

Mesure de la durée des traitements Notion de distribution des temps de séjour

1. Contexte industriel

Différentes études conduites sur le traitement thermique des aliments pour animaux, montrent qu'il est possible de détruire les Salmonelles présentes dans ces produits en appliquant un barème temps/température (humidité).

Dans l'industrie, les procédés les plus utilisés pour réaliser ces traitements sont des procédés en continu. Leur efficacité dépend essentiellement de la maîtrise des facteurs temps et température ; le facteur temps étant le plus difficile à mesurer et à maîtriser, en raison du phénomène de dispersion des temps de séjour.

En effet, lorsqu'un produit est traité dans un système en continu (ou réacteur-mélangeur), la vitesse de passage des particules dans le système n'est pas homogène et cela a pour conséquence une hétérogénéité de la durée du traitement, phénomène qui constitue la dispersion des temps de séjour ou DTS.

Dans un procédé de destruction thermique de micro-organismes, ce phénomène revêt une grande importance, puisque les particules présentant les temps de séjour les plus courts peuvent quitter l'installation sans être décontaminées.

Ainsi, pour qualifier la durée du traitement dans un procédé en continu, il faut impérativement connaître la distribution des temps de séjour.

En mesurant les temps de séjour des particules dans le procédé et en regroupant ces données par classe, il est alors possible de :

- représenter graphiquement la distribution des classes de temps de séjour.
- décrire la population sur la base de leur temps de séjour à l'aide de paramètres.

2. Différents types d'écoulement dans un réacteur-mélangeur

L'application de la distribution des temps de séjour, à l'étude de l'écoulement des mélanges dans un mélangeur en continu a permis de définir différents types d'écoulement, dont 2 écoulements idéaux,

l'écoulement piston et l'écoulement en mélange parfait.

- Dans l'écoulement piston, la vitesse du produit est constante et uniforme sur la section du réacteur. Chaque particule qui entre dans le réacteur avance par tranche sans mélange avec les autres particules d'âges différents.
- Dans l'écoulement en mélange parfait, la composition du mélange est uniforme dans tout le volume du mélangeur-réacteur.

En pratique, dans un mélangeur-réacteur quelconque, des courbes intermédiaires entre les deux modèles sont souvent observées.

Ces 3 modèles d'écoulement sont schématisés dans la Figure 1 et la Figure 2.

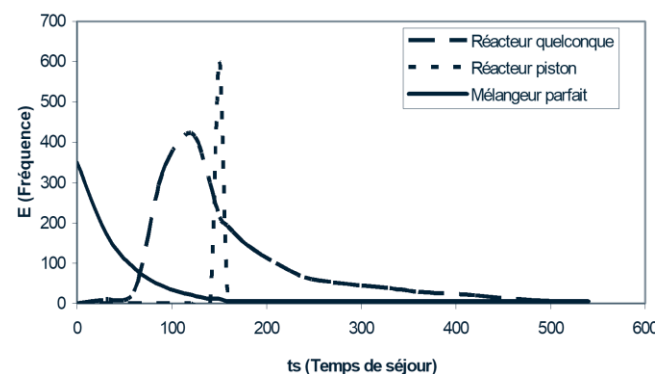


Figure 1 : Différents modèles d'écoulement - Densité de fréquence des temps de séjour

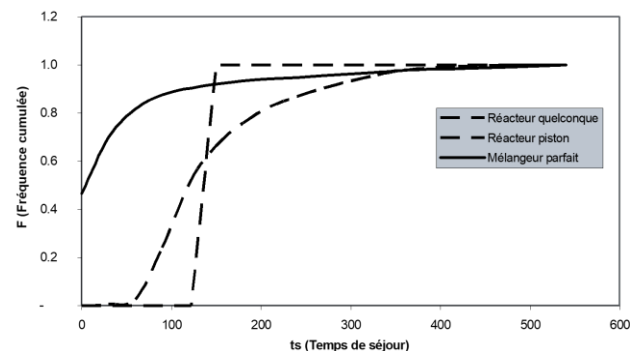


Figure 2 : Différents modèles d'écoulement - Fréquence cumulée des temps de séjour

3. Détermination expérimentale de la DTS au moyen de traceurs

3.1. Principe

La méthode consiste à injecter un traceur à l'entrée du mélangeur-réacteur et à le détecter à sa sortie.

3.2. Injection du traceur

Il existe deux modes d'injection, l'injection échelon et l'injection-impulsion.

