

# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE

Première partie : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I INDUSTRIE CIMENTIERE ET ENVIRONNEMENT

I.1 Les émissions de CO<sub>2</sub> de l'industrie du ciment

I.2 Impacts environnementaux et mesures d'atténuation

Chapitre II GENERALITES SUR LES CEMENTS

II.1. Définition du ciment :

II.2. Les constituants du ciment

II.3. Normalisation et classification du ciment

II.4. Caractéristiques des ciments

II.5. Domaines d'utilisation

II.6. Fabrication du ciment

II.7. Hydratation du ciment portland

Chapitre III LES AJOUTS CIMENTAIRES

III.1 Généralités

III.2 Classification des ajouts cimentaires

III.3 Avantages d'utilisation des ajouts cimentaires

Chapitre IV LES BASALTES

IV.1 Définition

IV.2 Caractéristiques physiques

IV.3 Structure

IV.4 Composition chimique

IV.5 Composition minéralogique

IV.6 Classification des basaltes

IV.7 Principaux gisement à Madagascar

IV.8 Utilisation

Chapitre V LES POUZOLANES

- V.1 Définition
- V.2 Types de pouzzolanes
- V.3 Activité pouzzolanique
- V.4 Caractéristiques de la Pouzzolane
- V.5 Différentes utilisations de la pouzzolane
- V.6 Gisements des pouzzolanes
- V.7 Conclusion

## Chapitre VI LE CIPOLIN

- VI.1 Définition
- VI.2 Propriétés du cipolin
- VI.3 Gisements de cipolin

## Deuxième partie : ETUDES EXPERIMENTALES

### Chapitre VII LES MATERIAUX UTILISES

- VII.1 Types et provenances
- VII.2 Méthodes de caractérisation

### Chapitre VIII PRATIQUES DES ESSAIS NORMALISES

- VIII.1 Essais physiques
- VIII.2 Essais mécaniques

### Chapitre IX PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES

- IX.1 Caractéristiques du basalte
- IX.2 Caractéristiques de la pouzzolane
- IX.3 Caractéristiques du cipolin
- IX.4 Caractéristiques du ciment BINANI

### Chapitre X ELABORATION DU CIMENT ECOLOGIQUE

- X.1 Ciments mélangés avec un seul ajout
- X.2 Ciments mélangés avec les trois ajouts
- X.3 Les compositions optimales
- X.4 Conclusion

## CONCLUSION GENERALE

## BIBLIOGRAPHIES

## ANNEXES

## TABLE DES MATIERES

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Spécifications pour les ciments Portland dans la norme ASTM C 150 .....	11
Tableau 2:Spécifications pour les ciments composés dans la norme ASTM 595.....	12
Tableau 3: Classes de résistance selon la norme NF EN 197-1 .....	13
Tableau 4: Les cinq types de ciments courants .....	14
Tableau 5: Les différents types de ciments de la norme NF EN 197-1 .....	15
Tableau 6: Correspondance entre anciennes et nouvelles désignation des ciments .....	17
Tableau 7: Composition minéralogique moyenne des ciments (en % massique) ciments Portland. ....	24
Tableau 8: Domaines d'utilisation des différents types de ciments .....	27
Tableau 9: Teneurs limites et teneurs moyennes des éléments chimiques entrant dans la fabrication de ciment .....	29
Tableau 10: teneur moyenne des éléments chimiques dans le basalte .....	39
Tableau 11: composition chimique moyenne des basaltes de la partie Sud-Ouest de Madagascar. ....	42
Tableau 12: Composition chimique moyenne de la pouzzolane .....	48
Tableau 13: Composition chimique moyenne des pouzzolanes d'Antsiranana (en % massique) .....	50
Tableau 14: Masse volumique apparente des pouzzolanes d'Antsiranana .....	50
Tableau 15: Composition chimique moyenne des pouzzolanes de Nosy-Be (en % massique) .....	52
Tableau 16: Masse volumique apparente des pouzzolanes de Nosy-Be .....	52
Tableau 17: Composition chimique moyenne des pouzzolanes d'Antsirab (route Betafo) (en % massique) .....	53
Tableau 18: Composition chimique moyenne des pouzzolanes de Sambaina.....	53
Tableau 19 : composition chimique moyenne du cipolin de Mahajanga.....	55
Tableau 20: Les analyses des échantillons des cipolins à Ambatondrazaka .....	56
Tableau 21: Résultats des analyses d'échantillons de cipolins à la carrière d'Ibity (en % massique) .....	56
Tableau 22 : Pourcentage massique des constituants chimiques du calcaire de Soalara ....	57
Tableau 23: Mode de malaxage : .....	66
Tableau 24: caractéristiques physiques du basalte .....	71
Tableau 25: composition chimique du basalte .....	71
Tableau 26: Résultat de l'analyse granulométrique du basalte .....	71
Tableau 27 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane .....	72
Tableau 28 : Composition chimique de la pouzzolane.....	72
Tableau 29 : Analyse granulométrique de la pouzzolane.....	73
Tableau 30 : Caractéristiques physiques du cipolin .....	73
Tableau 31 : Composition chimique du cipolin.....	74
Tableau 32 : Analyse granulométrique du cipolin .....	74
Tableau 33 : Caractéristiques physiques du CEM I .....	75
Tableau 34 : Composition chimique du CEM I.....	75
Tableau 35 : Composition minéralogique du ciment .....	76
Tableau 36: Résultat des essais de compression du CEM I-B.....	78
Tableau 37 : Résultat des essais de traction par flexion du CEM I-B.....	78
Tableau 38: Résultat des essais de compression du CEM I-P.....	80
Tableau 39: Résultat des essais de traction par flexion du CEM I-P.....	81

Tableau 40: Résultat des essais de compression du CEM I-C .....	83
Tableau 41: Résultat des essais de traction par flexion du CEM I-C.....	83
Tableau 42 : récapitulation des résultats des essais mécaniques à 28 jours : .....	86
Tableau 43: Résultats des essais mécaniques des ciments mélangés avec 3 ajouts .....	87
Tableau 44: Comparaison des résultats des essais physiques de l'échantillon .....	90
Tableau 45: Comparaison des résultats des essais mécaniques de l'échantillon .....	90
Tableau 46: Comparaison des résultats des essais physiques de l'échantillon.....	91
Tableau 47: Comparaison des résultats des essais mécaniques de l'échantillon .....	91

