

Modélisation de l'écoulement des constituants dans un malaxeur industriel

Interprétation physique et capacités prédictives

RÉSUMÉ

Les recherches sur le malaxage engagées au début des années 1980 se sont appuyées sur une centrale de fabrication intégrant les deux cycles existants : le cycle discontinu (1980) et le cycle continu (1990).

Ce dernier étant le plus fréquemment employé pour la fabrication des matériaux de chaussée, il a fait l'objet d'études plus systématiques. Notamment, une modélisation du malaxage de graves traitées a été entreprise. Elle s'inspire d'une méthode utilisée en génie chimique : le malaxeur est assimilé à une succession de réacteurs parfaits dans lesquels les matériaux sont progressivement mélangés et poussés vers la sortie.

Le temps de séjour de chaque constituant est mesuré en le marquant par un traceur radioactif, et en décomptant dans le temps le nombre de particules marquées qui sortent du malaxeur. La modélisation est réalisée à partir de la distribution du temps de séjour des particules marquées. Deux paramètres physiques sont alors calculés : le temps de séjour moyen (T_s) et le nombre de réacteurs (J) auquel est assimilé le malaxeur.

Différentes expérimentations ont été menées depuis 1990. Elles ont permis de montrer l'intérêt de la méthode. L'objet des études présentées ici est de valider la méthode, notamment en vérifiant son aspect prédictif. Il est possible de déterminer la capacité de lissage du malaxeur lorsque les constituants sont soumis à des perturbations de dosage. Les résultats des perturbations réelles ont été comparés à ceux issus de la modélisation. Ils révèlent que le modèle est satisfaisant pour l'eau, contrairement à celui pour les éléments fins. Les résultats sont encourageants pour la modélisation des granulats. De plus, la mise en relation des deux paramètres (T_s) et (J) avec l'homogénéité du mélange a été appréhendée. Elle confirme que l'augmentation du temps de séjour moyen (T_s) contribue à améliorer l'homogénéité. En revanche, la relation entre le nombre de réacteurs (J) et l'homogénéité du mélange n'est pas conforme à ce que prévoit la théorie.

Les résultats sont intéressants mais montrent les limites de la méthode.

MOTS CLÉS : 31-36 - Malaxeur - Écoulement (fluide) - Mesure - Temps (durée) - Courbe (math.) - Essai - Distribution (stat.) - Modèle mathématique - Granulat - Granulométrie continue - Traitement des assises.

Pierre-Olivier VANDANJON
Chargé de recherche

Marie-Line GALENNE
Directeur de recherche
Chef de la section Exécution des chantiers routiers
Division Méthodes et matériels de construction et d'entretien des routes
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Jacques TERRIÈRE
Assistant
Chef de l'unité Physique des matériaux
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

Introduction

La description précise des écoulements dans un malaxeur continu est difficile. Cette difficulté provient du caractère polyphasique du mélange, de la différence de taille des constituants, de la géométrie du malaxeur et du caractère chaotique des trajectoires internes des particules. De plus, nous n'avons pas accès directement à l'intérieur du malaxeur en fonctionnement. Les études sur le malaxage au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) visant une meilleure maîtrise de la fabrication se sont donc, en premier lieu, naturellement orientées vers une description globale du système. Confrontés à des problèmes similaires, les chercheurs en génie chimique ont développé une approche « système » pour les réacteurs chimiques, utilisant la « distribution des temps de séjour » (DTS) des constituants.

Grâce à la maîtrise par le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées des méthodes de marquage par radio-isotope, cette modélisation issue du génie chimique a été appliquée au problème du malaxage. Les premières études ont principalement porté sur l'interprétation physique du modèle, à savoir l'étude des paramètres du modèle et l'analyse du pouvoir de lissage du malaxeur.

Cet article complète ces études antérieures en reliant ces paramètres à la qualité du mélange produit. De plus, une nouvelle utilisation de cette modélisation est proposée pour prévoir l'effet d'une perturbation de l'alimentation du malaxeur sur la production finale. Avant de présenter ces résultats, nous rappelons brièvement l'utilisation de la DTS ainsi que les résultats antérieurs à cette recherche.

Rappel sur la distribution des temps de séjour

L'objectif de ce rappel est d'introduire les éléments utiles à la compréhension de l'article (*cf.* Villermaux, 1993 pour une présentation complète ; Leclerc et *al.*, 1996 pour une application au malaxeur).

La distribution des temps de séjour (DTS) permet une description globale du malaxeur. Celui-ci est considéré comme un réacteur ou une succession de réacteurs dans lesquels les matériaux sont progressivement mélangés et poussés vers la sortie. Des particules marquées sont injectées dans le flux d'entrée du réacteur à un temps initial déterminé puis sont dénombrées dans le courant de sortie en fonction du temps. La durée de séjour des particules entre leur introduction (quasi simultanée pour toutes les particules marquées) et leurs sorties dépend de leur cheminement dans le malaxeur. La courbe représentant le pourcentage de particules sorties en fonction du temps, illustrée par la figure 1, est appelée distribution du temps de séjour (DTS). Le temps moyen de sortie d'une particule est calculé à partir de cette courbe, il permet d'accéder à la durée moyenne de présence d'une particule dans le malaxeur. Cette valeur est appelée le temps de séjour expérimental, noté T_s , d'une particule dans le malaxeur.

Une exploitation plus poussée des signaux d'entrée et de sortie permet la modélisation du malaxeur sous forme de réacteur chimique. Les paramètres sont ajustés de telle sorte que le signal de sortie calculé par le modèle soit le plus proche possible de la distribution du temps de séjour mesurée sur la production du malaxeur (fig. 2).

Généralement, deux types de modèles sont utilisés pour décrire le malaxage continu (*cf.* Leclerc et *al.*, 1996) :

- ① la cascade de réacteurs parfaitement agités **sans échange**,
- ② la cascade de réacteurs parfaitement agités **avec échange**.

■ Dans le premier cas, le modèle est une suite de réacteurs parfaitement agités mis en série. Dans un réacteur parfaitement agité, toutes les particules ont la même probabilité de sortir quel que soit le temps passé dans le réacteur. La cascade de réacteurs parfaitement agités possède deux paramètres : le temps de séjour moyen d'une particule dans la cascade, noté τ , et le nombre J de réacteurs mis en série. Les précédentes expérimentations ont montré que le temps de séjour moyen du modèle est différent du temps de séjour moyen déterminé expérimentalement. Le nombre J de réacteurs est considéré comme un indice de qualité du mélange : lorsque J est égal à 1, le réacteur est parfait, plus J augmente, plus la cascade de réacteurs se comporte comme un retard pur ce qui veut dire qu'aucun mélange n'est réalisé contrairement à ce que l'on attend d'un malaxeur. Ce comportement du modèle est illustré sur la figure 3, qui présente une variation de la réponse impulsionnelle du modèle en fonction du nombre J de réacteurs mis en série.

