

## VIII - Réactions chimiques

Prof. Cécile Hébert

17 avril 2025

## programme des 2 dernières semaines du semestre

Lundi 9 mai : correction d'un <sup>ou 2</sup> exercices en classe par  
1 ou 2 assistant.e.s

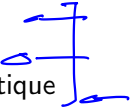
Mardi 21 mai cours "normal"

Vendredi 23 mai cours en amphithéâtre (CE1-3) 8-10

Lundi 26 mai : cours en amphithéâtre CE1-4

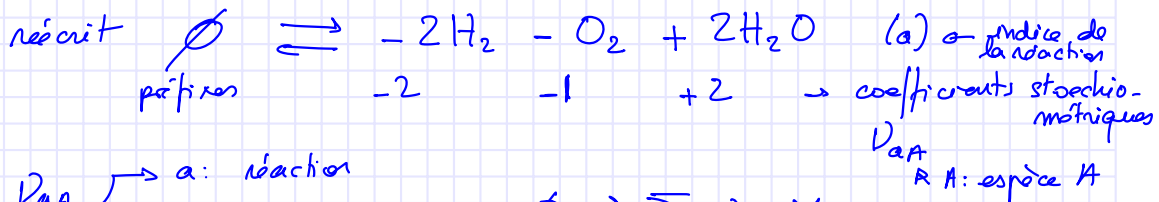
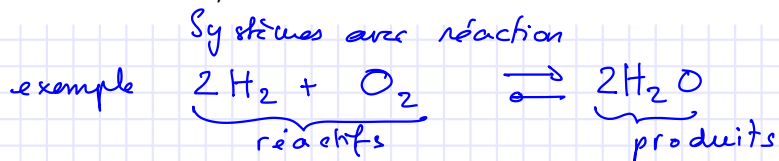
Mardi 28 mai dernière séance d'exercices avec les  
assistant.e.s

### Plan du cours

- I - Introduction
  - II - Premier principe
  - III - Second principe
  - IV - Fonctions thermodynamiques et équilibres
  - V - Gaz parfait et gaz de van der Waals ; théorie cinétique des gaz
  - VI - Changements de phases
  - VII - Machines thermiques
  - VIII - Thermochimie
  - IX - Transport
  - X - Physique statistique
- 

1. Introduction
2. Enthalpie libre de réaction  $G$
3. Enthalpie et entropie de réaction  $H$   $S$
4. Bilan de matière, entropie créée
5. Grandeurs molaires
6. Enthalpie de formation et réaction
7. Mélanges (de gaz) parfaits
8. Loi d'action de masse
9. Osmose

## 1. Introduction, définition



$$\emptyset \rightleftharpoons \sum_A \nu_{aA} X_A$$

$\nu_{aA} > 0$  produits

$\nu_{aA} < 0$  : réactifs.

On peut avoir d'autres réactions!  $\text{CH}_4 + \underline{2\text{O}_2} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \underline{2\text{H}_2\text{O}}$   
 $\text{O}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  partagés entre 2 réactions

En général on a  $n$  réactions de 1 à  $n$  et  $r$  espèces  $A$  de 1 à  $r$   
 Système fermé variation de  $N_A$  est due aux réactions.

On utilise  $\xi_a$  (ksi-a) l'avancement de la réaction (a)

Variation de  $N_A$ :  $dN_A$  est due à  $\xi_a$   $dN_{A,a} = \nu_{A,a} d\xi_a \Rightarrow dN_A = \sum_a \nu_{A,a} d\xi_a$   
 à  $t=0$   $\xi_a(t=0) = 0$   $N_A = N_{A,0} + \sum_a \nu_{A,a} \xi_a$

$\xi_a$  peut prendre toutes les valeurs telles que  $N_A \geq 0 \quad \forall A$

Vitesse de réaction  $\Omega_a$   $\underline{\Omega_a = \frac{d\xi_a}{dt} = \dot{\xi}_a}$

Système fermé  $\dot{N}_A = \frac{d}{dt} [N_{A,0} + \sum_a \nu_{aA} \xi_a] = \sum_a \nu_{aA} \dot{\xi}_a = \sum_a \nu_{aA} \mathcal{R}_a$

$$\dot{N}_A = \sum_A + \cancel{\dot{N}_A}(\text{fermé}) = \sum_A$$

$$\sum_A = \sum_a \nu_{aA} \mathcal{R}_a$$

⚠ ne pas confondre  $\sum_A$  source de A  
 $\sum_A$  "somme sur A"

