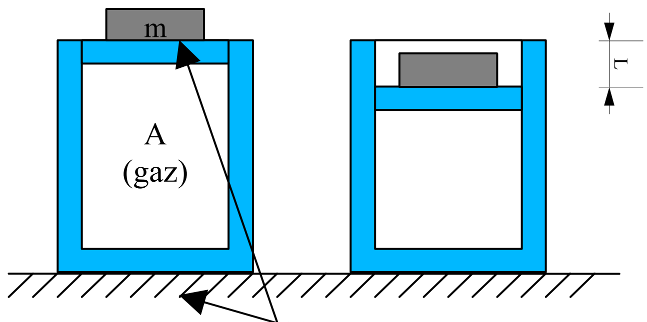
PHY2215 - HIVER 2009

Cours 03 – Interaction entre systèmes

Survol:

- Interaction entre systèmes
    - Travail
    - Chaleur
    - Travail quasi-statique
- Atteinte de l'équilibre: irréversibilité
    - Contraintes
    - Retrait des contraintes et équilibre
- Équilibre thermique entre systèmes

Interaction mécanique entre systèmes



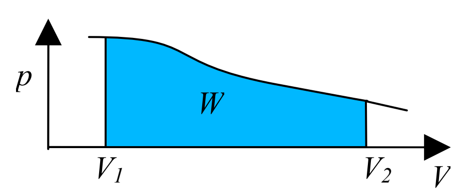
- Un système A' fait un travail sur le système A
- L'énergie du système A augmente de la même valeur que celle du système A' a diminuée:
- Soit W le travail fait **par** le système A (si A fournit W, son énergie doit diminuer)
  $\Delta E = -W\ (= mgL) = -\Delta E'$
- ΔE: changement de rayon de l'hyper-coquille

Chaleur Q

- on peut aussi introduire de l'énergie dans un système autrement que par un travail mécanique
    - définition de la chaleur : _______________
- la chaleur est l'augmentation d'énergie d'un système autrement que par un travail reçu

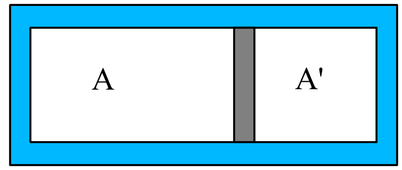
Travail quasi-statique

- lent p/r au temps de relaxation
- exemple: déplacement lent d'un piston (superficie a, pression p)
    - $dW = -dE = (a\,p)dL = p(a\,dL) = p\,dV \quad \Rightarrow \quad p = -\partial E/\partial V$
    - $W = \int_{V_1}^{V_2} dW = \int_{V_1}^{V_2} p\,dV$



    - le travail dépend du chemin d'intégration.
    - si le système est isolé, Q=0 $\Rightarrow$ $\Delta E = -W$

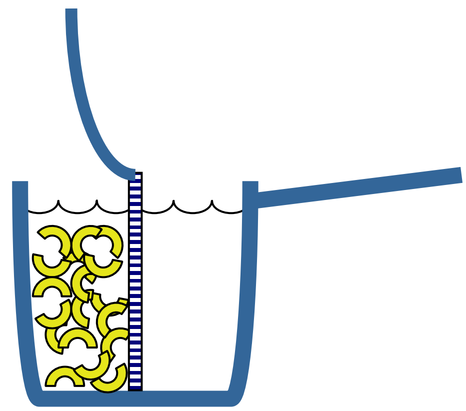
Types d'interactions



- Paroi est isolante et fixe:
  - A et A' n'interagissent pas
- Paroi non-isolante mais fixe:
  - Interaction purement thermique (W=0)
- Paroi isolante et mobile:
  - Interaction purement mécanique
  - La pression et le volume changent de telle sorte qu'un système fera un travail sur l'autre ($W = -W'$)
- Paroi non-isolante et mobile:
  - interaction mécanique et thermique