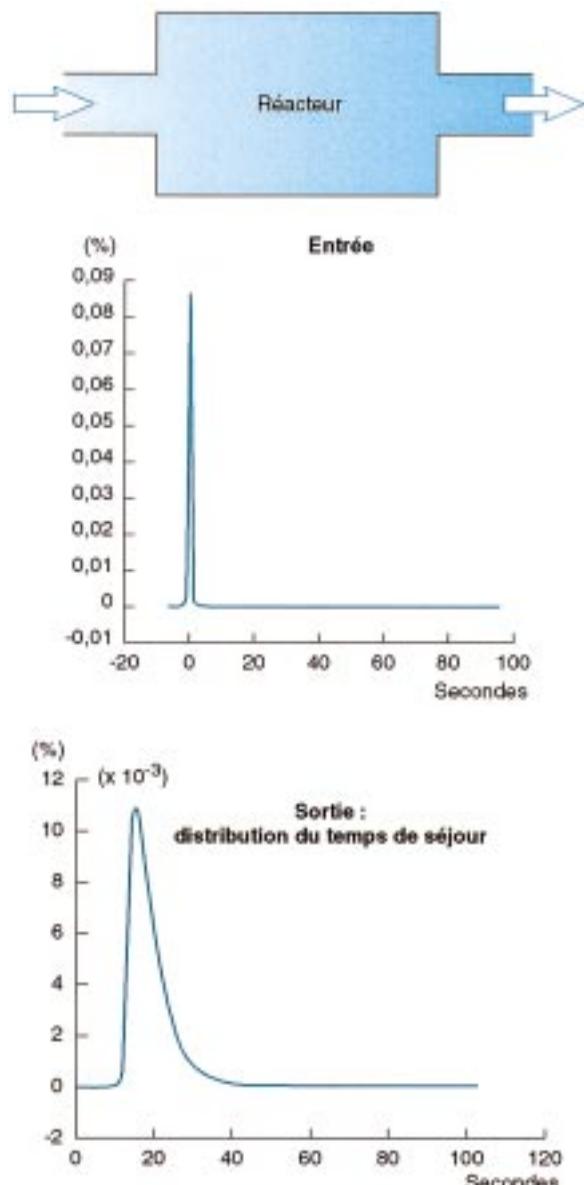


Fig. 1 - Principe de la distribution des temps de séjour.

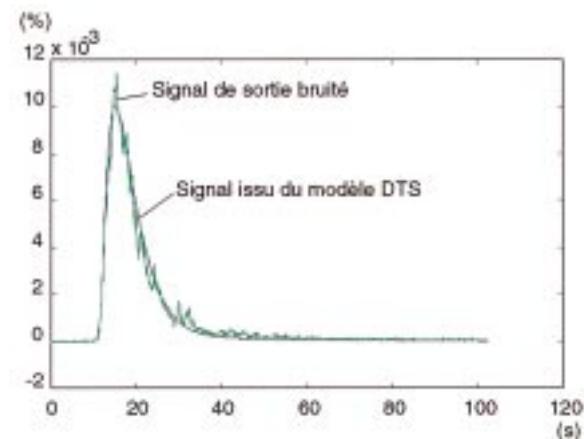


Fig. 2 - Ajustement du signal DTS au signal de sortie.

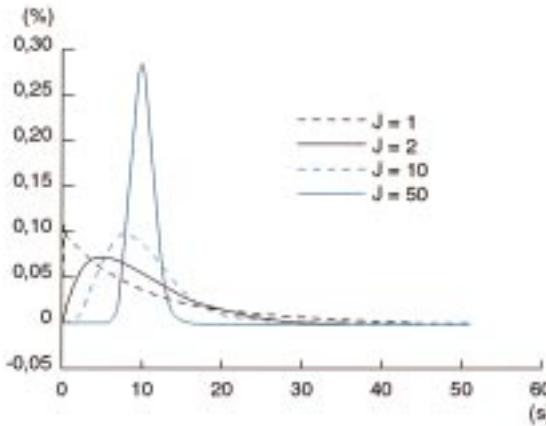


Fig. 3 - Variation de la réponse impulsionnelle du modèle selon le nombre de J.

■ Le modèle de la cascade de réacteurs parfaitement agités avec échange est une extension du premier cas. Un réacteur parfaitement agité avec échange comprend deux parties : un volume mobile et un volume stagnant. Le modèle est caractérisé par trois paramètres : le temps de passage dans le volume mobile, noté τ_m , le rapport des volumes stagnant et mobile, noté K, et le temps d'échange entre les volumes mobiles et stagnant, noté τ_e . Comme dans la modélisation précédente, la mise en série de ces réacteurs implique d'ajouter le paramètre J du nombre de réacteurs dans la cascade. À partir de ces quatre paramètres, il est possible de calculer un temps de séjour moyen τ que l'on peut comparer avec le temps de séjour expérimental.

À travers le paramètre J, la modélisation par la DTS apporte des informations supplémentaires par rapport à un calcul simple du temps de séjour, sur la qualité du malaxage. Un logiciel spécifiquement mis au point pour cette méthode facilite la détermination des différents paramètres (Leclerc et al., 1995). Il est à remarquer que l'identification des paramètres donne des résultats non entiers, notamment pour J, ce qui peut sembler surprenant car J représente un nombre de réacteur, *a priori*, entier. Cependant, ceci ne pose pas de problème d'interprétation :

- d'un point de vue physique car le malaxeur n'est pas physiquement constitué de plusieurs réacteurs ;
- d'un point de vue mathématique car un J non entier revient à travailler avec des dérivées non entières, ce qui est une technique connue dans le domaine de la modélisation de l'amortissement et de la commande (Oustaloup, 1999).

Les modèles utilisés sont relativement simples par rapport à des modèles issus de la mécanique des milieux granulaires ou de la mécanique des fluides. En contrepartie, ils présentent des limites. La modélisation s'appuie uniquement sur l'évolution du temps de séjour des constituants dans le malaxeur. Or, celui-ci varie selon les constituants : il existe donc un modèle de malaxeur par constituant. Il en est de même pour les conditions de production. Par exemple, une augmenta-

tion de la vitesse des pales du malaxeur entraîne un changement dans la distribution du temps de séjour des particules. Ceci se traduit par un modèle différent.

Cette modélisation des malaxeurs est intéressante par sa simplicité ; elle permet une meilleure compréhension des phénomènes, mais elle est limitée par son approche uniquement temporelle. Par le passé, les validations de ce type de modélisation ont porté sur le temps de séjour. Lors des expérimentations décrites dans cet article, deux types de validations ont été recherchées :

- ① celle concernant la valeur J et sa relation avec la qualité du mélange ;
- ② celle relative à la prédiction, par le modèle, des effets d'une variation de dosage d'un des constituants sur la production.

Expérimentations

Nous avons mené trois campagnes d'essais sur la station d'étude du malaxage du centre de Nantes (fig. 4) en 1995, 1996 et 1998. Nous avons pour cela utilisé un malaxeur continu pour matériaux traités aux liants hydrocarbonés mais mis en œuvre ici pour le malaxage des matériaux non traités (fig. 5).



Fig. 4 - Station d'étude du malaxage du centre de Nantes du LCPC.



