



bnetd

Bureau national d'études
techniques et de développement



**CONTROLE QUALITE DU BETON
C50/60 ET DE SA MISE EN ŒUVRE : CAS DU PROJET DE CONSTRUCTION
DE LA TOUR F DANS LA VILLE D'ABIDJAN.**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER
GÉNIE CIVIL –BÂTIMENT ET TRAVAUX PUBLICS

Présenté et soutenu publiquement par
Ounki Monique Nova KAKOU (20210151)

Encadrant 2iE : Dr Philbert NSHIYIMANA, Enseignant-Chercheur à l'Institut 2iE

Maître de stage en entreprise : Mr N Zi Kouassi Guy Armel analyste d'étude

Structure d'accueil : Bureau National d'Études Techniques et de Développement (BNETD), Abidjan

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Pr Abdou LAWANE GANA**

Membres et correcteurs : **Dr Nafissatou SAVADOGO**

M. Yawo Daniel ADUFU

Promotion [2024 /2025]

DÉDICACE

A :

Mes parents pour leurs prières et leurs conseils constants, leurs efforts fournis pour que je réussisse dans mes études.

Mes frères, sœurs et amis pour leur soutien moral et leur encouragement.

REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait pu être réalisé sans l'action de plusieurs intervenants que nous tenons à remercier infiniment en particulier :

L'institut 2iE et a tout le personnel administratif ainsi que le corps enseignant de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement pour la qualité des formations reçues

Mon encadreur **Dr. PHILBERT NSHIMIYIMANA** Enseignant-Chercheur au Département Génie Civil de l'Institut 2iE pour l'encadrement malgré son emploi du temps très chargé ;

Monsieur **Kinapara COULIBALY**, Directeur général du Bureau National d'Etudes Techniques de Développement (BNETD) pour avoir répondu favorablement à notre demande de stage de fin d'étude au sein de sa structure.

Monsieur, **NZI KOUASSI GUY ARMEL** notre Maitre de stage de fin d'étude, pour les connaissances données, pour ses conseils, son regard critique et l'intérêt porté à l'avancement de ce travail ;

Monsieur **KONE LASSINA**, notre encadreur technique, ingénieur des travaux publics et chef de mission du projet de la tour F au compte du BNETD, pour son encadrement, sa disponibilité et son regard attentif sur notre travail ;

Je remercie chaleureusement ma famille ainsi que mes amis pour leurs précieux soutiens et pour leurs générosités. Je leur témoigne toute mon affection.

RÉSUMÉ

La construction de la Tour F d'Abidjan, un projet emblématique visant à positionner Abidjan comme un centre régional majeur, s'inscrit dans un contexte général de modernisation urbaine et de croissance économique rapide. Cette étude s'inscrit dans un contexte où les exigences techniques élevées, liées à la nature même de l'ouvrage, ont révélé des problématiques spécifiques, notamment en termes de formulation et de mise en œuvre du béton. L'objectif principal de ce travail était de vérifier et d'améliorer la qualité du béton tout au long du projet, en respectant les normes en vigueur, tout en répondant aux impératifs de durabilité et d'ouvrabilité. À travers des analyses rigoureuses, des méthodes de formulations utilisées, des résultats obtenus et des essais de convenance, cette étude a permis d'identifier les causes des défauts rencontrés et de proposer des ajustements adaptés. En s'appuyant sur des observations de terrain et des vérifications pratiques, ce mémoire a mis en lumière l'importance d'un contrôle strict des matériaux et des processus pour répondre aux exigences techniques et garantir des ouvrages de haute qualité. Cette réflexion se veut un apport concret pour relever les défis que posent les projets d'envergure, tout en assurant une durabilité.

Mots clés : Béton à Haute Performance, durabilité, Pompabilité, formulation-mix

ABSTRACT

The construction of the F Tower in Abidjan, an emblematic project aimed at positioning Abidjan as a major regional Centre, is part of a general context of urban modernization and rapid economic growth. This study is part of a context where the high technical requirements, linked to the very nature of the structure, have revealed specific problems, particularly in terms of concrete formulation and implementation. The main objective of this work was to verify and improve the quality of the concrete throughout the project, complying with current standards, while meeting the requirements of durability and workability. Through rigorous analyses, the methods of the formulations used, the results obtained and suitability tests, this study made it possible to identify the causes of the defects encountered and to propose appropriate adjustments. Based on field observations and practical checks, this thesis highlighted the importance of strict control of materials and processes to meet technical requirements and ensure high-quality structures. This reflection is intended to be a concrete contribution to meeting the challenges posed by large-scale projects, while ensuring sustainability.

Keywords: High Performance Concrete, durability, Pumpability, formulation-mix

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BAP : Béton Autoplaçant

BFUP : Béton Fibré à Ultra Haute Performance

BHP : Béton à Haute Performance

C50/60 : Classe de résistance caractéristique du béton

E/C : Rapport Eau/Ciment

GBA : Glissière en Béton Arme

MPa : Méga Pascal (unité de pression)

NF : Norme Française

PCE : Polycarboxylates Éthers (superplastifiants)

VA : Voile Architectonique

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCEUIL ET DU PROJET	2
I.1- Introduction	2
I.2- Présentation de la structure d'accueil	2
I.2.1- Historique de l'entreprise	2
I.2.2- Situation géographique.....	3
I.2.3- Missions et objectifs du BNETD	3
I.2.3.1- Mission du BNETD.....	3
I.2.3.2- Objectifs du BNETD.....	4
I.2.3.3- Domaines d'intervention du BNETD	4
I.2.3.4- Organisation et fonctionnement du BNETD	5
I.3- Présentation du projet	6
I.3.1 - Contexte du projet.....	6
I.3.2 - Localisation de la zone du projet.....	7
I.3.3 - Description de l'ouvrage	7
I.3.4 - Intervenants du projet.....	8
I.4- Conclusion partielle.....	9
CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LE BETON.....	10

II.1 - Introduction	10
II.2 - Etat des lieux de la formulation.....	10
II.2.1- Formulation C50/60	10
II.2.2- Spécificité du mix.....	11
II.2.3- Spécificité des ouvrages réalisés avec cette classe de résistance de béton	11
II.3 - Les différents types de béton	11
II.3.1 - Suivant la Résistance à la compression	11
II.3.2 - Suivant la Consistance (ouvrabilité).....	12
II.3.3 - Suivant l'exposition aux conditions environnementales	12
II.3.4 - Suivant la Durabilité.....	13
II.3.5 - Suivant la Masse volumique.....	13
II.3.6 - Suivant les Granulats utilisés.....	14
II.3.7 - Rhéologie du béton.....	14
II.4 - Les éléments constitutifs du béton.....	14
II.4.1 - Les granulats.....	14
II.4.2 - Ciment	15
II.4.3 - Eau de gâchage	17
II.4.4 - Les adjuvants	18
II.4.4.1 - Adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton	18
II.4.4.2 - Adjuvants modifiant la prise et le durcissement du béton.....	18
II.4.4.3 - Adjuvants modifiant certaines propriétés spécifiques du béton.....	19
II.4.5 - Les additifs	20
II.4.5.1 - Fumée de silices	20
II.4.5.2 - Laitier à haut fourneau	20
II.5 - Les méthodes d'élaboration des formulations du béton	21
II.5.1- Méthodes à "granularité continue"	21
II.5.2- Méthodes à "granularité discontinue"	21
II.5.3- Principales méthodes de formulation	22
II.5.4- Paramètres principaux à définir.....	23
II.5.5- Exigence de formulation pour la résistance	23
II.6 - Méthode de production et de mise en œuvre du béton	23

II.6.1- Méthode de production du béton.....	23
II.6.2- Principe de mise en œuvre du béton.....	26
II.6.2.1- Pompage et bétonnage.....	26
II.6.2.2- Vibration.....	26
II.6.2.3- Cure.....	26
II.7 - Conclusion.....	26
CHAPITRE III : QUALITE DU BETON FRAIS ET DURCI.....	28
III.1 Introduction.....	28
III.2 Matériaux utilisés.....	28
III.2.1- Ciment.....	28
III.2.2- Eau de gâchage.....	29
III.2.3- Les granulats.....	30
III.2.4- Les adjuvants.....	30
III.3 Méthodes expérimentales.....	31
III.3.1- Méthodes de Dreux Gorisse.....	32
III.3.2. Essais sur le béton frais.....	35
III.3.2.1 - Etalement.....	35
III.3.2.2 - Masse volumique.....	35
III.3.2.3 - Teneur en air.....	35
III.3.2.4 - Essai à l'entonnoir en forme de v <<V-Funnel test >>.....	36
III.2.4.1. Test des essais cratérisant l'ouvrabilité du béton.....	37
III.2. Mesure de la température du béton.....	38
4.3 Test sur le béton durci : Résistance à la compression.....	40
III.4- Difficultés rencontrées sur les différents mix(mélange).....	43
III 4.1- vérification de la qualité du béton.....	43
III.4.2 -Difficultés de pompage.....	44
III .4.3- Baisse de résistance au niveau des formulation C50/60.....	45
III.5.0 - Tableau des résistances en compressions du voile du noyau du mix 13.....	45
III.4.4-Non-conformité du parement des colonnes architecturales.....	47
III.5-Conclusion partielle.....	47

CHAPITRE IV : ANALALYSE DE LA FORMULATION ET LA PRODUCTION DE BETON	48
IV.1 - Les formulations des différents mix (mélange).....	48
IV.2- Evaluation de la conformité	48
IV.2.1 - Critères liés à la conception du mélange	48
IV.3- Vérification de la formulation de béton	49
IV.4. Conformité des matériaux	53
IV.4.1 - Granulats.....	53
IV.4- Qualité du béton	54
IV.4.1- Paramètres influents sur la rhéologie du béton frais	54
IV.4.1.1- Les granulats	54
IV.4.1.2 Utilisation des adjuvants.....	55
IV.4.1.3- Ciment	55
IV.5- Mesures préventives.....	55
IV.6- Non-conformité du parement C4 des colonnes architecturales.....	56
IV.7- Adaptation de la formulation de béton	57
IV.8- Étude économique	57
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	63
BIBLIOGRAPHIE	64
ANNEXES	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 : Classe de consistance du béton	12
Tableau II-2 : Les classes d'exposition défini par la norme NF206-1	13
Tableau II-3 : Exigences mécaniques et physique valeur caractéristique.....	17
Tableau III-1 : Propriétés physique du ciment	29
Tableau III-2 : caractéristiques des adjuvants.....	30
Tableau III-3 : Caractéristique de l'hydrofuge de masse.....	31
Tableau III-4 : Le coefficient k en fonction de la forme des granulats.....	34
Tableau III-5 : Analyse de la baisse de résistance du béton C50/60	45
Tableau III-6 : Critère d'acceptation des granulats selon la norme NF EN 206	46
Le tableau IV : De la norme F EN 206-1 indique les tolérances suivantes sur les constituants ..	49
Tableau IV.1 : Récapitulatifs dosages pour 1m ³	51
Tableau IV.2 : Formule utiliser et celle obtenue après vérification.....	52

LISTE DES FIGURES

Figure I- 1 : localisation du siège BNETD.....	3
Figure I-2 : Organigramme du BNETD.....	6
Figure I-3 : Localisation de la tour F	7
Figure I-4 : vue en plan et dénomination des éléments structurels de la tour.....	8
Figure II-1 : Processus de production du béton	25
Figure III-1 : Silo de ciment CHF 42.5.....	29
Figure III-3 : L'abaque de Dreux Gorisse.....	33
Figure III-2 : étalement au cône d Abrams.....	35
Figure III-3 : Mesure de la teneur en air.....	36
Figure III-4 : Essai de l'entonnoir en forme de <<V>.....	37
Figure III.5 : comparaison des valeurs de l'étalements mesurer pour le béton MIX 46 à celles admissible.....	38
Figure III.6 : comparaison des valeurs de l'étalements mesurer pour le béton MIX 47 à celles admissible.....	38
Figure III.7 : comparaison des valeurs de la température mesurer pour le béton MIX 47 à celles admissible.....	40
Figure III.8 : comparaison des valeurs de la teneur en air mesurer à celles admissible.....	40
Figure III.9 : comparaison des valeurs des résistances caractéristiques à 7 jours mesurer à celles admissible.....	41
Figure III.10 : comparaison des valeurs des résistances caractéristiques à 14 jours mesurer à celles admissible.....	42
Figure III.11 : comparaison des valeurs des résistances caractéristiques a 28 jours mesurer à celles admissible.....	42
Figure III-12 : Rectifieuse (a), Presse mécanique (b).....	43

Figure III-13 : Relation entre la résistance en compression et le rapport E/C **Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV-1 : Microfissure d'épaisseurs 0.15 mm à 0.30 mm en tête de colonne (a), présence de nid d'abeilles (b).....56

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des dernières décennies, le béton a fait l'objet de nombreuses recherches visant à améliorer ses propriétés, aussi bien en termes de mise en œuvre (ouvrabilité) que de résistance à l'état durci. Ces progrès ont permis d'élargir les possibilités d'utilisation du béton dans le domaine de la construction, tout en répondant aux exigences croissantes de performance, de durabilité et de sécurité. Dans ce contexte, le béton est devenu un matériau incontournable pour les structures modernes, y compris pour des projets d'envergure tels que la Tour F, située à Abidjan, qui se distingue par sa hauteur de plus de 300 mètres.

Cependant, pour assurer la stabilité et la résistance d'une structure, en conformité avec les réglementations relatives au béton, il est essentiel de maîtriser les techniques de production et de mise en œuvre du béton. La qualité du béton, sa résistance aux sollicitations importantes, ainsi que les méthodes employées doivent être contrôlées avec rigueur afin de garantir la sécurité et la pérennité des ouvrages. Dans le cadre de la construction de la Tour F, plusieurs difficultés ont été rencontrées lors du pompage du béton, à haute altitude notamment des blocages de conduites, des baisses de résistance à des jours d'âge et des conformités des parements des éléments d'ouvrage en béton. Ces difficultés soulignent la nécessité d'une maîtrise parfaite des processus de formulation et de mise en œuvre du béton.

L'objectif principal de ce projet de fin d'étude est de contribuer à l'amélioration du contrôle qualité du béton C50/60 et de son application sur le chantier de la Tour F. Ainsi que sur les projets futurs. Le béton C50/60 a été choisi pour ses performances en termes de résistance, en de répondre à la descente de charge du projet mais plusieurs problèmes ont surgi lors de sa mise en œuvre. Ainsi, cette étude se concentrera sur l'identification des facteurs influençant la qualité de la production du béton, ainsi que sur l'analyse des difficultés techniques rencontrées sur le chantier.

Ce mémoire s'oriente respectivement autour de 4 chapitres dont le chapitre 1 est réservé à la présentation de la structure d'accueil et du projet, le chapitre 2 est consacré à la généralité sur le béton, le chapitre 3 présente la qualité du béton frais et durci et enfin le chapitre 4 est de faire l'analyse de la formulation et la production de béton.

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCEUIL ET DU PROJET

I.1-Introduction

Ce chapitre présente la structure d'accueil du projet, en mettant en lumière le rôle du Bureau National d'Études Techniques et de Développement (BNETD), ainsi que les aspects essentiels du projet de la Tour F. La présentation se concentre sur la situation géographique du projet, les missions et objectifs du BNETD, ainsi que les différents domaines d'intervention de cette institution. Le chapitre détaille également la présentation du projet de la Tour F, en abordant son contexte, sa localisation, sa description, et les intervenants impliqués dans sa réalisation. Cette présentation constitue le cadre nécessaire à la compréhension des enjeux du projet et de l'importance du béton dans sa construction.

I.2-Présentation de la structure d'accueil

I.2.1- Historique de l'entreprise

Au lendemain de son indépendance, l'Etat Ivoirien devant se doter de moyens de conception pour stimuler et coordonner son développement, crée par décret le 31 Juillet 1964, le **Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement (BNETD)**. Celui-ci se révéla être une grande innovation grâce aux hommes qui l'animèrent, un moyen puissant et très efficace d'intervention de l'Etat. Le BNETD ne deviendra opérationnel qu'en 1966. A la suite du remaniement ministériel de 1977, ce dernier disparut et sous la tutelle du nouveau ministère celui des Travaux Publics, des Transports, de la Construction et de l'Urbanisme, naissent deux structures :

- ✓ Le Bureau Central d'Etudes Techniques (**BCET**) qui devrait assurer les mêmes objectifs que le premier **BNETD** ;
- ✓ La Direction et Contrôle des Grands Travaux (**DCGTX**) qui deviendra en 1978 et sous les ordres de feu Félix Houphouët Boigny, premier Président ivoirien, l'actuel **Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement (BNETD)**.

Dirigé à sa création par des coopérants français, le BNETD va progressivement se tourner vers les compétences nationales pour assurer sa mission de développement national. Grâce à une vaste expérience acquise au fil du temps et une expertise solide dans la réalisation des études et le

contrôle des projets d'intérêt public, le BNETD se positionne comme l'instrument essentiel en matière de conseil du gouvernement pour la mise en œuvre des grands projets de développement.

I.2.2- Situation géographique

Le siège du Bureau National d'Études Techniques et de Développement (BNETD) est situé à Abidjan, dans la commune de Cocody, sur le boulevard Hassan II, en bordure de la lagune Ébrié. Cette localisation stratégique offre une vue sur la commune du Plateau, située au nord, et permet une accessibilité optimale aux partenaires et clients (Figure I-1).

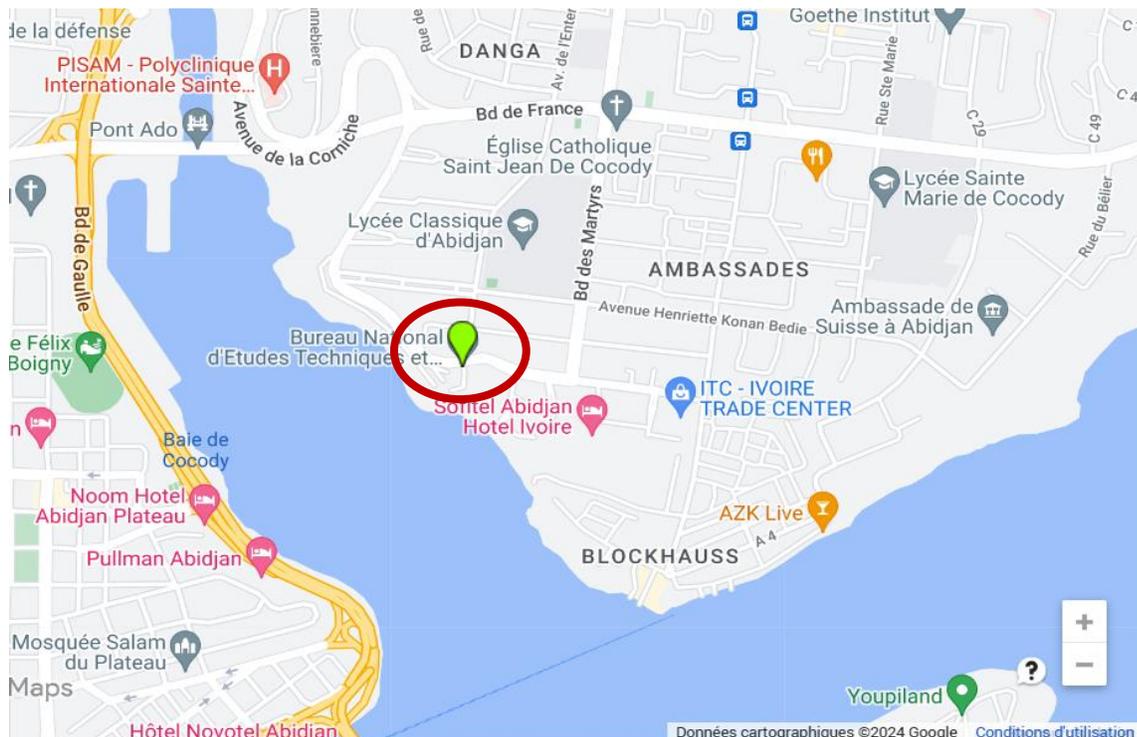


Figure I- 1 : localisation du siège BNETD

I.2.3- Missions et objectifs du BNETD

I.2.3.1- Mission du BNETD

Dans le souci de répondre avec rigueur et efficacité aux besoins de ses clients, Le BNETD exerce ses activités principales autour de quatre missions essentielles :

- Suivi et contrôle des projets : Assurer la conformité des travaux exécutés par rapport aux spécifications techniques et aux normes en vigueur.

