

Fabrication du béton hydraulique

par **Yves CHARONNAT**

*Directeur de Recherche
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

1. Production du béton	C 2 225 - 2
1.1 Rôle de la fabrication	— 2
1.2 Modes de production du béton.....	— 4
2. Fabrication du béton	— 7
2.1 Chaîne de production	— 7
2.2 Stockage des constituants.....	— 9
2.3 Dosage des constituants.....	— 14
2.4 Malaxage.....	— 24
3. Maîtrise de la qualité	
3.1 Objectifs	
3.2 Domaine concerné	
3.3 Connaissance de l'état des constituants	
3.4 Conduite des différents postes de la centrale.....	
3.5 Surveillance du fonctionnement du matériel.....	
4. Conclusion	
Pour en savoir plus	Doc. C 2 225

à paraître

Le béton, matériau parfois mal aimé et souvent mal connu, est capable de performances remarquables lorsqu'il est employé dans des ouvrages tels que des grands ponts (pont de Normandie en France ou pont de la Confédération au Canada) ou lorsqu'il constitue l'ossature d'immeubles de grande hauteur.

La sécurité de ces ouvrages dépend évidemment de l'adéquation des caractéristiques obtenues lors de la fabrication et de la mise en place de ce matériau comparées à celles prises en compte dans les calculs. Dans tous les cas, la qualité prédominante à rechercher est la régularité des performances et l'on s'attache autant à minimiser le coefficient de variation des caractéristiques obtenues qu'à viser des moyennes extraordinaires.

La fabrication du béton constitue la première opération irréversible de la construction de l'ouvrage et sa bonne exécution conditionne toutes les propriétés que le béton pourra acquérir, propriétés qui sont à la base du dimensionnement de cet ouvrage. Cette phase est d'autant plus délicate qu'elle part de constituants inertes dont, pour certains, les caractéristiques sont peu ou pas maîtrisées, pour réaliser un matériau « vivant » composant principal de l'ouvrage. En rapprochant ces constituants, selon un schéma particulier [1], la fabrication initie une série de réactions physico-chimiques qui se prolongeront tout au long de la vie de l'ouvrage.

La sensibilisation actuelle sur les économies de matériaux « nobles » implique de faire au mieux pour profiter des potentialités des constituants et donc de respecter les lois de constitution physique du mélange que le schéma retenu a normalement optimisé.

L'irréversibilité des réactions fait qu'il est indispensable de reproduire à l'identique, tout au long du chantier, cette opération.

Ce document analyse les différentes phases de la fabrication du béton.

Sans aborder les aspects technologiques du matériau et des matériaux, il définit les objectifs visés et les fonctions assurées pour chacun des matériaux utilisés en vue de satisfaire ces objectifs de niveau de performances et de durabilité pour les deux modes de production discontinu et continu [2]. Il présente les dernières connaissances acquises tant au niveau des recherches menées en laboratoire que par les constatations réalisées sur les chantiers.

Il est divisé en trois parties.

La production du béton décrit comment « voir » le béton lorsque l'on veut satisfaire les exigences exprimées ou quelquefois implicites du client. Cette partie présente également les différents modes de production, qu'il s'agisse du béton prêt à l'emploi, de la fabrication sur chantier ou de la fabrication pour éléments préfabriqués.

La fabrication du béton détaille les phases successives pour la réalisation du mélange en examinant les objectifs visés, les rôles, les modes d'action et, avec les difficultés rencontrées, les meilleurs moyens pour être efficace.

La maîtrise de la qualité regroupe la surveillance automatique du fonctionnement du matériel, les actions du conducteur de la centrale ainsi que les essais qui caractérisent en temps réel l'état des constituants et les performances du béton.

Le transport du béton n'est pas abordé dans ce document.

Cet article a été rédigé avec la collaboration de Ch. PAREY, Ingénieur Général Honoraire des Ponts et Chaussées.

1. Production du béton

1.1 Rôle de la fabrication

1.1.1 Objectifs

Un béton est un mélange défini par une formulation ou par un fuseau, par lesquels on prévoit les quantités des différents constituants pour un volume particulier de béton (généralement le mètre cube) et pour lequel on annonce certaines performances (performances de base : consistance et résistance mécanique). Outre cette demande, d'autres propriétés découlant des règles de l'art sont également attendues comme par exemple l'absence de ségrégation lors des manutentions et la compacité maximale une fois le béton en place. À partir du choix des constituants, ces propriétés sont obtenues grâce au respect des bonnes pratiques pour la fabrication du mélange.

La fabrication du béton consiste à organiser les constituants pour donner au mélange la consistance et la cohésion, qui permettent d'assurer sa bonne mise en place, et la résistance et la compacité, qui donnent à l'ouvrage la durabilité escomptée (figure 1).

Pour que le béton acquiert les propriétés attendues, il faut que les constituants soient dans les proportions définies par la formule et que la position relative des éléments respecte les conditions particulières pour que les réactions physico-chimiques se développent normalement (exemple, le contact intime eau-ciment).

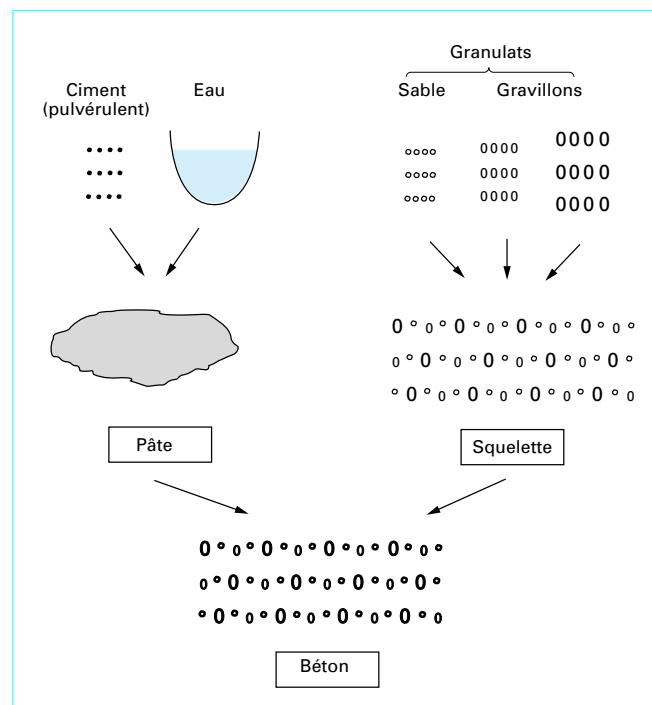


Figure 1 – Image symbolique de la constitution du béton [1]

Historique

Jusqu'à la fin des années cinquante, et sauf exception, la formulation du béton était d'une simplicité biblique : 800 litres de gravillon, 400 litres de sable, de 4 à 8 sacs de ciment et de l'eau en abondance, cette recette ne devait pas correspondre toujours exactement à un mètre cube, mais elle faisait prise et durcissait. Avec des coefficients de sécurité à la rupture de l'ordre de trois dans des ouvrages simples, les risques étaient minimes.

Progressivement, une certaine rationalité a été introduite dans cet artisanat. Des essais et des constatations menés à l'occasion de grands ouvrages (Villeneuve St-Georges-Tancarville) ou de grands barrages ont permis de mieux connaître les relations entre les divers facteurs intrinsèques et extrinsèques influençant les caractéristiques du béton. Les laboratoires se sont mis au travail : les méthodes de calcul et les règlements se sont considérablement affinés.

Parallèlement, le matériel de fabrication évoluait sur les grands chantiers puis très rapidement dans les centrales fixes. Des révolutions successives ont ensuite accéléré les processus ; l'arrivée en force de l'électronique d'abord analogique, puis numérique. On pourrait maintenant parler de FBAO (fabrication de béton assistée par ordinateur).

La formulation n'a plus rien à voir avec les errements anciens : le béton est un composite technique dans lequel entrent de multiples composants dont certains sont d'autant plus actifs que leur dosage est faible (adjuvants et additifs variés). Il ne s'agit pas encore, bien sûr, de chimie fine ou de pharmacie, mais certains déréglements de fabrication peuvent avoir des conséquences graves. De plus, les caractéristiques d'une fabrication ne sont toujours contractuellement connues que 28 jours après, c'est-à-dire longtemps après que le béton ait fait prise dans l'ouvrage.

Les années 70 ont connu une grande activité consacrée à la maîtrise de la qualité des ouvrages. Partant du constat simple que si les caractéristiques contractuelles n'étaient pas obtenues, il n'y avait que deux solutions : accepter un ouvrage non conforme (moyennant pénalités) ou le démolir avec toutes les conséquences imaginables sur les délais et l'économie du projet, on s'est efforcé de constituer une chaîne continue, homogène et progressive « d'épreuves » (étude, convenance, contrôle) et de stipulations sur les matériels permettant de réunir des conditions objectives de régularité de la qualité.

Cette philosophie a été progressivement traduite dans des textes contractuels généraux ou des normes. Ces textes pourraient être considérés par certains comme par trop contraignants. Il est possible de mesurer les progrès accomplis : les coefficients de variation des résistances obtenus sur les chantiers sont du même ordre de grandeur (et parfois meilleurs) que ceux de fabrications soignées de laboratoire, le prix du mètre cube aurait d'ailleurs plutôt baissé en francs constants, une bonne centrale et de bons automatismes permettent une bonne gestion et limitent les pertes.

1.1.2 Qualité de la fabrication

La qualité de la fabrication est jugée par la comparaison de l'état réellement obtenu avec ce qui était attendu. À défaut de posséder un essai direct suffisamment pertinent, cette qualité peut être caractérisée par l'intermédiaire de trois paramètres particuliers : la proportion, la répartition et la distribution des constituants.

1.1.2.1 Volume minimal représentatif du mélange

Le premier paramètre concerne la dimension du volume minimal, pris au hasard dans le mélange, et dans lequel on sera en mesure de retrouver la proportion des constituants. Plus ce volume sera petit et meilleure (dans l'absolu) sera la fabrication.

Nota : pour satisfaire la définition de la qualité, il serait préférable de viser un volume minimal compatible avec les caractéristiques de l'ouvrage. Mais d'une part, une installation

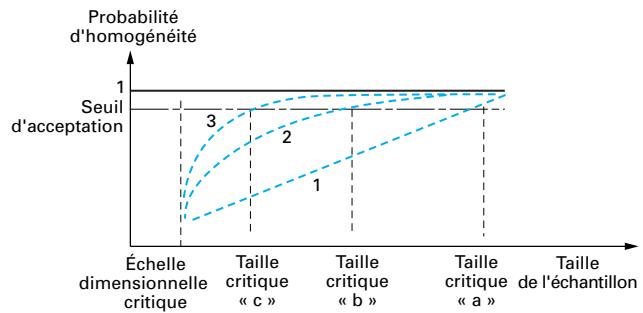


Figure 2 – Détermination de la taille critique de l'échantillon

de fabrication du béton est toujours censée pouvoir fabriquer des bétons très performants et, d'autre part, les critères permettant de faire la liaison performance-volume ne sont pas définis. Pour un ouvrage donné, on pourra toujours adapter les conditions d'utilisation répondant strictement aux besoins, ce qui permettra de se placer dans les conditions économiques les plus favorables.

Il existe cependant un volume critique (**échelle dimensionnelle critique**) en deçà duquel il n'est physiquement pas possible, avec une probabilité raisonnable, de retrouver par analyse tous les constituants. Les études menées sur les milieux granulaires [3] montrent bien que cette limite du volume par valeur inférieure est une réalité et qu'elle peut, selon des lois de probabilité, se calculer si on prend en compte les caractéristiques de chacun des éléments qui composent le milieu étudié. C'est par le malaxage, car c'est principalement de lui que résulte cette partition, par les échanges successifs provoqués par les outils de brassage que l'on tendra à s'approcher de cette dimension. Deux mélanges différents n'auront pas, en principe, la même échelle dimensionnelle critique. Pour que les résultats des mesures des proportions des constituants soient discriminants, il importe que la taille des échantillons soit la plus proche possible de la plus petite échelle dimensionnelle critique des mélanges comparés.

Exemple : La figure 2 symbolise trois mélanges de même formulation, caractérisés par le même nombre d'échantillons et se différenciant par le malaxage. Le mélange 1 a été très peu malaxé. Le mélange 3 a été très bien malaxé. Dans l'état actuel des moyens qui nous sont offerts (analyse des proportions), le choix de la taille de l'échantillon peut fausser entièrement le jugement. Pour le mélange 1 si on prend un échantillon de volume important (taille critique a), le mélange apparaîtra comme homogène, au même titre que les deux autres mélanges. Le critère n'est donc pas discriminant. Plus la taille de l'échantillon sera petite et plus notre critère permettra de différencier les écarts d'homogénéité. Un échantillon de taille critique c permettra de différencier les trois mélanges.

En supposant que le volume appelé « échelle dimensionnelle critique » représente un volume en deçà duquel il n'est physiquement pas possible, avec une probabilité raisonnable, de retrouver par analyse tous les constituants, l'analyse de tout échantillon de taille inférieure à cette échelle dimensionnelle conduira systématiquement à conclure à un manque d'homogénéité.

Si la taille de l'échantillon est trop grande on constate qu'il y a un lissage des défauts d'homogénéité. Si elle est trop petite tous les mélanges sont hétérogènes.

1.1.2.2 Position relative des constituants

Le second paramètre concerne la répartition des constituants (proximité des grains de ciment et de l'eau, quantité de pâte entourant les granulats, empilement des grains dans l'espace...). Il

n'existe pas, à ce jour, de méthode directe pour la mesurer. Toutefois, la combinaison des résultats des analyses granulométriques réalisées sur les volumes prélevés donne des informations pouvant caractériser cette répartition.

Les combinaisons généralement retenues sont :

- le rapport de l'eau au ciment, qui peut simuler les contacts eau-ciment et donc la qualité future des hydrates ;
- le rapport du sable à l'ensemble du squelette granulaire, qui représente la distribution granulaire et donc la compacité future du mélange (ici interviendra pour l'ouvrage la qualité du serrage du béton) ;
- le rapport de la pâte (eau + ciment) à la surface des grains, qui caractérise l'enrobage et donc la quantité moyenne probable d'hydrates autour des grains.

1.1.2.3 Fuseau image du mélange

Se baser sur ces deux seuls paramètres sous entend que les constituants sont de constitution homogène et constante ; ce n'est évidemment pas le cas. On peut les caractériser par leur variabilité réelle. En prenant en compte cette variabilité ainsi que les proportions dans le mélange on est à même de construire le fuseau « image » de ce mélange [4]. La construction du fuseau « image » est basée sur le principe suivant : lorsque les méthodes de fabrication des constituants respectent les règles de l'art, on considère que leurs caractéristiques suivent des lois normales décrites par une valeur moyenne et un écart type. Les caractéristiques du mélange de ces constituants suivront elles aussi des lois normales qui peuvent être déterminées mathématiquement à partir des lois précédentes [5].

La distribution des caractéristiques de ces constituants peut évoluer du fait des actions menées lors de la fabrication du mélange. Ces évolutions possibles portent principalement sur la granularité (la plus connue est la ségrégation, pouvant apparaître lors de la manipulation des granulats, mais on peut penser également à l'attrition des gravillons qui crée des fines). Pour étudier cette éventuelle perturbation des propriétés, on considère que les lois d'additivité, entre la dispersion naturelle du constituant et les actions dues à la fabrication, sont applicables et on retient la procédure d'analyse de l'évolution du fuseau image.

La fabrication est caractérisée, de ce point de vue, par le fuseau réel résultant de l'expérimentation. On prend pour unité de mesure la largeur du fuseau image. Selon que le fuseau résultant est une fois et demie, deux fois ou trois fois le fuseau image, la fabrication est, par exemple, considérée respectivement comme satisfaisante, moyenne ou mauvaise.

Le fuseau image de la figure 3 représente la dispersion « incompressible » au niveau de la distribution granulaire d'un béton du fait de la dispersion naturelle de la granularité des constituants.

À cette dispersion réelle, on doit ajouter une dispersion « virtuelle » résultant du mode de contrôle de l'homogénéité. En effet, ce contrôle est réalisé à partir de l'analyse d'échantillons « découpés » dans le lot du béton à caractériser. Or même pour un constituant distribué régulièrement dans le lot, on peut réaliser un prélèvement qui « passe à côté » de ce constituant, ce qui faussera le jugement. C'est l'erreur de découpe. Cette erreur est dépendante de l'importance dans le mélange du constituant analysé, du volume de chaque prélèvement et du volume total prélevé pour effectuer l'analyse [4].

Le fuseau image est calculé à partir de la variabilité des constituants et de leur proportion dans le mélange. L'accroissement de la « largeur du fuseau » est généralement dû aux actions mécaniques exercées durant la fabrication.

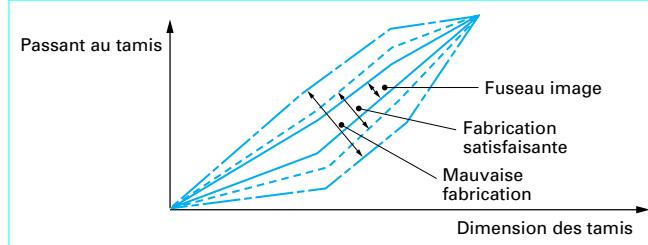


Figure 3 – Caractérisation de la production par le fuseau « image »

1.1.3 Actions de la fabrication

Les trois paramètres, précédemment décrits, résultent des mêmes essais : la granulométrie du béton réalisée sur des échantillons. On pourra éventuellement n'en utiliser que deux en fonction de l'objectif visé : caractérisation d'une gâchée (proportion et répartition) ou d'une production (répartition et distribution).

Cette analyse permet de fixer le rôle de chacun des éléments de la centrale. En effet pour espérer obtenir ce mélange « idéal », il faut que :

- le stockage ne dégrade pas les propriétés des constituants (référence au fuseau image) ;
- le dosage délivre des quantités de constituants respectant les proportions définies par la formulation (référence aux bonnes proportions) ;
- le malaxage réduise l'échelle dimensionnelle servant de référence à la mesure de l'homogénéité (référence au volume minimal représentatif du mélange).

Les différents éléments de la centrale de fabrication permettent d'assurer ces « missions » en garantissant :

- au client une forte probabilité d'avoir un béton conforme à sa commande et donc, possédant potentiellement les performances à l'échéance souhaitée ;
- au gestionnaire de la centrale à béton que les opérations sont faites le plus économiquement possible (économie de matériau, délais d'exécution et usure du matériel).

1.2 Modes de production du béton

1.2.1 Origine des productions

On distingue trois origines de production du béton :

- le béton de chantier ;
- le « béton prêt à l'emploi » (BPE) ;
- le béton pour éléments manufacturés.

Aucune définition reconnue n'existe pour différencier ces trois origines. Toutefois la pratique courante permet de retenir les définitions suivantes :

- la production de chantier est réalisée sur le site de l'ouvrage à construire ;
- la production BPE est réalisée par une installation « indépendante » des chantiers ; elle met à disposition des chantiers, du béton frais ;
- la production pour éléments manufacturés est réalisée sur le lieu où sont fabriqués ces éléments manufacturés qui seront transportés, une fois durcis, vers le lieu d'utilisation.

Tableau 1 – Débit des différentes centrales de production

Volume du malaxeur	Débit possible	Type de production	Type de travaux
< 0,500 m ³	15 m ³ /h	laboratoires	études de béton
		chantier	petits bâtiments
de 0,5 à 2 m ³	de 15 à 80 m ³ /h	chantier	tous bâtiments
			ouvrages d'art
de 1 à 3 m ³	de 40 à 150 m ³ /h	préfabrication	tous éléments
			BPE
de 2 à 7 m ³	de 60 à 300 m ³ /h	chantier	toutes fabrications
			routes, barrages, aéroports
continu (1)	de 300 à 1 000 t/h	chantier	routes, barrages, aéroports

(1) La fabrication en continu est principalement pratiquée pour les ouvrages nécessitant une grande quantité de béton avec un débit élevé [9]

Les règlements d'installation vis-à-vis des conditions d'environnement pour les installations classées sont applicables pour toutes les installations produisant le béton (bruit, poussières, rejets...) (Arrêté du 2 février 1998 cf. [Doc. C 2 225]).

On trouvera en [Doc. C 2 225] la répartition des quantités de granulats et de ciment consommées par les différents producteurs ainsi que l'évolution de cette répartition dans le temps.

1.2.2 Centrales

Le béton est fabriqué dans une « centrale à béton » qui regroupe tout un ensemble d'équipements nécessaires pour produire un béton satisfaisant à la demande. Selon la disposition des éléments (figure 4), c'est une centrale verticale (ou centrale tour, la bascule à granulats se situe au dessus du malaxeur) ou une centrale horizontale (centrale en ligne ou en étoile).

Selon les origines de production, les centrales présentent quelques différences principalement en structure et en débit, mais les principes de fonctionnement des équipements sont identiques.

1.2.2.1 Centrales de chantiers

Les centrales de chantiers sont installées en fonction des ouvrages à construire, il n'y a pas de suivi organisé globalement. Leur installation étant temporaire, les autorisations d'emploi relèvent généralement du maître d'ouvrage.

En référence aux définitions des chantiers données par la norme NF P 18-201, on peut distinguer différents niveaux de centrales à partir des volumes de gâchées de béton : les centrales de bâtiment, d'œuvre d'art et routière (tableau 1).

Nota : ces affectations conventionnelles, qui n'ont rien d'officielles, ne limitent pas pour autant l'emploi de ces malaxeurs à chacune des fabrications citées mais expriment sur quels types de chantiers, on les rencontre le plus fréquemment.

1.2.2.2 Centrales de BPE

Ce sont des centrales qui, généralement, sont intégrées dans le tissu urbain. La plupart de ces centrales ont un débit compris entre 40 m³/h et 150 m³/h. En principe, le béton est transporté en bétonnières portées. Quelques clients viennent eux-mêmes chercher leur béton, on dit alors que le béton est livré sous centrale.

On trouvera en [Doc. C 2 225] l'évolution de cette profession dans les vingt-six dernières années.

1.2.2.3 Centrales pour éléments manufacturés

Ce sont des centrales qui sont, le plus souvent, implantées dans « l'usine » qui fabrique les éléments en béton. La diversité de ces éléments est très grande [6] et peut aller des blocs aux poutres pré-

contraintes en passant par les tuyaux, les éléments de façade, les voûsoirs etc.

1.2.3 Référentiel

Il existe plusieurs types de réglementation pour la fabrication du béton.

1.2.3.1 Normes

Dans le domaine normatif, on peut citer :

- la XP P 18-305, qui définit les spécifications à prendre en compte pour le béton prêt à l'emploi ; elle est plutôt orientée vers les performances du béton et fixe peu d'exigences pour le matériel et la fabrication ;
- les normes « Éléments en béton », qui définissent les performances des produits en béton ; il n'y a quasiment pas d'exigence sur la fabrication du béton ;
- les normes de mise en œuvre des bétons issues des anciens documents techniques unifiés (DTU) ;
- le prEN 206 (projet européen), qui retient à la fois des spécifications sur le produit béton et quelques prescriptions sur les matériaux de fabrication ;
- les NF P 98-170 et NF P 98-431 relatives à l'exécution des chaussées en béton et des séparateurs et murets en béton ;
- la NF P 98-701, qui précise la terminologie des centrales de production des matériaux routiers, en particulier des centrales à béton ;
- la NF P 98-730, qui définit les centrales à béton utilisées pour les travaux routiers et équipements annexes ;
- les NF P 98-744 parties 2, 3, 4, 5, qui décrivent le mode de calibrage des doseurs continus ;
- la XP P 98-772, qui décrit les modules d'acquisition de données pour les centrales continues.

1.2.3.2 Règlements techniques

Dans le domaine réglementaire technique, ce sont les textes décrivant les ouvrages qui éventuellement fixent des exigences de moyens sur la fabrication du béton.

Nota : bien que le concept actuel soit l'orientation vers les spécifications de performances, le fait de fixer un minimum de moyens n'est pas contradictoire. Son but est de garantir la régularité de production, régularité qui ne peut être estimée par les contrôles de performance trop peu nombreux. Toutefois, le contrôle des performances spécifiées reste le « juge de paix » en cas de litige.

On peut citer :

- les cahiers des clauses techniques générales (CCTG) fascicule 65 pour les ouvrages d'art, 31 pour les équipements routiers et 28 pour les chaussées en béton ;
- les cahiers des clauses techniques particulières (CCTP) qui précisent le CCTG pour l'ouvrage considéré.

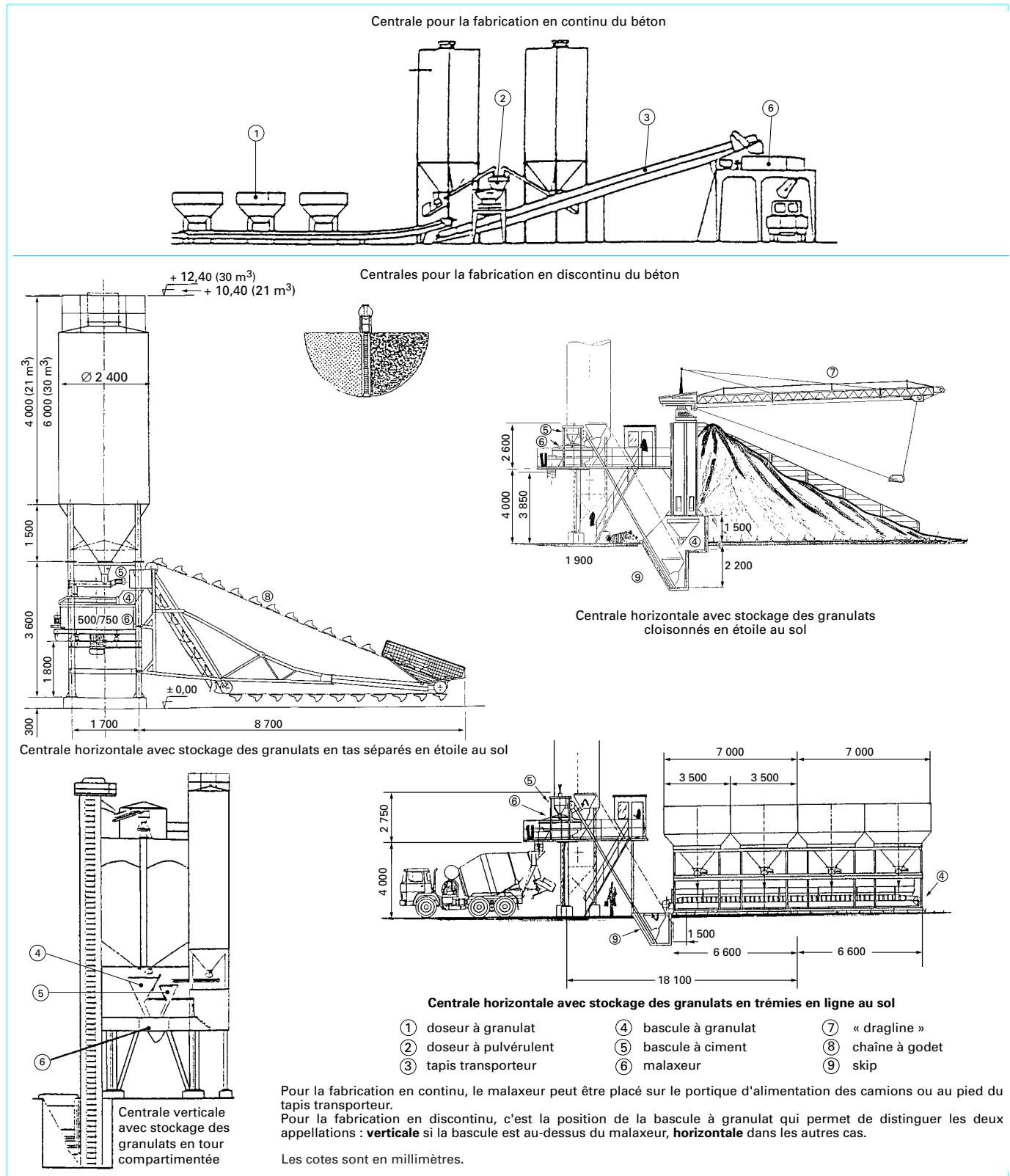


Figure 4 – Différents types de centrales

1.2.3.3 Certification

Dans le domaine de la certification, on peut citer :

- la marque de qualité NF-BPE, qui correspond à une certification du matériau béton fabriqué ; outre des exigences relatives aux performances atteintes par le béton, cette marque, pour donner au client une assurance de régularité, y a adjoint des exigences sur le matériel et les conditions de fabrication ;
- la liste d'aptitude dans le cadre des travaux prévus par le fascicule 65 du CCTG (ouvrages d'art en béton armé et précontraint) ; cette certification s'applique aux centrales de BPE et porte sur l'équipement des centrales et sur le système qualité mis en place. Elle engage le producteur pour le suivi des performances spécifiées dans le cahier des charges de l'ouvrage ;
- la liste d'aptitude dans le cadre des travaux prévus par le fascicule 28 du CCTG (chaussées en béton de ciment) ; cette certification s'applique aux centrales de chantiers routiers.