V variance nombre de paramètres intensifs qu'un opérateur peut imposer au système


$$V = 2 + r - m - n$$

r: nombre de substances  
 m: nombre de phases  
 n: nombre de réactions chimiques

"phase" mélange de gaz  $\Rightarrow$  1 phase

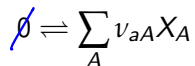
"liquide" et ses solution (sel) : 1 phase

eau + glace  $\rightarrow$  2 phases

 } 2 phases

## Résumé

Pour une réaction chimique notée (a)



avec :  $\nu_{aA}$  coefficients stoechiométriques ;  $X_A$  espèce chimique.

Les  $\nu_{aA}$  sont négatifs pour les réactants et positifs pour les produits.

$\xi_a$  avancement de la réaction (a).  $\Omega_a = \dot{\xi}_a$  vitesse d'avancement.

$\Sigma_A$  source d'espèce A.

$$\Sigma_A = \sum_a \nu_{aA} \Omega_a$$

$$\left| \begin{aligned} dN_A &= \sum_a \nu_{aA} d\xi_a \\ \nu_{aA} &= \frac{\partial N_A}{\partial \xi_a} \end{aligned} \right.$$

$\dot{N}_A = \Sigma_A + I_A$ . Système fermé  $I_A = 0$ .

$\nu = 2 + r - m - n$   $r$  : substances ou phases  $n$  réactions chimiques.



## 2. Energie libre de Gibbs ou enthalpie libre (G) de réaction (système fermé)

grandeur caractéristique de la réaction (a)

réactions se font à T et p constantes.  $G(T, p, \{N_A\})$   $N_A(\xi_a)$ but : remplacer  $N_A$  par  $\xi_a$ 

$$dG = - \cancel{SdT} + \cancel{Vdp} + \sum \mu_A dN_A = \sum_A \mu_A dN_A = \sum_A \mu_A \sum_a \nu_{aA} d\xi_a$$

$$dG = \sum_A \sum_a \mu_A \nu_{aA} d\xi_a = \sum_a \left( \sum_A \mu_A \nu_{aA} \right) d\xi_a$$

par définition : enthalpie libre de la réaction (a)  $\Delta G_a = \sum_A \mu_A \nu_{aA}$

$$dG = \sum_a \Delta G_a d\xi_a$$

Un système fermé maintenu à T et p constant minimise G  $dG < 0$

$\Delta \mu_a$  dépend de  $p$  et  $T$  donc  $\Delta G_a$  aussi.

$$dG = \sum_a \Delta G_a d\xi_a \quad \Delta G_a = \frac{\partial G}{\partial \xi_a}$$

Si une seule réaction (a)  $dG = \Delta G_a d\xi_a$

$dG$  est négatif (évolution spontanée)

le signe de  $\Delta G_a$  impose le signe de  $d\xi_a$

$\hookrightarrow$  = sens de la réaction

si  $\Delta G_a < 0$  pour avoir  $dG < 0$   $d\xi_a > 0$  sens  $\rightarrow$

si  $\Delta G_a > 0$   $d\xi_a < 0$  sens  $\leftarrow$

si  $\Delta G_a = 0$   $dG = 0$  à l'équilibre  $\Rightarrow d\xi_a = 0$

Attention livres de physique on voit plutôt  $\mathcal{A}_a = -\Delta G_a$   
affinité

$$\mathcal{A}_a = - \frac{\partial G}{\partial \xi_a} \quad \text{rappelle} \quad \vec{F} = - \vec{\nabla} E_p$$

## Résumé

L'enthalpie libre de la réaction (a) est

$$\Delta G_a = \sum_A \mu_A \nu_{aA}$$

lié à (a)  $\Leftrightarrow \sum_A \nu_{aA} X_A$

$\Delta G_a < 0$  alors  $d\xi_a > 0$ , la réaction va dans le sens  $\longrightarrow$

$\Delta G_a > 0$  alors  $d\xi_a < 0$ , la réaction va dans le sens  $\longleftarrow$

$\Delta G_a = 0$  alors le système est à l'équilibre ; pas de réaction,  $d\xi_a = 0$ ,  $\dot{\xi}_a = 0$ .