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma du procédé de fabrication du ciment .....	32
Figure 2 : phases d'hydratation du ciment .....	34
Figure 3 : Principaux Gisement de basalte à Madagascar.....	41
Figure 4: Carte de la localisation des indices de pouzzolanes à Madagascar.....	49
Figure 5: Carte illustrant les localités riches en pouzzolanes : Nosy-Be .....	51
Figure 6: Localisation du gisement de pouzzolane à Betafo .....	52
Figure 7 : courbe granulométrique du basalte .....	72
Figure 8 : Courbe granulométrique de la pouzzolane .....	73
Figure 9: Courbe granulométrique du cipolin .....	74
Figure 10 : Résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM I – B en fonction du temps .....	78
Figure 11 : Résistance à la compression des ciments mélangés CEM I – B en fonction du temps .....	79
Figure 12 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des ciments mélangés .....	79
Figure 13: Evolution de la résistance à la compression des ciments mélangés .....	80
Figure 14 : Résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM I – P en fonction du temps .....	81
Figure 15 : Résistance à la compression des ciments mélangés CEM I – P en fonction du temps .....	81
Figure 16: Evolution de la résistance à la traction par flexion des ciments mélangés .....	82
Figure 17 : Evolution de la résistance à la compression des ciments mélangés .....	82
Figure 18 : Résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM I – C en fonction du temps .....	83
Figure 19 : Résistance à la compression des ciments mélangés CEM I – C en fonction du temps .....	84
Figure 20 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des ciments mélangés .....	84
Figure 21 : Evolution de la résistance à la compression des ciments mélangés .....	85
Figure 22 : Influence des ajouts sur la résistance mécanique des ciments mélangés à 28 jours .....	86
Figure 23: Résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM I – BCP en fonction du temps.....	87
Figure 24 : Résistance à la compression des ciments mélangés CEM I – BCP en fonction du temps .....	88
Figure 25 : Evolution de la résistance des ciments mélangés CEM I – BCP en fonction du temps .....	88

## LISTE DES PHOTOS

Photos 1: basalte broyé .....	59
Photos 2 : pouzzolane broyée .....	59
Photos 3 : Cipolin broyé.....	59
Photos 4: Déversoir .....	60
Photos 5 : appareil de Vicat .....	66
Photos 6 : conservation des éprouvettes.....	69

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

ASTM : American Society for Testing Materials

UE : Union Européenne

EN : Norme Européenne

NF : Norme Française

AFNOR : Association Française de la Norme

$F_{CE}$  : Classe vraie du ciment

MA : Module d'alumine

MC : Module de chaux

MS: Module de silice

CEM I : Ciment Portland Artificielle

B : basalte

P : Pouzzolane

C : Cipolin

SSB : Surface Spécifique de Blaine

PF: Perte au feu

$R_c$  : Résistance à la compression

$R_t$  : Résistance à la traction

MPa : MegaPascal

RN : Route Nationale

$\rho$  : Densité apparente

$\gamma$  : Densité absolue

$D_{max}$  : Diamètre maximale

## INTRODUCTION GENERALE

Le développement des infrastructures du génie civil telles que : routes, bâtiments, ports, ponts, ouvrages d'art ...constitue une composante essentielle de la puissance économique d'un pays. Grâce à leurs propriétés mécaniques et aux faibles coûts de fabrication par rapport à d'autres matériaux de construction, les matériaux cimentaires sont les plus utilisés dans ce domaine.

Or, on constate sur le marché que le prix du ciment ne cesse d'augmenter surtout à Madagascar. Par ailleurs, selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO<sub>2</sub>. Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le ciment est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine. L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclés ,et les gisements des ressources naturelles telles que la pouzzolane, le cipolin et le basalte, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland, permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et se traduit par la fabrication d'un ciment non polluant sur le plan environnemental.

La recherche d'un liant écologique et économique nous a inspiré le thème de ce mémoire qui s'intitule :

« CONTRIBUTION A L'ETUDE DE FABRICATION DES CEMENTS ECOLOGIQUES-  
UTILISATION DU BASALTE COMME AJOUT CIMENTAIRE »

Le but de cette étude est d'une part de résoudre les problèmes qui se posent sur le plan économique et la pollution de l'environnement, et d'autre part l'utilisation rationnelle et économique des matériaux locaux. Cette étude consiste aussi à mettre en évidence les éventuels effets bénéfiques des ajouts cimentaires sur les propriétés du ciment.

Pour atteindre cet objectif, notre plan sera divisé en deux grandes parties. Dans la première partie, les études bibliographiques, on y parlera de l'industrie cimentière et environnement ; des généralités sur le ciment ; des ajouts cimentaires ; ainsi que les généralités sur les basaltes ; les pouzzolanes et les cipolins.

Dans la deuxième partie, les études expérimentales, on y trouve les matériaux utilisés ; les pratiques des essais normalisés ; les propriétés et caractéristiques des matériaux et l'élaboration du ciment écologique à base de basalte.



## Première partie : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

## Chapitre I. INDUSTRIE CIMENTIERE ET ENVIRONNEMENT [2]

Le ciment est nécessaire à la fabrication du béton. En termes d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium. L'industrie cimentière est fortement émettrice de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ ). La problématique des changements climatiques incite à rechercher tous les moyens de réduction des émissions de  $\text{CO}_2$  et l'amélioration des consommations énergétiques spécifiques qui doit se doubler d'une marche nouvelle de substitution des produits traditionnellement fabriqués (clinker) par des produits présentant des caractéristiques voisines.

### I.1. Les émissions de $\text{CO}_2$ de l'industrie du ciment [1]

Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de  $\text{CO}_2$ . Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète.

Pour les industries cimentaires, on distingue deux sortes d'émission :

- Les émissions provenant des besoins en énergie calorifique ;
- Les émissions provenant du procédé de fabrication du ciment.

A ces deux sources principales il faut ajouter les émissions dues au transport des matières premières et à la consommation d'électricité.

#### I.1.1. Les émissions énergétiques

Les émissions énergétiques représentent environ 40% des émissions totales d'une cimenterie. Elles sont dues aux combustions des combustibles fossiles pour la cuisson du clinker.

#### Efficacités énergétique et énergie de substitution

Depuis 1970, les pays développés ont adopté des politiques énergétiques dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique dans les cimenteries.

Pour valoriser les déchets qui pourraient de toute façon dégagés de  $\text{CO}_2$  lors de leur incinération, on les utilise pour substituer les combustibles fossiles.

L'efficacité énergétique atteint ces maximums dans les pays les plus avancés.

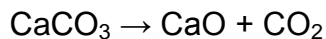
Au Japon, les émissions dues à l'énergie restent constante depuis 1990.

Ainsi, les études d'impacts et les mesures d'atténuation se focalise surtout sur les émissions de procédé.

### **I.1.2. Les émissions de procédé [3]**

C'est le CO<sub>2</sub> produit lors de la réaction de décarbonatation du carbonate de calcium , à une température environ 900 °C, pour donner du CaO.

Selon la réaction :



Pour le ciment Portland, l'émission énergétique représente 0,28 tonne de CO<sub>2</sub>/ tonne de ciment. L'émission de procédé dégage 0,52 tonne de CO<sub>2</sub> par tonne de ciment. Ce qui fait que le ciment Portland dégage environ 0,8 tonne de CO<sub>2</sub> pour une tonne de ciment.

Afin de réduire les émissions de procédés, L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclés, et les gisements de ressources naturelles, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et se traduit par la fabrication d'un béton non polluant et durable sur le plan environnementale.

## **I.2.Impacts environnementaux et mesures d'atténuation [2]**

Actuellement la dégradation de la couche d'ozone et le réchauffement climatique entraînent la dégradation des ressources naturelles ainsi que l'écosystème de Madagascar.

### **Effet de serre et réchauffement climatique**

Les rayons solaires sont convertis en chaleur au contact de la terre. Une partie de chaleurs est renvoyée vers l'espace sous forme de radiation infra rouge. Certains gaz comme le CO<sub>2</sub> ne laissent pas passer ces radiations et les renvoient vers la terre. La chaleur est donc piégée comme dans une serre par ces gaz, d'où « effet de serre ».

