



HAL
open science

Génie de la Réaction Chimique : Distribution des Temps de Séjour

Marie Debacq

► **To cite this version:**

Marie Debacq. Génie de la Réaction Chimique : Distribution des Temps de Séjour. École d'ingénieur. CGP215: Génie de la réaction chimique & Évaluation économique des procédés, Conservatoire national des arts et métiers, France. 2009. cel-01487790v1

HAL Id: cel-01487790

<https://hal.science/cel-01487790v1>

Submitted on 13 Mar 2017 (v1), last revised 14 Jul 2022 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Génie de la Réaction Chimique
extrait : Distribution des Temps de Séjour

CGP215

Génie de la réaction chimique & Évaluation économique des procédés

Marie DEBACQ
marie.debacq@cnam.fr



écoulement dans les réacteurs réels : Distribution des Temps de Séjour

Ce chapitre est consacré à une méthode très efficace pour l'étude des écoulements dans les réacteurs réels : la Distribution des Temps de Séjour (DTS). Il s'agit en réalité d'une méthode d'étude applicable à bien d'autres cas que les réacteurs : des appareillages de l'industrie chimique, aux réseaux urbains d'évacuation des eaux usées, en passant par les zones portuaires. Il s'agit aussi de l'exemple le plus connu d'une méthodologie d'étude très efficace en génie des procédés (et ailleurs) : la méthode systémique, qui consiste à obtenir des informations macroscopiques utiles à partir de mesures expérimentales simples.

Une séance de Travaux Pratiques illustrera ce chapitre.

On se propose d'étudier l'écoulement de liquides, de gaz ou de solides divisés en circulation dans des installations industrielles (réacteurs, séparateurs) ou dans des milieux naturels (milieux poreux, bassins fluviaux, zones côtières...). Dans le cas des installations industrielles, il s'agit de disposer des informations nécessaires sur l'écoulement pour prévoir leur capacité de production, et détecter d'éventuels défauts. Dans le cas des milieux naturels il s'agit de prévoir les risques de pollution, de comprendre les ensablements, etc. Dans tous les cas, on souhaite obtenir une information GLOBALE sur l'écoulement dans le système considéré.

On dispose aujourd'hui de codes de calcul permettant de déterminer l'écoulement dans toutes sortes de systèmes. Mais dans de nombreuses situations rencontrées dans la pratique (systèmes polyphasiques, fluides aux propriétés mal connues, géométries très complexes), les résultats de ces simulations sont quelque peu hasardeux et nécessitent des moyens et des temps de calcul sans commune mesure avec l'objectif poursuivi. En outre, même lorsqu'il est faisable, ce calcul conduit à une description inutilement détaillée (champ de vitesse en tout point du système) au regard des besoins simples. Enfin toute approche théorique devant être confrontée à des données expérimentales, la mesure de Distribution des Temps de Séjour reste très pertinente, malgré les progrès constants et rapides en mécanique des fluides numérique.

Il est rare que tous les éléments fluides ou solides qui pénètrent au même instant dans un système (réacteur, port, etc.) sortent ensemble de ce volume. Ces éléments n'ont pas tous le même "temps de séjour" individuel : comme l'illustre la Figure 1, certains ① passent directement de l'entrée à la sortie, d'autres ② y séjournent plus ou moins longtemps ; il peut exister des zones de recirculation ③, ou encore des zones immobiles ④ (zones mortes). La distribution des temps de séjour dans un système est une caractéristique importante de celui-ci, car elle influence de façon notable les performances d'un réacteur ou l'efficacité d'une roche comme barrière contre la pollution.

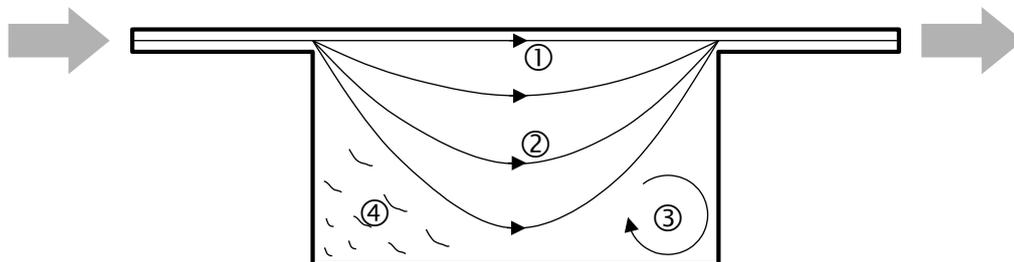


Figure 1 : Distribution des temps de séjour.

☞ fonction de distribution des temps de séjour E

C'est le mérite de DANCKWERTS d'avoir imposé dès 1953 une approche systémique à ce problème en définissant une fonction de distribution aisément accessible à l'expérience. La fonction de distribution des temps de séjour E est telle que "la fraction de fluide qui séjourne dans l'installation pendant un temps compris entre t_s et t_s+dt_s égale le produit $E(t_s).dt_s$ ", comme illustré sur la Figure 2.

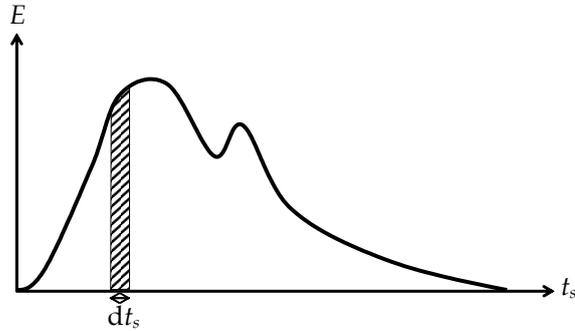


Figure 2 : Fonction de distribution des temps de séjour.