Fig. 5 - Malaxeur utilisé lors des expérimentations.
 Caractéristiques : Malaxeur Ermont CM 120 -
 Nombre d'arbres : 2 - Nombre de bras : 14 -
 Nombre de palettes/arbre : 28 - Vitesse nominale : 116 tr/min -
 Plan de malaxage : facile, moyen, normal, difficile.
 Ces modalités correspondent au nombre de palettes montées en « rétro ».

Le matériau produit était une grave sableuse traitée au filler. La composition du mélange était (pourcentage rapporté à la masse du granulat) :

| | |
|---------------------|-------|
| ➤ 10/20 maraîchères | 33 %, |
| ➤ 2/10 maraîchères | 23 %, |
| ➤ 0/5 estuaire | 38 %, |
| ➤ filler | 6 %, |
| ➤ eau | 6 %. |

■ **En 1995**, le constituant marqué était l'eau. Trois modalités de débit : 120 t/h, 150 t/h et 180 t/h et trois modalités de vitesse de rotation des pales : 66 tr/min, 87 tr/min et 116 tr/min, ont été réalisées.

■ **En 1996**, la répétabilité de cette modélisation a été étudiée. Nous nous sommes placés dans l'une des conditions de production précédentes : 120 t/h et 66 tr/min. À cette occasion, l'effet de la puissance de marquage a été quantifié : les constituants peuvent être marqués radioactivelement de façon plus ou moins importante. Nous avons voulu vérifier que les paramètres du modèle (τ et J) étaient insensibles à ce paramètre.

■ **En 1998**, nous avons testé les capacités prédictives du modèle. Pour cela, une première série d'expérimentations a permis de déterminer le modèle pour chaque constituant (l'eau, le filler et les granulats). Ensuite, de vraies perturbations ont été opérées sur leur dosage de façon à évaluer la réponse du malaxeur pour chaque cas. Alors que la modélisation pour les fillers et l'eau a été obtenue grâce au marquage radioactif de ces constituants, celle de la fraction granulaire 10/20 a été basée sur la mesure de débit avant et après le malaxeur (*cf.* encart sur la station d'étude du malaxage du centre de Nantes). Nous avons alors comparé les conséquences observées de ces perturbations sur la production par rapport à celles prévues par le modèle.

L'étude de la distribution des temps de séjour dans le malaxeur pour l'eau et le filler s'effectue grâce à un marquage radioactif des constituants. Ceux-ci sont détectés par un système de photomultiplicateurs en entrée et en sortie du malaxeur. Nous avons fait appel aux Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC) d'Angers et d'Autun qui ont effectué un marquage de l'eau et du filler (Terrière et Carrez, 1999), (*cf.* encart sur le marquage radioactif des constituants dans le cadre de l'étude sur le malaxage).

Interprétation physique du modèle

L'interprétation physique du modèle de la DTS a déjà été étudiée lors de précédentes études (Leclerc et *al.*, 1996). Il s'agit, ici, de la compléter. Pour cela, nous étudierons trois points.

- 1 Nous avons comparé du point de vue de l'interprétation physique de leurs paramètres les deux types de modèle généralement utilisés : la cascade de réacteurs parfaitement agités avec échange et celle sans échange.
- 2 Traditionnellement, le **nombre J de réacteurs** dans la cascade caractérise la qualité du mélange. Cepen-

dant, deux études (Findeling, *et al.*, 1993) et (Leclerc et *al.*, 1995) semblaient donner des résultats contradictoires. Nous avons à nouveau vérifié cette hypothèse.

3 Nous avons fabriqué la même production plusieurs fois, nous avons alors évalué la précision du **temps de séjour**.

Choix du modèle

Dans l'article (Leclerc et *al.*, 1996), les auteurs indiquent que le modèle de cascade de réacteurs avec échange semble plus réaliste pour l'eau mais pose des problèmes d'optimisation pour les fines. Le tableau I compare, lors du marquage de l'eau, les valeurs des paramètres de chaque modélisation au temps de séjour expérimental et ceci pour un grand nombre d'essais.

Pour le modèle avec échange, les paramètres J et τ_e varient beaucoup contrairement au modèle sans échange (fig. 6). Cette variation ne s'expliquant pas physiquement, nous avons choisi de nous concentrer sur l'interprétation physique du modèle DTS sans échange avec uniquement deux paramètres. Lors des expérimentations décrites dans l'article (Leclerc et *al.*, 1996), le malaxeur utilisé était de géométrie différente : il était à fond plat tandis que le malaxeur Ermont est à fond semi-cylindrique. Le volume stagnant est donc plus important que dans le malaxeur Ermont. Ceci peut expliquer que le modèle avec échange était plus adapté pour le malaxeur à fond plat.

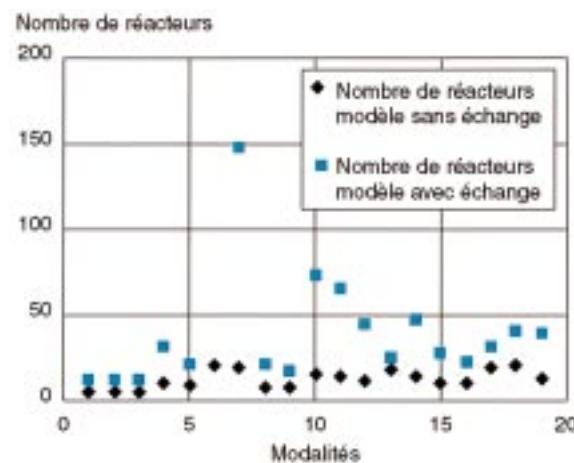


Fig. 6 - Comparaison du nombre de réacteurs pour les modèles avec et sans échange selon les modalités exprimées dans le tableau I.

Interprétation du nombre de réacteurs

Théoriquement, le nombre J de réacteurs est interprété comme caractérisant la qualité du mélange : plus J est important, plus le mélange est mauvais car plus le malaxeur se rapproche d'un retard pur. Lors des expérimentations de 1995, nous avons prélevé pour certaines productions quarante-huit échantillons dans le flux de sortie, sur lesquels nous avons mesuré la teneur en eau. Nous qualifions la qualité du malaxage de l'eau

TABLEAU I

Valeurs des paramètres des deux modèles de cascade de réacteurs parfaits avec et sans échange, lors de plusieurs productions.

