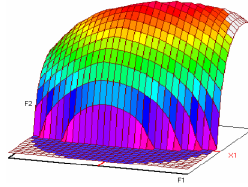


Année Universitaire : 2010-2011



**Master Sciences et Techniques CAC Agiq
Chimométrie et Analyse Chimique : Application à la gestion
industrielle de la qualité**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et
Techniques**

Titre
**Amélioration et maîtrise du comportement du
ciment dans le béton**

Présenté par:

Sekkak Salma

Encadré par:

- **AYADI Abdel Aziz HOLCIM-FES**
- **BALI Hamza FST Fès**

Soutenu Le 21 Juin 2011 devant le jury composé de:

- **M^r. BALI Hamza**
- **M^r. AYADI Abdel Aziz**
- **M^r. ALILOU EL Houssine**
- **M^r. BEN-TAMA Abdeslam**
- **M^r. EL GHADRAOUI EL Houssine**

Stage effectué à : HOLCIM-FES

DEDICACES

A mes parents,

En reconnaissance des sacrifices qu'ils ont toujours consentis pour moi, de leurs encouragements, leurs soutiens, et de leur aide morale et matérielle permanentes. Que ce modeste travail soit pour eux un témoignage de mon infini respect et mon profond amour.

A mon frère,

Avec tout l'amour que je le porte en témoignage de l'affection que je l'ai toujours réservée, j'espère qu'il trouve à travers ce travail l'expression de mes sentiments les plus chaleureux.

A ma famille, et mes amis

Aucune dédicace ne saurait vous exprimer mon grand attachement, vous trouverez ici la reconnaissance pour tous les services que vous avez pu me rendre.

A tous ceux qui ont très chers.

REMERCIEMENTS

Je remercie vivement le Mr. El KADDOURI, Directeur HOLCIM-FES pour m'avoir accueillie au sein de la société. Cette expérience fut pour moi une initiation vers la vie professionnelle.

Je tiens à remercier également le chef de service de contrôle de qualité Mr. HAJJI ZOUHAIR, et Mr. AYADI ABDELAZIZ, mon maître de stage pour son amabilité, sa grande disponibilité, ses encouragements, son soutien, son aide et ses précieux conseils durant ma période de stage, qu'il trouve dans ces mots l'expression de ma sincère gratitude.

Mes humbles et chaleureux remerciements s'adressent au Pr. EZZAKI et Pr. BALI HAMZA, mon encadrant à la faculté, pour son aide, sa grande disponibilité, ses encouragements, ses remarques judicieuses, qui n'a épargné aucun effort pour me venir en aide pour la réalisation de ce travail.

Je remercie également l'ensemble de jury, qu'il me soit permis de vous témoigner toute ma gratitude et mon profond respect d'avoir aimablement accepté de juger ce mémoire.

Mes sincères remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel du service laboratoire contrôle de qualité pour m'avoir accueillie au sein de leur équipe, pour leur aide pratique et inconditionnelle et leur sympathie.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail, qu'ils puissent trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Liste des tableaux et des figures

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Composition des différents ciments fabriqués par HOLCIM-FES.....	13
Tableau 2 : Principales caractéristiques et domaines d'utilisations de chaque ciment.....	13
Tableau 3 : Les classes de consistance du béton frais.....	24
Tableau 4 : Les échelles de l'affaissement du béton frais.....	24
Tableau 6 : les résistances à 28 jours du H.C et les résistances à 28 jours du béton.....	34
Tableau 7 : le rapport des résistances à 28 jours du cône HOLCIM et du béton.....	35
Tableau 8 : Résistance à 28 jours du cône HOLCIM et de la Norme Marocaine.....	37
Tableau 9 : le rapport des résistances à 28 jours du cône HOLCIM et de la Norme Marocaine.....	38
Tableau 10 : Les températures à 10 min et à 45 min du cône HOLCIM à 28 jours et les résistances du béton à 7 jours.....	40
Tableau 11 : Le slump à 10 min et à 45 min du cône HOLCIM à 28 jours et le slump du béton.....	42

Liste des figures.

Figure 1 : Description du prismètre.....	15
Figure 2 : Appareil de VICAT.....	15
Figure 3 : Appareil de BLAINE.....	16
Figure 4 : Schéma descriptif de l'appareil BLAINE	16
Figure 5 : Camions à bétonniers portées (toupie).....	23
Figure 6 : Cône d'Abrams.....	24
Figure 7 : Principe du surfacage au soufre	27
Figure 8: dispositif de centrage de l'éprouvette sur la presse.....	27
Figure 8 : la résistance à 28 jours du H.C / la résistance à 28 jours du béton.....	32
Figure 9 : la résistance à 28 jours du H.C / la résistance à 28 jours de la Norme Marocaine ...	38
Figure 10 : les températures à 10 min et à 45 min / la résistance à 7 jours du béton.....	41
Figure 11 : le slump à 10 min et à 45 min du H.C / le slump du béton	43
Figures 12 : La corrélation entre les variables X_i et Y_i	46

SOMMAIRE

Introduction	3
Chapitre I : Présentation d'HOLCIM	5
I-Histoire du ciment	6
II-Présentation du groupe HOLCIM	6
1-Présentation du groupe HOLCIM- Maroc	6
1.1 Historique	6
1.2 Organigramme.....	8
2-Présentation du groupe HOLCIM-FES	9
2.1 Objectifs	9
2.2 Situation géographique	9
2.3 Choix du site.....	10
III-les principales voies de fabrications	10
Chapitre II : Le ciment et ses constituants	11
1-Définition du ciment	12
2-Constituant du ciment	12
3-Les types des ciments.....	13
4-Laboratoire d'analyse et de contrôle de qualité	13
5-Analyses physico-chimiques et les caractéristiques du ciment.....	14
5.1 Les analyses chimiques des ciments réalisés consistent à déterminer ..	14
5.2 Les analyses physiques des ciments réalisés consistent à déterminer...	14
Chapitre III : Le béton et ses constituants	17
1-Classification du béton	18
2-Constituant du béton	19
2.1 Granulats	19



2.2 Adjuvants	21
3-Fabrication du béton	21
4-les principaux essais sur le béton	23
4.1 Essais de l'affaissement (cône d'Abrams)	23
4.2 Résistance	26
Chapitre IV : Amélioration et maîtrise du comportement du ciment dans le béton	29
I-Cône HOLCIM	30
II-Interprétation des résultats	33
III-Interprétation statistiques	44
1-Rappel statistique	44
2-Applications sur les résultats obtenus	44
Conclusion.....	49
Annexe	



Introduction

L'industrie marocaine du ciment a constamment répondu au développement quantitatif des besoins et à l'évolution quantitative du marché grâce à la modernité de ses centres de production et par l'ouverture de son capital à l'investissement privé national et étranger.

Le Secteur Marocain compte quatre grandes entreprises qui exploitent un total de 11 usines pouvant produire annuellement plus de 10 Millions de tonnes, dont le Groupe HOLCIM (Maroc) qui est un leader dans ce secteur.

Vu l'importance du béton (c'est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde) notre sujet va se basé sur l'étude de ce dernier et de ses constituants en premier lieu, puis on va consacrer notre travail sur la méthode de **cône HOLCIM**, qui va nous diriger afin d'avoir une idée sur le comportement du ciment dans le béton. Il va aussi nous permettre de réaliser une base de données pour anticiper et prévoir quelques paramètres qui caractérisent le béton (la résistance et la mesure du slump).

Cette étude va aussi nous rapprocher à la perfection pour la satisfaction du client, le fait de prévoir des paramètres sans attendre la livraison du ciment à la centrale de béton (où la production du béton, et son contrôle), la société aura l'aptitude de contrôler les résultats de la centrale et être plus précise de point de vu des mesures car on peut anticiper la résistance et le slump qu'on aura dans le béton.

Dés la livraison du béton au client, celui-ci réclame le cahier de charge où la valeur du slump et sa résistance souhaités sont indiqués. Ces mesures différent selon l'utilisation du béton, mais parfois, on peut travailler dans les meilleurs conditions avec un ciment de bon qualité sans avoir les résultats attendus.

Le laboratoire de contrôle de qualité joue un rôle majeur dans l'industrie cimentière, car il assure la conformité du produit par rapport aux exigences des normes malgré le non homogénéité des matières premières qui peuvent être altérées par des conditions climatiques

Dans le laboratoire d'HOLCIM-FES, à coté des fonctions quotidiennes, notre méthode a prouvé son efficacité par l'obtention des résultats satisfaisants pour l'équipe du laboratoire et pour le client qui va profiter de ce nouveau service.

Ceci montre que HOLCIM-FES est en pleine expansion pour le développement et la maîtrise du ciment mais aussi le comportement de cette dernière dans le béton.

Dans ce travail, nous avons procédé de la façon suivante:

- ☆ Dans la première partie, nous avons donné une brève présentation de la société.
- ☆ Dans la deuxième partie, nous avons traité, les caractéristiques du ciment, les divers procédés de fabrication du ciment et les analyses effectuées.
- ☆ Dans la troisième partie, nous avons donné un aperçu sur le béton et ses différents constituants.
- ☆ Enfin, dans la quatrième partie, nous avons développé mon sujet qui s'intitule : amélioration et maîtrise du comportement du ciment dans le béton.



Chapitre I Présentation d'HOLCIM

I. Histoire du ciment :

Au début du XIXe siècle, Louis Vicat (1768- 1828), jeune ingénieur des ponts et des chaussées de 22ans mène des travaux autour des phénomènes d'hydraulicité du mélange « chaux – cendres volcaniques » ce liant, déjà connu des Romains, restait jusqu'alors le seul matériau connu capable de faire prise au contact de l'eau.

Louis Vicat fut le premier à déterminer de manière précise les proportions de calcaire et de silice nécessaires à l'obtention du mélange, qui après cuisson à une température donnée et broyage, donne naissance à un liant hydraulique industrialisable : le ciment artificiel.

En Europe, l'utilisation du ciment et du béton (un mélange de ciment, de granulats, de sable et d'eau) dans les grands travaux de génie civil remonte à l'antiquité. Le ciment Portland, le plus utilisé dans la construction en béton, a été breveté en 1824 du fait de sa similitude d'aspect et de dureté avec la roche du jurassique supérieur que l'on trouve dans la région de Portland dans le sud de l'Angleterre.

En France, la première usine de ciment est créée en 1846 à Boulogne - sur - mer, bien que les premiers ciments aient été fabriqués du ciment à Pouilly en Bourgogne. Lafarge a fabriqué le ciment à partir de 1868, sur son site du Teil dans l'Ardèche, dont il exploite depuis 1833 le gisement de pierre calcaire pour produire de la chaux. Mais, le véritable essor de l'industrie du ciment coïncide avec le développement des nouveaux matériels de fabrication : four rotatif et broyeur à boulet en tête. Ainsi en 1870, il fallait près de 40 heures pour produire une tonne de Clinker contre environ 3 minutes de nos jours.

II. Présentation du groupe HOLCIM

1. Présentation du groupe HOLCIM- Maroc

Le secteur marocain contient quatre grandes entreprises qui exploitent un total de dix usines pouvant produire annuellement 10 millions de tonnes, dont le groupe HOLCIM est un participant dans la production.

HOLCIM MAROC filiale du groupe suisse Holderbank, un groupe cimentier présent dans différentes régions du monde, dispose d'une capacité de production de 2.2 millions de tonnes/an au Maroc

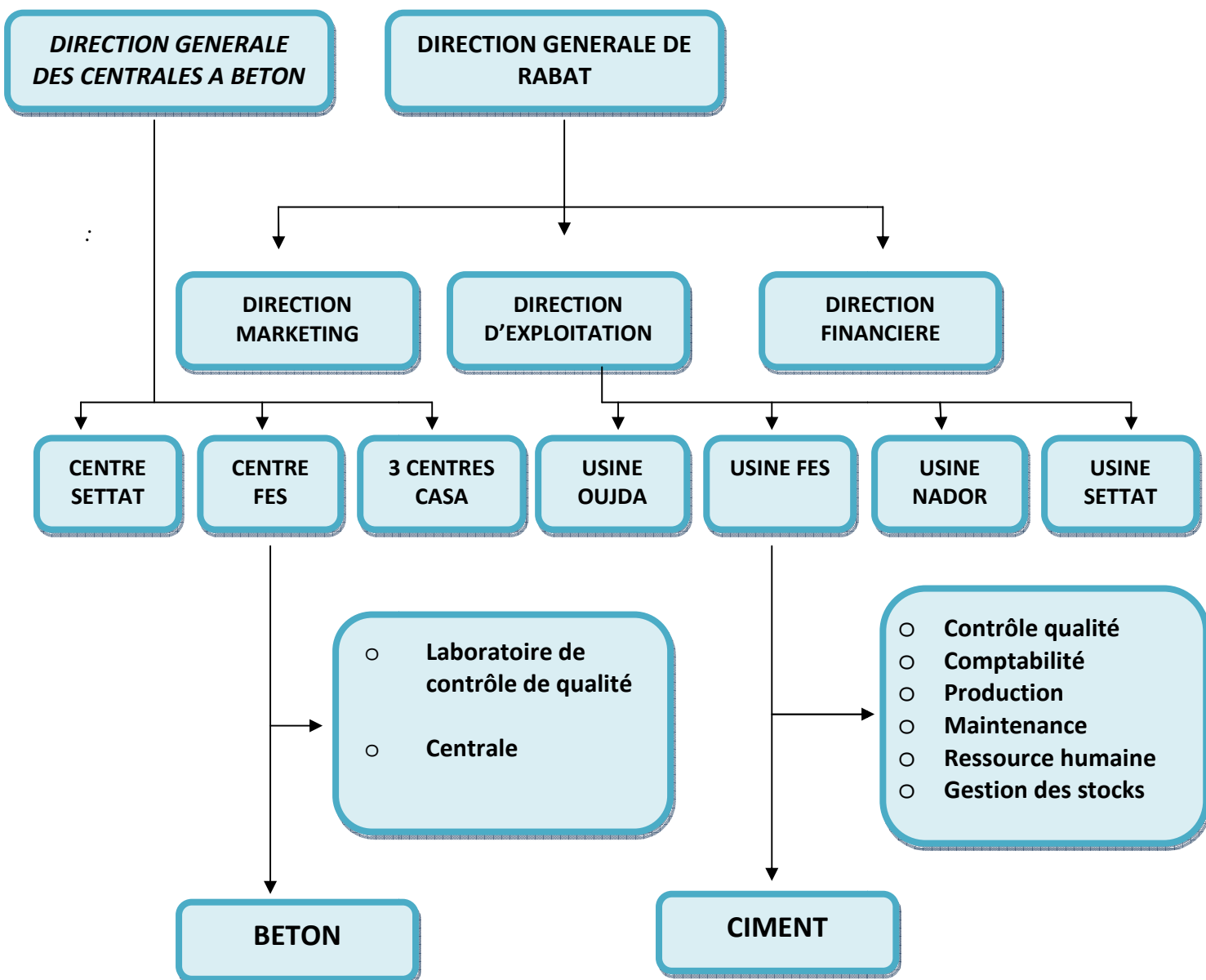
1.1 *Historique*



- 1972.** Les gouvernements marocain et algérien décident de construire une cimenterie à Oujda, sous le nom de la Cimenterie Maghrébine (CIMA). Son capital social est de 75 millions de dirhams, réparti à égalité entre l'Office pour le Développement Industriel (ODI) et la SNMC (société nationale marocaine), organismes représentant respectivement le Maroc et l'Algérie. Le projet CIMA fut mis en veilleuse et placé sous administration provisoire à cause du retrait algérien de l'opération en 1975.
- 1976.** L'ODI crée une société nouvelle dénommée Cimenterie de l'Oriental (CIOR) qui reprend les actifs de la CIMA avec pour objet la réalisation d'une cimenterie dans la région d'Oujda.
- 1979.** HOLCIM Maroc, 30 ans au service de la construction du Maroc. Mise en service de l'usine d'Oujda qui démarre avec une capacité de production de 1.2 millions de tonnes par an.
- 1980.** Installation à Fès d'un centre d'ensachage d'une capacité de 500 000 tonnes par an.
- 1982.** Installation à Casablanca d'un centre d'ensachage d'une capacité de 350 000 tonnes par an.
- 1985.** Création de Ciments Blanc du Maroc à Casablanca.
- 1989.** Installation d'un centre de broyage à Fès d'une capacité de 350 000 tonnes par an.
- 1990.** Début des travaux pour la réalisation d'une ligne complète de production de clinker à Fès et lancement de l'activité (béton prêt à l'emploi) **BPE** avec l'installation d'une première centrale à béton à Fès.
- 1993.** Démarrage de l'unité de Fès portant la capacité de production globale à 1,9 million de tonnes par an et prise de contrôle majoritaire du capital de la CIOR par HOLCIM dans le cadre du programme de privatisation.
- 1997.** Installation d'une centrale à béton à Rabat et d'une autre à Casablanca.
- 1999.** Construction d'une seconde centrale à béton à Casablanca et mise en service d'un centre de broyage et d'ensachage à Nador.
Mise en service des installations de valorisation de combustibles de substitution à l'usine de Fès Ras El Ma, d'une troisième centrale à béton à Casablanca et d'une autre à Nador.
- 2001.** Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie de Fès.
- 2002.** Changement de l'identité visuelle: **CIOR** devient **HOLCIM Maroc** et démarrage de la nouvelle activité granulats (Benslimane).
Début des investissements relatifs à la rationalisation du dispositif industriel de Fès.
Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie d'Oujda.
- 2004.** Extension de la cimenterie de Fès.