- Conception et planification : Élaborer des études techniques et stratégiques pour accompagner le développement du pays.
- Assistance et conseil : Fournir des services d'appui technique et organisationnel aux projets publics et privés.
- Réalisation d'études techniques : Réaliser des analyses techniques détaillées sur les infrastructures et les projets de développement.

I.2.3.2- Objectifs du BNETD

Le BNETD s'est assigné les objectifs suivants :

- Autonomie organisationnelle : Décentraliser les responsabilités au sein de l'administration pour accroître l'autonomie de gestion et l'efficacité des opérations ;
- Maîtrise des délais et des coûts : Optimiser l'exécution des projets pour garantir leur réussite tout en respectant les délais et les budgets ;
- Exploitation des synergies : Favoriser une collaboration interne efficace pour maximiser l'efficacité des actions entreprises.

I.2.3.3- Domaines d'intervention du BNETD

Le BNETD intervient dans plusieurs secteurs stratégiques pour le développement du pays, notamment :

- Infrastructures et transports : Réalisation d'études topographiques, géodésiques et de calculs de structures pour des ouvrages d'art ;
- Urbanisme et aménagement du territoire : Élaboration de plans directeurs et assistance technique aux collectivités locales ;
- Environnement, énergie et hydraulique : Réalisation d'études d'impact environnemental et mise en œuvre de projets de conservation des ressources naturelles ;
- Construction et équipements publics : Études architecturales, techniques et surveillance de la qualité des ouvrages publics.

I.2.3.4- Organisation et fonctionnement du BNETD

Le BNETD dispose d'un personnel qualifié constitué de cadres, d'Ingénieurs et de Techniciens Supérieurs. À l'instar de toutes les sociétés d'État ivoiriennes actuelles, le BNETD est administré par une haute direction composée des entités suivantes :

- Un conseil d'Administration ;
- Une Direction Générale assurée par M. COULIBALY Kinapara depuis fin 2015 ;
- Un Secrétariat Général ;
- Les Directeurs ;
- Les conseillers techniques.

En termes d'organisation, le BNETD est subdivisé en pôles, départements et services. Une mission bien déterminée est assignée à chacune de ces entités qui possèdent les compétences requises pour réaliser les objectifs du bureau, L'organigramme de l'entreprise est représenté à la figure I-2.

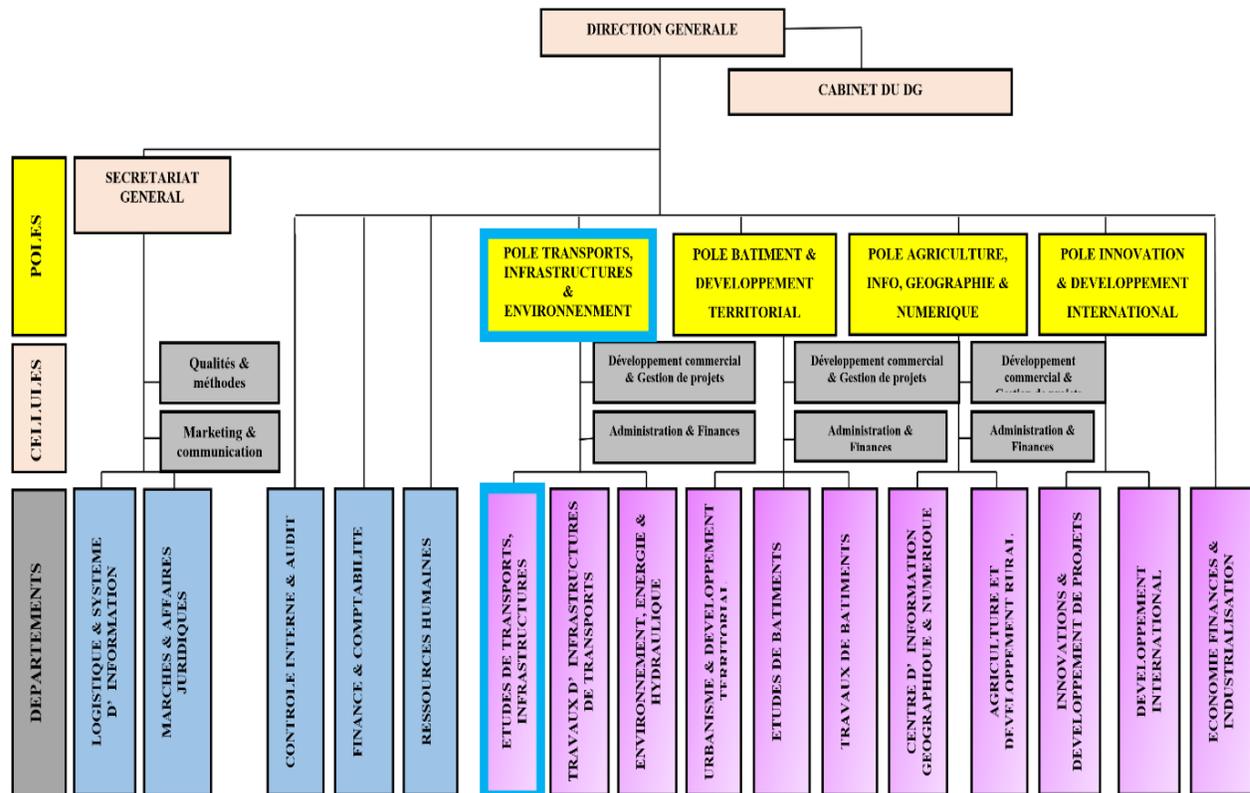


Figure I-2 : Organigramme du BNETD

Dans le cadre de notre stage, nous avons été affectés au Département Travaux de Bâtiment spécifiquement au service Contrôle Travaux Complexes.

I.3-Présentation du projet

I.3.1 - Contexte du projet

Aujourd'hui, les effectifs s'étant accrus, l'administration loue de nombreux locaux à travers la ville pour loger les ministères qui n'ont pas pu trouver une place dans la cité administrative. Ces locaux ne sont pas toujours bien adaptés aux besoins des services, ceux-ci sont repartis en divers endroits de la ville, ce qui entrave leur synergie, nuit au bon fonctionnement et engendre des problèmes de transport. La charge de ces loyers pèse lourdement sur le budget de l'État. La construction de la dernière tour (tour F) de la cité administrative d'Abidjan s'impose donc aujourd'hui comme une nécessité urgente.

La Tour F fait partie des projets phares du ministère ivoirien de la Construction. Elle a été conçue par l'architecte Pierre Fa Khoury, fondateur de PFO Africa., dans le but de créer un symbole de

l'ambition architecturale et du développement durable de la Côte d'Ivoire. Prévue pour accueillir plus de 3 500 fonctionnaires, la tour F développe 120 000 m² de surface hors œuvre sur une parcelle de 1.3 ha soit 13 000 m² et comporte soixante-quinze (75) étages. Elle est posée sur un socle comportant deux (02) niveaux de sous-sols. Elle culminera à plus de 400m de hauteur. Une fois terminée, cette tour sera l'une des plus grandes d'Afrique, avec une hauteur totale de 421 mètres, symbolisant le dynamisme de l'économie ivoirienne.

I.3.2 - Localisation de la zone du projet

La Tour F est située dans le quartier administratif du Plateau, au cœur d'Abidjan, en Côte d'Ivoire. Cet emplacement stratégique la place à proximité des principales infrastructures économiques et politiques du pays, renforçant ainsi son rôle de centre d'affaires. Il est bordé par l'avenue de la gendarmerie au Nord et par l'avenue Jean Paul II à l'Est. Le relief de la zone accueillant la tour est un plateau, sur un sol, en général, constitué de sable argileux (figure I-3).



Figure I-3 : Localisation de la tour F

I.3.3 - Description de l'ouvrage

Le projet de la Tour F comprend deux parties distinctes :

- **La Tour** : Une structure en béton armé d'une hauteur de 330 mètres, avec une flèche supplémentaire de 91 mètres, ce qui donne une hauteur totale de 421 mètres. Elle comprend

75 étages répartis entre des bureaux, des espaces techniques, des salles de réunion et des espaces de conférence, restaurants ;

- **Le Parking** : Un bâtiment de 47 400 m², incluant 688 places de stationnement réparties sur trois niveaux, ainsi que des espaces techniques au sous-sol.

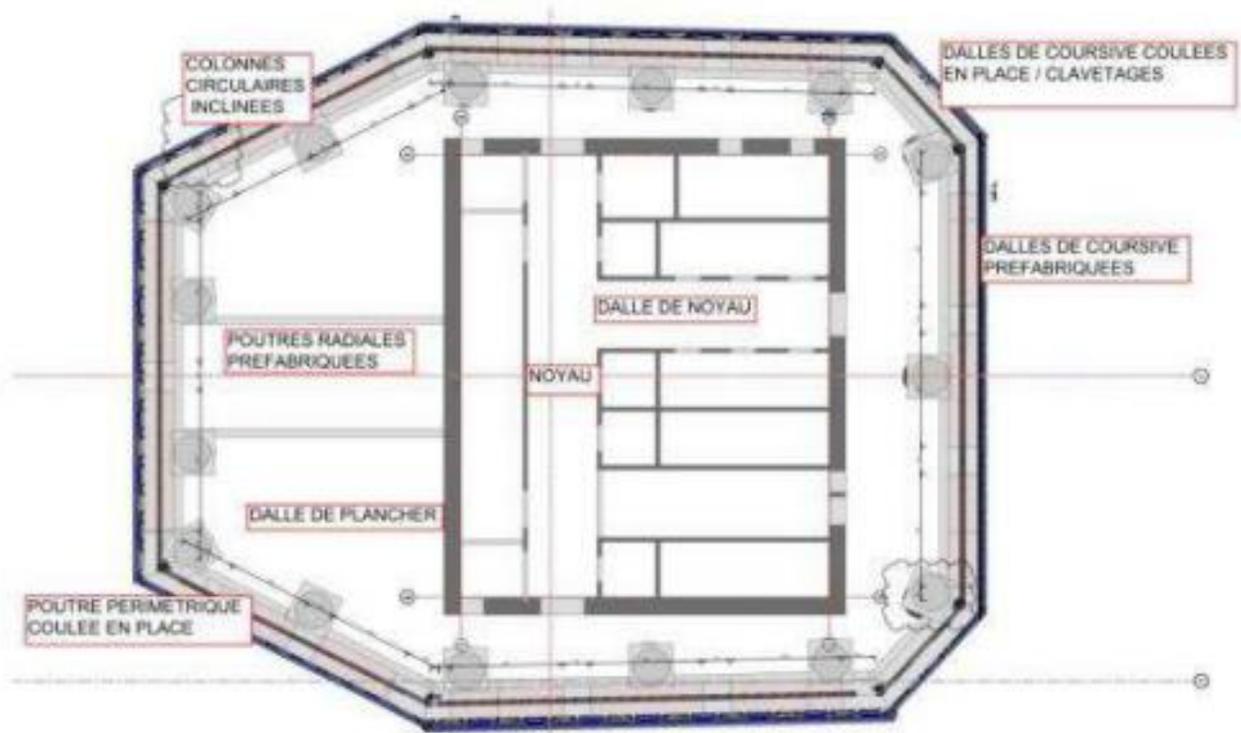


Figure I-4 : vue en plan et dénomination des éléments structurels de la tour

I.3.4 - Intervenants du projet

Les principaux acteurs impliqués dans la réalisation de ce projet sont :

- **PFO Africa** : Opérateur, il assure l'exécution de la mission de financement, de conception et d'exécution des travaux confiée par l'Autorité Contractante **BESIX** : Sous-traitant principal responsable de la structure en béton et des éléments métalliques.

Autre sous-traitant du projet ;

- **CEGELEC**;
- **METAL YAPI**;

- **KYSYTEM;**
- **ARCHITEKNIK;**
- **BNETD** : Assistant Technique au Maitre d'Ouvrage, il est chargé des aspects techniques, administratifs, juridiques, économiques et financiers afin d'assurer la bonne exécution du marché de conception-réalisation.

I.4-Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de définir le contexte dans lequel s'inscrit le projet de la Tour F et de comprendre le rôle du BNETD en tant qu'Assistant Technique à Maitrise d'Ouvrage. La présentation de la structure d'accueil et du projet a mis en lumière les spécifications du site et les objectifs de l'ouvrage, ainsi que les défis architecturaux et techniques associés à la construction de la tour. L'importance d'une maîtrise totale des procédés de fabrication et de mise en œuvre du béton, afin de garantir la stabilité et la durabilité de la structure, a été soulignée. Ce cadre permettra de mieux comprendre les problématiques liées à la formulation et à l'application du béton dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LE BETON

II.1 - Introduction

Le béton est aujourd'hui très sollicité pour répondre à des exigences de performance, de durabilité, et d'esthétique. Pour y parvenir, des recherches ont permis de développer des bétons spéciaux comme les Bétons à Haute Performance (BHP), les Bétons à Très Haute Performance (BTHP), les Bétons Fibrés Métalliques (BFM) ou les Bétons Autoplaçants (BAP). Ces innovations, notamment les BHP, ont révolutionné l'industrie du béton. Initialement prisés pour leur résistance élevée, ces bétons ont connu une évolution remarquable, comme dans le cas des Bétons Fibrés à Ultra Haute Performance (BFUP)[1]. En plus de leur résistance exceptionnelle, les BHP offrent de nombreux avantages. Ils présentent une porosité très réduite, une meilleure résistance aux agents agressifs et, de manière générale, assurent une bonne durabilité. Ces caractéristiques les rendent particulièrement adaptés à la réalisation d'ouvrages soumis à des contraintes élevées ou exposés à des environnements sévères.

II.2 - Etat des lieux de la formulation

Ce chapitre aborde en détail l'état des lieux des formulations de béton utilisées dans le projet de la Tour F, il existe deux classes de résistance sur le chantier C50/60 et C30/37. Nous allons nous intéresser à la classe de résistance C50/60 il serait donc question d'analyser ses spécificités de ses formulations, en termes de composition et de méthodes de mise en œuvre, en lien avec les besoins structuraux de la tour. Ce chapitre explore également les essais réalisés pour vérifier la conformité des matériaux constitutifs du béton, tels que le sable, le gravier, et l'eau de gâchage, et met en lumière les difficultés rencontrées lors du pompage et du coulage du béton. L'objectif est de comprendre les causes des problèmes rencontrés sur le chantier et d'identifier des solutions pour améliorer la qualité du béton et sa reproductibilité.

II.2.1- Formulation C50/60

Sur le chantier, plusieurs formulations de béton (ou mix) ont été testées et utilisées. Depuis le début du projet, des mix spécifiques ont été élaborés pour répondre aux besoins initiaux de la structure plus précisément en termes de fluidité, de résistance, et de maniabilité. Cependant avec l'évolution des travaux certains mix ont été abandonnés en raison des problèmes rencontrés sur le chantier.

II.2.2- Spécificité du mix

La formulation C50/60 est utilisée pour des ouvrages nécessitant une résistance à la compression élevée, soit 50 MPa après 28 jours. Cette formulation est principalement appliquée pour les structures critiques telles que les voiles, les colonnes et autres éléments porteurs. Elle repose sur un rapport eau/ciment strictement contrôlé pour garantir une résistance maximale. L'ajout de super plastifiants permet de maintenir une bonne fluidité sans compromettre la résistance. En plus des agrégats habituels, ces Mix contiennent des adjuvants spécifiques et du ciment CHF 42.5 N à faible chaleur d'hydratation. Par ailleurs, nous avons l'utilisation de certains additifs à l'instar de la fumée de silice et du laitier qui jouent un rôle prépondérant dans l'amélioration des parements des éléments d'ouvrage béton. Compte tenu de la complexité des ouvrages à réaliser, la formulation de béton a été accentuée sur un pourcentage élevé d'élément fin ; ce qui conduit à l'utilisation de deux types de sable (le 0/2 sable de lagune et le 0/4 concassé).

II.2.3- Spécificité des ouvrages réalisés avec cette classe de résistance de béton

Les ouvrages réalisés avec cette formulation incluent des éléments verticaux tels que les voiles et les colonnes, les bâches à eau mais également des éléments horizontaux (dalles et poutres radiales) soumis à des charges importantes. La formulation C50/60 garantit la durabilité et la résistance à long terme des structures, même dans des conditions environnementales difficiles.

II.3 - Les différents types de béton

Le béton est classé en fonction de plusieurs critères qui déterminent ses caractéristiques, ses performances et son aptitude à répondre aux exigences spécifiques des projets de construction. Ces critères incluent la résistance à la compression, la consistance, la durabilité, l'exposition à des conditions environnementales spécifiques, ainsi que les matériaux utilisés dans sa formulation.[2]

II.3.1 - Suivant la Résistance à la compression

L'un des critères les plus importants pour classer le béton est sa résistance à la compression, exprimée en mégapascals (MPa). Cette résistance est généralement mesurée après 28 jours de durcissement. En fonction de cette résistance nous avons :

- **Béton ordinaire** : Résistance variant entre 15 et 30 MPa.

- **Béton haute performance (BHP)** : Résistance supérieure à 50 MPa, utilisé pour des applications nécessitant une résistance exceptionnelle, comme dans les structures porteuses critiques.
- **Béton précontraint** : Peut dépasser 100 MPa, conçu pour les éléments structurels soumis à de fortes sollicitations.

Outre la résistance à la compression, certains types de béton sont classés en fonction d'autres propriétés mécaniques, telles que la résistance à la traction et à la flexion. Le béton fibré, par exemple, est renforcé avec des fibres (en acier ou en polymères) pour améliorer sa résistance à la traction et éviter la fissuration.

II.3.2 - Suivant la Consistance (ouvrabilité)

La consistance du béton définit sa capacité à être manipulé, coulé et mis en place sans séparer les granulats. Elle est mesurée par le test d'affaissement (slump test) ou d'étalement (flow test) pour les bétons très fluide. Les types de béton sont ainsi classés en fonction de leur fluidité, la norme NF EN 206/CN indique 3 classes de consistance de béton comme indiqué dans le tableau II-1.