Si la température de l'atmosphère augmente à cause de cet effet de serre, il s'en suivra une augmentation de la température moyenne de la planète.

### *I.2.1. Etude d'impact environnemental (EIE) [3]*

L'évaluation des impacts négatifs sur un projet nous permet de prendre des mesures d'atténuation sur ce dernier, l'étude d'impact est donc indispensable avant d'entamer un projet.

#### *I.2.1.1. Impacts sur la santé publique*

L'émission des gaz à effets de serre entraîne la toxicité, la cancérogène, les effets allergènes, les irritations (la peau, la muqueuse, les yeux, ...)

Le réchauffement climatique favorise le paludisme surtout dans les régions côtières de Madagascar.

#### *I.2.1.2. Cas des ressources en eau*

L'évaporation causée par le réchauffement climatique provoque la diminution et même à long terme l'assèchement des marais et des lacs. Cette difficulté en eau induirait :

- Des conflits socioculturels et fonciers entre les migrants et les riverains ;
- Des phénomènes de défrichements relatifs à la conquête de nouvelles terres dans les zones d'accueil plus viables ;
- une augmentation de coût de la vie (augmentation du prix de revient de l'eau).

#### *I.2.1.3. Cas du sol*

Les déchets solides qui contiennent encore des produits chimiques sont les causes de la pollution du sol. Le  $\text{NO}_2$  provoque l'acidification du sol et de l'eau, c'est-à-dire diminution du pH. Cela conduirait à une augmentation de la teneur en élément toxique.

#### *I.2.1.4. Cas de zones côtières*

Le réchauffement climatique entraîne une augmentation du niveau de la mer par fusion de glaciers. De ce fait, certaines petites îles vont disparaître et des villes entières seront submergées d'eau si aucune action n'est entreprise. Prenons comme exemple le cas de Morondava. En 1997, le recul de côte a été évalué entre 5,71m et 6,54m en 2100. Ce qui laisse supposer qu'une partie du littoral de Morondava disparaîtrait de la carte actuelle.

### I.2.1.5. Cas de l'agriculture et élevage

#### ➤ agriculture

La diminution du niveau de l'eau entrainera des difficultés pour l'aménagement en eau de l'agriculture. Comme exemple, dans la région d'Alaoira, on a constaté une diminution de la production de riz qui est passé de 1,2 t/habitant en 1975 à 0,6t/habitant en 1999.

#### ➤ Elevage

La dégradation du sol causée par le feu de brousse entrainera une diminution des terrains qui sont favorables pour l'élevage surtout les bovins.

### I.2.2. Mesures d'atténuation

On sait que lors de leur croissance, les matières végétales captent le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère par la photosynthèse selon la réaction :



Il faut donc, soit conserver les aires protégées, soit procéder à la reforestation pour diminuer les taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

D'autres mesures doivent être aussi prises en compte afin de limiter l'émission des gaz à effet de serre comme :

- Valoriser les déchets industriels ;
- Utilisation des énergies renouvelables ;
- Perfectionner l'efficacité des équipements pour la cuisson ;
- Sensibilisation des publics pour le reboisement et la reforestation.

## Chapitre II. GENERALITES SUR LES CEMENTS

### II.1. Définition du ciment :

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu constitué de silicates et d'aluminates de calcium qui s'hydrate en présence d'eau pour donner naissance à un composé hydraté stable et résistant. Il est inodore et de couleur grise en général, obtenu par la cuisson à haute température (1400 -1450°C) de mélanges dosés de calcaire et d'argile.

### II.2. Les constituants du ciment [4]

Ils présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes :

- ❖ des propriétés hydrauliques: ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau;
- ❖ des propriétés pouzzolaniques: ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables;
- ❖ des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage...).

#### II.2.1. Le clinker :

C'est le principal constituant des ciments. Le clinker est un produit obtenu par la cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkerisation) d'un mélange dosé et homogénéisé de matières contenant les quatre oxydes :  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Les oxydes cités ci-dessus se retrouvent dans le clinker sous forme de silicates et aluminates de calcium anhydres dont les principaux sont:

- $\text{C}_3\text{S}$ : 45 à 65 %,
- $\text{C}_2\text{S}$ : 10 à 30 %,
- $\text{C}_3\text{A}$ : 05 à 15 %,
- $\text{C}_4\text{AF}$ : 05 à 15 %.

Ces différentes phases ne se trouvent pas à l'état pur dans le clinker, mais sous forme de solution solide.

### *II.2.1.1. Alite ou silicate tricalcique ( $C_3S$ )*

Le  $C_3S$  est le minéral le plus important du clinker, étant donné qu'il confère au ciment la plus grande partie de sa résistance.

### *II.2.1.2. Bélite ou Silicate bicalcique ( $C_2S$ )*

Il confère au ciment des résistances initiales moins élevées que le  $C_3S$ , mais développe des résistances à long terme. Son aptitude au broyage est moins bonne que celle du  $C_3S$ .

### *II.2.1.3. Celite ou Aluminate tricalcique ( $C_3A$ )*

C'est le constituant qui possède la prise la plus rapide et la chaleur d'hydratation la plus élevée. Il confère au ciment de très bonnes résistances initiales (1 à 2 jours). Il influe très peu sur les résistances par la suite. Il joue aussi un rôle important dans la tenue du ciment à certains milieux agressifs. L'aluminate tricalcique constitue, avec  $C_4AF$ , ce qu'on appelle la "masse interstitielle du clinker".

### *II.2.1.4. Alumino-ferrite tetracalcique ( $C_4AF$ )*

Il n'entre pas en jeu dans la résistance du ciment, mais joue par contre le rôle de fondant favorisant l'eutectique lors de cuisson du mélange cru. Il est responsable de la teinte des ciments.

## **II.2.2. Les autres constituants principaux :**

Ils sont ajoutés au clinker, dans certaines proportions bien définies (supérieure à 5%), pour donner les différents types de ciments.

- Laitier granulé de haut fourneau - S
- Pouzzolanes naturelles ou artificielles – P ou Q
- Cendres volantes –V ou W
- Schistes calcinés – T
- Calcaire – L
- Fumées de silice – D
- ....

### **II.2.3. Les constituants secondaires :**

Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou dérivé de processus de fabrication de clinker ou des constituants décrits dans les paragraphes ci-dessus, sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux.

Dans tous les cas, ils entrent dans la composition des ciments dans des proportions qui n'excèdent pas 5% en masse.

### **II.2.4. Les additifs**

Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment; tels que, par exemple, des agents de mouture. La quantité totale de tels additifs ne devrait pas dépasser 1 % en masse du ciment (exception faite des pigments). Ces additifs ne doivent pas favoriser la corrosion des armatures ou influencer défavorablement les propriétés du ciment ou du mortier et du béton fabriqués avec ce ciment.

La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure à 0,5% en masse du ciment

### **II.2.5. Sulfate de calcium**

Le gypse (dihydrate de sulfate de calcium ou  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) est le sulfate de calcium le plus utilisé dans le ciment. Le ciment ne contient qu'environ 3 à 6% de gypse, mais ce dernier a une très grande influence sur la résistance et sur la prise du ciment.