Atteinte de l'équilibre: irréversibilité

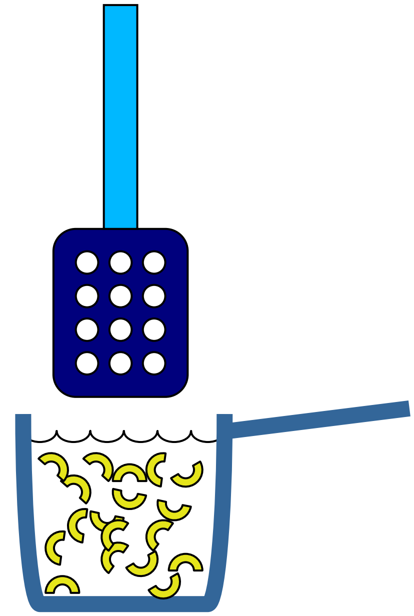
Contraintes et équilibre:



- Le fait d'imposer une contrainte $y = y_i$ sur un paramètre y du système réduit le nombre d'états accessibles
- Le système ne pourra accéder qu'aux états à l'intérieur de ces contraintes: $\Omega_{total} \to \Omega(y)$
- Exemple 1:
  - Des macaronis dans une casserole
  - volume total $y = V$
  - macaronis limités à la moitié gauche par une grosse cuillère percée
  - contrainte $y_i = V_i = V/2$
- Exemple 2:
  - un frigo fermé (système A, $E = E_i$)
  - …dans une cuisine bien isolée (système A', $E' = E_i'$).
  - états totaux du système frigo* + cuisine:
    - tous les états incluant lorsque la porte du frigo est rendue non-isolante
      - par exemple quand le frigo est ouvert
  - états accessibles au système frigo fermé + cuisine:
    - uniquement la fraction des états pour laquelle le système "frigo" a une énergie $E=E_i$ tout en maintenant le système "cuisine" à une énergie $E'=E_i'$
- Exemple 3:
  - Un piston isolant maintenu fixe
  - Contrainte sur le système
    - seuls les états V_i, E_i et V'_i, E_i' du système total (piston mobile et non isolant) sont accessibles

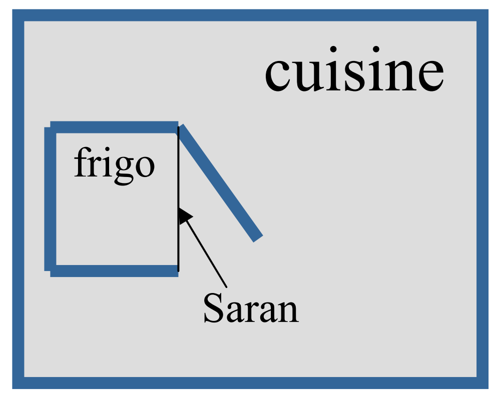
---

* On aura pris soin de mettre un "Saran-wrap" dans l'ouverture du frigo pour éviter d'avoir à discuter du mélange des molécules d'air au moment d'ouvrir la porte



On lève la contrainte

- Le système aura maintenant accès aux états qui lui étaient précédemment inaccessibles.
- Exemple 1:
  - on retire la cuillère percée de la casserole
  - une fois l'équilibre final atteint, chaque macaroni peut se retrouver n'importe où
  - la probabilité d'être à gauche pour chacun est 1/2
  - mais la probabilité que tous les N macaronis du système soit simultanément du côté gauche est (1/2)(1/2)…(1/2) = $(1/2)^N$



- Exemple 2:
  - On ouvre la porte du frigo
    - pas de mélange d'air à cause du Saran
  - Le nombre d'états accessibles au système frigo/cuisine deviendra beaucoup plus grand si l'air de la cuisine donne de l'énergie à l'air du frigo
  - Lorsque l'état le plus probable sera atteint, les systèmes cesseront d'échanger de l'énergie
  - Comme on le démontrera au prochain cours, cette situation se produit lorsque la température devient la même.
- Exemple 3:
  - On laisse le piston se déplacer
  - Le déplacement du piston sera tel que le nombre d'états accessibles par le système A+A' deviendra maximum.
  - Comme nous le montrerons au prochain cours, cette situation correspond à une pression égale pour les deux systèmes.