Dans le cas de l'injection-échelon, l'injection de traceur est maintenue pendant toute la durée de l'essai, la quantité de traceur utilisée est importante, il faut maîtriser avec précision le débit d'injection du traceur.

Dans le cas de l'injection-impulsion, une quantité donnée de traceur est injectée à l'entrée du réacteur-mélangeur, pendant un temps très court, inférieur à 0,01 du temps de passage (J. Villiermaux, 1993). Cette méthode est utilisée dans l'industrie de la nutrition animale, car elle ne nécessite pas la maîtrise du débit du traceur et la quantité de traceur injecté est faible.

Les conditions d'injection des traceurs ont été décrites par J.J. Bimbenet (1995) et J. Villiermaux (1993, 1996). Pour ces auteurs, l'injection ne doit être effectuée que si le système est stationnaire et que le traceur ne perturbe pas le fonctionnement du réacteur. Il est préférable d'injecter le traceur dans des zones rétrécies où règne donc un régime turbulent qui assurera la réalisation du mélange. L'injection du traceur doit être répartie dans toute la section d'entrée du système étudié. La quantité de traceur injectée est définie en fonction de la quantité de traceur que l'on peut analyser à la sortie du conditionneur et du mode d'injection du traceur.

3.3. Prélèvement des échantillons à la sortie du réacteur-mélangeur et dosage du traceur

Les échantillons sont prélevés le plus près possible du mélangeur-réacteur pour éviter de prendre en compte dans la DTS du réacteur-mélangeur des perturbations ayant pour origine les circuits et équipements situés en aval de réacteur-mélangeur. Dans le cas d'injection-impulsion, la durée de la phase de prélèvements doit être supérieure à la durée du traitement et la période entre deux prélèvements doit être calculée de façon à obtenir environ 30 à 40 échantillons. Ce nombre d'échantillons étant nécessaire pour obtenir une distribution des temps de séjour représentative.

La méthode de dosage du traceur est choisie en fonction du traceur injecté dans le réacteur-mélangeur (Tecaliman 2004 a).

3.4. Traitement des données obtenues par Injection-impulsion

Le traitement des données permet d'établir des courbes de DTS (Loncin 1976) et de calculer un certain nombre de variables pour caractériser la distribution des temps de séjour.

3.4.1. La courbe des densités de fréquences

L'axe des abscisses correspond aux classes d'âge «Ti» ou classe de temps de séjour dans le procédé. L'axe des ordonnées correspond à la proportion de particules appartenant à une classe d'âge «Ti». (Figure 3).

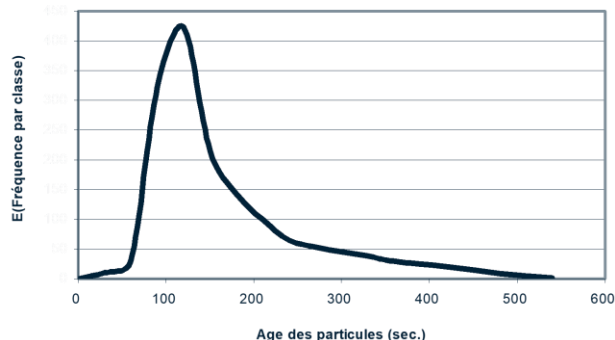


Figure 3 : Courbe type de DTS - Fonction E (Densité de fréquence des temps de séjour)

3.4.2. La courbe des fréquences cumulées

L'axe des abscisses correspond aux classes d'âge «Ti» ou classe de temps de séjour dans le procédé. L'axe des ordonnées correspond au cumul des densités de probabilité ou fréquences cumulées «F» des particules classées selon leur âge externe (Figure 4).

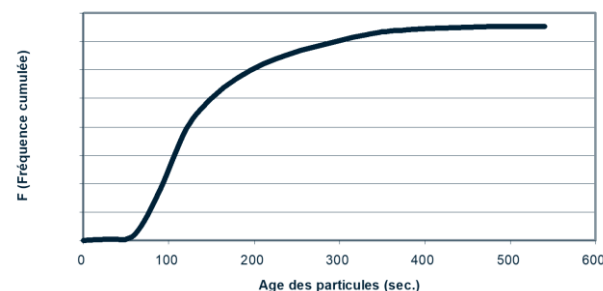


Figure 4 : Courbe type DTS - Fonction F (Fréquences cumulées des temps de séjour)

3.4.3. Les courbes normées

Cette représentation de la DTS permet d'avoir des échelles de temps et de concentration indépendantes du débit du réacteur, de la quantité de traceur injectée ou récupérée (Figure 5 et Figure 6).