- 2005.** Démarrage du centre d'ensachage et de distribution de Settat.
- 2006.** Extension du centre de Nador.
- 2007.** Démarrage de la cimenterie de Settat et de la plateforme de prétraitement de déchets Ecoval.
- 2008.** Lancement du projet de doublement de capacité de production de l'usine de Fès. Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 du centre de Nador.
- 2010.** L'Édition du projet d'extension de l'usine Ras El Ma pour augmenter la capacité de production à environ 50%.

1.2 Organigramme



2. Présentation du groupe HOLCIM Fès

HOLCIM Fès appartient à un groupe cimentier, il dispose d'une capacité annuelle de broyage ciment de 1 millions tonnes. **Il utilise le procédé de fabrication à voie sèche intégrale** (certifié ISO 14001 et ISO 9001).

La cimenterie de Ras El Ma travaille dans le plus strict respect des exigences environnementales, notamment par la mise en place :

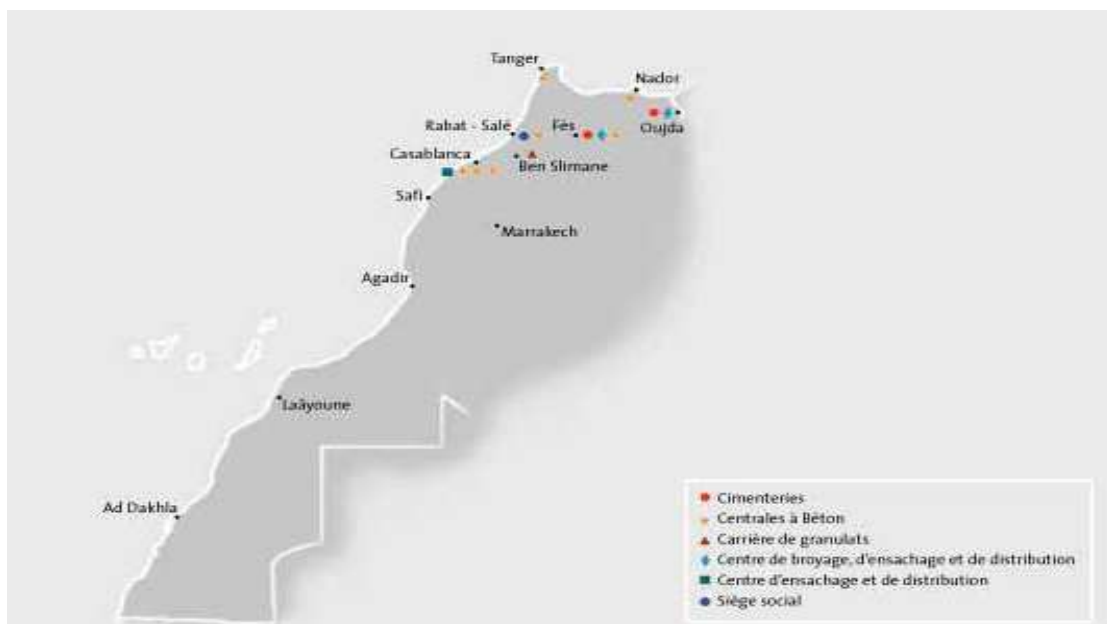
- des systèmes de dépoussiérage performants,
- d'un réseau d'assainissement moderne
- d'un dispositif renforcé de prévention et de lutte contre les incendies

2.1 *Objectifs :*

Orientée vers une écoute active des clients et fondant sa politique sur une approche de développement durable. HOLCIM avait pour objectifs de :

- Satisfaire le marché régional en ciment
- Optimiser les coûts de produits et de distribution
- Mieux maîtriser l'impact du procédé sur l'environnement
- Améliorer la satisfaction des clients en termes de temps d'attente ainsi que la logistique
- Assurer la production d'un produit conforme à la norme marocaine en vigueur.

2.2 *Situation géographique :*



La cimenterie de Ras El Ma est située à 25 Km au Sud de la ville de Fès à proximité de l'autoroute FES – CASABLANCA

2.3 Choix de site

Le site n'était pas choisi au hasard mais en tenant compte de plusieurs raisons :

- La disponibilité de la matière première en quantité et en qualité (l'usine a été implantée à proximité d'une carrière calcaire de 230 hectares disposant d'une réserve d'exploitation estimée à 100 ans)
- La possibilité d'alimentation en eau (deux forages ont été réalisés à côté de l'usine)
- La possibilité d'alimentation en énergie (l'électricité est alimentée par l'ONEP)
- La qualité des terrains de point de vue fondation et écoulement de la production et l'approvisionnement de la cimenterie.

III. Les principales voies de fabrication :

Il existe quatre méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement des matériaux et qui diffèrent par la nature du traitement thermique utilisé pour la préparation du mélange cru :

➤ Par voie humide (la plus ancienne) :

Le cru qui constitue l'ensemble des matières premières est broyé et malaxé en présence d'eau pour former une pâte liquide avant cuisson, cette méthode est abandonnée pour des raisons d'économie d'énergie.

➤ Par voie semi humide (dérivée de la voie humide) :

Le mélange est en partie débarrassé de son eau avant cuisson, cette méthode est abandonnée pour les mêmes raisons que la précédente voie.

➤ Par voie sèche (la plus utilisée) :

Le cru est éventuellement séché puis broyés finement et envoyé dans le four sous forme pulvérulente, **cette méthode est la plus utilisée** car elle est la plus économique en énergie.

➤ Par voie semi sèche (dérivée de la voie sèche) :

Le cru est aggloméré en boulettes avant cuisson

Chapitre

II

Les caractéristiques du ciment et de ses constituants

1. Définition du ciment

Le ciment (du latin caementum, signifiant pierre non taillée) est une matière pulvérulente formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier.

Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton.

Un ciment artificiel est un produit provenant de la cuisson de mélanges artificiels (de la main de l'homme) de silice, d'alumine, de carbonate de chaux, sur lesquels l'eau n'a aucune action (ou qu'une action très lente avant la trituration) et qui, réduits en poudre mécaniquement, font prise sous l'action de l'eau en des temps variables suivant leur qualité.

2. Constituants du ciment

2.1 **Extraction des matières premières**

Les matières premières principales sont extraites dans des carrières situées à proximité de la cimenterie afin de réduire les coûts de transport.

➤ **La carrière de calcaire :**

Le calcaire est utilisé dans le cru comme matière première principale à un taux moyen de 78%. La carrière de calcaire est située à proximité de l'atelier de concassage de l'usine, son exploitation est sous-traitée depuis le 15 février 1999 et elle se fait par abattage à l'explosif sous forme de deux gradins.

➤ **La carrière d'argile :**

L'argile est utilisée dans le cru comme matière première secondaire à un taux moyen de 22%. La carrière d'argile se situe à 7 km de l'usine, son exploitation est sous-traitée depuis 1981.

➤ **La carrière de schiste**

C'est une matière principale utilisée en raison de 9% environ. Sa carrière se situe à 45km environ du site de l'usine (région de BHALIL).

➤ **La carrière du minerai de fer**

C'est une matière de correction riche en oxyde de fer disponible dans la région d'Elhajeb.

Ces 12 derniers mois HOLCIM a ajouté une nouvelle matière, il s'agit de la fluorine c'est une matière importante qui sert à baisser la température de cuisson et permet de donner une résistance au cru.

3 Différents types du ciment

Il existe deux types de ciments fabriqués par HOLCIM :

➤ **Le ciment Portland Artificiel (CPA)**

Le CPA est constitué au minimum de 95% de Clinker et de 5% de gypse.

➤ *Le ciment Portland (CPJ)*

Le CPJ résulte du mélange de 70 à 80% du clinker, de 7% de gypse et de 13 à 23% d'autres ajouts tels que les cendres volants, la pouzzolane et le calcaire.

Deux types de ciment CPJ sont fabriqués par HOLCIM:

- Le CPJ 35 utilisé dans les travaux de maçonnerie
- Le CPJ 45 et CPJ 55 utilisés pour la fabrication du béton destiné aux travaux de routes, ainsi que les bétons manufacturés.

Ainsi les tableaux suivants résument la composition de ces différents ciments:

Type de ciment	Composition Chimique (en %)				
	Clinker	Gypse	Calcaire	Pouzzolane	Cendre volante
CPA 55	95	5	-	-	-
CPJ 55	80	8	2	7	5
CPJ 45	70,5	6,5	3,6	14,4	5
CPJ 35	63,5	6,5	28	0	2

Tableau 1 : Composition des différents ciments fabriqués par HOLCIM-FES

Type de ciment	Caractéristiques	Domaine d'utilisation
CPA 55 et CPJ 55	Haute résistance (55MPa)	- La fabrication du béton armé fortement sollicité, béton précontraint et béton à haute Performance. - Décoffrage rapide.
CPJ 45	Résistance Moyenne (45MPa)	- Grands œuvres (béton armé fortement sollicité et à résistance mécanique élevée).
CPJ 35	Faible résistance (35MPa)	- 90% dans les travaux de maçonnerie - 10% dans les grands œuvres

Tableau 2 : Principales caractéristiques et domaines d'utilisations de chaque ciment

4 Laboratoire d'analyse et de contrôle de qualité

Le laboratoire de contrôle de qualité a pour responsabilité de vérifier la conformité de réalisation des différentes étapes de production; depuis la matière première jusqu'au produit fini qui est le ciment.

Il constitue une auto-évaluation et permet d'y construire une réelle capacité de réaction et d'anticipation afin de rester conforme aux standards en vigueur et aux normes marocaines de production de ciments.

Les cimenteries modernes sont aujourd'hui fortement automatisées, tel est le cas de HOLCIM - cimenterie de Fès-

Les chimistes en fonction, analysent en permanence les échantillons disposés en différents points de l'unité de production.

Dans la salle de contrôle, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, les techniciens supervisent l'ensemble des phases de la production, de la carrière jusqu'à l'ensachage.

C'est pourquoi HOLCIM Maroc a depuis longtemps mis en place des procédures de contrôle rigoureuses qui lui permettent de garantir la qualité de son produit pour être conforme aux exigences des normes marocaines.

Différents contrôles sont effectués dans ce laboratoire:

- Un contrôle du cru sortie du broyeur effectué chaque heure.
- Un contrôle de clinker effectué chaque 2 heures.
- Un contrôle de ciment effectué chaque 2 heures.
- Un contrôle de la farine chaude 3 fois par jour.
- Un contrôle de combustible 3 fois par jour.
- Un contrôle des matières premières 1 fois par semaine.

5 Les analyses physico-chimiques et les caractéristiques du ciment

5.1 *Les analyses chimiques des ciments réalisés consistent à déterminer :*

- Le pourcentage de la fluorine dans le cru.
- La nature des éléments chimiques qui constituent le solide étudié par analyse spectrométrie à RX.
- Le taux d'humidité.

C'est la détermination de l'eau libre à 105°C d'une matière donnée, cela consiste à calculer le rapport entre la perte de masse d'un échantillon portée à une température de 105°C et sa masse initiale.

- La Perte au feu : P.A.F

La perte au feu est une analyse permettant de déterminer la teneur en H₂O et en CO₂ présent dans la matière traitée.

- La granulométrie des matières brutes
- Des chlorures par potentiométrie
- Le but de cette analyse est de déterminer des éléments mineurs des chlorures.
- Les taux de cendres.

5.2 *Les analyses physiques des ciments réalisés consistent à déterminer :*

La Prise du ciment par le prismètre (manuel): L'objectif de cette analyse est de déterminer la stabilité du ciment par le début et la fin de la prise.

a. Détermination du début de la prise

La sonde amovible, descend perpendiculairement à la surface de la pâte et s'immobilise pendant un court arrêt quand elle entre en contact avec cette surface, elle est abandonnée à elle-même sans vitesse initiale.

On observe l'enfoncement de l'aiguille, ces derniers sont renouvelés jusqu'à constatations du début de la prise.

Ces différentes observations sont effectuées sur le moule immergé ou extrait de conservation pendant un temps ne dépassant pas **5 min** (en des points différents).

Les points de mesure doivent être écartés d'au moins **1.5 mm** de la paroi du moule et de **2.0 cm** entre eux.

Le début de prise est l'instant où l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à une distance du fond du moule supérieure à 2.5 mm.

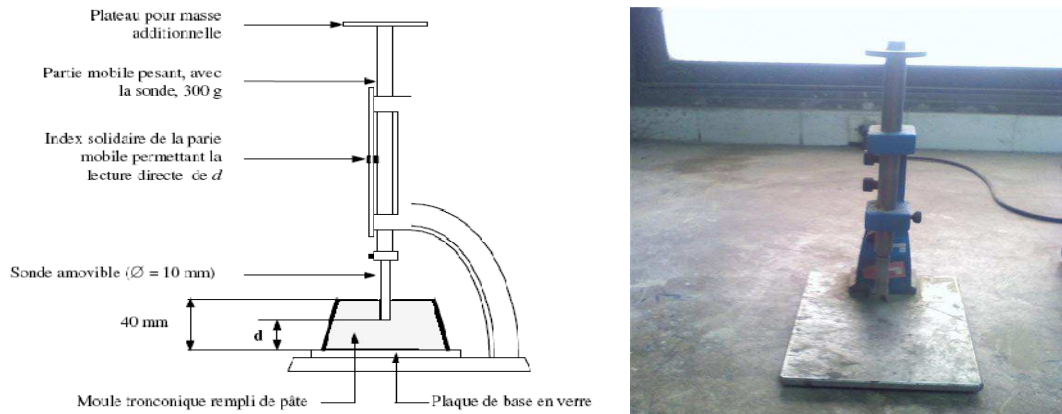


Figure 1 : Description du prismètre

b. Détermination de fin de la prise

Elle désigne le temps qui s'écoule entre le moment où l'eau est ajoutée au liant et le moment où l'aiguille de Vicat, soigneusement appliquée sur la surface de l'éprouvette retournée ne laisse plus d'empreinte.

- L'essai de résistance à la flexion et la compression : L'objectif est de mesurer les résistances à la compression et la flexion du mortier. Les essais de flexion et de compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression des liants hydrauliques (ciment).
- L'essai de prise par l'appareil de VICAT : Cet appareil est composé essentiellement d'un piston vertical, muni à son sommet d'un plateau destiné à recevoir une charge amovible ou éventuellement des poids et portant un curseur se déplaçant devant une graduation à sa partie inférieure, le piston peut recevoir soit la sonde de consistance, soit un porte-aiguille et l'aiguille de Vicat.



Figure 2 : Appareil de VICAT

La sonde de consistance : Elle consiste en une tige cylindrique en métal poli, terminée à sa partie inférieure par une section nette et d'équerre.