1.2.3.4 Contrats volontaires

Dans le domaine des contrats volontaires, il existe un protocole d'accord signé entre les différents syndicats professionnels de la construction et le syndicat du BPE. Il concerne peu l'équipement des centrales à béton mais aborde les procédés, en particulier le problème de l'ajout d'eau.

1.2.4 Évolutions des conditions de fabrication

1.2.4.1 Conduite des centrales

Le développement de l'utilisation de l'informatique dans les centrales a permis de modifier radicalement la conduite des centrales. L'automatisation, hier encore simple outil pour commander les « actionneurs », est devenu un véritable dispositif d'aide à la conduite par la surveillance tout azimut qu'il exerce sur les différents organes de la centrale. Par ailleurs, l'analyse permanente de la « normalité » de la situation et conjointement la délivrance de message au conducteur de la centrale sur ce qui se passe pendant la fabrication, permet d'en faire un outil prédictif qui prévient des dérives naissantes [7].

1.2.4.2 Identification des bétons

Avec la génération des systèmes d'enregistrement des paramètres de fabrication du béton, on peut aujourd'hui connaître la composition du béton livré ainsi qu'un certain nombre d'informations complémentaires.

Deux documents sont disponibles, le bon de livraison qui rappelle les caractéristiques garanties par le producteur et le bordereau des pesées qui décrit les conditions de fabrication. Parmi les données complémentaires aux valeurs de dosage, on peut citer la teneur en eau des granulats, la durée de malaxage, le moment précis du début de fabrication, etc. Bien qu'encore dans un format peu utilisable, certains bordereaux des pesées reproduisent la courbe du wattmètre, ce qui permet d'informer l'utilisateur du béton sur la qualité du malaxage.

1.2.4.3 Structure des centrales

L'évolution de la structure des centrales s'est faite principalement sous la pression des organismes de gestion de l'environnement. Les améliorations notables concernent la diminution des émissions de bruit et de poussières, les dispositions prises pour le recyclage des granulats du béton en retour et l'utilisation dans le béton des eaux de lavage de la centrale et enfin l'aspect général de la centrale afin qu'elle se « marie » mieux avec son environnement.

1.2.4.4 Mobilité des centrales

L'évolution de la mobilité des centrales, principalement de chantier, est liée à l'évolution de la structure de ces chantiers [8]. Il était

nécessaire pour pouvoir suivre ces chantiers de concevoir des centrales modulaires pour lesquelles l'ensemble des opérations imprudentes soient le plus possible réduites. Cet objectif a conduit naturellement à concevoir les matériels pour réduire le temps imparié à toutes les opérations de montage, démontage et d'entretien. Ainsi indirectement en cherchant à favoriser la mobilité des centrales, on a amélioré leur ergonomie.

2. Fabrication du béton

2.1 Chaîne de production

2.1.1 De la formule aux exigences

Comme cela a été dit précédemment, la fabrication du béton est une opération destinée à donner à un ensemble de constituants regroupés entre eux, des propriétés adaptées à diverses exigences, propriétés qui peuvent être explicites (consistance, résistance mécanique ...) ou implicites parce que relevant des règles de l'art (compatibilité, homogénéité,...).

Toutes ces exigences se traduiront au moment de la fabrication du béton par des caractéristiques de constitution du mélange. Ce sera par exemple la teneur minimale en ciment (XP P 18-305), le rapport de l'eau au ciment, la proportion de sable par rapport au squelette granulaire (FD P 98-171), la quantité d'éléments fins, la quantité maximale d'eau mais aussi une quantité suffisante qui devra être combinée avec la présence d'un plastifiant ou d'un fluidifiant, etc.

Il existe donc, pour le fabricant de béton, un certain nombre de « degrés de liberté » qui lui permettront d'ajuster au mieux la composition du béton pour tenir compte des performances réelles des constituants [10] et également des conditions de fabrication (teneur en eau des granulats) et de transport (consistance du béton pour tenir compte des pertes pendant le transport et d'une éventuelle attente).

Les moyens mis en œuvre pour respecter ces contraintes doivent présenter des performances suffisantes pour garantir la possibilité d'atteindre les caractéristiques correspondantes.

Comme on le comprend au vu de ces actions nécessaires dont certaines sont contradictoires (consistance-résistance), la fabrication du mélange est une opération complexe au cours de laquelle il faut valoriser les propriétés naturelles des constituants et ne pas risquer de rendre certains objectifs hors de portée, sous prétexte de favoriser une exigence.

Exemple : L'ajout d'eau, exemple le plus probant, est réalisé pour satisfaire une exigence de consistance.

Quelle que soit la raison de la quantité trop faible d'eau dans le béton et sans juger de l'acceptabilité de cette action, on peut considérer légitime un ajout d'eau si le béton présente une consistance telle que sa mise en place ne soit pas correctement réalisable

On peut évidemment refuser le béton (ce qui devrait être la règle générale) mais il se peut aussi que, sur ce chantier, les risques pris par l'ajustement de la consistance soient faibles en regard des conséquences d'un arrêt de bétonnage.

Cependant en faisant cet ajout, on remettra en cause :

— irrémédiablement la résistance mécanique, le retrait et la perméabilité du béton en place, trois facteurs dont les rôles vis-à-vis de la durabilité de l'ouvrage ne sont plus à démontrer ;

— probablement la cohésion du béton avec les risques de ressauage et de ségrégation.

Tableau 2 – Écoulement des matériaux fins

Constituants	Risques	Origine des incidents	Actions	Traitements	Moyens
Sable	colmatage	fines et eau	réduire la cohésion	aérer	vibreur secoueur extraction forcée
Pulvérulents secs	fusage	air	augmenter la masse volumique	désaérer	conditionneur
Pulvérulents humides	mottage et colmatage	eau et air	détruire les mottes	émotter	émotteur

Ainsi en corrigeant, à juste titre, un paramètre, on prend un risque important pour une partie de l'ouvrage et quelquefois même pour l'ouvrage tout entier.

2.1.2 Éléments de la centrale et leurs imbrications

Nous examinerons successivement dans cette partie les éléments constitutifs de la chaîne de fabrication des bétons :

— le **stockage**, il permet de conserver les propriétés des constituants et de mettre ces derniers dans les meilleures conditions pour satisfaire les opérations de dosage ;

— le **dosage**, il détermine les quantités de chacun des constituants pour que, conjointement, ils développent les caractéristiques attendues pour le béton ; la vidange des bascules doit être régulée en débit pour respecter les meilleures conditions de remplissage du malaxeur ;

— le **malaxage**, il rapproche les constituants et les distribue dans le mélange conformément aux indications de la formule ; il n'agira bien entendu que sur ce qui est introduit dans le malaxeur et ne pourra pas corriger les effets d'un mauvais dosage (même si quelquefois il peut les atténuer [11]).

Comme le montre la description des différentes fonctions, on constate que les trois opérations n'ont aucun caractère d'indépendance. Aussi le fonctionnement de chacun des matériels devra être commandé en référence au fonctionnement de l'équipement précédent et faire de telle sorte qu'il prépare le travail du matériel suivant. La centrale à béton possède pour cela un automatisme qui aide le conducteur de la centrale.

L'automatisme prend en compte les caractéristiques physiques des constituants (teneur en eau des granulats, teneur en fines de l'eau de récupération, etc.), commande les actionneurs (casque, tapis convoyeur, etc.), asservit les actions (dosage fins, dosage en eau efficace, etc.), vérifie les résultats atteints (respect des dosages, temps de malaxage, etc.) et surveille le fonctionnement des divers équipements.

2.1.3 Comportement des constituants au cours de la fabrication

Si le fonctionnement des matériels a une forte influence sur la qualité du mélange, il en est de même du comportement des matériaux. La régularité de production est liée à la régularité d'écoulement de tous les constituants et du béton.

Les constituants n'ont pas tous la même aptitude à s'écouler. Sans viser obligatoirement l'état le plus favorable à l'écoulement, il faut rechercher sa constance quitte à équiper les matériels de

moyens créant les conditions d'un bon écoulement lorsque cela est nécessaire.

Le comportement des différents constituants (tableau 2) est très variable en fonction de leur constitution. Les actions à entreprendre et les matériels à utiliser doivent être adaptés à chaque cas.

Trois objectifs doivent être recherchés en permanence pour permettre cette régularité d'écoulement.

Le premier est de mettre les constituants dans un état physique compatible avec un écoulement. C'est le rôle des moyens de stockage, les autres opérations de transfert, vers les doseurs puis vers le malaxeur, étant de durées suffisamment faibles pour que d'éventuelles variations ne soient pas observables si des dispositions particulières ne les provoquent pas.

Le second est d'équiper les matériels d'appareillage favorisant l'écoulement lorsque celui-ci est difficile. Ces appareillages sont des vibreurs, des canons à air, des diviseurs de flux de matériaux ou encore des dispositifs d'extraction forcée.

Le troisième est de lutter contre tout ce qui peut faire évoluer l'état ou la constitution des constituants et du béton sur l'ensemble du parcours dans la centrale à béton.

Si pour les deux premiers objectifs les actions à entreprendre sont assez évidentes puisqu'elles correspondent précisément aux fonctions remplies, il n'en est pas de même pour le troisième.

Exemple : les exemples qui suivent montrent les diverses origines possibles de modification de l'état ou de la constitution du mélange :

— la modification de la teneur en eau des granulats lorsque les tapis convoyeurs ou les matériels de transfert ne sont pas protégés des pluies ou des quantités d'eau stagnant dans les récipients ;

— la modification de la granularité d'un granulat (ségrégation par projection) lorsqu'un obstacle se trouve placé dans le flux de ce matériau ;

— le freinage d'un matériau du fait d'une insuffisance de propreté d'une goutte ou d'une paroi de trémie ou de l'enrassement d'un élément de translation (vis à ciment en particulier) ;

— l'apport brutal de fines lié à une accumulation en un point particulier de la chaîne ;

— le contre courant violent lors du remplissage d'une trémie close dans le cas de la bascule à pulvérulents secs ou lors du remplissage du malaxeur, ce contre courant pouvant être à l'origine de l'expulsion des éléments les plus fins ;

— la hauteur de chute libre du béton trop importante.

Tableau 3 – Risques encourus par la mauvaise utilisation des moyens de stockage des granulats

Principales origines de la ségrégation	Moyens pour y remédier
	agents atmosphériques (vent)
	projection
	roulement

2.2 Stockage des constituants

2.2.1 Objectifs

2.2.1.1 Conservation des propriétés

Les évolutions possibles des propriétés des constituants au stockage sont très nombreuses. Cela commence lors de la réalisation des stocks puis durant l'immobilisation et enfin lors de l'extraction pour un transfert soit vers un autre lieu de stockage (cas de l'existence d'un stockage primaire et d'un stockage secondaire), soit vers le système de dosage.

Nota : le stockage secondaire est le stockage en réserve, le stockage primaire est celui qui est juste avant le dosage.

2.2.1.1.1 Granularité

C'est pour les granulats qu'il y a le plus de risque d'évolution lors de la réalisation des stocks. Cette évolution dépend en particulier de la manière dont on les constitue.

Le roulage des engins sur les stocks est à l'origine d'une attrition des granulats et provoque la production de fines qui s'accumulent en des zones particulières.

L'emploi de sauterelle n'est pas sans inconvénients en cas de mauvaise utilisation. On doit toujours chercher à limiter la hauteur de chute en sortie du tapis car elle sera systématiquement génératrice de ségrégation soit par éboulement des plus gros grains soit par l'envol des fines.

Exemple : l'exemple présenté dans le tableau 3 concerne la sauterelle, engin fréquemment utilisé en carrière. Les autres moyens ont également leurs conditions particulières d'emploi, il faut tenir compte du matériau manipulé et des conditions environnantes.

2.2.1.1.2 Pollution par mélange

Le premier risque de mélange se situe au moment de la livraison des constituants notamment lorsque la nature du produit ne peut être constatée visuellement (ciment, adjuvants). C'est l'organisation de l'entreprise qui donne l'assurance d'un minimum de risque. Cette organisation doit être stricte et comporter un repérage très clair de chacun des conteneurs, une procédure bien rodée pour le dépôtage des camions de livraison et un examen attentif des bons de livraison.

Le mélange des natures de constituants peut encore intervenir pendant la période de stockage principalement à la suite de la rupture de la cloison séparant deux constituants différents. Quelques incidents ont conduit à l'abandon des silos compartimentés pour le stockage des pulvérulents (ciments ou additions) ainsi que des réservoirs multibacs pour les adjuvants.

2.2.1.2 Volume de stockage

Le stockage a également pour rôle d'assurer un volume minimal de matériau pour que la fabrication puisse se dérouler sans à-coups.

Le préjudice d'un stockage trop faible est d'abord supporté par le producteur lui-même. Cependant, on a souvent constaté sur chantier qu'une rupture d'approvisionnement, par la désorganisation du chantier qu'elle entraîne, se traduit toujours par des anomalies pouvant aller jusqu'à des non conformités de dosage [12] ou, plus grave encore, par des incidents sur l'ouvrage.

Nota : on a souvent constaté qu'un arrêt de production, par manque de produit, conduit à un arrêt de bétonnage qui se solde alors, dans les meilleurs des cas, par une simple reprise de bétonnage ou, dans le plus mauvais, par une fissuration localisée de l'ouvrage.

L'excès de stockage, outre une perte économique évidente, peut être également néfaste. On peut citer différents exemples qui montrent que les stocks doivent être renouvelés régulièrement pour ne pas être à l'origine d'évolution des constituants.

Le volume strictement nécessaire doit être modulé en fonction de l'organisation du fabricant de béton. Un suivi permanent de la consommation couplé à un bilan matière et à une bonne connaissance de la demande courante permet de travailler avec le volume minimal de stock [13].

Le tableau 4 étudie les effets et donne les volumes souhaitables de stockage.

Le volume optimal de stockage dépend du déroulement du chantier et de l'organisation du fabricant de béton. Il doit être étudié en début de chantier afin d'éviter les ruptures de stocks, toujours préjudiciables à l'ouvrage et l'excès de stockage qui est préjudiciable au constituant concerné.

2.2.2 Moyens de stockage

Les moyens de stockage sont très nombreux en type ou en forme, nous ne citerons que les plus utilisés.

2.2.2.1 Granulats

On distingue pour les granulats, trois types de stockage : en tas au sol, en trémie ou en tour compartimentée (figure 4).

2.2.2.1.1 Stockage au sol

Le stockage en tas sur le sol se rencontre le plus souvent dans les centrales de chantier soit sur les petits chantiers (bâtiment principalement) soit sur les très gros (routes, barrages) ou comme stockage secondaire pour les centrales de béton prêt à l'emploi. Ce type de stockage est le plus délicat à traiter vis-à-vis de la pollution par le sol (remontées de boues par exemple) et par le ruissellement de l'eau. On préconise toujours soit l'existence d'un stock mort au niveau du sol soit, pour les petites centrales, une aire bétonnée.

Tableau 4 – Volume de stockage des constituants

Caractéristique du stockage	Risques encourus	Stockage minimal ou/et actions souhaitables
faible	arrêts de production	renforcer momentanément les volumes de stockage stockage des granulats en carrière réserve de ciment chez le fournisseur mise en attente de camions de transport remplissage des silos systématiquement tous les soirs
satisfaisant	RAS	sable : entre une journée et deux jours gravillons : une demi-journée ciment : une demi-journée en présence de deux silos additions : un jour en présence d'un seul silo adjuvants : un jour
fort	évolution du constituant	effectuer régulièrement des prélèvements en fond de stock pour analyse éliminer les produits susceptibles d'avoir évolué ne se justifie pour les granulats que si les cadences de production sont trop faibles devant la cadence de fabrication du béton (chaussées en béton notamment)

Pour les centrales de chantier type bâtiment, la reprise se fait généralement par des moyens mécaniques guidés (chaîne à godets ou *dragline*, figure 4).

Pour les centrales routières ou pour le transfert dans le cas des centrales de BPE, la reprise est souvent réalisée par un engin automobile, généralement un chargeur. Le risque de pollution est plus grand et implique une bonne dextérité du chauffeur de l'engin pour reprendre le stock en évitant les zones polluées (bas de stock). Par ailleurs pour éviter la pollution par le chargeur, il est nécessaire que toute sa zone de circulation soit traitée en conséquence (lit de granulats sur le sol, par exemple).

2.2.2.1.2 Stockage en trémie

Le stockage en trémie est le plus fréquent en particulier dans les centrales de béton prêt à l'emploi. Ces trémies sont, soit alimentées directement à partir d'un quai, soit par un chargeur à partir d'un stock secondaire. Les risques de pollution sont essentiellement des risques de mélange. Pour limiter ce risque, les trémies doivent être particulièrement bien repérées par étiquetage de la classe granulaire et éventuellement du type de granulat. Par ailleurs, la taille du godet du chargeur doit être en rapport avec l'ouverture supérieure de la trémie. Pour éviter les remplissages excessifs, on dispose des rehaussements latéraux (et uniquement latérale si on veut conserver un effet dissuasif contre l'excès de chargement) entre les trémies adjacentes de façon à éviter les débordements d'une trémie dans l'autre.

2.2.2.1.3 Stockage en tour compartimentée

Le stockage en tour compartimentée impose des structures de centrales très importantes, ce qui renchérit notamment l'installation. Ce sont par contre ces installations qui permettent la meilleure intégration dans le site vis-à-vis de l'environnement. Les compartiments sont soit alignés, soit placés circulairement autour de « l'axe » de la centrale.

Ces compartiments sont alimentés à l'aide d'élevateurs verticaux (godets) ou inclinés (bande transporteuse lisse ou, au-delà d'une pente de 17 degrés, à chevron). L'élevateur fait tomber le granulat soit sur une goulotte rotative, soit sur un tapis navette, qui le déverse dans le compartiment adéquat.

Pour éviter les débordements et en conséquence les mélanges, un ensemble de dispositifs de « contrôle » est nécessaire. Il s'agit :

- d'une commande automatique faisant fonctionner l'élevateur pendant un certain temps après l'ordre d'arrêter le remplissage (un tour de l'ensemble des godets ou du tapis) ;
- d'un positionnement automatique de la goulotte ou du tapis navette en fonction du granulat transporté ;

— d'un capteur de niveau haut signalant le niveau maximal atteint (ce niveau doit être placé de façon que le compartiment puisse encore recueillir la quantité de matériau placé sur l'élevateur).

2.2.2.1.4 Dispositif de sortie des trémies et des compartiments

Qu'elle concerne les trémies ou les compartiments en tour, la forme de la partie basse assurant la sortie du granulat a un rôle important sur l'écoulement du produit [14]. Cette facilité à s'écouler n'est pas la même pour tous les matériaux du fait de leur nature minéralogique, de leur teneur en éléments fins, des traitements mécaniques subis, de leur forme ou de leur teneur en eau. Par exemple un sable roulé cru (sans fines) s'écoule très facilement alors qu'un sable calcaire concassé est sujet au voutage. Ce produit en particulier, nécessite des conditions très favorables pour s'écouler, conditions qui sont atteintes grâce à la forme des parois de la trémie ou/et par l'utilisation de dispositifs spécifiques d'écoulement placés à la base de la trémie (canon à air, vibreur sur paroi, vibration interne par « chapeau de gendarme », tapis extracteur de forme adaptée, etc.). En pratique, le rôle de ce dispositif est d'annihiler les frottements internes et le collage entre les grains, soit par l'introduction d'air dans le matériau, soit par la vibration des grains. De ce fait, on rend la force de pesanteur prépondérante.

Nota : l'utilisation de la vibration pour faire écouler des granulats est basée sur le même principe que dans le cas de l'utilisation de la vibration pour le serrage du béton : la « destruction » locale des forces internes de cohésion.

Exemple : pour les gravillons, on considère qu'une teneur en éléments fins (passant à 0,063 mm) de moins de 2 points (en masse) n'est pas une gêne à l'écoulement naturel. Au-delà, il faut envisager comme pour les sables l'emploi d'un dispositif d'aide à l'écoulement.

Nota : lorsque la valeur de la grandeur physique s'exprime en « pour-cent » (teneur en eau, teneur en fines...), pour éviter une confusion entre valeur absolue et valeur relative, il est fréquent d'utiliser l'appellation « point » lorsqu'il s'agit de la valeur absolue.

2.2.2.1.5 Égouttage des granulats

Lors de leur livraison, les granulats, et principalement les sables, sont souvent au-delà de leur teneur en eau « d'équilibre ». Au cours du stockage, ils auront alors tendance à s'égoutter soit naturellement par gravité soit sous l'action des secousses successives (ouvertures et fermetures des casques, § 3.3.1). Il n'est pas rare d'observer pour les sables sans fines une évolution de la teneur en eau de 10 points à 4 ou 5 points en quelques heures. Il faut alors évacuer cette eau en dehors du stock, elle sera le plus souvent dirigée vers des bacs de rétention en vue de sa réutilisation.

Cette nécessité d'égouttage a une répercussion directe sur le volume de matériaux à stocker. Or selon leur nature, principalement leur teneur en fines, le temps d'égouttage est très variable. Il va de quelques heures (sable avec peu de fines) jusqu'à un ou deux jours (sable avec 5 à 10 points de fines). Le volume stocké doit donc être suffisant pour permettre cet égouttage (bien entendu un éventuel stockage en carrière est à prendre en compte).

Nota : l'égouttage concerne principalement l'eau provenant du lieu d'extraction ; on constate en effet que l'eau provenant des intempéries ruisselle et pénètre peu dans les stocks sauf dans le cas de trémies à ciel ouvert.

2.2.2.2 Ciments et additions sèches

Les ciments et les additions sèches sont toujours stockés dans des **silos**, généralement dressés verticalement. Sur certains chantiers ou en vue d'un dépannage ou d'un renforcement du stock disponible, des silos horizontaux sont utilisés.

Nota : une addition est conventionnellement considérée comme sèche si sa teneur en eau, mesurée par séchage jusqu'à masse constante conformément à la norme XP P 18-555, est inférieure à 0,5 point.

Le transfert du pulvérulent de la citerne de transport vers les silos se fait par circulation d'air. Deux solutions sont possibles : soit la mise en surpression des citerne, soit conjointement une mise en pression de la citerne et une aspiration de l'air du silo. Si la première solution est la plus simple, et de ce fait la plus utilisée, elle peut provoquer une aération forte du pulvérulent et quelquefois même une surpression dans le silo pouvant aller jusqu'à son explosion. La seconde possibilité permet un calmage du pulvérulent beaucoup plus rapidement mais est encore très rarement utilisée.

Les silos sont toujours équipés de filtres pour éviter les fuites de pulvérulent vers l'extérieur. Sauf dispositions particulières, vannes « anti retour » sur les jonctions filtre-silos, les filtres doivent être individualisés par silo.

Le suivi direct de la quantité de produit dans le silo pour éviter les débordements ou les ruptures de stocks est réalisé à l'aide de sondes de niveau (mécanique, ultrason, capacitive...).

On peut être amené à réaliser des prélevements de produit pendant le transfert vers le silo. La réalisation de ces prélevements doit respecter des règles strictes pour éviter les échantillonnages pouvant présenter un biais. On aura donc intérêt à se référer aux indications de la norme traitant de ce sujet.

Exemple : l'équipement de la partie basse des colonnes montantes destinées à l'alimentation des silos (figure 5) comporte :

- un système de prélèvement, le plus souvent amovible (1) ;
- un « détrompeur » qui vérifie que le constituant en stock correspond au constituant livré tel qu'il a été déclaré par le conducteur de la centrale (2) ;
- un dispositif de contrôle de la pression qui arrête l'alimentation dès lors que la pression dépasse une valeur pré-déterminée (3).

2.2.2.3 Adjuvants

Les adjuvants sont stockés en **fût** ou en **citerne**. Il arrive fréquemment que les produits soient directement livrés avec le récipient qui servira pour le stockage. Pour garder leurs propriétés, les adjuvants doivent être conservés dans certaines conditions, conditions qui dépendent des produits. Certains craignent le gel ; il faut dans ce cas que l'installation soit calorifugée (cabines et conduites). Dans certaines régions très froides, on monte un fil chauffant dans le calorifugeage. D'autres sont sensibles à la décantation, il faut alors qu'un dispositif de brassage soit monté à demeure et que, quelque temps avant emploi, le volume présent dans la cuve soit énergiquement brassé (d'autant plus énergiquement qu'il est resté longtemps sans être brassé). On a pu constater que le calorifugeage, en plus de placer les produits dans les meilleures conditions d'efficacité, permet un meilleur fonctionnement des appareils de dosage et une longévité accrue de ceux-ci.

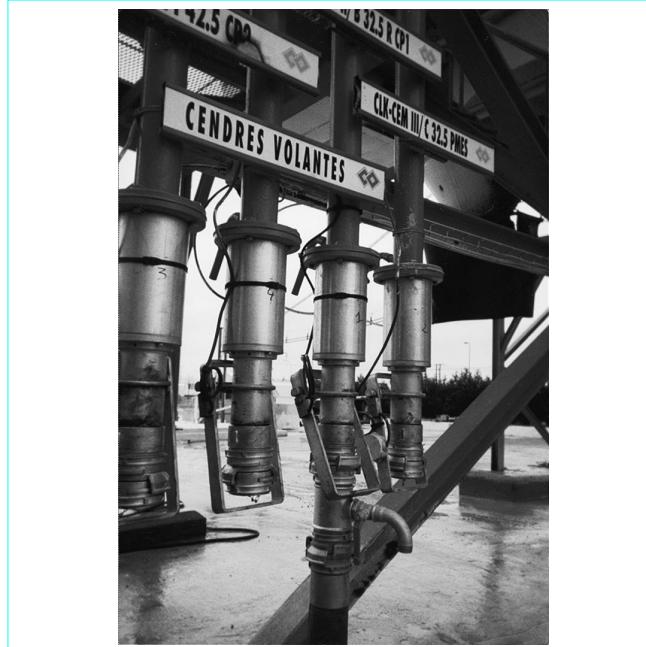


Figure 5 – Équipement des colonnes montantes des silos à pulvérulent

2.2.2.4 Ajouts

En pratique, les ajouts sont des constituants non normalisés qui sont le plus souvent incorporés sur demande du client. Ces produits ont leur propre système de stockage.

2.2.2.5 Eau

Compte tenu des actions engagées pour éviter les rejets, on trouve sur les centrales plusieurs types d'eaux dont celles provenant des retours de béton frais, du lavage des équipements de la centrale, du lavage des aires de fabrication, de l'eau utilisée pour le traitement des éprouvettes (sciage et rectification principalement) et les eaux de ruissellement. Elles sont chargées d'éléments fins qui selon l'origine peuvent être du ciment, des éléments fins des granulats, des poussières de béton durci, etc. Les teneurs en éléments fins peuvent être importantes, et leur densité très différente de celle de l'eau. Ces suspensions sont donc susceptibles de décantation. Une agitation permanente pendant le temps de stockage est donc indispensable.

Nota : l'utilisation des eaux de ruissellement est soumise à des règles très précises. On se reporterà, pour plus de détail, à la norme sur l'eau de gâchage Pr NF EN 1008.

2.2.3 Conditionnement des constituants

Sans en arriver aux risques décrits par le tableau 2, qui perturbent tout le fonctionnement de la centrale, les fluctuations de l'état des constituants peuvent être à l'origine de défauts notables, d'autant plus graves qu'ils ne sont pas directement détectables, ce qui enlève toutes possibilités de réaction pour les corriger avant qu'elles ne provoquent des non-conformités (tableau 5).

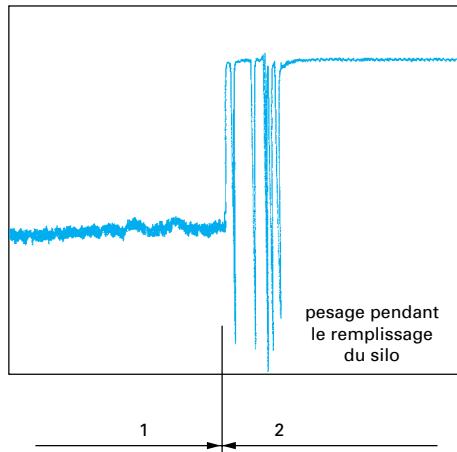
2.2.3.1 Répercussions des changements d'état des constituants

On distingue trois types de perturbations liées à des changements de l'état des constituants.