L'affinité chimique est définie comme  $\mathcal{A}_a = -\Delta G_a$

3. Enthalpie et entropie de réaction (système fermé) p et T constants

$dH = \delta Q$  en effet  $dH = dU + d(pV) = \delta Q + \delta W + \cancel{\delta Q} + p dV + V dp$   
 $dH = \delta Q - \underbrace{p^{ext} dV + p dV}_{0}$   $p = cte \quad p = p^{ext} \Rightarrow -p^{ext} dV + p dV = 0$

H fonction d'état  $\Rightarrow$  permet de calculer  $\delta Q \Rightarrow Q$  chaleur libérée par une réaction.  
 but exprimer dH avec  $\xi_a$   $H(S, p, \{N_A\})$

$H(S(T, p, \{N_A\}, \{\xi_a\}), p, \{N_A\}, \{\xi_a\}) = H(T, p, \{\xi_a\})$   
 $H(T, p, \{\xi_a\}) \rightarrow dH = \cancel{\frac{\partial H}{\partial T} dT} + \cancel{\frac{\partial H}{\partial p} dp} + \frac{\partial H}{\partial \xi_a} d\xi_a = \frac{\partial H(T, p, \{\xi_a\})}{\partial \xi_a}$

exprimer dH avec

# VIII - Réactions chimiques 3. Enthalpie et entropie de réaction

$$dH = \frac{\partial H(S, p, N_A)}{\partial S} \frac{\partial S(T, p, \xi_a)}{\partial T} dT + \frac{\partial H(S, p, N_A)}{\partial p} \frac{\partial S(T, p, \xi_a)}{\partial p} dp + \frac{\partial H(S, p, N_A)}{\partial S} \cdot \frac{\partial S(T, p, \xi_a)}{\partial N_A} \cdot \frac{\partial N_A}{\partial \xi_a} d\xi_a$$

$$+ \frac{\partial H(T, p, \dots)}{\partial p} dp + \frac{\partial H(S, p, \{N_A, \xi_a\})}{\partial N_A} \frac{\partial N_A}{\partial \xi_a} d\xi_a$$

$$dH = \sum_a \sum_A \left[ \underbrace{\frac{\partial H(S, p, \{N_A\})}{\partial S}}_T \cdot \underbrace{\frac{\partial S(T, p, \{N_A\})}{\partial N_A}}_{\boxed{?}} \cdot \underbrace{\frac{\partial N_A}{\partial \xi_a}}_{\nu_{aA}} + \underbrace{\frac{\partial H(S, p, \{N_A\})}{\partial N_A}}_{\mu_A} \cdot \underbrace{\frac{\partial N_A}{\partial \xi_a}}_{\nu_{aA}} \right] d\xi_a$$

$$dG = - \underbrace{S}_{T, p, N_A} dT + V dp + \sum \mu_A dN_A$$

(Maxwell)

$$\frac{\partial S}{\partial N_A} = - \frac{\partial \mu_A}{\partial T}$$

$$\frac{\partial S(T, p, \{N_A\})}{\partial N_A} = - \frac{\partial \mu_A(T, p, \{N_A\})}{\partial T}$$

# VIII - Réactions chimiques 3. Enthalpie et entropie de réaction

$$dH = \sum_a \sum_A T \left( \frac{\partial \mu_A}{\partial T} \right) \nu_{aA} + \mu_A \nu_{aA} \Big] d\xi_a$$

$\nu_{aA}$  indép. de  $T$   
 $\left( \frac{\partial \mu_A}{\partial T} \right) \cdot \nu_{aA} = \frac{\partial \nu_{aA} \mu_A}{\partial T}$

$$= \sum_a \left[ \underbrace{\sum_A \left( -T \frac{\partial}{\partial T} \nu_{aA} \mu_A \right)}_{-T \frac{\partial}{\partial T} \left[ \underbrace{\sum_A \nu_{aA} \mu_A}_{\Delta G_a} \right]} + \underbrace{\sum_A \mu_A \nu_{aA}}_{\Delta G_a} \right] d\xi_a$$

$$\Delta G_a = \sum_A \mu_A \nu_{aA}$$

$$\Rightarrow dH = \sum_a \left[ -T \frac{\partial \Delta G_a}{\partial T} + \Delta G_a \right] d\xi_a$$

$$dH = \delta Q = \sum_a \Delta H_a d\xi_a$$

par définition  $\Delta H_a = -T \frac{\partial \Delta G_a}{\partial T} + \Delta G_a$  enthalpie de la réaction (a)

$$dH = \sum_a \Delta H_a d\xi_a \Rightarrow \Delta H_a = \frac{\partial H}{\partial \xi_a}$$