L'aiguille de VICAT : elle est constituée d'une tige cylindrique en métal poli, terminée à sa partie inférieure par une section nette et d'équerre et de 1 mm^2 ($d = 1.13 \text{ mm}$). L'ensemble aiguille et porte-aiguille ont la même masse que la sonde de consistance.

Le moule tronconique : il est constitué par un anneau de forme tronconique reposant par sa grande base sur une plaque-support. L'anneau, dont la paroi intérieure est lisse, peut être en métal, en matière plastique, etc..... La plaque support est en verre ou en métal, elle est parfaitement plane.

- Surface spécifique Blaine.

Selon Blaine, le contrôle de la perméabilité à l'air a pour but la détermination de la granulation des poudres. Pour ce contrôle, la substance (ciment) est condensée sous des conditions définies. La résistance opposée à ce courant d'air dépend de la granulation de la substance. Des conditions qui divergent de cette formule peuvent être calculées.



Figure 3 : Appareil de BLAINE

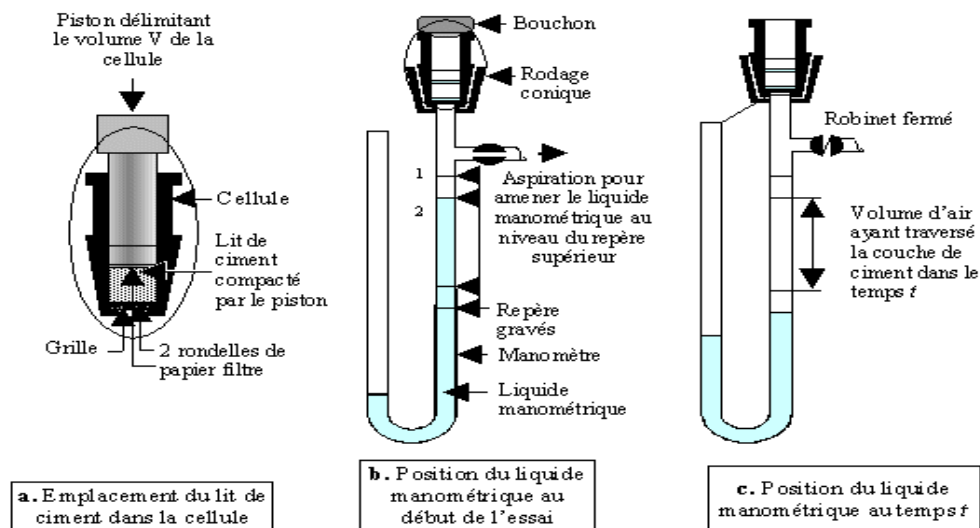


Figure 4 : Schéma descriptif de l'appareil BLAINE

L'appareil (Blaine) est composé d'un tube de verre en U avec quatre repérés indiquant le niveau au sommet du bras droit de ce tube ; il y a un logement conique destiné à recevoir la cellule en acier inoxydable. Sur le droit du tube en U est connecté un robinet muni d'une petite pompe à main en caoutchouc.

La cellule est composée d'un cylindre creux, Très soigneusement poli, et présente sur son fond une saillie servant d'appui à un disque métallique à petits trous. Un piston également en acier poli peut pénétrer dans une cellule. Le tube en U est monté sur un support auquel est accroché aussi un thermomètre.

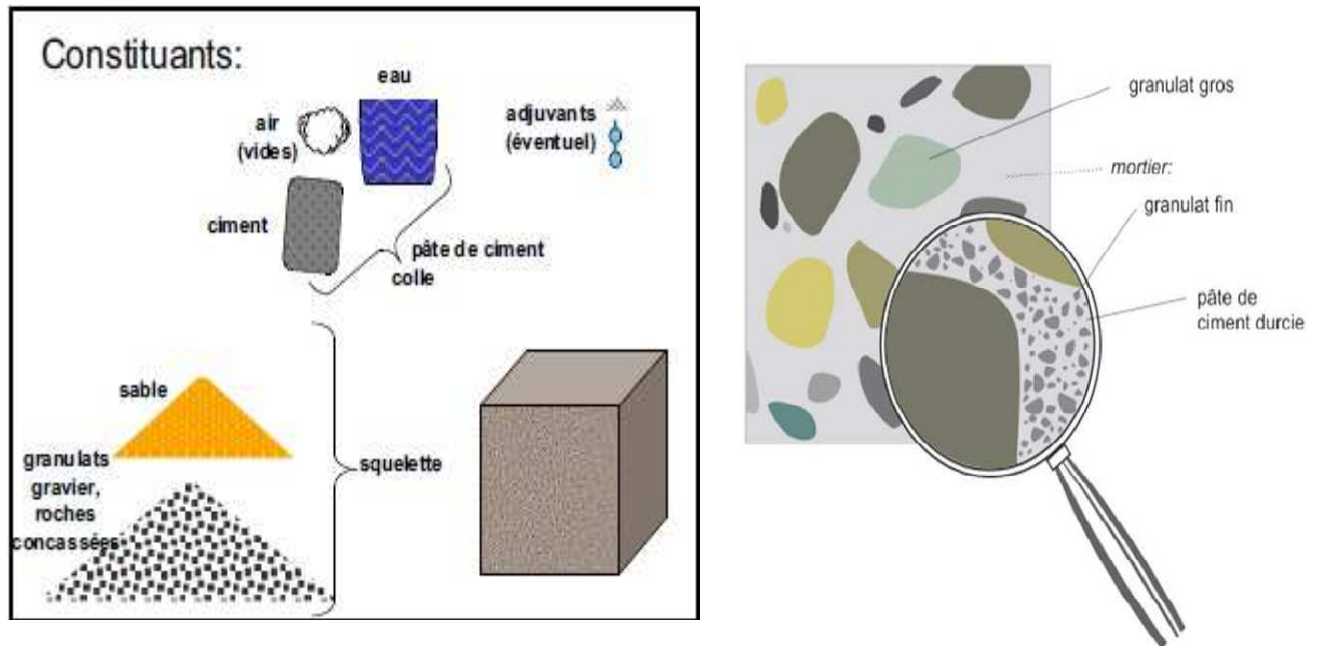
Chapitre

III

Béton et ses constituants

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant. La forme la plus ancienne du béton remonte à 7000 ans avant JC. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspdin en 1824[1].

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.



1 Classification des bétons

Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories. En général le béton peut être classé en trois groupes selon sa masse volumique ρ :

- Béton normal : ρ entre 2 000 et 2 600 kg/m³ ;
- Béton lourd : $\rho > 2600$ kg/m³ ;
- Béton léger : ρ entre 800 et 2 000 kg/m³ ;

Le béton peut varier en fonction de la nature :

- des granulats,
- des adjuvants
- des colorants et des traitements de surface.

Il peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

HOLCIM produit différents types de bétons :

❖ **Bétons spéciaux** : Ce sont des bétons qui n'ont pas été prévus par la norme, mais qui sont expressément demandés par les clients, ce sont principalement des:

- Bétons à résistances (B35, B25, B20...),
- Bétons à remblayage,
- Mortiers.

- ❖ **Bétons à Caractéristiques Spécifiées (BCS) :** Ces Bétons à caractéristiques spécifiées conformes à la norme sont désignés par toutes les données précisant leur composition ou leurs caractéristiques particulières répondant à une spécification du client (dosage, coloration...).

Ce sont des bétons bénéficiant d'une garantie de résistance nominale à la compression (de 13 MPa à 30 MPa).

- ❖ **Bétons à Caractéristiques Normalisées (BCN) :**

- Bétons imprimés: bétons architectoniques répondant à une conception architecturale ou esthétique.
- Bétons à fibres de polypropylène: bétons spécialement étudiés pour limiter la microfissuration de surface.
- Bétons colorés : bétons de couleur distincte de la couleur usuelle du béton.
- Bétons prêts à l'emploi autoplaçants: bétons fabriqués en usine puis transportés et livrés sur chantier.

2. Les constituants des bétons

2.1 Les granulats[2]

Les granulats pour bétons sont des grains minéraux classés en fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballasts, suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 125 mm.

Selon un concept traditionnel, les granulats constituent le squelette du béton. Ceux, qui sont généralement moins déformables que la matrice de ciment, s'opposent à la propagation des microfissures. Ils améliorent ainsi la résistance du béton.

Le choix d'un granulats est donc un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudiée en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité.

La granulométrie est l'étude de la taille des grains qui forment le granulats, elle consiste à tamiser le granulats sur une série de tamis à mailles carrées, de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus (reste non tamisé) sur chaque tamis.

La norme indique la terminologie usuelle des granulats selon leurs dimensions, retenons que :

- Fillers $D < 2 \text{ mm}$,
- Sables $1 < D < 6,3 \text{ mm}$,
- Gravillons $1 \text{ mm} < D < 125 \text{ mm}$,

De nombreuses caractéristiques des granulats sont testées comme la masse volumique, la propreté, la forme, la composition...

Il existe différents types de granulats :

- ***Les granulats roulés***

Les granulats alluvionnaires (dits roulés) ont une forme arrondie due à l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses (nuisibles à la résistance du béton) et criblés pour obtenir différentes classes de dimension.

- ***Les granulats de carrières***

Les granulats de carrière sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent de l'origine de la roche, de la régularité du banc, du degré de concassage....

- **Les granulats artificiels**

Par exemple, il peut être intéressant d'utiliser des granulats très légers (bois, polystyrène expansé). Très légers (20 à 100 kg/m³) ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m³ (la masse volumique d'un béton est d'environ 2500 kg/m³). On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : Blocs coffrants, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants.

2.1 Les adjuvants

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment Portland, commencent des recherches sur l'incorporation de produits susceptibles d'améliorer certaines de ses propriétés.

On cherche à agir sur :

- les temps de prise,
- les caractéristiques mécaniques,
- et de sa mise en œuvre et l'étanchéité.

- ❖ A partir de 1909, le sucre connu comme retardateur de la prise du béton et souvent employé.
- ❖ Entre 1910 et 1920 débute la commercialisation d'hydrofuges et d'accélérateurs à base de chlorure de calcium
- ❖ A partir de 1930, les entraîneurs d'air sont fréquemment utilisés. Ils seront suivis par les antigels et les produits de cure.
- ❖ Depuis 1960, avec le développement du béton manufacturé et du béton prêt à l'emploi, les adjuvants prennent une place grandissante.

- **Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton**

Les plastifiants réducteurs d'eau et les superplastifiants modifient la consistance des bétons à l'état frais, avant le début de la prise. On cherche à obtenir une grande « fluidité » sans ajouter de l'eau, afin que le béton puisse facilement se mettre en place dans le coffrage.

Ces adjuvants ont pour fonction principale, soit :

- d'améliorer l'ouvrabilité du béton,
- d'améliorer les résistances mécaniques.

Leurs dosages sont compris entre 0,4 et 3% du poids de ciment.

- **Les accélérateurs de prise**

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer le temps de prise du ciment dans les bétons. Ils sont à recommander pour :

- les bétonnages par un temps froid,
- les décoffrages rapides,
- les scellements,
- les travaux en galerie et sous l'eau, etc.

- **Les retardateurs de prise**

Introduits dans l'eau de gâchage, ils ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise du ciment dans le béton ou le mortier. Par rapport au témoin, l'augmentation du temps de début de prise est comprise entre une heure et deux heures. Les retardateurs de prise sont particulièrement recommandés pour :

- les bétonnages par temps chaud,
- les bétonnages en grande masse,
- la technique des coffrages glissants.

- ***Les hydrofuges***

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale d'assurer une bonne étanchéité au béton.

- ***Les entraîneurs d'air***

Ils ont pour fonction d'entraîner la formation dans le béton, de microbulles d'air uniformément réparties dans la masse. La résistance au gel du béton durci, ainsi que sa résistance aux sels de déverglaçage et aux eaux agressives, sont considérablement améliorées.

3 *La fabrication du béton*

Les méthodes de fabrication du béton sont adaptées à la nature du chantier et aux types de béton à réaliser. Le béton est fabriqué principalement dans :

- des centrales de **béton prêt à l'emploi (BPE)**,
- des centrales de chantier,
- des bétonnières pour les petits chantiers.

➤ **Fabrication du béton au sein de la centrale à béton HOLCIM [2]**

○ *L'approvisionnement et le stockage des constituants*

Les constituants du béton doivent faire l'objet du stockage compatible avec les besoins du chantier, en évitant aussi bien les ruptures de stock que les surstockages. Les constituants utilisés doivent toujours être de qualité et conformes aux normes en vigueur.

- ***Le stockage du ciment***

Une fois qu'on a choisi le ciment adapté à l'ouvrage à réaliser (par exemple :CEM I, CEM II...), le ciment est livré en vrac par camion-citerne est déchargé pneumatiquement et stocké dans des silos.

- ***Le stockage des granulats***

Il convient d'éviter tout mélange entre des granulats de natures, d'origines ou de classes granulaires différentes. Pour éviter la pollution des granulats par la terre ou par des déchets, le stockage se fait sur une aire aménagée. La propreté des sables est un facteur de qualité indispensable du béton.

Le stockage en trémies, elles sont à ciel ouvert, généralement de faible hauteur et aussi hautes que larges. Le stockage en trémie présente les garanties de qualité et de régularité indispensables pour l'obtention de bétons à caractéristiques très régulières (résistances mécaniques, teinte). C'est également le seul moyen susceptible de garantir une teneur en eau constante des granulats, qui fait l'objet de mesures par sonde.

- ***Le stockage de l'eau***

Si l'on est amené à stocker de l'eau sur le chantier, on veillera à ce qu'elle ne puisse être polluée par des matières organiques ou des sels tels que les chlorures ou les sulfates.

- ***Le stockage des adjuvants***

Les adjuvants sont stockés en bidons ou en conteneurs fermés, bien identifiés. Les précautions

concernant le stockage par temps froid, ainsi que les dates limites d'emploi doivent être scrupuleusement respectées.

- ***Le dosage des constituants***

Le ciment est acheminé du silo à la trémie de dosage par des vis sans fin (vis d'Archimède) qui assurent un débit régulier et qui sont à l'abri de l'humidité ambiante, ou par transport pneumatique.

Le dosage pondéral (nettement préférable au dosage en volume) est mécanique : la trémie remplie de ciment, portée par un fléau analogue à une balance romaine déclenche l'arrêt de l'arrivée de ciment lorsque le poids requis est atteint.

En ce qui concerne les granulats, ils sont repris par skip ou dragline et acheminés jusqu'à la doseuse par bande ou par tapis. Pour obtenir une composition de béton définie et constante, la teneur en eau des granulats doit être mesurée régulièrement.

Le dosage en eau de gâchage sera effectué, déduction faite de l'apport d'eau contenue dans les granulats. L'eau est dosée par la pompe doseuse.

- ***Le malaxage des constituants***

Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté et déterminer un temps de malaxage suffisant.

- ***Le matériel de malaxage : Les malaxeurs***

Ces appareils assurent une homogénéité du mélange supérieure à celle obtenue avec les bétonnières, grâce au déplacement relatif des composants à l'intérieur du mélange. Ce déplacement est

provoqué par des trains de palettes dont l'axe est excentré par rapport à celui de la cuve, qui est elle-même fixe ou tournante.

La plupart des malaxeurs sont à axes verticaux. Le béton subit un puissant effet de brassage à la fois dans le sens vertical et dans le sens horizontal. Ce type de matériel est le mieux adapté à l'obtention de bétons homogènes.

- ***Les paramètres du malaxage***

Une fois déterminé l'appareil adapté au béton à réaliser, le malaxage (pour être efficace) doit prendre en compte :

- l'ordre d'introduction des composants ;
- la vitesse de rotation de la cuve ;
- le temps de malaxage.

Avec un malaxeur, on considère comme préférable, lorsque c'est possible, d'introduire le ciment et l'eau qui assure son mouillage, puis le sable (pour constituer le mortier) et enfin les gravillons. Les adjuvants ont été préalablement dilués dans une partie de l'eau de gâchage.