Tableau II-1 : Classe de consistance du béton

CLASSE DE CONSISTANCE	ETALEMENT EN mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

II.3.3 - Suivant l'exposition aux conditions environnementales

Le béton peut être classé selon les conditions climatiques et environnementales auxquelles il sera exposé. Les différents types de béton sont adaptés aux environnements spécifiques pour garantir leur longévité et leur performance :

- **Béton pour environnement marin** : Résistant aux agressions des chlorures présents dans l'eau de mer.
- **Béton résistant aux sulfates** : Utilisé dans des sols ou des eaux contenant des sulfates, qui peuvent attaquer le béton.

Les classes d'exposition sont définies par la norme **NF206-1** (Tableau II-2).

Tableau II-2 : Les classes d'exposition défini par la norme NF206-1.

Classe d'exposition		
Courantes	X0	Béton non armé ne subissant aucune agression
	XC	Béton soumis à la carbonatation risque de carbonatation
	XF	Béton soumis à des cycles de gel/dégel
Particulière	XS	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
	XD	Corrosion induite par des chlorures ayant une origine autre que marine
	XA	Béton soumis à des attaque chimiques

II.3.4 - Suivant la Durabilité

La durabilité du béton désigne sa capacité à résister aux agressions physiques, chimiques et climatiques sur le long terme. Elle est particulièrement importante dans les projets où les conditions environnementales peuvent être sévères, comme dans les zones soumises au gel/dégel ou aux attaques chimiques. Le béton haute performance (BHP) est souvent privilégié dans ces cas pour sa durabilité exceptionnelle.

II.3.5 - Suivant la Masse volumique

Le béton peut également être classé en fonction de sa densité, ce qui influence son poids et ses propriétés isolantes. D'après la norme **NF EN 206+A2/CN** nous avons :

- **Béton léger** : Fabriqué avec des granulats légers, il est utilisé dans des applications nécessitant un faible poids, comme les structures porteuses ou les toitures (masse volumique comprise entre 800 et 2 000 kg/m³).
- **Les bétons de masse volumique normale** (2 000 à 2 600 kg/m³)

- **Béton lourd** : Utilisé pour des applications nécessitant une grande densité, comme la protection contre les radiations (masse volumique supérieure à 2 600 kg/m³).

II.3.6 - Suivant les Granulats utilisés

Les granulats (sable, gravier, etc.) sont des matériaux essentiels dans la composition du béton. Leur nature et leur taille influencent la résistance, la durabilité et la texture du béton. Par exemple, des granulats recyclés peuvent être utilisés pour des applications moins exigeantes, tandis que des granulats spécifiques sont employés pour des bétons haute performance.

Cette classification permet de choisir le type de béton le mieux adapté aux besoins spécifiques d'un projet, que ce soit pour des éléments structurels, des revêtements décoratifs ou des applications dans des conditions extrêmes. Le choix de la formulation et des matériaux constitutifs est crucial pour assurer la performance, la durabilité et la sécurité des ouvrages.

II.3.7 - Rhéologie du béton

La rhéologie est la science qui étudie la déformation et l'écoulement des matériaux sous l'effet des contraintes appliquées. Elle examine les propriétés fondamentales des matériaux, tel que leur élasticité, leur plasticité et leur viscosité. La rhéologie du béton quant à elle étudie son comportement sous des contraintes. Les principaux paramètres étudiés incluent la **Viscosité** (Elle décrit la résistance du béton à l'écoulement. Un béton trop visqueux peut poser des problèmes de mise en œuvre), la **Fluidité** (La capacité du béton à se déplacer et remplir les coffrages sans se séparer), la **Rhéométrie** (elle permet de caractériser la résistance à l'écoulement du béton sous différentes conditions de contraintes).[3]

II.4 - Les éléments constitutifs du béton

II.4.1 - Les granulats

Les granulats sont des matériaux inertes, de texture granulaire, utilisés comme composant principal dans la fabrication du béton. Ils peuvent être de deux types principaux : roulés, lorsqu'ils sont transportés et déposés par les cours d'eau, ou concassés, lorsqu'ils sont obtenus par broyage en carrière. Avant 1983, ces matériaux étaient appelés « agrégats » dans les normes techniques. Un granulats est constitué d'un ensemble de grains minéraux classés selon leur taille, allant des

particules fines (sables) aux gravillons et cailloux, avec des dimensions granulométriques comprises entre 0 et 125 mm.[4] Ces matériaux proviennent de différentes sources :

- **Origine alluvionnaire, terrestre ou marine** : obtenus à partir de gisements de sable et de gravier, souvent situés dans des lits de rivières, des zones côtières ou terrestres.
- **Roches massives** : issues du concassage de calcaires, de granites ou de roches volcaniques.
- **Recyclage** : dérivés de la valorisation des matériaux de construction provenant de démolitions, ce qui contribue à une approche plus écologique et durable.

Les caractéristiques des granulats, notamment leur nature, leur forme et leurs propriétés mécaniques, dépendent du type de gisement exploité et des méthodes de production utilisées. Une de leurs caractéristiques fondamentales est la granulométrie, qui correspond à la répartition des dimensions des grains. Cette granulométrie est mesurée par une analyse granulométrique, réalisée à l'aide de tamis calibrés.

Les granulats jouent un rôle clé dans la composition et les propriétés du béton, en influençant sa compacité, sa maniabilité, et sa résistance mécanique.

II.4.2 - Ciment

Le ciment est un liant hydraulique essentiel dans la fabrication du béton. Il se présente sous forme de poudre fine obtenue par un processus de cuisson à haute température (environ 1450 °C) et de broyage d'un mélange minéral composé principalement de calcaire (CaCO_3) et d'argile. Ce processus produit un matériau intermédiaire appelé clinker, qui constitue le principal ingrédient du ciment. Lorsqu'il est mélangé à de l'eau, le ciment forme une pâte qui prend progressivement et durcit, tout en conservant sa résistance et sa stabilité, même en milieu humide ou aquatique. Cette propriété explique son appellation de liant hydraulique[5]. Le ciment est fabriqué à partir des matières suivantes :

- **Le Clinker** :

Il est obtenu par cuisson de matières premières contenant de la chaux (CaO), de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3) et de l'oxyde de fer (Fe_2O_3), jusqu'à fusion partielle. Le clinker est ensuite refroidi rapidement et broyé.

➤ **Le laitier de haut fourneau :**

C'est un sous-produit issu du refroidissement rapide de la scorie liquide provenant des hauts fourneaux. Il est ajouté pour améliorer la durabilité et réduire l'impact environnemental du ciment.

➤ **La Pouzzolanes et les cendres volantes :**

Ce sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux naturels ou artificiels. Les pouzzolanes sont des roches volcaniques, tandis que les cendres volantes proviennent des centrales thermiques. Ces ajouts confèrent au ciment des propriétés spécifiques, notamment une meilleure résistance chimique.

➤ **Les Fillers calcaires :**

Ils sont obtenus par le broyage de roches calcaires de qualité. Ils améliorent certaines propriétés du ciment, comme sa maniabilité et sa finition.

Grâce à cette composition variée, les ciments offrent des propriétés adaptées à des usages spécifiques, tels que la construction de structures résistantes, durables et adaptées aux contraintes environnementales.

On distingue 5 types de classe de ciment :

- **CEM I :** Ciment Portland ;
- **CEM II :** Ciment Portland Composé ;
- **CEM III :** Ciment de Haut Fourneaux ;
- **CEM IV :** Ciment Pouzzolanique ;
- **CEM V :** Ciment Composé ;

Les matériaux qui entrent dans la composition de ces différents types de ciment sont le clinker portland (K), le laitier granule de haut fourneau (S), les matériaux pouzzolaniques, les cendres volantes le schiste calciné, le calcaire, et les fumées de silice. Les compositions détaillées des ciments sont en annexe D.

Selon la résistance, trois classes courantes qui sont : classe 32.5 ; classe 42.5 ; classe 52.5. La résistance courante d'un ciment est la résistance à la compression déterminée conformément à la norme NF EN 196-1 2016, mesurée à 28 jours elle doit être conforme à l'exigence du **tableau**

II.3. A chaque classe de résistance courante correspond deux classes de résistances à cours termes, une classe de résistance à court terme ordinaire, notée N et une classe de résistance à court terme élevée, notée R.

Tableau II-3 : Exigences mécanique et physique des valeurs caractéristiques

Classe de résistance	Resistance a la compression MPa				Temps de prise min
	Resistance à court terme		Resistance courante		
	2jours	7 jours	28 jours		
32.5 N	-	16.0	32.5	52.5	75
32.5 R	10.0	-			
42.5 N	10.0	-	42.5	62.5	60
42.5 R	20.0	-			
52.5 N	20.0	-	52.5	-	45
52.5 R	30.0	-			

II.4.3 - Eau de gâchage

L'eau joue un rôle essentiel dans la composition du béton. Elle est incorporée au mélange pour hydrater le ciment, déclenchant ainsi les réactions chimiques nécessaires à la prise et au durcissement du béton. De plus, elle garantit la cohésion entre les différents constituants, tout en améliorant la maniabilité du mélange, ce qui facilite sa mise en œuvre sur le chantier. Cependant, pour assurer une qualité optimale du béton, il est impératif que l'eau utilisée soit propre, exempte d'impuretés ou de substances nuisibles. Par ailleurs, la quantité d'eau doit être strictement contrôlée. Un excès d'eau peut entraîner une augmentation de la porosité du béton, réduisant ainsi sa résistance mécanique et sa durabilité. À l'inverse, une quantité insuffisante peut nuire à l'hydratation complète du ciment, compromettant les performances finales du béton.

II.4.4 - Les adjuvants

Les adjuvants sont des substances chimiques incorporées en petite quantité (< 5 % du poids du ciment) dans la formulation du béton au moment de sa fabrication. Leur objectif principal est d'améliorer les performances du béton, tant à l'état frais qu'à l'état durci, tout en préservant ses caractéristiques fondamentales telles que sa durabilité, sa résistance mécanique, et sa stabilité. Ils permettent d'adapter le comportement du béton en fonction des exigences spécifiques des projets de construction. [5] Les adjuvants sont classés en plusieurs catégories en fonction de leur effet sur les propriétés du béton.

II.4.4.1 - Adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton

Ces adjuvants influencent le comportement rhéologique (fluidité, viscosité) du béton, des mortiers et des coulis à l'état frais, avant le début du durcissement. Ils agissent en réduisant le seuil de cisaillement de la pâte et en modifiant sa viscosité, ce qui améliore la maniabilité du béton sans nécessiter une augmentation de la quantité d'eau. On distingue :

➤ Les plastifiants

Qui augmentent l'ouvrabilité du béton en réduisant la quantité d'eau nécessaire pour une consistance donnée. Ils permettent de produire un béton plus maniable tout en conservant la résistance mécanique. Exemples : Lignosulfonates (agents naturels), SP1 (BASF)

➤ Les superplastifiants

Plus performants, offrent une fluidité exceptionnelle au béton, rendant possible la fabrication de bétons autoplaçants (BAP). Ils sont souvent utilisés pour des éléments complexes ou des coffrages étroits nécessitant un béton très fluide. Exemples : Polycarboxylates éthers (PCE), Sika Viscocrete. Ces adjuvants trouvent leur application courante dans les bétons autoplaçants, les éléments préfabriqués et coulis pour injections.

II.4.4.2 - Adjuvants modifiant la prise et le durcissement du béton

Ces adjuvants influencent la cinétique d'hydratation du ciment en accélérant ou en ralentissant les réactions chimiques responsables de la prise et du durcissement du béton on distingue :

➤ Les Accélérateurs de prise :

Ils réduisent le temps de prise du béton, ce qui est particulièrement utile dans des conditions climatiques froides ou pour des travaux nécessitant une mise en service rapide (par exemple, réparations urgentes, préfabrication rapide). Exemples : Chlorure de calcium (CaCl_2), Sika Rapid1

➤ **Les Retardateurs de prise :**

Ils augmentent le temps de prise du béton, permettant une manipulation prolongée, notamment dans des climats chauds ou lors de travaux nécessitant un transport sur de longues distances. Exemples : Glucides modifiés, Chryso Retardateur 100.

Ils trouvent leurs applications courantes dans le cas des bétons utilisés dans des environnements climatiques extrêmes, les travaux nécessitant un décoffrage rapide ou prolongé.

II.4.4.3 - Adjuvants modifiant certaines propriétés spécifiques du béton

Ces adjuvants sont conçus pour améliorer des propriétés spécifiques du béton, souvent liées à sa durabilité ou à son comportement en conditions particulières.

On distingue :

➤ **Les Entraîneurs d'air :**

Ils favorisent la formation de microbulles d'air uniformément réparties dans le béton. Cela améliore la résistance au gel/dégel en réduisant les risques de fissuration dus à la dilatation de l'eau gelée. Exemples : Vinsol Resin, MasterAir (BASF).

➤ **Les Hydrofuges de masse :**

Ils diminuent l'absorption capillaire du béton durci, ce qui améliore sa résistance à l'eau et réduit les infiltrations. Ces adjuvants sont souvent utilisés pour des ouvrages exposés à des environnements humides ou submergés (bassins, fondations). Exemples : Sika Watertight Concrete Powder, Mapei Dynamon SX.

➤ **Les Rétenteurs d'eau :**

Ils permettent d'augmenter l'homogénéité et la stabilité du mélange en empêchant la ségrégation des granulats et la perte d'eau par suintement. Ils sont souvent utilisés dans les mortiers pour améliorer leur adhérence. Exemples : Cellulose éthérée, Chryso Cure.

Ils sont généralement utilisés dans les bétons exposés à des cycles de gel/dégel, les bétons hydrauliques et les mortiers de réparation. Les adjuvants constituent des outils essentiels pour adapter les performances du béton aux besoins spécifiques des projets de construction. Qu'il s'agisse d'améliorer la maniabilité, d'ajuster le temps de prise, ou de renforcer la durabilité du béton, ils permettent une grande flexibilité dans les formulations. Leur utilisation judicieuse garantit un béton plus performant, adapté aux exigences structurelles, environnementales et climatiques, tout en optimisant la qualité et l'efficacité des travaux.

II.4.5 - Les additifs

Les additifs sont des matériaux incorporés dans le béton ou le ciment pour améliorer leurs propriétés spécifiques. Contrairement aux adjuvants, ils sont utilisés en plus grande quantité et influencent durablement la composition et les performances du béton. Parmi les additifs les plus courants, on trouve la fumée de silice et le laitier de haut fourneau.

II.4.5.1 - Fumée de silices

Selon la norme NF P 18-502, la fumée de silice est une poudre ultrafine résultant de la production d'alliages de silicium. Elle est composée de particules sphériques très fines (environ 0,1 μm), soit 100 fois plus petites que les grains de ciment, avec une surface spécifique comprise entre 20 et 25 m^2/g . La fumée de silices présente plusieurs avantages notamment : l'amélioration de l'homogénéité du mélange et la fermeture des pores entre les grains de ciment, créant une matrice plus dense. Elle réduit également la porosité et la perméabilité, augmentant la résistance du béton à l'eau et aux agents agressifs, renforce la résistance mécanique à la compression et à la traction, améliore la durabilité du béton dans les environnements agressifs (milieux marins ou industriels). Cet additif en particulier trouve son application dans les bétons haute performance (BHP), ouvrages marins, bétons précontraints.[6]

II.4.5.2 - Laitier à haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de l'industrie sidérurgique, obtenu par le refroidissement rapide des scories issues de la fusion du minerai de fer. Il est composé principalement de silicates, d'aluminosilicates et de calcium, qui réagissent avec l'eau pour améliorer les performances du béton. Son utilisation dans le béton lui confère plusieurs avantages notamment : Augmente la durabilité du béton, en particulier contre les attaques chimiques (sulfates,

chlorures), renforce la résistance mécanique à long terme tout en réduisant la perméabilité, diminue l'impact environnemental en valorisant un sous-produit industriel et en réduisant la consommation de clinker dans le ciment. Ils trouvent son application dans les Bétons exposés à des environnements agressifs (milieux marins, sols sulfatés), ouvrages nécessitant une grande durabilité (ponts, tunnels, barrages)[7].

La fumée de silice et le laitier de haut fourneau sont des additifs essentiels dans les formulations modernes de béton. Ils améliorent significativement la résistance, la durabilité et la densité du béton tout en contribuant à réduire son impact environnemental grâce à la valorisation de sous-produits industriels.

II.5 - Les méthodes d'élaboration des formulations du béton

La formulation d'un béton vise à déterminer le mélange optimal des différents constituants (granulats, ciment, eau, et éventuellement des adjuvants) afin d'obtenir un matériau aux propriétés répondant aux exigences spécifiques de l'ouvrage. Cette démarche est essentielle pour garantir à la fois la résistance, la durabilité, et la maniabilité du béton.[8] Les méthodes de composition se répartissent généralement en deux grandes catégories :

II.5.1- Méthodes à "granularité continue"

Ces méthodes se caractérisent par une courbe granulométrique qui s'élève de manière progressive et régulière, allant des plus petites particules (ciment, diamètre moyen de $\approx 6,3 \mu\text{m}$) jusqu'aux grains les plus gros (graviers, diamètre maximal DD). Une granularité continue permet une meilleure compacité des granulats, réduisant les vides et nécessitant moins de pâte de ciment pour les combler. Ces méthodes sont largement utilisées pour les bétons courants et les bétons autoplaçants. Elle présente quelques avantages notamment : la Meilleure compacité du béton, le béton plus plastique, offrant une ouvrabilité améliorée, la réduction du retrait et du fluage grâce à une distribution uniforme des grains.

II.5.2- Méthodes à "granularité discontinue"

Ces méthodes se distinguent par une courbe granulométrique présentant un ou plusieurs paliers, indiquant l'absence d'éléments intermédiaires dans la composition. Cela crée une structure où les grains de granulats sont regroupés par catégories distinctes (fins et grossiers), augmentant la densité

interne du béton. Cette méthode présente plusieurs avantages, notamment : les Bétons obtenues présentent des résistances à la compression légèrement supérieure, la réduction des coûts en granulats, grâce à l'utilisation ciblée de fractions spécifiques. Mais l'ouvrabilité ici est plus faible, nécessitant parfois l'ajout de plastifiants pour améliorer la maniabilité. Cette méthode est utilisée pour des bétons spécifiques nécessitant une haute résistance mécanique, comme les bétons précontraints ou les ouvrages très sollicités.

II.5.3- Principales méthodes de formulation

Plusieurs méthodes permettent de définir les proportions optimales des constituants du béton en fonction des exigences techniques :

➤ **Méthode Baron**

Elle basée sur l'équilibre entre les granulats et la pâte de ciment, cette méthode privilégie la compacité et la maniabilité. Elle est souvent utilisée pour des formulations à granularité continue.

➤ **Méthode Bolomey**

Cette méthode repose sur une relation entre la résistance à la compression et le rapport eau/ciment. Elle est simple et bien adaptée aux bétons courants.

➤ **Méthode de Féret**

Elle Introduit une relation entre la compacité du béton et sa résistance mécanique, prenant en compte le volume absolu des granulats et du ciment.

➤ **Méthode Faury**

Cette méthode privilégie l'optimisation granulométrique pour réduire les vides entre les grains, augmentant ainsi la densité et la résistance du béton.

➤ **Méthode Dreux-Gorisse**

Elle est la plus utilisée dans les pays francophones, elle combine des principes empiriques et scientifiques pour optimiser les proportions des constituants en fonction de la résistance et de l'ouvrabilité recherchées.