On peut substituer le gypse par un autre additif de régulation de prise. Pour certaines compositions de clinker, l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) peut être utilisée en remplacement total du gypse mais, en principe, une substitution de 30 % de gypse par l'anhydrite est possible pour tous les types de clinker.

## **II.3. Normalisation et classification du ciment [4] [12]**

Plusieurs normes sont utilisées pour la normalisation des ciments. Ces normes peuvent être propres à un pays ou adoptées par un ensemble de pays. Les pays membre de l'Union Européenne (UE) par exemple utilisent la même norme (EN 197-1) dans le domaine des ciments.



Les normes de référence des ciments courants sont les normes ASTM C150 et C595 et la norme européenne EN 197-1 publiée par l'AFNOR sous la référence NF EN 197-1.

La norme malagasy pour les liants hydrauliques homologuée par décision du Directeur Général du Bureau Des Normes de Madagascar (B.N.M) et des membres du Comité Technique de Normalisation sous la référence NM 031 / 2005, a été créée. Cette norme NM 031 s'appuie sur la norme européenne EN 197-1.

### II.3.1. Les normes ASTM :

Les normes ASTM sont les plus utilisées pour le commerce mondial du clinker et du ciment. Elles font une distinction entre les ciments Portland et les ciments composés.

#### II.3.1.1. Les ciments Portlands- Norme ASTM C 150

Les ciments Portland reposent principalement sur la norme « ASTM C 150 Specification for Portland Cement ». Associée à différentes méthodes et spécifications de mesures.

Tableau 1 : Spécifications pour les ciments Portland dans la norme ASTM C 150

ASTM C 150: Spécifications pour les ciments Portland	
Type I	Usage général
Type II	Chaleur d'hydratation et résistance au sulfate modérées
Type III	Résistance initiale élevée
Type IV	Faible chaleur d'hydratation
Type V	Résistance au sulfate élevée
A	Avec entraîneur d'air
LA	Avec faible teneur en alcalis

La norme ASTM ne tolère que des additions de sulfate de calcium et des agents entraîneur d'air dans les ciments. D'autres additifs peuvent être utilisés à des conditions de rencontrer les spécifications de la norme C 465 qui fixe les écarts de propriétés des ciments admissibles en cas d'addition :

- le besoin en eau pour la consistance normale ne doit pas être augmenté de plus de 1% ;
- le temps de début de prise mesuré selon la méthode de Vicat ne peut pas varier (diminuer ou augmenter) de plus de 1 heure ou 50% ;

- l'expansion autoclave ne peut pas augmenter de plus de 0.1% ;
- la résistance à la compression ne peut pas diminuer de plus de 5%.

### II.3.1.2. Les ciments hydrauliques composés-Norme ASTM C 595

La norme américaine autorise l'utilisation de pouzzolane et de laitier dans les ciments composés à condition de satisfaire aux spécifications de l'activité pouzzolanique.

Notamment, la résistance à la compression du ciment composé doit atteindre au moins 75 % du ciment Portland de référence.

Tableau 2:Spécifications pour les ciments composés dans la norme ASTM 595

ASTM C 595 : Spécification pour les ciments composés	
Type	Composition
Type S	Ciment au laitier avec minimum 70% de laitier
Type IS	Ciment de haut fourneau avec 25 à 70% de laitier
Type I (SM)	Ciment Portland au laitier contenant moins de 25% de laitier
Type P	Ciment à la pouzzolane avec 15 à 40% de pouzzolane
Type IP	Ciment à la pouzzolane avec 15 à 40% de pouzzolane, mais avec un développement de la résistance plus forte que le type P
Type I (PM)	Ciment Portland à la pouzzolane contenant moins de 15% de pouzzolane

Tous ces types de ciment peuvent être conditionnés pour répondre aux critères :

- Résistance modérée au sulfate (MS)
- Air entrainé (A)
- Chaleur d'hydratation modérée (MH)

### II.3.2. La norme Européenne EN 197-1

Elle est publiée par l'AFNOR sous la référence NF EN 197-1 « Ciment-Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ».

La norme NF EN 197-1 est subdivisée en trois rubriques :

- ✓ Une première partie descriptive qui définit les constituants du ciment et délimite les différents types de ciments ;
- ✓ Une deuxième partie qui fixe les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico-chimiques ;

- ✓ Une troisième partie consacrée aux critères de conformité, les procédures de leur vérification et les seuils de garantie.

### II.3.2.1. Classes de résistance

Un mode de classification des ciments le plus utilisé est la classification suivant les résistances mécaniques, et plus exactement la résistance à la compression simple.

Selon la norme NF EN 197-1, les ciments sont réparties en trois classes : 32.5, 42.5 et 52.5, définies par la valeur minimale garantie de la résistance normale à 28 jours. La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours sur mortier normal conformément à la norme NF EN 197-1 et exprimée en MPa.

Tableau 3: Classes de résistance selon la norme NF EN 197-1

Classes de résistance			
Désignation de la classe	Résistance à la compression [MPa]		
	à 2 jours	à 28 jours	
	Limite inférieure	Limite inférieure	Limite supérieure
32.5N	-	$\geq 32.5$	$\leq 52.5$
32.5 R	$\geq 10$		
42.5N	$\geq 10$	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$
42.5 R	$\geq 20$		
52.5N	$\geq 20$	$\geq 52.5$	-
52.5 R	$\geq 30$		
➤ Sous classe N: Normale ➤ Sous classe R: résistance à jeune âge élevée			

### Remarques

- Pour l'ancienne norme NF P 15 301 jusqu'à 1994, les classes de résistance étaient définies par la valeur moyenne de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa.
- L'ancienne classe 35 (n'a pas de correspondance dans la nouvelle norme), pour les autres classes on a :
  - 45 et 45 R → 32.5N et 32.5R ;
  - 55 et 55 R → 42.5N et 42.5R ;

- HP et HPR → 52.5N et 52.5R.

- Pour les liants dont la résistance normale moyenne est inférieure à 35MPa, la classe de résistance est définie par sa valeur exprimée en bar.

#### II.3.2.2. Les ciments de la norme NF EN 197-1 (ciments courants) :

Les ciments de la norme NF EN 197-1 sont définis comme ciments courants, à l'instar des autres ciments plus spécifiques, dans la composition, la fabrication et/ ou l'utilisation.

Dans la norme NF EN 197-1, les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion des constituants.