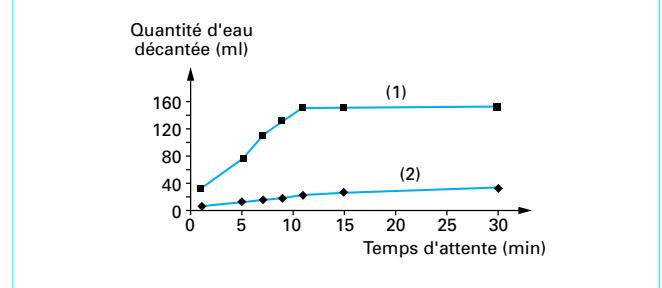
Tableau 5 – Perturbations de l'état des constituants et remèdes pour limiter leur influence sur le comportement (écoulement) de ces constituants

Constituants	Origine des perturbations	Dispositions à prendre
pulvérulents secs (ciment et additions sèches)	aération par le transport par air (éviter l'emploi d'aérogliссières pour le transfert vers les dispositifs de dosage) remplissage du silo par excès de pression température du pulvérulent élevée vitesse d'extraction excessive	densifier le matériau à la base du silo, vis à double pas ou vibration par exemple (1) conserver une quantité minimale de pulvérulent dans le cône du silo extraction lente du pulvérulent [18] éviter de soutirer du pulvérulent pendant le remplissage du silo (figure 6) éviter les pulvérulents trop chauds
sable	utilisation trop rapide après l'extraction concentration de fines par égouttage ou ségrégation arrêt d'écoulement si la quantité de fines accumulées est trop forte	organiser les stocks pour permettre un égouttage (dépend de la quantité de fines) prélever à l'avancement dans les stocks (reprise en ligne en évitant le pied des tas) éviter le roulage des camions sur les stocks calibrer régulièrement les sondes de teneur en eau utiliser les sondes comme des indicateurs de fluctuation dégager régulièrement les zones d'accumulation de fines
gravillons	variation de la teneur en éléments fins.	éviter le roulage des camions sur les stocks dégager régulièrement les zones d'accumulation de fines
additions humides	mottage (tableau 6) décantation (figure 7)	émouvoir le produit protéger les stocks pour éviter l'augmentation de teneur en eau (cas des produits peu humides) délayer le produit pour dépasser la teneur en eau de boulettage (cas des produits très humides) agiter en permanence lorsque le produit est délayé
eaux de récupération	décantation irrégularité de la teneur en éléments fins	agiter le produit en permanence contrôler la densité du produit en permanence

(1) À ne pas confondre avec certaines actions (envoi d'air, vibration en fréquence élevée) qui ont pour but d'améliorer le glissement entre le pulvérulent et la paroi du silo et qui provoque pour cela un fusage très localisé.



Le signal enregistré correspond au poids de matériau sur une longueur conventionnelle de la courroie, mesuré à l'aide d'une jauge de déformation au niveau d'un rouleau (vitesse de défilement de l'enregistrement de l'ordre de 1 cm/min). La première partie correspond à une extraction sans remplissage du silo, la seconde, au cours de laquelle on note ponctuellement des excès de produit importants, correspond à une extraction simultanément à un remplissage du silo.

Figure 6 – Mise en évidence de l'influence du remplissage du silo pendant le soutirage**Figure 7 – Observation de la décantation de deux familles de cendres volantes « liquéfiées »**

La première est la **modification du produit** qui entraîne des écarts de dosage immédiats. C'est en particulier la fluctuation de la teneur en eau du matériau (granulats et principalement le sable et les additions humides) ou la variation de la teneur en éléments solides d'une solution (cendres volantes délayées, eau recyclée, solution d'adjuvant, etc.).

Exemple : les deux courbes de la figure 7 représentent le comportement de deux familles de cendres volantes prélevées sur le même site (essai selon NF P 18-359). On constate que la famille (1) se décante dès la fin de l'agitation. Ces cendres volantes étaient diluées avec la même masse d'eau. Le volume de la solution est de 500 ml. La quantité portée en ordonnée représente la quantité d'eau « claire » au-dessus de la solution décantée. Le rapport massique de cendres volantes/eau est de 1.

Tableau 6 – Différence de comportement des cendres volantes selon leur teneur en eau

Teneur en eau (en points)	Aspect	Moyens de manutention	Remarques
moins de 10	pulvérulent sec	comme les ciments, il est nécessaire de les stocker en silo et de les densifier (par évacuation d'air) pour le dosage	prélevées en sortie de cheminée de l'usine de production
de 10 à 20	agglomérats	on les traite comme des sables très peu humides avec un risque important de bouleillage	réhumidification contrôlée nécessaire
de 20 à 50	pâte visqueuse	il est nécessaire de les émouvoir et les mottes sont susceptibles de se reformer après émouvement	état naturel au stock
au-delà de 50 (1)	liquide	se transportent et se dosent comme de l'eau mais il est nécessaire de les agiter en permanence	émouvement, dilution et agitation

(1) La teneur en eau des cendres volantes stockées sur parc a tendance à se stabiliser dans une plage située entre 30 et 40 %, c'est-à-dire à une valeur pour laquelle les risques de formation de boulettes et de colmatage sont maximaux. Leur emploi dans ces conditions nécessite un conditionnement très sérieux. Cette technique a été retenue pour le dosage des cendres volantes humides au barrage du Puylaurens et a donné toute satisfaction [19].

En plus des écarts de dosage, on a pu constater que ces incidents se traduisaient par des modifications des caractéristiques du béton. C'est le cas de la consistance du béton lorsque la teneur en eau du sable fluctue fortement (figure 8).

Exemple : le graphique montre que :

- l'indication de la sonde est fluctuante pour une même mesure ;
- la sonde détecte en retard l'apparition d'un sable très humide ;
- des fluctuations trop fortes de l'humidité du sable perturbent la consistance du béton.

La technique de la mesure de l'humidité du sable s'est notablement améliorée, en particulier pour la qualité de l'information. Toutefois, les deux dernières constatations restent d'actualité : un mauvais positionnement de la sonde dans le flot du matériau entraîne une détection tardive du changement de teneur en eau et cette fluctuation forte de cette teneur en eau ne permet pas de maîtriser correctement la consistance du béton.

La seconde est la **modification de la cohésion interne du constituant** qui modifie son aptitude à s'écouler. Cette modification est constatée principalement dans les constituants qui contiennent à la fois de l'air et de l'eau (sable, cendres volantes humides,...). Elle provoque en général des variations du flux des constituants concernés et peuvent par exemple être à l'origine d'une modification de la quantité d'après coulant lors du dosage ou du retard d'un constituant lors du remplissage du malaxeur.

La troisième est la **variation de la masse volumique du produit** notamment au cours de son transport sur une courroie. Cette anomalie intéresse plus particulièrement la fabrication du béton en mode continu (figure 9). Elle est à l'origine d'erreur de dosage (fabrication en continu) ou de modification de l'après coulant (fabrication en discontinu).

2.2.3.2 Origine des changements d'état

Les trois types de perturbations ont essentiellement pour origine la teneur en air et/ou en eau des constituants. Il faudra donc pour chacun des constituants agir de façon que la quantité de chacun de ces fluides contenus dans le constituant soit proche de celle qui permet une bonne maîtrise de l'écoulement. Cette maîtrise ne correspond pas forcément à l'écoulement le plus facile mais à celui qui sera le moins variable. Selon les cas, il sera nécessaire de réduire la quantité d'air (matériaux pulvérulents secs [15] [16]), d'augmenter la quantité d'air (additions légèrement humides, sable [17]), de diminuer la quantité d'eau (sable), d'augmenter cette quantité d'eau (additions colmatantes), etc. Dans d'autres cas (fabrication en continu, en particulier), il faudra adapter le débit des matériaux en fonction de la « susceptibilité » d'écoulement du constituant à la vitesse d'extraction.

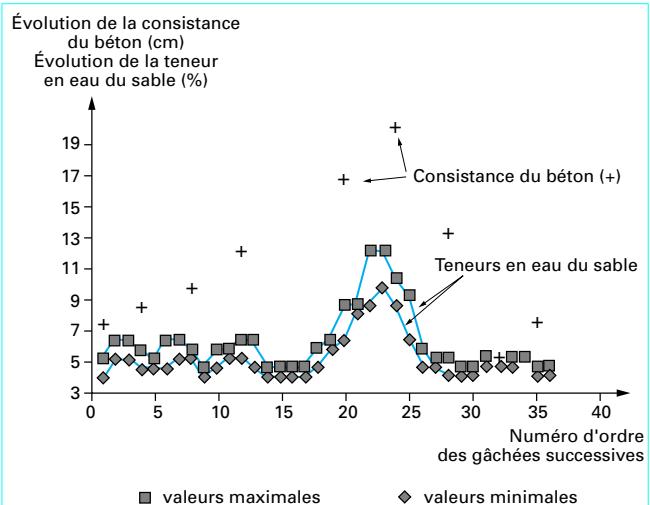


Figure 8 – Influence de la variation de la teneur en eau du sable sur la consistance du béton

Exemple : sur la figure 9, dans la zone reconnue de « fonctionnement acceptable », la variation de la masse volumique autour de la valeur moyenne est inférieur à 3 %. Ainsi, pour le mode de conditionnement retenu pour cette expérimentation, la variation de vitesse acceptable et donc la variation de débit possible est de 20 % autour du débit optimal. L'évolution de la valeur moyenne de la masse volumique impose une prise en compte de celle-ci pour chaque débit pratiqué (calibrage de la masse volumique en fonction de la vitesse).

En dehors de cette zone, les fluctuations possibles sont trop importantes pour garantir un flux régulier de matériau.

Les règles permettant d'ajuster la quantité de fluide pour garantir la régularité de l'état du constituant relèvent de l'expérience d'autant que des paramètres extérieurs peuvent venir modifier les conditions d'équilibre. La variation de la quantité d'éléments fins est fortement influente.

À titre d'exemple, on peut citer les gravillons qui à partir du moment où ils contiennent plus de 2 % d'éléments fins doivent être considérés comme ayant un écoulement irrégulier. Ces éléments fins, qui ne sont pas obligatoirement un signe de manque de propriété, résultent souvent du roulement des camions de livraison sur les stocks.

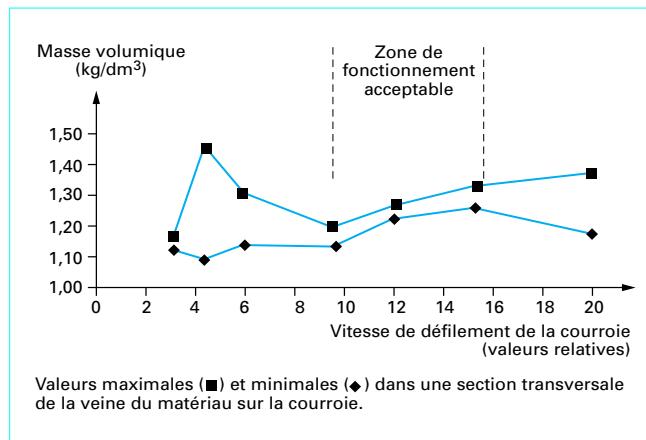


Figure 9 – Évolution de la masse volumique d'une cendre volante sur un tapis extracteur en fonction de la vitesse de défilement [18]

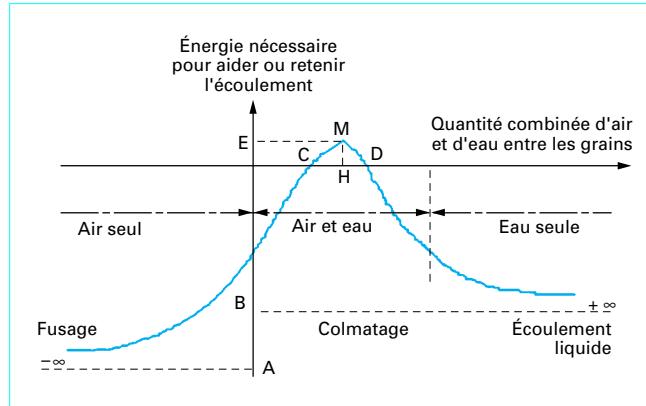


Figure 10 – Schéma du comportement à l'écoulement d'un pulvérulent en fonction de sa teneur en air et en eau

Pour certains produits, on peut, selon les cas, être dans les conditions de matériaux très secs avec en conséquence un excès d'air ou dans le cas de suspension avec toutes les possibilités intermédiaires.

Exemple : sur la figure 10, on porte en ordonnée l'énergie nécessaire en plus de la pesanteur pour provoquer l'écoulement (valeurs positives) ou l'en empêcher (valeurs négatives). On a représenté ici un pulvérulent colmatant en présence d'eau (H). L'axe des abscisses représente la masse volumique du produit pour une quantité finie de pulvérulent sec, ce qui revient à la quantité combinée d'air et d'eau entre les grains. Le pulvérulent à l'état sec et très aéré est fusant (asymptote A) ; en solution, il s'écoule comme un liquide (asymptote B). Il passe par une situation intermédiaire M (d'ordonnée E), qui peut avoir un caractère colmatant si $E > 0$, pour lequel les forces dues aux ménismes air-eau entre les grains sont maximales. En C et D, la force de pesanteur compense les forces internes de cohésion du produit.

Ce schéma considère les grains parfaitement répartis dans le volume du produit.

Dans certains cas, il faut aider le matériau à s'écouler (cas des matériaux dits colmatants) alors que dans d'autres il faut l'empêcher de s'écouler trop vite (cas des matériaux dits fusants). Pour obtenir satisfaction vis-à-vis de l'écoulement, c'est sur le matériel

qu'il conviendra d'agir soit en concevant des matériels spécifiques (trémies pour matériaux colmatants par exemple) soit en installant sur ces matériaux des équipements particuliers (vibreurs, canon à air, ...).

2.2.3.3 Application

Avec l'expérience, nous avons pu déterminer les causes et définir quelques remèdes pour chacun des constituants. Ceux-ci sont décrits dans le tableau 5.

2.3 Dosage des constituants

2.3.1 Objectifs

Doser les constituants, c'est déterminer les proportions de chacun d'eux pour que, une fois regroupés, l'ensemble ainsi formé soit à l'image de la formulation du béton.

Le dosage des constituants serait une opération facile si chacun d'eux se retrouvait isolé et si on utilisait pour chacun un moyen de dosage indépendant. Or, ce n'est pas le cas, ni pour l'indépendance des constituants, ni pour celle des appareils de dosage.

En effet, l'eau par exemple, constituant particulièrement facile à doser lorsqu'il est dans la nature, est dans notre cas en partie entraînée avec les granulats et cette partie sera dosée dans la bascule à granulats et non dans la bascule à eau. L'eau qui sera dosée va, si les granulats ne sont pas saturés, en partie être absorbée par ces granulats ; cette partie d'eau qui sera donc pesée avec l'eau d'apport, ne devra pas être prise en compte dans l'eau efficace, eau efficace dont la quantité est définie par la formulation du béton.

Par ailleurs, pour des raisons de place et d'économie, tous les granulats seront pesés successivement sur la même bascule. Or les tolérances de fabrication qu'il faut respecter s'appliquent à chacun des granulats. Le dispositif de dosage devra donc être tel qu'il satisfasse les tolérances aussi bien pour la fraction granulaire la moins importante que la fraction granulaire la plus importante. Le tableau 7 montre qu'il n'existe pas un seul constituant dont le dosage ne doive pas tenir compte de la présence d'au moins un autre constituant.

Le dosage se fera en référence à des **consignes** qui seront différentes des quantités indiquées dans la formulation. Ces consignes résulteront de la formulation du béton corrigée par des paramètres d'état des constituants (teneur en eau, coefficient d'absorption des granulats,...) ou des paramètres de fonctionnement du matériel (dosage cumulatif, décalage de zéro,...) ou encore des paramètres d'ajustement des caractéristiques du béton pour tenir compte des conditions de transport du béton (exemple correction d'eau pour tenir compte des risques d'évaporation et des risques de raidissement intempestif du béton). Ces consignes sont calculées par l'automatisme avec ou sans l'intervention du conducteur de la centrale. Le mode et les conditions du calcul de ces consignes résultent des fonctions de l'automatisme.

Bien doser les constituants, c'est d'abord bien calculer les consignes (rôle de l'automatisme) puis respecter les consignes aux tolérances près (rôle des moyens de dosage).

Tableau 7 – Liaison entre les différents matériaux et leur mode de dosage dans une centrale à béton

Formulation	Constituants	Dosage	Matériel de dosage	Interférences
sable	sable et eau	cumulé	bascule n° 1	prise en compte de l'erreur sur le constituant précédent et de l'eau apportée
gravillons	gravillons et eau			
additions humides	additions et eau	cumulé	bascule n° 2	prise en compte du liant équivalent (§ 3.4.2.2)
ciment	ciment			
additions	additions			
adjuvants	adjuvant et eau	souvent cumulé avec l'eau	compteur	prise en compte de la quantité théorique de ciment
eau efficace	partie de l'eau	eau d'apport	bascule n° 3 ou pompe	prise en compte du coefficient d'absorption des granulats et de leur teneur en eau

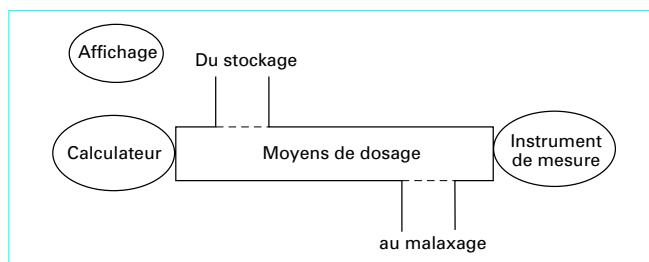


Figure 11 – Schématisation de la chaîne de dosage

2.3.2 Chaîne de dosage

2.3.2.1 Description

Le dosage des matériaux est réalisé à l'aide d'une chaîne de dosage (figure 11) constituée des éléments suivants :

— **un calculateur** ; il calcule les consignes à partir des informations qui lui sont directement adressées par le conducteur de la centrale et les équipements de contrôle et de mesure ; ce calculateur est intégré à l'automatisme de pilotage de la centrale ;

— **un conteneur de matériau** ; il permet d'alimenter le doseur selon les règles déjà analysées pour faciliter l'écoulement du matériau et la maîtrise de son flux ;

— **un dispositif d'extraction du matériau** ; il met le produit en mouvement ; pour les constituants solides, ce sera un extracteur associé à la pesanteur et pour les constituants liquides ce sera une pompe ou un clapet associé à la pesanteur ;

— **un réceptacle pour le matériau dosé** ; il permet de recevoir le produit au fur et à mesure de son dosage ; il doit présenter les caractéristiques adaptées au matériau pour permettre ultérieurement son écoulement ;

— **un instrument de mesure** constitué de capteurs spécifiques (jauges de déformation, ailettes en rotation dans un fluide, compte tours,...), relayés par un dispositif de visualisation et généralement d'une imprimante.

Cette chaîne ou ligne de dosage est complétée par une liaison permanente avec l'automatisme qui, en plus de définir la consigne de dosage, compare en permanence l'information délivrée par le(s) capteur(s) à cette consigne et commande le fonctionnement de l'extracteur pour canaliser le flux de matériau. Cette liaison, qui permet de garantir la qualité du dosage, est gérée à partir de l'analyse de l'information du (des) capteur(s) en accélérant ou en ralentissant le débit, ou en stoppant l'extraction. On retrouvera cette fonction dans le chapitre relatif aux automatismes.

2.3.2.2 Réglementation des instruments de mesure

Les **bascules** sont réglementées par décrets en application de la Directive Européenne 90/384/CEE concernant l'harmonisation des législations des états membres, relatives aux instruments de pesage à fonctionnement non automatique. Le texte technique de référence est la norme NF EN 45501.

Nota : cette dénomination signifie que le cycle de programmation doit être relancé après chaque opération. Il faudrait compléter par « et à équilibre automatique ». Les ensacheuses de ciment par exemple sont des instruments à fonctionnement automatique.

Les **compteurs d'eau** (froide) sont réglementés par le décret n° 76-130 du 29 janvier 1976 et l'arrêté du 19 juillet 1976.

Les **doseurs continus** sont techniquement réglementés par les normes de la sous série NF P 98-700.

2.3.2.2.1 Approbation de modèle et vérifications primitives et périodiques

La réglementation vis-à-vis des bascules et des compteurs prévoit plusieurs niveaux d'intervention : l'approbation de modèle et les vérifications primitive et périodique.

L'**approbation de modèle** correspond à une analyse poussée de la conception de l'instrument et la vérification que les informations délivrées restent stables malgré des variations de température ou des paramètres d'alimentation électrique de l'appareil (tension, fréquence,...). L'approbation de modèle est faite soit par la sous direction de la métrologie (bascules), soit par le Laboratoire de la Ville de Paris (compteurs) pour le compte de cette sous direction.

La **vérification primitive**, qui est réalisée lorsque l'appareil est nouvellement installé, consiste à s'assurer que sur toute la longueur de l'échelle de mesure, l'information délivrée satisfait les exigences de précision (le demi échelon, cf. § 2.3.2.4.1).

La **vérification périodique** est identique à la précédente et est réalisée en général une fois par an sur les appareils en service (respect de la valeur de l'échelon).

Les vérifications des bascules sont réalisées par des basculiers notifiés « vérificateurs » ou « vérificateurs-réparateurs » par les Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) selon le programme défini par la norme FD X 07-017-1 Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des Instruments de Pesage à Fonctionnement Non Automatique (IPFNA).

Ces exigences de contrôle sont imposées réglementairement aux matériels utilisés pour déterminer la facturation du produit. Ce n'est évidemment pas le cas pour les matériels de mesure utilisés dans les centrales de production de béton. Cependant, les règlements techniques des diverses « certifications » ont retenu ces exigences.

2.3.2.2.2 Prise des informations

Dans l'exécution du dosage, les informations sur lesquelles se basera l'automatisme doivent être particulièrement fiables. Cette fiabilité dépendra d'abord du mode de mesure des paramètres. Dans la chaîne, il est nécessaire de choisir le lieu de mesure qui reflétera le mieux l'exécution de l'ordre et non l'ordre lui-même. Les deux exemples qui suivent montrent bien, l'un en fonctionnement discontinu et l'autre en fonctionnement continu que ne pas respecter ce principe conduit le plus souvent à des anomalies.

Exemple 1 : mesure de la quantité d'adjuvant dosé par la mesure du temps de fonctionnement d'une pompe.

La pompe accidentellement (mais on le constate fréquemment) s'est désamorcée ; pendant tout le temps de fonctionnement aucun liquide n'est passé. Un capteur monté sur la canalisation, en aval de la pompe, aurait permis de constater ce désamorçage.

Exemple 2 : mesure de la quantité de granulat délivré par un doseur continu de type pondéral.

La vitesse de défilement de la bande était mesurée à l'aide d'une dynamo tachymétrique montée sur le rouleau « menant ». Or pendant tout le temps de l'opération, on a constaté, par intermittence, un glissement de la bande sur le tambour menant. La mesure aurait été réalisée sur le rouleau mené, l'incident aurait tout de suite été constaté. De même, une analyse fine du signal délivré par la jauge aurait fait apparaître une constance quasi parfaite du signal ce qui est synonyme d'anomalie.

Ces deux exemples montrent qu'il est indispensable de dissocier le matériel qui met en mouvement le produit et le matériel qui mesure la grandeur résultant de cet écoulement.

2.3.2.3 Mode de programmation des consignes

Avant de lancer l'opération de dosage, il est nécessaire de définir la consigne à viser. Pour cela, on doit tenir compte des proportions et imbrications entre les différents constituants et des matériaux utilisés.

2.3.2.3.1 Respect des proportions

On rencontre deux principes dans la méthode de programmation des dosages pour respecter les proportions entre les constituants : soit on prend en référence le dosage réel d'un constituant et on aligne tous les autres sur celui-ci par des valeurs de consigne de proportion (méthode d'assujettissement à un constituant), soit on vise une valeur de consigne fixe pour chacun des constituants (méthode de référence à des consignes fixes).

La formulation d'un béton définit la quantité de chacun des constituants en masse pour un mètre cube de béton compacté à refus.

Nota : pour les autres matériaux de génie civil (enrobé, gravier traité et non traité), la formulation est exprimée en pourcentage de masse sans référence à un volume de mélange. Cette orientation est généralisée aux matériaux mis en place par compactage.

En pratique, on déterminera généralement les quantités de matériaux en masse en fabrication discontinue comme en fabrication continue, toutefois pour les constituants dont le passage de la masse au volume n'entraîne pas de difficultés particulières (exemple les adjuvants en fabrication discontinue ou l'eau, les adjuvants et les gravillons sans fines pour la fabrication continue) et si les moyens de dosage utilisés sont suffisamment fiables, on admet de réaliser les dosages en mode volumétrique.

■ Méthode d'assujettissement à un constituant

Cette méthode est intéressante lorsque l'un des constituants, jugé important pour les propriétés finales du béton, est difficilement maîtrisable en écoulement (ciment, sable...). Dans ce cas, on choisit ce constituant comme la référence de dosage et on mesure la quantité

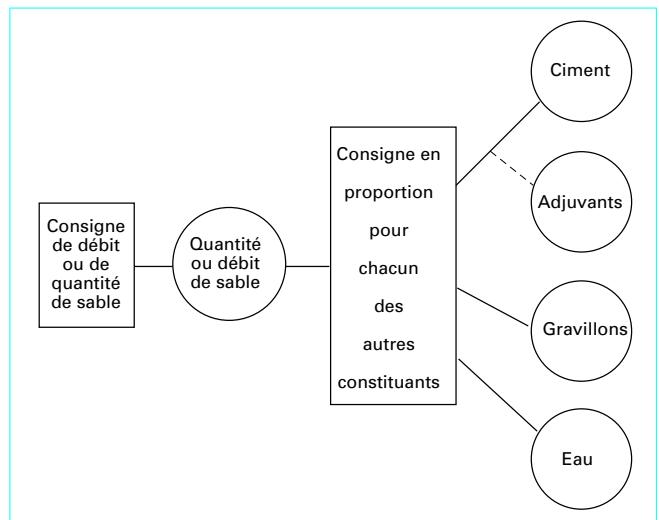


Figure 12 – Mode de définition des consignes par assujettissement du sable (par exemple)

réellement dosée de ce constituant avec précision. Les consignes des autres constituants seront les proportions par rapport à ce premier constituant et on fera varier les quantités des autres constituants selon le dosage réel du constituant de « référence » (figure 12).

En fabrication discontinue, cet effet de cascade n'impose pas que le sable soit entièrement dosé pour lancer le dosage des autres constituants (en particulier, le ciment qui est en général très long). On peut concevoir des ajustements de consignes au cours du dosage. Ce principe implique que le sable soit dosé en premier lors du dosage en cumulé des granulats.

En fabrication continue, ce principe impose que le sable soit le constituant le plus éloigné en temps des constituants. Il faut une bonne connaissance des décalages spatio-temporels de l'ensemble des constituants.

Cette méthode implique une très bonne mesure du constituant de référence. Elle peut être particulièrement intéressante pour la fabrication en continu sous réserve de bien connaître les décalages spatio-temporels entre les constituants afin de pouvoir réagir au bon moment.

Exemple : ce mode de dosage est utilisé dans les centrales continues d'enrobage entre les granulats secs en sortie de la trémie et le bitume.

L'erreur sur le constituant de référence n'a pas de conséquence puisque tous les constituants seront dans les bonnes proportions.

On vise plus particulièrement le sable ou le ciment comme constituant de référence. En pratique, on choisit plutôt le sable bien que son influence sur les propriétés finales du béton soit moindre que pour le ciment. En effet, le flux du ciment est généralement un paramètre régulier que l'on sait correctement maîtriser et les doseurs utilisés pour le ciment sont très performants (probablement du fait du coût du produit). À l'inverse, le sable, du fait de la fluctuation de sa teneur en eau, a un écoulement irrégulier et les doseurs utilisés n'ont pas le même degré de sophistication que les doseurs à ciment.

Le choix du sable comme constituant de référence n'interdit pas les possibilités d'aligner le dosage des adjuvants sur la consigne du ciment.

C'est probablement une méthode d'avenir car elle permet de prendre en compte, et même d'annihiler pour le dosage de tous les

constituants, l'erreur faite sur le constituant jugé le plus influent sur les caractéristiques du béton.

■ Méthode de référence à des consignes fixes

Chaque constituant a sa propre consigne en valeur absolue, qui reste fixe quoi qu'il arrive. C'est la méthode la plus utilisée. Elle impose qu'on réalise un conditionnement efficace pour tous les constituants et sous-entend l'absence de liaison probabiliste entre les dosages de chacun des constituants, ce qui n'était pas toujours le cas dans le passé (dosage cumulatif avec programmation par cumul). En effet, on a pu constater que lorsqu'un granulat était dosé en faible quantité après un autre granulat dosé en forte quantité, il arrivait fréquemment, qu'avec le jeu des tolérances, le premier cité était omis.