La formulation du béton est une étape cruciale pour garantir la qualité et les performances du matériau. Les méthodes à granularité continue sont aujourd'hui privilégiées pour leur équilibre entre compacité, maniabilité et durabilité. Le choix de la méthode de formulation dépend des exigences spécifiques du projet (résistance, environnement, type de structure) et des ressources disponibles. L'adoption de techniques modernes, comme la méthode Dreux-Gorisse, permet de concilier efficacité et précision dans la composition des bétons.

II.5.4- Paramètres principaux à définir

Pour formuler un béton, plusieurs paramètres fondamentaux doivent être pris en compte :

- La maniabilité : elle assure une bonne mise en œuvre du béton dans les coffrages.
- La nature du ciment : Détermine la prise, la durabilité et la résistance à long terme.
- La résistance caractéristique du béton (f_{c28}) : Correspond à la résistance minimale requise à 28 jours, avec une marge de sécurité de 15 % pour atteindre la résistance moyenne (σ_{c28}).
- Le type et la granulométrie des granulats : Influencent la compacité, la résistance et l'ouvrabilité.
- **Temps de durcissement** : La durée nécessaire pour que le béton atteigne sa résistance maximale, influencée par la température et l'humidité.

II.5.5- Exigence de formulation pour la résistance

Le béton est généralement formulé pour atteindre une résistance moyenne en compression à 28 jours (σ_{c28}), qui doit être supérieure d'environ 15 % à la résistance caractéristique minimale (f_{c28}). Nécessaire pour assurer la stabilité de l'ouvrage. Cette marge de sécurité permet de compenser les variations liées à la qualité des matériaux et aux conditions de mise en œuvre.

II.6 - Méthode de production et de mise en œuvre du béton

II.6.1- Méthode de production du béton

Il faut noter qu'avant d'autoriser la production du béton, outre le volet réception de l'élément d'ouvrage à bétonner, ces prérequis sont impérativement respectés :

- La Fiche technique du béton doit être validée
- Condition météo doit être compatible pour le coulage du béton (température, pluie ...)
- Formulation adapter dans le cas contraire refus de bétonnage

Le béton est produit via la centrale à béton ELKON installée sur le site. Une fois la toupie chargée, elle passe au laboratoire afin que les différents tests inscrits dans la fiche technique du Mix puissent être réalisés. Si les tests sont concluants, la toupie est autorisée à descendre vers la pompe à béton stationnaire (Pompe SCHWING) ou mobile en vue d'y verser son contenu. Après le déversement de son contenu dans la pomme stationnaire, le béton est acheminé dans le voile ou sur le couvrant dédié via une conduite de bétonnage installée à cet effet.

Le béton C50/60 est mis en œuvre à l'aide de pompes à haute performance, en veillant à respecter les conditions de température et d'humidité pour éviter toute altération des propriétés du béton. Une attention particulière est accordée à la cure du béton, qui doit être réalisée sur une période minimale de 7 jours pour assurer un durcissement optimal et prévenir la formation de fissures. Le respect des délais de bétonnage et la cure du béton restent essentiels pour garantir des propriétés optimales. La figure III-1 présente le processus de production du béton

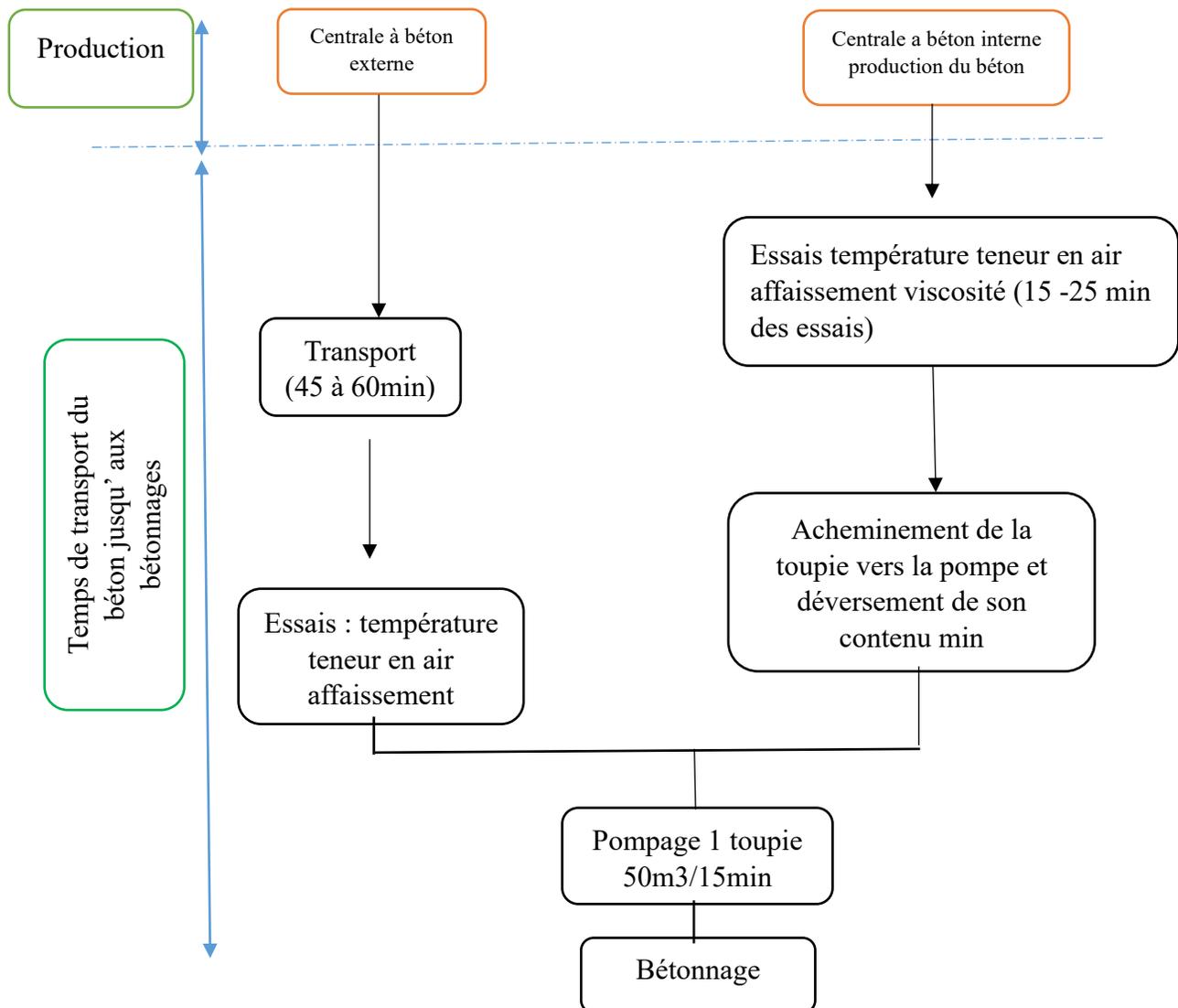


Figure II-1 : Processus de production du béton

II.6.2- Principe de mise en œuvre du béton

II.6.2.1- Pompage et bétonnage

Le béton est déversé dans le coffrage ou zone de bétonnage, via une pompe à béton (fixe, ou mobile) l'ensemble des phases de bétonnage sera réalisé en respectant les règles de bonnes pratiques qui sont :

- ✓ Le Godet, la hauteur de chute ≤ 1.5 m,
- ✓ Pompe, longueur/ hauteur du noyau ≤ 1.5 m,
- ✓ Le temps entre la fabrication et la mise en place du béton doit respecter au plus le critère d'acceptation,
- ✓ Eviter de dépasser le délai lors de la livraison pour le bétonnage.

II.6.2.2- Vibration

L'étape de la vibration est indispensable pour que le béton puisse se mettre en place. En effet, la vibration du béton aide à sa mise en place d'une part et d'autre part permet de faire remonter les bulles d'air à la surface accordant ainsi une meilleure compacité au béton.

II.6.2.3- Cure

La cure est un traitement indispensable des éléments béton. En effet, faire la cure du béton permet de réduire le retrait excessif de l'eau par évaporation créant les micro fissures sur l'ouvrage réalisé. La cure du béton lui octroie un durcissement contrôlé. Les produits utilisés pour la cure peuvent être soit des produits liquides ou un géotextile imbibé d'eau

II.7 - Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier les bases fondamentales du béton et de comprendre l'importance de ses différents composants et paramètres dans la réalisation d'un béton de qualité. La composition du béton, ainsi que l'utilisation d'adjuvants spécifiques, jouent un rôle déterminant dans ses propriétés mécaniques et sa durabilité. De plus, la maîtrise des méthodes de formulation et de la rhéologie du béton est essentielle pour garantir une mise en œuvre optimale sur les chantiers. Les connaissances acquises sur ces aspects fondamentaux serviront de base pour analyser les

formulations spécifiques utilisées dans le projet de la Tour F, et pour comprendre les défis techniques rencontrés.

CHAPITRE III : QUALITE DU BETON FRAIS ET DURCI

III.1 Introduction

Dans cette partie, nous présenterons les matériaux, les équipements utilisés ainsi que les procédures expérimentales. Tout d'abord, nous détaillerons les matériaux employés dans notre projet, notamment les types de ciment utilisés sur le chantier, le gravier, le sable et les adjuvants, en mettant l'accent sur leurs propriétés chimiques, physiques et minéralogiques. Ensuite, nous décrirons les méthodes de caractérisation du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci avant d'aborder le point sur les difficultés rencontrés et l'approche de résolution des problèmes.

III.2 Matériaux utilisés

III.2.1- Ciment

Le ciment utilisé pour la formulation du béton est de type CFA (Ciment de Fonctionnement et d'Adhésion), conforme aux normes ISO. Des tests ont été réalisés pour vérifier sa résistance et son comportement à l'hydratation. Le ciment utilisé garantit une prise rapide, une résistance à la compression élevée et une durabilité optimale pour les conditions climatiques locales. Le ciment utilisé est le CHF 42.5 de la société SCA (Société de ciment d'Abidjan). Il faut noter que dans certaines formulations de béton C50/60 nous avons utilisés deux types de ciment à savoir le CPA 52.5 et le CHF 42.5. En effet, la durée de réalisation d'un niveau de couvrant ou de noyau ne permet pas d'attendre 28 jours d'âge du béton avant de réaliser le niveau supérieur. Par ailleurs, la technique de réalisation du noyau avec le coffrage grim pant exige l'obtention de 20MPa après 24Heure. Il était donc impératif de booster la résistance afin d'obtenir la valeur de 28 jours dès les 7jours du béton compte tenu du planning des travaux qui exige une accélération des tâches Les caractéristiques physiques du ciment sont représentées dans le tableau III-1.

Tableau III-1 : Propriétés physique du ciment

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique	2.98
Stabilité	1 mm
Temps de début de prise	250 min
Temps fin de prise	360min
Chaleurs d'hydratation	210j/g
Température livraison ciment vrac	Maxi 65°C



Figure III-1 : Silo de ciment CHF 42.5

III.2.2- Eau de gâchage

L'eau de gâchage a été contrôlée pour s'assurer qu'elle est propre et ne contient pas d'impuretés. Une eau de qualité est essentielle pour garantir une bonne hydratation du ciment et éviter toute contamination qui pourrait affecter la prise et la durabilité du béton. Toutes les eaux déclarées potable peuvent être utilisées pour faire le gâchage. L'eau de mer est interdite pour le béton armé et précontraint à cause de sa teneur en chlore (sel dissous) élevé

III.2.3- Les granulats

Les granulats utilisés proviennent de la carrière CADERAC et LDK située sur le PK 44 autoroute du nord et dans la commune de Koumassi se sont :

- Le sable de lagune de classe granulaire 0/2,
- Le concassé 0/4
- Le gravier 5/15.

Le sable utilisé dans le projet a été testé pour s'assurer de sa conformité avec les spécifications. Il a été vérifié qu'il ne contenait pas d'impuretés susceptibles d'altérer les propriétés du béton. Le sable respecte également la norme de granulométrie pour garantir une bonne compacité et une résistance optimale.

Les granulats (gravier) ont été soumis à des tests de qualité afin de vérifier leur résistance et leur compatibilité avec les autres composants du béton. Le gravier utilisé dans le projet a montré de bonnes caractéristiques mécaniques et respecte les normes en vigueur.

III.2.4- Les adjuvants

Dans le but d'atteindre les résistances mécaniques élevées nous utilisons comme adjuvants, le sika tempo 12 et le sika viscocret 492 qui sont des superplastifiants et le sika plastiretard qui est un retardateur de prise. Les caractéristiques des adjuvants du Sika tempo 12, le Sika viscocret 492 et le sika-plastiretard sont présentées dans le tableau III-2

Tableau III-2 : caractéristiques des adjuvants

Adjuvants	Sika tempo 12	Sika viscocret 492	Sika-platiretard
Apparence	Liquide brun de couleur clair	Liquide de couleur brun	Liquide de couleur brun fonce
Densité	1.060± 0.020	1.08 ±0.03	1.1±0.040
PH	5.5±1.0	5±1.0	5±1.0
Extrait sec	29.5±1.4%	38± 1.5%	-

Teneur en chlorure	≤0.1 %	≤0.1%	≤0.1%
Fonction	Augmente la maniabilité du béton	Augmente la maniabilité du béton.	Retarde le temps de prise du béton

Les adjuvants utilisés dans la formulation du béton ont été choisis pour leurs propriétés améliorant la fluidité, le retard de prise. Des tests ont été réalisés pour vérifier leur efficacité dans la formulation C50/60 et C30/37. Les résultats ont confirmé que les adjuvants utilisés respectaient les critères de performance exigés.

Les hydrofuges de masse sont des produits incorporés directement dans le mélange de béton pour limiter l'infiltration d'eau à travers les pores et les capillaires. Ils agissent en rendant le béton plus imperméable, sans pour autant altérer ses propriétés plastiques (comme sa maniabilité ou sa mise en œuvre) ni son aspect esthétique. Les hydrofuges de masse réduisent l'infiltration de l'eau dans les pores et capillaires du béton, tout en préservant ses propriétés plastiques et esthétiques. Leur dosage moyen est de 0,5 à 2 % du poids du ciment. Il permet de confectionner un béton étanche (fondation, radier bâche à eau ...). Ils se combinent à la chaux du ciment pour former des cristallisations complémentaires qui obstruent les capillaires du mortier ou du béton. Le Tableau III-3 présente les caractéristiques de l'hydrofuge de masse utilisé sur le chantier.

Tableau III-3 : Caractéristique de l'hydrofuge de masse

Aspect	Couleur	Densité	PH	Extrait sec	Teneur en chlorures CL ⁻
Liquide	Blanche	1.010±0.010	8.50±1.00	6.80%±0.70%	≤0.1%

III.3 Méthodes expérimentales

L'étude de la composition du béton, consiste à définir le mélange des différents constituants (granulats, ciment, eau, adjuvants) dans le but de garantir que le béton réponde aux exigences de

qualité pour la construction de l'ouvrage. La méthode de Dreux Gorisse qui reste la méthode la plus utilisée dans nos pays sera utilisée dans cette étude.

III.3.1- Méthodes de Dreux Gorisse

Cette méthode nous permet de déterminer de manière optimale les valeurs des matériaux, nécessaires pour la confection d'un m³ de béton. Plusieurs étapes de calcul sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique du béton :

➤ Détermination du rapport E/C .

Le rapport E/C est calculé grâce à la formule de BOLOMEY :

$$\sigma_{c28} = G' \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Avec : σ_{c28} la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa, σ'_c la classe vraie du ciment à 28 jours d'âge, C le dosage en ciment en Kg par m³ de béton, E le dosage en eau total sur matériaux secs en l/m³ de béton, G' le coefficient granulaire, fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats.

➤ Détermination de C

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure III-4 en fonction des valeurs C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

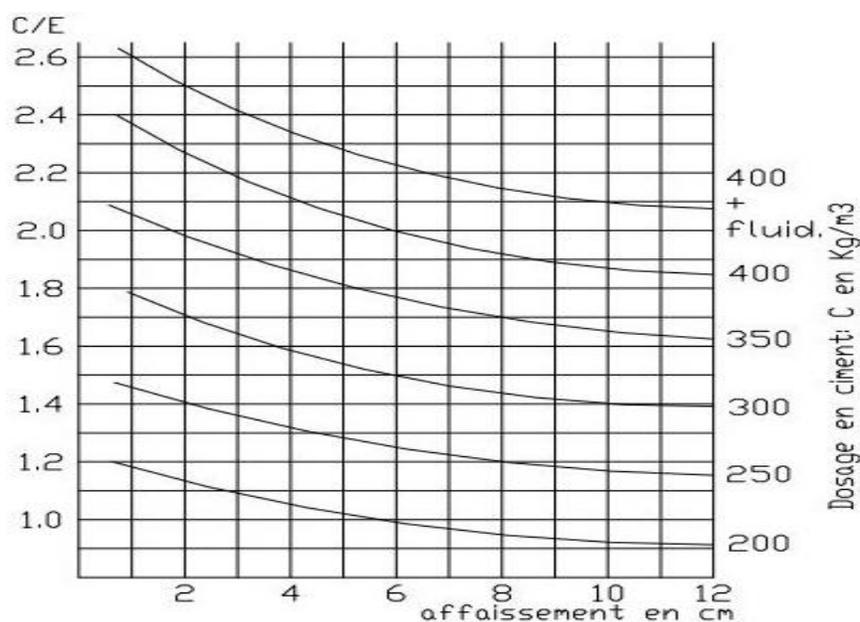


Figure III-3 : L'abaque de Dreux Gorisse [9]

➤ **Détermination de E**

La quantité d'eau nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs du rapport E/C et de C.

➤ **Détermination du mélange optimal à minimum de vides**

Il s'agit de déterminer le pourcentage de sable, de gravillon qui vont permettre de réaliser le squelette granulaire avec un minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laisser par les plus gros. Pour déterminer le mélange optimal il faut :

- Tracée de la courbe de Dreux Gorisse :

On trace la courbe granulaire de référence OAB sur le même graphe d'analyse granulométrique (pourcentage des tamis en fonction du diamètre des tamis), tel que

Le point O est repéré par les coordonner [0.063;0],

Le point de brisure B est repéré par les coordonnées (Si $D_{max} \leq 20$ mm $X = D_{max} / 2$, Si $D_{max} > 20$ mm

Module (X) = (Module (D_{max}) +38/ 2),

En ordonner $Y = 50 - \sqrt{1.25(D_{max})} + K'$ ou $K' = K + K_S + K_P$, Y est donné en pourcentage des passants cumules.

K est un coefficient donner, K_s est fonction du module de finesse ($6M_{d_{fs}} - 15$) avec $M_{d_{fs}}$ le module de finesse du sable ,

$K_P = +5 + 10$ selon le degré de plasticité désirer (K_P correction supplémentaire si le béton sera pompé). Le tableau III-4 donne les valeurs de K en fonction de la forme des granulats.

Tableau III-4 : Le coefficient k en fonction de la forme des granulats

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roule	Concasse	Roule	Concasse	Roule	Concasse
Dosage en ciment	400 + fluide	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

- Détermination des pourcentages en volume absolus de matériaux

La détermination des pourcentages en volume absolu de granulats permet la confection d'un mélange, à minimum de vide il est nécessaire de tracer la courbe granulométrique des matériaux du mélange. Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faibles granularités et par 5% des passants pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracé avec la droite briser de Dreux permet de déterminer les pourcentages en volume absolu de chaque matériau.

