

Exercice 2 : mélange initial

- a) $\frac{n(N_2)}{1} > \frac{n(H_2)}{3} \Rightarrow H_2$ est le RL b) $\frac{n(Cu)}{1} > \frac{n(Ag^+)}{2} \Rightarrow Ag^+$ est le RL
- c) $\frac{n(alcool)}{3} = \frac{n(MnO_4^-)}{4} \Rightarrow$ mélange stoechiométrique

Exercice 3 : constante d'équilibre

- 1/ a. $K^0 = \frac{a_{AgBr}}{a_{Ag^+} \times a_{Br^-}} = \frac{(c^0)^2}{[Ag^+][Br^-]}$ b. $K^0 = \frac{a_{Ag(CN)_2^-}}{a_{Ag^+} \times (a_{CN^-})^2} = \frac{[Ag(CN)_2^-](c^0)^2}{[Ag^+][CN^-]^2}$
- c. $K^0 = \frac{(a_{Ag^+})^2 \times a_{H_2} \times (a_{H_3O^+})^2}{(a_{Ag})^2 \times (a_{H_3O^+})^2} = \frac{[Ag]^2 (p_{H_2})^2}{[H_3O^+]^2 (p^0)^2}$ d. $K^0 = \frac{a_{H_3O^+} \times a_{HO^-}}{a_{H_2O}} = \frac{[H_3O^+][HO^-]}{(c^0)^2}$

Rq : Toutes les activités concernent l'état d'équilibre

2/ Produit ionique de l'eau

Exercice 4 : calcul des concentrations initiales et sens d'évolution spontanée

1. $[Fe^{3+}]_0 = \frac{n_1(Fe^{3+})}{V_{tot}} = \frac{c_1 V_1}{V_1 + V_2}$ et $[SCN^-]_0 = \frac{n_2(SCN^-)}{V_{tot}} = \frac{c_2 V_2}{V_1 + V_2}$
- AN : $[Fe^{3+}]_0 = \frac{10 \cdot 10^{-2} \times 100}{100 + 100} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ et $[SCN^-]_0 = \frac{2,0 \cdot 10^{-2} \times 100}{100 + 100} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$

2. Il faut comparer la valeur du quotient de réaction dans l'état initial $Q_{r,i}$ à celle qu'il prend à l'équilibre ($Q_{r,eq} = K^0$) :

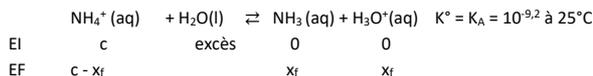
$$Q_{r,i} = \frac{[FeSCN^{2+}]_0 c^0}{[Fe^{3+}]_0 [SCN^-]_0} = \frac{0,10}{0,10 \times 10} = 10$$

$Q_{r,i} < K^0 \Rightarrow$ évolution du système dans le sens direct (formation de $[FeSCN^{2+}]$)

$$3. Q_{r,i} = \frac{0,10}{0,010 \times 0,010} = \frac{10 \cdot 10^{-1}}{1,0 \cdot 10^{-4}} = 1,0 \cdot 10^5$$

$Q_{r,i} > K^0 \Rightarrow$ évolution du système dans le sens inverse (formation de Fe^{3+} et SCN^-)

Exercice 5 : pH d'une solution d'acide faible



Hypothèse : comme $K_A \ll 1$, on suppose $x_f \ll c$ (transformation très peu avancée)

$$K_A = \frac{[NH_3][H_3O^+]}{[NH_4^+]} = \frac{x_f^2}{c - x_f} \approx \frac{x_f^2}{c} \Rightarrow x_f = \sqrt{K_A \times c}$$

AN : $x_f = \sqrt{10^{-9,2} \times 1,0 \cdot 10^{-2}} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$

\Rightarrow on vérifie la pertinence de notre hypothèse : on a bien $x_f \ll c$

$[H_3O^+] = [NH_3] = x_f = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$

$[CH_3COOH] = c - x_f \approx c = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$