Bien entendu, les désagréments les plus graves ne sont pas les plus probables et les écarts extrêmes sur deux constituants jugés importants pour la qualité du béton, ont une très faible probabilité de se produire simultanément (exemple dosage minimal en ciment et dosage maximal en eau vis-à-vis du respect du rapport de l'eau au ciment, tableau 8). C'est pourquoi cette méthode, dans l'état actuel des exigences, est tout à fait satisfaisante.

Tableau 8 – Exemple du cumul « malheureux des écarts de dosage »

Constituant	Quantités théoriques	Erreur maximale tolérée EMT (§ 2.3.2.4.1)	Valeurs limites admissibles pour E_{eff} et C Valeur résultante pour E_{eff}/C
Eau efficace E_{eff}	180 L	+ 11 L	191 L
Ciment C	400 kg	- 20 kg	380 kg
E_{eff}/C	0,45	-	0,5

En pratique, la loi de combinaison des variances conduit, et c'est ce que l'on constate généralement, à des écarts sur le rapport E_{eff}/C , très inférieurs

2.3.2.3.2 Dosage en cumulé

Par économie de place, on utilise le plus souvent une seule bascule pour doser deux constituants ou plus. C'est le cas très généralement des granulats et quelquefois du ciment et des additions sèches et très rarement maintenant du ciment et de l'eau (dans des cuves différentes). Le choix de l'ordre de dosage dépend du mode de programmation.

En dehors de la prise en compte des constituants à doser, il existe une règle de base qu'en aucun cas on ne peut transgresser : c'est le moment de la prise d'information pour caractériser le dosage d'un constituant en vue du lancement du dosage suivant. Il est impératif de laisser un temps de stabilisation entre deux pesées successives (entre une et trois secondes) et le moment où l'on prend l'information correspond à la fin de ce délai. En effet, malgré toutes les précautions et dispositions qui ont été prises pour obtenir un écoulement régulier, il est de la plus haute fantaisie de garantir qu'une prise à la « volée » donne un résultat fiable.

■ Programmation par cumul

Ce mode de programmation (figure 13) consiste à définir au-delà du premier constituant, la consigne comme la somme des constituants précédemment dosés dans la bascule avec la quantité du constituant à venir. Ainsi au-delà du premier constituant, les suivants ne sont plus individualisés mais n'apparaissent que dans la différence entre la valeur programmée et la quantité de matériaux déjà dosés. Si donc le dosage des matériaux précédents fait apparaître un écart de dosage celui-ci sera automatiquement reporté sur le nouveau.

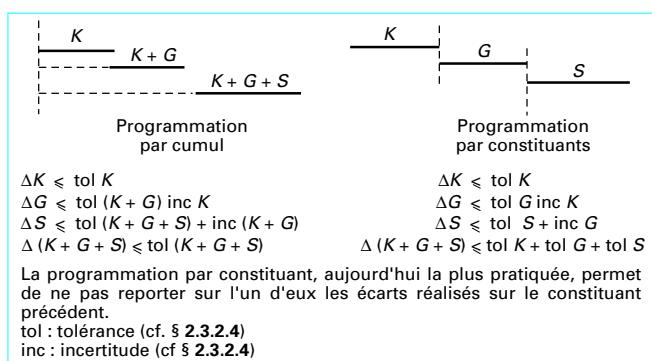


Figure 13 – Comparaison des écarts selon le mode de programmation en cumulé

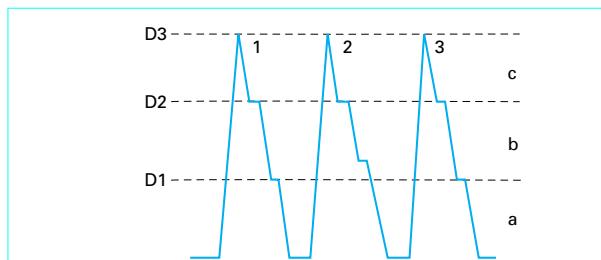


Figure 14 – Exemple des erreurs de dosage sur le constituant intermédiaire dans le cas d'un dosage cumulatif des granulats

Exemple : le graphique de la figure 14 est la recopie d'un enregistrement fait sur chantier, elle représente le dosage des granulats pour trois gâchées successives 1, 2 et 3. Chaque gâchée (§ 2.4.3.1) comporte trois granulats a, b et c. Les consignes de dosage sont D1 (granulat a), D2 (granulats a + b) et D3 (granulats a + b + c). C'est la programmation par sommes successives.

On constate pour la gâchée 2 qu'un surdosage du granulat (a) de 15 % entraîne un sous dosage du granulat (b) de 21 %. Cette incidence aurait pu être beaucoup plus grave si le constituant (b) était dosé en quantité plus faible, ce qui est souvent le cas des gravillons intermédiaires. L'incident, dans ce cas, est dû à une irrégularité d'écoulement du matériau (a).

L'erreur relative peut alors être très importante notamment si la quantité du nouveau constituant est faible (cas des gravillons intermédiaires). Dans le cas des dosages des granulats il faut, pour limiter les conséquences du report des erreurs, doser les classes granulaires dans un ordre continu (croissant ou décroissant) de granularité. Les écarts sur une classe sont alors compensés par la classe de granularité la plus voisine.

Avec les progrès de la technique informatique, cette méthode n'existe quasiment plus sur les nouvelles installations.

■ Programmation par constituants

Le procédé figure 13 consiste à définir la consigne d'un constituant en comptant à partir de la valeur réellement atteinte par l'ensemble des constituants précédemment dosés dans la bascule. Ainsi sur chacun des constituants, on ne trouve que l'écart correspondant à l'incertitude de mesure. L'expérience montre qu'on ne constate pas d'accumulation d'erreurs lorsque ces écarts sont réellement aléatoires. La figure 13 montre que les écarts de dosage sont plus favorables dans le cas de la programmation par constituants. L'avantage principal de cette méthode est de pouvoir choisir l'ordre

de dosage qui satisfait le mieux l'efficacité de vidange de la trémie réceptrice des constituants. C'est aujourd'hui cette méthode qui est la plus utilisée.

■ Dosage soustractif (ou dépesage)

Le dosage soustractif consiste à prélever d'une bascule une quantité précise de matériau dans une quantité plus grande. Ce mode de fonctionnement présente de sérieux avantages car il permet d'accroître les débits de production, le remplissage de la trémie à partir de laquelle est soutiré le produit se faisant pendant les périodes « imprudentes ». Cette pratique implique que l'instrument de pesage possède un grand nombre d'échelons pour que la tare, importante dans ce cas, ne vienne pas réduire la précision du dosage. En production discontinue, c'est principalement pour le ciment que le dosage soustractif est pratiqué.

2.3.2.3.3 Prise en compte du fonctionnement du matériel

Le matériel de transfert a une influence importante dans la correspondance entre la quantité programmée et la quantité réellement délivrée.

■ Après coulant

Lorsque l'automatisme donne l'ordre d'arrêter le dosage, la réponse des matériels n'est pas instantanée et une quantité de matériau peut encore arriver dans l'organe de dosage après cet ordre. L'après coulant combine le matériau qui est « en l'air », le matériau qui est apporté pendant le temps d'arrêt du dispositif d'apport du matériau et le matériau qui tombe après l'arrêt de fonctionnement du matériau (matériau présent dans la spire de la vis, talus de matériau se trouvant à l'extrémité du tapis...). Ces quantités sont généralement connues approximativement et doivent donc être prises en compte pour qu'une fois ces apports complémentaires faits, la quantité de matériau corresponde à la quantité souhaitée. Il faut donc prédir l'importance de cet apport, ce qui n'est pas toujours évident car ces apports peuvent dépendre de différents facteurs dont l'humidité du matériau (sable en particulier pour le problème du talutage).

■ Erreur de chute (ou de jetée)

Dans le cas du pesage, l'automatisme prend en compte la sollicitation sur la trémie de réception du matériau. Or, cette sollicitation

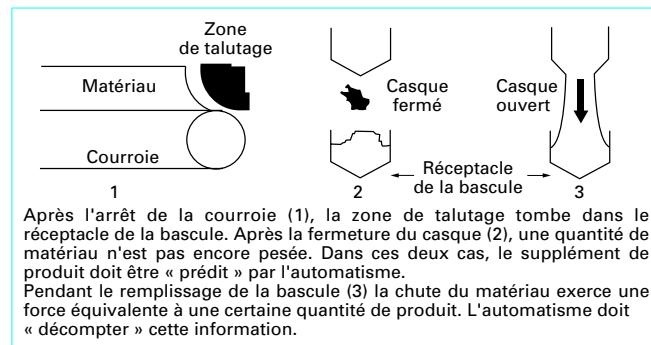
correspond à la quantité de matériau présent et à l'impact du matériau dans sa chute. Cet impact dépend du degré de remplissage de la trémie et sera donc variable selon la quantité à doser. Là encore, l'automatisme devra prendre en compte cette quantité qui est manquante.

■ Estimation de ces erreurs

Qu'il s'agisse de l'erreur de chute ou de l'après coulant (figure 15), il n'existe pas de méthode précise permettant de calculer les quantités de matériau concernées. C'est l'expérience qui permet de préprogrammer ces quantités.

2.3.2.4 Réglages et leur détermination

Dans la pratique, il existe des termes souvent utilisés les uns pour les autres alors que chacun d'eux définit une opération spécifique, relative à un matériel ou une action donnée et avec un objectif très précis. Le tableau 9 résume ces différents termes ou expressions. Parmi ceux ci, on peut citer l'étalonnage et le calibrage qui sont très souvent assimilés au réglage du matériel.



Après l'arrêt de la courroie (1), la zone de talutage tombe dans le réceptacle de la bascule. Après la fermeture du casque (2), une quantité de matériau n'est pas encore pesée. Dans ces deux cas, le supplément de produit doit être « prédict » par l'automatisme.

Pendant le remplissage de la bascule (3) la chute du matériau exerce une force équivalente à une certaine quantité de produit. L'automatisme doit « décompter » cette information.

Figure 15 – Talutage, après coulant et jetée

Tableau 9 – Terminologie métrologique (NF X 07-001) [22]

Matériels ou actions	Définitions	Opérations et/ou performances associées	Objectifs	Observations
instrument de mesure	matériel permettant de mesurer la quantité de matériau dosé	étalonnage	opération permettant de raccorder l'instrument de mesure à une échelle de mesure « exacte »	la référence est un étalon
		précision (absolue)	écart minimal d'indication entre deux valeurs pouvant être discriminées par l'instrument de mesure	correspond à la valeur de l'échelon
chaîne de dosage	ensemble des matériels permettant de doser les matériaux	calibrage	opération permettant de connaître l'écart entre la quantité commandée et la quantité obtenue de matériau	l'instrument de mesure est pris comme référence
		tolérance	écart admissible de matériau défini par le coefficient de variation d'une population gaussienne	caractérise les performances de la chaîne de dosage
		vérification	opération permettant de mesurer l'importance de la dérive de l'écart de matériau	bilan matière, étalonnage, calibrage de la chaîne
dosage	ensemble des opérations permettant de délivrer la quantité de matériaux	incertitude de mesure	écart vrai entre la lecture et la quantité vraie	inférieur à la valeur de l'EMT
		seuils d'acceptation	limite au-delà de laquelle le dosage n'est plus acceptable	en relation directe avec les performances du béton
		dérive	progression continue et monotone de l'écart de matériaux délivré	influence de l'usure et des chocs

Le réglage d'un appareil ou d'une chaîne de matériels est l'ensemble des opérations permettant de mettre ce matériel ou cette chaîne dans un état de fonctionnement lui permettant de remplir les fonctions qui lui sont attribuées. C'est une opération « tournevis et (même) marteau ».

L'étalonnage comme le **calibrage** ne sont que des constatations de ce que peut faire le matériel ou la chaîne de matériels et on ne doit pas faire d'opérations de réglage pendant que se déroulent les opérations d'étalonnage ou de calibrage. En effet, le fait d'intervenir sur le matériel modifie son état et oblige à reprendre les opérations d'étalonnage ou de calibrage au point zéro.

2.3.2.4.1 Instrument de mesure

■ Étalonnage

L'étalonnage (NF X 07-001) est l'ensemble des opérations établissant la relation entre les valeurs de la grandeur indiquée par un appareil de mesure et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisées par des étalons.

C'est l'opération qui consiste à mesurer l'écart entre l'indication du cadran de l'appareil de mesure et la somme des masses marquées étalons placées sur l'appareil de mesure. Cette opération doit être réalisée par un personnel qualifié dont la qualification est reconnue par la Sous-Direction de la Métrologie (liste publiée périodiquement). Les grandeurs étalons utilisées doivent avoir fait l'objet d'une vérification périodique (attestation).

L'étalonnage caractérise l'instrument de mesure dans la situation où il se trouve pour effectuer les dosages, il ne doit donc pas être déconnecté des canalisations ou autres éléments permettant l'arrivée et le départ du matériau. Ces canalisations ou ces autres éléments ne doivent pas entraver le libre mouvement du conteneur dans lequel se trouve les matériaux à peser. Une vérification manuelle préalable est indispensable.

■ Incertitude de mesure et précision

L'incertitude (NF X 07-001) est le paramètre associé au résultat d'un mesurage qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande (valeur lue).

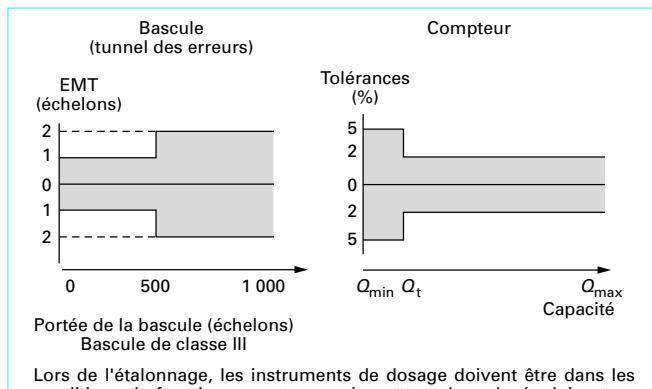
Les **erreurs maximales tolérées EMT** (NF X 07-001) sont les valeurs extrêmes d'une erreur tolérées par les spécifications, règlements, etc. pour un instrument de mesure donné.

La détermination de la quantité réellement dosée est réalisée à l'aide d'un instrument de mesure. Cet instrument de mesure possède son propre niveau d'incertitude dans les informations qu'il délivre. Cette incertitude (en valeur absolue) est en liaison avec la plus petite valeur que l'appareil de mesure est capable de discriminer.

L'échelon est la valeur maximale de l'incertitude absolue. La **précision** absolue de l'appareil de mesure est la valeur de l'échelon.

Pour nos besoins, l'incertitude de mesure doit être inférieure à l'**erreur maximale tolérée EMT** qui correspond à 1, 2 ou 3 échelons selon la classe de précision de la bascule (voir tunnel des erreurs sur la figure 16). La validité de l'échelon a été vérifiée lors de l'étalonnage sur toute l'échelle de mesure.

Les informations inférieures à la valeur de l'échelon (deux ou trois échelons dans certains cas) n'ont donc aucune validité garantie.



Lors de l'étalonnage, les instruments de dosage doivent être dans les conditions de fonctionnement normales et tous les relevés doivent se situer dans la partie grisée.

Figure 16 – Tolérances admises pour les instruments de mesure

Pour pouvoir caractériser les bascules par une seule information et permettre ainsi leur comparaison, il est défini la **précision relative** comme étant le rapport de la valeur de l'échelon à la portée maximale de cette bascule.

Remarque : si la valeur de l'échelon a un sens réel pour la mesure, la valeur de la précision relative n'a par contre aucune signification pour cette mesure car pour apprécier la précision de la mesure, il faudra toujours se rapporter à la quantité réellement pesée qui sera évidemment inférieure à cette portée maximale.

2.3.2.4.2 Chaîne de dosage

■ Calibrage

C'est l'opération qui permet de repérer la valeur programmée par rapport à la valeur vraie du résultat mesuré [17]. La valeur programmée est celle qui est affichée au pupitre. La valeur vraie est celle qui est lue sur le cadran de l'appareil de mesure. En pratique dans notre domaine, on repérera l'affichage pour que la quantité obtenue, information lue sur le cadran, corresponde bien à celle qui est souhaitée.

Le calibrage doit impérativement être réalisé avec le matériau qui sera ultérieurement dosé avec le matériel testé.

■ Écart de dosage et tolérances de fabrication

Les dosages vont être réalisés à l'aide d'une chaîne de matériels, aujourd'hui de plus en plus sophistiqués. Chacun de ces matériels possède une marge de variabilité dans laquelle toutes les situations, d'une pesée sur l'autre, sont possibles et aléatoires.

De nombreuses causes sont à l'origine d'un écart entre la valeur lue (qui représente la valeur réelle) et la valeur de consigne ; ce sont :

- la précision du système d'affichage (sans prendre en compte une erreur d'affichage) ;
- la traduction de l'affichage de la consigne en signal de commande ;
- l'estimation de l'erreur de jetée ou/et de l'après coulant ;
- la détermination du moment d'arrêt de dosage ;
- l'incertitude de mesure.

Toutes ces origines présentent la particularité d'être indépendantes les unes des autres et les écarts ont, dans des installations normalement conçues et correctement réglées, une distribution

aléatoire et des ordres de grandeurs voisins. On peut donc admettre que la loi de distribution de ces écarts est assimilable à une loi normale centrée.

La population des valeurs de dosage de chacun des matériaux est de ce fait assimilée à une courbe gaussienne avec la possibilité de trouver des valeurs qui s'éloignent notablement de la valeur moyenne (un casque qui se coince, le fusage d'un produit ou son blocage, une erreur du conducteur de la centrale...). Ces incidents ne signifient pas que le matériel n'est pas adapté à sa fonction, ce sont des aléas naturels et leur occurrence est généralement très faible. On a donc renoncé à définir les tolérances de dosage comme des valeurs extrêmes devant être respectées pour chaque pesée et on a choisi une définition statistique, liée à l'écart type de la population.

La tolérance de dosage, qui doit caractériser le fonctionnement de la chaîne de dosage, sera donc choisie égale à l'écart type de la population des écarts de dosage.

Cette tolérance intègre l'incertitude de mesure de l'instrument (précision de l'instrument) ainsi que les éventuelles erreurs d'affichage, par le conducteur de la centrale.

Le tableau 10 résume les différentes exigences actuellement en vigueur. Dans les différents textes en application à ce jour, l'expression de la tolérance pour chacun des constituants diffère mais ici elles ont toutes été ramenées à la même référence (distribution statistique selon une loi de Gauss). La précision s'applique à l'instrument, la tolérance s'applique au dosage et le seuil s'applique au constituant.

Cohérence entre précision et tolérances

En règle métrologique pure, on considère que la précision liée à l'appareil de mesure doit être dix fois plus faible que la tolérance. C'est pourquoi, les tolérances de dosage étant de l'ordre de 1 %, la précision demandée pour les instruments de mesure est de l'ordre de 1 %.

Cette exigence n'est pas superflue pour les deux raisons suivantes :

— la précision est déterminée en référence à la capacité maximale de l'instrument de mesure (portée pour une bascule) ; or la quantité dosée de matériau est, dans le meilleur des cas, comprise entre 0,5 et 0,9 fois la capacité de l'instrument de mesure ;

— les incertitudes doivent être comptées en début et en fin de chaque pesée.

De ce fait, on se rend compte que l'on admet implicitement une proportion entre incertitude relative maximale et tolérance beaucoup plus proche de trois que de dix.

Exemple : dans le tableau 11, le rapport de 3 est, le plus souvent, ce que l'on obtient de mieux.

Ce calcul considère le cas le plus défavorable notamment pour la détermination de l'incertitude absolue sur la quantité dosée puisque l'on additionne les écarts maximaux de début et de fin de pesée.

Tableau 10 – Valeur des portées, des précisions, des tolérances et des seuils d'acceptation selon les constituants dans le cas d'utilisation de bascules

Constituants		Portée de la bascule pour une gâchée de 1 m ³	Précision de l'instrument de mesure (1/n échelons)	Tolérances de dosage (coefficients de variation)	Seuils d'acceptation pour le béton
granulats	caractéristiques de la bascule	3 t	0,002		
	sable			0,03	
	sable correcteur			0,10	
	total sable				0,06
	gravillons			0,03	
	granulat correcteur			0,10	
	total des granulats				0,05
liants	caractéristiques de la bascule	0,6 t	0,002		
	ciment			0,02	
	addition			0,05	
	total liant				0,05
adjuvant	caractéristiques de la bascule	0,03 t (1)	0,002 (1)		
	chaque adjuvant			0,02	0,05
eau	caractéristiques de la bascule	0,3 t	0,002		
	eau de gâchage			0,02	
	eau efficace				0,12
total constituants					0,05
Opérations au cours desquelles on s'assure de la validité de ces grandeurs		identification de la centrale	étalonnage généralement annuel	calibrage vérification périodique	réception à la livraison du béton

(1) on admet couramment l'utilisation d'un compteur pour le dosage des adjuvants

Tableau 11 – Exemple du rapport réel entre incertitude de mesure et tolérance pour le dosage du ciment

Description de la bascule à ciment	Portée : 500 kg Nombre d'échelons de vérification : 500 Valeur de l'échelon de vérification : 1 kg Précision relative de la bascule : 2 %
Description de l'exigence	Quantité à doser : 300 kg Tolérance : 2 %
Résultat de la mesure	Incertitude maximale absolue sur chaque mesure : $500 \times 0,002 = 1 \text{ kg}$ Incertitude maximale absolue sur la quantité dosée : $1 \text{ kg} \times 2 = 2 \text{ kg}$ Incertitude relative sur le dosage du ciment : $2 \text{ kg} / 300 \text{ kg} = 0,66 \%$
Rapport entre tolérance et incertitude relative : $2/0,66 = 3$	

2.3.2.4.3 Quantité de matériaux délivrée**■ Seuils d'acceptation**

Si la tolérance peut être définie statistiquement, il n'est pas contre pas concevable, même si le risque est faible, que la proportion de l'un quelconque des constituants soit trop éloignée de la valeur théorique. En conséquence pour chaque ouvrage, on fixe des seuils d'acceptation devant être en permanence respectées. Ces seuils s'appliquent à chaque constituant après avoir tenu compte des éventuels regroupements de constituants différents (sable et eau par exemple).

Comme il est dit dans la remarque du § 2.3.2.4.1, la puissance de l'appareil de mesure n'est pas significative et on considérera de préférence l'incertitude de cette mesure que cette précision entraîne.

■ Affichage de la consigne

Pour permettre l'obtention d'un mélange à l'image de la composition, il est indispensable d'afficher la valeur résultante du calcul qui prend en compte l'état réel du constituant concerné. On a souvent constaté, que pour s'assurer du respect d'une spécification, l'affichage était majoré ou minoré selon le sens de la spécification (valeur spécifiée inférieure ou supérieure). Ce procédé est la preuve d'un réglage non optimisé. Il est tout à fait antiéconomique et illusoire de vouloir compenser un réglage approximatif par un surdosage (ou un sous-dosage) des constituants comme sur la figure 17.

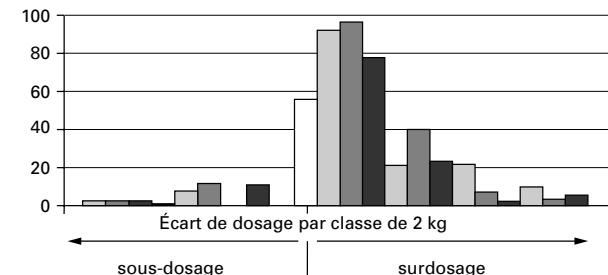
Ces pratiques peuvent donner naissance à des conséquences graves pour la qualité du béton et donc de l'ouvrage. Dans de nombreux cas, cette pratique a été à l'origine d'ajout d'eau sur chantier, la fabrication d'un béton très sec ne donnait des garanties supplémentaires que pour l'obtention de la résistance sur éprouvettes.

Il est tout aussi aberrant de vouloir profiter d'un « super » réglage pour viser au-dessous de la valeur théorique sous prétexte que, par un réglage très soigné on se sent capable de faire mieux que les spécifications. La distribution des résultats des dosages montre que le risque pris avec cette pratique devient très important.

■ Cohérence entre tolérances et seuils d'acceptation

Selon les définitions précédentes, la tolérance a une définition probabiliste alors que le seuil d'acceptation a une définition abso-

Nombre de cas constatés d'écart de dosage



Les relevés ont montré que le plus souvent la consigne de dosage était plutôt supérieure à la quantité estimée suffisante afin de garantir le respect des valeurs limites de dosage (relevé de bascules à ciment).

Figure 17 – Étalonnage de bascule (doc. CERIB)

lue. Il existe une relation entre ces deux valeurs pour que le risque du fournisseur ne soit pas trop élevé. On considère que le bon rapport entre le seuil d'acceptation et la valeur de l'écart type de distribution de la population des dosages est de 2,5.

Les textes actuels ont retenu deux modes de définitions des tolérances (tableau 12) : correspondant à un écart type (NF P 98-730) ou correspondant à 80 % des valeurs (XP P 18-305). Ces deux modes se rapportent en fait à la même population, les risques sont identiques. Par contre, on constate qu'en choisissant des seuils très serrés (3 %) le risque de refuser le béton, jugé conforme en production, au vu du listage des pesées, est très élevé (0,14).

Tableau 12 – Cohérence tolérances/seuils d'acceptation (exemple pour le ciment)

Tolérances			NF P 98-730	XP P 18-305
Tolérances			2 %	2,5 %
Proportion de valeurs couverte par ces tolérances			68 %	80 %
Correspondance exprimée en écarts types			1	1,28
Seuil	Valeurs	Définition du seuil	Probabilité de dépasser les seuils (1)	
	3 %	100 % des valeurs	0,14	
	5 %	100 % des valeurs	0,02	

(1) Malgré le respect des tolérances de dosage

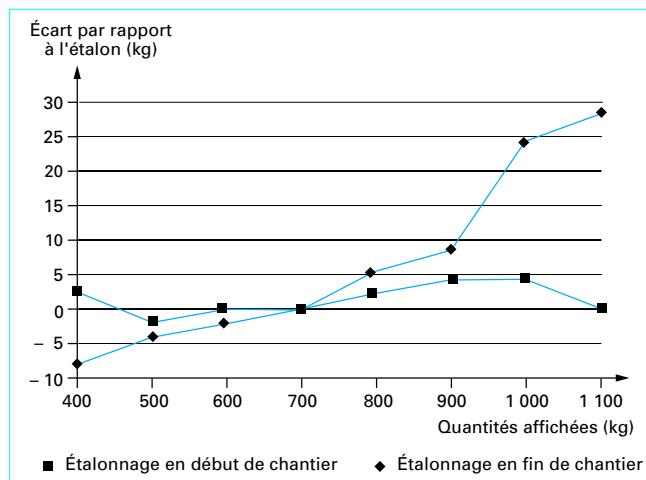


Figure 18 – Dérive d'une bascule

Dérive des réglages et vérifications

Un casque de dosage à sable s'ouvre et se ferme 18 000 fois par an pour une centrale fabriquant 15 000 m³ de béton annuellement. Si on réalise le dosage fin par battement de casque, ce sera entre 36 000 et 72 000 mouvements. Ce casque aura vu passer 15 000 t de sable. Autant dire beaucoup de chocs et de frottements qui seront à l'origine d'une évolution des matériaux et d'une dérive des réglages.

Exemple : la figure 18 montre la dérive constatée sur la bascule à l'origine d'une évolution des matériaux et d'une dérive des réglages.

En début de chantier, l'écart maximal constaté était de 4 kg soit de l'ordre de 0,5 %. Par l'usure et les vibrations, les dérives ont conduit à avoir un écart maximal systématique de + 28 kg soit 2,5 %. Le dosage courant se situant autour de 1 000 kg (gâchée de 3,5 m³), la surconsommation de ciment a atteint plusieurs centaines de tonnes.

L'élément de référence retenu pour déterminer les quantités de matériaux est l'instrument de mesure une fois étalonné. Avec un étalonnage annuel, on peut craindre que des dérives interviennent pendant cet intervalle. On perd alors toutes possibilités de maîtriser les quantités de matériaux consommés.

Le seul moyen de recouplement fiable consiste en dehors d'une vérification du matériel à effectuer un bilan matière. On réalise pour cela une comptabilité aussi précise que possible des entrées de matériaux (livraison du constituant) et les sorties (fabrication et prélevements éventuels). Si cette méthode ne donne pas de résultats très significatifs les premiers jours, elle devient par contre très pré-

cise pour les matériaux stockés en trémie ou en silos après quelques temps d'application.

Nota : ce bilan matière est pratiqué pour la fabrication des enrobés et les résultats obtenus permettent d'affiner le réglage en bitume.