Le but de ce chapitre est d'étudier les distributions des temps de séjour (DTS) dans les systèmes en écoulement, de voir quelles informations on peut en tirer quant à leur fonctionnement hydrodynamique et de rendre compte de ces distributions à l'aide de modèles représentatifs. Dans tout ce qui suit la notion de "réacteur" est prise au sens large. Les méthodes décrites s'appliquent en effet à toute portion d'espace traversée par des éléments mobiles qui y séjournent pendant des durées variables : aussi bien les appareils industriels, que les bassins fluviaux, les organes d'un être vivant, ou une autoroute la veille d'un week-end prolongé.

1.1. MÉTHODES DE MESURE

Pour caractériser l'hydrodynamique d'un système on peut imaginer de suivre l'histoire d'un traceur introduit dans l'écoulement.

1.1.1. principe

La méthode des traceurs consiste à "marquer" des molécules entrant dans le système, et à les dénombrer dans le courant de sortie en fonction du temps. Ainsi on applique, à l'aide d'un traceur, un certain *signal à l'entrée* du système et on examine sa *réponse en sortie*, pour en déduire des renseignements sur le comportement interne du fluide sous la forme d'une *fonction de transfert* : c'est donc une méthode systémique.

L'introduction du traceur, qui ne doit pas perturber l'écoulement dans le milieu étudié, peut se faire suivant une injection de type impulsion (Figure 3-a) ou échelon (Figure 3-b).

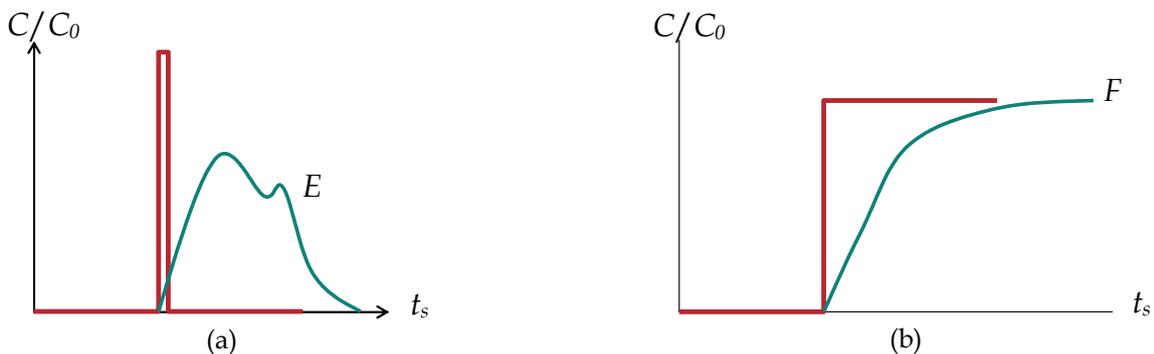


Figure 3 : Injections de type impulsion (a) ou échelon (b).

L'injection impulsion consiste à introduire N moles de traceur pendant un temps très court (au moins 100 fois inférieur au temps de passage τ). Le volume de traceur introduit doit être très faible par rapport au volume V du système afin de ne pas perturber son écoulement. On note $C_0 = N / V$, la concentration qu'aurait le traceur uniformément réparti dans tout le volume. La réponse $C(t_s)$ en sortie du système, une fois normalisée par son intégrale, est la fonction de distribution E :

$$E(t_s) = \frac{C(t_s)}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt}$$

L'injection échelon consiste à faire passer brusquement la concentration en traceur dans le flux d'alimentation du système d'une concentration nulle à une concentration C_0 , sans perturber l'écoulement dans le système. La réponse normalisée est appelée "fonction F ".

1.1.2. conditions d'application de la méthode

L'application de cette méthode est soumise à 3 hypothèses principales : l'écoulement doit être en régime permanent, le fluide doit être incompressible et l'écoulement doit être déterministe, c'est à dire qu'il ne fait pas intervenir de processus aléatoires macroscopiques, du moins à grande échelle de temps et d'espace (un processus aléatoire stationnaire tel que la turbulence est quasi-déterministe à l'échelle de l'expérimentateur).

Toutefois, les résultats présentés ici peuvent être généralisés aux cas d'écoulements en régime transitoire, aux fluides compressibles ou dilatables, ou au cas d'alimentations multiples, mais ces aspects ne seront pas détaillés ici. Des conditions supplémentaires sont imposées en entrée et en sortie du système : l'écoulement dans les conduites d'entrée et de sortie doit être SANS diffusion (type piston), et le fluide doit être homogène dans la zone de mesure.

1.1.3. choix du traceur

Le traceur choisi doit respecter certaines caractéristiques : avoir les mêmes propriétés hydrodynamiques que le fluide, être décelable par une propriété physique, être stable et parfaitement neutre pour le système (mesures dans les milieux naturels, ou dans les installations de production alimentaire...). Il faut enfin être sûr de pouvoir se débarrasser de tout le traceur.

Plusieurs types de traceurs et de méthodes de détection peuvent être envisagés : les plus courantes sont listées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Exemples de couples traceur / moyen de détection.

traceur	détection
sel	conductimétrie
colorant	colorimétrie
isotope radioactif	gammamétrie

1.2. PROPRIÉTÉS DE LA FONCTION DE DISTRIBUTION

Considérons le signal mesuré en sortie du système (Figure 4).

