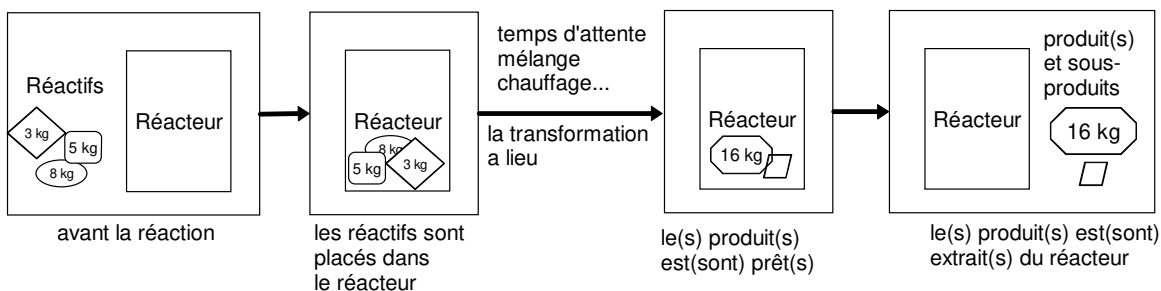


## 1.5 Exploitation des procédés

Un procédé industriel peut être exploité de différentes façons. En général, on va distinguer deux types d'exploitation : le procédé *en cuve* (en anglais : *batch*) et le procédé *en continu* (en anglais : *continuous process*). Le procédé en cuve sera utilisé pour de petites quantités ou pour des applications spécialisées. Le procédé en continu est le plus courant pour des applications industrielles à grande échelle.

### 1.5.1 Procédé en cuve

L'exploitation d'un procédé en cuve s'effectue de façon séquentielle, c'est-à-dire étape par étape. Les quantités requises de réactifs (les « ingrédients ») sont placés dans le réacteur (l'espace physique où la réaction prendra place : un réservoir, un bassin, une conduite, une colonne, etc.). Ensuite, en fonction du procédé (la « recette »), on pourra mélanger, chauffer, refroidir, attendre, dans l'ordre et selon les durées prescrites. Les produits (le résultat désiré) sont extraits du réacteur lorsque la réaction est complétée.



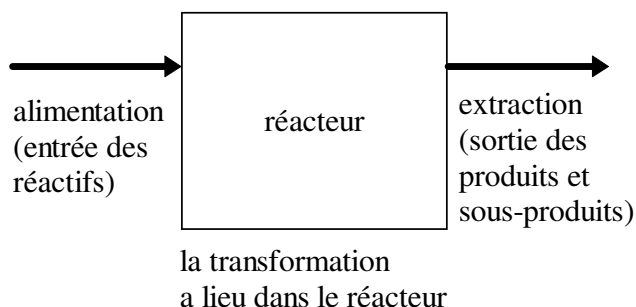
Le schéma ci-dessus illustre les principales étapes du procédé en cuve. Les quantités des réactifs placés dans le réacteur vont être mesurées en utilisant des grandeurs physiques appropriées : la *masse* ou le *volume*, selon les applications, l'état de la matière, la précision désirée, les méthodes de mesure disponibles, etc. Pour étudier les procédés, il est aussi possible d'effectuer des calculs en utilisant la *mole*, l'unité SI de la *quantité de matière* (voir section 1.4). À noter que le nombre de moles, contrairement à la masse ou au volume, ne peut pas être mesuré directement.

Le **principe de conservation de la masse** est très important pour l'étude des procédés chimiques. On considérera que, lors des transformations chimiques, la masse totale de la matière ne change pas : si on mesure la masse de tous les produits et sous-produits obtenus, elle sera égale à celle des réactifs au départ; observons cependant que certains réacteurs sont des systèmes ouverts : par exemple, un bassin ouvert à l'air libre pourra laisser échapper des substances à l'état gazeux dont la quantité sera difficile à établir. Cela ne veut pas dire que le principe ne s'applique pas, mais seulement qu'il est nécessaire de mesurer les quantités de toutes les substances impliquées dans le processus de transformation.

### 1.5.2 Procédé en continu

Dans un procédé exploité *en continu*, le réacteur est alimenté sans interruption par les réactifs, de même, les produits et sous-produits sont extraits continûment.

Le schéma ci-dessous illustre ce type de procédé :



La description du procédé doit s'ajuster au fait que l'alimentation, la transformation et l'extraction s'effectuent sans interruption. Les grandeurs physiques utilisées vont donc recourir au *temps*.