- Détermination des masses de granulat

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable ($S\%$) de gravillon ($g\%$) et de gravier ($G\%$), il est alors possible de déterminer les volumes de sables (V_s) de gravillon (V_g) et de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (S, g , et G). La formulation obtenue reste théorique par conséquent, réaliser les essais de convenance afin d'ajuster en fonction du besoin le dosage des superplastifiants et de l'eau. Par ailleurs, la composition

théorique du béton obtenue se fait sur des matériaux secs. Ainsi, lors des essais de convenance ou même pendant la réalisation du béton, il est primordial de vérifier la teneur en eau de chaque matériau et de faire les ajustements nécessaires sur le volume de l'eau de gâchage prévu dans les calculs

III.3.2. Essais sur le béton frais

III.3.2.1 - Etalement

La consistance du béton est un facteur important pour sa mise en œuvre. Cet essai permet de caractériser l'ouvrabilité et la consistance d'un béton frais. Il permet d'évaluer la fluidité du mélange et sa capacité à être mis en place. C'est un essai normalisé qui est réalisé avec le cône d'Abrams (figure III-2).



Figure III-2 : étalement au cône d Abrams

III.3.2.2 - Masse volumique

La mesure de la masse volumique permet de connaître la compacité du mélange, et détecter une potentielle présence de pores pouvant nuire à la résistance du béton. Elle est mesurée sur le béton frais à la centrale lors des épreuves de convenance, afin de valider la conformité de la production par rapport à l'étude.

III.3.2.3 - Teneur en air

La teneur en air d'un béton frais déterminée à partir d'un air mètre permet d'apprécier le pourcentage d'air contenu dans le mélange par la méthode pressiométrique. Sur le chantier de la tour F, la valeur de la teneur en air doit être inférieure ou égale à 3% selon la norme NF EN 12350-

7. Pour les bétons à compacité élevés comme le C50/60, cet essai est primordial pour assurer que le pourcentage d'air occlus dans le béton est maîtrisé.



Figure III-3 : Mesure de la teneur en air

III.3.2.4 - Essai à l'entonnoir en forme de v <<V-Funnel test

>>

Un entonnoir en acier (Figure III-5) est rempli de béton. Le clapet situé à la base de l'entonnoir est ensuite ouvert, ce qui permet l'écoulement du béton. On mesure alors le temps nécessaire pour que l'entonnoir se vide complètement. Ce temps d'écoulement est utilisé pour évaluer la viscosité du béton de manière précise.

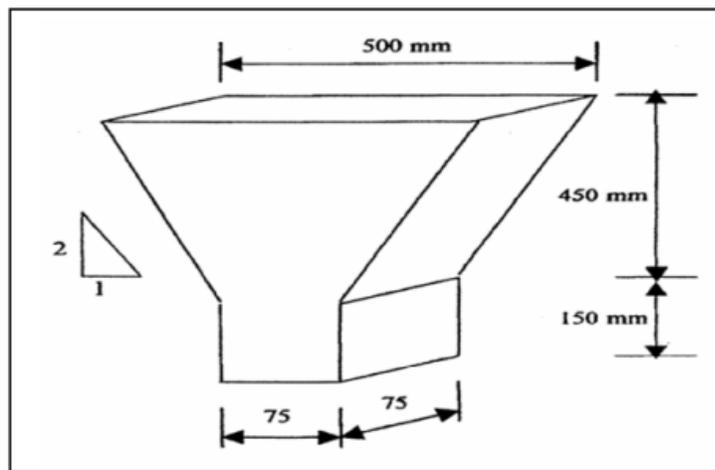


Figure III-4 : Ecoulement à l'entonnoir.

III.2.4.1. Test des essais cratérisant l'ouvrabilité du béton

L'objectif est de vérifier que l'étalement réalisé est dans la fourchette des valeurs contenues dans les critères d'acceptation du Mix éprouvé. Dans notre cas de figure, les valeurs d'étalement devaient être comprise entre 700 et 800mm afin de respecter les conditions de fluidité obtenues lors des tests de convenance et validé par les parties prenantes : ce test nous permettra de déterminer si,

- Le béton peut-être pompable c'est à dire une faciliter à être mis en œuvre
- Le béton commence à faire prise dans la bétonnière cas d'un intervalle <700 mm
- En respectant le rapport eau/ciment (E/C), une consistance fluide correspond à un étalement compris entre 700 et 800 mm En raison du risque élevé de ségrégation, un béton trop liquide sera refusé.
- Le béton est trop fluide présence d'eau à la surface du béton

La figure ci-dessous nous présente les étalements obtenus sur les échantillons de toupie lors du bétonnage du local technique Sud-est avec le Mix 46 A1. Comme évoqué dans le précédent point, chaque échantillon de toupie doit être dans la fourchette de 700 à 800 mm d'étalement. Ainsi, à l'analyse de la courbe, on constate que toutes les toupies ont un étalement moyen qui respectent la valeur cible mis à part la toupie N°5 qui a donné un étalement moyen de 560 mm. Par la suite, le béton de cette toupie a été rejetée. Les bétons rejetés sont pour la plupart utilisés pour réaliser les GBA (Glissière en Béton Arme) et ou les éléments liés à l'installation de chantier.

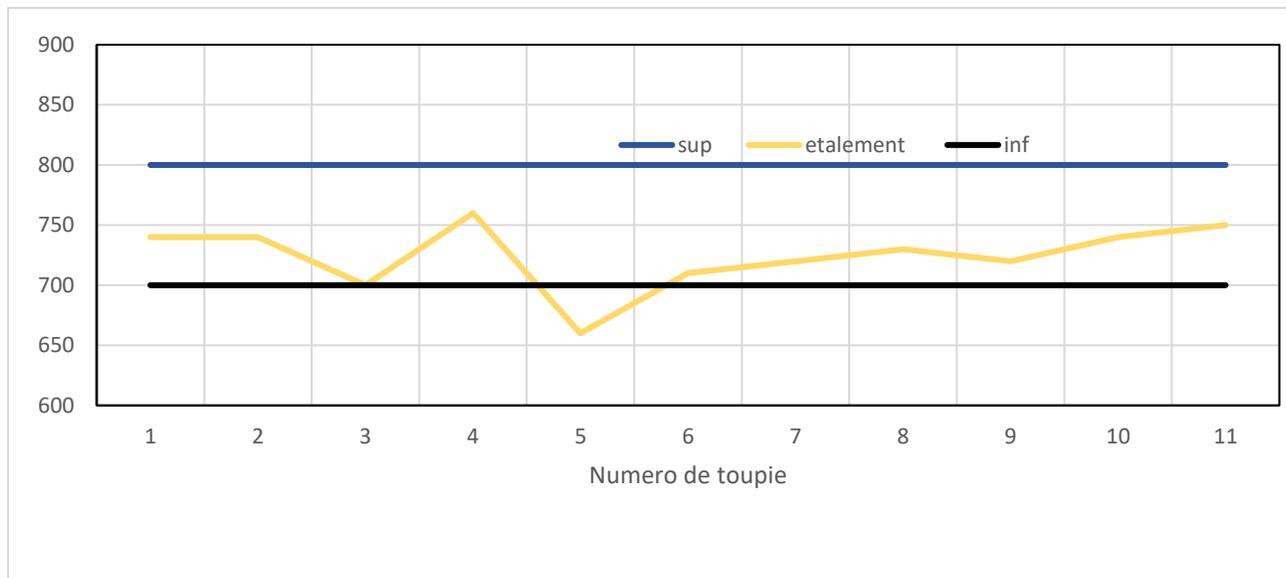


Figure III.5 : Comparaison des valeurs de l'étalement en mm mesurées pour le béton MIX 46 à avec la valeur admissible

La figure III.6 présente en abscisse les numérotations des camions et en ordonnées les valeurs de l'étalements mesurées sur des échantillons de béton du MIX 47. Les valeurs comprises entre 700 et 800 mm sont donc conformes

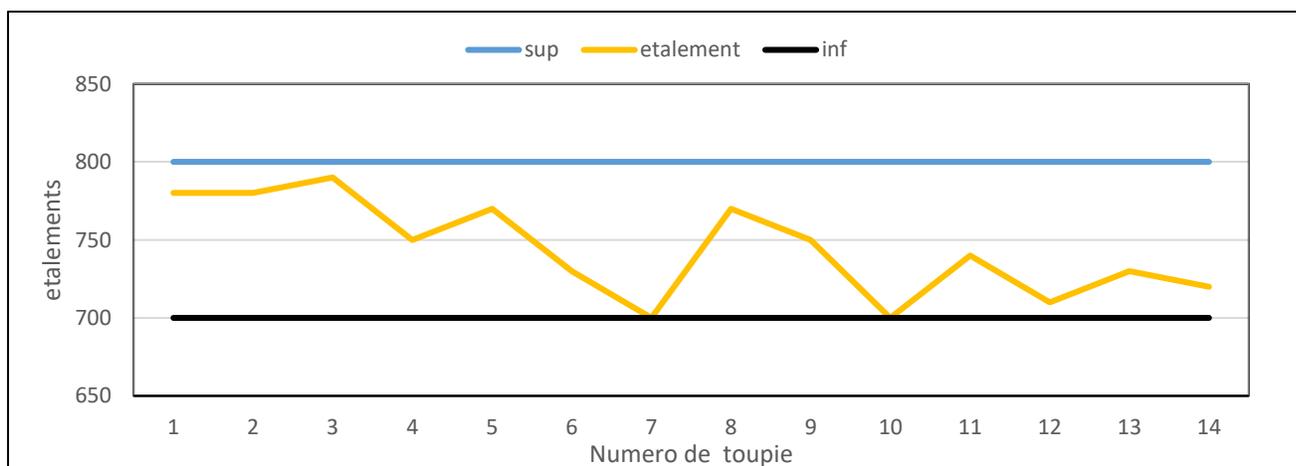


Figure III.6 : comparaison des valeurs de l'étalements en mm mesurées pour le béton MIX 47 avec la valeur admissible.

III.2. Mesure de la température du béton

Il est important de mesurer la température du béton afin de

- S'assurer que le retrait du béton sera maîtrisé., conformément à la norme NF EN 206 car, la température influence les réactions d'hydratation du ciment.
- Anticiper et prévenir les ouvertures des fissures
- S'assurer que la limite de température fixée à 31.5° pour le C50/60 est respectée. Au-delà de cette valeur, la toupie est maintenue au repos ou refroidit par arrosage et les tests sont repris. Après deux tentatives si les résultats ne sont pas conformes, le béton de la toupie est rejeté.
- Veiller à ce que le béton effectue son murissement conformément à la norme.
- Dans le cadre des travaux de la tour F, obtenir la température de 31.5° a été possible par l'utilisation d'un Chiller (équipement de production d'eau classée). C'est donc grâce au chiller qui produit l'eau de gâchage à 4°C qu'il est possible d'obtenir cette température. Par ailleurs, par temps chaud, il faut impérativement arroser la toupie pour une meilleure stabilisation de la température

La figure III.7 présente les température prise lors de l'arrivage de la toupie pour le test sur le béton .la température maximale dans notre cas est de 31.5 °C et donc les valeurs des températures mesurer son conforme selon l'exigence du client.

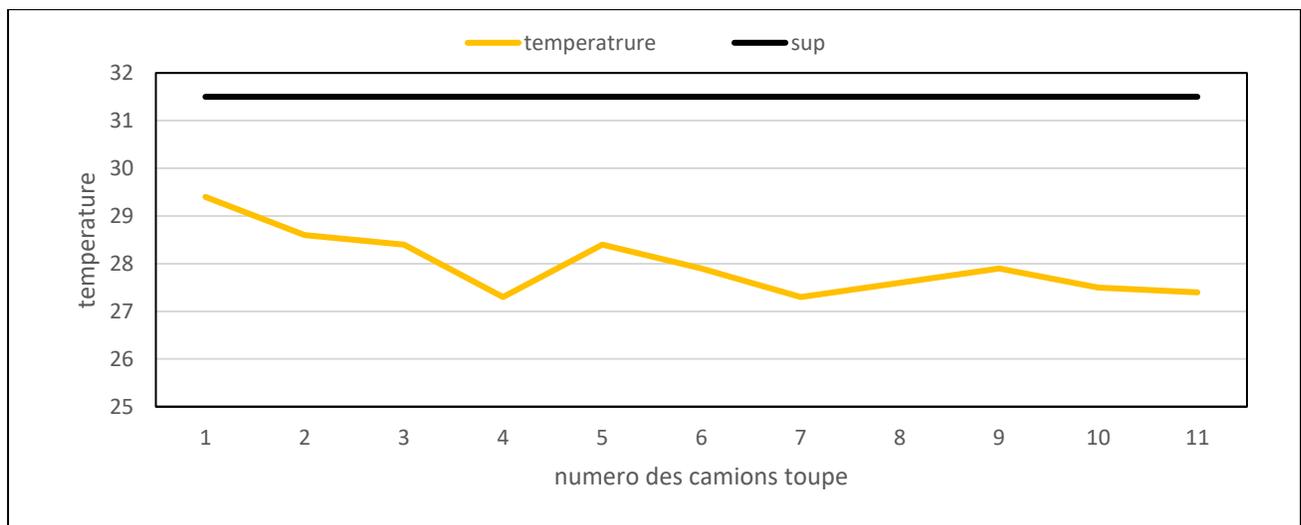


Figure III.7 : Comparaison des valeurs de la température mesurer pour le béton MIX 47 a la valeur admissible

La figure ci-dessous présente la teneur en air mesurée durant la phase de bétonnage. On observe des valeurs des teneur en air inférieure a 3 % conforme à la norme et aux prescriptions. La valeur varie selon les classes d'exposition du béton, elle nous permet de garantir la durabilité du béton en minimisant les vides internes ce qui améliore sa densité et les performances mécaniques du béton

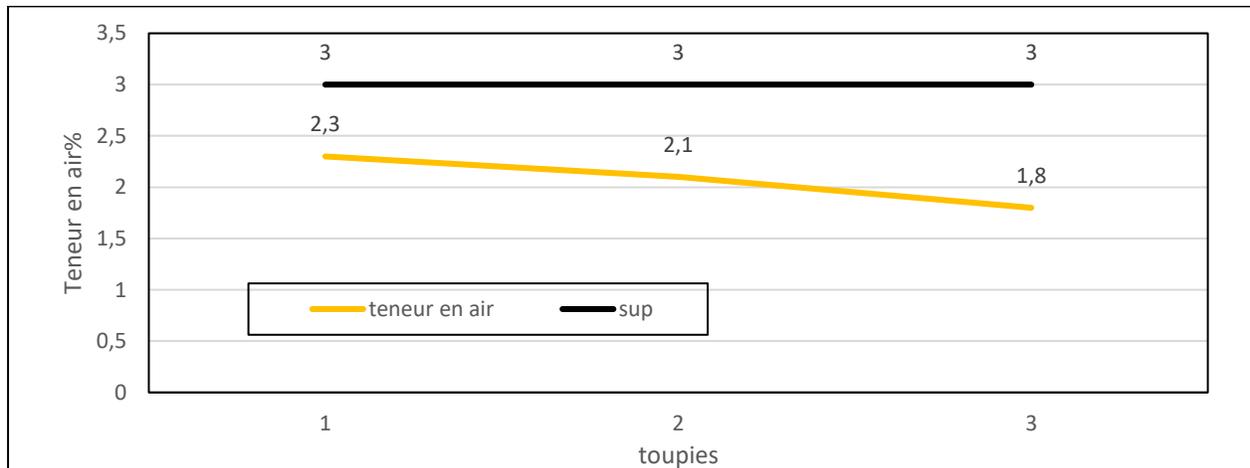


Figure III.8 : comparaison des valeurs de la teneur en air mesurer à celles admissible

4.3 Test sur le béton durci : Résistance à la compression

Après la détermination des propriétés du béton à l'état frais, des échantillons d'éprouvettes cylindrique et ou cubiques son confectionnées à des fins d'écrasement pour évaluer les propriétés mécaniques et la durabilité de ses bétons à 7 14 28 et 90 jours d'âge. Les éprouvettes sont confectionnées dans des moules normalisées 16/32 cm pour le cylindre et 15x15 cm pour le cube et 24 heures plus tard sont démoulées.

Les éprouvettes sont ensuite plongées dans un bain à température (25 °C selon la norme NF EN 12390-2) contrôlé jusqu'au jour de l'écrasement. Avant de passer à la presse à béton, l'éprouvette est retiré du bain, séchée, surfacée à l'aide de la rectifieuse. Avant de mesurer la résistance à la compression il faut s'assurer que la surface du cylindre et du cube soient plane des deux côtés pour une meilleure distribution uniforme des contraintes sur toute la surface.

La résistance à la compression s'obtient en appliquant à l'aide d'une presse mécanique (Figure III-7b) la charge sur le béton jusqu'à sa rupture. On détermine la résistance à la compression (f') à 7,14,28,90 jours. La résistance à la compression est calculée suivant la formule suivante :

$$f'c = \frac{F}{S} \text{ (MPa)}$$

Avec : $f'c$: Résistance moyenne à la rupture en compression

F : la charge enregistrer lors de la rupture,

S :la surface de l'éprouvette.