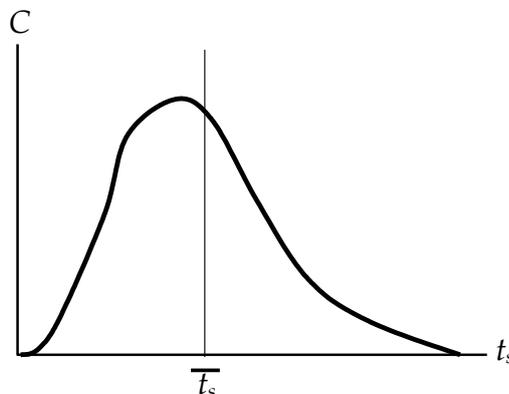


Figure 4 : Réponse à une injection.

1.2.1. réponse à une impulsion : la fonction de distribution E

La fonction de distribution des temps de séjour E possède les propriétés usuelles des distributions. En particulier on peut définir les moments de cette distribution.

moments de la distribution

Le moment d'ordre n de la fonction de distribution des temps de séjour est :

$$\mu_n = \int_0^{\infty} t_s^n \cdot E(t_s) \cdot dt_s$$

Le moment d'ordre 0, est le facteur de normation. Il est unitaire puisque $E(t_s) = \frac{C(t_s)}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt}$:

$$\mu_0 = 1$$

Le moment d'ordre 1 représente la moyenne de la distribution. Il est relié au temps de séjour moyen par :

$$\bar{t}_s = \frac{\mu_1}{\mu_0} = \mu_1$$

Le moment d'ordre 2 représente l'étalement autour du temps de séjour moyen. Il est lié à la variance par :

$$\sigma = \frac{\mu_2}{\mu_0} - \left(\frac{\mu_1}{\mu_0} \right)^2 = \mu_2 - \mu_1^2$$

Le moment d'ordre 3 représente l'asymétrie de la distribution et le moment d'ordre 4 son aplatissement.

1.2.2. réponse à un échelon : la fonction F

La fonction F est simplement l'intégrale de la fonction de distribution des temps de séjour E , elle apporte donc la même information. La méthode de mesure de la DTS par injection échelon est donc dite "méthode intégrale".

$$F(t_s) = \int_0^{t_s} E(t) \cdot dt$$

Ceci se retrouve simplement en se rappelant que l'impulsion est la fonction dérivée de l'échelon.

1.2.3. méthode à 2 points de mesure

Il est souvent difficile de réaliser pratiquement l'injection "proprement", en particulier d'avoir un temps d'injection très faible. Il peut également arriver que l'entrée du système que l'on souhaite étudier ne soit pas accessible, pour des raisons de sécurité par exemple.

La méthode dite des "deux points de mesure" permet, à partir d'une injection de forme quelconque, de déduire la DTS à l'aide de 2 mesures réalisées en entrée et en sortie du système (Figure 5).

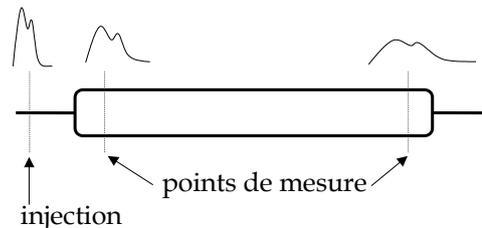


Figure 5 : Méthode à 2 points de mesure.

Le dépouillement s'effectue alors à partir des concentrations $C^e(t_s)$ et $C^s(t_s)$ mesurées en entrée et en sortie, à l'aide du **produit de convolution** :

$$C^s(t_s) = \int_0^{t_s} C^e(t) \cdot E(t_s - t) \cdot dt$$

1.3. EXPLOITATION QUALITATIVE : DIAGNOSTIC DES ÉCOULEMENTS

La simple observation de la forme de la courbe E obtenue permet d'effectuer un diagnostic de l'écoulement.

1.3.1. les réacteurs idéaux

Il existe deux situations limites d'écoulement :

- ✓ L'écoulement piston, caractérisé par le fait que tous les éléments situés dans une section droite progressent à la même vitesse, comme poussés par un piston. Le temps de séjour est identique pour tous les éléments et la composition évolue le long du réacteur : on obtient de la sorte un traitement très uniforme de la matière.
- ✓ Le mélange parfait, qui se traduit par le fait que des propriétés physico-chimiques (concentration, température, etc.) sont les mêmes en tout point du réacteur et identiques à celles de la sortie. Dans le cas d'un fonctionnement continu, le mélange parfait donne lieu à une importante distribution des temps de séjour des éléments : certains quittent le système dès l'introduction (court-circuit), d'autres séjournent très longtemps (par suite de recirculations), et les temps de séjour s'échelonnent de zéro à l'infini.

L'intérêt de ces deux concepts simples et extrêmes est que leur fonctionnement est bien connu. Par exemple on sait très bien calculer le taux de conversion chimique dans un réacteur piston ou un réacteur parfaitement agité (RPA).

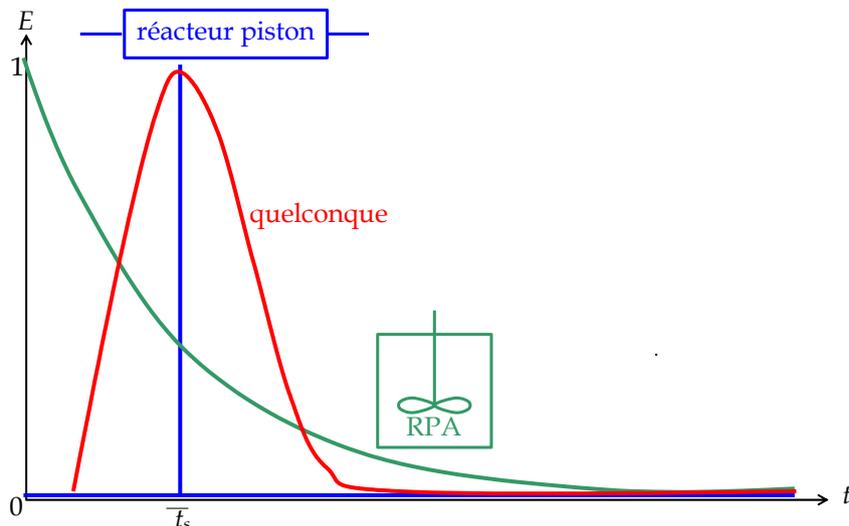


Figure 6 : Réacteur piston - réacteur quelconque - réacteur parfaitement agité.

