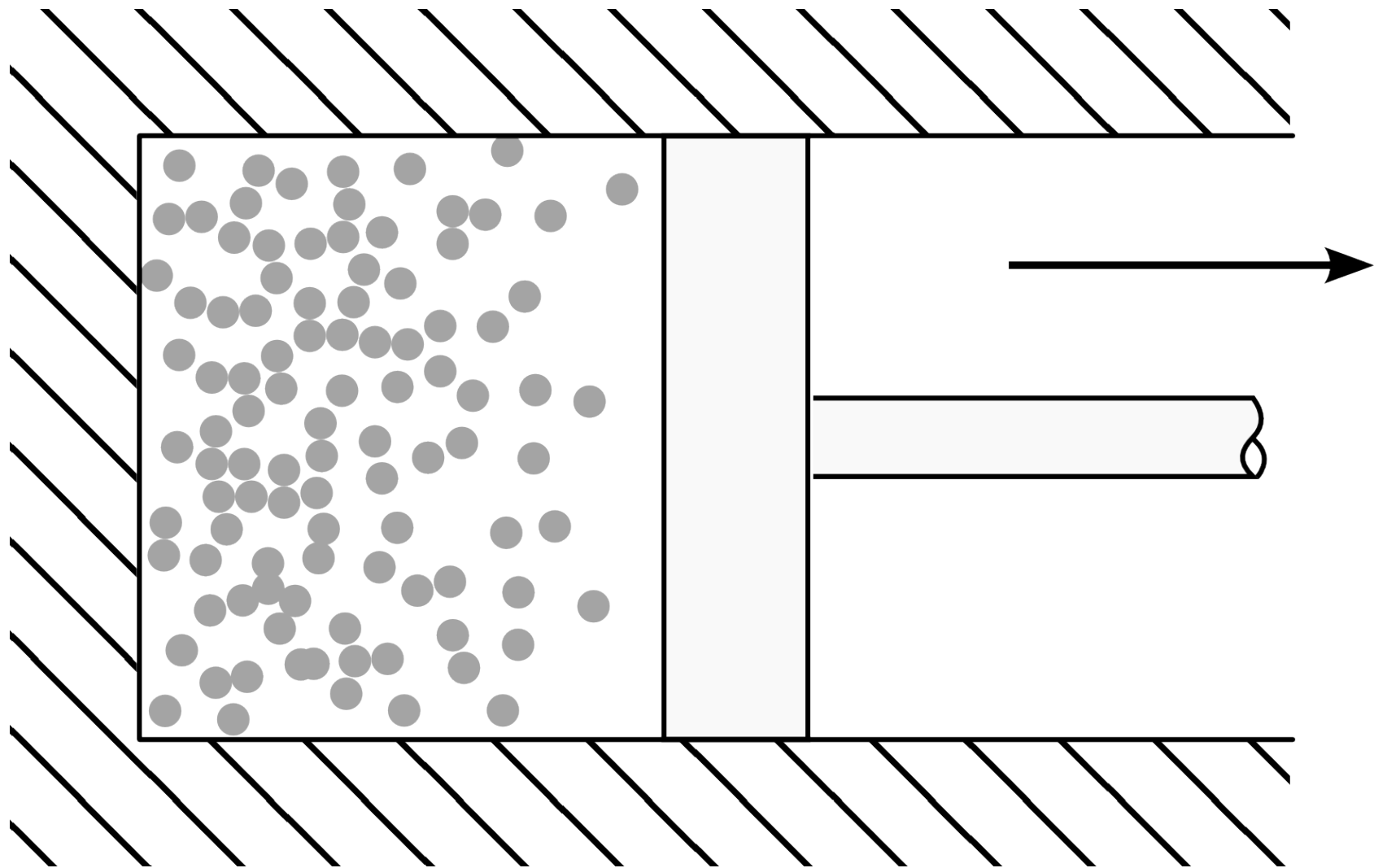
Et si la compression n'est pas

