



Chapitre 4 : Comment prévoir la quantité de matière lors d'une transformation chimique ?

I. Le tableau d'avancement, un outil pour le chimiste.

1. Le tableau d'avancement.

L'avancement de la réaction sera noté x , c'est un nombre exprimé en moles.

Pour étudier une réaction, on va se servir d'un tableau d'avancement qui va se présenter ainsi :

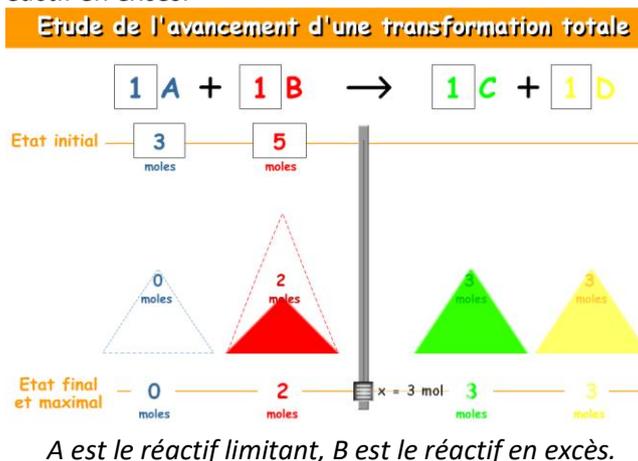
| Equation chimique de la réaction | | a A | + | b B | → | c C | + | d D |
|----------------------------------|------------|----------------|---|----------------|---|----------------|---|----------------|
| Etat du système | Avancement | n(A) | | n(B) | | n(C) | | n(D) |
| Initial | $x = 0$ | $n(A)_i$ | | $n(B)_i$ | | $n(C)_i$ | | $n(D)_i$ |
| En cours | x | $n(A)_i - a x$ | | $n(B)_i - b x$ | | $n(C)_i + c x$ | | $n(D)_i + d x$ |

Exemple : Tableau d'avancement avec les quantités initiales des réactifs $n_0(I_2) = 1,0$ mmol et $n_0(S_2O_3^{2-}) = 4,0$ mmol (doc. **B**).

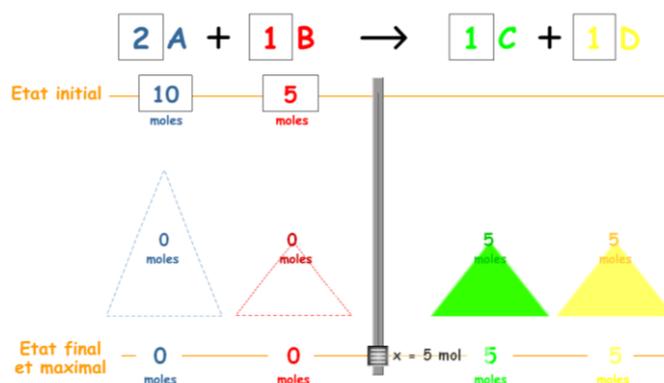
| Équation de la réaction | | $1 I_2(aq) + 2 S_2O_3^{2-}(aq) \rightarrow 2 I^-(aq) + 1 S_4O_6^{2-}(aq)$ | | | |
|-------------------------|-------------------|---|------------------|------------|------------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (en mmol) | | | |
| | | $n(I_2)$ | $n(S_2O_3^{2-})$ | $n(I^-)$ | $n(S_4O_6^{2-})$ |
| État initial | $x = 0$ | 1,0 | 4,0 | 0 | 0 |
| État intermédiaire | $0 < x < x_f$ | $1,0 - 1x$ | $4,0 - 2x$ | $0 + 2x$ | $0 + 1x$ |
| État final | $x = x_f$ | $1,0 - 1x_f$ | $4,0 - 2x_f$ | $0 + 2x_f$ | $0 + 1x_f$ |

2. Vocabulaire sur le tableau d'avancement.

Le **réactif limitant** est le réactif qui va disparaître totalement à la fin de la réaction. L'autre réactif, celui qui restera à la fin est appelé réactif en excès.



On dit que l'on a introduit les réactifs en **mélange stœchiométrique** si à la fin de la transformation, **les réactifs ont tous disparu entièrement**. Ils sont donc tous réactifs limitant.



A et B sont dans les proportions stœchiométriques ; il y a deux fois plus de A que de B.

