

RÉALISER LE BILAN DE MATIÈRE D'UNE TRANSFORMATION CHIMIQUE À L'AIDE DE L'AVANCEMENT DE RÉACTION

Ce document vise à compléter la démarche de modélisation d'une transformation chimique présentée dans la ressource intitulée « Modéliser, au niveau macroscopique, une transformation chimique par une réaction chimique ». Il aborde la réalisation d'un bilan de matière quantitatif à l'échelle macroscopique grâce à l'avancement de réaction.

L'introduction du tableau d'avancement en classe de première n'est pas nouvelle. Aussi, ce document propose quelques pistes pour favoriser l'appropriation de la notion d'avancement par les élèves, dégager quelques enjeux de formation, et éviter que l'utilisation de ce tableau ne se limite à une procédure méthodique (algorithmique) de remplissage, parfois dépourvue de sens.

Introduire l'avancement de réaction

Un des enjeux liés à l'avancement de réaction est de développer la démarche du bilan de matière. L'utilisation de situations issues de la vie quotidienne peut aider à introduire cette démarche. Les situations ne manquent pas : préparation d'un sandwich à partir de paquet de pain de mie, de tranches de fromage et de tomate, fabrication d'une paire de lunettes à partir d'un lot de verres et de montures, etc.

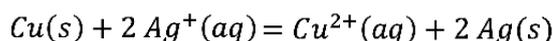
Sur l'exemple d'une usine fabriquant des vélos, les élèves pourraient déterminer, à partir du stock initial et du nombre de roues restantes, le nombre de vélos fabriqués et de châssis restants, en utilisant leurs propres raisonnements.

Un des obstacles majeurs autour de la notion d'avancement réside dans le passage de raisonnements construits au moyen de quantités discrètes à des formulations plus générales, mettant en jeu des relations littérales utilisant la notion d'avancement de réaction, noté x au niveau du lycée. Le rôle du professeur est alors central pour faire émerger une méthodologie générale autour de relations mathématiques entre des quantités d'objets assemblés.

Qu'est-ce que l'avancement de réaction ?

Lors d'une transformation chimique modélisée par une unique réaction, les variations des quantités de matière des espèces réactives et produites ne sont pas indépendantes.

Dans le document relatif à la modélisation d'une transformation par une réaction, les différentes transformations entre le cuivre et une solution aqueuse de nitrate d'argent ont été modélisées par la réaction :



Lors de ces transformations, il peut être montré que les variations des quantités de matière des espèces réactives et produites sont liées par les relations suivantes :

$$\frac{|\Delta n_{\text{Cu}}|}{1} = \frac{|\Delta n_{\text{Ag}^+}|}{2} = \frac{\Delta n_{\text{Cu}^{2+}}}{1} = \frac{\Delta n_{\text{Ag}}}{2}$$

Chacune des quantités de matière d'espèces peut donc être exprimée en fonction d'une grandeur appelée avancement de réaction, notée x et exprimée en moles (mol), de la manière suivante :

$$n_i = n_{i,\text{initial}} \pm \nu_i \cdot x$$

Avec, $n_{i,\text{initial}}$ la quantité de matière de l'espèce i introduite à l'instant initial ;

ν_i le nombre stœchiométrique associé à l'espèce i dans l'équation de la réaction.

Par exemple, quelle que soit la valeur de l'avancement x :

- la quantité de matière de cuivre est donnée par la relation : $n_{\text{Cu}} = n_{\text{Cu},\text{initial}} - x$;
- la quantité de matière d'argent est donnée par la relation : $n_{\text{Ag}} = n_{\text{Ag},\text{initial}} + 2x$.

Le tableau d'avancement, un outil pour faciliter le bilan de matière

Si l'avancement est une grandeur physique utilisée par l'ensemble de la communauté des chimistes, le tableau d'avancement en est une transposition pédagogique dont l'usage n'est pas universel.

Le tableau d'avancement fait apparaître pour chaque espèce, réactive ou produite, la quantité de matière introduite et la quantité de matière pour un avancement donné x . Son remplissage sur l'exemple pour l'une des transformations étudiées dans le document sur la modélisation donne :

	$\text{Cu}(s)$	+	$2 \text{Ag}^+(aq)$	=	$\text{Cu}^{2+}(aq)$	+	$2 \text{Ag}(s)$
$x = 0 \text{ mol}$	0,0068		0,050		0		0
$x \text{ mol}$	$0,0068 - x$		$0,050 - 2x$		x		$2x$

Retrouvez éducol sur :



Point d'attention

Contrairement au sens habituel de la lecture (de gauche à droite), un tableau d'avancement se lit verticalement, du haut vers le bas. Cette singularité gagnerait à être précisée aux élèves pour en faciliter l'appropriation et donner du sens à cet outil.