Avec une bétonnière, l'introduction d'une partie des gravillons avec une partie d'eau assure le lavage de la cuve. Le ciment, le reste de l'eau et le sable sont introduits ensuite. Les gravillons restants sont introduits en dernier.

La vitesse de rotation des appareils est de l'ordre de 20 à 30 tours/mn, elle diminue avec le diamètre de la cuve.

Le temps de malaxage est de l'ordre de 45 secondes. En revanche, les bétons très fermes ou riches en éléments fins peuvent nécessiter des durées de malaxage plus longues : 1 à 2 minutes.

○ *Le transport du béton : l'approvisionnement du chantier*

Le transport du béton frais s'effectue par l'emploi de camions à bennes fixes ou des classiques bétonnières portées (toupies) qui assurent le maintien de l'homogénéité pendant le transport. La capacité de ces bétonnières portées varie de 4 à 10 m³.

Le temps cumulé de transport et de déchargement doit être limité à 1h 30 mn environ dans des conditions normales de température (voisines de 20 °C). Le risque rencontré est une chute de la maniabilité du béton. L'emploi de retardateurs de prise et de plastifiants permet de résoudre ce type de difficultés.



Figure 5 : Camions à bétonnières portées (toupie)

4 *Les principaux essais effectués sur le béton*

➤ **Caractéristiques principales du béton frais**

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité, qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci.

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains, mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement ou encore utilisent l'énergie potentielle du béton où nécessitent un apport d'énergie extérieur.

On comprend qu'il est difficile de convenir d'un tel appareil tenant compte de tous les bétons possibles pour tous les usages et qui tiennent compte aussi des différents facteurs de l'ouvrabilité.

Certains appareils sont utilisés à la fois par les laboratoires et par les chantiers. La distinction proposée est donc parfois assez artificielle, sauf dans le cas d'appareillage très élaboré.

4.1 *Essais de l'affaissement (cône d'Abrams)*

La consistance ou l'ouvrabilité d'un béton est un facteur important. Elle conditionne la facilité de mise en place du béton dans le coffrage et influe sur le dosage en ciment et en eau dans le béton. Elle a donc indirectement une conséquence sur le prix du béton.

Plus la consistance demandée est grande plus le béton contient de l'eau et de ciment, plus son coût est élevé. Le choix de la consistance est donc un équilibre entre le coût du béton et l'ouvrabilité requise pour la mise en œuvre du béton.

L'observation visuelle de la consistance du béton permet de définir quatre classes de consistance et de les désigner par des lettres.

Ferme	Plastique	Très Plastique	Fluide
S1	S2	S3	S4

Tableau 3 : Les classes de consistance du béton frais

Mais cette approche peut être plus précise en quantifiant l'ouvrabilité. Pour cela il faut élaborer une échelle qui permette selon la valeur mesurée sur cette échelle de connaître avec une précision suffisante l'ouvrabilité requise pour la mise en œuvre du béton.

Observation	Affaissement	Classe
Ferme	de 0 à 4 cm	S1
Plastique	de 5 à 9 cm	S2
Très Plastique	de 10 à 15 cm	S3
Fluide	Supérieur à 16 cm	S4

Tableau 4 : Les échelles de l'affaissement du béton frais

Cette échelle de valeur a été arbitrairement élaborée par la mesure au cône d'Abrams. Cet essai de mesure est normalisé.

La norme indique toute la procédure de l'essai, le matériel à utiliser pour garantir cette échelle de mesure et donner du sens à la valeur mesurée. Globalement, il s'agit de former un cône de béton dans un moule. Au démoulage du cône, le béton frais s'affaisse.

L'importance de cet affaissement dépend de la consistance du béton ainsi que de la façon dont a été mis en place le béton dans le moule. La mise en place du béton est normalisée de façon à être constante.

Ainsi l'importance de l'affaissement ne dépend plus que de la consistance du béton. La mesure en cm de la hauteur d'affaissement peut donc être liée à la consistance du béton. L'échelle de mesure et de grandeur est ainsi créée.



Figure 6 : Cône d'Abrams

❖ Procédure d'essai avec le cône d'Abrams [3]

- i. Le cône légèrement huilé, est rempli de béton en trois couches.
- ii. Chaque couche est piquée par 25 coups de façon répartie jusqu'à la couche sous-jacente s'il y a lieu.
- iii. Le cône est arasé en faisant rouler la tige de piquage.
- iv. Le cône de béton est démoulé, le béton s'affaisse selon sa consistance.
- v. L'affaissement du béton est mesuré en cm à l'aide de la règle sur portique. Cet affaissement est la hauteur entre le haut du cône et le point le plus haut du béton affaissé



1



2



3



4



5

❖ Ajustement du dosage en eau

La mesure de l'affaissement permet de vérifier si l'ouvrabilité du béton est conforme à l'ouvrabilité souhaitée. Le dosage en eau du béton peut être donc ajusté selon le résultat de l'essai.

Le dosage en eau est diminué pour un affaissement trop fort. Ce dosage est majoré pour un affaissement trop faible.

➤ Caractéristiques principales du béton durcissant.

La caractéristique essentielle du béton durci est la résistance mécanique en compression à une période donnée (7 et 28 jours). Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages.

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, le béton se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations

importantes et, d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible par rapport à sa résistance à la compression. On se préoccupe assez peu de sa durabilité, de son imperméabilité.

Très souvent un béton de résistances mécaniques élevées est durable (bien que l'on puisse confectionner avec un ciment très performant un béton sous-dosé, peu étanche, de durabilité limitée) mais possédant cependant les résistances en compression exigées.

On verra que la résistance du béton dépend d'un grand nombre de paramètres :

- le type et le dosage des matériaux utilisés
- le degré et la condition de réalisation etc.

Par ailleurs, la résistance du béton est fonction d'une quantité de facteurs autres que la classe de ciment et qui sont à contrôler et à surveiller dès le choix de la qualité des granulats et tout au long de la chaîne de bétonnage.

La résistance d'un béton est une notion toute relative et elle dépend de la méthode d'essai utilisée (comprenant la forme des éprouvettes).

4.2 *Résistance*

L'identification de la résistance à la compression du béton peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes.

Ces dernières sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

➤ **Rectification des extrémités des éprouvettes**

Conformément à la norme, l'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées.

En effet, si les éprouvettes étaient placées telles quelles sur les plateaux de la presse, on ne serait pas assuré de la planéité des surfaces au contact et de leur perpendicularité aux génératrices de l'éprouvette.

La rectification consiste donc à rendre ces surfaces planes et perpendiculaires aux génératrices de l'éprouvette. Pour parvenir à ce résultat deux méthodes peuvent être employées :

- le surfaçage au soufre.
- la rectification par usinage des extrémités.

Le surfaçage au soufre consiste à munir chaque extrémité de l'éprouvette d'une galette à base de soufre respectant les deux exigences : planéité et perpendicularité aux génératrices.

La planéité est assurée de la façon suivante : le mélange soufre, porté à une température de $125^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, est liquéfié et versé sur une platine dont le fond a été rectifié (voir figure 7).

La perpendicularité est obtenue grâce à un dispositif de guidage qui maintient les génératrices de l'éprouvette perpendiculaires au fond rectifié du moule.

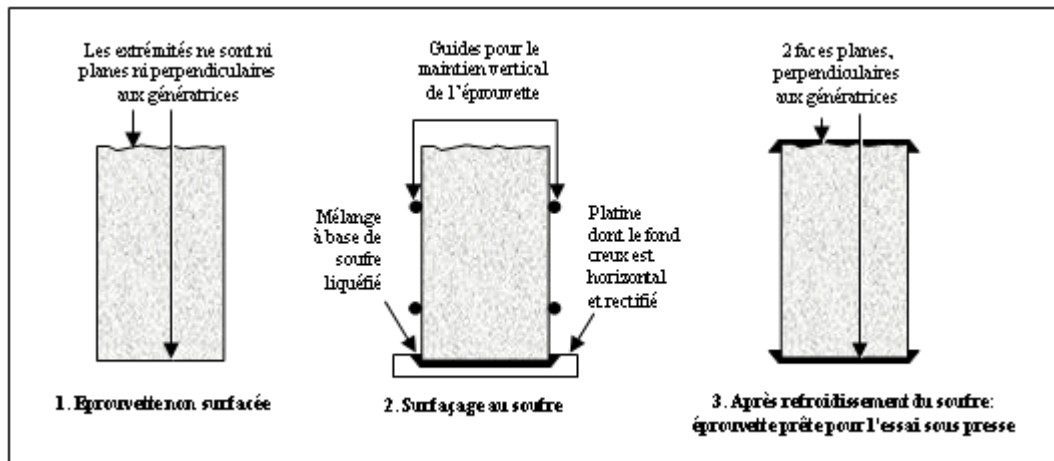


Figure 7 : Principe du surfaçage au soufre

L'éprouvette maintenue par le dispositif de guidage est descendue sur le soufre liquéfié. Quand, après refroidissement, le soufre s'est solidifié, l'éprouvette (à laquelle adhère alors la galette de soufre) est désolidarisée de la platine et procédé au surfaçage de la deuxième extrémité.

➤ Conduite de l'essai de rupture[4]

L'éprouvette, une fois rectifiée, doit être centrée sur la presse d'essai, comme il est indiqué sur la figure 8.

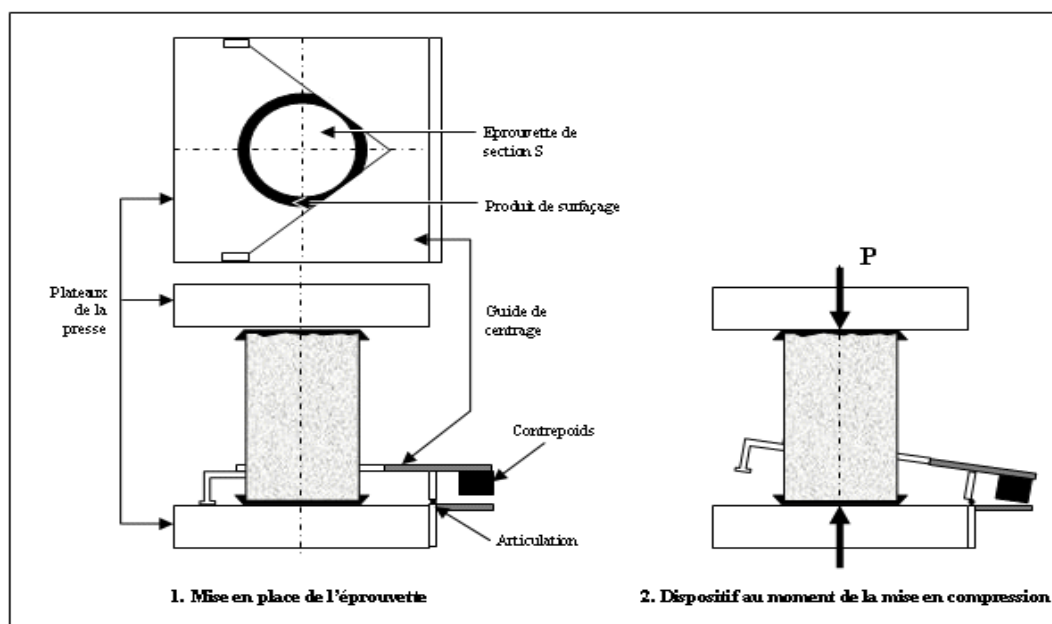


Figure 8: dispositif de centrage de l'éprouvette sur la presse

○ Influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés des bétons

Les caractéristiques des granulats ont une grande influence sur celles des bétons, soit une influence directe sur le rapport Eau/Ciment (qui est égale à 0.5) nécessaire pour obtenir la maniabilité voulue, avec toutes les conséquences qui en résultent sur la résistance et la durabilité.

Pour réduire les coûts, on cherche autant que possible, à utiliser les granulats disponibles localement, dans quelques cas, cependant, le choix peut être orienté par le ou les objectifs techniques comme la maniabilité, les résistances, la durabilité....

○ **Influence des matériaux fins sur les propriétés du béton**

Les matériaux fins confèrent au béton frais un pouvoir de rétention d'eau qui permet de s'opposer au ressuage et une cohésion qui assure le maintien de l'homogénéité (absence de ségrégation). Leur excès devient défavorable car il accroît la demande d'eau, donc le rapport E/C, leur absence ne permet pas d'obtenir un béton suffisamment compact et réduit les résistances mécaniques.

L'argile est le matériau fin le plus nocive pour le béton. il peut être présent sous forme d'une pellicule enveloppant les granulats et interférer dans leur liaison avec la pâte de ciment. La nocivité de l'argile est attribuée aussi à sa finesse, ses propriétés de surface et son affinité pour l'eau.

Deux autres matériaux fins peuvent exister dans les granulats : le silt et la poussière de concassage.

Le silt est matériau de 2 à 60 micromètres, réduit à cette taille par des processus météorologique naturel. Par ailleurs, les poussières de concassage sont des matériaux fins formés durant le processus de réduction de la roche en une pierre concassé.

les silts et les poussières fines peuvent soit, enrobe les granulats de la même manière que le fait l'argile, soit existe sous forme d'élément libre non adhérents aux granulats grossières, même lorsqu'ils sont sous cette dernière forme, ces derniers ne doivent pas être présents en quantité excessive, car leur finesse et donc leur grandeur de surface spécifiques augmente la quantité d'eau nécessaire à l'humidification de tous les grains du mélanges.

Chapitre

IV

Amélioration du comportement du ciment dans le béton

Les étapes de concassage, broyage, homogénéisation, et cuisson de cru (mélange des matières premières à la température environ 1400°C), nous donne le produit semi fini dit « clinker » qui est l'origine des caractéristiques hydrauliques du ciment.

Le ciment est le « produit fini » qui résulte du broyage du clinker et les ajouts (gypse, pouzzolane, calcaire, cendres volants), bien que le ciment dont les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques répondent à la norme en vigueur, devrait être une assurance pour l'obtention d'un béton de bonne qualité.

Pour HOLCIM-MAROC, le produit fini est désormais le béton est non le ciment.

Depuis plusieurs années, les laboratoires d'HOLCIM renforcent les contrôles du béton issu de leur propre ciment tel que, la préparation des moules du béton dans le laboratoire ciment. Cette dernière opération nécessite des moyens allant jusqu'à la création d'un laboratoire béton avec un laboratoire ciment, toutefois, la réalisation des ces essais ne reste pas sans inconvénient tel que principalement l'irrégularité des granulats.

Afin d'optimiser les moyens matériels et humains et standardiser les essais qui anticipent le comportement du ciment dans le béton, le laboratoire de la cimenterie de FES s'est doté d'un équipement dit « **cône HOLCIM** » dont les résultats devraient nous donner des indications fiables sur la maniabilité du béton (slump) et les caractéristiques physiques de la résistance. Notre travail se limitera donc à la réalisation des essais sur le cône HOLCIM, afin de faire des corrélations (avec les mêmes ciments) entre les essais du laboratoire ciment et ceux du laboratoire béton.

I. Cône HOLCIM

Au cours des années 1980 -1990, les études relatives aux bétons a hautes performances ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau par emploi d'agents réducteurs et par correction de l'empilement granulaire via les ultrafines a conduit aux gains de résistance et de durabilité que l'on connaît aujourd'hui (Okamura et Ouchi 1999).

En prolongement de ces travaux scientifiques, l'amélioration constatée de l'ouvrabilité de ces nouveaux bétons a conduit les chercheurs à développer et à fiabiliser cette propriété. Ce qui nous a dirigé de réaliser cette analyse pour une corrélation entre les ciments fabriquer en société et mélanger dans les chantiers pour les ouvrages de constructions des bâtiments.

La réalisation de cet étude nécessite un ensemble de matériels pour la préparation de la pate du cône HOLCIM, en générale, ce matériel est utilisé dans les analyses quotidienne au sein de notre laboratoire.



Cône HOLCIM



Malaxeur



Table à choc



Moule tronconique

- **Le cône HOLCIM:** c'est un appareillage qui se compose de 4 éléments et qui sert à déterminer le comportement du ciment dans le béton.