Modèle sans échange : temps de séjour τ et nombre de réacteurs J .Modèle avec échange : J nombre de réacteurs, τ_m temps de séjour dans le volume mobile, τ_e temps d'échange entre les deux volumes, K rapport des deux volumes, temps de séjour t calculé. Temps de séjour expérimental Ts

| Modalités | Débit (t/h) | Vitesse (tr/min) | DTS sans échange | | DTS avec échange | | | | | Ts expérimental |
|-----------|-------------|------------------|------------------|-------|------------------|--------|--------------|------|-------|-----------------|
| | | | τ | J | τ_m (s) | J | τ_e (s) | K | t | |
| 1 | 120 | 116 | 7,94 | 5,41 | 6,41 | 11,61 | 3,09 | 0,39 | 8,91 | 9,98 |
| 2 | 120 | 116 | 7,82 | 5,63 | 6,41 | 12,39 | 3,55 | 0,41 | 9,04 | 10,18 |
| 3 | 120 | 116 | 7,89 | 5,53 | 6,48 | 11,14 | 3,56 | 0,37 | 8,88 | 9,86 |
| 4 | 120 | 87 | 9,32 | 10,73 | 7,74 | 30,98 | 2,20 | 0,31 | 10,14 | 11,66 |
| 5 | 120 | 87 | 9,28 | 9,32 | 7,92 | 21,28 | 2,88 | 0,30 | 10,30 | 12,15 |
| 6 | 120 | 66 | 12,63 | 20,48 | 9,36 | 313,25 | 1,19 | 0,41 | 13,20 | 14,39 |
| 7 | 120 | 66 | 12,80 | 19,92 | 9,54 | 147,73 | 1,17 | 0,39 | 13,26 | 14,58 |
| 8 | 150 | 116 | 7,45 | 8,09 | 6,27 | 20,38 | 2,70 | 0,34 | 8,40 | 9,33 |
| 9 | 150 | 116 | 7,52 | 7,71 | 6,48 | 16,46 | 3,30 | 0,33 | 8,62 | 9,69 |
| 10 | 150 | 87 | 9,37 | 15,50 | 7,42 | 73,28 | 1,33 | 0,35 | 10,02 | 11,27 |
| 11 | 150 | 87 | 9,24 | 14,10 | 7,42 | 65,29 | 1,61 | 0,35 | 10,02 | 11,20 |
| 12 | 150 | 87 | 9,37 | 12,40 | 7,70 | 43,80 | 2,01 | 0,34 | 10,32 | 13,21 |
| 13 | 150 | 66 | 12,90 | 17,72 | 12,37 | 24,73 | 10,17 | 0,26 | 15,58 | 15,66 |
| 14 | 150 | 66 | 13,09 | 15,02 | 11,69 | 47,61 | 5,82 | 0,35 | 15,78 | 16,56 |
| 15 | 180 | 116 | 7,15 | 10,24 | 5,95 | 27,91 | 1,89 | 0,32 | 7,85 | 7,94 |
| 16 | 180 | 116 | 7,02 | 10,12 | 6,15 | 21,59 | 2,50 | 0,28 | 7,87 | 8,59 |
| 17 | 180 | 87 | 9,19 | 20,14 | 8,78 | 30,91 | 3,66 | 0,14 | 10,01 | 10,35 |
| 18 | 180 | 87 | 9,22 | 20,63 | 8,49 | 40,62 | 2,18 | 0,16 | 9,85 | 10,30 |
| 19 | 180 | 66 | 12,52 | 13,07 | 11,09 | 39,44 | 6,11 | 0,37 | 15,19 | 15,53 |

dans le mélange par la dispersion de l'eau, plus l'écart type sera faible et meilleur sera le mélange. Cette dispersion de l'eau a été comparée aux valeurs de J . La figure 7 qui exprime J en fonction de la dispersion de l'eau montre une relation opposée à celle prévue par la théorie. Donc J ne peut pas être interprété comme un indicateur de la qualité du mélange.

Calcul du temps de séjour

Le temps de séjour calculé par la DTS : τ , peut être comparé au temps de séjour expérimental Ts . Le temps de séjour déterminé par les modèles est toujours inférieur au temps de séjour expérimental comme l'indique la figure 8, toutefois, les tendances sont identiques.

Le temps de séjour expérimental est délicat à définir. Il est notamment influencé par les caractéristiques du marquage (puissance et longueur de l'impulsion) comme l'indique le tableau II, parce que ces conditions modifient l'intégrale du signal de sortie (cf. fig. 2). Un calcul d'erreur montre que cette intégrale est très sensible au bruit de fond de la méthode de traçage radioactif. En revanche, le temps de séjour τ calculé par la DTS apparaît moins sensible au prétraitement des signaux et

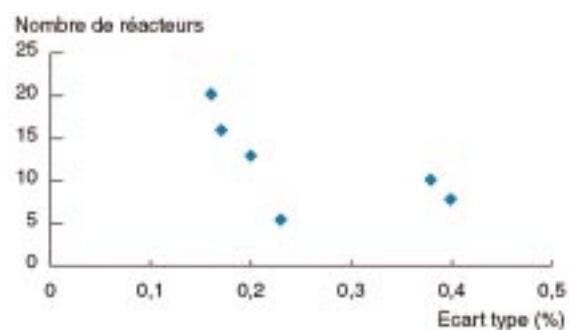


Fig. 7 - Évolution du nombre de réacteurs (J) en fonction de la dispersion de l'eau.

TABLEAU II

Valeurs des temps de séjours expérimental (Ts) et modèle (τ) lors de la variations des conditions de marquage de l'eau

| Essai | Ts | τ |
|-------|-------|--------|
| 021 | 15,26 | 13,87 |
| 051 | 16,32 | 13,99 |
| 131 | 17,22 | 14,71 |
| 151 | 16,05 | 14,23 |

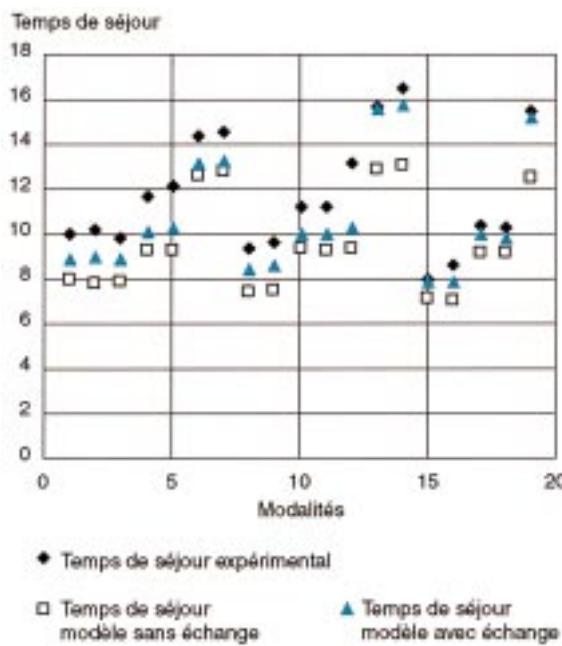


Fig. 8 - Comparaison des temps de séjour calculés par les modèles au temps de séjour expérimental suivant les modalités du tableau II.

nous semble donc plus apte à caractériser le temps de séjour réel des matériaux dans le malaxeur.

La comparaison du temps de séjour à la qualité du mélange a été étudiée. La figure 9 montre que la qualité du mélange dépend du temps de séjour : plus le temps de séjour est long, meilleur est le mélange. Ce résultat et l'étude précédente sur la sensibilité du paramètre à la puissance de marquage montrent que ce paramètre du modèle est important pour l'analyse du malaxage.