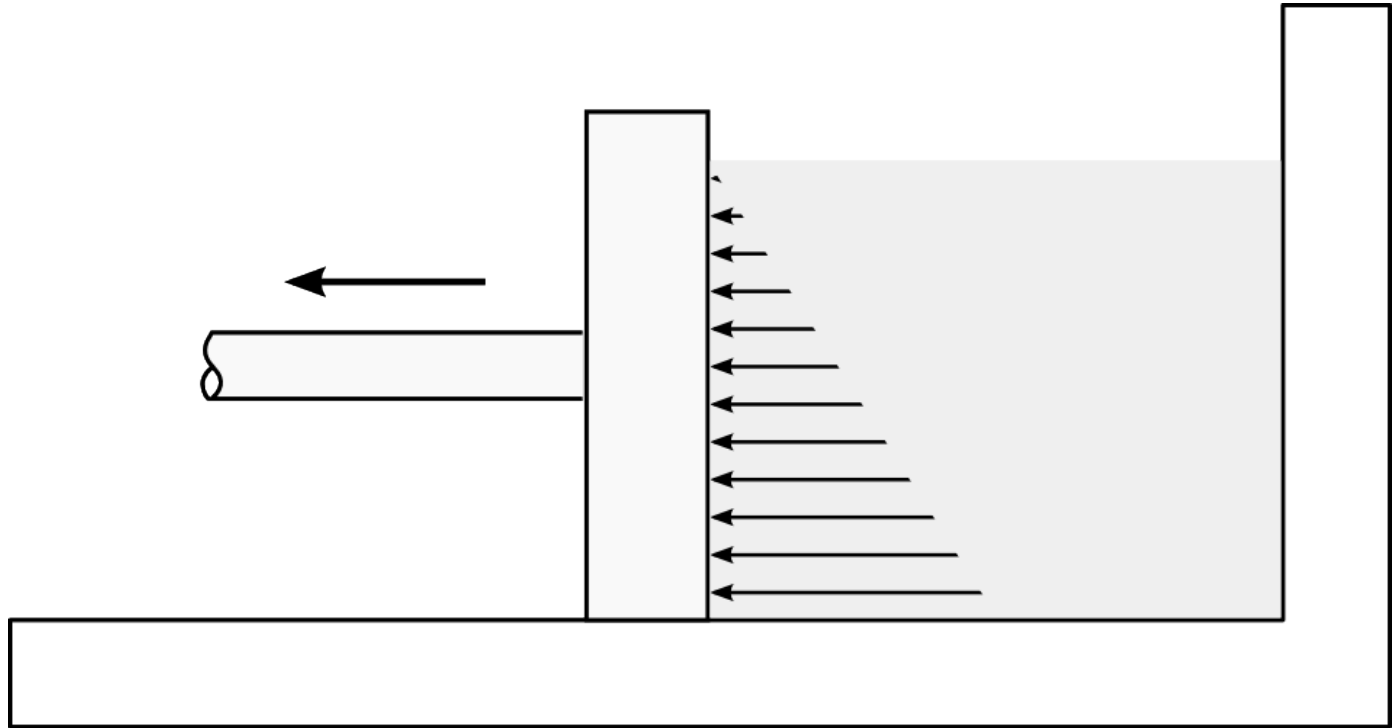
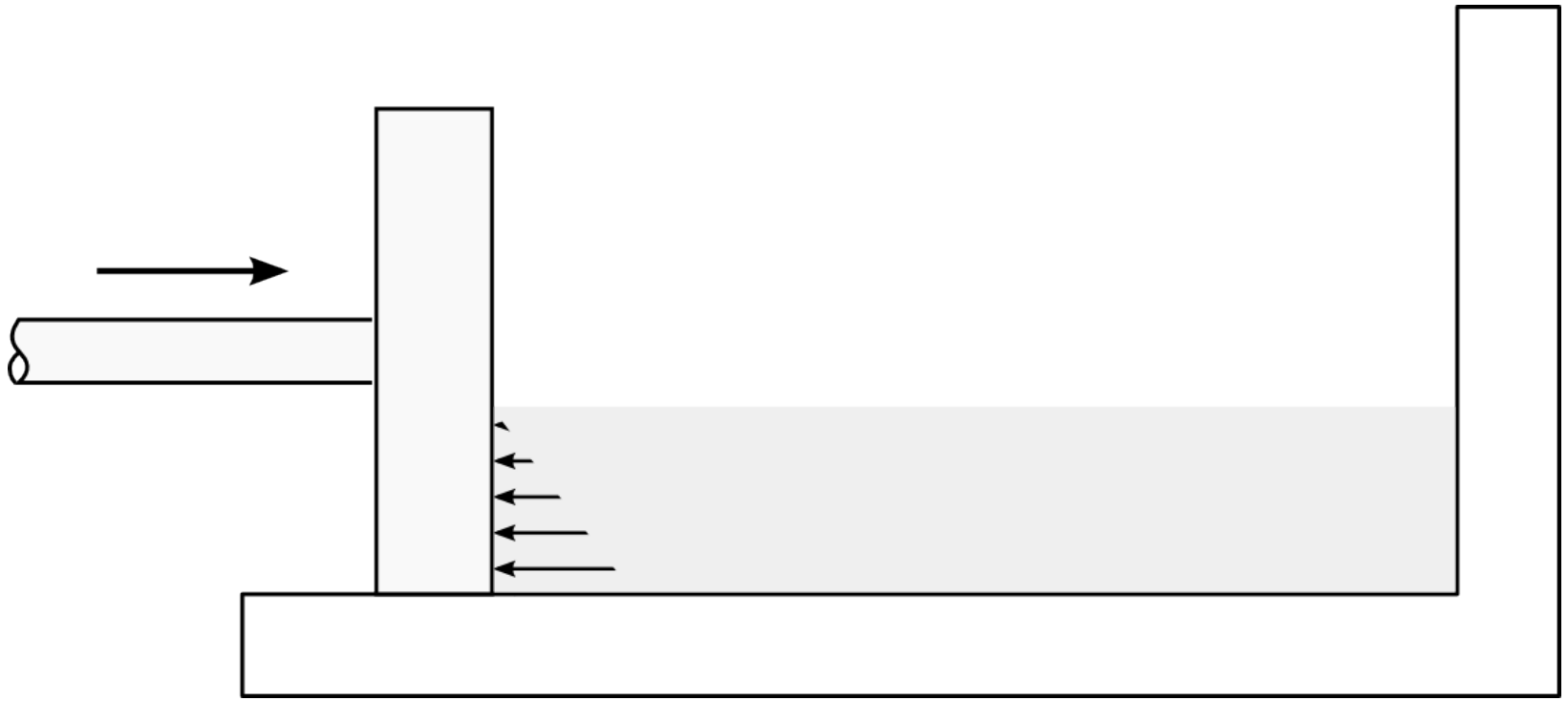
« infiniment lente » ?