1.3.1.1. réacteur piston

Un réacteur piston se comporte comme un retard pur. Toutes les molécules ont le même temps de séjour, c'est le temps de séjour moyen, et aussi le temps de passage. La réponse à une impulsion est donc simplement une impulsion décalée dans le temps de $\bar{t}_s = \tau$:

$$C(t_s) = C_0 \cdot \delta(t_s - \tau)^*$$

On voit que $\int_0^{\infty} C(t_s) \cdot dt_s = C_0 \cdot \tau$. Ainsi,

$$E(t_s) = \frac{\delta(t_s - \tau)}{\tau}$$

Cette [fonction distribution des temps de séjour dans un réacteur piston](#) est représentée sur la Figure 6.

1.3.1.2. RPA

Dans le cas d'une injection impulsion de N moles de traceur, le bilan en traceur sur le réacteur parfaitement

* δ est la fonction Dirac : $\delta(x) = \begin{cases} 1 & \text{pour } x = 0 \\ 0 & \text{pour } x \neq 0 \end{cases}$

agité fonctionnant en régime permanent s'écrit :

$$0 = Q \cdot C_{\text{traceur}} + V \cdot \frac{dC_{\text{traceur}}}{dt}$$

Avec comme condition initiale la concentration $C_0 = N / V$, la solution de cette équation différentielle du premier ordre sans second membre est :

$$C = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{t_s}{\tau}\right)$$

La concentration en traceur croît donc instantanément de 0 à C_0 à l'instant d'injection du traceur, puis décroît exponentiellement. Elle ne devient inférieure à 1% de C_0 qu'au bout de $5 \cdot \bar{t}_s$.

Notons que le temps de séjour moyen et le temps de passage sont ici aussi égaux : $\bar{t}_s = \tau = V / Q^*$.

Ainsi,

$$E(t_s) = \frac{1}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t_s}{\tau}\right)$$

Cette **fonction distribution des temps de séjour dans un RPA** est représentée sur la Figure 6.

1.3.2. défauts d'écoulement typiques

Comme on le voit sur la Figure 6, un système réel présente un cas intermédiaire entre, d'une part la situation du mélangeur parfait, et d'autre part la situation de l'écoulement piston.

Le temps de séjour moyen \bar{t}_s et le temps de passage $\tau = V / Q$ calculé à partir du débit d'alimentation Q du système, peuvent être différents ; en outre on peut avoir $\int_0^{\infty} C(t_s) \cdot dt_s \neq C_0 \cdot \bar{t}_s$; en particulier si tout le volume interne n'est pas réellement accessible au fluide.

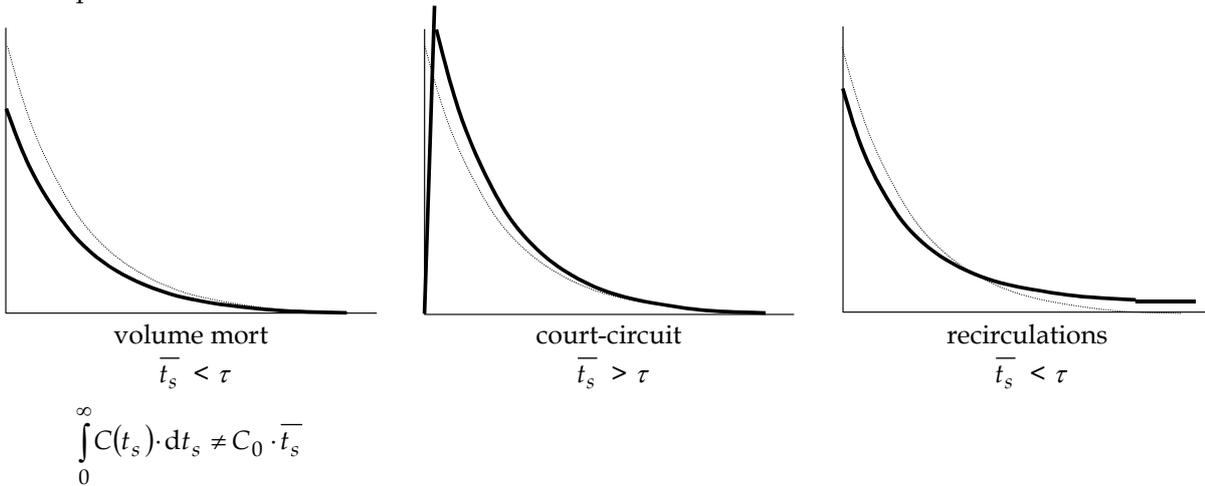


Figure 7 : Défauts d'écoulement dans un réacteur agité.