Pistes pour favoriser la compréhension des élèves

Pour favoriser la réflexion et éviter les raisonnements purement algorithmiques, il est vivement conseillé¹, lors des premières séances, de :

- minimiser la charge cognitive des élèves en leur fournissant directement des quantités de matière pour caractériser l'état initial du système (pas de quantités de matière à déterminer à partir de masses et/ou de volume de solutions) ;
- associer le tableau à un graphique illustrant les évolutions des quantités de matière en fonction de l'avancement (voir capacité numérique au programme) ;
- demander d'expliquer l'information apportée par chaque case du tableau d'avancement.

Point d'attention

L'avancement n'est pas une grandeur temporelle. C'est une grandeur de bilan macroscopique entre un état initial et un état d'avancement donnés. Son utilisation suppose la non-accumulation d'espèces intermédiaires au cours de la transformation. L'avancement ne porte aucune information cinétique et ne doit pas être confondu avec la vitesse de réaction. Il faut éviter les formulations du type « au bout d'une certaine durée, la quantité de matière vaut... » et préférer des formulations du type « après un avancement x , la quantité de matière vaut... ».

Puis progressivement :

- travailler la notion de bilan de matière en mobilisant simultanément plusieurs cases du tableau (par exemple, déterminer la valeur finale de la quantité de matière des ions argent connaissant la quantité de matière d'ions cuivre formés) ;
- ne pas limiter l'étude à des transformations totales ;
- proposer des situations dans lesquelles les quantités de matière initiales des espèces produites sont non nulles.

La puissance prédictive du tableau d'avancement gagnerait à être mise en avant. En effet, un tableau d'avancement permet d'opérer :

- un bilan *a posteriori* si l'on a connaissance de la composition du système à l'état final ;
- un bilan *a priori* permettant de déterminer la composition finale du système dans l'hypothèse d'une transformation totale.

Enfin, pour garder au tableau son caractère général, il semble préférable d'éviter d'indiquer des « zéros » pour désigner des quantités de matière finales de réactifs à l'intérieur du tableau, la caractérisation de l'état final pouvant être réalisée à l'extérieur du tableau d'avancement.

1. À ce sujet, on peut lire l'article « Tableau d'avancement : avantages et difficultés au long de la scolarité », J-F Le Maréchal, S. Perrey, M. Roux, O. Jean-Marie, *BUP*, 8 (867), 1399-1410

Retrouvez éduscol sur :



Exemple : détermination de la composition à l'état final à partir de données expérimentales

Dans 50 mL de solution de nitrate d'argent à la concentration de 1,0 mol.L⁻¹, est introduit 0,43 g de tournure de cuivre. À l'état final, au bout d'une heure, le cuivre a totalement disparu.

	$Cu(s)$	+	$2 Ag^+(aq)$	=	$Cu^{2+}(aq)$	+	$2 Ag(s)$
$x = 0 \text{ mol}$	0,0068		0,050		0		0
$x \text{ mol}$	$0,0068 - x$		$0,050 - 2x$		x		$2x$

Observation expérimentale : « à l'état final, le cuivre a disparu » (registre expérimental)

Traduction mathématique (registre des modèles) :

$$n_{Cu,f} = 0 \text{ mol} \Rightarrow 0,0068 - x_f = 0 \text{ mol} \Rightarrow x_f = 0,0068 \text{ mol}$$

Bilan de matière : quantités de matière à l'état final :

$$n_{Ag^+,f} = 0,036 \text{ mol}, n_{Cu^{2+},f} = 0,0068 \text{ mol} \text{ et } n_{Ag,f} = 0,014 \text{ mol}$$

Quelques enjeux de formation

Distinguer l'avancement final et l'avancement maximal

Une transformation est dite totale si le système cesse d'évoluer du fait de la consommation totale d'une espèce réactive (désignée « réactif limitant »), d'autres espèces réactives pouvant encore être présentes à l'état final.

L'avancement d'une transformation qui serait totale est appelé avancement maximal. Lorsque l'avancement final x_f est inférieur à l'avancement maximal x_{max} , la transformation est qualifiée de non totale. Cette situation abordée dès la classe de première, pourra être discutée en classe de terminale grâce à des arguments cinétiques et/ou thermodynamiques.