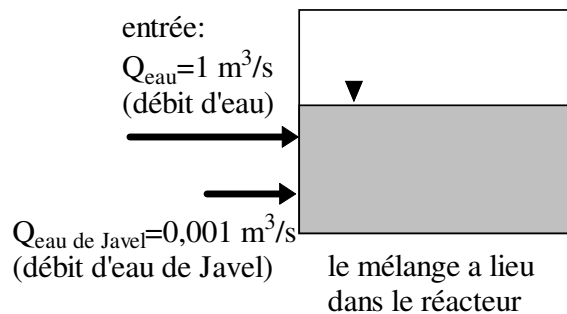
L'alimentation en réactifs va s'exprimer par un *débit*, une *quantité de matière par unité de temps*. Nous distinguerons :

nom	symbole	définition	unités SI
débit massique	$\dot{m}$	$\frac{\text{masse}}{\text{temps}}$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
débit volumique	$Q$	$\frac{\text{volume}}{\text{temps}}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
débit molaire	$\dot{n}$	$\frac{\text{nombre de moles}}{\text{temps}}$	$\frac{\text{mol}}{\text{s}}$

Le débit volumique est très couramment utilisé, que ce soit pour des liquides, des gaz (comme nous le verrons au module 2) ou des solides en poudre ou en grains. De ce fait, on dira souvent simplement *débit* pour désigner le débit volumique, alors que l'on précisera *débit massique* ou *débit molaire* le cas échéant.

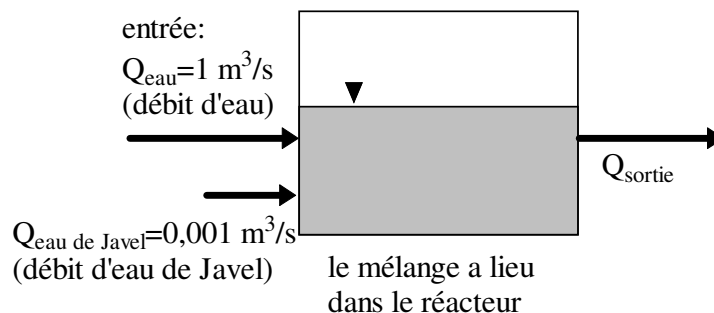
L'extraction des produits et sous-produits sera décrite par les débits de la même manière que pour les réactifs.

La façon habituelle d'exploiter un procédé en continu s'appelle l'*écoulement stationnaire*. Imaginons un procédé se déroulant dans un bassin à l'air libre (le réacteur) et alimenté par un débit volumique de liquide (de l'eau par exemple). Notre procédé consistera à mélanger à l'eau un faible débit d'eau de Javel pour la désinfecter :



Un débit total d'environ  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  de liquide entre dans le réacteur qui n'a aucune sortie! Il est inévitable que le réacteur déborde à plus ou moins brève échéance...

Il faut donc une extraction :



Si le débit à la sortie est inférieur au débit à l'entrée, le niveau dans le réacteur va monter et, à un moment donné, il va déborder. Inversement, si le débit de sortie est supérieur au débit d'entrée, le réacteur va se vider, et il ne sera pas possible de continuer à extraire les produits à ce taux. On peut représenter ce qui se passe par l'équation :

$$\sum \text{débits sortants} - \sum \text{débits entrants} = \text{variation de la quantité de matière dans le réacteur}$$

Le mode de fonctionnement le plus simple est celui où le niveau dans le réacteur reste constant; en termes plus généraux, il n'y aura pas de variation de l'emmagasinement. On a alors :

$$\sum \text{débits sortants} - \sum \text{débits entrants} = 0$$

ou

$$\sum \text{débits sortants} = \sum \text{débits entrants}$$

Dans l'exemple ci-dessus, le procédé est un simple mélange et il n'y a pas de transformation chimique de la matière. D'autres types de procédés vont inclure des transformations telles qu'il faudra associer le principe de conservation de la masse. En effet, la masse est la quantité qui reste inchangée au cours des transformations. Ainsi, on devra écrire, pour un procédé chimique quelconque exploité en écoulement stationnaire :

$$\sum \dot{m}_{\text{entrant}} = \sum \dot{m}_{\text{sortant}}$$

Dans certains cas particuliers, on pourra travailler avec les débits volumiques :

- les substances sont à l'état liquide seulement
- la température est constante
- le procédé n'implique que des transformations physiques (par exemple un mélange) et non des transformations chimiques

On aura alors :

$$\sum Q_{\text{entrant}} = \sum Q_{\text{sortant}}$$

**Capsule : cas d'écoulement dans les réacteurs en continu**

Lors de l'exploitation d'un procédé en cuvette, un temps (durée) est donné à la transformation dans la séquence des opérations. Qu'en est-il dans le cas d'un procédé en continu?