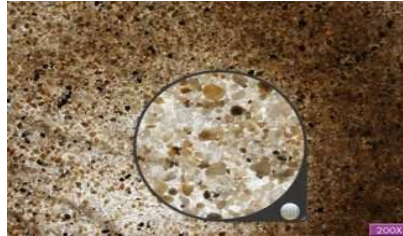
Il se compose de :

- un moule tronconique sans fond de 15 cm de haut, de 10 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 5 cm de diamètre en sa partie supérieure;
 - une plaque en verre,
 - une tige de piquage,
 - un portique de mesure.
- **Malaxeur** : sert à réaliser un mélange bien homogénéiser dit : « mortier ».
 - **Moule tronconique** : sert à remplir la pate préparée dans le malaxeur.
 - **Table à choc** : sert à assurer l'étalement de la pate dans le moule.

○ **Mode opératoire de l'utilisation du cône d'HOLCIM**

- La quantité d'eau, ciment et **le sable normalisé** requis pour préparer le mortier est calculée en respectant la norme (Eau/Ciment = 0,5).
- l'eau ajoutée est mélangée avec l'adjuvant (**la norme indique que l'adjuvant représente 0,4% du ciment**).
- Mettre le ciment et l'eau dans le récipient du malaxeur et mélanger.
- Cesser de mélanger pendant une minute afin de nettoyer avec la spatule le ciment collé sur les parois du récipient.
- **Mélanger le ciment + (eau + adjuvant) à la vitesse appropriée tous en ajoutant le sable.**
- Mesurer la température du mortier.
- Mesurer l'écoulement de récession avec le cône de HOLCIM à 10 minutes du gâchage initiale. (Bien remplir le cône en tassant 15 fois à l'aide d'un marteaux en caoutchoucs).
- Le reste du mortier est remis dans un sac en plastique pendant 45 minutes.
- Après ces 45 minutes mélanger le mortier à la vitesse appropriée et répéter l'écoulement de récession à 45 minutes du gâchage initial en prenant la température du mortier.
- la pate préparé est mise immédiatement dans le moule tronconique, ce dernier est ramené vers la table à choc pour bien étaler la pate (tout en arasant la surface au moyen d'une truelle prenant appui sur le bord du moule, perpendiculaire à la surface et déplacée d'un mouvement de scie de faible amplitude).

- Après le séchage de la pâte, les briques obtenues sont déplacé vers un bassin d'eau où elles vont rester 28 jours pour la mesure de la résistance voulue.
- ✓ **Le sable utilisé est un sable normalisé, certifié conforme EN 196-1 - ISO, conforme ISO 679 : 2009**



a. Caractéristiques du sable normalisé

Le sable normalisé (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

b. Contrôle

La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences de la norme.

Ouverture des mailles du tamis (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

Tableau 5 : la granulométrie du sable Normalisé

Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d'humidité et des contrôles de résistances mécaniques, selon les exigences des normes EN 196-1 et ISO 679 : 2009 .

c. Utilisation dans le Contrôle de la résistance mécanique

Le sable normalisé est utilisé pour le contrôle de la résistance mécanique des ciments et autres liants hydrauliques.

Le choix du sable normalisé dans cet expérience vient pour remplacer les granulats existants dans le béton réel, dans notre cas on a travaillé sur la portion fine du béton qui est inférieur à 5mm.

Le sable normalisé sera le meilleur choix à cause de sa stabilité dans ses caractéristiques chimiques et physiques et aussi pour standardiser l'expérience dans le but d'avoir le seul variable étudier «**le ciment**».

- **L'adjuvant** : utilisé dans notre étude est dont la formulation spécifique permet une action défloculante très marquée en particulier sur les éléments fins du béton, il permet aussi l'optimisation du dosage en ciment pour l'obtention d'une classe de résistance déterminée

A plasticité égale, après réduction de l'eau de gâchage, on constate :

- Une amélioration de la compacité du béton
- Une diminution de l'absorption capillaire
- Une augmentation relative des performances mécaniques

Il possède des propriétés hydrofuges et peut ainsi être employé pour diminuer l'absorption d'humidité dans le béton et peut être appliqué dans :

- Tous les types de ciments,
- Les bétons prêts à l'emploi pour le maintien de la rhéologie,
- La préfabrication lourde,
- Les bétons précontraints et bétons pompés,
- Les bétons armés en générale.

L'expérience du cône HOLCIM a été effectuée sur 60 échantillons du ciment portland (CPJ 55), dans des conditions ambiante (**T = 20°C, % humidité > 90%**), elle nous donne :

- La détermination du slump.
- La température du mortier à 10 min et à 45 min.
- La résistance à 7 et 28 jours.

II. Interprétations des résultats

N° Echantillons	Résistances à 28 jours H.C (MPa)	Résistances à 28 jours du béton(MPa)	N° Echantillons	Résistances à 28 jours H.C (MPa)	Résistances à 28 jours du béton(MPa)
1	58,75	34,6	40	52,82	36,9
2	54,56	35,6	41	55,05	35,4
3	58,51	36,8	42	53,88	36,7
4	54,40	36,7	43	55,63	35,7
5	54,76	37,2	45	52,50	36,9
6	55,75	36,1	46	54,28	35,7
7	53,63	35,1	45	53,73	36,1
8	52,80	36,9	47	54,00	36,4
9	55,03	35,4	48	53,90	37,2
10	53,86	36,7	49	56,62	35,1
11	55,61	35,7	50	54,54	36,1
12	52,48	36,9	51	53,24	36,7
13	54,26	35,7	52	52,98	35,7
14	53,71	36,1	53	53,12	35,1
15	53,98	36,4	54	53,22	37,1
16	53,88	37,2	55	54,62	34,8
17	56,60	35,1	56	53,12	35,1
18	54,52	36,1	57	53,22	37,1
19	53,22	36,7	58	54,62	34,8
20	52,96	35,7	59	53,82	36,8
21	53,10	35,1	60	54,42	36,9
22	53,20	37,1	moy	54	36
23	54,60	34,8	mini	52,48	34,6
24	53,80	36,8	maxi	58,75	37,22
25	54,40	36,9			
26	53,80	37,0			
27	53,00	36,8			
28	55,33	35,6			
29	53,92	36,7			
30	55,70	35,7			
31	52,64	36,9			
32	54,56	35,9			
33	58,75	34,6			
34	54,58	35,6			
35	58,53	36,8			
36	54,42	36,7			
37	54,78	37,2			
8	55,77	36,1			
39	53,65	35,1			

Tableau 6 : les résistances à 28 jours du H.C et les résistances à 28 jours du béton

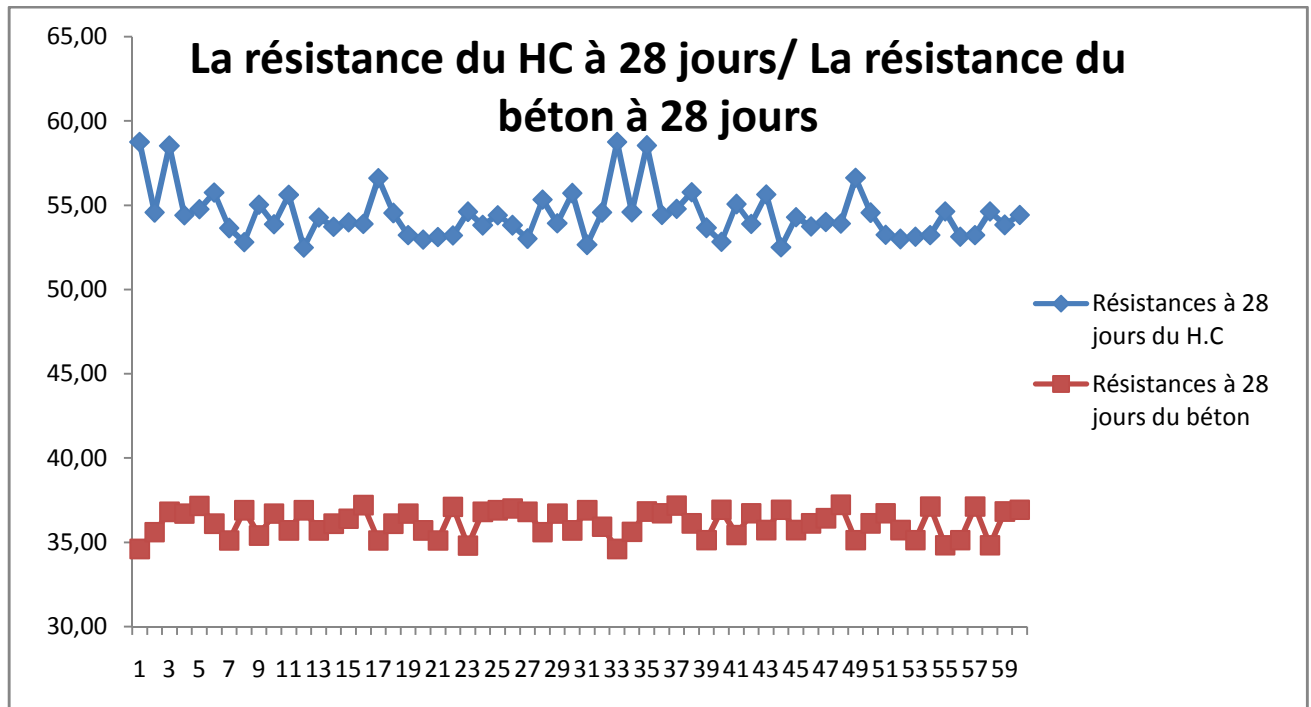


Figure8 : la résistance à 28 jours du H.C / la résistance à 28 jours du béton

D'après le graphe précédent, on observe que les résistances du cône HOLCIM varient dans le même sens que les résistances du béton.

Pour avoir plus d'information sur la relation entre ces deux paramètres on a établi le rapport résistances de cône HOLCIM à 28 jours / résistances du béton à 28 jours.

N° Echantillons	Resistances à 28 jours (H.C / Béton)	N° Echantillons	Resistances à 28 jours (H.C / Béton)
1	1,52	35	1,59
2	1,48	36	1,48
3	1,47	37	1,47
4	1,52	38	1,54
5	1,53	39	1,53
6	1,49	40	1,43
7	1,51	41	1,55
8	1,48	42	1,47
9	1,50	43	1,56
10	1,49	45	1,42
11	1,50	46	1,52
12	1,49	45	1,49
13	1,50	47	1,48
14	1,51	48	1,45
15	1,48	49	1,61

16	1,49	50	1,51
17	1,51	51	1,45
18	1,49	52	1,48
19	1,49	53	1,51
20	1,51	54	1,43
21	1,53	55	1,57
22	1,52	56	1,51
23	1,52	57	1,43
24	1,47	58	1,57
25	1,47	59	1,46
26	1,53	60	1,47
27	1,48	moy	1,50
28	1,49	mini	1,42
29	1,52	maxi	1,70
30	1,49		
31	1,51		
32	1,52		
33	1,70		
34	1,53		

Tableau 7 : le rapport des résistances à 28 jours du cône HOLCIM et du béton

Le rapport moyen est de **1,50**. Ceci dit que si la résistance déterminée sur cône HOLCIM est par exemple de X MPa : La résistance sur béton résultante de ce même ciment et de Y d'où :

$$X/1,50=Y$$

Si Y est très inférieur à la valeur nominale: il faut revoir la qualité du ciment. (la valeur limite de Y égale à 27MPa ; la valeur nominale de Y égale à 30 MPa).

Si Y est très supérieur a la valeur nominale : notre ciment est dis de sur qualité il faut l'optimiser,

C'est donc une base qui va nous permettre d'anticiper les résultats sur le béton et optimiser la qualité du ciment. Ce qu'on a essayer de faire c'est de créer une base qui va nous servir à tirer d'autre résultats, d'après ce rapport, on peut anticiper les résistances du béton sans effectuer l'analyse de la compression, par conséquent , on pourra mieux maîtriser notre ciment (même après son expédition) car on sera capable d'avoir les résultats lors de la fabrication du ciment, d'où les actions correctives afin d'avoir des résultats fiables dans le but d'amélioration sur l'exploitation.

N° Echantillons	Résistances à 28 jours H.C (MPa)	Résistances à 28 jours Norme Marocaine (MPa)	N° Echantillons	Résistances à 28 jours H.C (MPa)	Résistances à 28 jours Norme Marocaine (MPa)
1	58,75	50,60	40	52,82	50,13
2	54,56	50,00	41	55,05	50,93
3	58,51	53,50	42	53,88	51,63
4	54,40	50,60	43	55,63	52,33
5	54,76	50,80	45	52,50	50,23
6	55,75	53,90	46	54,28	51,43
7	53,63	50,90	45	53,73	53,23
8	52,80	50,10	47	54,00	50,13
9	55,03	50,90	48	53,90	51,73
10	53,86	51,60	49	56,62	52,53
11	55,61	52,30	50	54,54	51,03
12	52,48	50,20	51	53,24	51,04
13	54,26	51,40	52	52,98	51,23
14	53,71	53,20	53	53,12	50,83
15	53,98	50,10	54	53,22	51,43
16	53,88	51,70	55	54,62	52,43
17	56,60	52,50	56	53,12	50,83
18	54,52	51,00	57	53,22	51,43
19	53,22	51,01	58	54,62	52,43
20	52,96	51,20	59	53,82	51,53
21	53,10	50,80	60	54,42	50,13
22	53,20	51,40	moy	54	51
23	54,60	52,40	mini	52,48	50
24	53,80	51,50	maxi	58,75	53,93
25	54,40	50,10			
26	53,80	51,10			
27	53,00	51,10			
28	55,33	50,99			
29	53,92	51,82			
30	55,70	52,66			
31	52,64	50,30			
32	54,56	51,74			
33	58,75	50,60			
34	54,58	50,03			
35	58,53	53,53			
36	54,42	50,63			
37	54,78	50,83			
38	55,77	53,93			
39	53,65	50,93			

Tableau 8 : Résistance à 28 jours du cône HOLCIM et de la Norme Marocaine

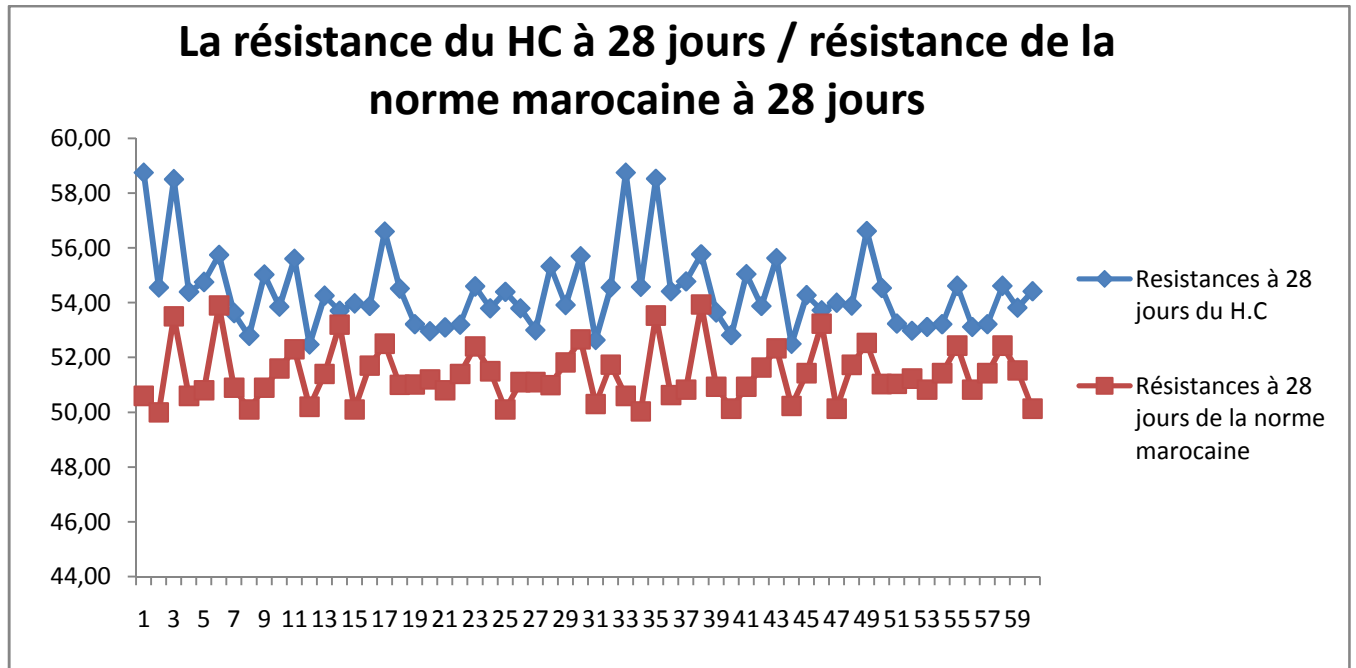


Figure9 : la résistance à 28 jours du H.C / la résistance à 28 jours de la Norme Marocaine

Ce graphe permet de nous s’assurer que les résistances du cône HOLCIM dans tous les échantillons sont supérieures à celles déclarées par la norme marocaine en ce qui concerne les résistances de ciments.