2.3.3 Matériels de dosage

En pratique (tableau 13), pour la fabrication discontinue, il sera utilisé des bascules (dosage pondéral) et des compteurs ou des débitmètres (ces derniers seront utilisés comme des compteurs), alors qu'en fabrication continue il sera utilisé des doseurs continus (volumétriques ou pondéraux) et des débitmètres ou des compteurs (ces derniers seront utilisés comme des débitmètres).

2.3.3.1 Bascules

Selon les définitions données par la norme NF EN 45501, les instruments de pesage utilisés pour la fabrication du béton sont de la classe III appelée classe moyenne (anciennement classe commerciale) ou de la classe IIII appelée ordinaire (tableau 14). En pratique, compte tenu de l'exemple présenté dans le tableau 11, seuls les instruments de pesage relevant de la classe III permettent de satisfaire, avec une probabilité suffisante, les tolérances de fabrication spécifiées.

Les principales règles d'utilisation des bascules sont les suivantes :

— la **portée** de chaque bascule doit être telle que toutes les pesées à réaliser sont supérieures à 10 % de cette portée ; la portée est exprimée en fonction du volume nominal de la gâchée (tableau 10) ;

— l'**échelon de vérification** représente l'incertitude absolue maximale ; il n'a de valeur que s'il a été vérifié tout au long de l'échelle de mesure par un organisme notifié (tableau 13) ;

— l'**écart maximal toléré EMT** (pour une bascule), en service, doit être inférieur à 1 échelon de vérification lorsqu'il y a au moins 500 échelons de vérification et de 2 échelons de vérification au-delà (figure 16) ;

— la **précision relative d'une pesée** sera d'autant plus faible que la quantité de matériau dosé sera grande.

Nota : il existe une valeur d'EMT différente lors de la première mise en service. Lors de la vérification primitive, c'est-à-dire la visite qui suit la première installation, la valeur de l'EMT est la moitié de l'EMT en service courant.

Il existe de nombreux types de bascules. Toutes comportent un réceptacle (réserve), un dispositif de mesure et un système d'évaluation (extracteur) [20]. Leur constitution est décrite dans le tableau 14.

On utilisera toujours des bascules pour les granulats et les pulvérulents. Pour l'eau, ce type de dosage est également préféré dans les centrales reliées à un réseau où la pression peut fréquemment fluctuer. Pour les adjuvants, l'emploi d'une bascule est plus délicat car, les quantités étant faibles, les bascules sont plus petites et de ce fait plus sensibles aux vibrations qui existent dans les centrales.

Tableau 13 – Caractéristiques des bascules

Classe de précision		Nombre minimal d'échelons de vérification : e	Portée minimale	Valeur de l'EMT (1) en service
Appellation	Symboles			
moyenne	III	500	20 e	1 jusqu'à 500 e 2 e au-delà
ordinaire	IIII	100	10 e	1 jusqu'à 50 e 2 de 50 à 200 e 3 e au-delà

(1) S'applique pour la vérification périodique.

Seule la classe de précision moyenne permet avec une probabilité raisonnable de satisfaire les tolérances de fabrication et les seuils d'acceptation du béton, en application à ce jour.

Tableau 14 – Récapitulatif des moyens utilisés pour le dosage des constituants

Constituants	Mode de fabrication	Réserve de constituant	Extracteur	Grandeur mesurée ou dispositif de mesure	
				volumétrique	pondéral (3)
granulats	discontinu	trémie tas au sol	casque courroie godet	(2)	jauge de déformation
	continu	trémie	courroie		vitesse de la courroie (5)
pulvérulent sec	discontinu	silo	vis alvéolaire	(2)	jauge de déformation
	continu	trémie	conditionneur courroie		vitesse du tapis et jauge de déformation
eau	discontinu	réseau réservoir (6)	vanne pompe	compteur débitmètre (4)	jauge de déformation
	continu	réseau réservoir (6)	pompe	débitmètre compteur	(1)
adjuvant	discontinu	cuvette citerne (7)	pompe	débitmètre et chronomètre compteur	jauge de déformation
	continu	cuvette citerne (7)	pompe	débitmètre compteur	(1)

- (1) Il n'est pas pratiqué, dans la fabrication des bétons, le dosage pondéral en fonctionnement continu (il existe en enrobé pour le dosage du bitume avec le compteur massique).
 (2) Le dosage volumétrique pour les granulats et le pulvérulent en continu et pour le pulvérulent en continu n'est pas reconnu.
 (3) Le pesage à partir de bascule mécanique n'est plus installé. On peut encore le trouver sur des installations anciennes.
 (4) Le mode de dosage par le temps de fonctionnement d'une pompe n'est pas admissible pour l'eau.
 (5) Ce mode de dosage n'est pratiqué que si la teneur en éléments fins est inférieure à 2 %.
 (6) Présence d'un agitateur en cas d'eau de récupération.
 (7) Présence d'un agitateur pour les solutions d'adjuvant et d'un calorifugeage pour les adjuvants gélifs.

2.3.3.2 Compteurs volumétriques

Nous prenons comme référence dans ce document les compteurs d'eau froide, considérant que les exigences prévues devraient s'appliquer pour les compteurs utilisés pour le dosage des adjuvants qui représentent la principale utilisation des compteurs sur les centrales à béton.

Selon le décret n° 76-130 du 29 janvier 1976 et l'arrêté du 19 juillet 1976, les définitions des caractéristiques des compteurs sont les suivantes :

— le **débit maximal**, Q_{\max} , est le débit le plus élevé auquel le compteur doit pouvoir fonctionner sans détérioration, pendant des durées limitées, en respectant les erreurs maximales tolérées et sans dépasser la valeur maximale de la perte de pression provoquée par la présence du compteur dans la conduite d'eau ;

— le **débit nominal**, Q_n , est le débit égal à la moitié du débit maximal Q_{\max} exprimé en mètres cubes par heure (en pratique, la désignation d'un compteur se fait par le débit nominal) ;

— le **débit minimal**, Q_{\min} , est le débit à partir duquel tout compteur doit respecter les erreurs maximales tolérées ;

— le **débit de transition**, Q_t , est la valeur du débit compris entre Q_{\max} et Q_{\min} qui délimite les zones de débit pour lesquelles les erreurs maximales tolérées sont différentes ;

— l'**écart maximal toléré** est de cinq centièmes du volume mesuré pour des débits inférieurs au débit de transition et de deux centièmes du volume mesuré pour les débits supérieurs au débit de transition (figure 16) ;

les **trois classes métrologiques** de compteurs sont définies par les plages d'utilisation des compteurs.

Exemple : le tableau 15 montre, pour un compteur dont le débit est de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ (certains compteurs à adjuvants), l'étendue des plages de précision en fonction de la classe métrologique retenue. La classe C est la plus exigeante puisque la plage correspondant à la tolérance de 2 % est la plus importante (de 15 l/h à 2 000 l/h) mais elle permet de descendre plus bas en régime.

L'utilisation des adjuvants a longtemps été freinée par le manque de fiabilité des dispositifs de dosage. Une analyse faite sur la période 1970-1980 montrait que les incidents dus aux méthodes de dosage (et de stockage) étaient beaucoup plus nombreux et généralement plus graves que ceux dus aux produits [21].

L'origine de ces incidents était double. D'une part, les automatismes de centrale ne prévoyaient pas la gestion du dosage en adjuvant et, d'autre part, les fournisseurs d'adjuvants installaient eux-mêmes et « gratuitement » la chaîne de dosage.

Cette situation se traduisait par les conséquences suivantes : — les matériels de dosage étaient choisis en fonction de leur prix et les conducteurs de centrales, qui ne géraient pas ce matériel, ne l'entretenaient pas non plus ;

— une forte réticence des maîtres d'œuvres à autoriser l'emploi d'adjuvants du fait de l'absence de fiabilité.

Ce fut l'époque où on utilisait des systèmes type « chasse d'eau » ou récipient en verre avec électrodes internes ou encore pompe doseuse à piston qui offraient peu de possibilités d'ajustement aux besoins réels. L'autre système souvent utilisé était la minuterie qui commandait la pompe pendant un temps préaffiché.

Devant les incidents constatés, quelques aménagements ont été imaginés comme par exemple l'installation sur les relais de puissance d'une temporisation qui déclenche une alarme dès que le temps « normal » de fonctionnement de la pompe était dépassé. Aujourd'hui, une gestion du dosage plus sérieuse a été mise en place.

Grâce au développement de l'informatique dans les centrales à béton, les automatismes peuvent assurer la surveillance du fonctionnement de ces systèmes. On s'est alors orienté vers les pompes centrifuges pour la mise en mouvement du produit et pour la mesure de la quantité délivrée vers trois solutions jugées satisfaisantes :

Tableau 15 – Classes métrologiques des compteurs d'eau

Classes	Débits	Valeurs des débits	
		$Q_n < 15 \text{ m}^3/\text{h}$	$Q_n \geq 15 \text{ m}^3/\text{h}$
A	Q_{\min} / Q_t	0,04 Q_n 0,10 Q_n	0,08 Q_n 0,30 Q_n
B	Q_{\min} / Q_t	0,02 Q_n 0,08 Q_n	0,03 Q_n 0,20 Q_n
C	Q_{\min} / Q_t	0,010 Q_n 0,015 Q_n	0,006 Q_n 0,015 Q_n
exemple pour un compteure de $1 \text{ m}^3/\text{h}$	classe	Q_{\max}	Q_n
	A	2	1
	B	2	1
	C	2	1
		Q_t	Q_{\min}
			Tolérance 5 %
			Tolérance 2 %
	A	0,1	0,04 à 0,1
	B	0,08	0,02 à 0,08
	C	0,015	0,01 à 0,015
			0,1 à 2
			0,08 à 2
			0,015 à 2

- les bascules ;
- les compteurs volumétriques ;
- les compteurs débitmétriques.

Si les bascules ne sont utilisées que pour la fabrication en discontinu, les compteurs volumétriques ou débitmétriques sont utilisés indifféremment pour la fabrication en continu comme en discontinu. Les valeurs de consigne étant définies en masse (par rapport à la masse de ciment), il est important de réaliser les conversions masse-volume en considérant la densité réelle du produit, en particulier en fonction de la température.

Bien que les dispositifs de mesure aient beaucoup évolué, cela ne doit pas faire oublier les quelques règles de base pour que l'ensemble donne satisfaction. Ces quelques règles sont les suivantes.

■ Vis-à-vis des produits eux-mêmes :

- il est nécessaire que chaque produit ait sa propre ligne de dosage ;
- une vérification régulière du compteur doit être réalisée pour s'assurer de la non-nocivité du produit sur le corps de la pompe.

■ Vis-à-vis de l'installation :

— très souvent le système de dosage des adjuvants est installé dans un local placé au pied de la centrale ; aussi, il existe en aval du système de mesure, une tuyauterie de grande longueur conduisant l'adjuvant vers son lieu d'introduction ; cette canalisation doit être équipée d'un clapet anti-retour placé très près du dispositif de mesure afin d'éviter la vidange de ce tuyau ; malgré ce dispositif, dont la fiabilité dans le temps n'est pas garantie, il est nécessaire d'équiper l'extrémité de la canalisation d'un détecteur de présence du produit ;

— les compteurs, débitmètres et pompes étant sensibles à la pression du liquide, les canalisations doivent être montées rigide-ment sur les éléments de la centrale à béton ;

— une prise d'air sur le circuit aval du compteur ou du débitmètre doit être mise en place pour éviter l'aspiration incontrôlée de l'adjuvant par les effets de dépression créés par le passage de l'eau (cas d'incorporation de l'adjuvant par piquage sur la conduite d'eau).

2.3.3.3 Doseurs continus

Les doseurs continus sont utilisés pour le dosage des pulvérolents et des granulats dans le cas d'une production en continu. Des exemples de doseurs continus à pulvérolent sec sont décrits figure 36 (NF P 98-701).

Le principe de ces matériels est le suivant :

- les dimensions géométriques de la veine sont calibrées ;

— la densité du matériau en sortie est régulée grâce à un conditionneur [18].

Pour certains doseurs, afin de tenir compte des fluctuations de densité et obtenir un débit massique constant, on régule la vitesse de défilement de l'extracteur (distributeur sur la figure 19) par l'indication relative à la masse présente dans (ou sur) le transporteur. Le doseur est alors appelé doseur continu à débit pondéral.

Lorsque, par nature, la densité du constituant est peu variable et que la teneur en eau est faible (cas des gravillons), on considère que la densité sèche est constante ; on ne mesure alors que la vitesse d'extraction du produit. Dans ce cas, le doseur est appelé doseur continu à débit volumétrique.

Pour l'usage dans le domaine des chaussées, la Direction des routes du Ministère chargé de l'équipement a mis en place une liste d'aptitude sur les doseurs continus [22]. Le référentiel est basé sur des normes NF P 98-721 et NF P 98-722. Les essais correspondant à cette certification permettent de déterminer les performances des doseurs pour différents types de matériaux (représentant différentes possibilités d'écoulement) dans toute la gamme de débit annoncée par le constructeur. Outre la nature des matériaux, les essais sont réalisés pour différents niveaux de remplissage des trémies et différentes teneurs en eau.

Les performances attendues et les modes de vérification sont définis par les normes de réception des centrales (NF P 98-730).

En général, le débit maximal du doseur (respectivement le débit minimal) est supérieur (respectivement inférieur) de 30 % au débit nominal. Ces débits sont exprimés en mètres cubes par heure pour les doseurs à débit volumique et en tonnes par heure pour les doseurs à débit pondéral (ou massique).

Pour faire varier le débit du doseur continu à débit volumétrique, on agit généralement sur la vitesse de l'élément extracteur.

Pour faire varier le débit du doseur continu à débit pondéral, on affiche le débit souhaité et c'est l'asservissement qui détermine la vitesse la mieux adaptée en fonction de la structure du doseur.

2.4 Malaxage

2.4.1 Généralités

Le malaxage des constituants est réalisé à l'aide d'un malaxeur. Il existe différents types qui généralement sont considérés, comme satisfaisant pour le malaxage des bétons courants. Ils ne sont

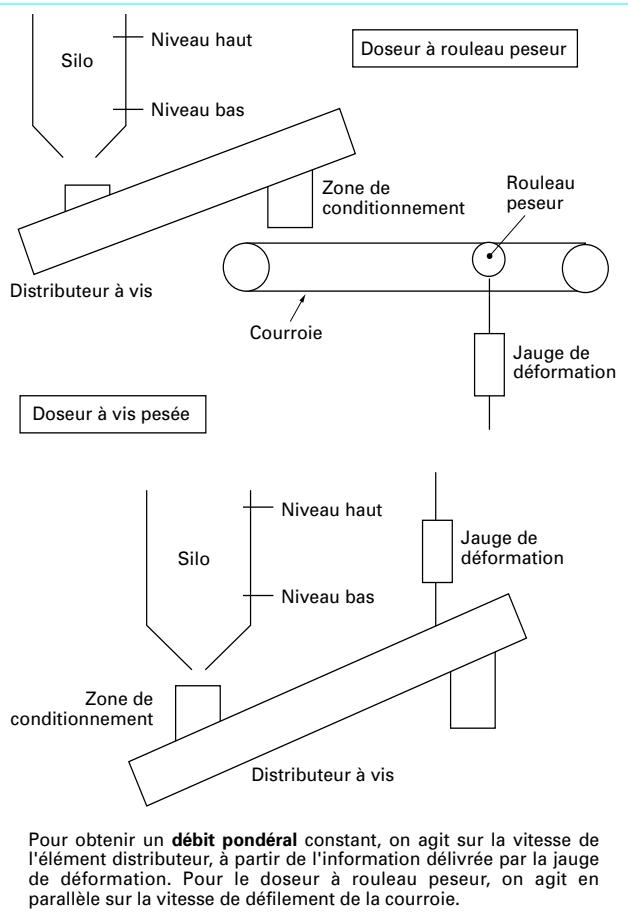


Figure 19 – Différents types de doseurs continus à débit pondéral

cependant pas reconnus équivalents, les conditions d'utilisation (mode de remplissage, temps de malaxage) devant être adaptées pour chacun des matériels.

Pour les bétons particuliers (bétons à hautes ou très hautes performances notamment), il est nécessaire de définir, dans des essais spécifiques, les meilleures conditions d'utilisation.

Bien que dans certains pays, elles soient utilisées comme malaxeur, les bétonnières portées ne sont pas reconnues en France comme aptes à malaxer les constituants du béton pour différentes raisons dont l'absence de maîtrise des conditions d'utilisation [23].

2.4.2 Objectifs

L'objectif du malaxage est de répartir dans l'espace de façon homogène, par l'action des outils de brassage, les « éléments » des constituants mis en présence dans le malaxeur.

Si cette répartition homogène est obtenue, alors les conditions pour l'existence des propriétés du béton seront réunies : l'eau et le ciment seront en contact, les granulats se retrouveront selon une organisation qui, après serrage, assurera la compacité du béton et enfin l'enrobage sera suffisant pour assurer la continuité de la liaison entre les grains inertes. Ainsi, les propriétés du béton pourront prendre naissance et se développer comme prévu.

2.4.3 Terminologie et définitions

La terminologie reprise ici correspond à celle retenue par le Comité Technique 150 « Efficiency of concrete mixers » de la RILEM [24].

Nota : RILEM : Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais des Matériaux et des structures.

2.4.3.1 Mode de production

Pour satisfaire les différents modes de fabrication des bétons, on utilise des malaxeurs « discontinus », qui délivrent le béton par **gâchées**, et des malaxeurs « **continus** », qui délivrent le béton en continu selon un flux massique équivalent, en moyenne dans le temps, à la somme des flux massiques de chacun des constituants entrant dans le malaxeur.

2.4.3.2 Mode de fonctionnement

Le mode de fonctionnement est décrit par la position de l'axe principal du malaxeur pendant le malaxage. Les différentes positions sont : verticales, horizontales ou inclinées.

Pendant les opérations de remplissage ou de vidange, la position de l'axe de certains malaxeurs peut être modifiée, basculement vers le haut pour le remplissage et vers le bas pour la vidange.

2.4.3.3 Constitution du malaxeur

Le malaxeur est constitué d'une cuve et d'un ensemble d'outils de brassage.

Les **cuves** sont soit fixes, soit animées d'un mouvement de rotation autour de leur axe principal.

Les **outils de brassage** sont constitués principalement de **pales** qui peuvent être pleines, ajourées ou en forme de peigne. Tout en provoquant le déplacement des constituants, certaines peuvent assurer des fonctions particulières (pales racleuses notamment).

Ces pales sont, soit montées sur des bras tournant autour d'un axe, soit fixées directement sur la cuve du malaxeur. Dans ce dernier cas, la cuve est animée d'un mouvement de rotation. Dans le premier cas, le malaxage est dit par action forcée et dans le second par action gravitaire. Les bétonnières malaxent par action gravitaire.

En plus des pales, certains malaxeurs (malaxeur à axe vertical) sont équipés d'outils particuliers du type « batteur ». Ils ont une action forte de cisaillement localisée dans le volume décrit par l'outil. Ce sont les **trains valseurs** (ou planétaires) et les **tourbillons**. En général, les vitesses de rotation de ces outils sont plus élevées que celles des pales. Cette vitesse peut quelquefois être modifiée pendant le malaxage pour tenir compte de la fonction en cours de réalisation (réduction de la vitesse pendant la vidange du malaxeur).

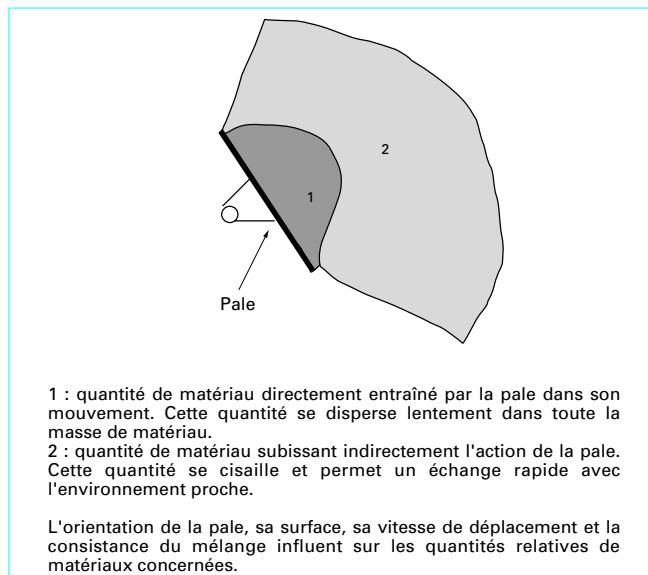
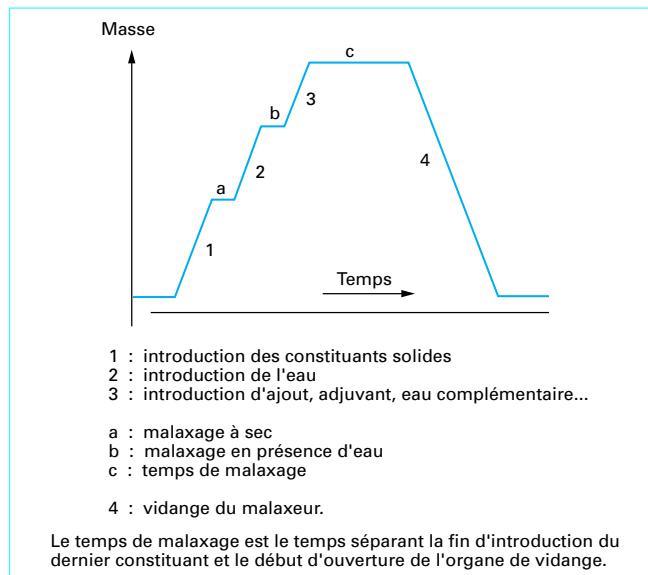
La cuve possède une sortie d'évacuation du béton placée au fond de la cuve ou sur sa paroi latérale ou sur l'axe pour les bétonnières.

Les malaxeurs continus ont des cuves équipées d'une **porte** pouvant être actionnée pendant le malaxage afin de maintenir un niveau constant dans la cuve pendant toutes les phases de production. En particulier, au démarrage, la porte est fermée afin que la charge nominale soit atteinte avant que la sortie du béton ne débute. La vitesse de rotation des pales peut également être ajustée pour s'adapter aux matériaux brassés.

2.4.3.4 Cycle de malaxage

La fonction cycle de malaxage n'a de sens que pour la fabrication discontinue. Elle correspond à l'ensemble des opérations qui s'écoulent entre le début de remplissage de la cuve et la fin de vidange.

Nota : il ne faut pas confondre cycle de malaxage et cycle de production. Ce dernier sert à déterminer le débit nominal d'une centrale à béton. Il englobe en plus du cycle de malaxage, le temps de fermeture de la porte ou du redressement du malaxeur et le temps



nécessaire pour terminer le dosage des constituants et assurer le transfert de ces constituants vers le malaxeur.

Le cycle de malaxage est décrit par la figure 20. On définit les différentes phases de malaxage de la façon suivante :

— **malaxage à sec**, période comprise entre le début d'incorporation des granulats et le début d'incorporation de l'eau et/ou des adjuvants ;

— **malaxage humide**, période comprise entre le début d'introduction de l'eau et la fin de vidange du malaxeur ;

— **temps de malaxage**, temps qui s'écoule entre la fin d'introduction du dernier constituant et le début de vidange du malaxeur.

La définition du temps de malaxage est conventionnelle et ne prend en compte que le moment où tous les constituants sont dans la cuve du malaxeur.

Bien que l'on ne parle pas de cycle de malaxage pour la fabrication continue, on distingue cependant les opérations suivantes :

— **malaxage à sec**, malaxage se déroulant dans la zone de la cuve précédant l'emplacement où est introduite l'eau ;

— **temps de séjour**, temps mis par les matériaux pour traverser la cuve du malaxeur. Les temps de séjour peuvent différer selon les constituants [25].

2.4.4 Modes d'action pour malaxer les constituants

La répartition déterministe de chaque grain ou de chaque goutte d'eau a peu de sens pour nos mélanges, c'est pourquoi il est préférable de considérer la probabilité de présence de ces grains ou de ces gouttes dans les différentes zones de la cuve.

La qualité du malaxage ou l'efficacité d'un malaxeur sont considérées comme satisfaisantes si la probabilité de présence d'un élément quelconque en un point particulier de la cuve est uniquement proportionnelle au nombre d'éléments formant le composant considéré.

Nota : pour éviter les confusions, on parlera dans ce texte de constituants et de classes granulaires pour décrire les produits qui entrent dans le malaxeur et de composants et de fractions granulaires pour ce qui constitue réellement le béton.

Si par exemple, on constate, dans un malaxeur à axe vertical à brassage forcé, que la couche inférieure comporte beaucoup de grains fins (par rapport à la moyenne constatée), cela signifie que les pales ne remontent pas suffisamment les matériaux (résultat fréquent d'un mauvais réglage des pales). Toujours dans ce type de malaxeur, si on constate en périphérie une proportion élevée de gros granulats (par rapport à la moyenne constatée), on peut considérer que ce malaxeur provoque une ségrégation des gros grains par excès de vitesse. Dans les deux exemples cités, le système de brassage ne distribue pas les grains de façon équivalente pour toutes les zones du malaxeur puisqu'il privilégie les effets de la densité ou de la masse des grains. Dans ces deux cas, la distribution des composants est donc influencée par la masse des grains (gros granulats en périphérie et grains fins en fond de cuve) et par les liaisons inter constituants (finés et eau dans le fond de la cuve), c'est-à-dire par des caractéristiques particulières autres que la proportion des constituants dans le mélange. Le malaxeur ne présente pas l'efficacité souhaitée pour fabriquer un mélange homogène.

Il se peut, dans la conception du malaxeur, que certains des outils de brassage provoquent des phénomènes du type de ceux décrits précédemment mais, dans ce cas, d'autres outils doivent être conçus pour en corriger les inconvénients.

Pour atteindre ce résultat, les pales soit par effet direct, soit par des effets d'entraînement (figure 21) transportent des quantités, relativement faibles, de matériaux d'un point à un autre de la cuve. Pour éviter les zones d'accumulations où des éléments particuliers viendraient se loger, il est nécessaire que ces effets d'entraînement se fassent ressentir sur tout le volume concerné. Il faut en quelque sorte que les pales décrivent tout le volume dans lequel se situent les matériaux. C'est par la multiplication de ces transports élémentaires que tous les éléments auront la possibilité de se trouver, à un moment ou à un autre, en un point quelconque de la cuve.

Cette action serait suffisante si les constituants ne présentaient pas de tendance, par affinité, à se regrouper selon des règles qui ne respectent pas obligatoirement celles visées pour atteindre l'homogénéité souhaitée. Les grains fins ont tendance à « flouler » et l'eau vient consolider ces agglomérats... Le système de brassage doit donc également détruire ces « boulettes » et distribuer les grains fins et l'eau dans tout le volume utile. Ce résultat est obtenu par des effets de cisaillement créés par les arêtes des pales. C'est pour amé-

liorer cette fonction que les constructeurs ont installé dans les malaxeurs à axe verticaux des trains valseurs et des tourbillons tournant à grande vitesse.

On a pu constater, lors d'expériences, que les granulats avaient également une action sur ces effets de cisaillement. Ils se comportent comme autant de petites pales.

Le malaxage sera réalisé pendant tout le temps où le volume utile sera soumis à l'action des outils de brassage. En fabrication discontinue, ce sera le temps entre début de remplissage et la fin de vidange tandis qu'en malaxage continu, ce sera le temps que met une tranche de matériaux à traverser le malaxeur.

Nota : La largeur de la tranche concernée dépend des échanges avant-arrière provoqués par les pales.

C'est par la multiplication de ces déplacements et de ces cisaillements que **progressivement le mélange se structure selon les proportions de matériaux incorporés dans le malaxeur**. Le nombre d'échanges effectués par le transfert des matériaux par les pales, c'est-à-dire le temps de malaxage, est déterminant pour que la structuration puisse se faire en tous les points du volume concerné et donner ainsi une homogénéité satisfaisante.

2.4.5 Homogénéité d'un mélange

2.4.5.1 Modes de jugement

Il existe deux voies pour évaluer la qualité de fabrication d'un béton :

- la mesure de la dispersion des performances mécaniques ;
- l'étude de la constitution granulaire du mélange.

Dans la pratique courante, la **mesure de la dispersion des performances mécaniques** est la plus appréciée car elle donne des valeurs très faciles à manipuler. Ce n'est pourtant pas celle retenue dans le cas de la caractérisation de l'efficacité des malaxeurs, pour les raisons suivantes :

- l'incertitude propre aux essais mesurant ces performances est trop grande pour la majorité des objectifs visés (sauf pour un très grand nombre d'essais) ;
- le jugement résultant est global et ne permet pas de préciser l'origine de l'hétérogénéité, même lorsqu'on est assuré que l'écart constaté provient d'une hétérogénéité du mélange ;
- le volume de matériau sur lequel est pratiqué l'essai est souvent trop grand et n'est pas modifiable en fonction du paramètre que l'on veut caractériser.