Tableau 4: Les cinq types de ciments courants

Type	Désignation
Ciments Portland	CEM I
Ciments Portland composés	CEM II /A ou B
Ciments de haut fourneau	CEM III /A, B ou C
Ciments pouzzolaniques	CEM IV /A ou B
Ciments composés	CEM V / A ou B

Tableau 5: Les différents types de ciments de la norme NF EN 197-1

Types	Notation		Composition (en % en masse) (1)		
	Dénomination	Symbole (2)	Clinker	Constituants principaux	Constituants secondaires
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95 - 100	0	0 - 5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A – S	80 - 94	6 – 20	0 - 5
		CEM II/B – S	65 – 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland à la fumée de silice (3)	CEM II/A – D	90 - 94	6 - 10	0 - 5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A – P	80 - 94	6 – 20	0 - 5
		CEM II/B – P	65 – 79	21 - 35	0 - 5
		CEM II/A – Q	80 - 94	6 – 20	0 - 5
		CEM II/B – Q	65 – 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A – V	80 - 94	6 – 20	0 - 5
		CEM II/B – V	65 – 79	21 - 35	0 - 5
		CEM II/A – W	80 - 94	6 – 20	0 - 5
		CEM II/B – W	65 – 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A – T	80 - 94	6 – 20	0 - 5
		CEM II/B – T	65 – 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A – L	80 - 94	6 – 20	0 - 5
		CEM II/B – L	65 – 79	21 - 35	0 - 5
		CEM II/A – LL	80 - 94	6 – 20	0 - 5
		CEM II/B – LL	65 – 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland composé (4) (5)	CEM II/A – M	80 - 94	6 – 20	0 - 5
		CEM II/B – M	65 – 79	21 - 35	0 - 5
CEM III	Ciment de haut fourneau (6)	CEM III/A	35 - 64	36 – 65	0 - 5
		CEM III/B	20 – 34	66 – 80	0 - 5
		CEM III/C	5 - 19	81 – 95	0 - 5
CEM IV	Ciment pouzzolanique (5) (7)	CEM IV/A	65 – 90	11 – 35	0 - 5
		CEM IV/B	45 – 64	36 – 55	0 - 5
CEM V	Ciment composé (5)	CEM V/A	40 – 64	36 – 60	0 - 5
		CEM V/B	20 - 39	61 - 80	0 - 5

(1) : Les valeurs données se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

(2) : Signification des lettres :

- Quantité des constituants principaux (autres que le clinker) :
  - A : 6 à 20 %
  - B : 21 à 35 %
  - C : 36 à 65 %
- Nombre: la lettre M pour signaler qu'on a au moins 2 constituants principaux
- Noms :
  - S: laitier de haut fourneau
  - D: fumée de silice
  - P: pouzzolane naturelle
  - Q: pouzzolane naturelle calcinée
  - V: cendres volantes siliceuses
  - W: cendres volantes calciques
  - T: schiste calciné
  - L ou LL: calcaire

(3) : La proportion de fumée de silice est limitée à 10 %

(4) : Présence de plusieurs constituants principaux à différentes proportions

(5) : Les constituants principaux doivent figurer dans la désignation du ciment

(Symboles entre parenthèses)

(6) : Le laitier de haut fourneau est le seul principal ajout au clinker pour ce type de ciments

(7) : Les principaux ajouts sont de la fumée de silice, de la pouzzolane naturelle et des cendres volantes (D, P ou Q et V ou W)

A titre indicatif nous donnons ci-après le tableau de correspondance entre anciennes et nouvelles désignations des ciments.

Tableau 6: Correspondance entre anciennes et nouvelles désignation des ciments

Depuis 1994 NF P 15 301		À partir de 2001 NF EN 197-1	
Ciment Portland CPA – CEM I		Ciment Portland CEM I	
Ciment Portland composé CPJ – CEM II / A ou B		Ciment Portland au laitier CEM II / A ou B - S	
		Ciment Portland à la fumée de silice CEM II / A ou B - D	
		Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II / A ou B - P
			CEM II / A ou B - Q
		Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II / A ou B - V
			CEM II / A ou B - W
		Ciment Portland au schiste calciné CEM II / A ou B - T	
		Ciment Portland au calcaire	CEM II / A ou B - L
CEM II / A ou B - LL			
Ciment Portland composé CEM II / A ou B - M			
Ciment de haut fourneau	CHF – CEM III / A ou B	Ciment de haut fourneau CEM III / A, B ou C	
	CLK – CEM III / C		
Ciment pouzzolanique CPZ – CEM IV / A ou B		Ciment pouzzolanique CEM IV / A ou B	
Ciment au laitier et aux cendres CLC – CEM V / A ou B		Ciment composé CEM V / A ou B	

### II.3.2.3. Les ciments qui font l'objet d'autres normes

D'autres ciments, seulement évoqués par la norme NF EN 197-1, font l'objet de normes spécifiques.

#### a. Ciment de laitier à la chaux (CLX) NF P 15 306

Le ciment de laitier à la chaux est obtenu par broyage d'un mélange intime de laitier de haut fourneau et de chaux. Ce type de ciment fait partie de la famille des liants pouzzolaniques.

- Deux classes de résistance : 100 et 160.

#### b. Ciment a maçonnerie (CM) NF P 15 307

Il résulte de mélange en proportion variable de liants hydrauliques (clinker, CPA, CPJ, chaux hydraulique...) et d'autres produits (laitier de haut fourneau, pouzzolane, filler...). La proportion de laitier doit être inférieure à 50%, de même pour la proportion des éléments inertes.

- Deux classes de résistance : 160 et 200

### c. Ciment naturel (CN) NF P 15308

Ce ciment résulte de la cuisson d'un mélange naturel de calcaire et d'argile de très grande régularité. Les ciments de « grappiers » sous-produit de la fabrication de la chaux vive font partie de ce type de ciment.

### d. Ciment sur sulfaté (CSS) NF P 15 313

C'est un ciment à prise lente mais à durcissement rapide développé entre les deux grandes guerres. Il est obtenu par mélange intime de laitier de haut fourneau, d'anhydre ou de gypse avec un peu de clinker. Sa composition chimique moyenne est: 80% de laitier + 15% d'anhydre + 5% de clinker

- Deux classes de résistance : 35 et 45 (Ancienne norme)

### e. Ciment prompt naturel (CNP) NFP15 314

Le ciment prompt naturel est obtenu par la cuisson à température modérée (1000-1200°C) d'un calcaire argileux de composition très régulière suivie d'un broyage très fin. C'est un produit naturel à prise et durcissement rapides à faible retrait et à résistances élevées à très court terme.

Le ciment prompt est caractérisé par la présence de silicate de calcium essentiellement sous la forme de silicate bicalcique actif d'aluminate de calcium riche en alumine et de sulfo-aluminate de calcium qui une spécificité du produit.

### f. Ciment alumineux fondu (CA) NF P 15 315

Il résulte de la cuisson jusqu'à la fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite suivie d'un broyage sans gypse à une finesse comparable à celle des CEM I. Le ciment alumineux fondu, appelé couramment « ciment fondu » est composé principalement d'alumine, d'oxydes de fer et de silice dans des proportions telles que le ciment obtenu renferme au moins 30% de sa masse d'alumine. Il est parfois dénommé « Ciment réfractaire » à cause de ses propriétés réfractaires qui permettent son utilisation dans la fabrication du béton réfractaire. C'est un ciment à prise lente mais à durcissement rapide.

#### II.3.2.4. Caractéristiques complémentaires normalisés

Pour certains types d'ouvrages des exigences relatives aux caractéristiques des ciments peuvent être requises ; elles font l'objet de normes spécifiques.



#### a. Ciments pour travaux à la mer (PM) NF P 15 317

Les ciments n'ont pas tous la même résistance face aux attaques chimiques liées à l'environnement marin; l'emploi de ciments présentant de bonnes caractéristiques de résistance à ces agressions est donc nécessaire.