* En effet $\bar{t}_s = \mu_1 = \int_0^{\infty} t_s \cdot E(t_s) \cdot dt_s = \int_0^{\infty} t_s \cdot \frac{C(t_s)}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt} \cdot dt_s = \frac{\int_0^{\infty} t_s \cdot C(t_s) \cdot dt_s}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt} = \frac{\int_0^{\infty} t_s \cdot C_0 \cdot \exp\left(-\frac{t_s}{\tau}\right) \cdot dt_s}{\int_0^{\infty} C_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cdot dt}$

Or $\int_0^{\infty} C_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cdot dt = \left[-C_0 \cdot \tau \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right]_0^{\infty} = -C_0 \cdot \tau \cdot (0 - 1) = C_0 \cdot \tau$.

D'autre part $\int x \cdot \exp(-k \cdot x) \cdot dx = \frac{-1}{k} \cdot x \cdot \exp(-k \cdot x) - \frac{1}{k^2} \cdot \exp(-k \cdot x)$ [ceci s'obtient par intégration par parties].

donc $\bar{t}_s = \frac{C_0 \cdot \left[-\tau \cdot t_s \cdot \exp\left(-\frac{t_s}{\tau}\right) - \tau^2 \cdot \exp\left(-\frac{t_s}{\tau}\right)\right]_0^{\infty}}{C_0 \cdot \tau} = \left[-t_s \cdot \exp\left(-\frac{t_s}{\tau}\right) + \tau \cdot \exp\left(-\frac{t_s}{\tau}\right)\right]_0^{\infty} = -[0 - 0 + \tau \cdot (0 - 1)] = \tau$

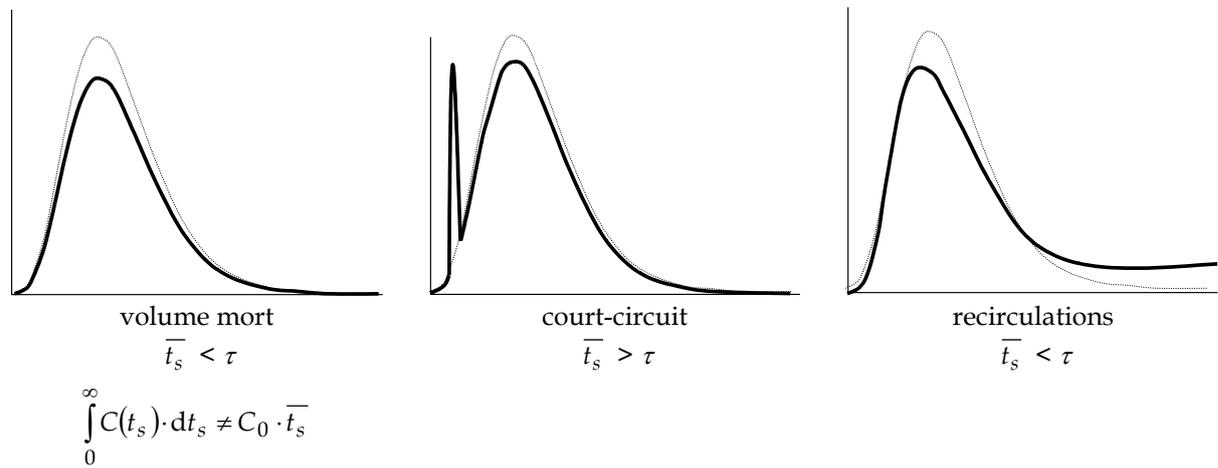


Figure 8 : Défauts d'écoulement dans un système quelconque.

En l'absence de ces défauts d'écoulement, on a $E(t_s) = \frac{C(t_s)}{C_0 \cdot \tau}$.

1.4. EXPLOITATION QUANTITATIVE : MODÉLISATION

Ayant obtenu par la méthode des traceurs une courbe expérimentale de DTS, on se propose de rendre compte de l'allure observée au moyen d'un modèle hydrodynamique simple, utilisable commodément par la suite pour prédire la conversion chimique d'un réacteur ou pour servir de base à son extrapolation.

1.4.1. modèle à dispersion axiale

Il s'agit de représenter les faibles écarts à l'écoulement piston. Le modèle superpose un écoulement piston purement convectif de vitesse u et une dispersion aléatoire obéissant formellement à une loi de Fick, dans le système de coordonnées x se déplaçant à la vitesse moyenne u du fluide :

$$D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

D est ici un coefficient de dispersion phénoménologique qui rend compte à la fois du fluide, du régime d'écoulement et de la géométrie du système.

Pour \tilde{N} moles de traceur par unité de surface déposées en $x = 0$, la solution de l'équation de dispersion est :

$$C(z) = \frac{\tilde{N}}{\sqrt{4\pi \cdot D \cdot t_s}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t_s}\right)$$

L'abscisse axiale $z (= x + u \cdot t)$ est fixe par rapport au système ; ainsi $z = 0$ en entrée et $z = L = u \cdot \bar{t}_s$ en sortie.

L'observateur posté à la sortie voit la concentration en fonction du temps en écrivant :

$$x = u \cdot (\bar{t}_s - t_s)$$

Comme $C_0 = \frac{\tilde{N}}{L}$ et $E(t_s) = \frac{C(t_s)}{C_0 \cdot t_s}$, on a :

$$E(t_s) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Pe}{\pi \cdot t_s \cdot \bar{t}_s}\right)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{Pe \cdot (\bar{t}_s - t_s)^2}{4 \cdot t_s \cdot \bar{t}_s}\right)$$

Cette expression fait intervenir le critère de Péclet Pe (produit d'une vitesse caractéristique de l'écoulement par une distance caractéristique, divisé par un coefficient de dispersion) : $Pe = \frac{u \cdot L}{D}$.