À ces inconvénients, jugés majeurs, peuvent s'ajouter, pour certains essais, l'influence de paramètres extérieurs à la fabrication tels que les caractéristiques propres des constituants, les conditions de confection des corps d'épreuve et enfin les temps de réponse des essais (jusqu'à 28 j).

Certes, la **constitution granulaire** ne constitue pas un juge de paix aussi strict qu'une résistance mécanique. On peut cependant admettre que deux échantillons ayant des constitutions granulaires différentes présenteront des caractéristiques mécaniques différentes. C'est, ne l'oublions pas, la raison d'être de la formulation des mélanges granulaires et c'est bien cette formulation que l'on cherche à reproduire dans la fabrication d'un mélange. La mesure des performances sera plutôt retenue quand on cherche à définir une composition en vue de satisfaire certaines exigences.

La définition du caractère homogène d'un mélange n'est pas généralisable dans l'absolu car chacun la voit selon le (ou les) critère(s) qu'il vise. Par ailleurs, cette homogénéité va dépendre du volume et du nombre des échantillons ainsi que du rapport de la quantité de matériau prélevé à la quantité de matériau présent dans le lot à caractériser. Comme nous avons choisi de caractériser l'homogénéité à partir de la constitution du mélange, notre référence sera une constitution particulière.

Le mélange sera homogène si chaque échantillon prélevé dans ce mélange est à l'image de ...

Il serait simple de dire : « ...à l'image de la formule du béton. » mais cela serait faux pour les raisons exprimées ci-après.

2.4.5.2 Critère de jugement

Pour réaliser le mélange, on place dans un volume donné les différents constituants. Ce volume sera la cuve du malaxeur pour les malaxeurs discontinus et une tranche verticale de matériaux pour les malaxeurs continus.

Pour toutes sortes de raisons, la quantité de chacun des matériaux peut différer de la formule théorique (approximation dans le calcul des valeurs de consigne, erreur de dosage, perte ou apport de matériau, mauvaise vidange du malaxeur...).

Dans le mélange, les constituants perdent leur « identité ». Dans le béton frais, on ne sait pas différencier le ciment des éléments fins du sable ou des gravillons et dans l'analyse on cumulera tout ce qui passe à un tamis donné (0,250 mm par exemple) sans considération de la nature de ce composant. De même, une fraction granulaire ne correspond pas, même pour des appellations identiques, à la classe granulaire d'origine.

Exemple : sur la figure 22, le composant d_1-d_2 du béton (correspondant à la définition du gravillon 1) est constitué d'une quantité de sable, d'une quantité de gravillon 1 et d'une quantité de gravillon 2 (en prenant en compte les proportions de chacun de ces granulats dans le mélange).

Pour un paramètre donné, l'homogénéité du béton sera caractérisée par la distribution des valeurs observées autour de la valeur moyenne déduite de ces observations.

2.4.5.3 Paramètres de jugement

Les paramètres permettant de caractériser l'homogénéité obtenue par le malaxage sont nombreux. Ils peuvent soit correspondre à des paramètres simples : la teneur en chacun des éléments, soit correspondre à des combinaisons de plusieurs paramètres simples : rapport de paramètres simples, soit enfin correspondre à certaines propriétés du mélange.

2.4.5.3.1 Paramètres simples

Les paramètres les plus souvent utilisés sont :

- la teneur en éléments fins (généralement passant à 0,250 mm) ;
- la teneur en eau ;
- la teneur en gros granulats ;
- le passant à 5 mm.

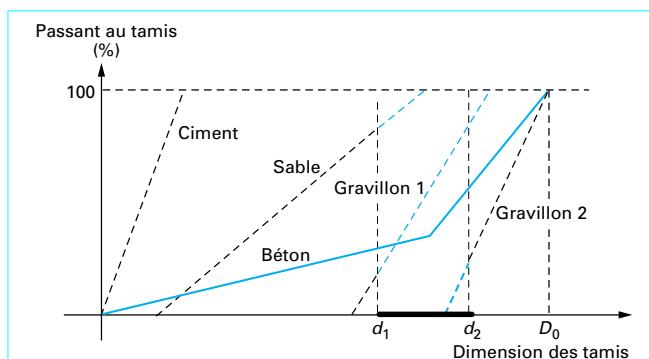


Figure 22 – Constitution d'une fraction granulaire (d_1-d_2) dans le mélange

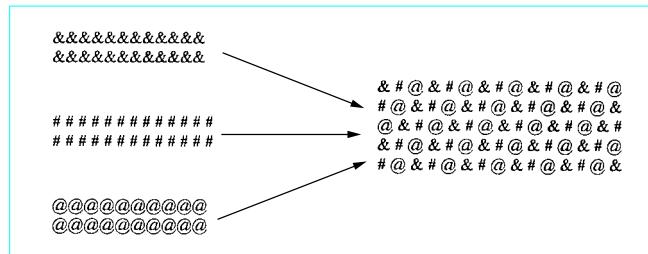


Figure 23 – Rôle d'un malaxeur

Les valeurs de ces paramètres sont rapportées à la masse de l'échantillon.

Certains de ces paramètres sont déjà, à eux seuls, l'image du fonctionnement du malaxeur. L'irrégularité de la répartition de la classe granulaire en $D/2-D$ (gros granulats) permet de penser qu'une ségrégation des gros grains est provoquée par un excès de vitesse de rotation. Une teneur en eau irrégulière résulte le plus souvent d'une mauvaise introduction dans le malaxeur (introduction localisée).

2.4.5.3.2 Paramètres combinés

Ces paramètres sont le plus souvent les rapports des paramètres précédents. Ce sont :

- le rapport de l'eau à la quantité d'éléments fins (E/f) ;
- le rapport du passant à 5 mm à la totalité du squelette granulaire $S/(S+G)$;
- le rapport de la quantité de « pâte » (eau + éléments fins) à la surface spécifique des granulats supérieurs à 0,250 mm.

Là encore, avec la distribution de ces valeurs, on peut caractériser le fonctionnement du malaxeur. Un rapport E/f très dispersé est généralement l'image d'une mauvaise pénétration de l'eau dans les éléments fins, ce qui correspond à un manque de cisaillement. Les deux autres rapports sont plutôt reliés aux déplacements provoqués par les pales (temps de malaxage).

2.4.5.3.3 Caractéristiques du béton

Malgré les réserves exprimées précédemment, certaines caractéristiques du béton sont intéressantes pour juger de l'efficacité d'un malaxeur ; ce sont la consistance et surtout la teneur en air occlus. En effet, la teneur en air occlus d'un béton est le résultat direct de l'action de cisaillement des pales du malaxeur.

2.4.6 Efficacité d'un malaxeur

De plusieurs constituants séparément bien ordonnés, le malaxeur doit faire un seul matériau (figure 23).

Le malaxeur aura donc pour missions :

- de « bousculer » l'ordonnancement des constituants pour former des volumes « unitaires » contenant chacun une partie homogénéité des constituants présents dans la cuve ;
- de « rapprocher » les constituants qui, par leur combinaison, donnent au matériau ses propriétés.

Ce rôle sera pleinement rempli si ces deux opérations sont faites dans un temps minimal avec une usure réduite du matériel.

2.4.6.1 Rôle du remplissage

Le remplissage progressif du malaxeur avec répartition au fur et à mesure permet une plus grande vitesse d'obtention de l'homogénéité souhaitée (§ 2.4.8.4). Cette évolution n'est pas linéaire. Alors qu'au début, elle croît très vite quel que soit le niveau obtenu au remplissage, elle devient plus lente et ce sont les derniers gains

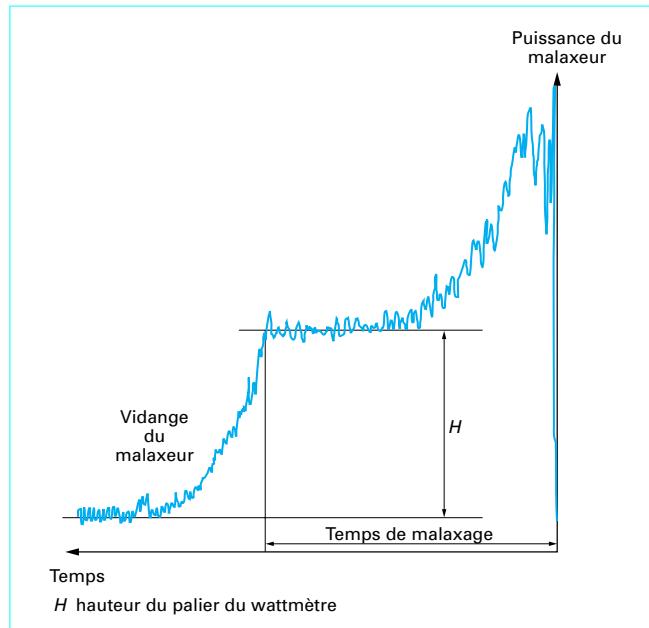


Figure 24 – Progression de l'homogénéité de consistance du béton

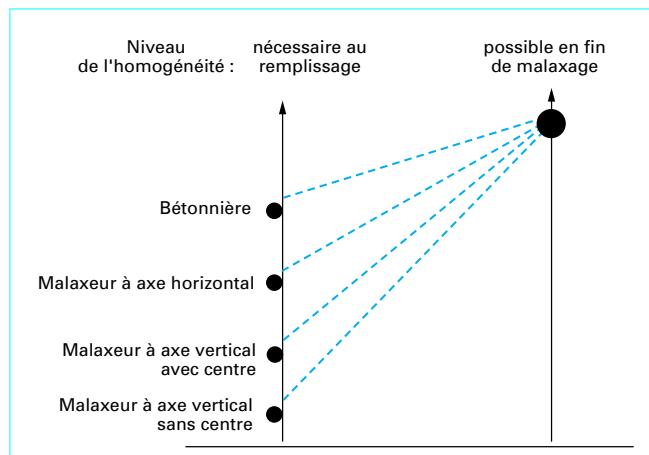


Figure 25 – Capacité des malaxeurs à homogénéiser

d'homogénéité qui proportionnellement sont le plus consommateur d'énergie. L'enregistrement de l'énergie de malaxage le montre très bien pour l'homogénéisation de la consistance (figure 24).

De nombreuses expériences ont mis en évidence cette influence jouée par le cycle de remplissage du malaxeur sur le temps nécessaire pour atteindre l'homogénéisation satisfaisante des constituants, en régulant l'arrivée des constituants, régulation tant pour le moment d'introduction que pour le débit. Ainsi, une bétonnière sera plus sensible et demandera plus de rigueur qu'un malaxeur à axe horizontal qui est lui-même plus sensible qu'un malaxeur à axe vertical (figure 25).

L'expérience acquise avec le principe du malaxage en continu confirme bien ce principe. En effet, c'est dans ce cas que le remplissage « progressif » est le mieux réalisé et le temps pendant lequel

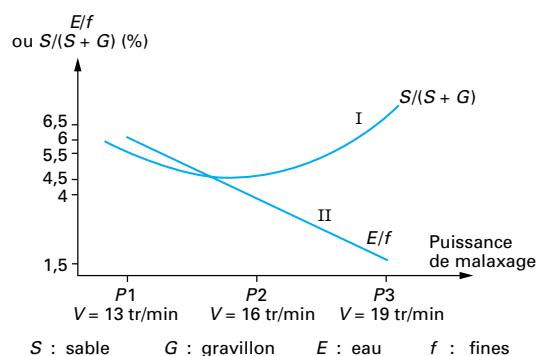


Figure 26 – Homogénéité et ségrégation

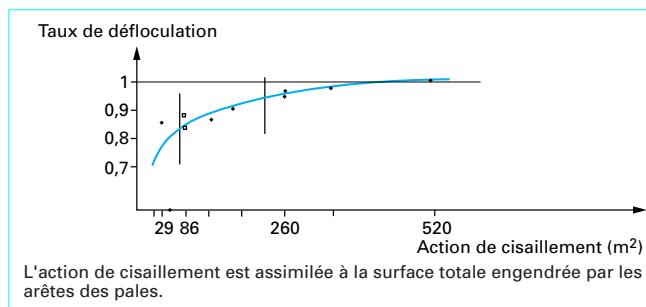


Figure 27 – Malaxage eau-ciment

les constituants sont soumis à l'action des outils de malaxeur (temps de séjour) est très faible alors que le résultat d'homogénéité est jugé très satisfaisant.

2.4.6.2 Rôle du brassage

Pour être efficace, les outils de brassage d'un malaxeur doivent déplacer, dans l'espace défini par la cuve, des petites quantités de matériaux et cisailler les agglomérats qui se forment naturellement pour en répartir les composants [26].

Pour bien réaliser ces deux fonctions, il faudrait adapter les niveaux d'énergie mis en jeu. En effet, le malaxage du ciment et de l'eau, résultat principal recherché par les actions de cisaillement, nécessite une énergie importante, principalement par action sur la vitesse.

Exemple : au cours de l'essai de la figure 26, nous avons fait varier la vitesse de rotation du malaxeur (donc la puissance de malaxage) et nous avons analysé la qualité du mélange obtenu à partir des critères E/f et $S/(S+G)$.

Un manque de vitesse ne donne pas une bonne homogénéité des éléments fins (dont le ciment).

Un excès de vitesse provoque une ségrégation des granulats les plus gros.

Il faut donc faire un compromis.

Exemple : le malaxage d'un pulvérulent sec avec de l'eau (figure 27) demande une grande énergie. Celle-ci peut être amenée par la vitesse de rotation, le nombre de tour et, très important, la longueur de l'arête de la pale qui vient cisailler le mélange. La qualité du mélange a été estimée à partir de la maniabilité de la pâte qui a été assimilée au taux de défloculation.

Un niveau élevé d'énergie peut provoquer sur le squelette granulaire une ségrégation des plus gros grains. Ce besoin de compromis sur la vitesse retenue, conduit à imaginer le malaxage en deux séquences, la première pour les constituants nécessitant une forte énergie (éléments fins, eau et adjuvants) et la seconde pour ceux dont l'excès d'énergie peut provoquer une ségrégation (répartition des granulats et enrobage des grains). Il faudrait alors utiliser deux malaxeurs adaptés (volume de la cuve, dimensions des pales, vitesses d'action...) car la simple action sur la vitesse de rotation ne suffit pas pour ce changement d'échelle, tous les paramètres de constitution du malaxeur étant concernés. Diverses expérimentations ont confirmé l'intérêt de ce système mais le passage au niveau industriel n'a pas encore été réellement réalisé.

Nota : un seul malaxeur « industriel » de ce type a été mis en service. Le moteur était de type hydraulique, seul moyen commode à l'époque pour agir en continu sur la vitesse de rotation. Le cycle de malaxage était très long, le procédé a été abandonné.

Toutefois, pour compenser cette insuffisance d'énergie pour l'homogénéisation des éléments fins en particulier, les constructeurs de malaxeurs à axe vertical ont adjoint, au système de malaxage traditionnel, soit des tourbillons, soit des trains valseurs et quelquefois les deux.

2.4.7 Mesure de l'efficacité du malaxeur

Il a été défini quatre procédures de mesure de l'efficacité du malaxeur en fonction de l'objectif visé.

Nota : les termes utilisés dans ce paragraphe correspondent à ceux définis par le comité technique 150 du RILEM [24] complété par l'article Normalisation et qualification des matériaux [22].

On distingue :

- **l'évaluation du malaxeur**, c'est-à-dire ce que le malaxeur est capable de faire et les conditions particulières pour le faire [27] ;
- **la qualification du malaxeur**, c'est à dire dans des conditions fixées propres au malaxeur, l'aptitude du malaxeur à fabriquer un mélange présentant des caractéristiques fixées [24] ;
- **la réception du malaxeur**, c'est-à-dire la vérification que le réglage du cycle de fabrication conduit à produire un béton satisfaisant les spécifications (NF P 98-730) ;
- **la détermination du temps de malaxage**, c'est-à-dire pour le mélange à fabriquer s'assurer que le temps de malaxage est suffisant pour donner les performances d'homogénéité attendues.

Les paramètres retenus, le nombre d'échantillons et leur volume sont définis dans le tableau 16.

2.4.8 Matériels utilisés

Les matériels utilisés pour réaliser le malaxage des constituants sont très nombreux. On peut distinguer six grandes familles :

- les malaxeurs à axe vertical, à action forcée (figure 28) ;
- les malaxeurs à axe vertical, à action gravitaire (figure 29) ;
- les malaxeurs à axe horizontal, à action forcée (figure 30) ;
- les malaxeurs à axe horizontal, à action gravitaire (figure 31) ;
- les malaxeurs à axe incliné à action gravitaire (figure 32) ;
- les malaxeurs continus (figure 33).

Il n'existe pas de séparation stricte entre action forcée et action gravitaire, les deux actions étant toujours conjointes ; la désignation permet de mettre en évidence l'action prépondérante pour chacun des malaxeurs.

Dans le cas de l'**action forcée**, on admet qu'en dehors de l'action de la pale, les composants restent immobiles, ce qui permet les échanges entre les constituants poussés par les pales et les constituants immobiles (malaxage par échange). Ce principe nécessite périodiquement que les constituants immobiles soient repris à leur tour, ce qui impose que les outils de brassage engendrent tout le volume de la cuve.

Tableau 16 – Paramètres retenus pour la caractérisation de l’homogénéité

Référence	Paramètres	Volume de l'échantillon	Nombre d'échantillons	Objectifs
RILEM	E/f	1 à 3 l	12 à 20	Qualification des malaxeurs
	fines f	5 à 8 l	12 à 20	
	$D/2 - D$	5 à 8 l	12 à 20	
	air occlus	6 à 8 l	9	
NF P 98-730	consistance	6 l	5	Réglage d'un malaxeur sur chantier
	passant à 5 mm	3 kg	5	
	air occlus	6 l	5	
Laboratoire central des Ponts et Chaussées (proposition)	granulométrie	2,5 kg	50	Évaluation d'un malaxeur
	teneur en eau	2 kg	50	

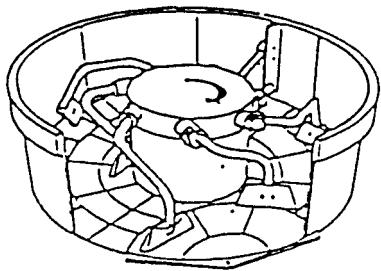


Figure 28 – Exemple de malaxeur à axe vertical à action forcée

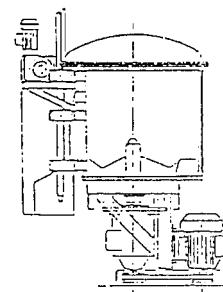
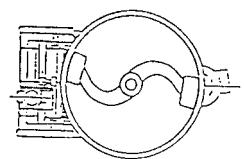
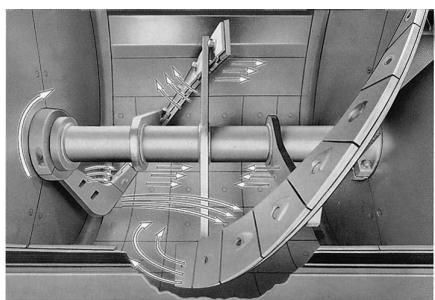


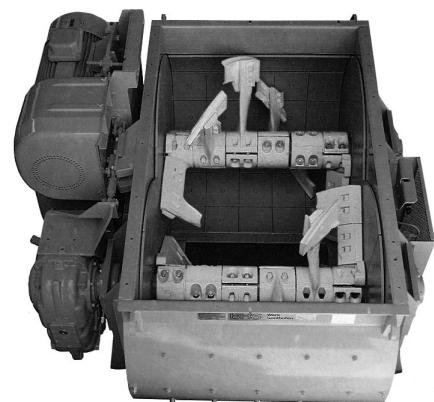
Figure 29 – Exemple de malaxeur à axe vertical à action gravitaire



Coupe



(a) d'après doc. ELBA



(b) d'après doc. BSH

Figure 30 – Exemples de malaxeurs à axe horizontal à action forcée

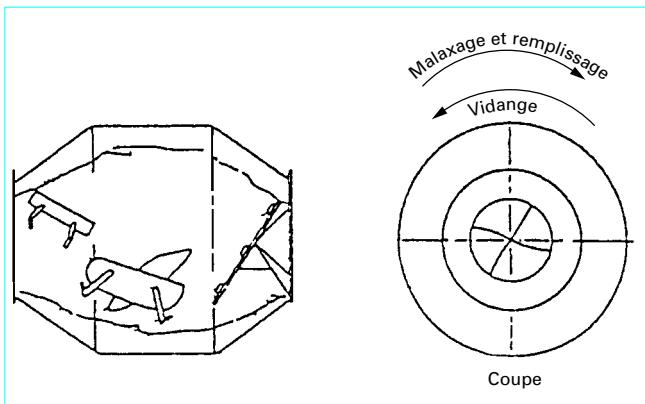


Figure 31 – Exemple de malaxeur à axe horizontal à action gravitaire

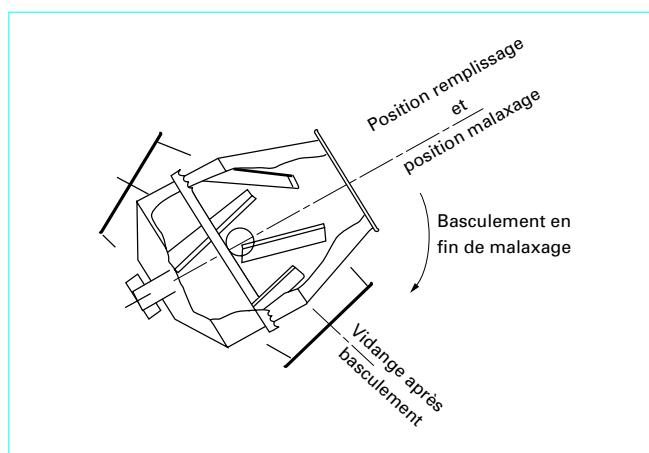


Figure 32 – Exemple de malaxeur à axe incliné à action gravitaire

Dans le cas d'**action gravitaire**, les pales n'ont qu'un effet passager dans la masse des composants, qui s'assimile au cisaillement. Le malaxage se fait principalement dans la chute, c'est-à-dire essentiellement dans des tranches verticales. Une orientation des pales sera donc nécessaire pour « entremêler » les tranches verticales.

2.4.8.1 Malaxeurs à axe vertical, à action forcée

Ce sont les matériels les plus souvent utilisés pour la fabrication en discontinu du béton. Ils sont constitués d'un ensemble de bras, avec des pales, tournant selon des mouvements circulaires concentriques. Certaines pales ont des fonctions spécifiques telles que le racleage des parois verticales, l'accélération de la vidange...

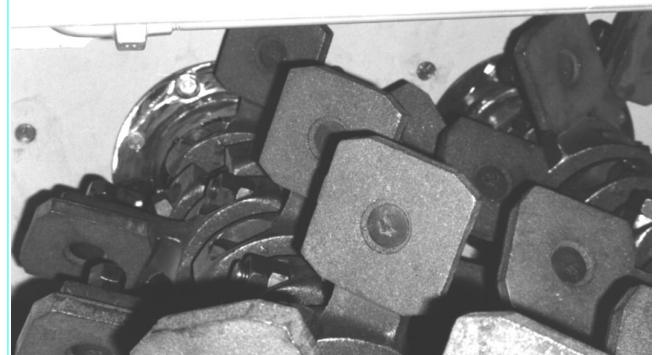
Ces pales se déplacent dans une cuve généralement fixe (quelques-unes sont animées d'un mouvement de rotation) ou dans un couloir circulaire. Dans ce dernier cas, le chemin à parcourir pour atteindre tous les points de la cuve est plus long ce qui nécessite un nombre de pales élevé. En absence de « centre », les échanges peuvent se faire radialement.

Les trains valseurs (jusqu'à trois) viennent souvent compléter ce dispositif.

Les tourbillons (un ou deux) sont le plus souvent utilisés pour la réalisation des bétons colorés (dispersion des colorants).



(a) malaxage continu disposition des injecteurs d'eau



(b) malaxage continu disposition des pales (doc. SAE)

Figure 33 – Exemple de malaxeur continu

La capacité de ces malaxeurs est généralement comprise entre 50 l et 3 000 l. La vidange est réalisée en escamotant (basculement, rotation, etc.) une partie du fond.

2.4.8.2 Malaxeurs à axe vertical, à action gravitaire

Ces matériels sont peu utilisés pour la fabrication du béton prêt à l'emploi ou sur chantier (on les utilise souvent pour l'homogénéisation des poudres) mais plutôt dans le domaine de la préfabrication. Ils sont constitués d'une cuve à axe vertical au fond de laquelle tourne une pale constituée de deux bras diamétralement opposés et terminés chacun par une pale. Le matériau est projeté vers le haut et retombe en se mélangeant. La vidange se fait par l'intermédiaire d'une porte latérale. Ces malaxeurs sont très sensibles à la dimension maximale des grains et ont une meilleure efficacité avec les bétons de consistance très ferme.

2.4.8.3 Malaxeurs à axe horizontal, à action forcée

Ces malaxeurs ont un ou deux arbres parallèles.

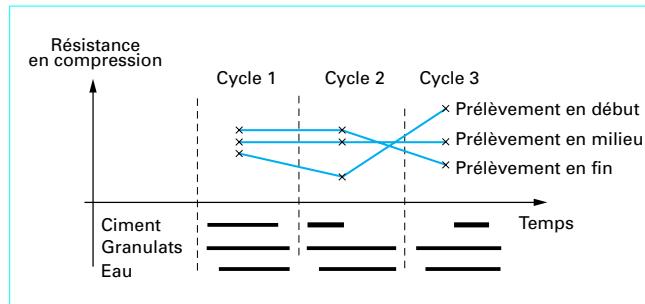


Figure 34 – Influence du remplissage d'une bétonnière à axe horizontal

Dans le cas des malaxeurs à un arbre, ce dernier est équipé de bras supportant soit une hélice continue, soit des pales décrivant une hélice discontinue.

Dans le cas des malaxeurs à deux arbres chacun d'eux comporte un grand nombre de bras radiaux supportant chacun une pale. L'orientation des pales permet de pousser ou de retenir les constituants. Dans la conception du système de brassage, les constituants parcourent toute la longueur de la cuve en basculant alternativement d'un côté à l'autre de cette cuve (on dit qu'ils décrivent un huit).

Les capacités vont de 1 000 l à 4 500 l.

La vidange se fait principalement par escamotage du fond. Quelques malaxeurs se vident par basculement autour de l'axe.

2.4.8.4 Malaxeurs à axe horizontal, à action gravitaire

Ces malaxeurs sont constitués d'une cuve animée d'un mouvement de rotation selon un axe horizontal. Des pales sont fixées à l'intérieur de la cuve. Ces pales en passant dans la masse des matériaux stagnant en partie basse, en relèvent une partie puis la laisse retomber dans l'ensemble des matériaux restés en partie basse.

La forme et la disposition des pales sont conçues pour provoquer des changements de plan. Certaines servent à guider le mélange vers la sortie.

Ces malaxeurs sont particulièrement sensibles à la manière dont ils sont remplis.

Exemple : l'expérience de la figure 34 a consisté à modifier le mode d'introduction des constituants dans une bétonnière à axe horizontal. Les trois cycles se différencient essentiellement par le moment et la vitesse d'introduction du ciment. Des prélèvements de béton ont été faits en début de gâchée, au milieu et en fin de gâchée. Des éprouvettes ont été réalisées pour la mesure de la résistance en compression.

Les résultats montrent qu'avec le cycle pour lequel l'introduction du ciment se faisait quasiment dans le même temps que les granulats, la dispersion sur la résistance en compression est minimale.

Les capacités de ces malaxeurs s'échelonnent entre 250 L et 7 000 L.

Le remplissage de la cuve se fait, soit par un orifice opposé à l'orifice de sortie, soit par le même orifice que celui utilisé pour vider le malaxeur.

La vidange se fait essentiellement par basculement soit du malaxeur tout entier, soit seulement de la goulotte d'introduction de

matériaux. Pour les plus petits malaxeurs, la vidange se fait par inversion du sens de rotation.

2.4.8.5 Malaxeurs à axe incliné

Ces malaxeurs sont à action gravitaire. Ils sont utilisés soit pour fabriquer de très petites quantités de béton (les volumes sont de l'ordre de 25 l), soit pour transporter le béton déjà malaxé (bétonnière portée) et dans ce cas le volume de béton transporté peut atteindre 14 000 l.

2.4.8.6 Malaxeurs continus

Ce sont des malaxeurs dont la constitution est assimilable aux malaxeurs à axe horizontal à action forcée. Ils possèdent deux arbres parallèles supportant des bras terminés par des pales. Ces pales ont des orientations permettant de réaliser le transfert de matériau entre les « tranches verticales ». Les capacités vont de 100 m³/h à 340 m³/h.