L'**avancement maximal** est la valeur de l'avancement x atteint lorsque la transformation est terminée. Sa valeur est déterminée en corrélation avec le réactif limitant puisque c'est quand ce dernier s'épuise que la réaction se termine.

Cet avancement maximal fixe l'état final, c'est-à-dire les quantités de matière des réactifs restant et des produits formés.

II. Comment prévoir l'évolution d'une transformation chimique ?

1. Utilisation du tableau d'avancement.

Un tableau d'avancement est toujours de la forme :

| | Avancement | 2 A | + 1 B | → | 1 C | + 2 D |
|--------------------|------------|----------------------|---------------------|---|------------|-------------|
| État initial | 0 | $n_0(A)$ | $n_0(B)$ | | 0 | 0 |
| État intermédiaire | x | $n_0(A) - 2x$ | $n_0(B) - x$ | | x | $2x$ |
| État final | x_{\max} | $n_0(A) - 2x_{\max}$ | $n_0(B) - x_{\max}$ | | x_{\max} | $2x_{\max}$ |

Celui des deux réactifs (A et B) qui s'épuise le premier est dit réactif limitant. Pour identifier le réactif dont il s'agit, il faut comparer les deux valeurs $x_{\max}(A)$ et $x_{\max}(B)$ qui vérifient les équations :

$$n_0(A) - 2x_{\max}(A) = 0 \text{ et } n_0(B) - x_{\max}(B) = 0.$$

On ne retient que la plus petite de ces deux valeurs pour compléter la dernière ligne du tableau, avec les valeurs numériques correspondant au système chimique étudié.

2. Exemple.

Quelle quantité de précipité va-t-on obtenir si on mélange 15 mmol de sulfate de cuivre à 20 mmol de soude.

Le tableau au départ est le suivant :

| | | Cu^{2+} | + 2 OH^- | → | $\text{Cu}(\text{OH})_2$ |
|-----------|-------|------------------|-------------------|---|--------------------------|
| El (mmol) | $X=0$ | $n1 = 15$ | $n2=20$ | | |
| Ex | | | | | |
| E max | | | | | |

On complète le tableau pour l'état intermédiaire :

| | | Cu^{2+} | + 2 OH^- | → | $\text{Cu}(\text{OH})_2$ |
|-----------|-------|------------------|-------------------|---|--------------------------|
| El (mmol) | $X=0$ | 15 | 20 | | |
| Ex | X | $15 - x$ | $20 - 2x$ | | x |
| E max | | | | | |

On complète l'état maximal en calculant la valeur possible de x_{\max} : soit 10 mmol, soit 15 mmol (on prend toujours la valeur la plus petite qui va être atteinte en premier). :

| | | | | | |
|--------------|-----------------|------------------|---------------------|---|---------------------|
| | | Cu ²⁺ | + 2 OH ⁻ | → | Cu(OH) ₂ |
| El (mmol) | X = 0 | 15 | 20 | | |
| Ex | X | 15 - x | 20 - 2 x | | x |
| E max | X = xmax | 5 | 0 | | 10 |

Méthodes

- On écrit l'équation à résoudre : $3 - 4x = 0$.
- On ajoute $4x$ de chaque côté de l'égalité :

$$\underbrace{3 - 4x + 4x}_{=0} = 0 + 4x$$

Soit : $3 = 4x$

- On divise chaque membre de l'égalité par le coefficient 4 qui est placé devant x :

$$\frac{3}{4} = \frac{4x}{4}$$

$$\frac{3}{4} = \frac{\cancel{4}x}{\cancel{4}}$$

Finalement : $x = \frac{3}{4}$

II. Avancement maximale pour prévoir l'état final d'un système chimique.

Aluminothermie

On considère le tableau d'avancement suivant :

| Équation de la réaction | | $2 \text{Al}(s) + \text{Fe}_2\text{O}_3(s) \rightarrow 2 \text{Fe}(s) + \text{Al}_2\text{O}_3(s)$ | | | |
|-------------------------|------------------|---|----------------------------|----------------|----------------------------|
| État du système | Avancement (mol) | Quantités de matière (mol) | | | |
| | | $n(\text{Al})$ | $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ | $n(\text{Fe})$ | $n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ |
| État initial | $x = 0$ | 4,0 | 2,0 | 0 | 0 |
| État intermédiaire | x | $4,0 - 2x$ | $2,0 - x$ | $2x$ | x |
| État final | x_f | $4,0 - 2x_f$ | $2,0 - x_f$ | $2x_f$ | x_f |



> La transformation étudiée est utilisée pour le soudage des rails.