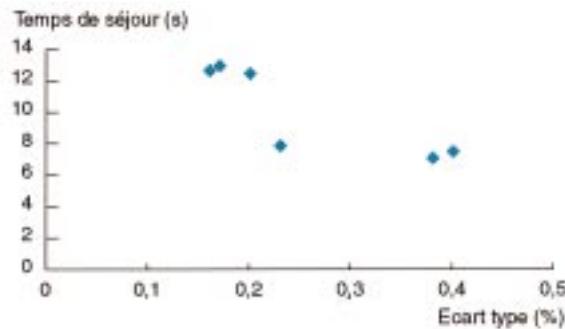


Fig. 9 - Évolution du temps de séjour du modèle en fonction de la dispersion de l'eau.

Capacités prédictives de la modélisation

La modélisation a deux objectifs : mieux comprendre le phénomène modélisé, et pouvoir le prédire. Dans cette partie, nous allons évaluer l'application de la DTS au malaxage dans l'objectif de prévoir les conséquences d'une anomalie de l'alimentation du malaxeur sur sa production.

Nous avons volontairement perturbé l'alimentation du malaxeur. Des analyses granulométriques en sortie du malaxeur permettent de mesurer la répercussion de cette perturbation sur la production. Les signaux de la perturbation d'alimentation sont mis en entrée de notre modèle DTS et nous comparons la sortie du modèle DTS avec les résultats des mesures sur la production réelle.

Il faut noter, ici, que nous violons sciemment les hypothèses de modélisation du malaxeur par la DTS car celles-ci supposent que la production est stabilisée. Cependant, la modélisation est encore valide si l'écoulement dans le malaxeur n'est pas beaucoup modifié par la perturbation.

Les capacités prédictives du modèle DTS sont évaluées pour trois constituants : l'eau, le filler et les granulats 10/20.

Plan d'expérience

Lors des expérimentations de 1998, nous avons choisi d'effectuer des perturbations qui sont susceptibles de rendre la production inacceptable du point de vue du cahier des charges des ouvrages (épreuve de convenance de fabrication des graves non traitées – cf. tableau III).

TABLEAU III
Spécifications issues du plan qualité type
du contrôle extérieurs chaussées

| Paramètre mesuré | Écart maximal |
|---|------------------------------|
| Teneur en eau | +/- 0,25 % en valeur absolue |
| Teneur en liant (filler pour l'expérimentation) | +/- 0,25% en valeur absolue |
| Passant à D | +/- 2 % en valeur absolue |
| Passant à 10 mm | +/- 4 % en valeur absolue |

Prévision de l'évolution de la teneur en eau du matériau produit du fait d'une perturbation sur l'alimentation en eau du malaxeur

L'étape d'identification du modèle fournit un temps de séjour de 14 s pour l'eau. Le débit d'eau, lors de la perturbation en eau, a été mesuré. Ce signal est nommé entrée. Le matériau en sortie du malaxeur a été prélevé toutes les 3 s, afin de mesurer la teneur en eau : le signal correspondant à cette mesure est noté sortie mesurée. Cette valeur de la teneur en eau réelle est comparée avec celle prédicta par le modèle DTS, identifiée sous le terme prévision DTS. La figure 10 indique ces trois signaux.

De notre point de vue, le modèle prévoit correctement l'effet de la perturbation sur la production compte tenu de la précision de mesure.

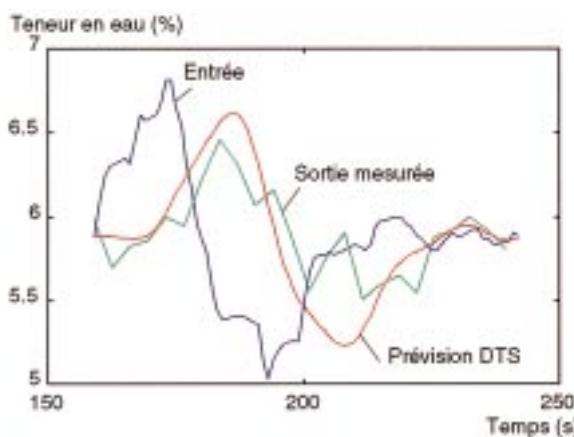


Fig. 10 - Capacité prédictive du modèle DTS pour l'eau.

Prévision de l'évolution de la teneur en fines du matériau produit du fait d'une perturbation sur l'alimentation en filler du malaxeur

Le temps de séjour des filler d'après le modèle DTS est de 11 s. De la même façon que pour l'eau, l'alimentation en filler a été volontairement modifiée, la figure 11 illustre cette perturbation. La production du malaxeur a été échantillonnée toutes les 3 s afin de mesurer la teneur en filler en utilisant le banc d'analyse granulométrique (BAG) (Vandanjon, 1999). Les différents signaux, issus des mesures ou de la prédition par le modèle DTS, sont représentés sur la figure 12.

De notre point de vue, la prédition par la DTS n'est pas satisfaisante car elle est décalée d'environ 10 s avec la courbe réelle. Ce décalage n'est pas seulement expliqué par l'incertitude de mesure. Toutefois, la forme de la perturbation est bien prédictée.

Prévision de l'évolution de la teneur en granulats du matériau produit du fait d'une perturbation sur l'alimentation en granulats du malaxeur

Par rapport à l'eau et aux fillers, la méthodologie de la modélisation du malaxage des granulats est différente : les granulats ne sont pas marqués par du produit radioactif mais leur débit est mesuré par un débitmètre de bande. (cf. encart sur la station d'étude du malaxage du centre de Nantes). Seule l'alimentation de la fraction granulaire 10/20 a été perturbée.

L'entrée du modèle est le signal du débitmètre de bande. Le signal de sortie est également mesuré par un débitmètre de bande qui se situe après le malaxeur. L'inconvénient provient de ce que ce débitmètre mesure le débit de l'ensemble de la production et non pas de la seule fraction granulaire 10/20. La comparaison entre ces deux signaux permet d'identifier difficilement, compte tenu du bruit sur les signaux, le temps de séjour par le modèle DTS : celui-ci vaut 11 secondes.

Pour tester le pouvoir prédictif du modèle, nous avons provoqué une perturbation différente de celle qui a permis l'identification du modèle. De la même façon que pour l'eau et le filler, nous avons échantillonné la production et mesuré la teneur en 10/20 en utilisant le

BAG. Nous avons comparé l'évolution de cette teneur avec la sortie du modèle DTS. Ces signaux se retrouvent sur la figure 13. Compte tenu de l'imprécision des signaux, cette modélisation semble correcte.

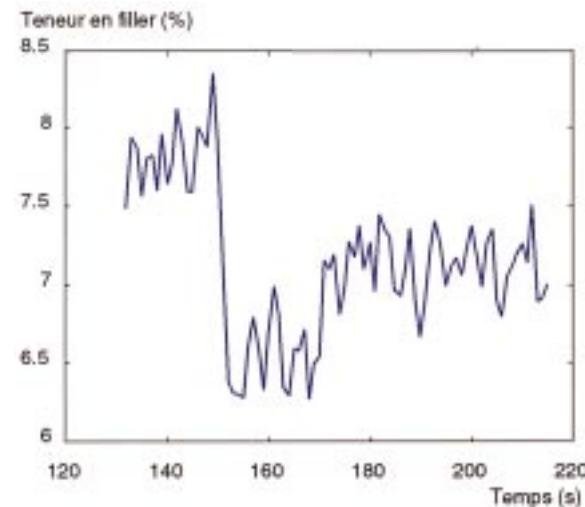


Fig. 11 - Perturbation du débit de fillers à l'entrée du malaxeur.