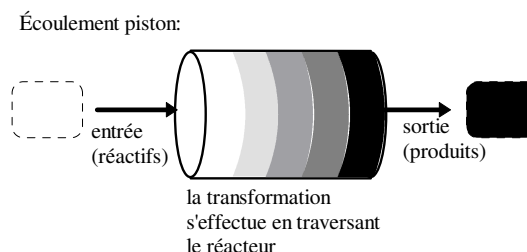
La durée moyenne de séjour dans le réacteur est calculée par la relation :

$$\text{temps de séjour} = \frac{\text{volume du réacteur}}{\text{débit volumique d'alimentation}}$$

On va distinguer deux modèles de réacteur en continu : l'écoulement « piston » et le réacteur complètement mélangé.

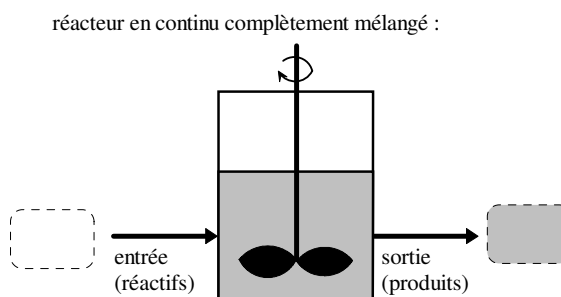
### L'écoulement piston

Dans le modèle d'écoulement piston, les réactifs sont introduits à une extrémité du réacteur et la transformation s'effectue alors que les substances cheminent vers l'autre extrémité du réacteur, la sortie où l'on extrait les produits. Dans ce modèle, le « contenu » (composition) du réacteur varie d'un point à l'autre.



### Le réacteur en continu complètement mélangé

Dans ce modèle du réacteur complètement mélangé, on considère que les réactifs introduits sont immédiatement et complètement dispersés dans l'ensemble du réacteur. En tout temps, le contenu du réacteur est homogène et identique à ce que l'on extrait à la sortie.



## 1.5.3 Exercices préparatoires

1. Deux conduites convergent vers une conduite commune. La première conduite transporte 10,0 L/min d'eau à 30°C et la seconde 2,00 L/min d'eau à 40°C. Le mélange est ensuite refroidi à 10°C.
  - a. calculez le débit massique dans chacune des conduites d'amenée
  - b. calculez le débit massique dans la conduite commune
  - c. calculez le débit volumique dans la conduite commune à 10°C.

2. Une pile à combustible est alimentée par de l'hydrogène et de l'oxygène. Le rapport entre la masse d'oxygène et la masse d'hydrogène à l'entrée est 7,94. Sachant que la pile produit 0,725 L/min d'eau à 32°C et que la masse totale des substances est conservée lors d'une réaction chimique, calculez le débit massique d'hydrogène à l'entrée de la pile.

### Réponses :

1. Les masses volumiques sont lues dans le tableau 1.2 et les valeurs sont converties de kg/m<sup>3</sup> à g/L.

$$\begin{aligned} \text{a.} \quad \dot{m}_1 &= 10 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times 996 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 9960 \frac{\text{g}}{\text{min}} \\ \dot{m}_2 &= 2,0 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times 992 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 1984 \frac{\text{g}}{\text{min}} \end{aligned}$$

$$\text{b.} \quad \dot{m}_{\text{total}} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 11944 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

$$\text{c.} \quad Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{11944}{1000} = 11,9 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

2. Pour calculer le débit massique d'eau à la sortie de la pile, on doit établir la masse volumique de l'eau par interpolation dans le tableau 1.2 :

$$\rho_{32^\circ\text{C}} = 996 + \frac{(992 - 996)}{(40 - 30)} \times (32 - 30) = 995,2 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

$$\dot{m}_{\text{eau (sortie)}} = 0,725 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times 995,2 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 721,5 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

La pile est exploitée en continu et en écoulement stationnaire :

$$\dot{m}_{\text{hydrogène}} + \dot{m}_{\text{oxygène}} = \dot{m}_{\text{eau (sortie)}}$$

$$\dot{m}_{\text{hydrogène}} + 7,94 \times \dot{m}_{\text{hydrogène}} = 721,5$$

$$\dot{m}_{\text{hydrogène}} = 80,7 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$