2. $pH = -\log [H_3O^+] = 5,6$

Exercice 6 : réaction acido-basique

$$1. K^0 = \frac{[CH_3COOH][C_6H_5COO^-]}{[CH_3COO^-][C_6H_5COOH]} = \frac{[CH_3COOH]_f [C_6H_5COO^-]_f}{[CH_3COO^-]_f [C_6H_5COOH]_f} = \frac{1}{K_{A1} \times K_{A2}}$$

(= $10^{pKa1 - pKa2}$)

AN : $K^0 = 10^{-4,2+4,7} = 10^{0,5} = 3,2$

2. a) Il faut comparer le quotient de réaction dans l'état initial à K^0 :

Les concentrations des 4 espèces sont toutes égales dans l'état initial : $\frac{c_0 V_0}{4V_0} = \frac{c_0}{4}$

$$\Rightarrow Q_{r,i} = \frac{[CH_3COOH][C_6H_5COO^-]}{[CH_3COO^-][C_6H_5COOH]} = 1$$

$\Rightarrow Q_{r,i} < K^0$ donc le système évolue dans le sens direct ($\Rightarrow x_f > 0$)

b) Faire un TA ; $K^0 = \frac{\left(\frac{c_0}{4} + x_f\right)^2}{\left(\frac{c_0}{4} - x_f\right)^2} \Rightarrow \sqrt{K^0} = \frac{\left(\frac{c_0}{4} + x_f\right)}{\left(\frac{c_0}{4} - x_f\right)} \Rightarrow x_f = \frac{\frac{c_0}{4}(\sqrt{K^0} - 1)}{1 + \sqrt{K^0}}$

AN : $x_f = \dots = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$

On en déduit les concentrations dans l'état final :

$[C_6H_5COO^-]_f = [CH_3COOH]_f = \frac{c_0}{4} + x_f = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$

$[C_6H_5COOH]_f = [CH_3COO^-]_f = \frac{c_0}{4} - x_f = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$

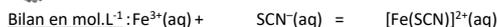
Le taux d'avancement final est : $\tau = \frac{x_f}{x_{max}} = 73\%$ ($\neq 100\%$: transformation limitée)

Exercice 7 : coloré ou pas ?

Il faut déterminer x_f pour calculer la concentration du complexe dans l'état final et la comparer à c.



Méthode calculatoire :



EI 2,0.10⁻³ 1,0.10⁻¹ 0

EF 2,0.10⁻³-x_f 1,0.10⁻¹-x_f x_f

$$K^0 = \frac{[Fe(SCN)]^{2+}}{[Fe^{3+}]_f [SCN^-]_f} = \frac{x_f}{(2,0 \cdot 10^{-3} - x_f)(1,0 \cdot 10^{-1} - x_f)}$$

$\Rightarrow 160x^2 - 17,32x + 0,032 = 0$ polynôme du second degré

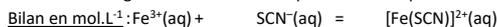
$\Rightarrow x_f = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ (l'autre racine, 0,11 mol.L⁻¹ est impossible car supérieur à x_{max})

$\Rightarrow [Fe(SCN)]^{2+}_f = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} > c \Rightarrow$ la solution est colorée



Méthode utilisant des simplifications :

En supposant la transformation quasi totale (la valeur de K^0 n'est pas très élevée mais on utilise un large excès de $SCN^- \Rightarrow$ déplacement d'équilibre en faveur des produits)



EI 2,0.10⁻³ 1,0.10⁻¹ 0

EF 2,0.10⁻³-x_{max} 1,0.10⁻¹-x_{max} x_{max}

(= supposée = 0 = 0,098 2,0.10⁻³ quasi-totale)

Vérifions l'hypothèse : $[Fe^{3+}]_f = \frac{[Fe(SCN)]^{2+}_f}{K^0 [SCN^-]_f}$

AN : $[Fe^{3+}]_f = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1} \ll [Fe^{3+}]_i$ (un peu limite ...)

Exercice 8 : totalement dissout ou pas ?