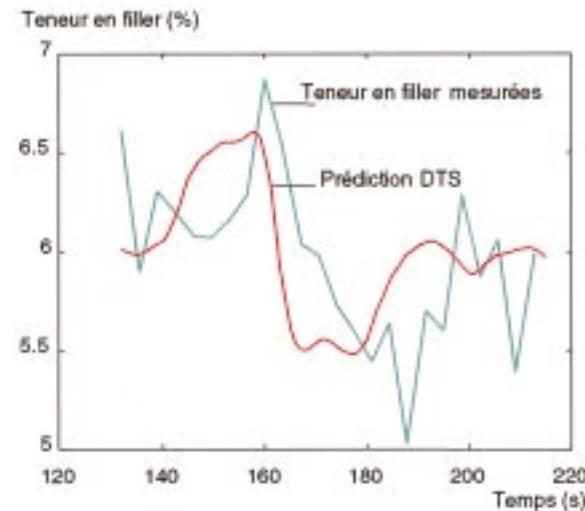


Fig. 12 - Capacité prédictive du modèle DTS pour les fillers.

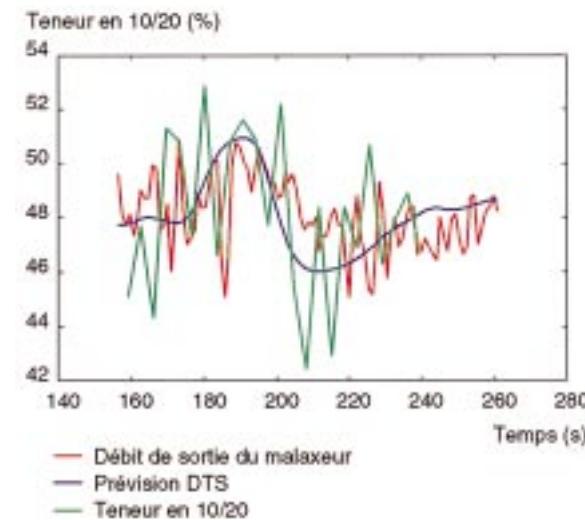


Fig. 13 - Capacité prédictive du modèle DTS pour les granulats.

Nous avons aussi cherché à effectuer des perturbations conjointes sur le débit d'eau et sur le débit de gravillons. Les perturbations sur les débits de gravillons masquent les perturbations sur le débit d'eau, rendant l'interprétation des signaux impossible.

Conclusion

Nous avons évalué la modélisation des malaxeurs par la méthode issue du génie chimique de la distribution des temps de séjour selon deux axes :

- ① l'interprétation physique des paramètres des modèles ;
- ② la capacité prédictive du modèle.

■ En ce qui concerne l'**interprétation physique des paramètres des modèles**.

- Contrairement à ce qui est prévu par la théorie, le paramètre « nombre de réacteurs » du modèle n'influence pas directement la qualité du mélange.
- En revanche, le paramètre « temps de séjour » des différents constituants dans le malaxeur caractérise bien la qualité de la production. Dans nos expériences, ce temps de séjour est de 14 s pour l'eau, 11 s pour le filler. Nous retrouvons là un résultat connu qui indique que le cheminement du filler et de l'eau dans le malaxeur est différent. En ce qui concerne les granulats, un premier résultat grossier indique un temps de séjour de l'ordre de 11 s.

■ Les **capacités prédictives du modèle** sont différentes selon les constituants.

- En ce qui concerne le filler, le modèle n'est pas directement opérationnel : il ne prévoit pas correctement la

partie de la production qui est affectée par une perturbation sur l'alimentation en fillers. Il manque, ici, des expérimentations pour mieux analyser ce problème.

- En ce qui concerne l'eau, les capacités prédictives du modèle sont vérifiées : l'amplitude de la variation de la teneur en eau du fait d'une perturbation sur l'alimentation en eau est correctement prédictée.
- Pour les granulats, les résultats sont encourageants mais doivent être confirmés.

■ Nous devons indiquer que ces résultats ne sont liés qu'à un type de malaxeur. Selon le malaxeur, les paramètres du modèle et la structure du modèle (modèle sans échange ou avec échange) sont différents. Cependant, ces résultats permettent d'aboutir aux conclusions suivantes.

- En prenant acte du fait que les temps de séjour sont différents selon les constituants, ceci implique que la composition du mélange dans le malaxeur est différente de celle de la sortie. Au sein du malaxeur, le mélange contient plus d'eau.
- Les temps de séjour des constituants sont courts par rapport au temps de malaxage des centrales discontinues (cf. article 4311 dans ce même bulletin). Ceci montre que des innovations dans le domaine des centrales discontinues sont possibles pour améliorer leur efficacité.
- Il est possible de construire un modèle simple de malaxeur qui permet de prévoir l'influence des perturbations de l'alimentation sur la qualité du mélange produit. Il doit être souligné que ces résultats sont issus d'expérimentations lourdes et de conditions de mesure difficiles. Les résultats présentés pourront être affinés et étendus à travers de nouvelles expérimentations.

Station d'étude du malaxage du centre de Nantes

Basée sur le principe d'une centrale de fabrication classique, cette station permet de réaliser deux cycles de fabrication :

- un cycle continu ;
- un cycle discontinu.

- L'étude du premier cycle a principalement permis d'acquérir des connaissances sur la capacité de lissage du malaxeur dont l'article présenté fait le bilan, et sur l'effet des paramètres de fonctionnement d'un malaxeur (vitesse, débit, plan de palettage) et ce pour quelques exemples de malaxeurs (Ermont, SAE, etc.). Ces essais ont principalement utilisés des graves traitées ou non, et des enrobés à froid.
- Le cycle discontinu a été employé lors d'expérimentations sur des bétons classiques ou des mélanges particuliers (argile-ciment, incorporation de cendres volantes et autres additions) malaxés classiquement (malaxeurs Couvrot ou Pataud) ou de façon innovante (Couvrot-LCPC à deux étages). Les expériences relatées dans cet article s'appuient sur le cycle continu, ce dernier sera donc décrit.

Les trois principales étapes de réalisation d'un essai de fabrication seront explicitées : les **procédures de fabrication**, les **informations recueillies** et enfin les **analyses effectuées**.