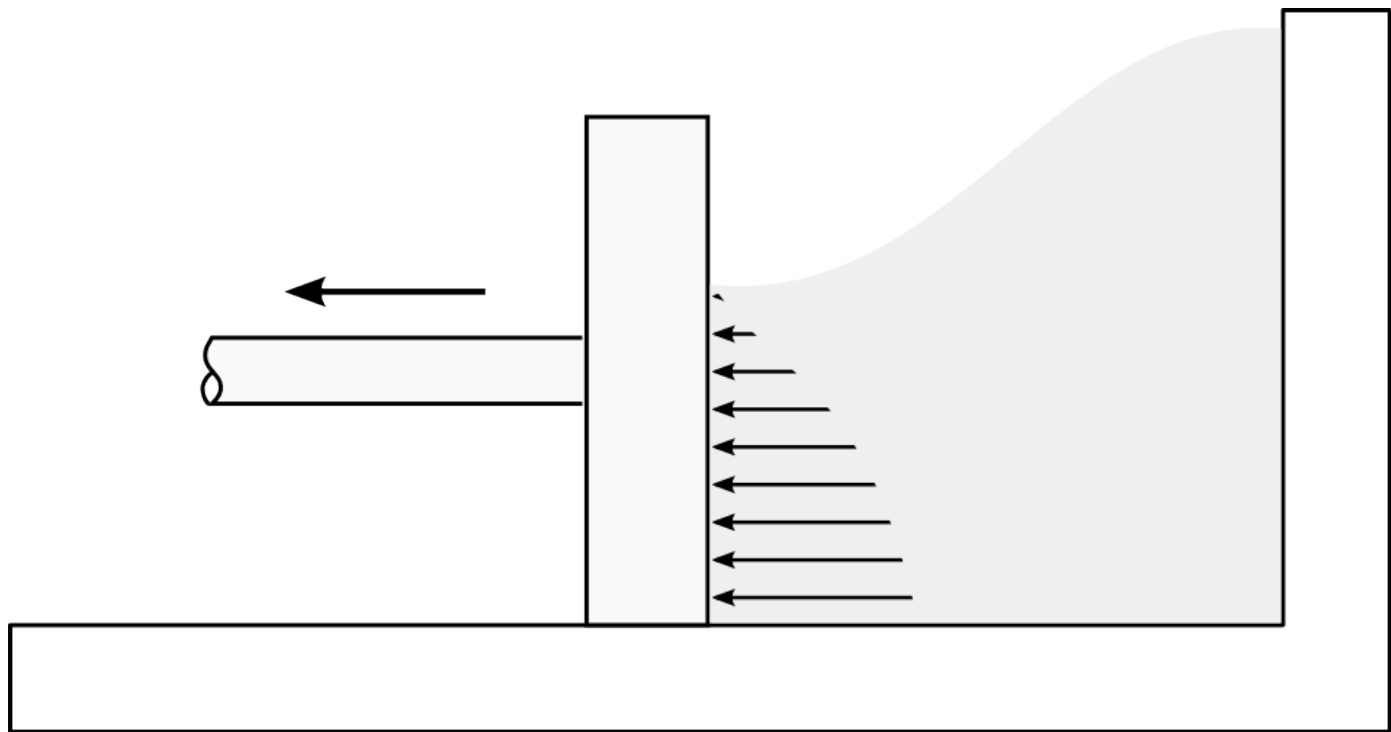
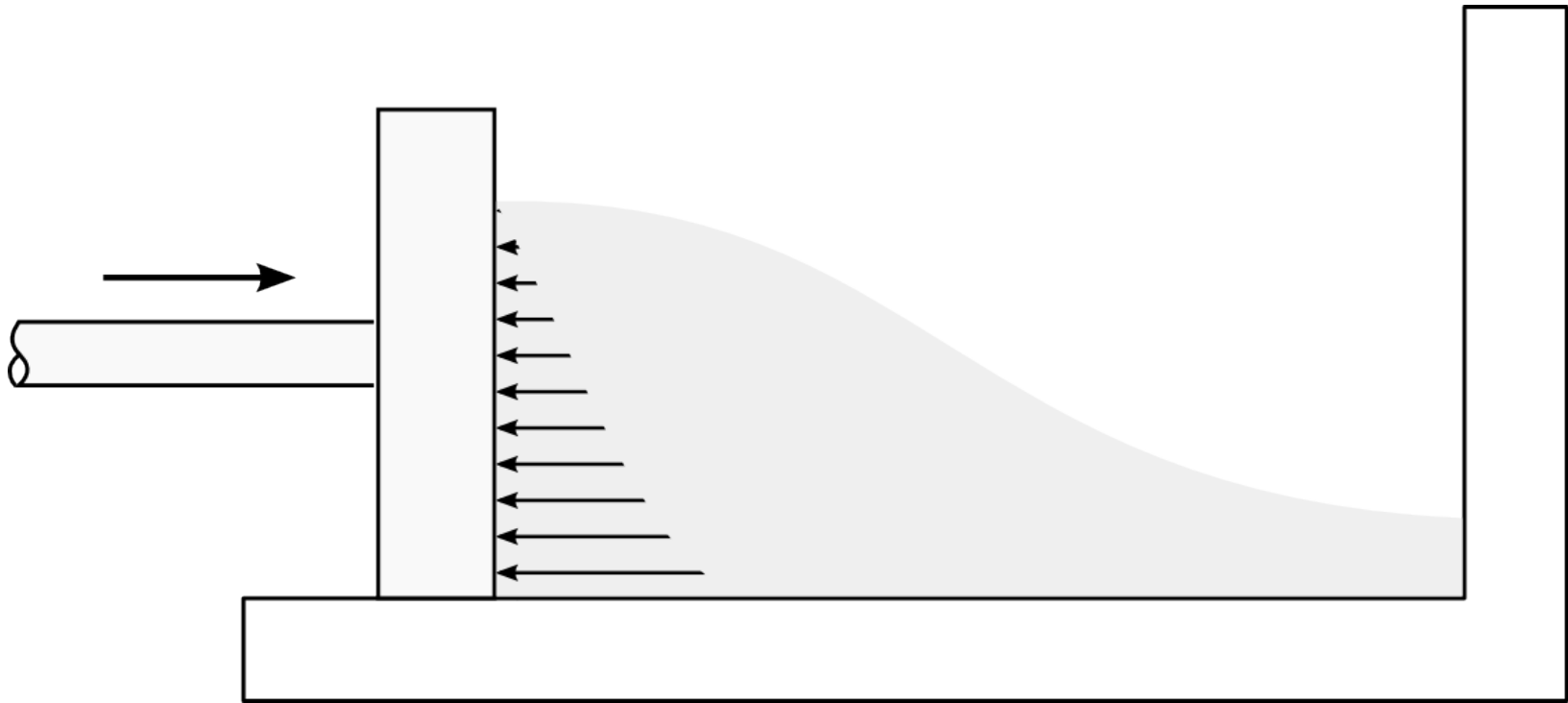