1. $n_0 = \frac{m}{M} = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$



EI n₀ 0 0

EF si équilibre n₀ - ξ_{eq} ξ_{eq} 2ξ_{eq}

$$K = [Fe^{2+}]_{eq} [Cl^-]_{eq}^2 = \frac{\xi_{eq}}{V} \times \left(\frac{2\xi_{eq}}{V}\right)^2 = \frac{4\xi_{eq}^3}{V^3} \Rightarrow \xi_{eq} = \sqrt[3]{\frac{V^3 K}{4}}$$

AN : $\xi_{eq} = \sqrt[3]{\frac{0,100^3 \times 524}{4}} = 0,51 \text{ mol}$

Or $\xi_{max} = n_0 = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$ donc $\xi_{eq} > \xi_{max}$ ce qui est impossible ! **L'état final n'est donc pas un état d'équilibre**, en réalité : $\xi_f = \xi_{max}$

3. $n(FeCl_2)_f = 0 \text{ mol}$ (rupture d'équilibre)
 $n(Fe^{2+})_f = 3,94 \text{ mmol}$ $n(Cl^-)_f = 7,88 \text{ mmol}$

Exercice 9 : précipite ou pas ?

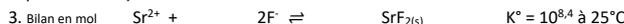
1. Attention à la dilution : $V_{tot} = V_1 + V_2 \approx V_1 = 1,0 \text{ L}$

$[F^-]_i = c_1 V_1 / V_{tot} \approx c_1 = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$

et $[Sr^{2+}]_i = c_2 V_2 / V_{tot} \approx c_2 V_2 / V_1 = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$

2. $Q_{r,i} = \frac{1}{[Sr^{2+}]_i [F^-]_i^2} = 10^8 < K \Rightarrow$ évolution dans le sens direct

\Rightarrow l'état final est donc un état d'équilibre (coexistence de toutes les espèces), on peut utiliser K^0 pour trouver x_f



EI 1,0.10⁻⁴ mol 1,0.10⁻² mol 0

EF 1,0.10⁻⁴ - ξ_f 1,0.10⁻² - 2ξ_f ξ_f

En divisant par le volume total ($V_{tot} \approx 1L$) : $[Sr^{2+}]_f = [Sr^{2+}]_i - x_f$ $[F^-]_f = [F^-]_i - 2x_{eq}$

$\Rightarrow K^0 = \frac{1}{[Sr^{2+}]_f [F^-]_f^2} = \frac{1}{(1,0 \cdot 10^{-4} - x)(1,0 \cdot 10^{-2} - 2x)^2} \Rightarrow$ polynôme du 3^{ème} degré

$\Rightarrow x_f = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$ (Rq : transformation quasi-totale, prévisible avec la valeur de K^0)

$\Rightarrow [F^-]_f \approx 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$; $[Sr^{2+}]_f$ quasi-nulle, on détermine sa valeur précise à partir de

$K^0 : [Sr^{2+}]_f = \frac{1}{K^0 [F^-]_f^2} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$

AUTRE METHODE :

si on suppose dès le départ que la transformation est **quasi-totale** (car $K^{\circ} \gg 1$)

=> $\xi_f \approx \xi_{\max} \Rightarrow$ recherche du RL => $\xi_{\max} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$

=> on en déduit la composition finale : $n(\text{SrF}_2)_f = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$

$$[\text{F}]_f \approx 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1} \text{ et } [\text{Sr}^{2+}]_f = \frac{1}{K[\text{F}]_f^{-2}} = 4,10 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1} \ll [\text{Sr}^{2+}]_i \text{ donc hypothèse de la}$$

transformation quasi-totale vérifiée)

$$4. [\text{F}]_i = c_1 V_1 / V_{\text{tot}} \approx c_1 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} \text{ et } [\text{Sr}^{2+}]_i = c_2 V_2 / V_{\text{tot}} \approx c_2 V_2 / V_1 = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$$

$$Q_{r,i} = \frac{1}{[\text{Sr}^{2+}]_i [\text{F}]_i^2} = 10^{10} > K \Rightarrow \text{évolution dans le sens inverse ... mais pas de solide dans}$$

l'état initial => le système n'évolue pas, la composition reste inchangée ;