① Procédures de fabrication

Équipée d'un automatisme NIGGEMAN, dédié à cette installation, la centrale peut fabriquer des mélanges à partir de trois doseurs volumétriques de 350 t/h pour les différentes fractions granulaires et d'un doseur pondéral de 200 t/h pour le sable. Le dosage de l'eau est volumétrique au débit maximal de 18 m³/h. Deux types de fines peuvent être incorpo-

réées. Elles sont régulées par un alvéolaire à la cadence maximale de 24 t/h. Chacun de ces doseurs est calibré lors d'une campagne d'essais de façon à réajuster les valeurs délivrées par l'automatisme. Les gravillons et la sable sont collectés par un tapis unique équipé d'une table de pesage, de précision meilleure que 1 %. La même table de pesage est installée en sortie du malaxeur sur le tapis échantillonneur. Un petit automate complémentaire permet d'élargir les commandes traditionnelles par des commandes spécifiques sur les temps et les types d'introduction des constituants (constante, par créneau, etc.).

2 Informations recueillies

Les débits des constituants sont enregistrés (fig. A et B), on peut donc caractériser la régularité de fabrication. D'autres informations sont collectées sur le déroulement du malaxage telles que la vitesse du malaxeur, sa puissance ainsi que le débit des matériaux avant (non compris l'eau et le filler) et après le malaxeur (fig. C).

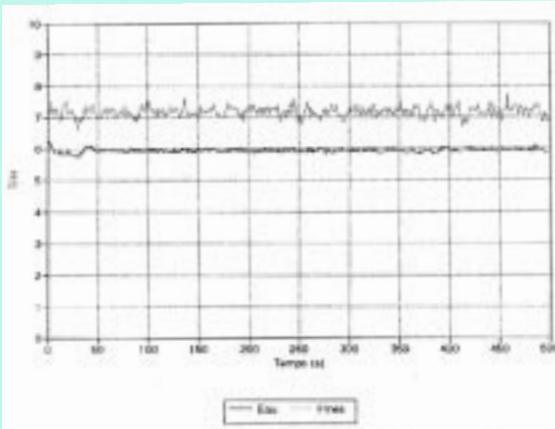


Fig. A - Enregistrements des débits de l'eau et des fines lors de la fabrication.

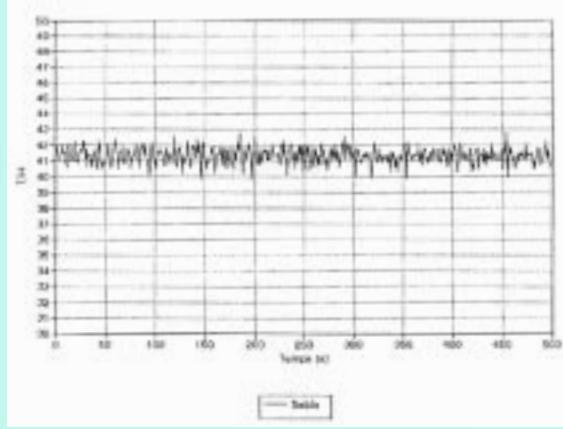


Fig. B - Enregistrement du débit de sable lors de la fabrication.

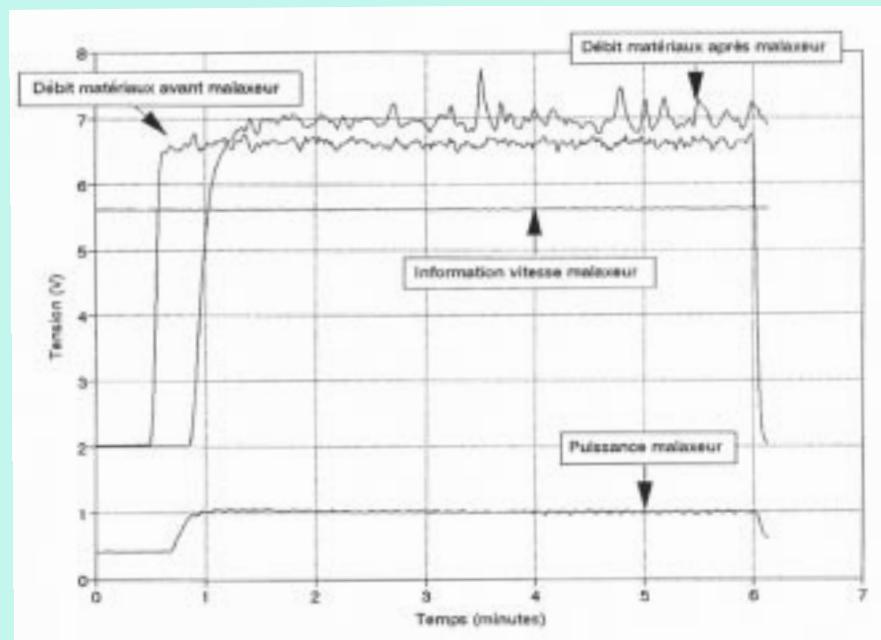


Fig. C - Enregistrements du déroulement du malaxage : vitesse et puissance de malaxage, débit des matériaux avant et après malaxeur.

3 Analyses effectuées

L'étude du malaxage nécessite d'analyser le matériau fabriqué. Cette analyse passe par une étape de prélèvement du matériau en sortie de malaxeur. Le tapis échantillonneur d'une longueur de 11 m permet d'avoir une importante quantité de matériau pour cette opération. Pour effectuer les prélèvements, deux méthodes sont possibles, soit une méthode

manuelle, soit une méthode automatique. Dans ce cas, un prélevageur automatique extrait une section complète de la veine de matériau (largeur x épaisseur) d'une masse correspondant à environ 2 kg. La première méthode permet de choisir l'emplacement et la masse du prélèvement, par contre elle est dépendante de l'opérateur, et donne donc lieu à plus d'incertitudes de mesures. Pour représenter correctement la fabrication, un certain nombre de prélèvements sont réalisés (jusqu'à quarante-huit pour une modalité de fonctionnement) généralement en double, la moitié étant destinée à la mesure de la teneur en eau et l'autre moitié à la détermination de la courbe granulaire. Grâce au banc d'analyse granulométrique (BAG), la courbe sera obtenue automatiquement (fig. D).