- En général, la situation avant l'enlèvement de la contrainte est hautement improbable après que celle-ci soit relâchée
- En général, le nombre d'états accessibles à un système pour un paramètre y possède un maximum très prononcé à une certaine valeur y_{max}.
- Suite au relâchement de la contrainte, $y = y_i \neq y_{max}$, le système évoluera à partir de y_i jusqu'à atteindre l'équilibre à y_{max}.
- Processus réversibles et irréversibles
  - Une fois qu'une contrainte a été levée, le système évolue vers une situation où, en général, il y a beaucoup plus d'états accessibles.
  - Si on réimpose une contrainte, il n'y a aucune raison pour laquelle le système se limiterait à nouveau aux états auquel il avait accès avant qu'on enlève la contrainte.
  - Si $\Omega(y_{\max}) = \Omega(y = y_i)$, le processus sera réversible.
  - Mais en général, $\Omega(y_{\max}) >> \Omega(y = y_i)$ et le processus sera irréversible

- Exemple 1:
    - les macaronis sont répartis uniformément dans la casserole
    - Si on remet la partition, ceci ne fera pas revenir les macaronis de leur côté initial!
    - On peut cependant utiliser la cuillère percée pour remettre le système dans son état initial.
    - Ceci implique cependant de fournir un travail supplémentaire au système
- Exemple 2:
    - le frigo et la cuisine sont maintenant à la même température
    - le fait de fermer la porte du frigo ne fera pas réchauffer la cuisine et refroidir le frigo (le frigo est débranché)
    - On pourra revenir à la situation initiale uniquement si un système externe effectue un changement thermique sur chacun des systèmes, par exemple en branchant le frigo
        - attention: comme le système de réfrigération n'est pas idéal, on relâchera en fait plus de chaleur dans la pièce que ce qu'il y avait initialement (voir cours 7 & 9)
- Exemple 3:
    - le piston, rendu mobile, s'est déplacé en position d'équilibre.
    - le seul fait de rendre le piston immobile à nouveau ne remettra pas la partition à sa position initiale.
    - cependant, un système extérieur peut effectuer un travail sur le système A+A' et ramener le piston à sa position initiale.
- pour qu'un processus soit réversible, il ne doit pas y avoir d'augmentation du nombre d'états
- le nombre d'états ne peut diminuer spontanément
    - en fait, il a une probabilité infime de le faire

<u>temps de relaxation intra-système vs inter-systèmes</u>

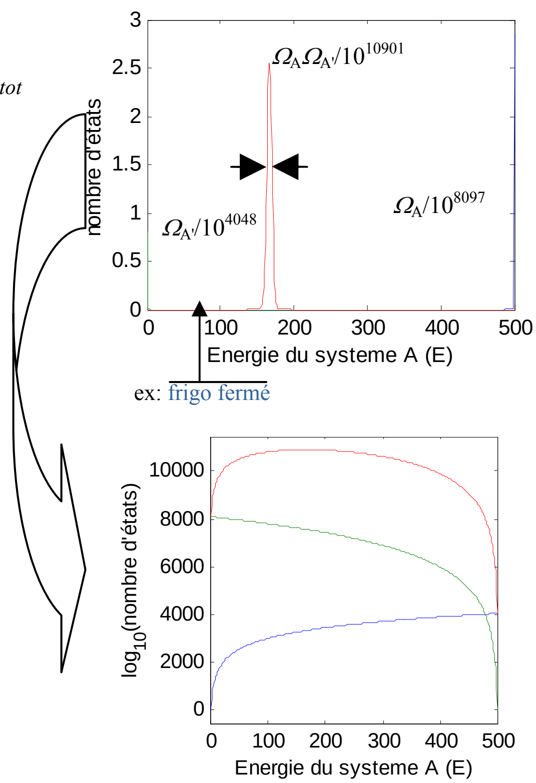
- en principe on ne peut traiter que des états d'équilibre
    - ex: il faut attendre que la température du frigo et de la cuisine soient la même avant de pouvoir conclure quoi que ce soit sur l'état des particules dans chaque partie du système
- cependant, si le temps de relaxation dans chaque partie du système est beaucoup plus petit que le temps de relaxation du processus engendré par le relâchement d'une contrainte, chaque partie du système se maintiendra en équilibre
    - ex: comme le Saran est partiellement isolant, on pourra mesurer la température* du frigo et de la cuisine en fonction du temps.
    - *le concept de température implique l'équilibre; le concept de "mesure de température" implique l'équilibre entre le système mesuré et le thermomètre (voir prochain cours)

