

Avancement et tableau d'avancement

Décrire l'évolution d'une transformation, c'est **compter combien de fois** la réaction s'est produite : c'est l'**avancement**.

1. Sur un exemple simple : assemblage de boules

On assemble des boules **noires** (N) et **blanches** (B) selon la « réaction » :



Chaque assemblage consomme **1 boule noire** et **2 boules blanches**. On part de $n_i(N) = 12$ noires et $n_i(B) = 16$ blanches, et on note x le **nombre d'assemblages** (de « réactions ») réalisés. On peut d'abord **compter réaction par réaction**, en remplissant le tableau ligne à ligne jusqu'à ce que la transformation ne puisse plus se poursuivre :

État	réactions x	(N)	+ 2 (B)	$\rightarrow (NB_2)$
Initial	0	12	16	0
	1	11	14	1
	2	10	12	2
	3	9	10	3
En cours	4	8	8	4
	5	7	6	5
	6	6	4	6
	7	5	2	7
final	8	4	0	8

dans cette case : nombre de boules
blanches (colonne $\circ$) présentes **après**
 $x = 5$ **réactions** (ligne $x = 5$)

La dernière ligne donne l'**état final** : l'une des couleurs est épuisée et la transformation ne peut plus se poursuivre.

L'*avancement maximal* est donc $x_{\max} = 8$.

Plutôt que tout énumérer, on **généralise** : après x réactions, il reste $12 - x$ noires (1 consommée à chaque fois) et $16 - 2x$ blanches (2 à chaque fois), et il s'est formé x objets NB_2 .

		nombre de boules blanches après x réactions		
		nombre de boules noires après x réactions		
État	x	(N)	+ 2 (B)	$\rightarrow$ (NB ₂)
Initial	0	$n_i(N)$	$n_i(B)$	0
En cours	x	$n_i(N) - x$	$n_i(B) - 2x$	x
Final	$x_{\max}$	$n_i(N) - x_{\max}$	$n_i(B) - 2x_{\max}$	$x_{\max}$

↑ boules **noires** en fin de transformation
 ↑ boules **blanches** en fin de transformation

La transformation s'arrête dès qu'un réactif est **épuisé** :

- les noires s'épuisent si $12 - x = 0$, soit $x = 12$;
- les blanches s'épuisent si $16 - 2x = 0$, soit $x = 8$.

C'est le **plus petit** qui l'emporte : $x_{\max} = 8$. Les **blanches** sont donc le **réactif limitant**. À l'état final, il reste $12 - 8 = 4$ noires, plus aucune blanche, et il s'est formé 8 objets NB₂.

2. En chimie

En chimie, le nombre d'entités est colossal : on les compte en **moles** (des paquets de $N_A = 6,0 \times 10^{23}$ entités). L'**avancement** x , exprimé en **mol**, est le nombre de fois — en moles — que la réaction s'est produite. On le suit dans un **tableau d'avancement**, exactement comme pour les boules.

Avancement et réactif limitant

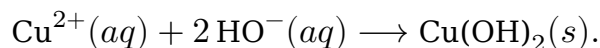
L'**avancement** x est le nombre de réactions qui se sont produites dans le système (en mol).

Le **réactif limitant** est celui qui s'épuise le premier.

L'**avancement maximal** $x_{\max}$ est la valeur de l'avancement atteinte lorsque la quantité de réactif limitant est nulle.

Un **mélange stoechiométrique** est réalisé quand les réactifs sont introduits dans le **rapport des coefficients** de l'équation : ils s'épuisent alors **tous en même temps** (aucun n'est en excès).

Exemple. On mélange $V_1 = 10 \text{ mL}$ d'une solution de cuivre(II) Cu^{2+} à $c_1 = 1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et $V_2 = 10 \text{ mL}$ de soude ($\text{Na}^+ + \text{HO}^-$) à $c_2 = 1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Il se forme un précipité bleu d'hydroxyde de cuivre :



Quantités initiales : $n_1 = c_1 \cdot V_1 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$ de Cu^{2+} et $n_2 = c_2 \cdot V_2 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$ de HO^- .