Dans cette représentation, on porte en :

- abscisse le temps réduit qui est le rapport entre le temps réel et le temps de passage (T_p temps de passage est égal à la masse de produit

présente dans le procédé divisé par le débit du procédé - Tecaliman 2004 c).

- ordonnées, la concentration réduite qui est la concentration en traceur divisée par la concentration qu'aurait le traceur s'il était uniformément réparti dans le produit présent dans le réacteur-mélangeur.

La méthode de calcul des concentrations et temps réduits est présentée dans i'Tec_S13 (Tecaliman 2004 b).

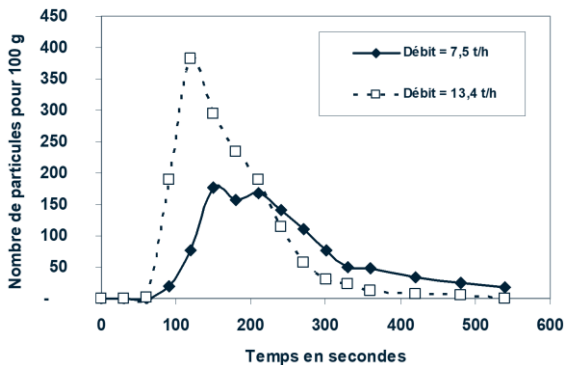


Figure 5 : Courbes de DTS - Fonction E (Densité de fréquence des temps de séjour) - Données brutes

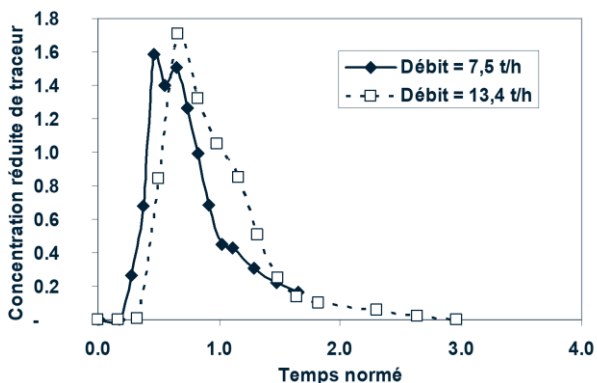


Figure 6 : Courbes de DTS - Fonction E (Densité de fréquence des temps de séjour) - Données normées

3.4.4. Les variables caractéristiques de la DTS

3.4.4.1 Cas général

3.4.4.1.1 Le taux de récupération du traceur

Le taux de récupération est égal au rapport entre les quantités de traceur récupérées et introduites au niveau du mélangeur. Il s'exprime en % et doit être compris entre 80 et 110%.

Un taux de récupération inférieur à 100% peut traduire :

- une destruction partielle du traceur dans le mélangeur- réacteur,
- une surestimation de la quantité de traceur injectée,
- une erreur systématique de dosage sur les échantillons prélevés à la sortie du conditionneur,

- un échantillonnage pas représentatif du flux de produit à la sortie du conditionneur (ex: fréquence d'échantillonnage faible ou irrégulière ou mesure de l'intervalle temps entre prélèvements erronée),
- une période d'échantillonnage trop courte, c'est à dire qui est arrêtée alors qu'il reste des particules de traceur dans le conditionneur.

Un taux de récupération supérieur à 100% peut traduire :

- une sous-estimation de la quantité de traceur injectée,
- la présence de traceur dans le produit traité avant injection du traceur dans le réacteur-mélangeur,
- une erreur systématique de dosage sur les échantillons prélevés à la sortie du réacteur-mélangeur.

3.4.4.1.2 Le temps de séjour moyen des particules dans le procédé : \bar{X}

C'est une estimation de la durée moyenne du traitement.

3.4.4.1.3 Le temps médian : Me

Il représente le temps nécessaire pour que 50 % des particules marquées soient passées dans le mélangeur-réacteur.

3.4.4.1.4 Le mode ou valeur dominante : Mo

Il correspond au temps de séjour le plus fréquent.

3.4.4.1.5 Le temps de séjour minimum

Le temps de séjour minimum des produits dans le réacteur-mélangeur est celui auquel apparaissent les premières particules de traceurs à la sortie du réacteur-mélangeur.