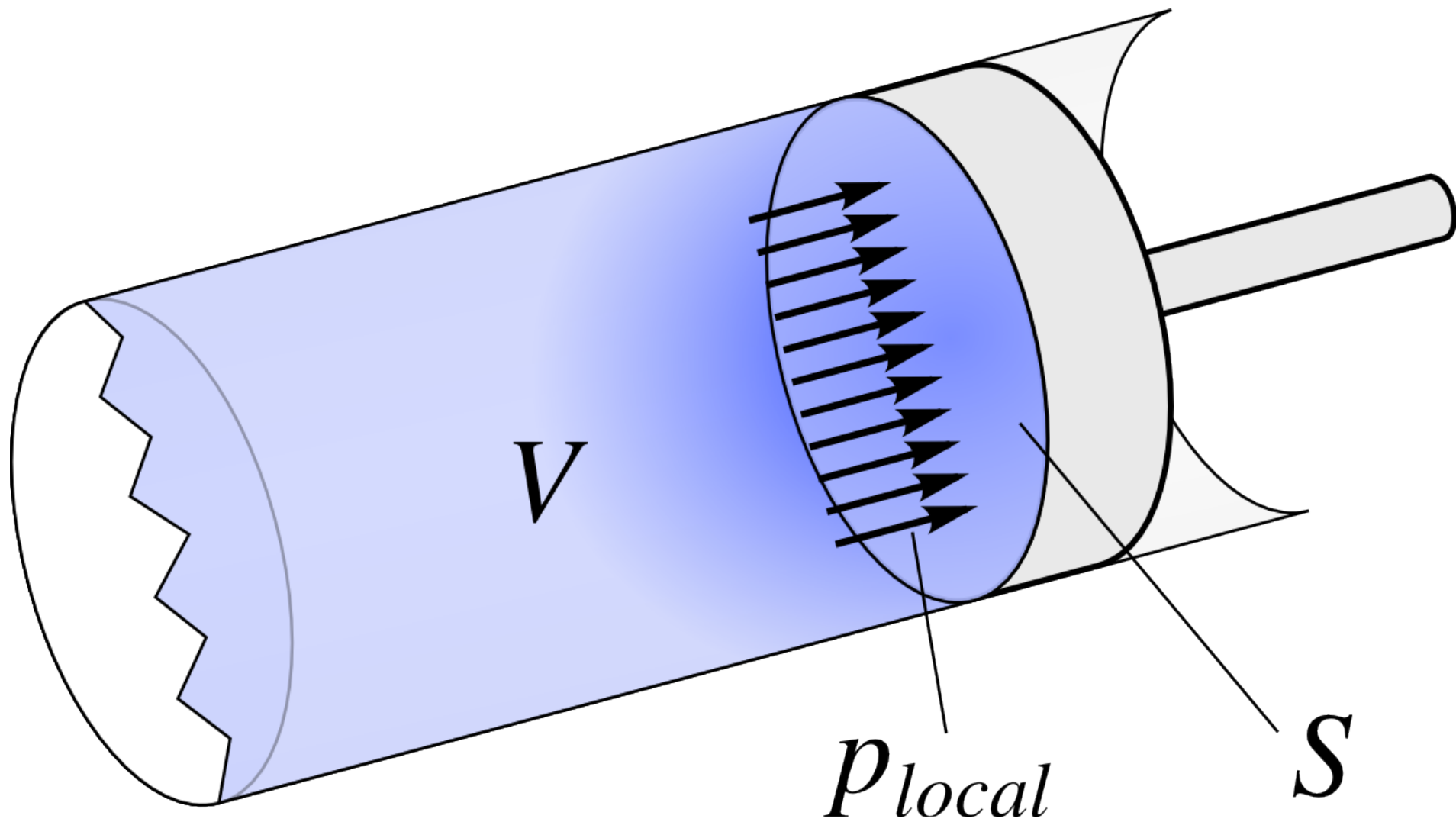
Et si la détente n'est pas non plus

« infiniment lente » ?