L'écoulement piston parfait est obtenu pour $D = 0$, soit Pe infini (dans la pratique pour $Pe > 200$). Pour les faibles critères de Péclet, la DTS s'affaïsse et devient dissymétrique (cf. Figure 9). On retrouve la DTS d'un RPA pour $Pe \rightarrow 0$.

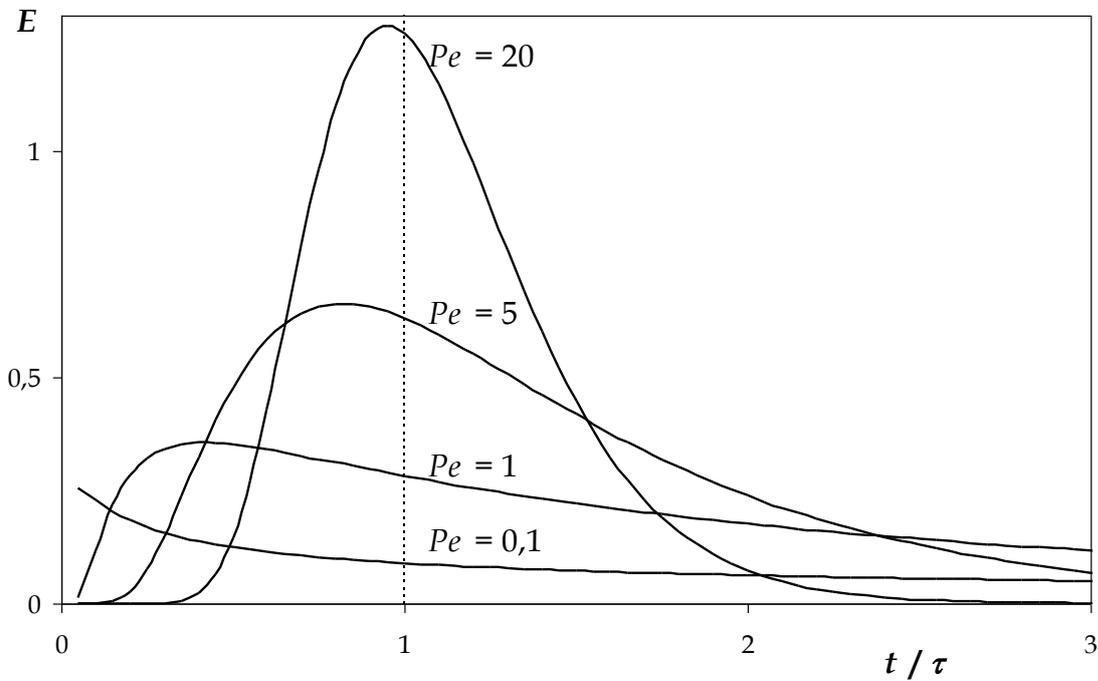


Figure 9 : Courbes de DTS en fonction du critère de Péclet.

Les moments de la DTS sont reliés au critère de Péclet, pour les grandes valeurs de celui-ci, selon :

$$Pe = 2 \cdot \left(\frac{\bar{t}_s}{\sigma} \right)^2$$

1.4.2. modèle de cascade de RPA

Lorsque J réacteurs parfaitement agités sont associés en cascade (c'est-à-dire en série), la DTS est la suivante :

$$E(t_s) = \left(\frac{J}{t_s} \right)^J \cdot \frac{t_s^{J-1} \cdot \exp\left(-J \frac{t_s}{t_s}\right)}{(J-1)!}$$

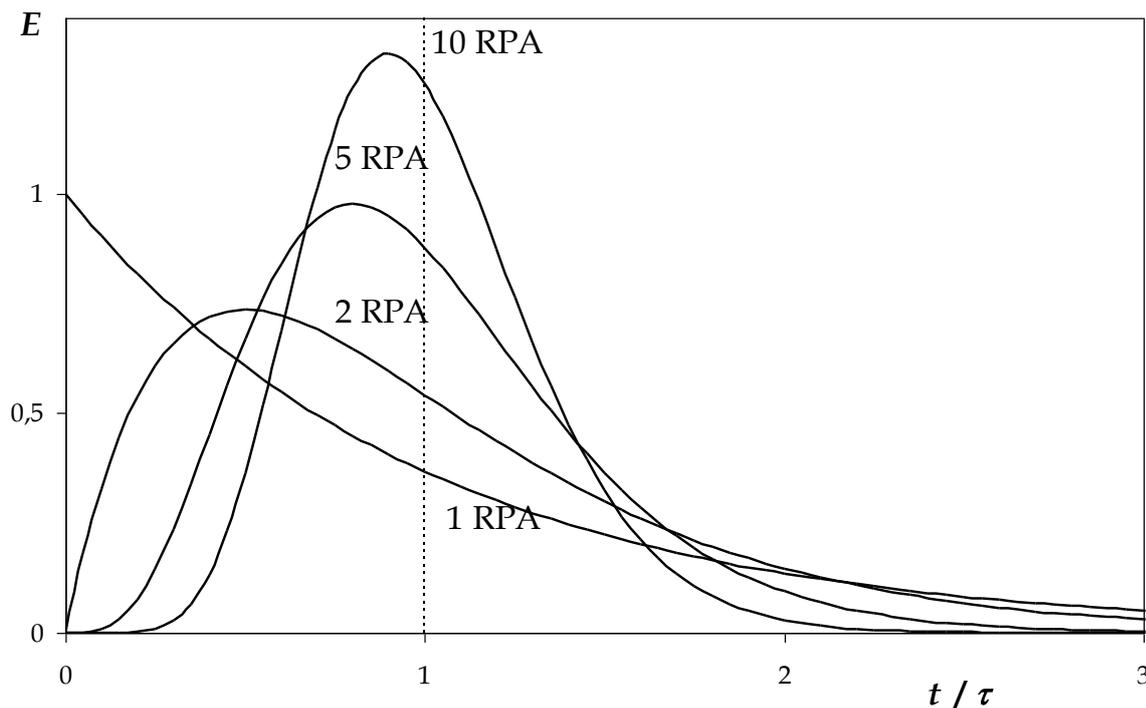


Figure 10 : Courbes de DTS en fonction du nombre de RPA en cascade.