**NB : Cône HOLCIM (ciment+eau+adjuvant+sable normalisé)
Norme Marocaine (ciment+eau+adjuvant+granulats)**

Pour éclaircir ceci, on a établie le **rapport résistances de cône HOLCIM à 28 jours / résistances de la norme marocaine à 28 jours.**

N° Echantillons	Résistances à 28 jours (H.C / NM)	N° Echantillons	Résistances à 28 jours (H.C / NM)	N° Echantillons	Résistances à 28 jours (H.C / NM)
1	1,04	26	1,08	50	1,07
2	1,05	27	1,06	51	1,04
3	1,01	28	1,04	52	1,03
4	1,10	29	1,07	53	1,05
5	1,12	30	1,01	54	1,03
6	1,00	31	1,11	55	1,07
7	1,04	32	1,05	56	1,05
8	1,09	33	1,16	57	1,03

9	1,04	34	1,09	58	1,04
10	1,06	35	1,09	59	1,06
11	1,03	36	1,07	60	1,06
12	1,10	37	1,08	moy	1,06
13	1,04	38	1,03	mini	1,00
14	1,03	39	1,05	maxi	1,16
15	1,07	40	1,05		
16	1,07	41	1,08		
17	1,01	42	1,04		
18	1,06	43	1,06		
19	1,07	45	1,05		
20	1,05	46	1,06		
21	1,06	45	1,01		
22	1,10	47	1,08		
23	1,03	48	1,04		
24	1,07	49	1,08		

Tableau 9 : le rapport des résistances à 28 jours du cône HOLCIM et de la Norme Marocaine

Le rapport moyen est de **1,06** ; donc on a défini un autre moyen de contrôler et confirmer les valeurs déclarées des essais selon la norme en vigueur, par la relation :

$$Y=X/1,06 \quad (\text{avec } Y=\text{Résistance du H.C et } X=\text{Résistance de la Norme Marocaine})$$

C'est aussi un moyen qui nous permet de s'informer sur la qualité du ciment car si dans le cas où la résistance du cône HOLCIM est inférieure à la résistance de la norme en vigueur donc on aura une anomalie provenant du ciment car c'est la seul constituant qui varie, il faudra revoir et s'assurer de sa qualité avant de l'utiliser.

N° Echantillons	Température à 10 min (°C)	Température à 45 min (°C)	Résistances à 7 jours du béton (Mpa)	N° Echantillons	Température à 10 min (°C)	Température à 45 min (°C)	Résistances à 7 jours du béton (Mpa)
1	23,0	22,5	25,6	33	23,1	22,5	25,6
2	24,0	22,5	24,9	34	24,1	22,7	24,9
3	20,5	20,0	26,3	35	20,6	20,2	26,3
4	21,0	19,0	25,8	36	21,2	19,2	25,8
5	20,0	19,8	28,1	37	20,1	20,0	28,1
6	22,5	21,0	25,1	38	22,6	21,2	25,1
7	21,0	20,0	24,1	39	21,2	20,2	24,1
8	21,1	20,8	26,8	40	21,2	21,0	26,8
9	21,9	21,2	25,5	41	22,0	21,4	25,5
10	22,0	21,3	26,7	42	22,2	21,5	26,7
11	22,2	21,5	25,7	43	22,4	21,7	25,7
12	22,0	21,8	27,1	45	22,1	22,0	27,1
13	21,5	21,3	25,4	46	21,6	21,5	25,4
14	20,4	20,1	26,7	45	20,7	20,3	26,7
15	23,5	22,8	25,9	47	23,7	23,0	25,9
16	23,4	22,6	27,9	48	23,5	22,8	27,9
17	22,8	22,0	23,7	49	22,9	22,2	23,7
18	22,5	23,4	24,3	50	22,6	23,6	24,3
19	20,0	23,0	25,1	51	20,2	23,2	25,1
20	23,2	23,0	23,5	52	23,3	23,2	23,5
21	24,2	23,8	24,1	53	24,4	24,0	24,1
22	23,0	23,5	27,5	54	23,2	23,7	27,6
23	23,5	24,0	23,9	55	23,6	24,2	23,9
24	24,2	24,5	24,8	56	24,3	24,0	24,1
25	25,0	25,5	25,1	57	23,2	23,7	27,6
26	27,0	25,8	26,7	58	23,6	24,2	23,9
27	21,3	20,9	27,1	59	24,3	24,7	24,8
28	22,0	21,3	25,7	60	25,2	25,7	25,1
29	22,1	21,2	26,9	moy	23	22	26
30	22,3	21,8	25,8	mini	20	19	23,47
31	22,2	21,9	27,3	maxi	27	25,8	28,13
32	21,7	21,6	25,6				

Tableau 10 : Les températures à 10 min et à 45 min du cône HOLCIM à 28 jours et les résistances du béton à 7 jours.

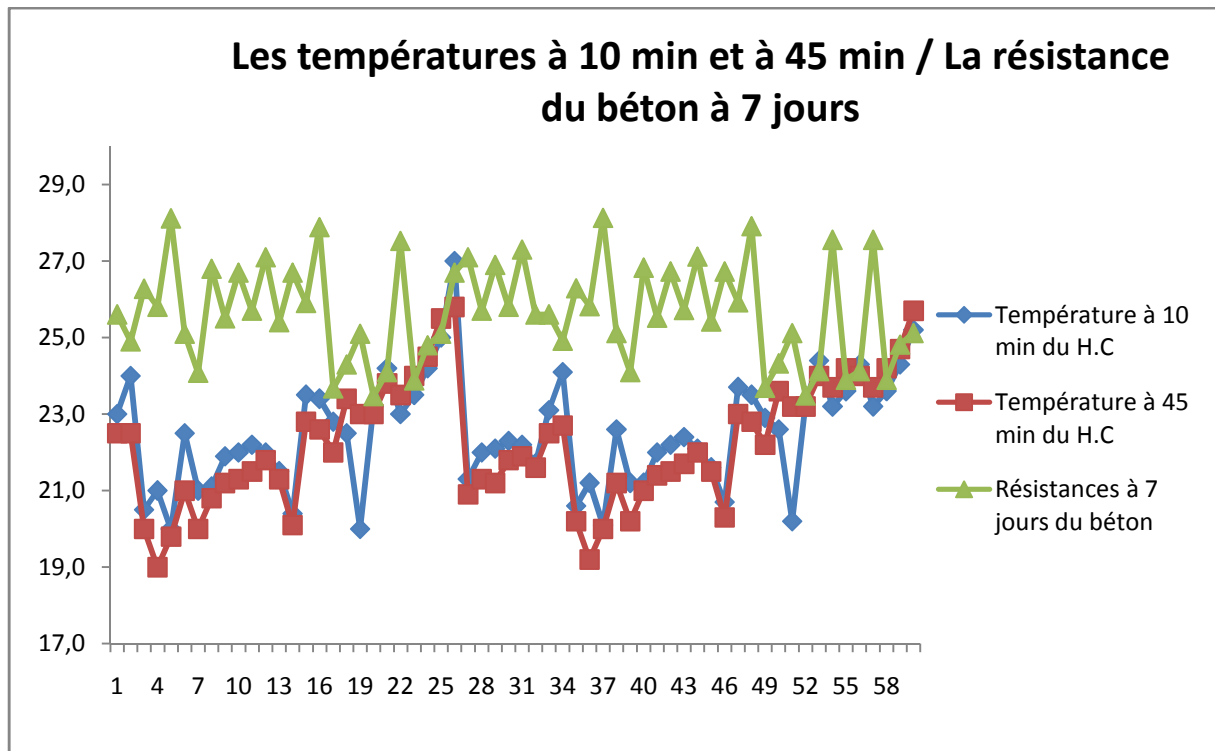


Figure 10 : les températures à 10 min et à 45 min / la résistance à 7 jours du béton

D'après le tableau on constate que : **en moyen la température du béton a baissé de 1°C en passant de 10 à 45 min ce qui ne devrait pas avoir un effet sur les caractéristiques du béton.**

Le choix des températures 10 min et 45 min :

10 min= le temps nécessaire pour mettre en contact le gâchage et le malaxage du ciment et du sable normalisé.

45min= le temps moyen pour livrer le béton (le temps de séjour dans la toupie).

D'après la figure précédente, on constate que : Généralement, les températures à 10 min sont supérieures aux températures à 45 min, c'est due à la réaction instantané du ciment en présence de l'eau qui est accompagné par une libération d'une chaleur appelé : « **chaleur d'hydratation** ».

Chaleur d'hydratation : chaleur dégagé lors de l'hydratation des différentes phases cimentiers.

Le phénomène qui est mis en jeu dans le cas du contact du ciment avec l'eau est l'hydratation :

On peut dire que les résistances du béton ne sont pas influencées à long terme (28 jours) mais, par l'effet de la chaleur d'hydratation provenant du ciment, on peut avoir son impact sur les résistances à court terme (7jours).

N° Echantillons	Slump à 10 min du H.C (cm)	Slump à 45 min du H.C (cm)	Slump du béton (cm)	N° Echantillons	Slump à 10 min du H.C (cm)	Slump à 45 min du H.C (cm)	Slump du béton (cm)
1	21,5	19,0	14	41	18,7	16,5	10,52
2	21,3	18,8	14	42	20,5	17,7	11,52
3	19,1	15,3	10,5	43	19,0	15,2	11,02
4	24,8	22,5	17	45	18,2	15,5	10,02
5	24,0	20,0	15,5	46	18,3	15,0	11,02
6	23,2	17,4	13,5	45	23,0	21,0	15,02
7	20,5	18,8	13	47	21,2	19,0	14,52
8	22,0	18,8	14	48	22,2	18,8	14,02
9	18,5	16,3	10,5	49	26,7	23,2	19,02
10	20,3	17,5	11,5	50	21,2	18,2	16,02
11	18,8	15,0	11	51	21,1	17,0	12,52
12	18,0	15,3	10	52	23,0	16,7	13,02
13	18,1	14,8	11	53	19,2	16,5	12,52
14	22,8	20,8	15	54	20,5	16,5	13,02
15	21,0	18,8	14,5	55	16,7	16,0	10,02
16	22,0	18,6	14	56	19,2	16,5	12,52
17	26,5	23,0	19	57	20,6	16,5	13,02
18	21,0	18,0	16	58	16,7	16,0	10,02
19	20,9	16,8	12,5	59	20,6	16,0	11,02
20	22,8	16,5	13	60	20,4	16,7	10,52
21	19,0	16,3	12,5	moy	21	18	13
22	20,3	16,3	13	mini	15,4	14,5	10
23	16,5	15,8	10	maxi	26,7	23,2	19,02
24	20,4	15,8	11				
25	20,2	16,5	10,5				
26	15,4	14,5	10				
27	22,2	19,0	15				
28	18,6	16,5	10,6				
29	22,3	17,9	11,7				
30	18,9	15,2	11,2				
31	18,2	15,6	10,3				
32	18,4	15,1	11,3				
33	21,5	19,0	14				
34	21,3	19,0	14,02				
35	19,3	15,5	10,52				
36	24,9	22,7	17,02				
37	24,2	20,2	15,52				
38	23,2	17,6	13,52				
39	20,7	19,0	13,02				
40	22,2	19,0	14,02				

Tableau 11 : Le slump à 10 min et à 45 min du cône HOLCIM à 28 jours et le slump du béton

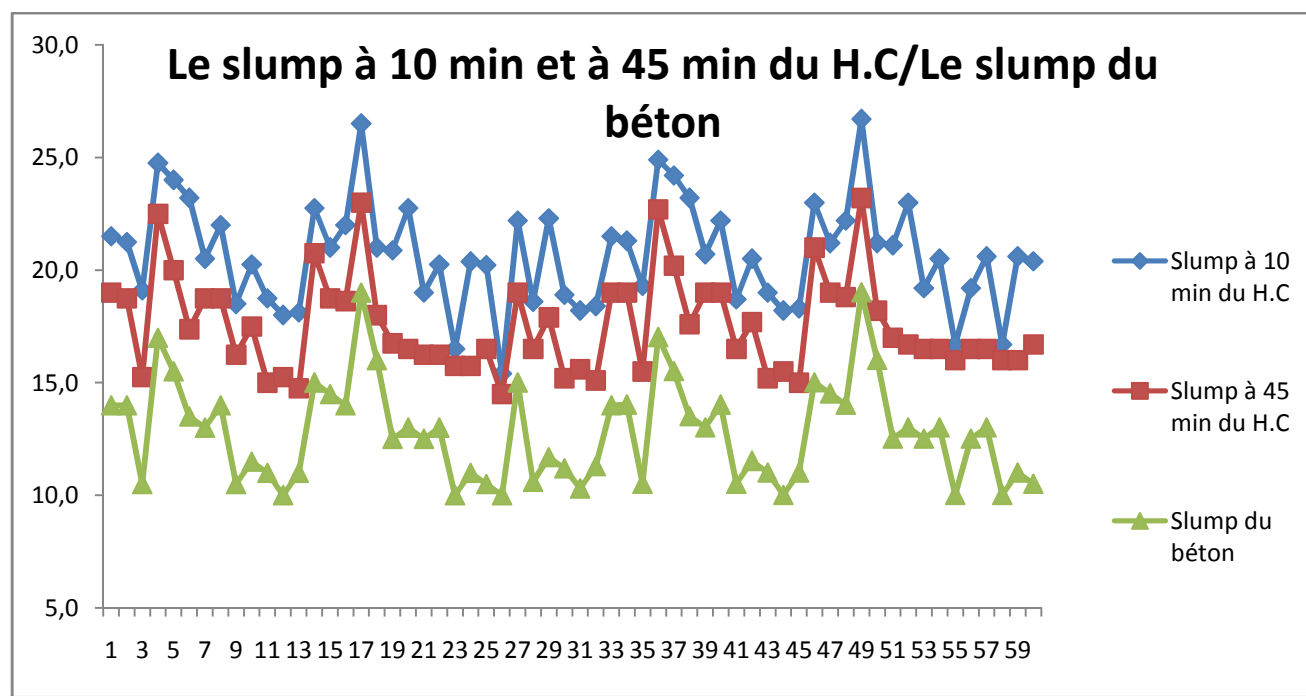


Figure 11 : le slump à 10 min et à 45 min du H.C / le slump du béton

A partir du tableau, la température à 10 min et 45 min, le slump est passé de 21 à 18 cm, soit une baisse de 3 cm si on se réfère au slump de 45 min.

Ceci dit que pour avoir un slump du béton de 13 cm par exemple, il faut viser un slump de 18 cm dans le cône HOLCIM et si le slump du cône HOLCIM dépasse de loin 18 cm, il faut s'attendre à un slump béton qui dépasse 13 cm.

Si cette situation persiste, le laboratoire béton est avisé pour en tenir compte pour la formulation du béton, principalement :

- Baissé la quantité d'eau ajouté,
- Ou d'autre essai sont à envisager sur d'autres adjuvants, le laboratoire béton est avisé pour **changement d'adjuvant**.