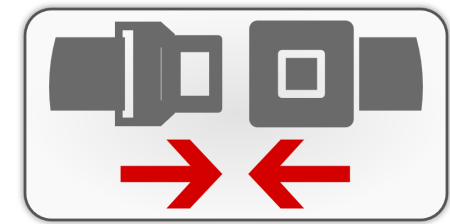






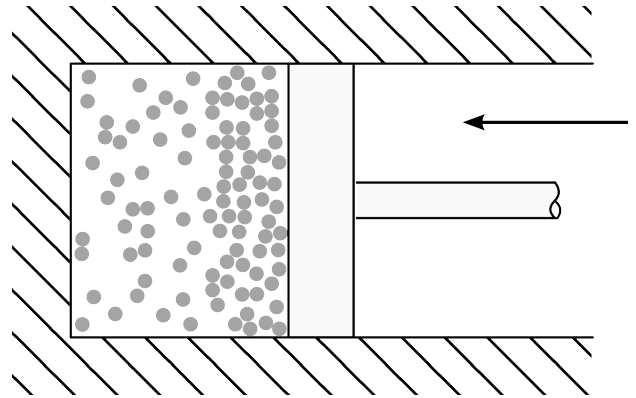
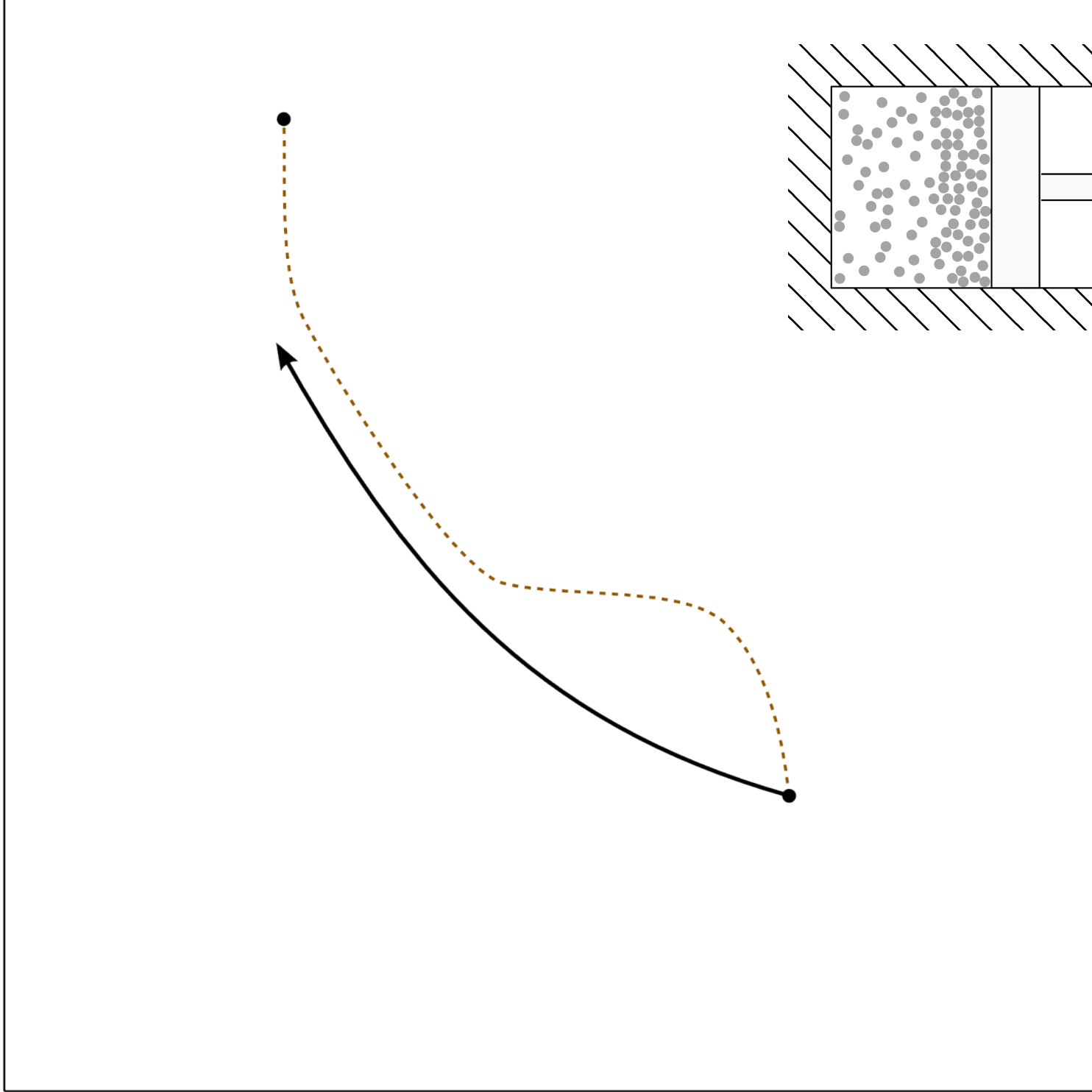


un fluide compressé ou détendu rapidement
se comporte comme un « mauvais ressort »