Globallement, les pales poussent le matériau vers une extrémité équipée d'une trappe amovible. Au démarrage, cette trappe est fermée pour améliorer la qualité du mélange fabriqué en début de production. En fonctionnement stabilisé, la trappe est en permanence ouverte mais son ouverture est réglable pour maintenir le niveau de matériaux dans la cuve au niveau nominal.

Certains de ces malaxeurs sont inclinables ; la sortie légèrement relevée provoque un ralentissement de la progression des matériaux et donc un temps de séjour plus long. Il existe également des possibilités de réglage de la vitesse de rotation.

Enfin, quelques malaxeurs ont une cuve amovible qui permet un nettoyage très rapide en fin de journée.

Quelques règles tirées de l'expérience

L'expérience a permis d'établir quelques règles de référence qui résultent très souvent du bon sens et qui ont été vérifiées sur les chantiers.

Comme cela a été montré dans la figure 34, le fait de mettre les mêmes quantités des différents constituants selon des séquences différentes modifie le résultat final. La première règle à respecter est de **réaliser toujours le même cycle de malaxage**.

Le remplissage étant la première participation à l'homogénéisation, il faut **charger le malaxeur très progressivement**.

Il faut un **léger décalage du ciment** (et éventuellement des additions) **par rapport aux granulats** (deux à trois secondes) pour éviter l'arrivée du ciment directement sur les parois de la cuve. L'inverse entraîne très souvent un amoncellement de ciment dans certaines zones du malaxeur et la formation de bloc de pâte autour des pales diminuant de ce fait l'efficacité du malaxeur.

Un temps de **malaxage à sec se traduit par une homogénéisation plus rapide** et donc un gain de temps. Cela a été constaté pour toutes les techniques. Le malaxage à sec, par un effet de broyage des agglomérats, accroît l'action du malaxeur probablement par une action plus forte des granulats dans le malaxage.

L'incorporation de l'eau et des adjuvants doit également faire l'objet de soins attentifs. Leur diffusion dans la masse est très difficile et tout ce qui permettra de les répartir préalablement est bénéfique. En pratique, il faut que **l'eau et l'adjuvant soient diffusés en jets fins ou en brouillard sur toute la surface des constituants** présents dans la cuve du malaxeur.

3. Maîtrise de la qualité

3.1 Objectifs

Le rôle de la fonction « fabrication du béton » est de reproduire à l'identique en instantané (homogénéité) et dans le temps (stabilité) une composition de béton à l'image de la composition théorique décrite par la formulation. L'objectif de la maîtrise de la qualité est :

- de faire en sorte que toutes les actions tendent vers ce but ;
- de s'assurer que tout le cycle se déroule comme prévu ;
- d'informer le conducteur de la centrale dès qu'une anomalie se présente dans le cycle de fabrication avant que cette dernière ne devienne une non-conformité ;
- de mettre à la disposition du « client » les informations utiles pour qu'il puisse prévoir le devenir du béton et engager éventuellement les dispositions nécessaires pour atteindre le but visé pour l'ouvrage.

3.2 Domaine concerné

Pour la fabrication du béton, la maîtrise de la qualité concerne la période qui sépare la fourniture des constituants et le départ du béton de la centrale. La qualité pour la fabrication sera la **régularité de la constitution du mélange** tant dans un volume restreint de béton (la gâchée) que tout au long de la production.

Pour obtenir une régularité de constitution à l'image de la **référence visée**, il faut respecter les proportions des composants et atteindre l'homogénéité souhaitée du mélange.

Comme on l'a vu dans le paragraphe relatif au dosage, le respect des proportions correspondant à la référence visée, impose d'abord de bien définir les **valeurs de consignes** et pour cela il est nécessaire de connaître l'état des constituants, état qui peut fluctuer en permanence. Pour le dosage et le malaxage, il faut en premier lieu effectuer les réglages qui permettent d'aboutir à la qualité attendue et vérifier par la suite que ces réglages ne se modifient pas.

La maîtrise de la qualité concerne donc :

- la connaissance de l'état des constituants ;
- la conduite des différents postes formant la centrale (stockage, dosage et malaxage) ;
- la surveillance du fonctionnement du matériel ;
- l'information du conducteur de la centrale.

Les moyens qu'il faudra mettre en œuvre ou à la disposition du conducteur de la centrale pour assurer toutes ces fonctions doivent être performants tant du point de vue de leur sensibilité pour détecter le moindre événement risquant d'évoluer et se traduire par une anomalie, que du point de vue de leur rapidité pour agir avant que l'anomalie ne se transforme en une non-conformité.

Pour cela, la machine seule n'est pas suffisante et l'homme seul, malgré toute la compétence possible, ne peut faire face à cette avalanche d'interventions nécessaires pour assurer toutes ces fonctions. La maîtrise de la qualité passera donc par l'**association homme-machine**.

Les systèmes mis en place doivent être programmés pour être :

- actifs, c'est-à-dire pouvoir déclencher une procédure spécifique lorsque lorsqu'une situation particulière conduisant à une anomalie a été détectée ; se sera par exemple la remise en fonctionnement d'un casque parce que la quantité dosée n'est pas suffisante ;
- prédictif, c'est-à-dire informer le conducteur de la centrale que l'évolution d'un signal permet de penser que l'anomalie constatée va devenir prochainement une non-conformité ou va provoquer une panne (exemple : une trop forte intensité dans une vis de transfert) ;

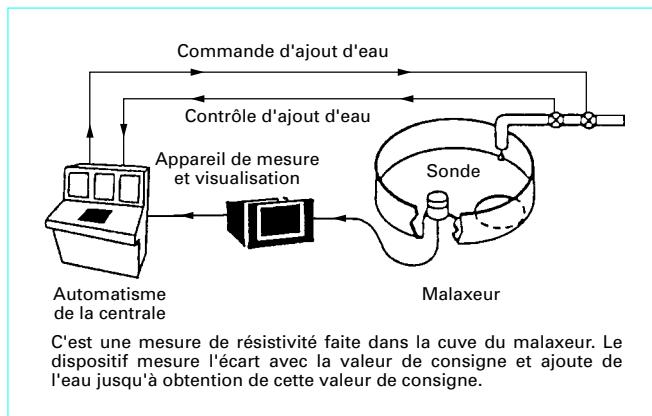


Figure 35 – Réglage de la quantité d'eau de gâchage à partir de la mesure de la résistivité du béton dans le malaxeur (doc. CERIB)

— curatif, c'est-à-dire enclencher une action pour corriger un écart de fonctionnement ; ce sera par exemple le prolongement du temps de malaxage parce que le remplissage du malaxeur ne s'est pas fait normalement ;

— préventif, c'est-à-dire déclencher une action parce que l'opération en cours ne se déroule pas normalement ; ce sera par exemple la commande du fonctionnement d'un vibreur parce que la vitesse d'écoulement d'un produit n'est pas celle prévue ; cette opération peut éventuellement être choisie entre plusieurs solutions, accélération ou ralentissement de l'écoulement, par actions différentes sur le vibreur (fréquence).

On pourrait probablement aller plus loin encore en combinant les caractéristiques des constituants et la définition de la composition du béton. L'absence de procédures indiscutables pour le calibrage des informations en liaison avec les caractéristiques du mélange et l'action sur la constitution du mélange ne permet pas aujourd'hui d'aller beaucoup plus loin. Sur cette base, seul l'ajustement de la quantité d'eau à doser en vue d'obtenir une certaine consistance du béton (par la mesure de la résistivité du béton en cours de malaxage) est régulièrement pratiquée aujourd'hui (figure 35).

3.3 Connaissance de l'état des constituants

Actuellement, l'offre en matériels destinés à établir l'état des constituants se limite essentiellement à la mesure des teneurs en eau, des températures ou des niveaux de remplissage des conteneurs.

3.3.1 Teneur en eau des constituants

La mesure de la teneur en eau des constituants concerne les granulats dont la constitution, teneur en éléments fins essentiellement, est à l'origine d'une possible fluctuation de cette teneur en eau. C'est le cas des additions, du sable et des gravillons de petite granularité (2-7 mm, par exemple). Pour les autres granulats, les fluctuations sont du même ordre de grandeur que l'incertitude de mesure, ce qui rend les sondes inefficaces. Pour ces granulats, il est préférable de réaliser la mesure de la teneur en eau par séchage (poêle à frire, étuve ou four à micro-ondes) à une périodicité compatible avec les conditions météorologiques.

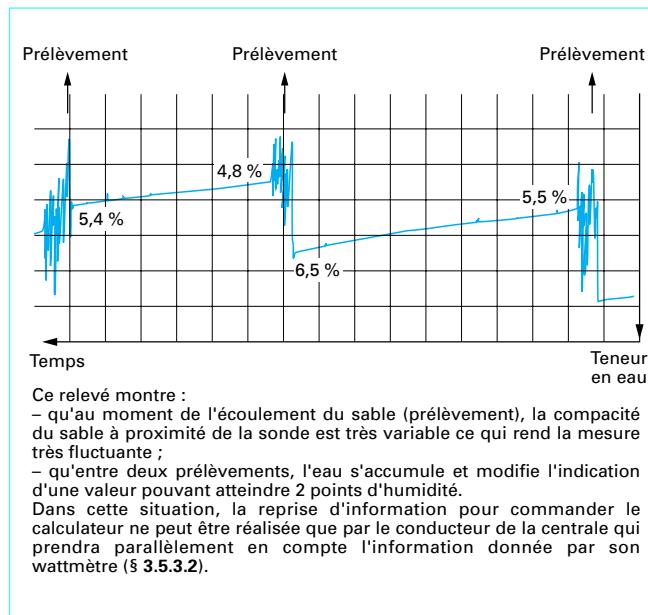


Figure 36 – Influence du mouvement du sable dans le silo sur l'information délivrée par la sonde de teneur en eau

Pour les additions, les sables et les gravillons fins, la mesure doit être faite en continu (figure 36). On utilise pour cela les **sondes de teneur en eau**. Le calibrage des sondes utilisées se fait également en référence aux méthodes de séchage.

Les différentes méthodes de mesure de la teneur en eau avec leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau 17. Les sondes par micro-ondes semblent donner une information très fiable. Toutefois, le faible volume de mesure impose que le résultat pris en compte résulte d'un grand nombre de mesures.

Les méthodes offrant, à ce jour le meilleur service dans ce domaine sont les sondes capacitatives (figure 37). On mesure, par

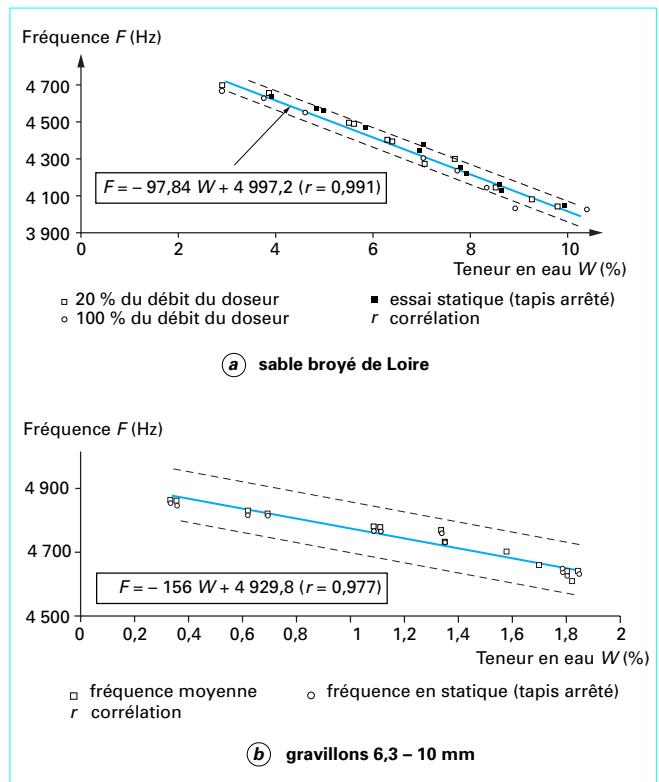


Figure 37 – Résultats de la mesure de la teneur en eau de sable et de gravillons sur bande transporteuse en mouvement par une sonde capacitive (doc. SAE)

cette méthode la fréquence de résonnance d'un oscillateur. Le seuil de signification est de 7 Hz. La résolution est excellente (meilleure que 0,5 points) notamment pour les faibles teneurs en eau.

Tableau 17 – Différents types de sonde de mesure de la teneur en eau (doc. CERIB)

Principe de mesure	Principaux facteurs d'influence	Volume mesuré	Précision pour le sable	Coût	Mise en œuvre	Fréquence de calibrage minimale
résistif (courant continu ou basse fréquence)	Polarisation des électrodes Sels dissous Granularité Température Densité	Écartement des électrodes	Faible	Faible	Aisée	Journalière
capacitif (courant haute fréquence)	Sels dissous Granularité Température Densité	50 l	de 0,5 % à 1 %	Moyen	Aisée	Hebdomadaire
micro-ondes	Température Densité	1 dm ³	0,5 %	Élevé	Aisée	Mensuelle
neutronique	Présence de matières organiques Densité	1 m ³	0,4 %	Élevé	Conditions de sécurité	Mensuelle
infrarouge	Poussières Température Densité	en surface	Bonne	Élevé	Aisée	Mensuelle

3.3.2 Température du ciment

Longtemps, le paramètre température du ciment était une information utilisable pour connaître les risques de raidissement du béton par fausse prise du ciment. Aujourd’hui, il n’en est plus ainsi ; c'est pourquoi la température maximale du ciment n'est plus une prescription. Elle reste toutefois un bon indicateur des risques de fusage du ciment au moment du dosage.

Les matériels utilisés pour réaliser cette mesure sont soit des sondes résistives, soit des thermo couples.

Les systèmes de conduite des centrales ne gèrent pas ce type d’information. Cependant, on pourrait très bien concevoir que, lorsque la température est supérieure à celle pouvant être à l’origine d’un fusage, on agisse sur le dispositif de conditionnement du ciment afin d’éviter ce risque (évacuation de l’air par tassement sous vibration basse fréquence par exemple).

3.3.3 Volume des stocks

Le stockage des constituants a pour rôle principal d’assurer la continuité de l’alimentation. Une discontinuité provoque des fluctuations au niveau des dosages car les conditions d’écoulement sont modifiées (cf. § 3.4.3.1.3). La mesure est réalisée par des sondes de niveau soit à pression (granulats), soit par micro-ondes (ciments). Les informations attendues ne nécessitent pas une grande précision (10 % environ) ; c'est pourquoi les matériels existants satisfont tout à fait au besoin et remplacent avantagusement le « sondage » au marteau réalisé sur la paroi du silo.

3.3.4 Écoulement des produits

Le suivi de l’écoulement des différents constituants se fait, soit à partir de capteurs spécifiques placés judicieusement sur le parcours du produit, soit à partir de l’analyse des informations délivrées par les capteurs du dispositif de dosage.

Les capteurs peuvent être :

- des détecteurs de passage, palpeur de veine par exemple ; dans ce cas, l’information est tout ou rien, c'est-à-dire utilisable seulement lorsqu'il y a un arrêt total de l’écoulement ;
- des jauge de déformation (jauge placée sur le rouleau d'un tapis de transfert par exemple) ; l’information recueillie permet d'intervenir dès que des variations sensibles de flux se font sentir.

À partir du signal récupéré, il est possible de commander l'accélération de l'extraction du produit et/ou d'agir sur son conditionnement (vibrer ou air comprimé...).

3.4 Conduite des différents postes de la centrale

La conduite de la centrale est réalisée par un automate commandé par un ordinateur. Les progrès réalisés sur la fiabilité de ces systèmes qui travaillent dans des milieux très agressifs (poussières, température, vibration, champ électromagnétique...) et la baisse de leur coût ont permis une généralisation spectaculaire de ces équipements pour tous les systèmes de production. Ce domaine étant encore (et pour un certain temps) en pleine évolution, les situations décrites pourraient paraître futuriste pour certains, elles sont cependant déjà en application chez quelques producteurs et se généraliseront progressivement.

Ces matériels doivent remplir les fonctions suivantes :

- assurer la bonne orientation des constituants lors de leur livraison ;

- déterminer les consignes de dosage ;
- commander la mise en fonctionnement et l’arrêt des différents matériels équipant la centrale.

3.4.1 Orientation des constituants

Lorsqu'un constituant est livré sur une centrale, celui-ci est identifié par le conducteur de la centrale et est « signalé » à l’automatisme de la centrale. Il s’en suit alors toute une série d’opérations soit commandées par l’automatisme lui-même, soit seulement supervisées par ce dernier après commande par le « livreur » ou le conducteur de la centrale (appelé homme dans ce paragraphe).

L’homme a pour rôle de mettre en fonctionnement le matériel permettant le transfert du constituant vers le conteneur concerné. Là commence le travail de l’automatisme. Il vérifie que le conteneur est en mesure de recevoir la quantité déclarée du constituant (place disponible) et que les moyens mis en service (tapis, goulotte, pompe, tuyau d’alimentation du silo, etc.) correspondent à la nature déclarée du constituant. Si c'est le cas, il met en place et en fonctionnement les moyens complémentaires pour diriger le produit vers la bonne case (goulotte tournante ou tapis navette...) et il donne l’autorisation de décharger.

Durant le déroulement de l’opération, il réalise une surveillance garantissant qu'il n'y aura pas de débordement. En effet, l’information « quantité de matériau présent dans le conteneur avant début de remplissage » n'est pas garantie, aussi, lorsque cela est possible (présence d'un capteur de niveau), l’automatisme suit le niveau de produit et provoque l’arrêt de l’opération de façon que le compartiment puisse encore recueillir la quantité de matériau éventuellement présent dans l’élément de transfert.

Après que l’homme ait considéré que le déchargement a été normalement exécuté, il commande la fin de l’opération. L’automatisme intervient à nouveau pour que les éléments de transfert soient vidés. Pour cela, il maintient après l’arrêt de vidange du camion, les éléments de transfert en fonctionnement pendant un temps prédéterminé (un tour de l’ensemble des godets ou du tapis, par exemple).

3.4.2 Détermination des consignes

La détermination des consignes doit prendre en compte les informations d'état des constituants (teneur en eau, coefficient d'absorption des granulats, teneur en fines de l'eau de récupération...), les conditions de fonctionnement du matériel de la centrale (pesage en cumulé, décalage de zéro...) et les éléments complémentaires de la commande (volume de béton, consistance...).

3.4.2.1 Consigne pour le dosage de l'eau

L'eau de gâchage est l'eau d'apport pour ajuster la consistance du béton.

La détermination de la valeur de consigne pour le dosage de l'eau de gâchage doit prendre en compte les paramètres suivants :

- eau apportée par les granulats ;
- eau susceptible d'être absorbée par les granulats ;
- eau apportée par les solutions d'adjuvants ;
- eau réelle apportée par la quantité d'eau de récupération dosée.

Le calcul de ces quantités d'eau doit être fait à partir des quantités réelles des constituants et non à partir des quantités indiquées par la formule théorique. Ces valeurs doivent également être prises en compte pour ajuster le dosage des constituants qui contenaient cette eau.

3.4.2.2 Détermination des quantités d'addition et de ciment pour le liant équivalent

Le **liant équivalent** est défini par la quantité de ciment (CPA-CEM I, cf. NF P 15-301) et la quantité d'addition prise en compte pour la substitution partielle du ciment.

Deux équations permettent de résoudre ce problème. D'une part, la quantité d'additions (P) que l'on peut prendre en compte pour cette opération et d'autre part la prise en considération (k) de cette quantité d'addition.

$$P = A / (A + C) \quad \text{et} \quad C' = C + k A$$

avec	C	quantité de ciment CPA-CEM I (à calculer),
	A	quantité d'addition (à calculer),
	C'	quantité de liant équivalent (définie par la norme XP P 18-305 ou par le projet),
	P	proportion maximale d'addition prise en compte (définie par la norme XP P 18-305 ou par le projet),
	k	coefficient de prise en compte de cette addition (définie par la norme XP P 18-305).

Sur les cinq paramètres trois sont fixés par la norme ou le marché, les deux autres (C et A) se calculent ainsi :

$$si K = 1 / (1 - P + k P), caractéristique de l'addition utilisée,$$

$$C = C' K (1 - P) \quad \text{et} \quad A = P K C'$$

3.4.3 Commande des actionneurs

Le rôle de l'automatisme est d'une part de déterminer à quel moment il donnera l'ordre d'actionner tel ou tel matériel, puis il doit s'assurer que l'ordre a bien été exécuté et que le matériel concerné remplit normalement sa fonction. Ce même travail doit être réalisé en sens inverse pour arrêter le fonctionnement du matériel.

Les actions seront différentes selon qu'il s'agira d'une fabrication en continu ou en discontinu.

3.4.3.1 Fabrication en discontinu

En fonctionnement discontinu, plusieurs commandes peuvent intervenir en même temps ; chacune d'elles intervenant aléatoirement dans le temps en fonction de la rapidité d'exécution de l'opération précédente. Nous examinerons ici chacune des actions indépendamment des autres.

3.4.3.1.1 Lancement du cycle de dosage

Pour le lancement du cycle de dosage, il faut distinguer deux états. Soit on lance une nouvelle fabrication, soit on relance une gâchée après avoir déjà fabriqué une gâchée du même type.

Dans le premier cas, il n'est possible de lancer la fabrication que lorsque tous les éléments de la centrale sont disponibles (présence de constituants dans les différentes trémies de stockage primaire, trémies des bascules vides et fermées, malaxeur vide et fermé, etc.).

Dans le deuxième cas, on rencontre différentes possibilités en fonction du degré de sophistication des automatismes. Soit on attend que la gâchée n soit totalement terminée pour lancer la gâchée $n + 1$ (ce sont plutôt les automatismes de l'ancienne génération), soit on imbrique les différentes actions au fur et à mesure que le matériel correspondant est disponible. Le principe reste le même, l'automatisme s'assure que le matériel est en état (vide et fermé) pour lancer l'opération.

Les notions de bascule vide ou de malaxeur vide n'existent pas. Elles sont en fait traduites par des seuils correspondant à des états

« quasiment vides » et ces seuils sont mis en mémoire dans le calculateur.

Il n'est pas rare de constater une vidange incomplète du malaxeur (entre 90 et 95 %) au moment de la relance du remplissage du malaxeur pour la gâchée suivante. Certes, il y a peu de risque du point de vue technique avec une telle pratique lorsqu'elle est appliquée entre deux gâchées d'un même béton mais dans ce cas toutes les références enregistrées pour le suivi de la qualité de fabrication du béton sont caduques et la maîtrise de la qualité ne peut plus être garantie.

3.4.3.1.2 Pesage en cumulé

Le pesage en cumulé ne peut être correctement réalisé qu'à partir du moment où on connaît bien la quantité de matériau dosé précédemment. Cette remarque veut dire qu'il est indispensable d'observer pour la lecture de l'information un temps d'attente entre deux pesées successives. L'amélioration des systèmes informatique n'apporte absolument rien de plus dans ce domaine puisque le problème posé concerne le doseur lui-même. Ce temps d'attente peut être faible et là par contre l'automatisme peut vérifier cette stabilité en interrogeant à grande cadence le capteur de pesage.

3.4.3.1.3 Ralentissement de débit pour affinage du dosage

Lorsque l'écoulement d'un matériau présente des irrégularités pour le débit pratiqué dans le dosage courant, il est nécessaire, pour respecter les tolérances de dosage, de ralentir le débit à l'approche de l'objectif. On dit alors que l'on passe en dosage fin. Le passage en dosage fin en vue d'affiner la valeur de dosage du constituant est également assuré par l'automatisme.

3.4.3.1.4 Vidange des bascules et remplissage du malaxeur

Pour cette opération, l'automatisme doit associer des tâches de commande parallèlement à des tâches de vérification. Le remplissage du malaxeur ayant une grande influence sur l'efficacité du malaxeur, il faut non seulement commander au bon moment l'ouverture de réceptacle des bascules mais également s'assurer que ces réceptacles se vidange à la bonne cadence.

Bien entendu, les ordres de transfert des constituants pourront être décalés dans le temps pour tenir compte des distances à parcourir et du cycle retenu.

3.4.3.1.5 Vidange du malaxeur

Ce n'est qu'après que le temps de malaxage se soit écoulé que l'automatisme autorise la vidange du malaxeur. L'automatisme doit donc décompter le temps qui s'écoule à partir du moment où tous les constituants sont présents dans le malaxeur. Ce temps est affiché comme toutes les autres données. Aujourd'hui, le temps de malaxage est attaché à la formule à fabriquer et est mis en mémoire hors de la portée du conducteur. Cette disposition résulte d'une volonté de prouver que ce temps, élément primordial pour atteindre l'homogénéité du mélange mais inversement pour accroître le débit de la centrale, ne peut être modifié qu'après une action volontaire et responsable.

3.4.3.2 Fonctionnement en continu

En fonctionnement continu l'effet séquentiel n'existe que dans le premier démarrage (démarrage en cascade) et dans les changements de cadence. Les arrêts se font en général instantanément en charge. La reprise, lorsqu'il n'y a pas de modification de débit, se fait, également en charge, tous les organes se mettant en fonctionnement en même temps.

3.4.3.2.1 Démarrage en cascade et changement de cadence

Pour démarrer la fabrication, l'ensemble des organes de dosage et de malaxage étant vides, on démarre successivement les divers doseurs dans l'ordre où ils se trouvent dans la chaîne.

Compte tenu des cadences, des vitesses de fonctionnement des éléments de transport et des distances séparant les différents équipements, l'automatisme programme les différents décalages.

Dans le cas d'un changement de cadence, que ce soit une augmentation ou une diminution, on applique le même principe d'accélération ou de ralentissement des éléments extracteurs des constituants.

3.4.3.2.2 Régulation de sortie du béton du mélangeur

Lorsque le malaxeur possède une porte de régulation, c'est l'automatisme qui commande son ouverture, soit sur un critère temps de fonctionnement, soit sur une information prélevée sur l'intensité du courant appelé par le moteur d'entraînement du malaxeur lorsqu'il y a eu un calibrage préalable.

Avec les malaxeurs à fermeture totale, les changements de cadence ne sont quasiment plus pratiqués. En effet, il apparaît plus économique pour le matériel et sans risque majeur pour la qualité du béton, d'arrêter la production et de la reprendre quand cela est nécessaire.

3.4.3.2.3 Alimentation des trémies des doseurs

Dans l'ensemble du fonctionnement de la centrale continue, il reste cependant une partie du travail en séquentiel. Il s'agit du maintien à niveau du matériau dans les trémies de stockage avant dosage. En effet, le bon fonctionnement d'un doseur continu, notamment pour pulvérulent, implique une certaine charge de produit en amont de l'extracteur. C'est pourquoi il est défini dans les trémies de stockage des doseurs, deux niveaux correspondant aux limites hautes et basses de remplissage. Lorsque le niveau réel est en limite basse, l'automatisme commande la mise en fonctionnement de l'alimentateur pour transférer du matériau à partir du silo de stockage jusqu'à atteindre le niveau haut.

3.5 Surveillance du fonctionnement du matériel

En plus de commander les différents actionneurs, l'automatisme surveille le respect des objectifs visés. Il existe deux types d'objectifs le premier est relié au bon fonctionnement des matériels et le second à l'obtention des résultats visés.

3.5.1 Surveillance des actions

La surveillance de fonctionnement du matériel se fait par la comparaison d'un paramètre mesuré par l'automatisme à ce que devrait être ce paramètre dans les conditions normales de fonctionnement.

Le développement de ce principe est très lent malgré tout l'intérêt des informations apportées sur le fonctionnement du matériel et surtout sur l'évolution de ce fonctionnement. La première installation utilisant ce procédé a été inaugurée en 1976.

Exemple : En fonctionnement discontinu, une vis, un casque, un tapis extracteur, une pompe etc., dans des conditions normales de fonctionnement, mettront un temps t pour délivrer une certaine quantité de matériau.

En fonctionnement continu, dans des conditions normales de fonctionnement, un tapis extracteur doit délivrer une certaine masse de matériau au mètre linéaire de bande et être animé d'une vitesse spécifique (cas des doseurs à débit pondéral).

Tous ces paramètres (temps, masse au mètre linéaire, vitesse linéaire), sont autant de moyens pour savoir si le matériel fonc-

tionne dans de bonnes conditions. Si l'écart constaté entre la valeur théorique et la valeur mesurée est significatif, alors on peut en conclure à coup sûr que le tapis, la vis, le casque etc. s'encaissent ou qu'il y a une « branche » qui gêne le passage du matériau ou que la pompe est en train de se désamorcer (si ce n'est pas déjà fait) etc. La comparaison permanente de ces temps de fonctionnement de chacun des matériels est à la base d'un diagnostic aussi sûr que puissant sur l'état du matériel, et un matériel en mauvais état c'est tôt ou tard une anomalie et une perte économique par usure anormale et ralentissement du débit. La détection de ces anomalies n'implique pas obligatoirement l'arrêt immédiat de la production, mais permet de programmer une intervention d'entretien du matériel au meilleur moment.