## Résumé

L'enthalpie de la réaction (a) est  $\Delta H_a = -T \frac{\partial \Delta G_a}{\partial T} + \Delta G_a$

une réaction:  $\Delta H_a = \frac{dH}{d\xi_a} = \frac{\delta Q}{d\xi_a}$  ; plusieurs réactions  $dH = \sum_a \Delta H_a d\xi_a = \delta Q$

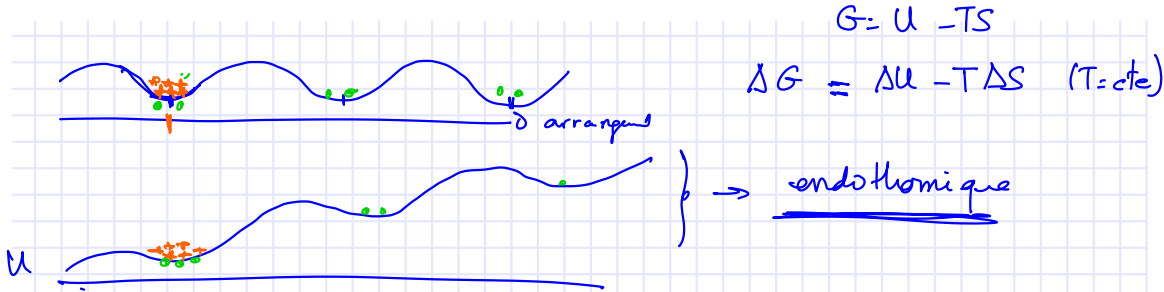
réaction dans le sens  $\rightarrow d\xi_a > 0$

$\Delta H_a < 0$  alors  $dH < 0$ , la réaction est exothermique  $\delta Q_a < 0$

$\Delta H_a > 0$  alors  $dH > 0$ , la réaction est endothermique  $\delta Q_a > 0$



## Réaction spontanée endothermique



## Entropie de réaction

$$S(T, p, \{N_A, \xi_a\}) \rightarrow S(T, p, \xi_a) \quad T, p, \text{ constants}$$

$$dS = \cancel{\frac{\partial S}{\partial T} dT} + \cancel{\frac{\partial S}{\partial p} dp} + \frac{\partial S}{\partial \xi_a} d\xi_a \quad dS = \sum_a \frac{\partial S}{\partial \xi_a} d\xi_a$$

Par définition  $\Delta S_a = \frac{\partial S}{\partial \xi_a}$  entropie de la réaction (a)

Une réaction  $dS = \Delta S_a d\xi_a$ ; plusieurs  $dS = \sum_a \Delta S_a d\xi_a$

$$G = U - TS + pV = \underbrace{U + pV}_{H} - TS \quad T = \text{cte} \Rightarrow dG = dH - TdS$$

Réaction (a)  $dG = \Delta G_a d\xi_a = \Delta H_a d\xi_a - T \Delta S_a d\xi_a$

$$\Delta G_a = \Delta H_a - T \Delta S_a$$

## 4. Bilan de matière, entropie créée

Système ouvert  $I_c \neq 0$   $I_c = \sum \mu_A I_A$  courant réversible de matière



$$\dot{N}_A = I_A + \Sigma A$$

$$\begin{aligned} \sum_A \mu_A \dot{N}_A &= \underbrace{\sum_A \mu_A I_A}_{I_c} + \sum_A \mu_A \Sigma A = I_c + \sum_A \mu_A \sum_a \nu_{aA} \mathcal{R}_a \\ &= I_c + \sum_a \left( \sum_A \mu_A \nu_{aA} \right) \mathcal{R}_a = I_c + \sum_a \Delta G_a \mathcal{R}_a \end{aligned}$$