3.4.4.1.6 La période qui s'écoule entre les temps où 84 et 16% des particules ont séjourné dans le procédé

Ce critère permet d'évaluer le degré d'étalement de la distribution des temps de séjour. Il est calculé à partir des données cumulées, en prenant comme références les temps T16% et T84%, ce qui correspond à un effectif égal à 68% (84-16=68) de la population de particules. Une valeur faible de ce critère traduit une distribution des temps de séjour très centrée, ou une pente importante de la fonction cumulée (F).

3.4.4.2 Distribution des temps de séjour normale

3.4.4.2.1 Moyenne, mode et médiane

Dans ce cas de figure, la moyenne, la médiane et la valeur dominante ont des valeurs très proches (B. Scherrer 1984) et différents paramètres statistiques peuvent être calculés pour caractériser la DTS.

En comparant la moyenne, au mode et à la médiane, il est possible de caractériser la courbe de distribution des temps de séjour (Fonction E) :

- Si $\bar{X} = Mo = Me$, la courbe de distribution est symétrique
- Si $Mo < Me < \bar{X}$, la courbe de distribution est asymétrique à droite, elle présente une traîne.
- Si $\bar{X} < Me < Mo$, la courbe de distribution des temps de séjour est asymétrique à gauche.

3.4.4.2.2 Variance et écart-type

Ces deux paramètres permettent d'évaluer le degré d'étalement de la courbe de fréquence de distribution des temps de séjour. Des valeurs élevées de la variance ou de l'écart type traduisent une distribution des temps de séjour étalée.

3.4.4.2.3 Le coefficient d'asymétrie de la courbe de distribution des temps de séjour : α_3

Un coefficient égal à 0 traduit l'existence d'une courbe de fonction E symétrique, un coefficient supérieur à 0 traduit l'existence d'un étalement des temps de séjour sous la forme d'une traîne (étalement de la courbe vers la droite), un coefficient inférieur à 0 correspond à une distribution allongée vers la gauche.

3.4.4.2.4 Le coefficient d'aplatissement de la courbe de distribution des temps de séjour : α_4

Ce coefficient est indépendant du système d'unité de mesure et de la variance de la distribution. Il permet de comparer des distributions entre elles (Fonction E).

- Si $\alpha_4 = 3$, l'aplatissement de la courbe de distribution des temps de séjour correspond à celui d'une distribution normale
- Si $\alpha_4 > 3$ la courbe de distribution des temps de séjour est plus étroite qu'une courbe normale
- Si $\alpha_4 < 3$, la courbe de distribution des temps de séjour est plus étalée que la courbe normale.

4. Application de la distribution des temps de séjour dans l'industrie de la nutrition animale

4.1. Conception du matériel

Dans un procédé en continu, la distribution des temps de séjour est d'autant plus étalée que le volume utile du réacteur-mélangeur est élevé (Villiermaux 1996). Or comme la durée de

traitement est fonction du rapport débit/volume utilisé, il est donc nécessaire d'utiliser, avec des débits élevés, des réacteurs-mélangeurs de grand volume.

Dans l'industrie de la nutrition animale, plusieurs types d'équipements ont été conçus pour résoudre ce problème :

- le conditionneur thermique à double corps et axes corotatifs,
- les conditionneurs montés en série,
- un conditionneur associé à un maturateur à plusieurs étages.

4.2. Comparaison entre matériels ou conduite de matériels

La transformation des données brutes de distributions de temps de séjour en données normées permet de comparer différents matériels entre eux ou de déterminer le temps de séjour moyen à différents débits dans un procédé dont la DTS est connue (J. Lamoine 1999).

5. Bibliographie

Bimbenet et Loncin 1995, Bases du génie des procédés alimentaires, Edition Masson.

Lamoine J. 1999, Application industrielle de la mesure de la DTS, i'Doc_Q6, mars 1999, 43-46.

Loncin. M. 1976, Génie Industriel Alimentaire, Aspects Fondamentaux, Edition Masson.

Riou Y. 1999, Etude Bibliographique sur la distribution des temps de séjour, Rapport interne Tecaliman.

Scherrer 1984, Biostatistique, Edition Gaëtan Morin.

Tecaliman 2004a, Les traceurs de mesure de la distribution des temps de séjour. i'Tec_S12, novembre 2004.

Tecaliman 2004b, Protocole de mesure de la distribution des temps de séjour dans un procédé de traitement en continu. i'Tec_S13, novembre 2004.

Villiermaux J. 1993, Génie de la réaction chimique, conception et fonctionnement des réacteurs, Lavoisier, Paris.

Villiermaux J. 1996, Réacteurs chimiques, Description des écoulements non idéaux, Techniques de l'Ingénieur, J84, 1996, J4011, 11 - 28.