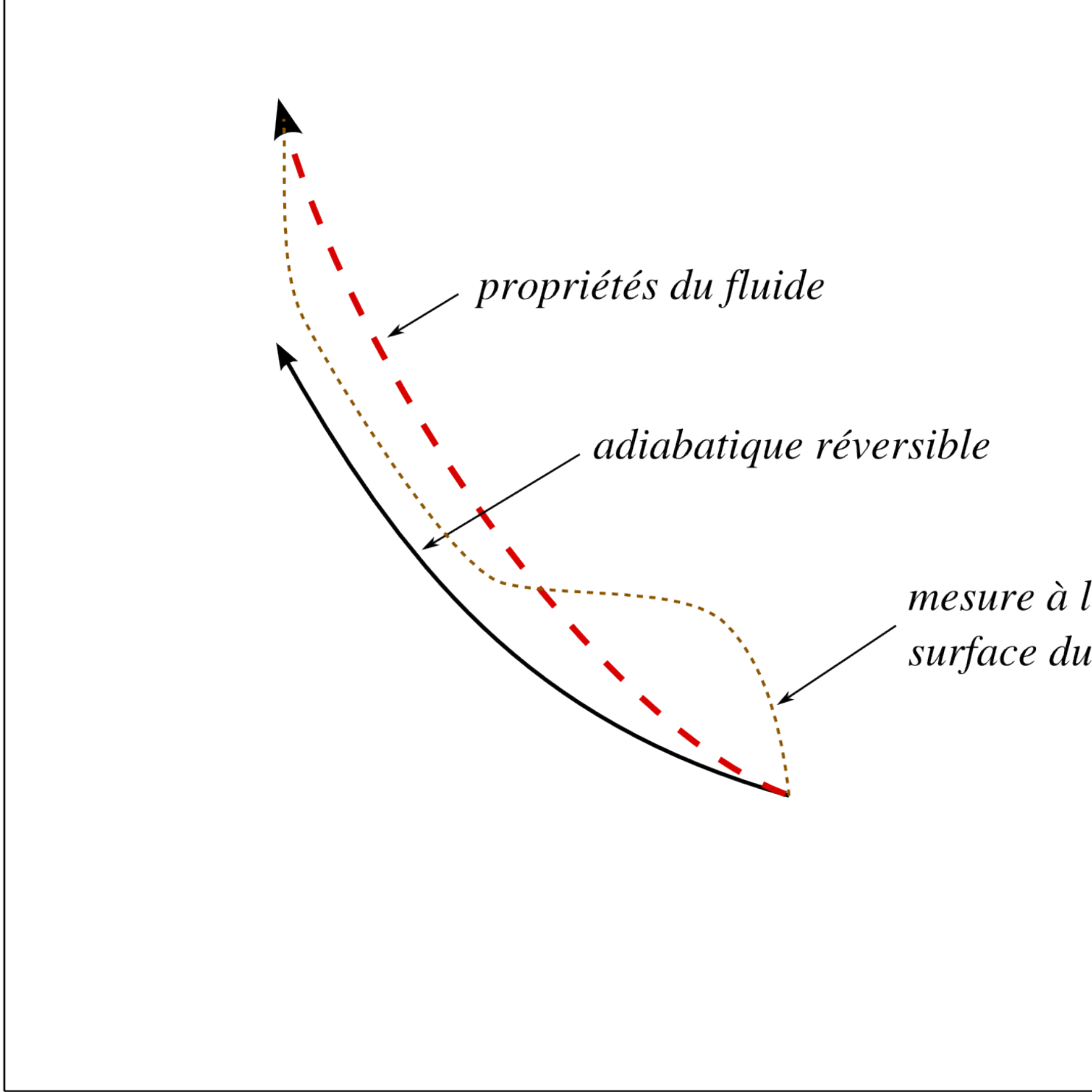
mais *où* est passée l'énergie ?

p



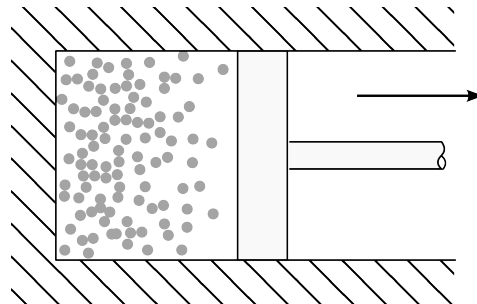
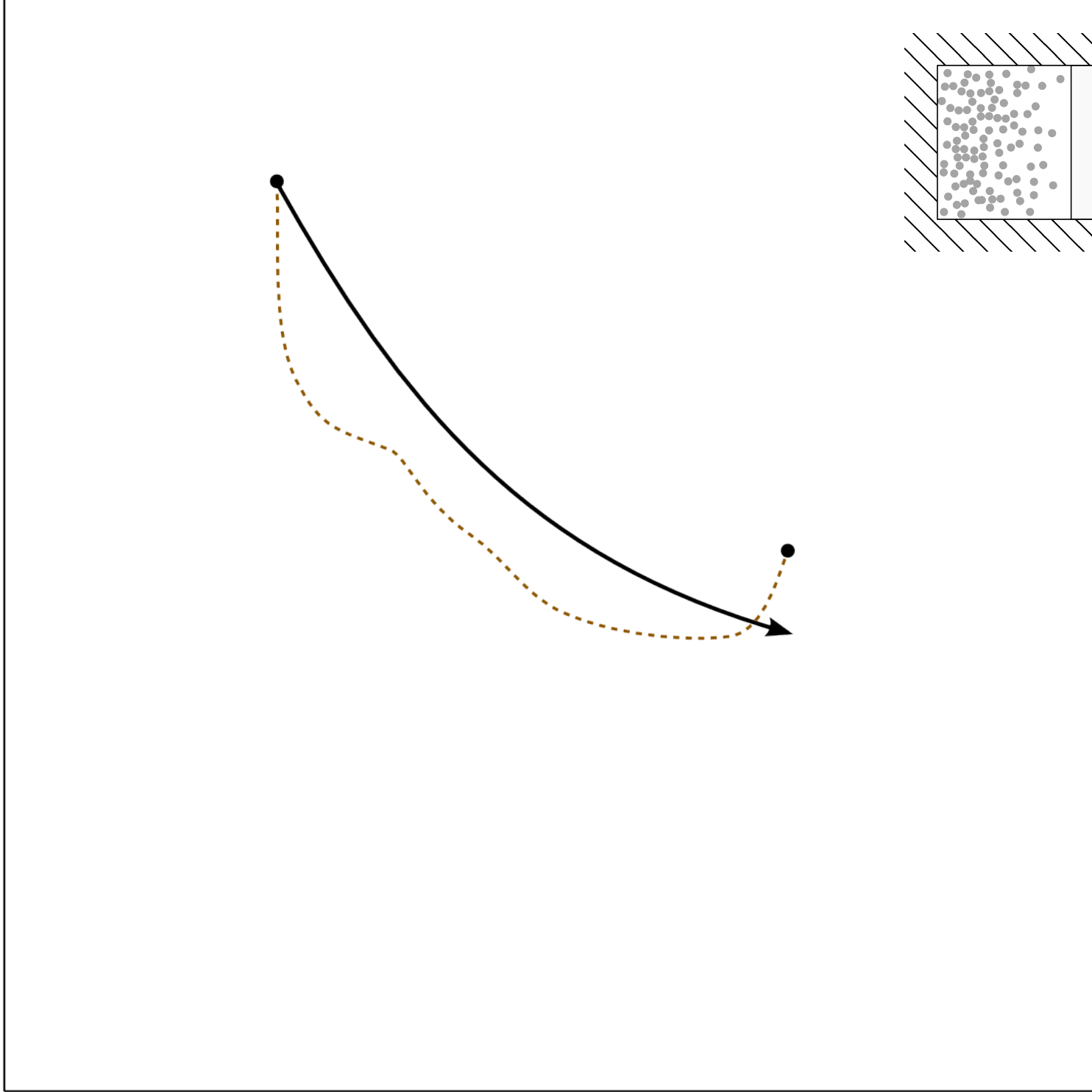
v