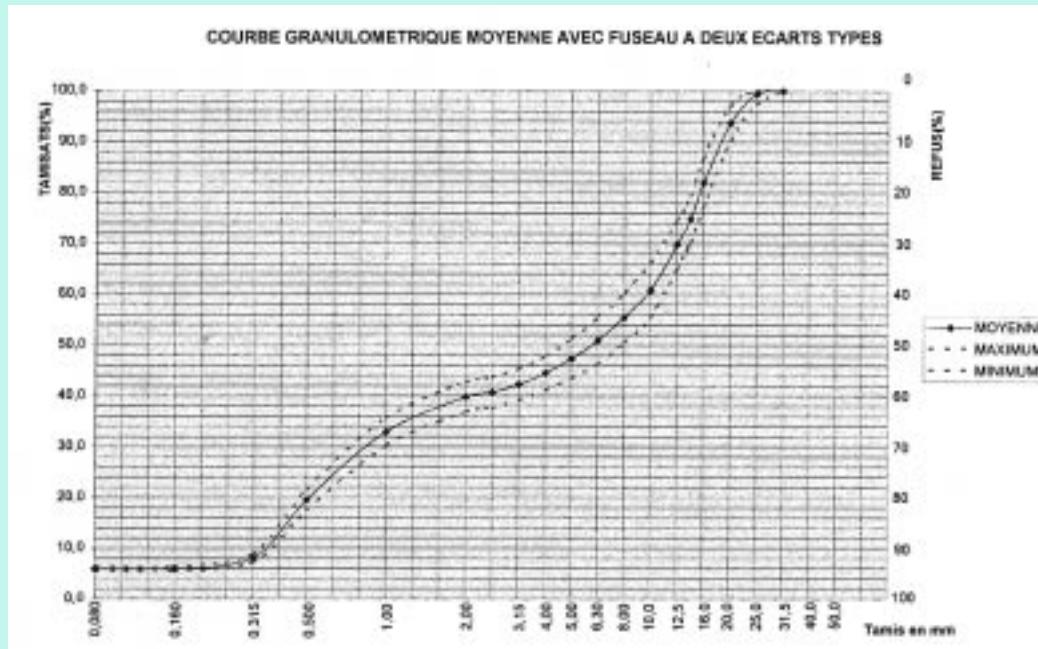


Fig. D - Fuseau granulaire issu de l'analyse de quarante-huit prélèvements au banc d'analyse granulométrique.

L'ensemble de ces équipements permet d'étudier un malaxeur ou d'évaluer les difficultés de malaxage d'un matériau nouveau, traité avec un liant hydraulique ou hydrocarboné à froid.

Le marquage radioactif des constituants dans le cadre de l'étude sur le malaxage

Les essais par marquage sur un malaxeur consistent à fixer un produit radioactif sur un élément du mélange (par exemple, l'eau, le bitume, une classe de granulats, une poudre minérale ou un adjuvant, etc.), afin de le doser à distance par le rayonnement émis.

Les mesures, non destructives, peuvent se réaliser en continu et à cadence élevée sur bande transporteuse, sur les matériaux en tas ou mis en place, ou encore sur des prélèvements d'échantillons.

Les marqueurs utilisés sont l'indium 113 m ou le technétium 99 m, obtenus à partir de générateurs médicaux amenés sur le site au moment de l'expérimentation. Ils sont émetteurs gamma, ce qui permet de les détecter facilement à travers une dizaine de centimètres de matériaux à l'aide de photo-scintillateurs.

On utilise un minimum de produit et du fait que ces marqueurs présentent une courte durée de vie, leur radioactivité disparaît spontanément avec une période respective de 1,4 et 6 h. Nous rappelons ici que la mise en œuvre de matières radioactives ne peut se faire sans les autorisations administratives garantissant le respect de la réglementation.

Dans le cadre de ces mesures de DTS (distribution de temps de séjour) sur malaxeur continu, le marquage de l'eau s'effectue par introduction de la solution radioactive du générateur dans un réservoir plombé de 3 l contenant la quantité

d'eau nécessaire aux essais. On injecte alors, sous pression d'air comprimé à l'aide d'une électrovanne programmable, une impulsion brève d'eau marquée (environ 50 cm³ en 0,2 s), dans la canalisation d'eau d'ajout du malaxeur.

Les poudres minérales sont marquées, quant à elles, sur 200 g environ par percolation du liquide marqué suivi d'un séchage. On peut augmenter la quantité marquée obtenue par mélange avec des poudres inactives dans un mélangeur de 100 l et injecter en impulsions ou en continu dans le circuit des fines d'apport.

L'enregistrement numérique des comptages radioactifs est alors déclenché sur un micro-ordinateur en continu, avec un pas de mesure de 0,1 s, pour relever la concentration de l'onde radioactive passant devant les détecteurs d'entrée (fig. A) et de sortie du malaxeur (fig. B).



Fig. A - Détecteur d'entrée (canalisation d'eau d'ajout).



Fig. B - Comptage des particules marquées sur le tapis échantillonneur en sortie de malaxeur.

- VILLERMAUX J. (1993), *Génie de la réaction chimique : conception et fonctionnement des réacteurs*, Technique et Documentation, Lavoisier.
- LECLERC J.-P., MUHR H., FINDELING C., TERRIÈRE J., CHARONNAT Y. (1996), Modélisation de l'écoulement de l'eau et du filler dans un malaxeur industriel et détermination de son pouvoir de lissage, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **201**, janvier-février.
- LECLERC J.-P., DETREZ C., BERNARD A., SCHWEICH D. (1950), DTS : un logiciel d'aide à l'élaboration de modèles d'écoulement dans les réacteurs, *Revue de l'Institut français du Pétrole*, vol. 50, **5**, septembre-octobre.
- FINDELING C., MUHR H. (1993), *Modélisation de l'hydrodynamique dans un malaxeur continu*, Rapport PROGEPI AV92-35 PROG 123, septembre.
- LECLERC J.-P., DUMAS P., CHARONNAT Y. (1995), Estimation des temps de séjour et des masses de l'eau et du filler dans un malaxeur industriel, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **196**, mars-avril.
- OUSTALOUP A. (1998), Les mathématiques de l'amortissement, *Pour la science*, **253**, novembre.
- TERRIÈRE J., CARREZ B. (1999), *Marquage radioactif de poudres minérales au Technetium pour l'étude des mélanges*, CETE de l'Ouest, 31.92.98.005, mars.
- VANDANJON P.-O. (1999), Le Banc d'Analyse Granulométrique : évaluation et utilisation, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **222**, juillet-août.

ABSTRACT

Modelling the flow of ingredients in an industrial mixer : physical interpretation and predictive power

P.-O. VANDANJON, M.-L. GALLENNÉ, J. TERRIÈRE

The research into mixing that was started in the early 1980s involved both types of plant, batch mixing plants (1980) and continuous mixing plants (1990).

As the latter are more frequently used to manufacture pavement materials, they were investigated more systematically. In particular, the mixing of bound granular materials was modelled. This was based on a technique used in chemical engineering – the mixer is treated as a succession of perfectly-mixed reactors in which the materials are progressively mixed and pushed towards the outflow.

The residence time of each constituent is measured by marking it with a radioactive indicator and observing the number of marked particles leaving the mixer. Modelling was conducted on the basis of the distribution of the residence time of the marked particles. Two physical parameters were then computed, the mean residence time (T_s) and the number of reactors (J) the mixer was considered to contain.

A variety of experiments have been conducted since 1990 and have shown the value of this technique. The purpose of the studies described here was to validate the technique, with particular regard to its predictive power. It is possible to determine the ability of the mixer to smooth out dosage irregularities. The results from real irregularities were compared with the results from modelling. This showed that the model for water was satisfactory, unlike that for fine particles. The results for the modelling of aggregate particles were encouraging. Furthermore, the attempt was made to connect the parameters (T_s) and (J) with mix homogeneity. This confirmed that an increase in the mean residence time (T_s) improves homogeneity. However, the relationship between the number of reactors (J) and homogeneity did not confirm the theoretical prediction.

The findings are of interest but reveal the limits of the method.