$$\sum_A \mu_A \dot{N}_A = I_c + \sum_a \Delta G_a \mathcal{R}_a$$

Chapitre III  $\Sigma_s$  vient uniquement des réactions si les I sont réversibles  
 $I_c$  réversible  $I_w$  et  $I_q$  aussi ( $p = p^{int} = p^{ext}$ ;  $T^{int} = T^{ext}$ )

$$\text{Slide 15 } \Sigma_s = -\frac{1}{T} \sum_A \mu_A \Sigma_A = -\frac{1}{T} \sum_A \mu_A \sum_a \nu_{aa} \mathcal{Q}_a$$

$$= -\frac{1}{T} \sum_a \left( \sum_A \mu_A \nu_{aa} \right) \mathcal{Q}_a = -\frac{1}{T} \sum_a \Delta G_a \mathcal{Q}_a$$

$$\Sigma_s = -\frac{1}{T} \sum_a \Delta G_a \mathcal{Q}_a$$

cf slide 9

réaction (a)

Si  $\Delta G_a > 0 \Rightarrow$  réaction sens  $\leftarrow \Rightarrow d\xi_a < 0 \Rightarrow \mathcal{Q}_a < 0 \Rightarrow \Sigma_s > 0$

Si  $\Delta G_a < 0 \quad \longrightarrow \Rightarrow d\xi_a > 0 \Rightarrow \mathcal{Q}_a > 0 \Rightarrow \Sigma_s > 0$

On a toujours  $\Sigma_s > 0$  'i

## 5. Grandeurs molaires

Variables  $p$  et  $T$  et  $\{N_A\}$ Volume grandeur extensive  $V(p, T, \{N_A\})$   $p$  et  $T$  intensives  $\{N_A\}$  extensivesOn fait  $\times \lambda$  sur le système

$$V(p, T, \{\lambda N_A\}) = \lambda V(p, T, \{N_A\}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \text{ de (1)} \quad \sum_A N_A \cdot \frac{\partial V(p, T, \{\lambda N_A\})}{\partial (\lambda N_A)} = V(p, T, \{N_A\}) \quad \text{vrai } \forall \lambda \text{ aussi si } \lambda=1$$

$$\sum_A N_A \frac{\partial V(p, T, \{N_A\})}{\partial N_A} = V(p, T, \{N_A\})$$

par définition  $\left[ \frac{\partial V}{\partial N_A} \right]_{p, T} = v_A$   
volume molaire de A

$$V = \sum_A N_A v_A \quad v_A \text{ en m}^3/\text{mol.}$$

Avec une substance  $V = N v$   $v = \frac{V}{N}$  volume molaire substance pure

$\mathcal{V}_A(T, p, \{N_A\})$   $\mathcal{V}_A$  est intensive

$\forall \lambda \quad \mathcal{V}_A(T, p, \{\lambda N_A\}) = \mathcal{V}_A(T, p, \{N_A\})$  prenons  $\lambda = \frac{1}{N}$   $N = \sum_A N_A$

$\mathcal{V}_A(T, p, \{N_A\}) = \mathcal{V}_A(T, p, \{\frac{N_A}{N}\})$   $\frac{N_A}{N} = x_A$  fraction molaire de A

$\mathcal{V}_A$  est une fonction de  $p, T, \{x_A\}$   $\mathcal{V}_A(p, T, \{x_A\})$   
 $\sum_A x_A = 1 = \sum_A \frac{N_A}{N} = \frac{\sum_A N_A}{N} = \frac{N}{N} = 1$  2 + (r-1) variables.

On a défini  $\mathcal{V}_A = \left. \frac{\partial V}{\partial N_A} \right|_{p, T}$  le volume molaire

De la même manière on définit l'entropie molaire  $s_A$

$$s_A = \left. \frac{\partial S}{\partial N_A} \right]_{T,p} = s_A(p, T, \{x_A\}) \quad S = \sum_A N_A s_A$$

On définit l'enthalpie molaire  $h_A = \left. \frac{\partial H}{\partial N_A} \right]_{p,T} = h_A(T, p, \{x_A\}) \quad H = \sum_A N_A h_A$

énergie libre molaire ?

$$\left. \frac{\partial G}{\partial N_A} \right]_{T,p} = \mu_A \quad G(T, p, \{N_A\}) \quad dG = -SdT + Vdp + \sum_A \mu_A dN_A$$

pas besoin, c'est  $\mu_A$  !