D'après la figure ci-dessus, on constate que le slump à 10 min et 45min varie dans le même sens pour tous les échantillons, et de même pour le slump du béton, lorsque le slump du cône HOLCIM augmente, il augmente aussi dans le béton, et c'est normal car on a travaillé avec les mêmes ciments et dans les mêmes conditions de travail.

L'augmentation ou la diminution du slump est dû à plusieurs raisons, notamment en fonction d'un certain nombre de paramètre :

- La demande en eau,
- La surface spécifique de Blaine (la finesse du broyabilité de ciment),
- La concentration des oxydes alcalins.

Ceci veut dire qu'un défaut sur la valeur du slump devrait être redressé en agissant sur l'un ou les paramètres ci-dessous.

Faible slump : Dans ce cas le ciment va durcir très rapidement le béton ne sera pas maniable donc le temps de prise sera rapide, ceci résulte d'un défaut dans la préparation du ciment (rapide prise).

Rapide prise veut dire que le taux de gypse est sous-estimé car la quantité ajoutée au ciment était insuffisante, ce qui a influencé le temps de prise.

Dans le cas contraire ou *le slump est très élevé*, on aura une diminution de temps de prise si ce ciment est livré au béton, le dosage de l'eau de gâchage va augmenter et donc la chute des résistances, par conséquent le prix du mètre cube du béton va s'élever.

L'origine de ce défaut peut être :

- Défaut du doseur,
- Mauvaise qualité du gypse,
- Colmatage du gypse lors de son entrainement dans le broyeur.

III. Interprétation statistique

1 Rappel statistique : (voir Annexe)

2 Application sur les résultats obtenus:

L'objectif est de chercher un modèle qui peut expliquer les résistances du béton à 28 jours par les résistances du cône HOLCIM à 28 jours.

Après l'obtention des résultats la première chose effectuée c'est de s'assurer que toutes les séries de mesures suivent **une loi normale**, puis on va déterminer **le coefficient de corrélation** qui va nous servir pour effectuer les tests et de s'assurer de la corrélation des résultats. Avec n =nombre d'échantillons et K =nombre de répétition (dans notre cas $n=3$, $K=3$).

Tableau des résultats :

N° Echantillons	Les répétitions des Résistances à 28 jours béton(MPa)			Résistances moyennes à 28 jours du béton (MPa)Yi	Résistances à 28 jours du cône HOLCIM (MPa) Xi
	Répétition 1	Répétition 2	Répétition 3		
1	34,99	35,01	34	34,7	58,75
2	35,15	36,67	35,11	35,6	54,56
3	36,49	36,9	37,01	36,8	58,51
4	37,79	36,88	35,56	36,74	54,40
5	37,95	37,54	36,12	37,20	54,76
6	36,25	36,08	36	36,11	55,75
7	34,4	35,54	35,43	35,12	53,63
8	38,6	35,87	36,36	36,94	52,80
9	35,61	34,63	35,6	35,28	55,03
10	35,88	36,91	37,3	36,70	53,86
11	36,2	35,17	35,73	35,70	55,61
12	37,6	36,87	36,36	36,94	52,48
13	35,98	35,52	35,75	35,75	54,26
14	36,25	36,08	36	36,11	53,71
15	36,69	36,56	36,21	36,49	53,98
16	36,95	37,54	37,22	37,24	53,88
17	36,75	36,83	37,87	37,15	56,60
18	36	36,05	36,43	36,16	54,52
19	37,1	36,6	36,39	36,70	53,22
20	35,61	35,93	35,6	35,71	52,96
21	35,03	35,31	35,06	35,13	53,10
22	36,29	37,8	37,25	37,11	53,20
23	34,53	34,94	34,96	34,81	54,60
24	36,48	37,22	36,75	36,82	53,80
25	37,43	36,79	36,57	36,93	54,40
26	36,21	37,23	37,6	37,01	53,80
27	36,8	36,81	36,78	36,80	53,00
28	35,89	35,14	35,95	35,66	55,33
29	36,73	36,94	36,46	36,71	53,92
30	35,48	35,3	36,31	35,70	55,70
31	36,83	37,79	36,17	36,93	52,64

➤ Le test de Shapiro et Wilk est appliqué sur les résistances du cône HOLCIM, sur les répétitions des résistances du béton on obtient :

Résistance cône HOLCIM

Statistique Calculée W	Loi Normale	Confiance %	Risque (alpha)%
0,9457	Conforme	85,7448	14,2552

La distribution statistique n'est pas significativement différente d'une loi normale.

Répétition 1 des résistances du béton

Statistique Calculée W	Loi Normale	Confiance %	Risque (alpha)%
0,9862	Conforme	4,4102	95,5898

La distribution statistique n'est pas significativement différente d'une loi normale

Répétition 2 des résistances du béton :

Statistique Calculée W	Loi Normale	Confiance %	Risque (alpha)%
0,9433	Conforme	87,7631	12,2369

La distribution statistique n'est pas significativement différente d'une loi normale

Répétition 3 des résistances du béton :

Statistique Calculée W	Loi Normale	Confiance %	Risque (alpha)%
0,9433	Conforme	87,7631	12,2369

La distribution statistique n'est pas significativement différente d'une loi normale

La prochaine étape consiste à observer les données pour déterminer s'il est raisonnable d'établir un lien linéaire entre les variables, de calculer le coefficient de corrélation et d'effectuer le test de corrélation pour voir si les valeurs sont indépendantes. (présenté dans la figure ci-dessus)

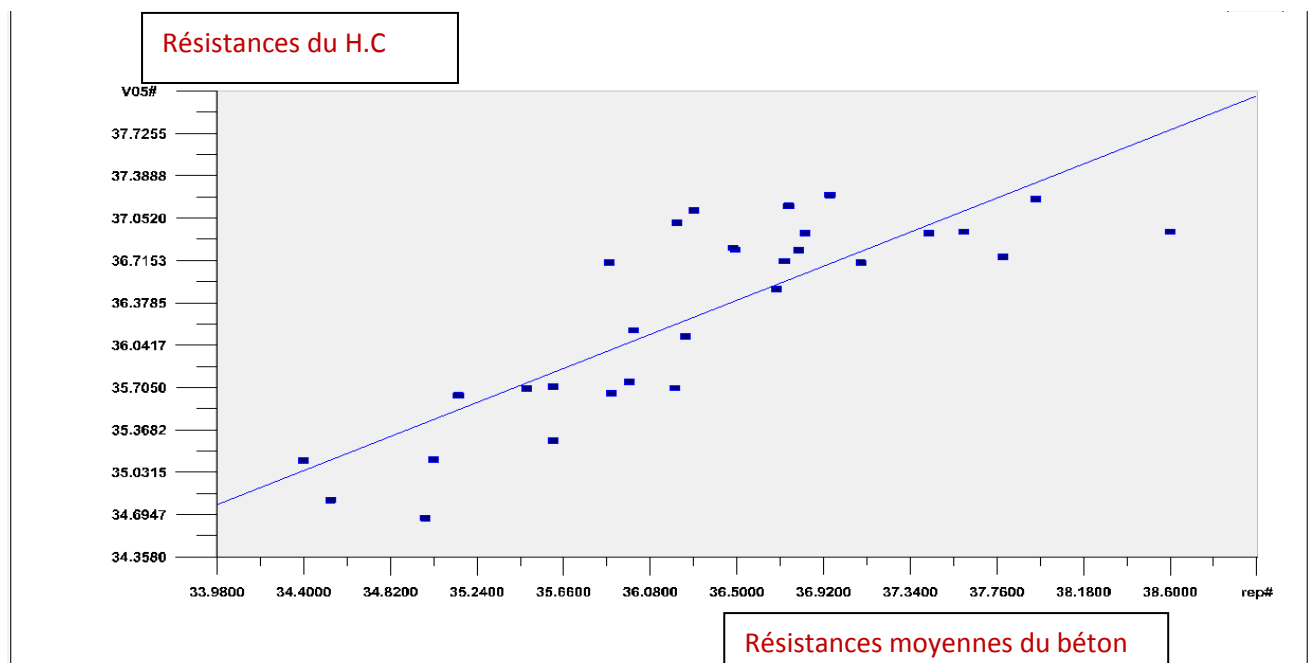


Figure 12 : La corrélation entre les variables X_i et Y_i

- Coefficient de Corrélation : $r=0,8658$ donc il existe une forte corrélation entre les X_i et les Y_i .

- Test de corrélation : avec le seuil de signification égale à 5% et le degré de liberté $v=n-2$, où $n=31$.

$$T_{cal}=4,6 > T(5\%,29)=2,042$$

On rejette H_0 et on accepte H_1 : les valeurs sont indépendantes les unes des autres

- Synthèse sur les Coefficients

Variable	Coefficient	Ecart-Type	T Student	Confiance %	Risque %
Constante (b0)	Non définie.	Non calculée.	Non calculée.	Non calculée.	Non calculée.
Facteur (b1)	0,6683	0,0018	367,4752	100,00	0,00

- Intervalle de Confiance à 95,00 %

Variable	Coefficient	Mini (2,50 %)	Maxi (97,50 %)
Constante (b0)	Non définie	Non calculée	Non calculée
Facteur (b1)	0,6683	0,6646	0,6720

- Décomposition de la somme de carrés

Source	Somme des Carrés	Degré de liberté	Carrés Moyens	Fisher	Confiance %	Risque %
Régression	40818,2646	1	40818,2646	135037,9925	100,00	0,00
Résidus	9,0682	30	0,3023	-	-	-
Total	40827,3328	31	1317,0107	-	-	-

- Ecart-Type Résiduel $Sr = 0,5498$, avec un degré de liberté de 30.
- Test d'Homogénéité des Variances et des coefficients de variations.

Avec un niveau de Confiance défini : 95,00 %.

Bartlett: Constance des variances

Nombre d'Echantillons	Ecart-Type Fusionné	D.D.L. Fusionné	Loi
31	0,5954	62	CHI ²
"E" de Bartlett	Degré de liberté	Confiance %	Risque (Alpha) %
46,4837	30	97,2074	2,7926

Conclusion :

Les variances ne peuvent pas être considérées comme constantes dans le domaine expérimental. Il convient alors:

- de vérifier l'existence éventuelle de valeurs aberrantes;
- de réduire le domaine expérimental.

➤ Test de Linéarité:

Comparaison des Ecart-Types Résiduels et de Mesures.

Ecart-Type Résiduel Sr :	Degré de liberté	Ecart-Type de mesure S ₀	DDL mesure
0,5498	30	0,3438	62
Statistique Calculée S _r ² /S ₀ ²	Confiance %	Risque %	
2,5577	99,9095	0,0905	

Attention: *L'écart-type résiduel de la régression (S_r) est significativement plus grand que l'écart-type de mesure annoncé (S₀). Le Modèle n'ajuste pas de façon satisfaisante la réponse aux points expérimentaux. On peut:*

1-Utiliser le modèle linéaire malgré tout, si les intervalles de confiance auxquels il donne lieu sont satisfaisants;

2-Remplacer le modèle linéaire par une régression polynomiale. S_i² = S_r² - S₀², variance d'inadéquation au modèle. S_i = 0,4291 .

L'équation du modèle obtenue montre que :

$$\hat{y} = 0,6683x + 0$$

Avec b₁=0,6683 et b₀=0 (b₀ est significativement différente de zéro).

Conclusion

Le groupe HOLCIM (présent dans 70 pays) a fait preuve grâce à ces laboratoires (suisse) de recherche, de son implication continue dans le développement du ciment, béton et granulats.

L'utilisation du cône HOLCIM pour le contrôle, s'ajoute à d'autres paramètres propres à ce groupe se convergent tous vers un seul objectif : l'optimisation et l'amélioration de la qualité du ciment et du béton (considéré comme réel produit fini).

Testé dans d'autres cimenterie du groupe (Europe, Amérique latine,...) ; les résultats du cône HOLCIM ont été très satisfaisantes ; c'est pourquoi le groupe HOLCIM (Maroc)-cimenterie de FES devrait s'aligner avec les autres usines du groupe.

Nous avons donc procédé à travers tous les essais réalisés, à la mise en place de ce nouveau paramètre de contrôle pour compléter la synergie entre le laboratoire de la cimenterie et ceux de différentes centrales à béton.

Durant les 4 mois de ce stage, j'avais la chance de participer à la création d'une base pour définir la corrélation entre les résultats du cône HOLCIM et ceux du béton (produit à partir du même ciment) et aussi anticiper dans les meilleurs délais pour définir les principaux caractéristiques du béton, ainsi que le comportement des adjuvants dans le béton.

Il faut noter que 20% des ciments ayant servi pour cette études ont été analysés dans d'autres laboratoires agréés, on peut donc se référer aux résultats obtenus lors des prochains essais qui seront systématiquement réalisé dans le laboratoire de l'usine sur tous les ciments expédiés (CPJ 45, CPJ 55).

Les essais ont été réalisés dans des conditions très proches de ceux réalisés sur le ciment selon la norme en vigueur ; ceci dans le but de standardiser ces derniers et pouvoir faire des tests inter-laboratoires avec d'autres cimenteries du groupe au Maroc ou à l'étranger.

Après avoir interpréter les résultats d'une façon observatrice, on s'est intéressé à la relation entre les résistances du cône HOLCIM et les résistances du béton, l'élaboration de cette relation était d'appliquer une méthode statistique appelé **la régression linéaire simple**. Cette dernière permet de déterminer l'équation liant les paramètres étudiés, aussi bien de donner un modèle statistique en le validant par des tests statistiques pour qu'il soit prêt à l'utilisation.

Le modèle postulé est vrai si *les intervalles de confiance auxquels il donne lieu sont satisfaisants; dans notre cas cette condition est vérifiée, le facteur b_1 appartient à l'intervalle $[0,6646 ; 0,6720]$.*

Par le biais de ce sujet de fin d'études, ce stage m'a permis d'améliorer mes connaissances théoriques et pratiques acquises durant le cursus universitaire, de développer mes capacités d'autonomie et d'adaptation au milieu professionnel. Par ailleurs, ce stage m'a aussi permis de développer mes compétences pratiques et mon savoir-faire par la maîtrise de plusieurs techniques analytiques, utilisées dans le secteur cimentier mais aussi de développer le secteur béton-ciment qui est plus en plus en évolution .

Enfin, j'ai pu parfaire ma connaissance des exigences du contrôle qualité qui ne se conçoit pas comme un ensemble figé de méthodes expérimentales, mais plutôt comme un concept dynamique appelé constamment à évoluer.

ANNEXE

I- Rappel statistique :

1 les tests d'hypothèses

- **Test de Shapiro et wilk**

Test Shapiro-Wilk de conformité d'une distribution à la loi normale consiste à former les hypothèses suivantes :

H_0 : les données X forment une distribution qui n'est significativement différente d'une loi normale.

H_1 : la distribution est significativement différente d'une loi normale.

Il existe de nombreuses méthodes pour vérifier si une série de données présente les caractéristiques d'une loi normale. La méthode développée par Shapiro-Wilk est dans bien des cas, la plus puissante, en particulier lorsque l'échantillon provient d'une distribution asymétrique. Cette méthode implique l'emploi de tables, actuellement calculées pour une taille d'échantillon comprise entre 5 et 50. ($5 \leq n \leq 50$) Comme dans tout autre test, il faudra déterminer à l'avance un risque de rejeter l'hypothèse nulle alors que celle-ci est vraie (α).

Le test de Shapiro-Wilk est basé sur le rapport W de deux estimations liées à la variance de la population dont provient l'échantillon : l'une, fonction des étendues partielles $X_n - X_1, X_{n-1} - X_2, \dots$ que l'on peut trouver à partir de la suite ordonnée () des n observations indépendantes d'un échantillon de taille n , l'autre, $(n-1) S^2$ fonction des carrés de écarts à la moyenne \bar{X} des observations.

Le rapport W sera comparé à une valeur théorique $W_{1-\alpha, n}$ et dans le cas où $W \geq W_{1-\alpha, n}$ nous pourrons affirmer avec un risque d'erreur α que la distribution suit une loi normale.