l'état final n'est pas un état d'équilibre

Exercice 10 : équilibre gazeux



Méthode dans le cas d'un mélange gazeux : prévoir une colonne supplémentaire pour faire le bilan de la **quantité de matière de gaz totale** dans chaque état (liée à la **pression totale**)

| bilan en mol | $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$ | $=$ | $2 \text{NO}_2(\text{g})$ | $(n_{\text{gaz}})_{\text{total}}$ |
|--------------|----------------------------------|-----|---------------------------|-----------------------------------|
| EI | 0,0125 mol | | 0 | 0,0125 mol |
| EF | $0,0125 - \xi_f$ | | $2 \xi_f$ | $0,0125 + \xi_f$ (mol) |

(= état d'équilibre)

1. D'après la loi des gaz parfaits : $pV = n_{\text{total}} RT$ avec $p =$ pression finale totale = 0,39 bar

$$\Rightarrow \xi_f = \frac{pV}{RT} - 0,0125 = \frac{0,39 \times 10^5 \times 10^{-3}}{8,314 \times 298} - 0,0125 = 3,2 \text{ mmol}$$

2. Calculons les pressions partielles des gaz à l'équilibre (en bar) :

$$p(\text{N}_2\text{O}_4) = \frac{n(\text{N}_2\text{O}_4)}{n_{\text{total}}} p = \frac{0,0125 - \xi_f}{0,0125 + \xi_f} \times 0,39 = 0,23 \text{ bar (ou utiliser } p(\text{N}_2\text{O}_4)V = n(\text{N}_2\text{O}_4)RT)$$

$$p(\text{NO}_2) = \frac{n(\text{NO}_2)}{n_{\text{total}}} p = \frac{2\xi_f}{0,0125 + \xi_f} \times 0,39 = 0,16 \text{ bar (ou } p(\text{NO}_2) = p - p(\text{N}_2\text{O}_4) \text{)}$$

$$K^{\circ} = \frac{(p_{\text{NO}_2}/p^{\circ})^2}{p_{\text{N}_2\text{O}_4}/p^{\circ}} \text{ avec } p^{\circ} = 1 \text{ bar} \Rightarrow K^{\circ} = \frac{0,16^2}{0,23} = 0,11$$

On en déduit K° :

Exercice 11 : équilibre avec des gaz, à pression constante

| bilan en mol | $\text{C}(\text{s})$ | $+$ | $\text{CO}_2(\text{g})$ | $=$ | $2 \text{CO}(\text{g})$ | $(n_{\text{gaz}})_{\text{total}}$ |
|--------------|----------------------|-----|-------------------------|-----|-------------------------|-----------------------------------|
| EI | excès | | 0,050 | | 0,010 | 0,060 |
| EF | excès | | $0,050 - \xi_f$ | | $0,010 + 2 \xi_f$ | $0,060 + \xi_f$ |

(= état d'équilibre car les 3 espèces coexistent)

1. Il faut comparer le quotient de réaction dans l'état initial à K° .

$$Q_{r,i} = \frac{(p_{\text{CO}}/p^{\circ})^2}{(p_{\text{CO}_2}/p^{\circ})}$$
 ; On calcule les pressions partielles des gaz dans l'état initial :

$$(p_{\text{CO}}) = \frac{(n_{\text{CO}})}{(n_{\text{gaz total}})} \times p = \frac{0,010}{0,060} \times 1,0 = 0,17 \text{ bar et } (p_{\text{CO}_2}) = \frac{(n_{\text{CO}_2})}{(n_{\text{gaz total}})} \times p = \frac{0,050}{0,060} \times 1,0 = 0,83 \text{ bar}$$

$$\Rightarrow Q_{r,i} = \frac{(0,17/1)^2}{(0,83/1)} = 0,03 < K^{\circ} \Rightarrow \text{évolution dans le sens direct (consommation de } \text{CO}_2)$$

2. On utilise un **excès** de carbone solide => il en reste nécessairement dans l'état final. Dans l'état final, il y a donc **coexistence de toutes les espèces** apparaissant dans l'équation : l'état final est un état d'équilibre.