On retrouve le cas du mélangeur parfait pour $J = 1$, et le piston parfait pour J infini (dans la pratique pour $J > 100$).

1.4.3. lien entre les deux modèles

Ces deux modèles sont de natures différentes, en particulier la matière peut remonter le courant (diffusion) dans le cas "dispersion axiale" mais pas dans le cas "cascade de RPA". Toutefois, à Pe et J élevés, ces modèles coïncident, comme on le remarque sur la Figure 11. On a alors $Pe \approx 2 \cdot J$.

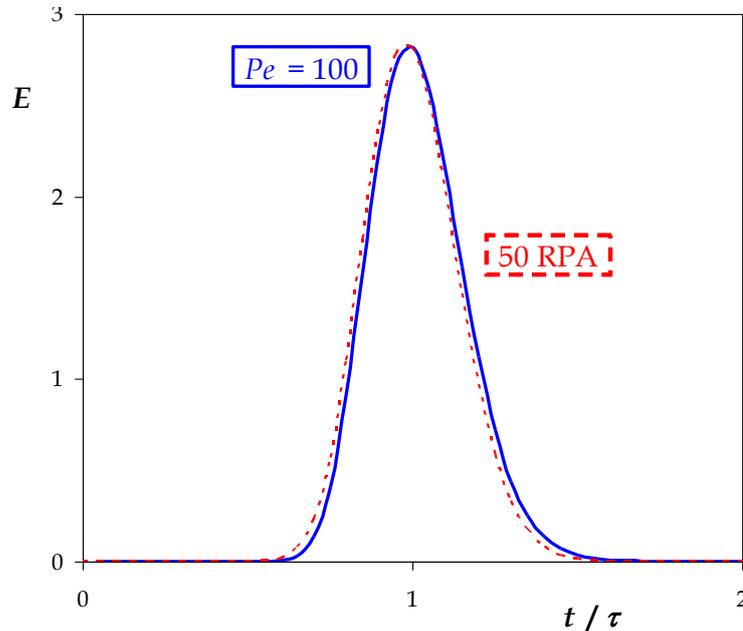


Figure 11 : Lien entre le modèle à dispersion axiale et la cascade de RPA.

Ces deux modèles permettent une interpolation continue entre les deux cas idéaux que sont le piston et le mélangeur parfaits.

1.4.4. représentation d'un réacteur réel

Pour rendre compte du comportement de réacteurs réels où l'écoulement est complexe, on est amené à compliquer les modèles élémentaires (figurés sur la Figure 12) en les associant (selon les possibilités de la Figure 13).

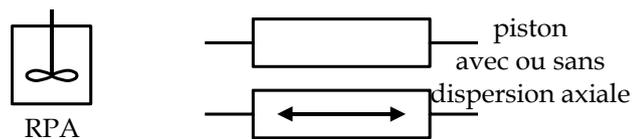


Figure 12 : Motifs élémentaires.

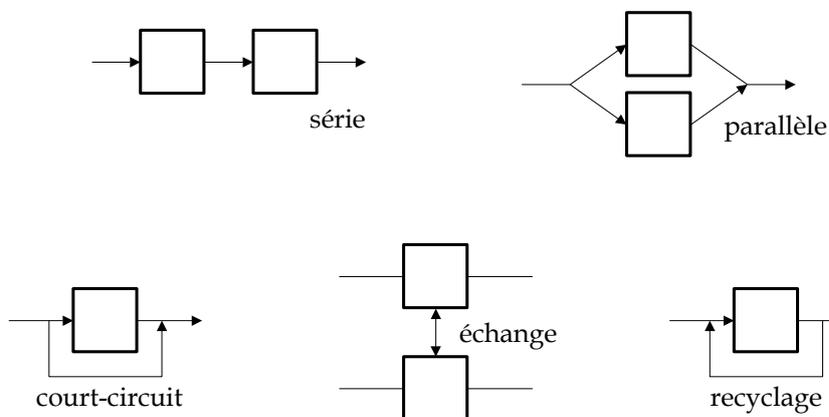


Figure 13 : Modes de liaison.

On dit qu'une association de réacteurs idéaux (par exemple celle de la Figure 14) est représentative d'un réacteur réel, et on l'appelle modèle, si les courbes de répartition des temps de séjour des molécules qui les traversent sont identiques. La courbe relative à l'association est calculée, et la courbe relative au réacteur est obtenue

expérimentalement en utilisant la technique des traceurs. Ce modèle n'est pas toujours unique, notamment pour les écoulements complexes.