Ces ciments sont signalés par la mention PM (Prise Mer) dans le cartouche de marquage. Ils présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique ( $C_3A$ ) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfates en présence d'ions chlorures, au cours de la prise et ultérieurement

#### b. Ciments à teneur en sulfures limitée (CP) NF P 15 318

Ces ciments sont des produits dont les caractéristiques sont complémentaires de celles des ciments de la norme NF EN 197-1. Ils sont signalés par la mention CP sur leur emballage. Ces ciments trouvent leurs principales applications dans les ouvrages de masse et certains ouvrages en béton précontraint.

#### c. Les ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) XP P 15 319

Les eaux séléniteuses constituent un milieu particulièrement agressif, qui nécessite l'emploi de ciments spécifiques. Ces ciments présentent également des teneurs limitées en aluminat tricalcique ( $C_3A$ ). Ils comportent la mention ES sur leur emballage.

### II.4. Caractéristiques des ciments [4]

Un ciment est caractérisé par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur la pâte pure, soit sur un «mortier normal» (mélange normalisés de ciment, sable et eau défini par la norme NF EN 196-1). Ces critères constituent les caractéristiques du ciment. Elles sont d'ordre chimique, minéralogique, physique et mécanique.

#### II.4.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

##### II.4.1.1. Composition chimique élémentaire

Elle renseigne sur les différents éléments chimiques présents dans le ciment. Les éléments sont déterminés sous forme d'oxydes (et sous forme d'ions pour quelques rares exceptions).

On distingue:

- les quatre oxydes principaux :  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;
- les éléments secondaires :  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,...

Elle est la base de calcul de la composition minéralogique.

#### a. Hydraulicité

C'est une grandeur qui permet d'évaluer le caractère hydraulique d'un liant. Elle est définie par l'indice d'hydraulicité  $i$  :

$$i = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

L'indice d'hydraulicité représente le rapport entre les constituants acides et celles des constituants basiques du liant.

#### b. Chaux de saturation

C'est la quantité maximale de chaux qui peut être fixée par les constituants acides ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) contenus dans le mélange.

On a l'expression de la chaux de saturation :

**$\text{CaOsat} = 2,80 \text{ SiO}_2 + 1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3$**  (mélange normal) ;

**$\text{CaOsat} = 2,80 \text{ SiO}_2 + 1,10 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,70 \text{ Fe}_2\text{O}_3$**  (mélange riche en oxyde de fer) ;

#### c. Modules et valeurs requises

Tout ciment est caractérisé par trois grandeurs :

- ✓ le module de chaux MC ;
- ✓ le module de silice MS ;
- ✓ le module d'alumine ou module oxydique MA.

Ce sont des valeurs requises, en rapport avec la composition minéralogique et les performances mécaniques attendus du ciment.

#### ❖ Module de chaux MC

C'est le rapport exprimé en pourcentage de la teneur en chaux du mélange sur la chaux de saturation.

$$MC = \frac{CaO}{CaO_{sat}} * 100$$

MC varie de 92 à 103 pour l'ensemble des ciments, et de 95 à 98 pour les ciments Portland courants.

- Si  $MC = 100$ , le mélange contient exactement la quantité de chaux qui peut être fixée par  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  et  $Fe_2O_3$  contenus dans le mélange.
- Si  $MC > 100$ , il existe forcément de la chaux libre non combinée dans le mélange ; tout le  $C_2S$  produit intermédiairement est transformé en  $C_3S$ .
- Si  $MC < 100$ , le ciment contient à la fois du  $C_2S$  et du  $C_3S$ .

Pour un ciment ou un clinker, c'est la chaux effectivement combinée qui intervient dans le calcul de MC.

#### ❖ Module de silice MS

Il renseigne sur la quantité de silicates et celles d'aluminates contenus dans le ciment ou le clinker

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

MS varie de 1,6 à 3,4 pour les ciments en général, et de 2,2 à 2,5 pour les ciments Portland courants.

#### ❖ Module d'alumine MA

Ce module caractérise la nature de la masse interstitielle du clinker, contenant la presque totalité des oxydes d'aluminium et de fer.

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

- Si  $MA < 0,638$ , le ciment contient du  $C_2F$  au lieu de  $C_3A$ , on dit que le mélange est « riche en fer »
- Si  $MA > 0,638$ , le ciment est normal et contient du  $C_3A$ .

Les ciments sans  $C_3A$  présentent une grande résistance chimique aux sulfates, ainsi qu'une faible chaleur d'hydratation.

MA varie en général de 1,2 à 2,5 et de 1,5 à 2 pour les ciments Portland courants.

#### II.4.1.2. Composition minéralogique – Formule de BOGUE

##### a. Définition

La composition minéralogique d'un ciment est l'ensemble des teneurs en constituants principaux ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_4AF$ , et  $C_3A$  ou  $C_2F$ ), ainsi que celles d'autres constituants du clinker de moindre importance, et celles des composés introduits volontairement (constituants principaux, constituants secondaires et régulateurs de prise) ou accidentellement dans le ciment.

La composition minéralogique est déterminante sur les propriétés hydrauliques et mécaniques des ciments, et par conséquent, sur leur mode d'utilisation.

La composition minéralogique peut être déterminée par l'association de quelques méthodes physiques de caractérisation :

- ✓ microscopie électronique (MEB),
- ✓ diffraction des rayons X (DRX),
- ✓ spectrométrie infra rouge (SIR),
- ✓ analyse thermique différentielle,
- ✓ ...

Elle peut être déduite de la composition chimique en utilisant la « formule de BOGUE ».

Dans ce cas elle est dénommée composition minéralogique potentielle.

##### b. Formule de BOGUE

- Quantité insuffisante de chaux :  **$MC \leq 90$**

Système  $C_3S$ -  $C_3A$  –  $C_5A_3$  –  $C_4AF$  ( $C_2S$  ne peut pas se transformer en  $C_3S$ )

- $C_2S = 2,87 SiO_2$

- $C_3A = 3,61 \text{ CaO} - 6,74 \text{ SiO}_2 - 3,81 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 2,96 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
- $C_5A_3 = 4,88 \text{ SiO}_2 + 4,31 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,92 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 2,61 \text{ CaO}$
- $C_4AF = 3,04 \text{ Fe}_2\text{O}_3$

➤ Quantité suffisante de chaux mais sans excès : **90 <MC ≤ 100 ; MA > 0,638**

Système  $C_3S - C_2S - C_3A - C_4AF$  (théoriquement, il n'y a pas de chaux libre)

- $C_3S = 4,07 \text{ CaO} - 7,61 \text{ SiO}_2 - 6,72 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,43 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
- $C_2S = 2,87 \text{ SiO}_2 - 0,75 \text{ C}_3S$
- $C_3A = 2,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,69 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
- $C_4AF = 3,04 \text{ Fe}_2\text{O}_3$

➤ Excès de chaux : **MC > 100 ; MA > 0,638**

Système  $\text{CaO} - C_3S - C_3A - C_4AF$  (Théoriquement tout  $C_2S$  est transformé en  $C_3S$ , et il y a existence de chaux libre)

- $C_3S = 3,80 \text{ SiO}_2$
- $C_3A = 2,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,69 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
- $C_4AF = 3,04 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
- $\text{CaO}_{\text{libre}} = \text{CaO} - \text{CaO}_{\text{sat}}$

➤ Quantité suffisante de chaux mais excès en oxyde de fer : **90 <MC ≤ 100 et MA < 0,638** : « Mélange riche en fer »

Système  $C_3S - C_2S - C_2F - C_4AF$  (Théoriquement, il n'y a pas de chaux libre).