$$H: dH = TdS + Vdp + \sum_A \mu_A dN_A$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial N_A} \right]_{(S,p)} = \mu_A$$

Ne mélange pas  $\mu_A$  avec  $h_A$  !!  
pas les bonnes variables

On a vu  $\Delta G_a = \Delta H_a - T \Delta S_a$

$$\frac{\partial G}{\partial \xi_a} = \frac{\partial H}{\partial \xi_a} - T \frac{\partial S}{\partial \xi_a} \quad (1)$$

$$G(T, p, \{N_A\}) = G(T, p, \{N_A, \{\xi_a\}\})$$

$$\frac{\partial G}{\partial \xi_a} = \left. \frac{\partial G}{\partial N_A} \right|_{T, p} \cdot \frac{\partial N_A}{\partial \xi_a}$$

$$\frac{\partial H}{\partial \xi_a} = \left. \frac{\partial H}{\partial N_A} \right|_{T, p} \frac{\partial N_A}{\partial \xi_a}$$

$$\frac{\partial S}{\partial \xi_a} = \left. \frac{\partial S}{\partial N_A} \right|_{T, p} \frac{\partial N_A}{\partial \xi_a}$$

dans (1)

$$\underbrace{\left. \frac{\partial G}{\partial N_A} \right|_{T, p}}_{\mu_A} \cdot \cancel{\frac{\partial N_A}{\partial \xi_a}} = \underbrace{\left. \frac{\partial H}{\partial N_A} \right|_{T, p}}_{h_A} \cdot \cancel{\frac{\partial N_A}{\partial \xi_a}} - T \underbrace{\left. \frac{\partial S}{\partial N_A} \right|_{T, p}}_{s_A} \cdot \cancel{\frac{\partial N_A}{\partial \xi_a}}$$

$$\mu_A = h_A - T s_A$$



## Résumé

$x_A$  concentration molaire de la substance  $A$ .

$v_A$  volume molaire,  $s_A$  entropie molaire et  $h_A$  enthalpie molaire.

$$v_A(T, p, \{x_A\}) = \frac{\partial V(T, p, \{N_A\})}{\partial N_A}$$

$$V = \sum_A v_A(T, p, \{x_A\}) N_A$$

$$s_A(T, p, \{x_A\}) = \frac{\partial S(T, p, \{N_A\})}{\partial N_A}$$

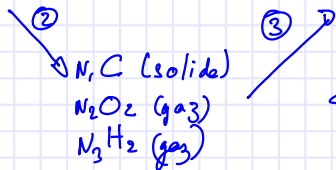
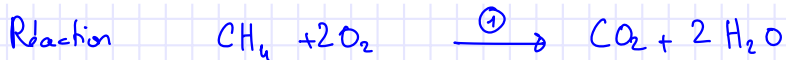
$$S = \sum_A s_A(T, p, \{x_A\}) N_A$$

$$h_A(T, p, \{x_A\}) = \frac{\partial H(T, p, \{N_A\})}{\partial N_A}$$

$$H = \sum_A h_A(T, p, \{x_A\}) N_A$$

$$\mu_A = h_A - T s_A$$

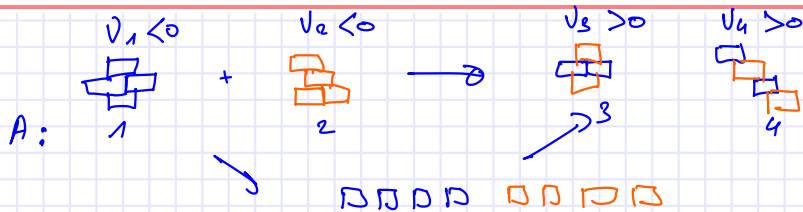
## 6. Enthalpie de formation et réaction, loi de Hess




← éléments purs à  $p$  : 1 atm et  $T$  (souvent  $25^\circ\text{C}$ )

Loi de Hess: le  $\Delta H_{\textcircled{1}}$  pour la réaction  $\textcircled{1}$  est égal à la somme des  $\Delta H_i$  des réactions intermédiaires

version "physique"  $H$  est une fonction d'état



enthalpie de formation de A<sub>1</sub>  $\Delta H_{A_1}$   $\square\square\square\square \rightarrow$    
 dépend de T et p tabulé à "pression normale" 1 atm  $\ominus$