Étapes de réalisation du test de Shapiro-Wilk :

- Étape 1 : Classer les n observations par ordre de grandeur croissante :

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_j \leq \dots \leq x_{n-1} \leq x_n$$

- Étape 2 : Calculer la Somme des Carrés des Écarts:

$$SCE = \sum (x_i - \bar{x})^2 = (n-1)S^2$$

NB : pour effectuer ce calcul aisément avec la calculatrice,

- 1- Mettre la calculatrice en mode statistique,
 - 2- entrer les n observations,
 - 3- Calculer s ,
 - 4- Trouver la somme des carrés des écarts (SCE) en effectuant l'opération : $SCE = (n-1) \times s^2$
- Étape 3 : Calculer les différences :

$$d'_1 = x_n - x_1$$

$$d'_2 = x_{n-1} - x_2$$

$$d'_3 = x_{n-2} - x_3$$

...

Si n est pair il y aura alors $n/2$ différences.

Si n est impair il y aura alors $(n-1)/2$ différences, l'observation médiane ne sera pas utilisée.

- Étape 4 : Calculer :

$$b = \sum a_i d'_i$$

Les coefficients a_i sont donnés dans une table en fonction de n et i .

- Étape 5 : Calculer :

$$W = \frac{b^2}{SCE}$$

- Étape 6 : Comparer W à $W_{1-\alpha, n}$

$W_{1-\alpha, n}$ est trouvé dans la table de Shapiro-Wilk en fonction du risque d'erreur α et de la taille de l'échantillon n .

- Finalement,
Si $W < W_{1-\alpha, n}$ la distribution NE SUIVRAIT PAS UNE LOI NORMALE.

Si $W \geq W_{1-\alpha, n}$ la distribution SUIVRAIT UNE LOI NORMALE.

- **Test Homogénéité des variances [5]**

Ces k groupes d'observations ont été générés par k distributions normales indépendantes de variances respectives $\sigma^2_1, \sigma^2_2, \dots, \sigma^2_k$.

Ces k variances sont-elles égales ?

Cette question est importante parce que certaines techniques majeures comme ANOVA supposent explicitement que les groupes d'observations considérés sont issus de populations normales indépendantes de **variances identiques**. Il convient donc, avant de lancer une ANOVA, de vérifier que les données ne sont pas en contradiction avec cette hypothèse, et donc de commencer dans un premier temps par soumettre les données à un **test d'homogénéité des variances** comme par exemple le **test de Bartlett**.

Un test d'homogénéité des variances met en concurrence

* L'hypothèse nulle $H_0 : \sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_k (= \sigma^2)$,

Et* L'hypothèse alternative H_1 : "Au moins une des variances est différente des autres".

- 1) Remarquez la similarité formelle entre ces hypothèses et celles d'ANOVA, le terme "moyennes" étant remplacé par le terme "variances".
- 2) Quand $k = 2$, le test d'homogénéité des variances est simplement le test F .

- *La statistique de Bartlett*

Notons n_1, n_2, \dots, n_k les tailles respectives des groupes.

La statistique du test de Bartlett est :

$$Q = \frac{A}{B} = \frac{\left(\sum_{i=1}^k \nu_i\right) \log s^2 - \sum_{i=1}^k \nu_i \log s_i^2}{1 + \frac{1}{3(k-1)} \left[\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{\nu_i}\right) - \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^k \nu_i}\right) \right]}$$

où

* $\nu_i = n_i - 1$,

* s_i^2 est l'estimateur sans biais classique de σ_i^2 ,

* Et s^2 est l' "estimateur agrégé" de la variance commune σ^2 sous \mathbf{H}_0 :

$$s^2 = \frac{\nu_1 s_1^2 + \nu_2 s_2^2 + \dots + \nu_k s_k^2}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_k} = \frac{\sum_{i=1}^k \nu_i s_i^2}{\sum_{i=1}^k \nu_i}$$

C'est le barycentre des variances des différents groupes pondérées par les tailles respectives des groupes moins 1.

La partie fonctionnelle de la statistique est le numérateur A . Le dénominateur B ne contient pas de grandeur aléatoire. C'est un "facteur de correction" destiné à rapprocher la distribution de la statistique de Bartlett de sa forme asymptotique. Son rôle est de rendre l'espérance de la statistique de test Q égale à la moyenne de cette distribution asymptotique. On voit immédiatement que B tend vers 1 quand les tailles des groupes tendent vers l'infini.

- *Distribution de la statistique de Bartlett*

Ainsi, il apparaît que le test de Bartlett destiné à tester l'hypothèse d'homogénéité des variances de distributions normales indépendantes.

Par conséquent, la distribution **asymptotique** de Q est une distribution du Chi-2 dont nous montrerons que le nombre de degrés de liberté est égal à $k - 1$. Comme la distribution exacte de la statistique de Bartlett n'est pas connue, le test utilise cette distribution asymptotique comme approximation de sa distribution réelle.

Règle de décision :

Si $Q < \chi^2_{(\alpha, k-1)}$, l'inégalité est vérifiée, les variances sont considérées comme homogènes.

Si $Q > \chi^2_{(\alpha, n-1)}$, il faut vérifier si la variance suspecte ou aberrante (S_{max}^2) n'est pas la conséquence de la présence dans le groupe incriminé, d'une valeur elle-même « suspecte » ou « aberrant ».

- **Test de corrélation**

Le test du chi-deux de contingence vise à tester l'indépendance de deux caractères statistiques. Dans le cadre gaussien (et dans ce cadre seulement) deux variables aléatoires sont indépendantes si et seulement si elles sont non corrélées. Le problème ici est de décider si une corrélation observée entre deux caractères statistiques, mesurés sur les mêmes individus, est ou non significative.

Pour le modèle probabiliste, les observations proviennent d'un échantillon $((X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n))$ d'une loi normale bidimensionnelle, d'espérance (μ_x, μ_y) et de matrice de covariance :

$$\begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_y \rho \\ \sigma_x \sigma_y \rho & \sigma_y^2 \end{pmatrix}.$$

C'est la loi d'un couple de variables, dont les espérances respectives sont μ_x et μ_y et les variances σ_x^2 et σ_y^2 , le coefficient de corrélation étant ρ . L'estimateur naturel de ρ est le *coefficient de corrélation empirique*, à savoir la variable aléatoire r^2 suivante :

$$r^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

Où \bar{X} et \bar{Y} désignent les moyennes empiriques des X_i et des Y_i respectivement. L'hypothèse nulle que l'on souhaite tester est :

$$\mathcal{H}_0 : \rho = 0.$$

On utilise pour cela le résultat suivant :

Si H_0 est vraie, alors la statistique :

$$T = \sqrt{n-2} \frac{R}{\sqrt{1-R^2}},$$

Suit la loi de Student $\mathcal{T}(n-2)$.

Le test bilatéral de seuil α aura pour règle de décision :

Rejet de

$$\mathcal{H}_0 \text{ si } T \notin [-T_{\alpha/2, n-2}; T_{\alpha/2, n-2}]$$

- **Rappel sur la régression linéaire simple**

Pour établir ce modèle il faut d'abord voir si ces résistances sont corrélées entre eux, puis on va utiliser la régression linéaire simple, dans le but d'établir s'il y a un lien linéaire entre deux variables X et Y.

Le modèle est :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon.$$

Dans ce modèle, appelé modèle de régression linéaire simple, les composantes ont la signification suivante :

- Y est la variable dépendante ou expliquée à caractère aléatoire;
- X est la variable indépendante ou explicative mesurée sans erreur ou fixée à des niveaux arbitraires;
- β_0 et β_1 sont les coefficients de régressions théoriques du modèle que l'on devra estimer à l'aide d'un échantillon;
- ϵ représente l'erreur théorique aléatoire associée à la variable dépendante

Y : c'est une variable aléatoire qui prend en compte l'existence éventuelle d'autres influences que celle de X sur Y.

✓ Conditions d'application du modèle linéaire simple : Le modèle linéaire simple s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- 1) La courbes de régression n'est autre que la courbe joignant les moyennes des distributions des X_i lorsque ces moyennes sont alignées la courbe de régression est alors une droite.
- 2) $\text{Var}(\epsilon) = \sigma^2$ est constante (c'est-à-dire l'erreur aléatoire demeure constante pour toute les valeurs de X) ;
- 3) Les Y_i ne sont pas corrélés entre eux les sont distribués suivant une loi normale et pour chaque valeur X_i les valeurs de la variable dépendante Y sont distribuées selon la loi normale.

Régression linéaire simple de modèle I, régression de y (dépendante) en x (indépendante ou explicative):

$$\hat{y} = b_0 + b_1x$$

\hat{y} : réponse prédite par le modèle pour la solution x : $\hat{y} = b_0x + b_1$

$$b_1 = S_{xy}/S_x^2 \text{ mais aussi } b_1 = r (S_y/S_x)$$

$$\text{avec } S_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), S_x^2 = \sum (x_i - \bar{x})^2, S_y = \sum (y_i - \bar{y}), S_x = \sum (x_i - \bar{x})$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1\bar{x} \text{ Remarque: si } x \text{ et } y \text{ sont centrés-réduits alors } \beta_1 = r \text{ et } \beta_0 = 0$$

• **Test de signification des coefficients du modèle**

Le test statistique sur b_1 nous permet de vérifier statistiquement si la composante linéaire b_1X est ou non pertinente dans le modèle, si oui on dit que la composante linéaire permet d'expliquer d'une façon significative les fluctuations dans les observations Y_i

Test de signification de la pente b_1 d'une régression linéaire simple

Lorsque les conditions d'application sont réunies et si H_0 est vraie, alors la variable auxiliaire $T_{cal} = b_1/S(b_1)$, suit une loi de Student à $v = n - 2$ degrés de liberté avec un seuil de signification α et la comparer avec $t(\alpha, n-2)$ lu dans la table de Student.

$$\text{Avec : } S = \frac{s}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (\mathbf{b1})$$

$$\text{Et } s = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-2}$$

Test de signification de l'ordonnée à l'origine b_1 d'une régression linéaire simple
Lorsque les conditions d'application sont réunies et si H_0 est vraie, alors la variable auxiliaire

$T_{cal} = b_0 / S(b_0)$, suit une loi de Student à $v = n - 2$ degrés de liberté avec un seuil de signification α et la comparer avec $T(\alpha, n-2)$ lu dans la table de Student.

$$\text{Avec : } s = \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}} S(b_0)$$

- **Intervalle de confiance**

Intervalle de confiance de la pente d'une droite de régression de y en x

Cet intervalle est défini comme:

β_1 doit appartenir à cet intervalle $[b_1 - T_{\alpha/2; n-2} S(b_1) < \beta_1 < b_1 + T_{\alpha/2; n-2} S(b_1)]$ où β_1 est la pente dans la population statistique.

Intervalle de confiance de l'ordonnée à l'origine d'une droite de régression de y en x

Cet intervalle est défini comme:

β_0 doit appartenir à cet intervalle $[b_0 - T_{\alpha/2; n-2} S(b_0) < \beta_0 < b_0 + T_{\alpha/2; n-2} S(b_0)]$ où β_0 est l'ordonnée à l'origine dans la population statistique.

2 Régression linéaire simple et analyse de la variance

Un autre objectif de la régression est de déterminer dans quelle mesure la droite de régression est utile à expliquer la variabilité existante dans les observations Y_i .

C'est une façon de savoir si la régression est significative, test effectué cette fois à l'aide d'un rapport de variance.

L'analyse de la variance va nous permettre de :

- Quantifier la variation totale dans les observations et de la décomposer en deux sources de variations :
 - une variation attribuable à la régression,
 - une variance résiduelle,
- Le coefficient de détermination R^2
- De vérifier à l'aide d'un tableau d'analyse de la variance, si la source de variation attribuable à la régression est significative. (voir tableau ci-dessous).

Source de variation	Somme de carrés	Degrés de liberté	Carré moyen
Expliquée par la régression (variation expliquée par la droite)	$SCR = \sum (\hat{Y}_i - Y)^2$	1	$S^2_r = CMR = SCR/1$
Résiduelle (variation inexpliquée par la droite)	$SC_{res} = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	n-2	$S^2_r = CM_{res} = SC/n-2$
Totale	$SCT = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$	n-1	

-Test de l'Anova1:

On poste les hypothèses suivantes : $H_0 : \beta_1 = 0$
 $H_1 : \beta_1 \neq 0$

On va utiliser les carrés moyen un test unilatéral à droite, suit la loi de Fisher, au seuil de signification α et de degré de liberté $\nu_1 = 1$ et $\nu_2 = n-2$. et la comparer avec $F(\alpha, 1, n-2)$ lu dans la table de Snedecor

$$F = CMR / CM_{res}$$

Si $F < F_{\alpha; 1; n-2}$, on garde H_0 et la régression est non significative, on peut pas valider le modèle linéaire. Dans ce cas il faut chercher un autre modèle.

Si $F > F_{\alpha; 1; n-2}$, on garde H_1 et la régression est significative entre Y et X au seuil de signification α

3 Vérification de la validité de la droite de régression

Ce test consiste à vérifier la validité de la droite de régression (c'est bien une droite dans tout le domaine choisi) c'est-à-dire de s'assurer que la variance caractérisant l'erreur due à une erreur de modèle est bien inférieure à l'erreur expérimentale.

L'erreur résiduelle $\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ peut être décomposé en une somme de deux écarts (voir le tableau suivant):

Source de variation	Somme de carrés	Degrés de liberté	Carré moyen
Erreur Expérimentale	$SCE_e = \sum (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$	n-K	$S^2_e = SC_{EXP} = SCR/n-K$
Erreur du modèle	$SCE_{nl} = \sum (\bar{Y}_i - Y_i)^2$	K-2	$S^2_{nl} = SCE_{nl} / K-2$
Résiduelle	$SCE_r = \sum (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$	n-2	$S^2_r = SCE_r / N-2$

-Test de l'Anova2:

On poste les hypothèses suivantes : $H_0 : \beta_1 = 0$
 $H_1 : \beta_1 \neq 0$

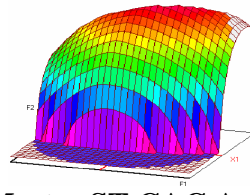
On va utiliser les carrés moyen un test unilatéral à droite, suit la loi de Fisher, au seuil de signification α et de degré de liberté $v_1 = 1$ et $v_2 = n - 2$. et la comparer avec $F(\alpha, k - 2, n - k)$ lu dans la table de Snedecor.

$$F = SCE_{nl} / SC_{Exp}$$

Si $F < F_{\alpha; k-2; n-k}$, on garde H_0 le test n'est pas significatif l'erreur du modèle est négligeable.
Si $F > F_{\alpha; k-2; n-k}$, on garde H_1 le domaine choisi n'est pas linéaire et donc il faut le réduire.

Bibliographie

- [1] Technologie du béton, Edition 1994, Groupement Belge du Béton
- [2] Les Fiches techniques, tome II, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, CIM béton
- [3] <http://www.estigc.fr/labo/beton/abrams.htm>
- [4] http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_six_six.html
- [5] http://www.aiaccess.net/French/Glossaires/GlosMod/f_gm_bartlett_test_homogeneite.html



Master ST CAC Agiq

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: SEKKAK Salma

Année Universitaire : 2010/2011

Titre: Amélioration et maîtrise du comportement du ciment dans le béton

Résumé

Le contrôle avec le cône HOLCIM s'ajoute à d'autres paramètres propres à ce groupe se convergeant tous vers un seul objectif : l'optimisation et l'amélioration de la qualité du ciment et du béton (considéré comme réel produit fini). J'ai donc procédé à travers tous les essais réalisés, à la mise en place de ce nouveau paramètre de contrôle pour compléter la synergie entre le laboratoire de la cimenterie et ceux de différentes centrales à béton.

Durant, les 4 mois de ce stage, j'avais la chance de participer à la création d'une base pour définir la corrélation entre les résultats du cône HOLCIM et ceux du béton produit à partir du même ciment par une méthode statistique appelé la régression linéaire simple pour nous permettre d'anticiper dans les meilleurs délais pour définir les principaux caractéristiques du béton, ainsi que le comportement des adjuvants dans le béton.

Mots clés: ciment, béton, adjuvants, granulats, cône d'Abrams, consistance, compression, cône HOLCIM, régression linéaire simple, corrélation.