- $C_3S = 4,07 \text{ CaO} - 7,61 \text{ SiO}_2 - 4,48 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 2,86 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
- $C_2S = 2,87 \text{ SiO}_2 - 0,75 \text{ C}_3S$
- $C_2F = 1,70 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 2,67 \text{ Al}_2\text{O}_3$
- $C_4AF = 4,77 \text{ Al}_2\text{O}_3$

Gilles BERARD – BERGERY propose une composition minéralogique moyenne pour les ciments Portland.

Tableau 7: Composition minéralogique moyenne des ciments (en % massique)  
ciments Portland. [5]

Constituant	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Teneur	60	15	8	8

### c. Chaux libre

Le suivi de la quantité de chaux libre contenue dans le clinker ou le ciment est très important car il renseigne sur le degré de cuisson du produit. La chaux libre ou chaux non combinée est en relation étroite avec les qualités d'un ciment (performances mécaniques, expansion, poids au litre...). En général, la quantité maximale de chaux libre acceptable est de 2%.

La chaux qui intervient dans la formule de Bogue et dans le calcul de MC est celle dont on a déduit la chaux libre et celle apportée par le régulateur de prise.

$$MC = \frac{CaO_{comb}}{CaO_{sat}} \times 100$$

CaO<sub>comb</sub> : Chaux combinée

- Pour un clinker :  $CaO_{comb} = CaO_{tot} - CaO_{libre}$
- Pour un ciment :  $CaO_{comb} = CaO_{tot} - CaO_{libre} - 0.7 SO_3$

## II.4.2. Caractéristiques physiques [6] [7] [8]

### II.4.2.1. Couleur

Elle varie avec la composition chimique des matières premières (particulièrement la teneur en oxyde de fer) et la nature des combustibles utilisés pour la fabrication du clinker.

Généralement, elle est grise (à cause des cendres des combustibles), mais il existe toute une gamme de colorise et particulièrement les ciments blancs obtenus par l'utilisation des matières premières pures et de combustibles fluides.

### II.4.2.2. Finesse de mouture (NF EN 196-6)

Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous grains contenus dans un gramme de ciment. La notion la plus utilisée est la surface

spécifique de BLAINE notée SSB. Elle s'exprime en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Suivant le type de ciment, cette grandeur est généralement comprise entre 2800 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

#### II.4.2.3. Densités

##### a. Masse volumique apparente

Appelée aussi « poids au litre du ciment », elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1000  $\text{kg}/\text{m}^3$  en moyenne.

##### b. Masse volumique absolue ou masse spécifique

Elle représente la masse de tous les grains de solides contenus dans une unité de volume (vide entre les éléments exclus). Il varie de 2,9 à 3,15  $\text{kg}/\text{l}$  suivant le type de ciment. Un ciment de faible poids spécifiques ( $d < 2,9$ ) indique une forte concentration en produits d'addition ou une mauvaise cuisson pour son clinker.

#### II.4.2.4. Début de prise (NF EN 196-3)

C'est le temps au bout duquel le ciment commence à faire prise. Le temps de début de prise est déterminé par l'instant où l'aiguille de VICAT de 1  $\text{mm}^2$  de section ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment.

Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 45 minutes ou 1 heure.

#### II.4.2.5. Expansion (NF EN 196 - 3)

C'est un phénomène qui se passe au cours de la prise et le durcissement du ciment par une augmentation de volume due à un excès de sulfates, de chaux libre ou de magnésie.

Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion ne doit pas dépasser 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments (NF EN 197 – 1).

#### II.4.2.6. Retrait (NF P 15 433)

C'est une diminution de volume pendant le durcissement qui est due à un départ d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation. La mesure est effectuée sur éprouvette prismatique de « mortier normal » 4x4x16 cm.

Le retrait est limité à 0,8 mm/m ou à 1 mm/m suivant le type de ciment.

#### II.4.2.7. Eau de consistance normale

Elle caractérise la quantité d'eau utile pour obtenir une consistance normale pour un mortier normal (NF EN 196-1).

#### II.4.3. Caractéristiques mécanique

Elles sont définies par la capacité d'un matériau à résister à toute sollicitation extérieure impliquant une force. La plus importante pour les ciments est la résistance à la compression simple. Quelque fois, il y a lieu de déterminer la résistance à la traction par flexion à l'usure. Conformement à la norme NF EN 196-1, la classe de résistance d'un ciment est définie par la valeur minimale de la résistance à la compression simple du mortier normal à 28 jours d'âge et exprimée en MPa.

La classe vrai d'un ciment, notée  $F_{CE}$  est la résistance moyenne effective mesurée expérimentalement (avant utilisation d'un nouveau lot).

#### II.5. Domaines d'utilisation

Les ciments tirent leurs principaux domaines d'utilisation dans la confection de mortiers et de bétons ainsi que d'autres produits dérivés.

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

- Résistances mécaniques,
- Résistance à une attaque physique ou chimique,
- Mise en œuvre particulière.



Tableau 8: Domaines d'utilisation des différents types de ciments [9]

TYPES	DOMAINES D'UTILISATION	EMPLOIS NON RECOMMANDES
CEM I CEM II / A ou B CEM V / A ou B	Travaux courants de béton en élévation ou fondation	Présence d'eaux agressives
CEM III / A, B ou C	- Travaux de béton armé souterrains - Travaux en eaux agressives - Travaux hydrauliques	- Travaux en élévation - Enduits et chapes - Ouvrages de faible épaisseur
CEM IV / A ou B	- Construction sous-marine et souterraine en béton et béton armé - Etanchéité et résistance à l'eau	- Travaux aériens - Bétonnage par temps froid
CNP	- Travaux à prise rapide : scellement, aveuglement de voies d'eau - Travaux en milieu agressif	Tout autre emploi
CA	- Doublure des appareils thermiques - Mortier et béton réfractaire - Bétonnage par temps froid - Pieux d'essai en béton armé	- Bétonnage par temps chaud - Travaux de masse - Présence d'eau alcaline - Mélange avec d'autres ciments
CLX	- Travaux de maçonnerie - Présence d'eau quelque peu agressive - Travaux de génie rural - Tous travaux souterrains	- Travaux en élévation - Travaux en béton armé
CM	- Maçonnerie - Agglomérés	Travaux de béton armé
CN	- Petits travaux de bétonnage - Maçonnerie - Enduits - Agglomérés - Présence d'eau quelque peu agressive	Travaux de béton armé
(ES)	- Travaux de fondation à décoffrage rapide	- Présence d'eaux acides - Ouvrages soumis au gel
(PM)	- Présence d'eaux agressives	- Mélange avec d'autres ciments
(CP)	- Travaux de béton armé souterrains - Travaux en eaux agressives - Travaux hydrauliques	- Travaux en élévation - Enduits et chapes - Ouvrages de faible épaisseur

## II.6. Fabrication du ciment [4] [10]

### II.6.1. Aperçu général

Le principal constituant du ciment est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne 80% et 20%.