La figure ci-dessous **présente** la comparaison des valeurs des résistances obtenues à 7 jours à la résistance minimale attendu. On observe que l'ensemble des éprouvettes ont une valeur de résistance a au-dessus de la résistance admise

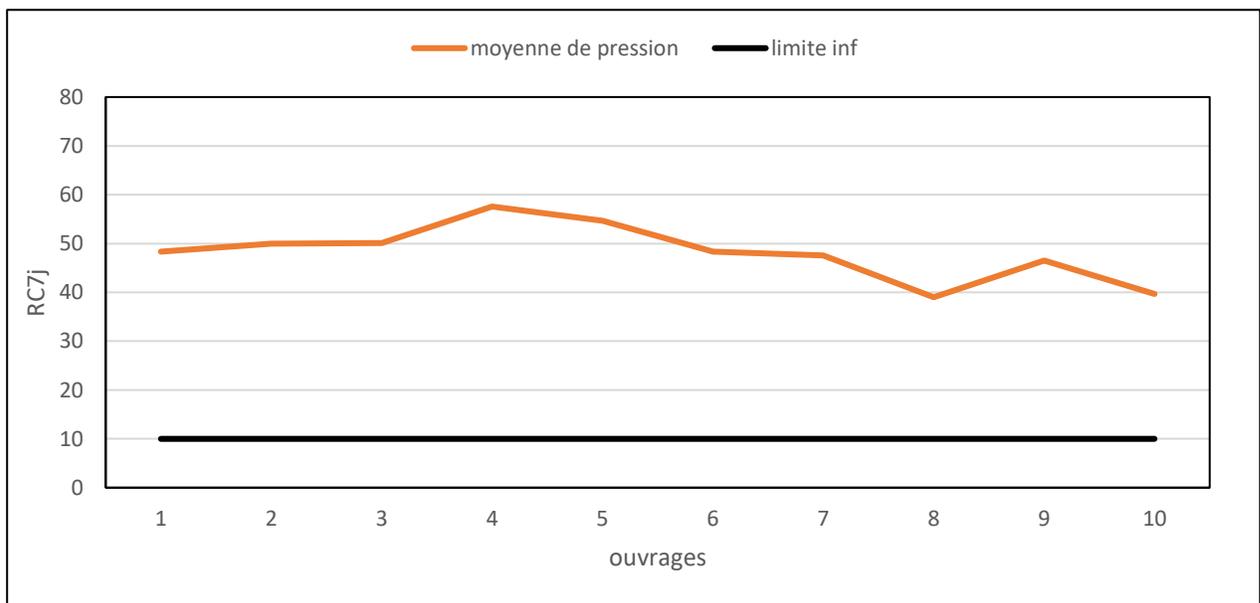


Figure III.9 : comparaison des valeurs des résistances caractéristiques en MPa à 7 jours mesurées avec la valeur admissible

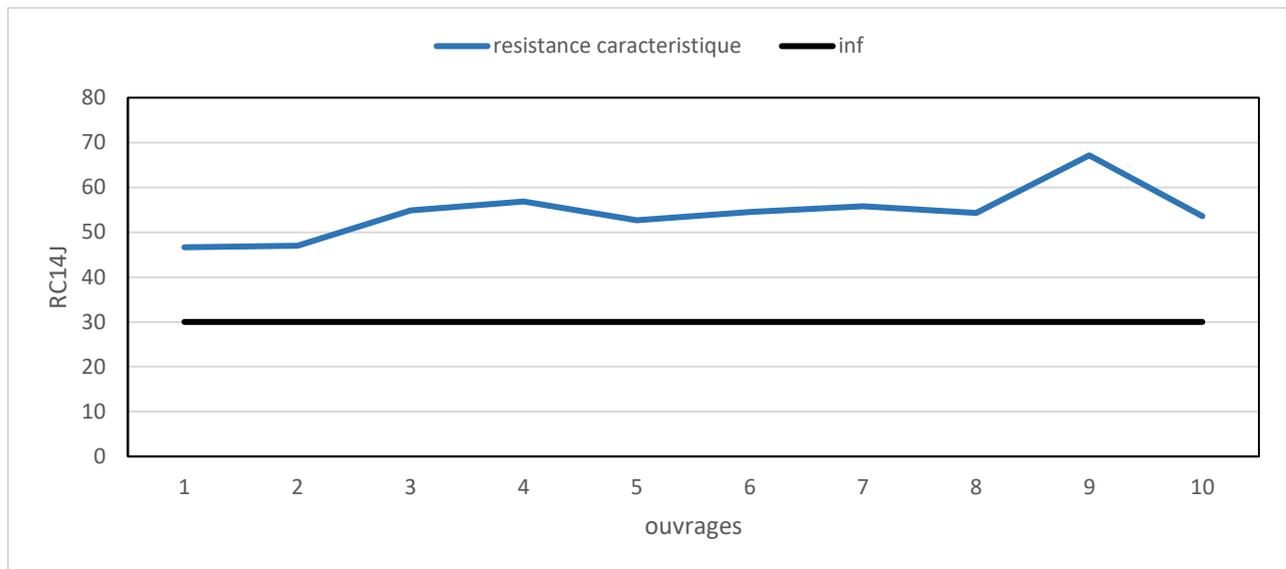


Figure III.10 : Comparaison des valeurs des résistances caractéristiques en MPa à 14 jours mesurer à celles admissible.

La résistance du béton MIX 46 a destinée aux ouvrages du noyau de la tour à 14 jours est toujours supérieurs à la valeur attendue donc notre béton est conforme en termes de résistances

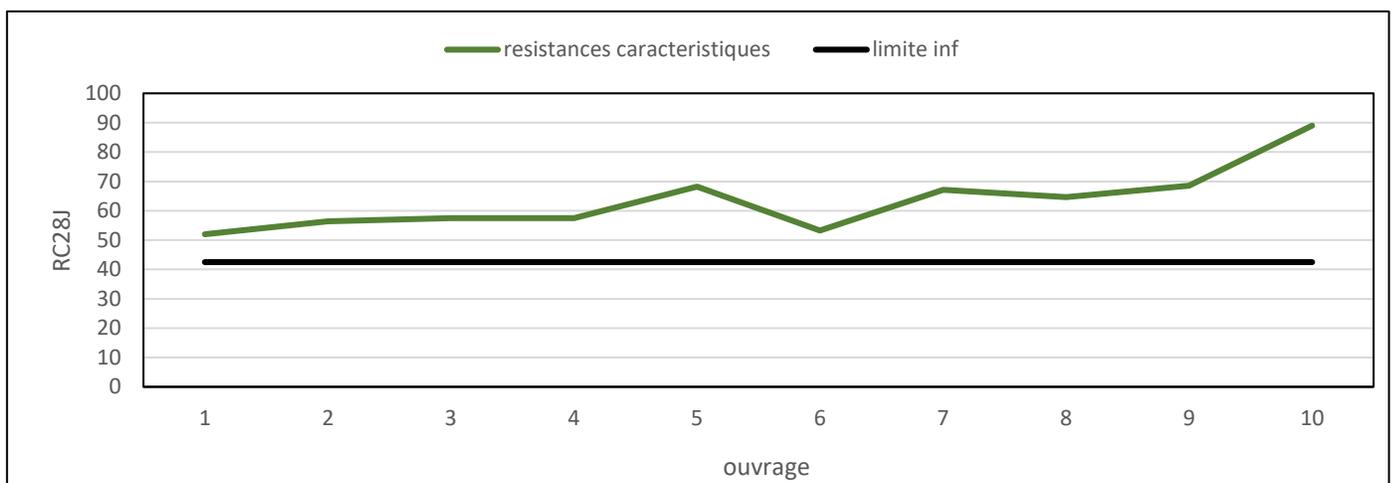


Figure III.11 : Comparaison des valeurs des résistances caractéristiques en MPa a 28 jours mesurées avec la valeur admissible



Figure III-12 : Rectifieuse (a), Presse mécanique (b)

III.4- Difficultés rencontrées sur les différents mix(mélange)

III 4.1- vérification de la qualité du béton

Dans le cadre de la construction de la Tour F, une formulation initiale de béton haute performance avait été mise en place en décembre 2021. Cependant, lors du décoffrage des voiles, nous avons constaté des désordres de tous genres ce qui a entraîné la démolition de 350 m³ de béton. À la suite de cet incident, une nouvelle formulation, le **MIX13 A1**, avec laquelle nous avons réalisé un certain nombre de niveau de noyau et de couvrant jusqu'à ce qu'elle montre également ses limites (baisse de résistance du au ciment utiliser, à la mise en œuvre ou à une température trop élevée. Vu l'avancement des travaux une nouvelle formulation verra le jour il s'agit du **MIX 18**. Ce nouveau MIX vient résorber les insuffisances du MIX précédant dans l'objectif d'atteindre les niveaux les plus hauts, mais du fait de sa faible rhéologie cet objectif an pas été atteint. Après le mix 18 vient le **MIX 34**, qui lui avait une bonne résistance caractéristique à 28 jours mais des parements qui ne respectaient pas les exigences architecturales du projet.

III.4.2 -Difficultés de pompage

Des problèmes de bouchage des tuyaux de pompage ont été observés à plusieurs reprises. Durant certains bétonnages, le MIX46 A1 présentait un état plus visqueux lors de sa mise en œuvre, observation faite sporadiquement pour des bétonnages avec la pompe stationnaire ou à la benne.

- Durant le bétonnage du Noyau N58-I :
- Le béton a fait sa prise dans la conduite et a bloqué celle-ci ce qui a entraîné le remplacement de toute la conduite sur 3 semaines.
- Une portion du voile VA06 VA10 à mi-hauteur n'a pas été remplie complètement
- Des défauts de parements superficielles ont été constatés par endroit

➤ **Les causes susceptibles**

Causes liées à la formulation du béton

- **Rapport E/C trop faible** → Béton trop visqueux, manque de fluidité.
- **Granulométrie mal optimisée** → Manque de fines ou de sable, entraînant une mauvaise compacité.
- **Manque d'agent stabilisant** → Ségrégation et blocage dans la conduite.
- **Changement de température du béton** → Accélération de la prise en cas de forte chaleur.

Causes liées au pompage

- **Diamètre des tuyaux trop faible** → Augmente la pression et favorise le blocage.
- **Longueur et hauteur du pompage importantes** → Pertes de charge élevées, nécessitant une formulation plus fluide.
- **Absence ou mauvais enrobage des conduites** → Favorise le durcissement du béton dans la pompe.
- **Nettoyage insuffisant des conduites** → Résidus de béton pouvant provoquer des bouchons.
- **Vitesse de pompage trop lente ou irrégulière** → Risque de ségrégation et blocage du béton.

Causes liées à la mise en œuvre

- **Temps de transport trop long** → Début de prise avant coulage.
- **Mauvaise vibration du béton** → Défauts de parement et zones non remplies.
- **Conditions climatiques défavorables** → Chaleur ou vent accélérant l'évaporation de l'eau.
- **Erreur de dosage sur chantier** → Modification involontaire des proportions.

III .4.3- Baisse de résistance au niveau des formulation C50/60

Certaines formulations de béton C50/60 ont montré une baisse de résistance par rapport à celle attendue après 28 jours. Ce phénomène a été causé par l'utilisation d'un ciment qui ne respectait pas les caractéristiques de résistance. Il a donc fallu faire des séances avec l'entité qui livre le ciment en lui expliquant les risques qu'il fait courir au chantier en livrant de tel produit. Dans la correction de la non-conformité, une attention particulière a été accordée au rapport E/C

Le Tableau III-5 présente la baisse de résistance du béton C50/60.

Tableau III-5: Analyse de la baisse de résistance du béton C50/60

Voile du noyau VA(16,01,02,03,04,05,06,15,13,15,12)- VA11 entre (VA06 et VA04)-VA11 entreVA(03,01) Zone2 de la Tour N06 Beton (C50/60) Mix13 A1								
CENTRALE	14005	9/24/2022	28	14806.5	941.964	922.79436	46.14	46.05
	14006			14990.5	963.45	944.0655	47.20	
	14007			14912.5	915.216	896.31384	44.82	
CENTRALE	14014	9/24/2022	28	14761.5	845.481	827.27619	41.36	43.08
	14015			14689.5	882.765	864.18735	43.21	
	14016			14734.5	912.476	893.60124	44.63	
CENTRALE	14023	9/24/2022	28	14734	886.809	868.19091	43.41	43.58
	14024			14819.5	891.352	872.68848	43.63	
	14025			14789.5	892.433	873.75867	43.69	

III.5.0 - Tableau des résistances en compressions du voile du noyau du mix 13

A l'analyse du tableau, nous constatons que la portion de noyau N06 réalisée ce jour n'a pas atteint la résistance de 50MPa à 28jours d'âge. Suite à cela, des investigations ont été menées sur l'ensemble des intrants qui entrent dans la composition du béton et en parallèle une campagne de

carottage a été lancé au pied de l'ouvrage afin de comparer les résultats de carotte comprimé avec celui des éprouvettes cylindriques.

Ces diminutions de performances mécaniques se manifestent par des écarts mesures entre les résistances spécifiées dans les documents techniques et celles obtenues lors des essais en laboratoire. Une surveillance attentive des résistances en compression est donc essentielle pour détecter ces variations et comprendre les causes de cette baisse de résistance. Ces résultats nécessitent une investigation approfondie afin de vérifier la conformité du béton aux exigences normatives et aux objectifs du projets.

Tableau III-6 : Critère d'acceptation du mélange près à être selon la norme NF EN 206

Critères à vérifiés	Critère d'acceptation
Ecart maximal par rapport au rapport eau libre/ciment sur le bon de livraison :	+ 0,02
Ecart maximal de la teneur en ciment sur le bon de livraison :	- 10 kg/m ³
Ecart maximal entre le poids cible et le poids réel des éléments sur le bon de livraison :	± 3% sur tous les composants sauf les adjuvants ou additifs ± 5%
Température maximale du béton sur chantier	Pour les ouvrages verticaux : ≤ 31.5° Pour les ouvrages horizontaux : ≤ 31.5°
Délai limite à ne pas dépasser entre le T0 de fabrication et le début de la mise en œuvre pendant les coulées de jour (10h à 24h) :	≤ 1,5 heures (90 minutes)
Contrôle visuel	Sur le chantier : VSI = 0 ou VSI = 1 À la centrale : VSI = 0, 1 ou 2 Voir
Valeurs d'étalement au cône d'Abrams (EN 12350-8) mesurées acceptables sur chantier pour le béton autoplaçant :	Entre 700 et 800 mm

Viscosité obtenue au test du VFunnel réalisé à chaque prise d'éprouvettes.	Classe VFX (7s-20s) : soit de 7,0 secondes à 20,0 secondes.
Teneur en air	Pour les ouvrages verticaux : $\leq 3.0\%$ Pour les ouvrages horizontaux : $\leq 3.0\%$

III.4.4-Non-conformité du parement des colonnes architecturales

Conformément au CCTP, il était attendu des colonnes de parement C4 au décoffrage. Cependant, l'utilisation du MIX 34 A1 montre des insuffisances pour atteindre cet objectif. En effet, on constate sur les colonnes après décoffrage un faïençage excessif, des microfissures, le ressuage, excès de bullage en surface. Compte tenu de cette situation, des dispositions strictes ont été mise en place sur les colonnes à savoir :

- Vitesse de bétonnage modérée ;
- Respect de la hauteur de chute du béton ≤ 50 cm ;
- Vibration conforme à la procédure mise en place à cet effet ;
- Cure de la peau systématiquement lors du décoffrage ;
- Utilisation de film polyane pour couvrir la colonne dès le décoffrage ;
- Renforcement du ferrailage en vue de la réduction de l'enrobage.

III.5-Conclusion partielle

Le chapitre a permis de mettre en évidence les défis techniques liés à la formulation et à la mise en œuvre du béton dans le cadre du projet de la Tour F. Les difficultés rencontrées, telles que les problèmes de pompage, les variations de résistance du béton, problèmes de parement au niveau des colonnes ont été analysées en profondeur. L'étude a également montré l'importance du suivi rigoureux des processus de formulation et de mise en œuvre pour garantir la qualité du béton, les et sa conformité aux normes ont été proposés pour améliorer la reproductibilité du béton C50/60 et optimiser les techniques de pompage et de coulage, afin de minimiser les risques de non-conformités et d'assurer la durabilité de la structure.

CHAPITRE IV : ANALALYSE DE LA FORMULATION ET LA PRODUCTION DE BETON

IV.1 - Les formulations des différents mix (mélange)

Différents mix C50/60	Granite 5/15	Sable 0/4	Sable 0/2	Ciment kg	Eau l	Adjuvants		Additifs		E/C
						Sikaplastiretards (5 % de la masse du ciment)	Sikatempo 492 (5 % de la masse du ciment)	Fume de silice kg	Laitier De haut fourneaux kg	
MIX47	577	329	753	450	172	4.80	-	-	50	0.38
MIX34	577	329	753	450	172	0.8	4.71	5	50	0.38
MIX 37	579	331	756	450	172	-	4.70	-	50	0.38

IV.2- Evaluation de la conformité

Le producteur est responsable de l'évaluation de la conformité aux propriétés spécifiées du béton.

Pour cela le producteur doit effectuer les opérations suivantes :

-essais initiaux, lorsqu'exigé ;

-contrôle de production du producteur, compris le contrôle de conformité ;

IV.2.1 - Critères liés à la conception du mélange

Le mélange doit avoir un contenu de 1 000 litres plus ou moins sa tolérance. La tolérance globale sur le rendement est fournie par les tolérances sur le dosage cible de chaque composant comme indiqué dans le tableau 27 de la norme NF EN 206-1.

Tableau IV : De la norme NF EN 206-1 indique les tolérances suivantes sur les constituants

Constituants	Tolérance
Ciment Eau Ensemble des granulats	$\pm 3\%$ de la quantité requise
Adjuvants, additions et fibres utilisées en quantités $\leq 5\%$ de la masse de ciment	$\pm 5\%$ de la quantité requise
NOTE La tolérance est la différence entre la valeur cible et la valeur mesurée	

IV.3- Vérification de la formulation de béton

La méthode de Dreux a été développée au Chapitre III et sera appliquée pour cette vérification. L'objectif visé ici consiste à vérifier si le dosage utilisé pour la fabrication de béton correspond aux matériaux utilisés

- **Données du mix 34 de la classe de résistance C50/60**
- ✓ Donnée sur le bon de livraison
- ✓ Ciment CHF 42.5 :
- ✓ Masse volumique réelle du ciment : 3.10 t/m^3
- ✓ Fumée de silices 50 kg
- ✓ Etalement souhaiter : 700 à 800 mm

➤ **Détermination du dosage en eau**

$$\text{Rapport E/C} = \frac{\text{Quantité d'eau}}{\text{dosage en ciment}} = \frac{172}{450} = 0.38$$

Le rapport E/C de 0.38 est conforme pour un béton de classe C50/60 selon la norme doit être entre 0.35 et 0.40 cette résistance garantit une faible porosité et une résistance mécanique élevée, en cohérence avec les exigences du chantier

➤ **Détermination du dosage en ciment**

$$F_{c28} = \sigma_{c28} \cdot G (C/E - 0.5)$$

- ✓ G' : coefficient granulaire
- ✓ σ_{c28} : résistance du béton à la compression à 28jours.

➤ **Détermination de la compacité du béton**

Avec un béton très fluide (700 à 800mm) et une mise en place par piquage

Donnée $D_{max} = 15 \text{ mm}$; $\gamma = 0.795$.