On peut également concevoir une surveillance des matériels par recouplement d'informations provenant de matériels différents. Cette comparaison de signaux peut se faire sur l'intensité du signal lui-même ou sur son évolution (dérivée dans le temps) ou encore sur une analyse fréquentielle.

Exemple pour une centrale discontinue : la somme des constituants réellement dosés doit correspondre à la somme des quantités de constituants définies par la formule théorique. Un écart sera significatif d'un mauvais report des corrections en fonction de l'humidité des granulats ou d'un mauvais calcul relatif au liant équivalent. C'est évidemment le fonctionnement de l'automatisme qui sera visé. Ces vérifications peuvent également porter sur des sommes partielles telles que sable et eau ou ciment et additions ou somme totale des granulats etc.

Exemple pour une centrale continue : sur les chaînes de dosage des granulats, on monte sur le tapis collecteur un débitmètre de bande. Ce débitmètre mesure le débit de la veine regroupant l'ensemble des granulats envoyés vers le malaxeur. Normalement, l'indication de ce débitmètre doit correspondre à la somme des débits de matériau de tous les doseurs en fonctionnement sur la chaîne (avec un léger décalage temporel). La comparaison et l'analyse spectrale d'un éventuel écart permet de détecter les défauts et également de signaler quel doseur est à l'origine de cet écart.

3.5.2 Surveillance du résultat atteint

Cette surveillance nécessite un automatisme très performant dans la possibilité de relever une valeur de dosage. On a vu que le rapport entre l'incertitude de mesure et la tolérance de dosage était souvent de trois. De même, le rapport entre la tolérance de dosage et le seuil d'acceptation est de deux environ. Cela veut dire qu'entre la confiance que l'on a d'une valeur de mesure et la valeur pour laquelle le produit doit être considéré comme non conforme, il y a un rapport de six environ. À partir de cette marge, on peut définir des critères indicateurs d'une évolution néfaste du dosage (matériel, consigne...). C'est sur ces observations que l'on a créé les seuils d'alarme (ou d'alerte) pour le suivi des chantiers routiers (à ne pas confondre avec les seuils de refus qui sont utilisés comme critère d'acceptation ou de refus du matériau sur le chantier). Aujourd'hui, ces seuils peuvent être directement générés par l'automatisme qui peut alors soit déclencher une action particulière (mise en fonctionnement d'un vibreur par exemple), soit une alarme pour une intervention du conducteur de la centrale. La réaction du conducteur de la centrale dans ce cas est un peu plus urgente que précédemment, mais si ces seuils sont correctement définis le conducteur de la centrale pourra intervenir sans précipitation. Le seuil d'alarme est souvent choisi égal à la moitié du seuil de refus du matériau. Il est souhaitable que le signal déclenché par le dépassement du seuil d'alarme soit visuel et non sonore.

À partir de ce signal, on peut envisager diverses réactions. Si le dépassement du seuil est isolé, alors on peut considérer qu'il s'agit d'un aléa et que l'on peut ne rien faire. Si ce dépassement de seuil est fréquent (trois à quatre fois par heure) alors on doit considérer que cet incident est l'image d'une anomalie de fonctionnement du

matériel et l'automatisme devrait bloquer le fonctionnement de la centrale afin de permettre une intervention.

Chaque paramètre relatif aux différents dosages aura un seuil d'alarme et un de refus. On a pu constater quelquefois que certains automatismes détectant des non-respects de ces seuils modifiaient la consigne de la gâchée suivante. Cette pratique n'est pas acceptable car elle sous entend que les gâchées seront réhomogénéisées dans la bétonnière portée (une gâchée sèche pouvant compenser une gâchée humide), ce qui est tout à fait aléatoire [23].

3.5.3 Information du conducteur de la centrale

3.5.3.1 Moyens de signalisation

Il existe différents moyens d' informer le conducteur de la centrale du mauvais fonctionnement d'un équipement de la centrale :

— l'avertisseur sonore : il doit être réservé au cas grave pour lequel la production est réellement inacceptable et qui nécessitent un arrêt impératif ;

— le voyant lumineux : il risque d'être peu remarqué au milieu des autres voyants de fonctionnement des équipements de la centrale et son état passager en fait un mode d'information peu sûr (niveau de remplissage des conteneurs, mise en fonctionnement d'un vibreur...) ;

— information ou message sur écran ou sur cadran : il risque également de passer inaperçu pour les mêmes raisons que précédemment (indication des valeurs de dosage, ampèremètre pour l'information relative à l'alimentation du malaxeur...) ;

— le message persistant, c'est-à-dire qui ne s'efface que sur action du conducteur de la centrale ou qui reste affiché suffisamment longtemps pour qu'il ne puisse pas passer inaperçu (wattmètre enregistreur, bordereau de liste des pesées...).

C'est probablement ce dernier qui est le plus efficace et qui, avec le développement de l'informatique, est possible sur tous les automatismes. Ce message peut prendre plusieurs formes. Ce peut être un message écrit qui indique directement la raison et l'origine de l'anomalie. Ce peut être un « dessin » qui décrit le fonctionnement d'un matériel, il revient alors au conducteur de la centrale de l'interpréter, sauf si un fichier particulier explicitant les différentes causes de l'anomalie a été mis en mémoire. Ce peut être enfin un enregistrement sur bordereau des valeurs avec mise en évidence des anomalies.

3.5.3.2 Wattmètre enregistreur

C'est en 1928 que le wattmètre, mesurant la puissance du moteur du malaxeur, a été envisagé pour la première fois pour le contrôle de la consistance du béton. Longtemps, il a été présenté comme un appareil qui n'était utilisable que sur certains malaxeurs. Aujourd'hui, l'expérience a montré qu'il apportait sa contribution à la connaissance de la qualité du béton quel que soit le mode de fabrication (discontinu ou continu), pour tous les matériaux granulaires et pour tous les malaxeurs. Son premier apport concerne la maîtrise de la consistance du béton.

La figure 38 montre le principe et le montage du wattmètre différentiel.

La prise d'information combinée avec le fonctionnement des bascules permet d'attacher l'information wattmétrique aux paramètres d'une gâchée et faciliter le dépouillement ultérieur des informations recueillies.

Dans l'exemple d'enregistrement de la figure 39, on peut constater que la corrélation entre l'eau de gâchage (ou l'eau d'apport), qui est le premier paramètre responsable de la consistance du béton, et le niveau de stabilisation du palier du wattmètre (cf. figure 24) est excellent. Le wattmètre est l'outil idéal pour maîtriser la fabrication du béton. Son domaine d'application est très large et concerne les bétons courants de consistance, mesurée à l'affaissement, compris entre 1 et 20 cm.

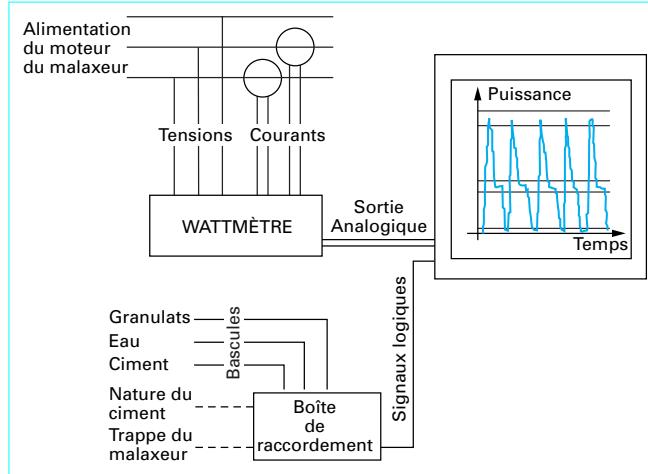
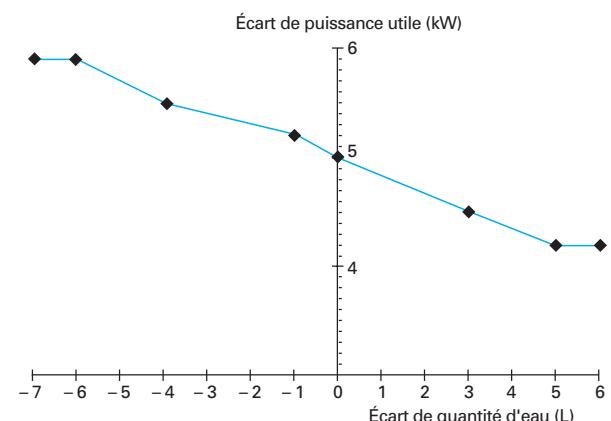


Figure 38 – Wattmètre différentiel : principe, montage et exemple de signature



Dans ce cas particulier, le wattmètre permet d'apprécier une variation de la quantité d'eau de 1 litre.

Si P est la puissance de malage (correspondant au palier de la courbe du wattmètre) et E la quantité d'eau totale, on obtient la relation suivante :

$$H = -0,859 E + 122,6 \quad \text{avec } H \text{ en mm et } E \text{ en L}$$

Le coefficient de corrélation est de 0,99 (déterminé à partir de 14 mesures)

Figure 39 – Correspondance entre la variation de la quantité d'eau et la variation de la puissance utile du malaxeur

Les progrès qui ont été faits, dans le sens de l'ergonomie, pour l'utilisation de ce matériel de contrôle de malaxage, sont très importants [28].

Le premier concerne la mise sur ordinateur de la visualisation de la courbe. Ce faisant, on a supprimé tous les inconvénients des enregistreurs graphiques tels que papier, plumes...

Le second est l'enregistrement des données sur disquette, ce qui permet de revenir très facilement pour visualiser une courbe ou une période de production.

Le troisième est le développement d'un logiciel de traitement permettant de caractériser la régularité d'une production ou le fonctionnement d'un matériel.

La limite actuelle du système est la représentativité des informations recueillies. Elles ne sont valables que pour une composition donnée (extensible aux familles de bétons de constitution très proche avec les précautions d'usage), ce qui impose de réaliser un calibrage avant le lancement d'une production. Il reste cependant, même en absence de calibrage, la possibilité d'apprécier la régularité de production (figure 40).

Cet appareil est tout à fait adapté pour être utilisé comme preuve incontestable de la régularité de la fabrication [29].

3.5.3.3 Bordereau des pesées

Dans les centrales de fabrication de BPE, on distingue le bon de livraison et le bordereau des pesées. Le bon de livraison décrit les objectifs visés par le producteur et les dispositions prises (au niveau de la formulation) pour garantir le respect des exigences du marché. Le bordereau des pesées informe sur la nature et la quantité des constituants qui ont été réellement mis dans le béton.

Si par le passé de grandes difficultés de maintenance des machines étaient rencontrées pour le bon fonctionnement de ce type de matériel, il n'en est plus de même aujourd'hui et plus rien ne limite l'emploi de ces matériaux même dans les ambiances très agressives des chantiers.

Aujourd'hui, toutes les centrales qui travaillent conformément à la norme relative au béton prêt à l'emploi sont équipées d'une imprimante permettant l'impression du bordereau des pesées.

Sur ce bordereau, les informations suivantes devraient figurer :

- l'heure de début de fabrication ;
- le temps de malaxage (fabrication en discontinu) ;
- la teneur en eau de chaque granulat (rapportée au matériau sec) ;
- la quantité de chacun des constituants en repérant la nature de ces constituants ; à titre d'exemple, en cas d'utilisation d'une eau de récupération en complément d'une eau naturelle, il faut distinguer la part de chacune d'elle ;
- à défaut de la nature des constituants, l'origine de l'alimentation pour chaque constituant (numéro du silo, de la trémie, de la cuve...) ;
- le cas échéant, la teneur en matières en suspension de l'eau de récupération si celle-ci est supérieure à 2 points.

En complément, une fiche doit indiquer :

- la correspondance conteneur - constituant ;
- le coefficient d'absorption de chaque granulat ;
- la densité de l'adjuvant si celui-ci est dosé volumétriquement ;
- la valeur du coefficient de prise en compte de l'addition dans le liant équivalent.

L'ensemble de ces documents permet au conducteur de la centrale de s'assurer de la qualité de ce qu'il fabrique et à l'utilisateur de vérifier que sa confiance est bien placée. Il est évident que ces listages, même limités à ce qui est indispensable, sont très compliqués à utiliser. Pour simplifier leur lecture, un signe particulier indique les valeurs de dosage qui ne respectent pas les seuils d'acceptation.

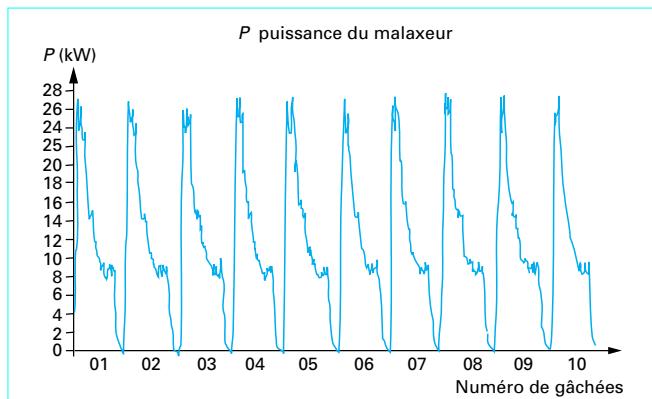


Figure 40 – Exemple de courbes de wattmètre différentiel montrant la régularité de production

4. Conclusion

Avec la recherche de performances toujours plus élevées, la fabrication joue un rôle de plus en plus important sur la qualité du béton, tant sur l'obtention du niveau de performances que sur leurs régularités pendant la construction des ouvrages.

La fabrication est même à un tournant de la chaîne puisqu'il lui est possible, contrairement aux autres maillons de cette chaîne, de corriger les « imperfections » de la nature et de faire du « sur mesure ». Il faut pour cela, bien connaître les caractéristiques des constituants dont certaines sont très variables dans le temps.

Conserver les caractéristiques des constituants et mettre tout en œuvre pour que les propriétés finales du mélange bénéficient au mieux de ces caractéristiques, doivent être les objectifs permanents et le souci premier pour le conducteur de la centrale. Pour cela, il dispose d'outils pour lesquels il lui revient d'effectuer les opérations de contrôle et d'entretien permettant de garantir leur constante fiabilité.

Pour conduire sa centrale et surveiller le fonctionnement des différents équipements, la microélectronique et l'informatique apportent une aide tout azimut : surveillance, prévision, information et prédition ; et c'est bien grâce à l'évolution de ces deux domaines que tous les progrès de la fabrication ont pu se concrétiser.

Mais si le conducteur de la centrale y trouve un regain d'intérêt et un support de tous les instants, cela lui demande également un niveau de compétence de plus en plus élevé. Il lui devient en effet nécessaire de savoir apprécier les retombées de toute action relevant de la fabrication, non seulement sur la qualité du béton, mais également sur les conséquences possibles pour l'ouvrage quelle que soit son importance.

Cette compétence associée aux progrès de la technique, permet une augmentation des performances du béton et une plus grande assurance de la qualité pour les ouvrages.

Fabrication du béton hydraulique

par **Yves CHARONNAT**

Directeur de Recherche
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Références bibliographiques

- [1] BRUNEAUD (S.) et al. – *Knowledge of concrete mixers : the mixer test station*. Congrès ERMCO'89 Stavanger Norvege 7-9 juin 1989.
- [2] BLASZCZYK (F.) et al. – *Advancements in continuous concrete plant*. 8th International symposium on concrete roads Cembureau Lisbonne 1998.
- [3] GY (P.). – *Hétérogénéité, Échantillonnage, Homogénéisation : Ensemble cohérent de théories*. Masson Collection Mesures Physiques.
- [4] ROBIN (P.). – *Contribution à la caractérisation de l'échantillonnage de mélanges granulaires en vue d'étudier les phénomènes de malaxage*. Thèse de Docteur Ingénieur de l'université de Clermont Ferrand 1988.
- [5] GOURDON (J.L.) et al. – *Contribution à la caractérisation de l'échantillonnage des mélanges granulaires en vue d'étudier les phénomènes de malaxage – Materials Science to construction materials engineering* 1st International RILEM congress J.C. Maso editor 1987.
- [6] Mémento. Production CERIB janvier 1997.
- [7] CHARONNAT (Y.) et al. – *Fabrication des bétons de ciment et des graves traitées* RGRA n° 746 déc 1996.
- [8] BONVALLET (J.) et al. – *Les centrales de fabrication des matériaux routiers des années deux mil*. RGRA n° 757 déc 1997.
- [9] LE BRIS (J.) et al. – *Utilisation d'une centrale continue pour la fabrication de béton routier*. Bull. liaison Labo. P et Ch. 94 mars -avril 1997.
- [10] SEDRAN (T.) et al. – *René-LCPC Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil*. Bull. liaison Labo. P et Ch. 194 p 87-934 1994.
- [11] LECLERC (J.P.) et al. – *Modélisation de l'écoulement de l'eau et du filer dans un malaxeur industriel et détermination de son pouvoir de lissage*. Bull. liaison Labo. P et Ch. 201 janv p 5-15 1996.
- [12] BRACHET (M.) et al. – *Vers un contrôle de qualité non conventionnel des bétons hydrauliques*. Annales de l'ITBTP, supplément au n° 336 février p 93-120 1976.
- [13] *Chaussées en béton de ciment – Les matériaux (ENPC)*. Cours de route, p 81-107 1989.
- [14] RANAIVOSON (D.). – *Dosage des granulats : Étude des phénomènes d'écoulement et de voûte. Application à la conception des trémies doseuses*. Thèse de doctorat, spécialité Génie Civil Université de Nantes et École Nationale Supérieure de Mécanique 1990.
- [15] OUDIN (J.) et al. – *Comportement des matériaux pulvérulents routiers*. Bull. liaison Labo. P et Ch. 187 p 77-79 1993.
- [16] BLASZCZYK (F.) et al. – *Comportement des pulvérulents lors de leur dosage*. RGRA 740 mai 1996.
- [17] CHARONNAT (Y.) et al. – *Fabrication des mélanges granulaires – Bilan 1993*. Bull. Liaison Labo. P et Ch., Spécial XVIII Matériaux mai p 21-33 1995.
- [18] BLASZCZYK (F.) et al. – *Étude du comportement mécanique des pulvérulents en écoulement*. Thèse de doctorat d'état de l'Université de Tours 1997.
- [19] MAHIOU (B.) et al. – *Le barrage de Puylaurens – Une grande voûte en construction avec des procédés innovants*. Travaux n° 711 juil-août 1995.
- [20] CHARONNAT (Y.). – *Le dosage pondéral dans les centrales à béton*. Bull. liaison Labo. P et Ch. 174 juil.-août p 5-16 1991.
- [21] Ch. Spécial Matériaux de travaux publics p 59-70 1982.
- [22] *Le béton hydraulique - Connaissance et pratique ENPC*. Chapitre 10 Presses de l'ENPC 1998.
- [23] GOURDON (J.L.) et al. – *Normalisation et qualification des matériaux*. Bull. liaison Labo. P et Ch. Spécial XVIII Matériaux mai p 93-104 1995.
- [24] CHARONNAT (Y.). – *Les bétonnières portées sont elles des malaxeurs*. Bull. liaison Labo. P et Ch. Spécial Matériaux de travaux publics p 71-86 1982.
- [25] CHARONNAT (Y.). – *Efficiency of mixers. Production Methods and Workability of concrete*, (P.J.M.) Bartos, (D.L.) Marrs and (D.J.) Cleland editors E & FN SPON juin p 45-54 1996.
- [26] LECLERC (J.P.) et al. – *Normalisation et qualification des matériaux*. Bull. liaison Labo. P et Ch. 196 mars-avril p 19-25 1995.
- [27] BEITZEL (H.). – *Gesetzmässigkeiten zur optimierung von betonmischern*. Thèse de Docteur Ingenieur Universität Karlsruhe N.O. Wieler Rheinland-pfalz 1981.
- [28] BAROUX (R.) et al. – *Malaxage des mélanges granulaires*. Rev Travaux 599 p 22-25 1985.
- [29] THEILLET (R.) et al. – *Suivi et contrôle de la fabrication des mélanges – Une nouvelle jeunesse pour la wattmètre différentiel*. Bull. liaison Labo. P et Ch. 174 juil.-août p 5-16 1991.
- [29] CHARONNAT (Y.). – *Quality control in concrete mixing. Production Methods and workability of concrete* (P.J.M.) Bartos (D.L.) Marrs and (D.J.) Cleland editor E & FN SPON juin p 45-524 1996.

Normalisation

Association Française de Normalisation

- NF P 15-301 06-94 Liants hydrauliques - ciments courants - composition spécifications et critères de conformité.
- NF P 18-201 05-93 Travaux de bâtiment – Exécution des travaux en béton – Cahier des clauses techniques.
- XP P 18-305 08-96 Béton – Béton prêt à l'emploi.
- NF P 18-359 07-85 Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Coulis courants d'injection pour précontrainte – Mesure de l'exudation (stabilité).
- XP P 18-555 12-90 Granulats – Mesures des masses volumiques, coefficients d'absorption et teneur en eau des sables.

NF P 98-170 04-92

FD P 98-171 04-96

NF P 98-431 04-91

NF P 98-701 05-93

Chaussées en béton de ciment. Exécution et contrôle.

Chaussées en béton de ciment. Étude de formulation d'un béton. Détermination de la composition granulaire conduisant à la compacité maximale du béton frais.

Barrières de sécurité routières en béton – Séparateurs et murets en béton coulés en place – Définitions, fonctionnements et dimensions.

Sous-série NF P 98-700 Matériaux de construction et d'entretien des routes

Central de traitement de matériaux – Terminologie et performances.

FABRICATION DU BÉTON HYDRAULIQUE

NF P 98-721	06-92	Doseurs en continu des granulats – Banc et méthode d'essai de la mesure du débit.	10-96	partie 5 Doseur pondéral à pulvérulent – Essais par pesée matière	
NF P 98-722	06-92	Doseurs en continu des pulvérulents – Banc et méthode d'essai de la mesure du débit.	XP P 98-772	03-96	Module d'acquisition de données pour les centrales de fabrication des mélanges granulaires – Description et spécifications fonctionnelles – Module pour la fabrication en continue – mars 1996.
NF P 98-730	09-92	Centrale de fabrication du béton de ciment – Définition des types de centrales et essais pour la vérification des réglages.	FD X 07-017-1	12-95	Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des instruments de pesage à fonctionnement non automatique (IPFNA).
NF P 98-744		Calibrage et vérification des réglages sur chantier des doseurs continus des centrales de production de matériaux.	XF X 07-001	12-94	Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie.
	10-96	partie 2 Doseur pondéral à granulats.			Normes européennes
	10-96	partie 3 Doseur volumétrique à granulats.	Pr EN 206		Béton – Performances, production et conformité.
	10-96	partie 4 Doseur pondéral à pulvérulent – Essais par prélèvement sur courroie.	Pr NF EN 1008		Eau de gâchage pour bétons.
			EN 45501	11-93	Aspects métrologiques des instruments de pesage à fonctionnement non-automatique.

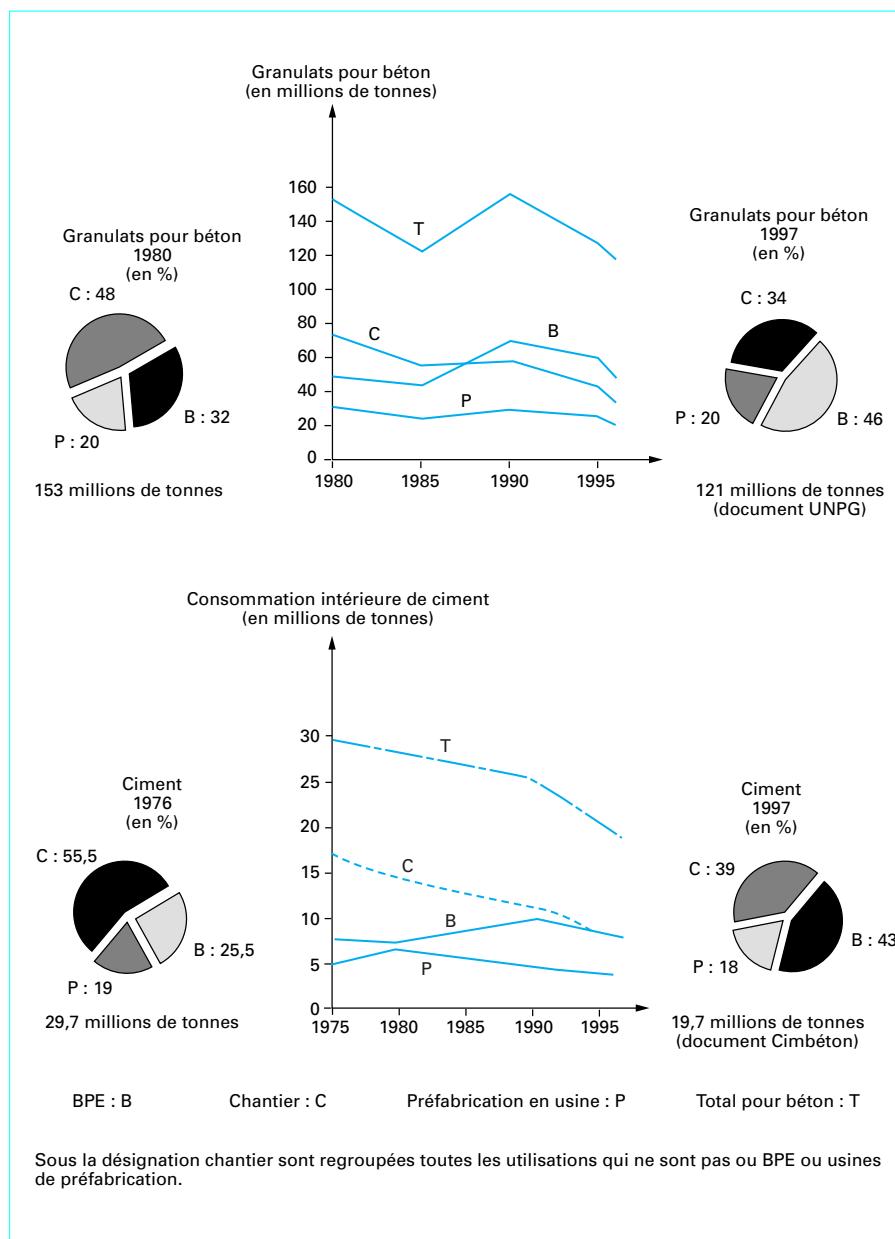


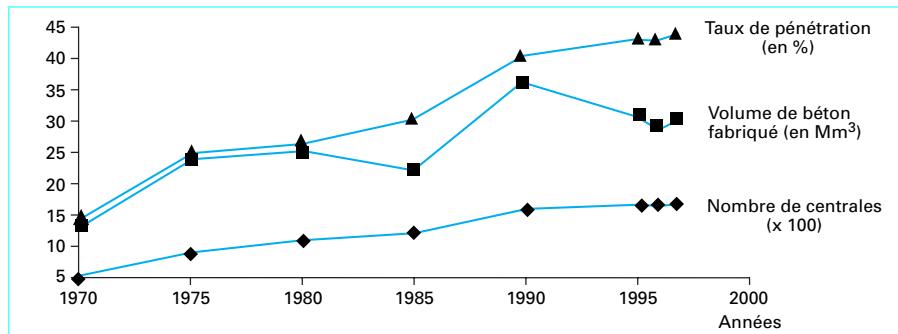
Figure A – Évolution des consommations de granulats et de ciment pour les différentes professions

Évolutions

Sur les vingt dernières années, on note (figure A) une forte progression du pourcentage de consommation de granulats et de ciment par les usines de BPE au détriment surtout des fabrications de chantier. Elle est confirmée par l'évolution du taux de pénétration présenté dans la figure B .

La proportion de ciment consommé, appelé « Taux de Pénétration », symbolise l'importance de l'évolution du BPE au sein de l'ensemble des professions de la construction. Dans certains pays, ce taux dépasse 60 %.

En 27 ans, la production de béton par le BPE a été multipliée par 2 et le nombre de centrales par 3. On constate que la production moyenne annuelle a fortement diminué. Si en 1976 cette production annuelle était de 36 000 m³, elle n'est plus aujourd'hui que de 16 000 m³. Certaines centrales de la région parisienne produisent plus de 200 000 m³ de béton par an .



Réglementation

Directive européenne 90/384/CEE concernant l'harmonisation des législations des états membres, relatives aux instruments de pesage à fonctionnement non automatiques.

Décret n° 76-130 du 29 janvier 1976 réglementant la catégorie d'instruments de mesure : compteurs d'eau froide.

Arrêté du 19 juillet 1976 relatif à la construction, l'approbation de modèle et la vérification primitive des compteurs d'eau froide.

Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. NOR : ATEP 9870017A.