État	avancement	Cu^{2+}	$+ 2 \text{HO}^-$	$\rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2$
Initial	0	n_1	n_2	0
En cours	x	$n_1 - x$	$n_2 - 2x$	x
Final	x_{max}	$n_1 - x_{\text{max}}$	$n_2 - 2x_{\text{max}}$	x_{max}

Recherche de x_{max} :

- Cu^{2+} s'épuise si $n_1 - x = 0$, soit $x = 1,0 \times 10^{-3}$;
- HO^- s'épuise si $n_2 - 2x = 0$, soit $x = 0,5 \times 10^{-3}$.

$0,5 < 1$ donc $x_{\text{max}} = 5,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$ et HO^- est le **réactif limitant**.

Dans l'état final, il reste $5,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$ de Cu^{2+} , plus de HO^- , et il s'est formé $5,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$ de $\text{Cu}(\text{OH})_2$.

Cap bac — l'indispensable

Remplir un tableau d'avancement

1. Écrire l'**équation équilibrée** de la réaction.
2. Calculer les **quantités initiales** ($n = c \cdot V$; $n = m/M$; ...) et remplir la première ligne (état initial).
3. Exprimer chaque quantité à l'avancement x :
 - $n_{\text{initial}} - (\text{coefficient}) \times x$ pour un réactif ;
 - $(\text{coefficient}) \times x$ pour un produit dont la quantité initiale est nulle
4. Trouver x_{max} : pour **chaque réactif**, résoudre « quantité = 0 » ; le **plus petit** x obtenu est x_{max} (le réactif correspondant est limitant).
5. Injecter x_{max} pour obtenir la composition de l'**état final**.

Pièges fréquents

- L'avancement x est **commun** à toute la réaction ; ce sont les **coefficients** qui le multiplient (un réactif de coefficient 2 est consommé en $2x$).
- x_{max} est le **plus petit** des « x d'épuisement », pas le plus grand.
- Le réactif **en excès** n'est pas entièrement consommé : il en reste à l'état final.

3. Auto-test

Répondez avant de regarder les corrigés.

1. Avec la réaction $N + 2B \rightarrow NB_2$, on part de 10 noires et 30 blanches. Quel est le réactif limitant ? Que vaut $x_{\max}$?
2. Pour $Cu^{2+} + 2HO^- \rightarrow Cu(OH)_2$, on mélange $2,0 \times 10^{-3}$ mol de Cu^{2+} et $2,0 \times 10^{-3}$ mol de HO^- . Déterminer $x_{\max}$, le réactif limitant et la **composition de l'état final**.
3. Pour la **même réaction**, on dispose de $2,0 \times 10^{-3}$ mol de Cu^{2+} . Quelle quantité de HO^- faut-il introduire pour un **mélange en proportions stoechiométriques** ? Que vaut alors $x_{\max}$?
4. À l'état final d'une transformation **totale**, que reste-t-il du réactif limitant ?

Corrigés

1. Noires épuisées à $x = 10$; blanches épuisées à $30 - 2x = 0$, soit $x = 15$. Le plus petit gagne : $x_{\max} = 10$, **réactif limitant : les noires** (il reste $30 - 20 = 10$ blanches).
2. Cu^{2+} épuisé à $x = 2,0 \times 10^{-3}$; HO^- épuisé à $2x = 2,0 \times 10^{-3}$, soit $x = 1,0 \times 10^{-3}$. Donc $x_{\max} = 1,0 \times 10^{-3}$ mol, **réactif limitant : HO^-** . À l'état final, il reste $1,0 \times 10^{-3}$ mol de Cu^{2+} , plus de HO^- , et il s'est formé $1,0 \times 10^{-3}$ mol de $Cu(OH)_2$.
3. Les quantités doivent être dans le rapport des coefficients : $\frac{n(HO^-)}{2} = \frac{n(Cu^{2+})}{1}$, soit $n(HO^-) = 2n(Cu^{2+}) = 4,0 \times 10^{-3}$ mol. Les deux réactifs s'épuisent alors **ensemble** : $x_{\max} = n(Cu^{2+}) = 2,0 \times 10^{-3}$ mol (aucun réactif en excès).
4. **Rien** : par définition, le réactif limitant est **entièrement consommé** ($n = 0$).