Après correction on a $\gamma = 0.765$

Le D_{max} : 15 mm

- ❖ Volume absolu : $1000 \gamma = 1$
- ❖ Volume total de ciment : $\frac{450}{3.1} = 146.2 \text{ l}$
- ❖ Volume absolu granulats : $795 - 146.2 = 648.8 \text{ l}$

La courbe de composition de béton donnée (**voir annexe 5**)

- Sable 0/2 : (45) %
- Sable 0/5 : (20) %
- Granite concasse 5/15 : (35) %

- ❖ Masse du Sable 0/2

$$M_{s1} = S_1\% \times V_G \times \text{Densité}_1$$

$$Ms1 = 0.45 \times 648 \times 2.61 = 726.8 \text{ kg/m}^3$$

❖ Masse du Sable 0/5

$$Ms2 = S_2\% \times VG \times \text{Densite}_2$$

$$Ms2 = 0.20 \times 648 \times 2.57 = 333 \text{ kg/m}^3$$

❖ masse du gravier 5/15

$$Ms2 = G_2\% \times VG^* \times \text{Densite}_3$$

$$Ms2 = 0.35 \times 648 \times 2.57 = 582.9 \text{ kg/m}^3$$

➤ **Détermination des proportions d'adjuvants**

• **Sika tempo 12**

$$M_{\text{sika T}} = A\% \times C$$

$$M_{\text{sika T}} = \frac{0.95}{100} \times 450 = 4.3 \text{ kg/m}^3$$

• **Sika Plastiretard**

$$M_{\text{sika P}} = A\% \times C$$

$$M_{\text{sika P}} = \frac{0.35}{100} \times 450 = 1.6 \text{ kg/m}^3$$

M ; masse des différentes proportions

A % : pourcentages des adjuvants

C : Masse de ciment

Les dosages volumétrique et pondéraux obtenus sont présentes dans le tableau ci-dessous

Tableau IV.1 : Récapitulatifs dosages pour 1m³

Matériaux	Masse en kg
Ciment	450
Sable 0/2	726.8

Sable 0/5	333
Gravier 5/15	482.9
Sika plastiretard	1.6
Sika Tempo 492	4.3
Eau	173
Laitier	50
microsilice	5

Tableau IV.2: Formule utiliser et celle obtenue après vérification

Matériaux	Formule utiliser	Formule obtenue après vérification	Ecart kg
Ciment	450	450	0
Sable 0/2	753	726.8	26.2
Sable 0/5	329	333	-4
Gravier 5/15	577	482.9	94.1
Sika plastiretard	1.58	1.6	0.02
Sika Tempo 492	4.80	4.3	50
Eau	172	173	1
Laitier	50	50	0
Micro silice	5	5	0

Le tableau ci-dessous présente le comparatif entre les quantités des éléments de la formulation utilisée sur le chantier dans le cadre du bétonnage des voiles du noyau et les quantités obtenues

avec la méthode de Dreux Gorisse. L'analyse du tableau nous montre que la formulation théorique obtenue avec la méthode de Dreux Gorisse est sensiblement identique à celle utilisée par le chantier compte tenu des faibles écarts obtenus. On peut donc noter que la formulation de béton utilisée est conforme aux règles de l'art

IV.4. Conformité des matériaux

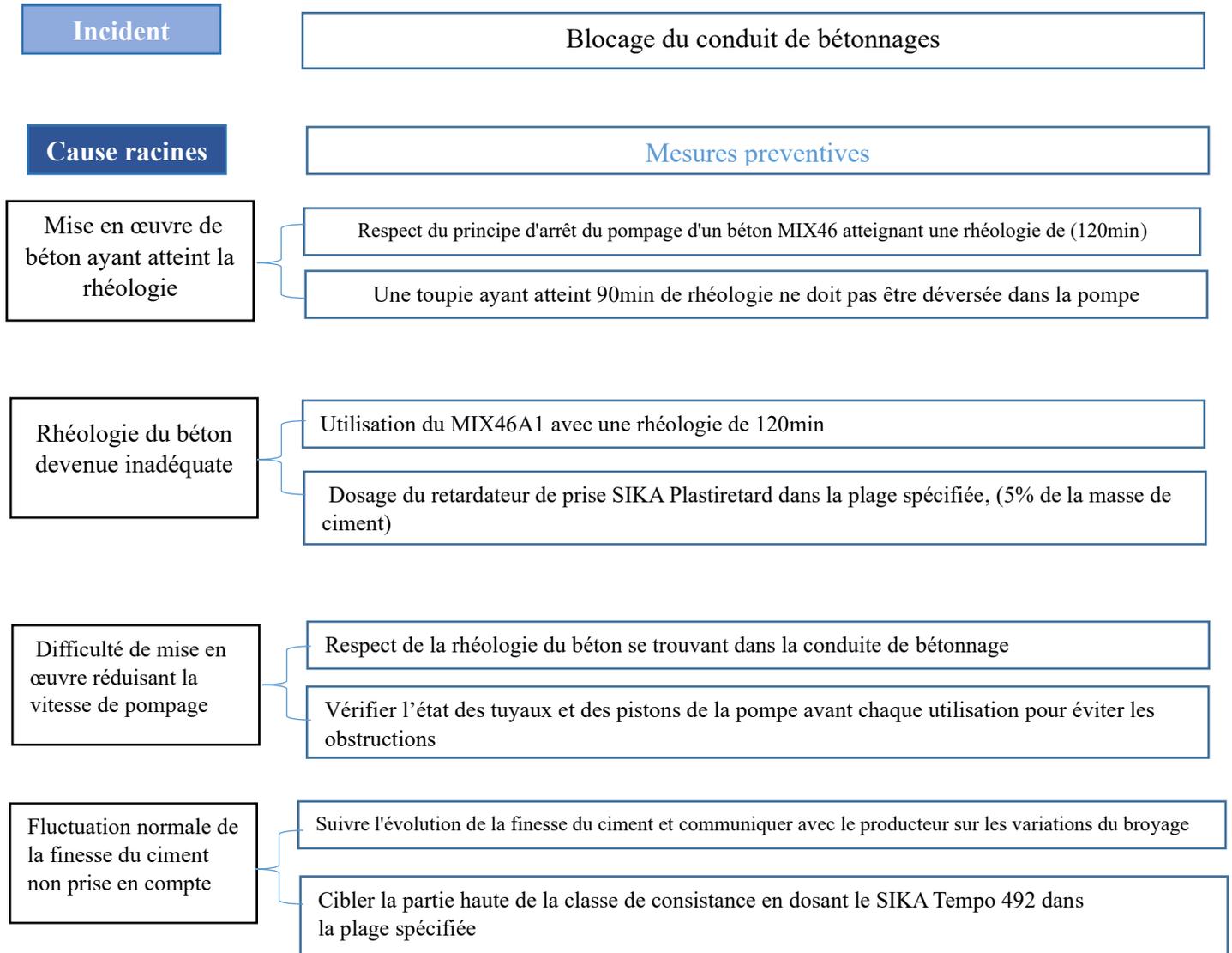
La conformité des matériaux employés dans la fabrication du béton est essentielle afin d'assurer les performances mécaniques, la durabilité et la réalisation des structures. Les essais effectués sur les granulats, le ciment, sont examinés dans cette partie, tout en évaluant leur conformité aux normes en vigueur.

MATERIAUX	ESSAIS	NORMES	Valeurs Trouvées	CCTP	Conformité
Sable 0/2	Granulométrie	NF EN 933-8	0/2	0/2	Conformité
	Equivalent de sable	NF EN 933-8	93.98	93	Conformité
Sable 0/4	Granulométrie	NF EN 933-1	0/4	0/4	Conformité
	Equivalent de sable	NF EN 933-8	97.89	97.89	Conformité
Gravier 5/15	Granulométrie	NF EN 933-8	5/15	5/15	Conformité
Ciment	Détermination de la résistance réelle du ciment	NF EN 196-1	46.7	42.5	Conforme

IV.4.1 - Granulats

Les granulats constituent la majeure partie du béton et leurs qualités influent sur la résistance et la durabilité du mélange cette analyse se fait selon la norme NF EN 933-1.

IV.4- Qualité du béton



IV.4.1- Paramètres influents sur la rhéologie du béton frais

IV.4.1.1- Les granulats

La composition granulométrique du béton peut entraîner des problèmes de fluidité dans les conduites. Les fines, bien qu'elles contribuent à la résistance, augmente la viscosité du mélange, ce qui peut rendre le béton plus difficile à pomper, surtout sur de longue distance. Le seuil de cisaillement est déterminé par le nombre et la nature des contacts entre les grains de la matrice

cimentaire, la phase granulaire et ses interactions avec la pâte ont une influence sur l'écoulement des bétons

IV.4.1.2 Utilisation des adjuvants

Les adjuvants jouent un rôle important sur la rhéologie des bétons, en modifiant leur comportement à l'état frais et durci. Ajouter en petite quantité (moins de 5 % du poids de ciment)

Les plastifiants utilisés dans la formulation

Dans le cas du projet

IV.4.1.3- Ciment

La quantité et le type de ciment utilisés ont un impact majeur sur la rhéologie du béton. Une augmentation de la quantité de ciment améliore généralement la cohésion et la maniabilité, mais peut également augmenter la viscosité, rendant le béton plus difficile à travailler. De plus, les caractéristiques du ciment, comme sa finesse ou sa composition chimique, influencent la fluidité et la capacité du mélange à s'écouler.

IV.5- Mesures préventives

- ✓ Après analyse du parcours que fait le béton après sa production il en ressort qu'il met en moyenne 15 min pour quitter la centrale à béton 15 autres minutes pour quitter le labo

Temps CAB moy 15 min

Temps labo moy 15 min

Temps de pompage moy 31min

Temps de trajet 14min

- ✓ Le béton fabriqué sur chantier doit être mis en œuvre moins de 30 mn après sa confection

Il est donc primordial qu'une toupie ayant atteint plus de 30 min après production du béton ne soit pas présentée à la pompe à béton pour éviter que la rhéologie ne soit atteinte

- ✓ Il est important de limiter la durée de transport du béton en prenant en compte les conditions climatiques, telles que la température, l'humidité ou le vent.

- ✓ Dosage du retardateur de prise SIKA Plastiretard dans la plage spécifiée.
- ✓ Respecter la classe de consistance en dosant le SIKA Tempo 492 dans la plage spécifiée.
- ✓ Respect de la rhéologie du béton se trouvant dans la conduite du béton.
- ✓ Les matériels utiliser pour le transport doivent être fréquemment nettoyer à l'eau pour ne pas introduire des corps étrangers ou des déchets dans le béton

IV.6- Non-conformité du parement C4 des colonnes architecturales

Les colonnes architecturales réalisées avec le béton Mix 34 A1 ont montré des défauts esthétiques, notamment des nids d'abeilles et des fissures superficielles (Figure III-10). Ces non-conformités ont été principalement dues à une mauvaise gestion du compactage et à un séchage trop rapide. Pour résoudre ce problème, des ajustements dans la formulation et la mise en œuvre ont été effectués, notamment un contrôle plus rigoureux de la cure et de la vibration du béton.

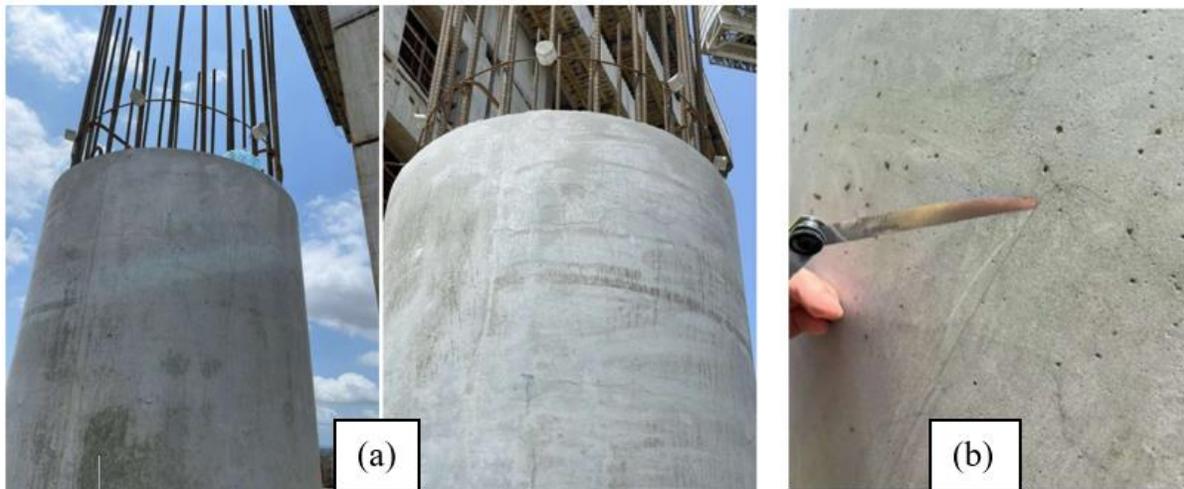


Figure IV-1 : Microfissure d'épaisseurs 0.15 mm à 0.30 mm en tête de colonne (a), présence de nid d'abeilles (b)

On observe l'apparition de fissure sur quelque ouvrage tels que les colonnes on relève aussi des bullages. Après analyse ses défauts peuvent être du a une mauvaise mise en œuvre du béton par les ouvriers

Ces défauts peuvent tirer leur origine

- Mauvaise réalisation de la cure du béton
- Une vibration du béton excessive qui peut entraîner la ségrégation du béton
- Mauvaise formulation du béton utiliser

IV.7- Adaptation de la formulation de béton

Dans le cadre de la construction, l'utilisation d'une formulation unique de béton pour tous les ouvrages peut être techniquement contraignante et économiquement inefficace. Une approche adaptative consiste à moduler la formulation en fonction des exigences spécifiques de chaque élément structurel tout en respectant les contraintes normatives et les performances attendues. Cette partie nous proposerons une étude comparative du béton et des recommandations visant à optimiser les formulations de béton. Lors des formulations par ouvrage il en ressort qu'il avait prévu bétonner le couvrant extérieur en c30/35 et ; les colonnes et capitaux en C50/60 mais pour une mise en œuvre rapide l'entreprise a décidé de couler l'ensemble avec du C50/60 d ou une perte pour l'entreprise

IV.8- Étude économique

iv.8.1- Etude financière du béton c50/60

Nous utiliserons le Mix 46 A1 pour l'étude économique du béton C50/60.

- **Composition du Mix 46 A1**

Masse de Ciment	$C = 450 \text{ kg/m}^3$
Masse d'Eau	$E = 172 \text{ kg/m}^3$
Masse de Sable 0/2	$M = 753 \text{ kg/m}^3$
Masse de Sable 0/4	$M = 329 \text{ kg/m}^3$

Masse de Gravier 5/15	M = 577 kg/m ³
Masse du Laitier	M = 50 kg/m ³
Masse de Microsilice	M = 5 kg/m ³
Masse de Sika Tempo 492	M = 4,80 kg/m ³
Masse de Sika Plastiretard	M = 1,58 kg/m ³

- **Prix affecté à chaque matériau**

Ciment : CEM III A 42.5 N	96000 FCFA/tonne
Eau	453 FCFA/m ³
Sable 0/2	6500 FCFA/tonne
Sable 0/4	7500 FCFA/tonne
Gravier 5/15	8500 FCFA/tonne
Laitier	150000 FCFA/tonne
Microsilice	555000 FCFA/tonne
Sika Tempo 492	32000 FCFA le bidon de 20Kg
Sika Plastiretard	150000 FCFA le bidon de 20kg

- **Estimation du coût du Béton Mix 46 A1 Béton C50/60**

Ciment : CEM III A 42.5 N	43200 FCFA
Eau	77916 FCFA
Sable 0/2	4894,5 FCFA
Sable 0/4	2467,5 FCFA

Thème : Contrôle qualité du béton C50/60 et de sa mise en œuvre : cas du projet de construction de la tour F dans la ville d'Abidjan

Gravier 5/15	4904,5 FCFA
Laitier	5250 FCFA
Microsilice	2775 FCFA
Sika Tempo 492	7680 FCFA
Sika Plastiretard	11850 FCFA
TOTAL	160937,5 FCFA

NB : Les calculs effectués se font sur 1 m³ et ne prennent pas en compte le coût du transport des matériaux.

iv.8.2- Etude financière du béton c30/37

Nous utiliserons le Mix 18 A2 pour l'étude économique du béton C30/37.

- **Composition du Mix 18 A1**

Matériaux	Masses
Masse de Ciment 1	C = 100 kg/m ³
Masse de Ciment 2	C = 350 kg/m ³
Masse d'Eau	E = 170 kg/m ³
Masse de Sable 0/2	M = 754 kg/m ³
Masse de Sable 0/4	M = 309 kg/m ³
Masse de Gravier 5/15	M = 706 kg/m ³
Masse du Chryso	M = 2,4 kg/m ³

- **Prix affecté à chaque matériau**

Matériaux	Prix
Ciment : CEM III A 42.5 N	96000 FCFA/tonne
Ciment CEM I 52.5 N	96000 FCFA/m ³
Eau	453 FCFA/m ³
Sable 0/2	6500 FCFA/tonne
Sable 0/4	7500 FCFA/tonne
Gravier 5/15	8500 FCFA/tonne
Chryso	183000 FCFA le bidon de 20kg

- **Estimation du coût du Béton Mix 18 A1 Béton C30/37**

Matériaux	Prix
Ciment : CEM III A 42.5 N	9600 FCFA
Ciment CEM I 52.5 N	28800 FCFA
Eau	77010 FCFA
Sable 0/2	4875 FCFA
Sable 0/4	2317,5 FCFA
Gravier 5/15	6001 FCFA
Chryso	21960 FCFA
TOTAL	150563,5 FCFA

NB : Les calculs effectués se font sur 1 m³ et ne prennent pas en compte le coût du transport des matériaux.

Prix C 50/60-prix C30/37 =

160935.7-150563.5=10772.2 FCFA

Il en ressort que le prix d'un mètre cube de béton de résistance caractéristique C50/60 est plus élevé par rapport au mètre cube de béton de classe de résistance C30/37

Soit une différence de 10772.2 Fcfa par mètre cube de béton qu'une entreprise peut avoir comme gain

IV.9- Conclusion

En conclusion ce présent mémoire nous a permis de mettre en lumière le contrôle rigoureux

Des paramètres pour la mise en œuvre du béton dans des projets complexes comme celui de notre chantier tour F, des défis techniques liés à l'utilisation de béton à haute performance de classe de résistance C50/60, la réussite d'un tel ouvrage repose sur une maîtrise parfaite des formulations de béton le respect des conformités tel que décrit dans le CCTP et selon les exigences normatives.

Grace a une analyse approfondie et a des essais sur la formulation utilisée, des solutions ont été mises en œuvre.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

À l'issue de ce mémoire, nous avons approfondi les enjeux liés à la vérification de la formulation, à la conformité et à la qualité du béton C50/60 dans le cadre de la réalisation de la Tour F à Abidjan. Ce projet, par sa complexité et ses exigences élevées, nous a permis de mieux comprendre les défis techniques et organisationnels associés à des constructions de grande envergure.

L'analyse des différents aspects du processus de mise en œuvre du béton a mis en lumière l'importance d'un contrôle qualité rigoureux. Chaque étape, de la formulation en laboratoire jusqu'au coulage final sur le chantier, doit être soigneusement surveillée pour garantir que le béton respecte les spécifications prévues. La vérification régulière des formulations, basée sur la méthode de Dreux-Gorisse, a été un outil clé pour assurer la conformité des mélanges aux normes requises et répondre aux contraintes spécifiques du projet.

Ce travail a également souligné combien la qualité du béton est un facteur déterminant pour la durabilité et la sécurité de la structure. Les ajustements apportés, tant au niveau des formulations que des procédés de mise en œuvre, ont permis de surmonter les contraintes rencontrées tout en maintenant des performances élevées. Ces efforts illustrent l'importance de la collaboration entre les équipes techniques, les laboratoires et les opérateurs sur le terrain.