$\Delta H_T^\ominus (X_A)$  enthalpie standard de formation de A  
 à partir des corps purs dans leur forme stable à T

$$\Delta H_{\text{réaction}} = \sum_A \nu_{aA} \Delta H_T^\circ (X_A) \quad \text{réaction à } T$$

$\Delta H_T^\circ$  se trouvent dans des tables

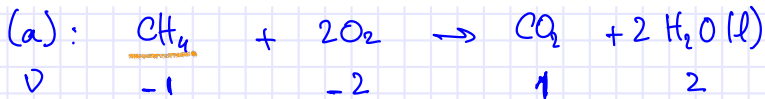
$\nu_{aA}$  : donnent le signe

Exemple : enthalpie de combustion du  $CH_4$  :

Enthalpies standard de formation de certaines substances : en kJ/mol

$CO_2(g) : -393.5$ ;  $H_2O(g) : -241.8$ ;  $H_2O(l) : -285.8$ ;  $CH_4 : -74.9$ ;  
 $O_2(g) : 0$

} à  $25^\circ C$



$$\begin{aligned} \Delta H_{(a)} &= -1(-74,9) - 2(0) + 1(-393,5) + 2(-241,8) \\ &= -890,2 \text{ kJ/mol} \quad \text{reaction exothermique ;} \end{aligned}$$

## 7. Mélanges (de gaz) parfaits [d'abord un mélange de GP puis on extrapole à d'autres mélanges]

gaz parfait en mélange  $r$  espèces  $A$  de 1 à  $r$  □  $v, p, T$

$$p = \sum_A p_A = \sum_A N_A \frac{RT}{V} \quad (\text{loi de Dalton})$$

$$G(T, p, \{N_A\}) \quad dG = -SdT + Vdp + \sum_A \mu_A dN_A = -SdT + \sum_A V dp_A + \sum_A \mu_A dN_A$$

Maxwell en croisant  $dp_A$   $dN_A$  sur la même substance  $A$   $\frac{\partial \mu_A}{\partial p_A} = \frac{\partial V}{\partial N_A}$

$$p_A V = N_A RT \Rightarrow V = \frac{N_A RT}{p_A} \quad \frac{\partial V}{\partial N_A} = \frac{RT}{p_A} = \frac{\partial \mu_A}{\partial p_A} \quad \text{Intégrons cette expression entre } p \text{ et } p_A$$

$$\int_p^{p_A} \frac{RT}{p_A} dp_A = \int_p^{p_A} \frac{\partial \mu_A}{\partial p_A} dp_A = RT \ln \frac{p_A}{p} = \mu_A(p_A, T, \{N_A\}) - \mu_A(p, T, \{N_A\})$$

$$RT \ln \frac{p_A}{p} = RT \ln x_A = \mu_A(p_A, T, \{N_A\}) - \mu_A(p, T, \{N_A\})$$

$\mu_A$  intensive s'adap. taille du système  $\mu_A(p, T, \{\frac{N_A}{N}\}) = \mu_A(p, T, \{x_A\}) = \mu_A(p, T, \{N_A\})$   
 $\mu_A(p, T, \{x_A\})$

Gaz parfait pas d'interactions de potentiels  $\mu_A$  de A ne dépend pas des  $x_i$   $i \neq A$   
 $\mu_A(p, T, \{x_A\})$  est en fait  $\mu_A(p, T, x_A)$

$$RT \ln \frac{p_A}{p} = RT \ln x_A = \mu_A(p_A, T, x_A) - \underbrace{\mu_A(p, T, x_A)}_{\substack{\text{amener le gaz A à la pression } p \\ \mu_A \text{ de A seule à } p, T \mu_A(p, T)}} \quad x_A = 1$$

$$RT \ln x_A = \mu_A(p \cdot x_A, T, x_A) - \mu_A(p, T)$$

$$RT \ln x_A = \mu_A(p, T, x_A) - \mu_A(p, T)$$

$$\mu_A(p, T, x_A) = \mu_A(p, T) + RT \ln x_A$$

pour un GP A en mélange parfait

On définit un mélange parfait (gaz ou liquide) comme un mélange  
 Ad que  $\mu_A(p, T, x_A) = \mu_A(p, T) + RT \ln x_A$