$$3. \text{ Il faut déterminer } \xi_f \text{ à partir de } K^{\circ} : K^{\circ} = \frac{(p_{\text{CO}}/p^{\circ})^2}{p_{\text{CO}_2}/p^{\circ}}$$

On exprime les pressions partielles des gaz en fonction de ξ_f :

$$p(\text{CO}) = \frac{0,010 + 2\xi_f}{0,060 + \xi_f} \times p \text{ et } p(\text{CO}_2) = \frac{0,050 - \xi_f}{0,060 + \xi_f} \times p \text{ avec } p = 1,0 \text{ bar}$$

$$\Rightarrow K^{\circ} = \frac{(0,010 + 2\xi_f)^2}{(0,060 + \xi_f) \times \frac{0,050 - \xi_f}{0,060 + \xi_f}} = \frac{(0,010 + 2\xi_f)^2}{(0,060 + \xi_f)(0,050 - \xi_f)} \Rightarrow \dots \Rightarrow 5,70 \times \xi_f^2 + 0,057 \xi_f - 5,10 \cdot 10^{-3} = 0$$

=> $\xi_f = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$; l'autre solution, -0,035 mol, est physiquement impossible (évolution dans le sens direct)

Composition du mélange gazeux : $n(\text{CO})_f = 0,06 \text{ mol}$ et $n(\text{CO}_2)_f = 0,025 \text{ mol}$

Pression partielle des gaz : $n(\text{gaz})_{\text{total}} = 0,06 + 0,025 = 0,085 \text{ mol}$

Fraction molaire des gaz : $x(\text{CO}) = n(\text{CO}) / n(\text{gaz})_{\text{total}} = 0,71$ et $x(\text{CO}_2) = 0,29$

d'où $p(\text{CO}) = x(\text{CO}) p = 0,71 \text{ bar}$ et $p(\text{CO}_2) = 0,29 \text{ bar}$

4. Pour que l'état final soit un état d'équilibre (pour lequel les pressions partielles sont liées par K°), il faut que du solide soit encore présent dans l'état final.

Si on note n la quantité de carbone initialement introduite, il faut donc que $n - \xi \geq 0$, soit donc $n \geq \xi$: il faut en introduire **plus de $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$** .

Exercice 12 : solubilité de l'acide benzoïque dans l'eau

Imaginons une solution saturée : elle est obtenue après dissolution de la quantité de matière maximale d'acide benzoïque que l'on peut dissoudre par L de solvant (le reste est sous forme d'excès solide) ;

Bilan en mol (pour $V = 1 \text{ L}$ de solution saturée)

| | $\text{PhCOOH}(\text{aq})$ | $=$ | $\text{PhCOOH}(\text{aq})$ |
|----|----------------------------|-----|----------------------------|
| EI | n_0 (excès) | | 0 |
| EF | $n_0 - \xi_f$ | | ξ_f |

(=état d'équilibre car les 2 espèces coexistent, il reste du solide en excès => on peut utiliser K°)

$$K^{\circ} = \frac{[\text{PhCOOH}]_f}{c^{\circ}} = \frac{\xi_f}{V \times c^{\circ}} \Rightarrow \xi_f = K^{\circ} \times V \times c^{\circ} = 0,028 \times 1 \times 1 = 0,028 \text{ mol}$$

Comme la quantité de solide dissoute est égale à ξ_f , on en déduit la masse maximale d'acide benzoïque dissoute :

$$m = \xi_f \times M = 0,028 \times 122 = 3,4 \text{ g}$$

Exercice 13 : détermination conductimétrique du pKa

L'acide fluorhydrique réagit avec l'eau selon la réaction acido-basique :

| | $\text{HF}(\text{aq})$ | $+$ | $\text{H}_2\text{O}(\ell)$ | \rightleftharpoons | $\text{F}^{-}(\text{aq})$ | $+$ | $\text{H}_3\text{O}^{+}(\text{aq})$ | |
|------|------------------------|-----|----------------------------|----------------------|---------------------------|-----|-------------------------------------|---------------------|
| E.I. | 0,010 | | - | | 0 | | 0 | mol.L ⁻¹ |
| E.F. | $0,010 - x$ | | - | | x | | x | |