- Déterminer quantitativement l'état final du système chimique étudié sachant que la transformation est totale.

La transformation étant totale, $x_f = x_{\max}$.

Hypothèse 1 : si Al était le réactif limitant, alors $4,0 - 2x_{\max} = 0$.

L'avancement maximal serait $x_{\max} = 2,0$ mol.

Les quantités finales des réactifs s'annulent pour la même valeur de l'avancement maximal $x_{\max} = 2,0$ mol.

Bilan des quantités de matière dans l'état final :

$$n_f(\text{Al}) = 4,0 - 2x_{\max} = 0 \text{ mol}$$

$$n_f(\text{Fe}) = 2x_{\max} = 4,0 \text{ mol}$$

Hypothèse 2 : si Fe₂O₃ était le réactif limitant, alors $2,0 - x_{\max} = 0$.

L'avancement maximal serait $x_{\max} = 2,0$ mol.

$$n_f(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 2,0 - x_{\max} = 0 \text{ mol}$$

$$n_f(\text{Al}_2\text{O}_3) = x_{\max} = 2,0 \text{ mol}$$

L'arbre de Diane

On immerge un fil de cuivre $\text{Cu}_{(s)}$ dans $V = 50,0 \text{ mL}$ d'une solution de nitrate d'argent ($\text{Ag}^+_{(aq)} + \text{NO}_3^-_{(aq)}$). Les quantités de matière apportées d'ions argent et de cuivre sont respectivement $n = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$ et $n' = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$. Le fil de cuivre se recouvre de paillettes métalliques et la solution bleuit.

Données • Couples oxydant/réducteur : $\text{Cu}^{2+}_{(aq)}/\text{Cu}_{(s)}$ et $\text{Ag}^+_{(aq)}/\text{Ag}_{(s)}$

• Les ions $\text{Cu}^{2+}_{(aq)}$ sont bleus en solution, les ions $\text{Ag}^+_{(aq)}$ incolores.

- Quel métal se forme ? À quels ions doit-on la couleur bleue ? Écrire les demi-équations des couples en présence et l'équation de la réaction.
- Déterminer le réactif limitant et la valeur de l'avancement maximal x_{max} .
- Calculer la concentration finale c_1 en ions $\text{Cu}^{2+}_{(aq)}$.



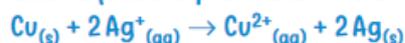
- Les paillettes sont de l'argent issu de la réduction des ions Ag^+ .

La demi-équation correspondante est : $\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$.

La solution bleuit du fait de la formation d'ions Cu^{2+} par oxydation de Cu .

La demi-équation est : $\text{Cu} = \text{Cu}^{2+} + 2e^-$.

On combine les deux demi-équations pour obtenir le bilan :



b

| Avancement | Quantité de matière de... | $2\text{Ag}^+_{(aq)} + \text{Cu}_{(s)} \rightarrow 2\text{Ag}_{(s)} + \text{Cu}^{2+}_{(aq)}$ | | | |
|------------------|-------------------------------|--|-----------------------|-------------------|-------------------------|
| | | $\text{Ag}^+_{(aq)}$ | $\text{Cu}_{(s)}$ | $\text{Ag}_{(s)}$ | $\text{Cu}^{2+}_{(aq)}$ |
| 0 | ... apportée à l'état initial | n | n' | 0 | 0 |
| x | ... en cours de réaction | $n - 2x$ | $n' - x$ | $2x$ | x |
| x_{max} | ... présente à l'état final | $n - 2x_{\text{max}}$ | $n' - x_{\text{max}}$ | $2x_{\text{max}}$ | x_{max} |

Si Ag^+ est limitant, $n - 2x_{\text{max}} = 0$, soit $x_{\text{max}} = \frac{n}{2}$ et $x_{\text{max}} = 5,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

Si Cu est limitant, $n' - x_{\text{max}} = 0$, soit $x_{\text{max}} = n'$ et $x_{\text{max}} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$.

La plus petite de ces valeurs de x_{max} ne peut être dépassée,

donc $x_{\text{max}} = 5,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$: c'est Ag^+ qui est limitant.

c

La quantité de matière finale d'ions cuivre est x_{max} .

Leur concentration finale est : $c_1 = \frac{x_{\text{max}}}{V}$ soit $c_1 = \frac{5,0 \times 10^{-3}}{50,0 \times 10^{-3}} = 0,10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.