p



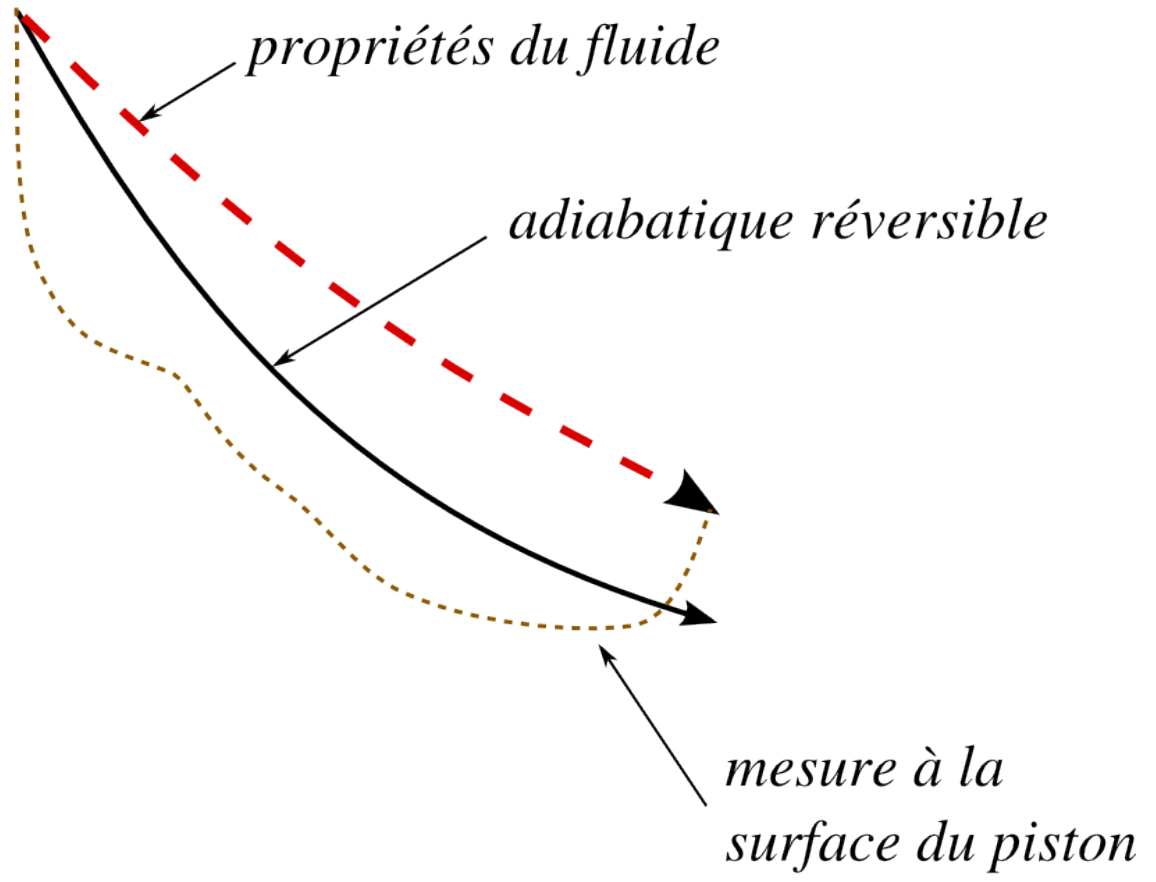
v

p

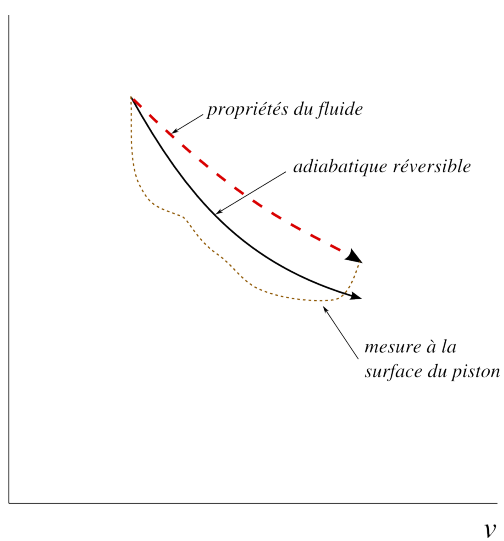


v

p



L'excédent d'énergie
(dépensée par le piston)
a été transformée en chaleur
à l'intérieur du fluide



$$W_{A \rightarrow B} \neq - \int_A^B p \, dv$$

Pour un fluide lorsque le mouvement est rapide !