- si le temps de relaxation entre les (deux) parties du système est très court p/r au temps expérimental, on atteint rapidement l'équilibre: pas de problème
- si le temps de relaxation entre les (deux) parties du système est de l'ordre du temps expérimental, les arguments sur l'état d'équilibre ne s'appliquent pas: gros problème

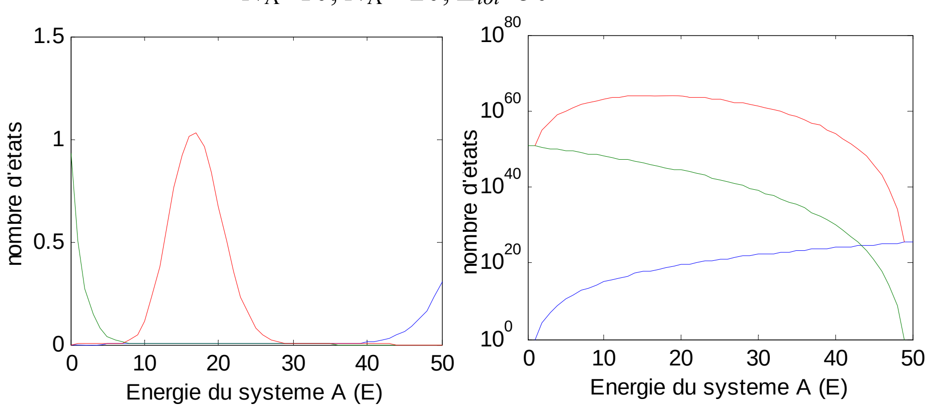
Interaction thermique entre systèmes

- soit deux systèmes (A et A') dont les nombres d'états accessibles sont $\Omega(E)$ et $\Omega'(E')$ pour des intervalles d'énergies $[E, E+\delta E]$ et $[E', E'+\delta E']$, respectivement
  - les systèmes ne sont pas isolés entre eux mais le sont de l'extérieur ($E_{tot} = E+E'$ est constant)
  - le système A voudrait se dirigé vers une énergie pour laquelle il y a un maximum d'états probable, i.e. $E=E_{tot}$
  - cependant, le système A' doit avoir l'énergie $E'=E_{tot}-E$ et il est hautement improbable qu'il se retrouve avec $E'=0$
  - la probabilité de retrouver le système A+A' dans un état où l'énergie du système A est E sera donné par $P(E) = \Omega_{tot}(E)/\Omega_{tot}$
  - mais $\Omega_{tot}(E) = \Omega_A(E)\cdot\Omega_A'(E') = \Omega_A(E)\cdot\Omega_A'(E_{tot}-E)$
  - en général, $\Omega(E)$ est une fonction qui croît rapidement en fonction de E
    - exemple du gaz parfait: $\Omega(E) \propto E^{\frac{3}{2}N}$
  - or, si $\Omega_A(E)$ croît rapidement avec E, $\Omega_A'(E_{tot}-E)$ décroîtra aussi rapidement en fonction de E
  - $P(E) = \Omega_{tot}(E)/\Omega_{tot}$ aura donc un maximum très prononcé
- exemple de deux gaz parfaits en contact thermique ($\Omega(E) \propto E^{\frac{3}{2}N}$)

N_A=1000, $N_{A'}$=2000, E_{tot}= 5000



N_A=10, $N_{A'}$=20, E_{tot}=50



À retenir

- interaction entre systèmes:
    - W: travail effectué par le système; mécanique : $W = \int_{V_1}^{V_2} pdV$
    - $-W$: travail effectué sur le système
- Q: énergie absorbée par le système autre que par un travail W
- $$Q \equiv \Delta E + W$$
- processus réversible : $\Omega(y) = \Omega(y_i)$
- processus irréversible
    - lorsqu'on relâche une contrainte, le système tend, par échange entre ses parties (énergie, volume, etc.), vers un état plus probable, car en général, la multiplicité $\Omega(y) >> \Omega(y = y_i)$ à mesure que le système évolue et que la valeur de y change
    - la fonction de probabilité $P(E)$ possède en général une valeur maximale très prononcée