La valeur de l'avancement maximal ne dépend que des quantités de matière initiales des espèces réactives. Sa détermination s'opère en envisageant séparément la disparition de chaque espèce réactive, puis en confrontant les valeurs correspondantes d'avancement maximal en vue de choisir celle qui est adaptée à la transformation.

Exemple : la transformation est-elle totale ?

Dans 50 mL de solution de nitrate d'argent à la concentration de 1,0 mol.L⁻¹, est introduit 0,43 g de tournure de cuivre. Au bout de 10 minutes, la concentration des ions cuivre est déterminée égale à 0,13 mol.L⁻¹, au moyen d'une courbe d'étalonnage.

	$Cu(s)$	+	$2 Ag^+(aq)$	=	$Cu^{2+}(aq)$	+	$2 Ag(s)$
$x = 0 \text{ mol}$	0,0068		0,050		0		0
$x \text{ mol}$	$0,0068 - x$		$0,050 - 2x$		x		$2x$

Retrouvez éducol sur :



Détermination de l'avancement maximal dans l'hypothèse d'une transformation totale :

Cas 1 : si le cuivre est le réactif limitant, alors $0,0068 - x_{max} = 0 \text{ mol}$

$$\Rightarrow x_{max,1} = 0,0068 \text{ mol}$$

Cas 2 : si les ions argent sont le réactif limitant, alors $0,050 - 2x_{max} = 0 \text{ mol}$

$$\Rightarrow x_{max,2} = 0,025 \text{ mol}$$

La valeur d'avancement maximal qui peut être atteinte en premier est $x_{max,1}$. C'est cette valeur qu'il faut retenir puisque toute évolution du système au-delà de cet avancement est rendue impossible par disparition du cuivre.

$$x_{max} = 0,0068 \text{ mol}$$

Détermination de l'avancement final à partir de données expérimentales :

La concentration finale mesurée des ions cuivre permet de déterminer la quantité de matière des ions cuivre à l'état final, et par conséquent, l'avancement final :

$$n_{Cu^{2+}} \text{ final} = x_f = 0,0065 \text{ mol}$$

Conclusion : Aux incertitudes de mesure près, la transformation peut être qualifiée de non totale puisque l'avancement final est inférieur à l'avancement maximal ($x_f < x_{max}$).

Point d'attention

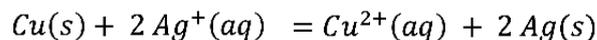
Il ne convient pas de dire qu'une « réaction est totale ». En effet, la réaction modélise la transformation en rendant compte des proportions avec lesquelles les espèces se transforment (apparaissent et disparaissent) ; c'est un outil de bilan de matière. À la différence d'une transformation chimique, la réaction n'est reliée à aucune condition opératoire (température, pression ou encore quantités de matière initiales des différentes espèces). Une même réaction modélise ainsi une infinité de transformations, correspondant à des conditions différentes. Parmi celles-ci, certaines peuvent être totales, d'autres non, tout dépend de leurs conditions expérimentales. C'est donc une transformation qui peut être qualifiée de totale ou de non totale.

Retrouvez éduscol sur :



Identifier une situation de stœchiométrie

Un mélange est dit stœchiométrique quand les espèces réactives ont été introduites dans des proportions indiquées par la réaction. Dans le cas de la réaction entre le cuivre et les ions argent :



Le mélange initial est stœchiométrique s'il y a dans ce mélange une quantité double d'ions argent que de cuivre, soit $n_{\text{Ag}^+} = 2 n_{\text{Cu}}$ que l'on peut aussi écrire $\frac{n_{\text{Cu}}}{1} = \frac{n_{\text{Ag}^+}}{2}$

Sur le plan mathématique, cela se traduit par une relation générique :

$$\forall i, \quad \frac{n_i}{\nu_i} = cte$$

Mais pour éviter que la notion de stœchiométrie ne se résume à l'application d'une formule, il semble préférable de faire raisonner les élèves à partir de l'équation de la réaction.

On peut aussi associer le mélange stœchiométrique à l'absence d'excès d'un réactif. Ainsi, quand le mélange initial est stœchiométrique, la recherche de l'avancement maximal conduit à une valeur identique pour toutes les espèces réactives.

Les élèves seraient en droit de se demander pourquoi les réactifs ne sont pas toujours introduits dans les proportions stœchiométriques. Des explications utilisant le quotient de réaction leur seront apportées en classe de terminale.

Retrouvez éducol sur :