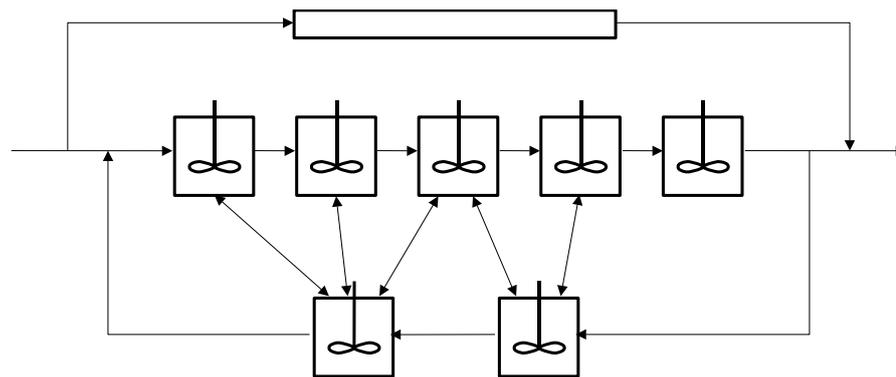


Figure 14 : Exemple de représentation d'un réacteur réel comme l'association de réacteurs idéaux.

représentation des défauts d'écoulement

La Figure 15 présente le modèle de Cholette et Cloutier. Le paramètre α permet de rendre compte des courts-circuits, et le paramètre β des zones stagnantes (recirculations).

La fonction DTS associée est :

$$E(t) = (1 - \alpha) \cdot \delta(t) + \frac{\alpha^2}{\beta \cdot t_s} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot t}{\beta \cdot t_s}\right)$$

La Figure 16 représente la DTS pour des valeurs de α et β données.

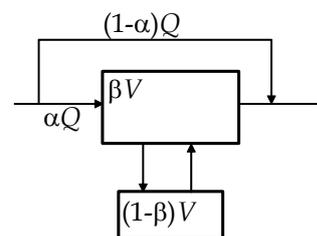


Figure 15 : Modèle de Cholette et Cloutier.

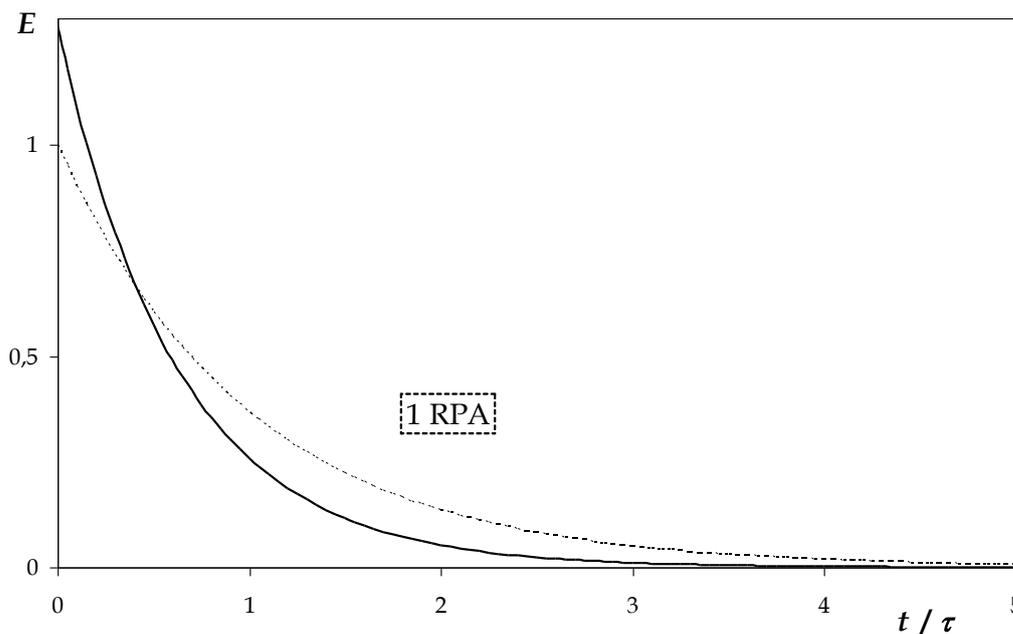


Figure 16 : Modèle de Cholette et Cloutier ($\alpha = 0,8$ et $\beta = 0,5$).

1.5. CONCLUSIONS

Les mesures de distribution des temps de séjour permettent de détecter les circulations défectueuses. Dans les installations industrielles, ces défauts peuvent apparaître lors de réutilisations d'équipements existants, ou bien lorsque la capacité de production varie, ou encore quand la conception a été imprécise. Lorsque l'on a détecté un défaut d'écoulement sur un réacteur industriel, on n'effectue pas forcément d'amélioration, car le gain de productivité escompté est parfois trop faible pour justifier une modification coûteuse de l'installation : mais il est important de connaître ces défauts et d'en tenir compte dans la marche de l'appareillage.

L'association adéquate de réacteurs idéaux avec les modes de liaison appropriés permet de modéliser l'écoulement réel dans un système. Ce modèle pouvant ensuite être utilisé par exemple pour calculer la conversion chimique dans un réacteur.

Lorsque l'on est confronté à un système trop complexe pour être immédiatement "calculé" à l'aide d'une approche analytique classique, on doit définir une approche quantitative plus globale. L'approche systémique s'appuie sur la relation entrée/sortie et sur la réponse du système à des stimuli extérieurs. Elle est complémentaire de l'approche analytique détaillée et fournit un autre type d'information : globale et souvent très efficace. La Distribution des Temps de Séjour est l'exemple le plus célèbre d'approche systémique, car elle fut extrêmement féconde.

☞ limites

Cette approche, souvent très efficace, a cependant des limites. En particulier du fait des conditions d'application (régime permanent, fluide incompressible), toutefois la généralisation est souvent possible.

La courbe de répartition des temps de séjour d'une association de réacteurs est indépendante de l'ordre dans lequel on les place, comme symbolisé sur la Figure 17. En chimie, cette indépendance est limitée au cas des réactions du premier ordre (les plus fréquentes toutefois). Pour les réactions d'un ordre différent, il convient d'étudier en outre les macro- et micromélanges.



Figure 17 : Deux configurations donnant la même DTS.