Les perspectives ouvertes par cette expérience sont nombreuses et porteuses de progrès. L'intégration de technologies modernes, telles que des capteurs pour suivre en temps réel les propriétés du béton ou des logiciels de simulation pour optimiser les formulations, pourrait renforcer encore la maîtrise de la qualité. Par ailleurs, le partage des bonnes pratiques et l'amélioration continue des protocoles de vérification permettraient de standardiser les démarches, tout en s'adaptant aux spécificités des projets futurs.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « CT-T43.pdf ».
- [2] « REBBOUH.Naima.pdf ».
- [3] F. de LARRARD et C. F. Ferraris, « Rhéologie du béton frais remanié », *P P*, 1998.
- [4] « Granulats. Origines et caractéristiques : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur ». Consulté le: 31 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-materiaux-de-construction-42224210/granulats-origines-et-caracteristiques-c902/>
- [5] « <https://www.infociments.fr/betons/adjuvants> ».
- [6] « <https://www.infociments.fr/la-fumee-de-silice-laddition-incontournable-pour-des-betons-durables> ».
- [7] « <https://www.infociments.fr/glossaire/laitier-de-haut-fourneau> ».
- [8] D. BENAMARA, « Formulation et étude d'un béton à haute performance (BHP) », PhD Thesis, Université Mohamed Khider–Biskra, 2011. Consulté le: 29 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/4417>
- [9] « Abaque de DREUX vierge en pdf <https://www.4geniecivil.com/2017/02/abaque-dreux.html>

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche technique ciment CHF	I
Annexe 2 : Fiche technique ssika viscocrete TEMPO-12	II
Annexe 3 : Renseignement sur le dosage	III
Annexe 4 : Fiche technique PLASTIRETARD	IV
Annexe 4 : Plan de contrôle de la tour F	VI
Annexe 5 : courbes granulométriques	VI

Annexe 1 : Fiche technique ciment CHF

CIMENT CUIRASSE
Société des ciments d'Abidjan (SCA)

FICHE TECHNIQUE
CHF - CEM III / A 42,5N PM-ES-LH
Ciment de haut fourneau

Norme Ivoirienne : NI 05.06.001: 2018
 NF EN 197-1 : Avril 2012
 NF P 15-317 : Sept 2006 (PM - Ciments pour travaux à la mer)
 NF P 15-319 : Janv 2014 (ES - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates)

Version du 21/01/2021		Norme NF EN 197-1 NI 05.06.001	NF P 15-317 NF P 15-319	Moyenne usine
Composition du ciment				
Clinker	%	35 à 64		35
Laitier (S)	%	36 à 65	≥ 60	65
Gypse	%			3,5
Caractéristiques physiques et mécaniques				
Résistance à la compression	2 jours	MPa	Mini 10,0	12,5
	7 jours	MPa		28,1
	28 jours	MPa	Mini 42,5	46,0
	56 jours	MPa		52,1
Surface spécifique Blaine (55B)	cm ² /g			4429
E/C	%			33,4
Stabilité	mm	Maxi 10	Maxi 5	1
Temps début de prise	min	Mini 60		237
Temps fin de prise	min			330
Chaleur d'hydratation (Q41h)	J/g	Maxi 270		189
Température livraison ciment vrac	°C			48 (max 65)
Composition chimique				
SiO ₂	%			27,5
Al ₂ O ₃	%			10,1
Fe ₂ O ₃	%			1,5
CaO	%			49,9
MgO	%			4,3
SO ₃	%	Maxi 4,00		2,34
Na ₂ O Equivalent	%			0,50
Chlorures (Cl ⁻)	%	Maxi 0,10		0,00
Perte au feu (LOI)	%	Maxi 5,00		1,73
Résidus insolubles (IR)	%	Maxi 5,00		0,52
Sulfures S ²⁻	%		Maxi 2,0	0,60

- QUALITÉ ET RÉGULARITÉ
Contrôles réguliers en production et sortie silos réalisés par nos différents laboratoires et un laboratoire indépendant certifié ISO 9001 et COFRAC de référence situé en France.
- RHÉOLOGIE ADAPTÉE AU BPE
Permet d'obtenir un maintien d'ouvrabilité dans le temps idéal pour une utilisation en BPE Adapté à l'utilisation de la grande majorité des adjuvants à un dosage maîtrisé avec un rapport E/C optimum
- RÉSISTANCES MÉCANIQUES
Convient à la fabrication de bétons de classes de résistances élevées
- DURABILITÉ AMÉLIORÉE
PM-ES : Prise Mer et Eaux Sulfatées, le destine aux environnements chimiquement agressifs et travaux à la mer
LH : Low Heat ou faible chaleur d'hydratation, ciment particulièrement adapté pour les ouvrages de grande masse et permet de réduire le risque de réaction sulfatique interne (RSI). Basse température de livraison ciment. Teneur en chlore limitée et résistance à l'Alcali Réaction renforcée
- ESTHÉTIQUE
Adapté pour des voiles de teinte claire (parements, bétons esthétiques, bétons désactivés)
- APPLICATIONS BÉTON
Travaux en milieu humide
Bétonnage en eaux agressives (eau de mer, eaux séléneuses, eaux industrielles, eaux pures)
Ouvrages massifs, fondations, superstructures, murs de soutènement, voiles, radiers, planchers, silos
Ouvrages souterrains et injection dans les sols
Travaux routiers, stabilisation des sols, bétons de roulement et grave ciment

SCA Producteur de ciment en Côte d'Ivoire depuis 1967

Annexe 2 : Fiche technique sika viscocrete TEMPO-12



NOTICE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12

SUPERPLASTIFIANT / HAUT RÉDUCTEUR D'EAU

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération à base de polycarboxylates..

DOMAINES D'APPLICATION

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 permet la fabrication de tout type de béton de consistance plastique à auto-plaçante.

- Béton autoplaçant ou autonivelant
- Béton à long maintien d'ouvrabilité sans effet retard de prise
- Béton à faible rapport Eeff/C
- Béton à haute ou très haute performance
- Béton pompé sur de très longues distances
- Bétonnage par temps chaud

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

De part sa formulation spécifique, Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est particulièrement recommandé pour les ciments à faible ou moyenne teneur en sulfates alcalins.

Sa capacité à conférer un long maintien d'ouvrabilité lui permet de s'adapter facilement à des ciments faiblement demandeurs en adjuvants.

Son caractère polyvalent permet de s'adapter à tout type de matériaux et à une large gamme de ciments.

AGRÈMENTS / NORMES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 répond aux exigences de la norme NF EN 934-2 tableaux 3.1 & 3.2.

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	<ul style="list-style-type: none">• Cubitainer 1000 l• Fût 200 l• Bidon 20 l• Vrac
Aspect / Couleur	Liquide brun clair.
Durée de Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact.
Conditions de Stockage	Entre 5°C et 35°C, à l'abri du rayonnement direct du soleil. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
Densité	1.060 ± 0.020
Valeur pH	5.5 ± 1.0
Extrait Sec	29.5 ± 1.4% (halogen) 29.5 ± 1.4% (NF EN 480-8)
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0.1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 1 %

NOTICE PRODUIT
Sika® ViscoCrete® TEMPO-12
Avril 2020, Version 01.02
021.90.101.1000000110

Annexe 3 : Renseignement sur le dosage

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage	Plage de dosage : 0,1 à 5,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées
Distribution	Sika® ViscoCrete® TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité. Nos FDS sont disponibles sur demande.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

Sika Côte d'Ivoire S.A.R.L.
ZI Yopougon
21 BP 248, Abidjan 21
Côte d'Ivoire
<https://civ.sika.com/>
Tel: +225 23 50 79 90

NOTICE PRODUIT
Sika® ViscoCrete® TEMPO-12
Avril 2020, Version 01.02
021301011000000110

2 / 2

SikaViscoCreteTEMPO-12-6-CI-(04-2020)-1-2.pdf

BUILDING TRUST



Annexe 4 : Fiche technique PLASTIRETARD



NOTICE PRODUIT Plastiretard

RETARDATEUR DE PRISE



INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Le Plastiretard est un retardateur de prise pouvant être utilisé dans tous les bétons, chapes et mortiers.

DOMAINES D'APPLICATION

Effet sur le temps de prise:

Par son effet retardateur, le Plastiretard permet de retarder le temps de prise des bétons.

Il est particulièrement adapté :

- A la mise en œuvre par temps chaud
- Aux bétons nécessitant une durée pratique d'utilisation élevée,
- Aux bétons nécessitant des délais de finition longs.

Amélioration de la maniabilité :

Par son effet plastifiant, le Plastiretard permet également une mise en œuvre plus facile.

Amélioration des résistances mécaniques.

Grâce à sa fonction de retardateur, le Plastiretard permet d'augmenter les résistances mécaniques à long terme.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Par son action physico-chimique, le Plastiretard permet :

- de retarder le début de prise et de conserver une bonne ouvrabilité pendant le temps nécessaire à sa mise en place,
- d'améliorer la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage,
- d'augmenter les résistances mécaniques à long terme,

AGRÈMENTS / NORMES

Marquage CE et NF selon la norme NF EN 934.2 tab. 8

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	<ul style="list-style-type: none">▪ Bidon de 20 litres▪ Fût de 250 kg▪ Conteneur perdu de 1000 litres▪ Vrac
Aspect / Couleur	Liquide jaune, légèrement trouble
Durée de Conservation	36 mois dans son emballage d'origine intact
Conditions de Stockage	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
Densité	1,175 ± 0,030
Valeur pH	9,5 ± 1,0
Extrait Sec	31,0 ± 1,5% (méthode halogène selon NF 085) 31,0 ± 1,5% (NF EN 480-8)

Notice Produit
Plastiretard
Mai 2018, Version 01/01
021406011000000005

Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 6,0 %

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage Recommandé

Plage de dosage : de 0,05 à 2,0 % du poids du liant ou du ciment selon la température, le retard de prise et les performances recherchées.

- Dosage habituellement conseillé : de 0,1 à 0,5%
- Le dosage de 0,5% peut éventuellement être dépassé pour l'obtention de retards de prise importants.

Il faut réaliser des essais à différents dosages dans les conditions du chantier (en particulier la température) de façon à déterminer le dosage fournissant le résultat souhaité.

INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

Le Plastiretard est introduit dans la gâchée soit mélangé à l'eau soit en même temps que l'eau. Il est recommandé d'effectuer des essais préliminaires pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité.

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité. Nos FDS sont disponibles sur www.quickfds.com et sur le site www.sika.fr

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

SIKA FRANCE S.A.S.
84 rue Edouard Vaillant
93350 LE BOURGET
FRANCE
Tél.: 01 49 92 80 00
Fax: 01 49 92 85 88
www.sika.fr



Plastiretard-fr-FR-[05-2018]-1-1.pdf

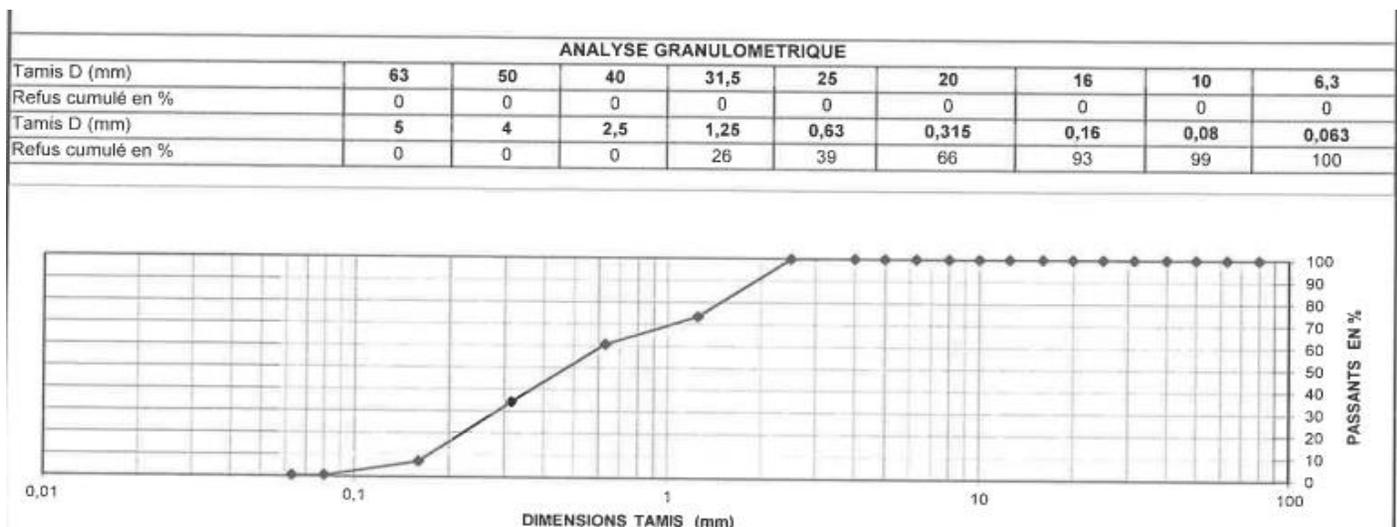
Thème : Control qualité du béton c50/60 et de sa mise en œuvre : cas du projet de construction de la tour F dans la ville d'Abidjan

Annexe 4 : Plan de contrôle de la tour F

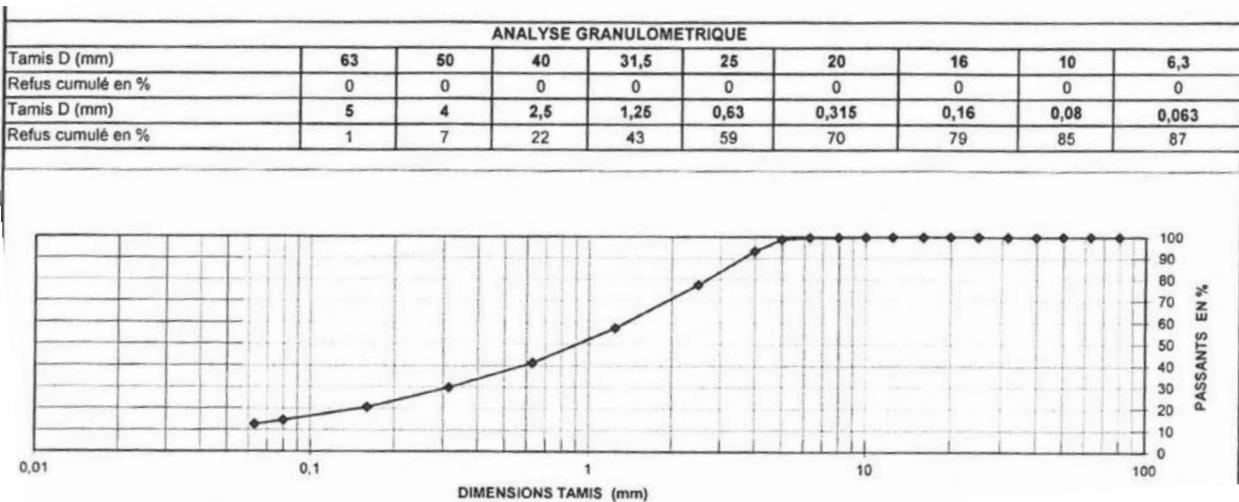
PLAN DE CONTROLE QUALITE		La Tour F : Plan de Contrôle				Essais de convenueance - Rev A		Date	lundi 9 août 2021				
Activité		Type de contrôle		Critères d'approbation			Document de vérification / Moyens (Records, ITR, MTR ...)		Point de Vérification				
Item No.	Description	Inspection	Laboratoire	Topographie	Document / Spécification / Plans Réf.	Résultats requis (critère d'acceptation)	Moment / Fréquence (Temps, quantité, ou autre)	Document de vérification / Moyens (Records, ITR, MTR ...)	Constaté qualité BESIX	Laboratoire BESIX	PTD	SOOTEC	ATND
4.4	Teneur en air du béton frais		X		Conformément à la norme NF EN 12350-7	Valeur comprise entre 0 et 2%	A effectuer à 10 + 90 min	Visuel / Fiche de contrôle essai de convenueance	A	A	/	/	/
4.5	Masse volumique du béton frais		X		Conformément à la norme NF EN 12350-6	Au moins compris entre 2200 à 2400 kg/m³	A effectuer à 10 + 90 min	Visuel / Fiche de contrôle essai de convenueance	A	A	/	/	/
4.6	Rampissage des moules		X		Selon les règles de l'art	Rempissage des moules en trois couches et piquage à la tige ou utilisation d'une aiguille vibrante	A effectuer à 10 + 60 min	Visuel	A	A	/	/	/
4.7	Stockage des éprouvettes		X		Selon les règles de l'art	Les éprouvettes doivent être couvertes et stockées sur le lieu du levèvement	Après le prélevement jusqu'au transport	Visuel	A	A	/	/	/
5. Transport, démoulage, conservation et essai de compression													
5.1	Transport des éprouvettes vers laboratoire	X	X		Selon les règles de l'art	Transport des éprouvettes dans les moules sur un lit de sable et sans occasionner des chocs mécaniques entre elles.	Le lendemain de la confection des éprouvettes après durcissement du béton	Visuel / Photos	A	A	/	/	/
5.2	Démoulage des éprouvettes au laboratoire	X	X		Selon les règles de l'art	Au moyen d'un compresseur ou d'un dévissage des moules	Le lendemain de la confection des éprouvettes après durcissement et sur le lieu de leur conservation	Visuel / Photos	A	A	/	/	/
5.3	Conservation des éprouvettes au laboratoire	X	X		Conformément à la norme NF EN 12390-2	Sous eau, à Température de 20 ± 2°C	Pendant la conservation	Visuel / Photos	A	A	/	/	/
5.4	Essai de compression en laboratoire		X		Conformément à la norme NF EN 12390-3	Résultats conformes à 28 jours d'âge. Les résultats seront analysés au fur et à mesure de la maturité du béton.	A 3 jours, 7 jours, 14 jours, 21 jours, 28 jours et 56 jours d'âge	PV laboratoire	PC	PC	PC	PC	PC
Vérification Point		Exigences				Fait Par:		Revus Par:		Approuvé Par:			
A = Auto contrôle:		Contrôle continu par l'exécutant, pouvant être documenté si nécessaire				Technicien Qualité		Spécialiste béton BESIX		Technical Manager			
PC = Point critique:		Matérialisation du contrôle sur un document de suivi d'exécution				ADOU Abou		Xavier Farina		Julien Vannobays			
PA = Point d'arrêt:		Point au-delà duquel une activité ne doit pas se poursuivre sans un accord				AAD		SFA		IVA			
R = Revue Documentaire:		Revue de la documentation et/ou des certificats				03-08-21		09-08-21		09-08-21			

Annexe 5 : courbes granulométriques

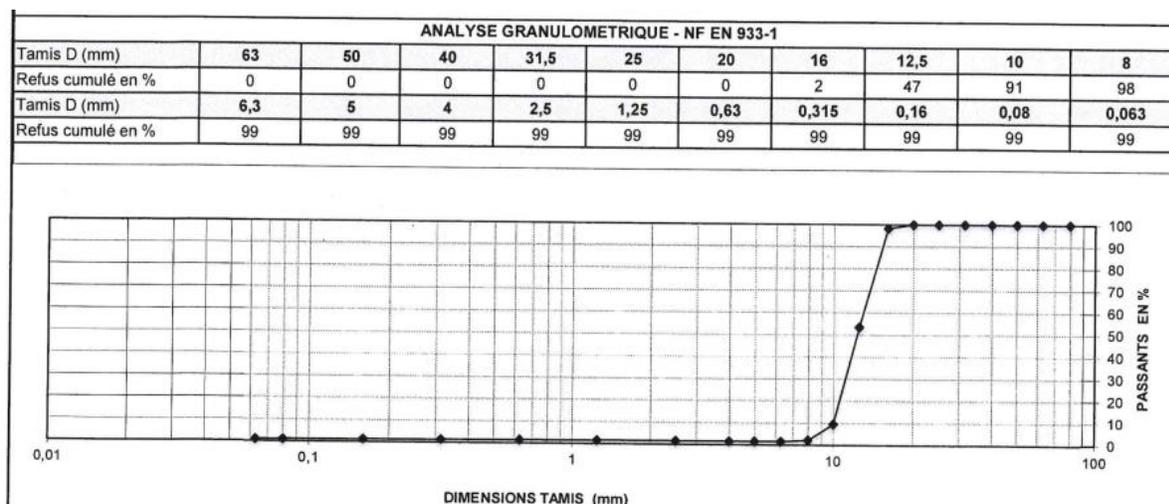
- L'analyse granulométrique du sable 0/2



- L'analyse granulométrique sable 0/4



- L'analyse granulométrique sable 5/15



Annexe 6 : conduite de bétonnage de la tour