À l'équilibre, la conductivité de la solution vaut : $\sigma = \lambda_{\text{F}^{-}} [\text{F}^{-}] + \lambda_{\text{H}_3\text{O}^{+}} [\text{H}_3\text{O}^{+}] = (\lambda_{\text{F}^{-}} + \lambda_{\text{H}_3\text{O}^{+}}) x$

On peut donc calculer l'avancement à l'équilibre (ATTENTION aux unités) :

$$\chi = \frac{\sigma}{\lambda_{\text{F}^{-}} + \lambda_{\text{H}_3\text{O}^{+}}} \text{ A.N. } x = \frac{92 \cdot 10^{-3}}{(55,4 + 349,85) \cdot 10^{-4}} = 2,27 \text{ mol.m}^{-3} = 2,27 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$$

$$\text{Or, par définition, } K_A = \frac{[\text{F}^{-}][\text{H}_3\text{O}^{+}]}{[\text{HF}]} \text{ donc } K_A = \frac{x^2}{0,010 - x} \text{ A.N. } K_A = 6,67 \cdot 10^{-4} \Rightarrow pK_A = 3,18$$

Exercice 14 : optimisation d'un procédé chimique

1. Influence de T et p.

a) $Q_r = K^{\circ}_{800} = 0,03$

Le quotient de réaction dans l'EI correspond à la valeur précédente, c'est-à-dire 0,03. Cette valeur est inférieure à la nouvelle constante d'équilibre car $K^{\circ}_{800} < K^{\circ}_{1200}$ On a donc $Q_{r,i} < K^{\circ}_{1200} \Rightarrow$ le système évolue spontanément dans le **sens direct** (on forme davantage de H_2).

$$c) Q_r = \frac{p(\text{CO}) p(\text{H}_2)^3}{p(\text{CH}_4) p(\text{H}_2\text{O}) (p^{\circ})^2} = \frac{x(\text{CO}) x(\text{H}_2)^3}{x(\text{CH}_4) x(\text{H}_2\text{O})} \times \frac{p^2}{(p^{\circ})^2}$$

Si p augmente, Q_r augmente aussi (fractions molaires et p° sont constantes)

d) L'état initial correspond à l'état d'équilibre précédent : $Q_{r,i} = K^{\circ}_{1200} = 760$

En diminuant la pression, on augmente Q_r donc Q_r devient supérieur à K°_{1200} :

$Q_r > K^{\circ}_{1200} \Rightarrow$ évolution dans le **sens inverse** (consommation de H_2)

e) Pour **optimiser le rendement** (= obtenir un maximum de H_2), il faut donc travailler à haute température et basse pression.

2. Influence de la composition du mélange à T, p constants

$$Q_r = \frac{x(\text{CO}) x(\text{H}_2)^3}{x(\text{CH}_4) x(\text{H}_2\text{O})} \times \frac{p^2}{(p^{\circ})^2} = \frac{n(\text{CO}) n(\text{H}_2)^3}{n(\text{CH}_4) n(\text{H}_2\text{O})} \times \frac{1}{(n_{\text{tot}})^2} \times \frac{p^2}{(p^{\circ})^2}$$

a) Si on ajoute N_2 , seule n_{tot} est modifiée : n_{tot} augmente donc Q_r diminue.

On a alors $Q_r < K^{\circ} \Rightarrow$ déplacement de l'équilibre dans le **sens direct**

b) Si on ajoute CH_4 , on augmente $n(\text{CH}_4)$ et n_{tot} ; ces grandeurs sont toutes les deux au dénominateur donc leur augmentation fait diminuer Q_r : $Q_r < K^{\circ} \Rightarrow$ déplacement de l'équilibre dans le **sens direct**

Remarque : la conclusion n'est pas évidente si on ajoute CO par exemple (modification du numérateur et du dénominateur, dans le même sens) ; une étude mathématique plus poussée serait alors nécessaire