Cette transformation est irrécupérable :

elle est **irréversible**.

La réversibilité

- 1) Pas de frottement (mécanisme)
pas de friction interne (turbulence)

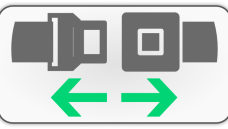
La réversibilité

- 2) Pas de différence de pression interne
 - pression homogène
 - mouvement infiniment lent (!)

La réversibilité

- 3) Pas de différence de température
 - Parois à température du fluide
 - Transfert de chaleur infiniment lent





2.5 Cas particuliers

2.5.1 Travail nul : évolutions isochores

isochore

=

à volume constant

à volume constant ?

$$d v = 0$$

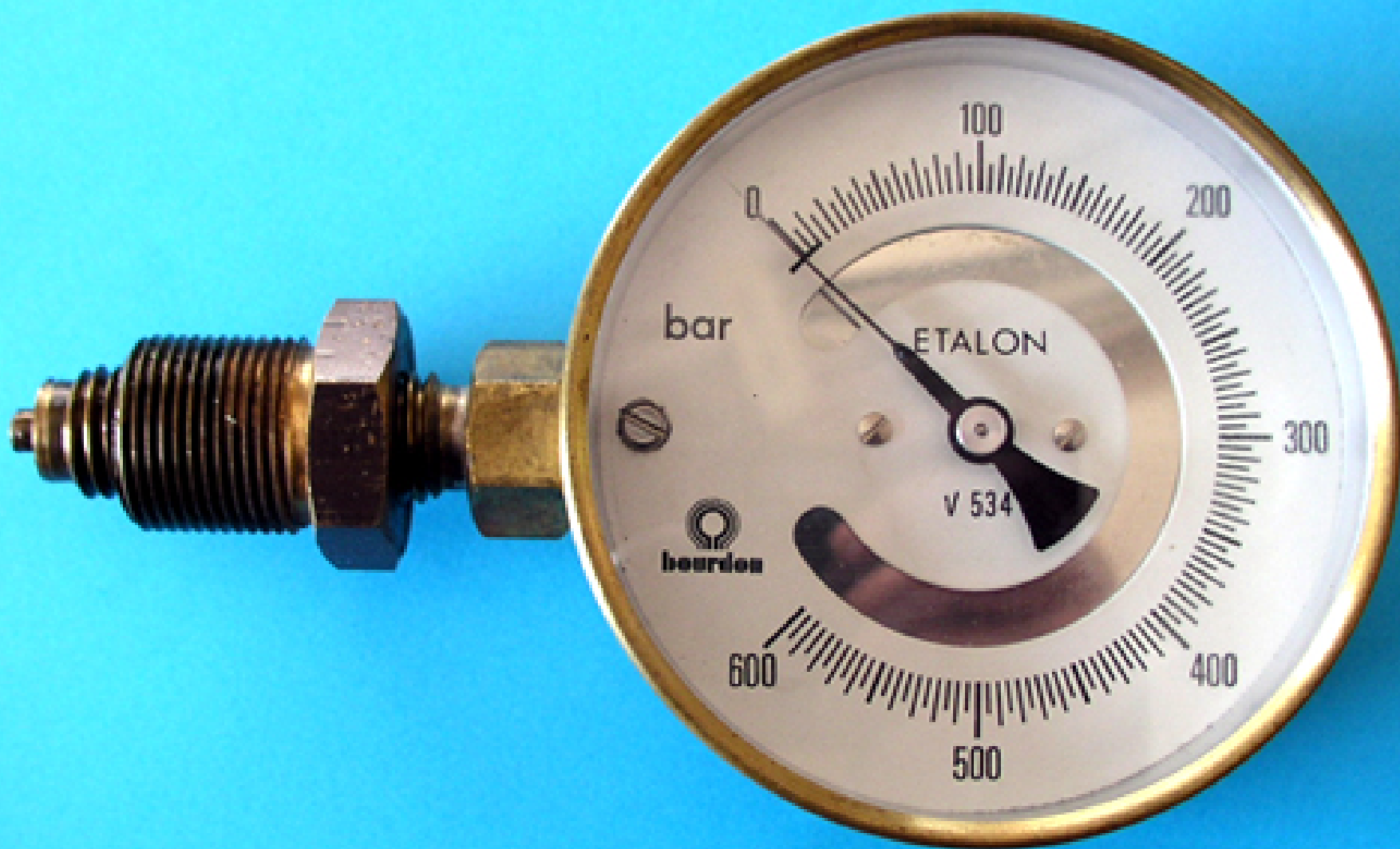
$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B p \, d v = 0$$

2.5.2 Pression indiquée et pression réelle

pression jaugée

=

pression réelle – pression atmosphérique



$$p_j \equiv p_{réel} - p_{atm}$$