Actuellement, les cimenteries modernes utilisent jusqu'à quatre matières premières : le calcaire, un constituant riche en silice, un autre riche en alumine et un dernier riche en oxydes de fer.

La fabrication du ciment dépense beaucoup d'énergie : concassage et broyage des matières premières – homogénéisation du mélange cru – cuisson à haute température – broyage du clinker.

Quel que soit le procédé utilisé, la fabrication du ciment doit comprendre les phases suivantes :

- approvisionnement en matières premières ;
- dosage du cru ;
- préparation du cru ;
- cuisson ;
- traitement du clinker ;
- Conditionnement.

Il existe deux procédés extrêmes de fabrication :

❖ Le procédé par voie sèche

Les matières premières sont broyées à sec et envoyées à l'état sec dans les fours. Ce procédé est, actuellement et de très loin, le plus utilisé dans les pays industrialisés depuis l'adoption de la technique des préchauffeurs (échangeurs de chaleur à cyclones) et de précalcinateur (foyer complémentaire dans le dernier cyclone).

❖ Le procédé par voie humide

Le mélange cru, est broyé avec de l'eau pour former une pâte que l'on envoie dans les fours.

Entre ces deux procédés, il y a :

- Le procédé par voie semi-sèche : le cru est broyé à sec puis envoyé dans les fours sous forme de granules, par aspersion d'eau.

- Le procédé par voie semi-humide : le cru est broyé à sec puis envoyé dans les fours sous forme de pâte.

### II.6.2. Les différentes étapes de fabrication du ciment

#### Approvisionnement en matières premières

Les matières premières sont extraites de carrière généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont transportés vers l'atelier de concassage et réduits en une dimension maximale de 50mm. Le concasseur est situé parfois sur le lieu même de l'extraction,

#### II.6.2.1. Préparation du cru

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage et délayage, dans les proportions définies, en un mélange très fin de diamètres moyens  $\leq 90 \mu\text{m}$  qui constitue le "cru". Les matières premières de bases doivent contenir les quatre oxydes indispensables à la fabrication du clinker : la chaux  $\text{CaO}$ , la silice  $\text{SiO}_2$ , l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et l'oxyde de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Ces composants se trouvent dans les gisements en proportion variable. A cette occasion, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant des ajouts en faible proportion: magnésie, sulfates et sulfures,...)

Tableau 9: Teneurs limites et teneurs moyennes des éléments chimiques entrant dans la fabrication de ciment

Oxydes	Teneurs limites [%]	Teneurs moyennes [%]
CaO	60/69	65
SiO <sub>2</sub>	18/24	21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4/8	6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1/8	3
MgO	<5	2
K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O	<2	1
SO <sub>3</sub>	<3	1

Le cru est préparé automatiquement sous forme de poudre (voie sèche) ou de pâte (voie semi-humide ou humide), en fonction de la technique de fabrication utilisée.

#### a. La préhomogénéisation :

Les matières premières employées pour la fabrication du ciment sont hétérogènes. Afin de réduire le cout en énergie dans le système d'homogénéisation, les cimentiers

ont adopté l'installation de préhomogénéisation qui est un mélange préliminaire et de stockage des matières. Ces opérations s'insèrent entre l'exploitation des carrières et les opérations de séchage-broyage du cru.

*b. Le broyage-séchage :*

Après préhomogénéisation les matières premières sont finement broyées à 0,2 mm pour être chimiquement réactives au cours de leur cuisson dans le four. Notons que les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de crus très fins. Le séchage et le broyage jusqu'à l'obtention d'une farine ayant un refus nul au tamis de 160µm sont assurés par les broyeurs à crus.

Pour une cuisson par voie sèche, les gaz chauds provenant du four et du refroidisseur à des températures entre 300 et 400°C assurent l'apport calorifique nécessaire au séchage. Dans un four à voie semi-sèche, les fumées sortent à basse température, de 120 à 150°C. Donc, il faut utiliser une source auxiliaire de chaleur.

*c. L'homogénéisation*

Il permet d'obtenir une farine crue de composition chimique uniforme afin d'obtenir un clinker de qualité constante. L'homogénéisation est réalisée par un brassage intime de la farine par de l'air dans des silos d'homogénéisation.

*II.6.2.2. Cuisson du cru*

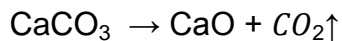
Réalisée dans des fours rotatifs à une température maximale d'environ 1450°C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker (grains de 0,5 à 4 cm de diamètre). A la sortie du four, le clinker est refroidi rapidement (à une température de 50 à 250°C) pour éviter une forte cristallisation.

Les processus de cuisson et de refroidissement influent sur les formes minéralogiques des composants du clinker.

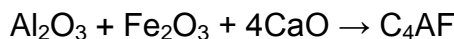
Quel que soit la technique de fabrication, les réactions lors de la cuisson sont résumées comme les suivantes :

- 100 à 120°C : départ de l'eau d'humidité ;
- 500 à 750°C : déshydratation des minéraux argileux ;
- 700 à 1000°C : décomposition des argiles ;

- Vers 950°C : décarbonatation ;



- 1000 à 1100°C : formation de ferrite  $\text{C}_4\text{AF}$ , tout le fer se combine avec une partie de l'alumine.



- Vers 1250°C :

- Formation de celite ou aluminat tricalcique  $\text{C}_3\text{A}$  : l'alumine restant se combine avec de la chaux.



- Formation d'alite vers 1300-1450°C : la silice se combine avec 2 moles de CaO.



- Apparition d'une phase fondue

- 1250 à 1450°C:

- Augmentation de la quantité de la phase fondue ;
- Mise en solution de CaO et  $\text{C}_2\text{S}$  ;

- Vers 1450°C : formation de  $\text{C}_3\text{S}$  (réaction de clinkerisation) : combinaison d'une mole de  $\text{C}_2\text{S}$  avec de la chaux.



#### II.6.2.3. Refroidissement du clinker

Dans le cas des ciments gris, le clinker est refroidi, dans la plupart des cimenteries actuelles, par un refroidisseur à grilles:

Dans le cas du ciment blanc, un refroidisseur rotatif est inséré entre le four rotatif et le refroidisseur à grilles. Son rôle est de refroidir très rapidement le clinker à sa sortie du four, avant qu'il ne soit oxydé au contact de l'air afin de maintenir la qualité du ciment blanc. Il s'agit d'un cylindre légèrement incliné qui tourne sur lui-même et à l'intérieur duquel de l'eau est pulvérisée à l'aide de multiples buses.

#### II.6.2.4. Broyage du clinker

Le Clinker Portland est additionné de gypse et éventuellement d'ajouts cimentaires (Laitier, pouzzolane, calcaire,...) et est broyé en poudre fine d'une granulométrie inférieure à 80  $\mu\text{m}$ . On obtient le ciment Portland si on n'utilise pas d'autres ajouts que le gypse et dans le cas contraire un ciment composé.

#### II.6.2.5. Traitement du clinker – conditionnement

Le clinker sorti du four est envoyé vers un dépôt pour un délai minimum de 15 jours, pour permettre le refroidissement définitif et le pourrissage (il est rarement broyé directement). Il est ensuite broyé avec du gypse (4 – 5 % en masse) et les autres constituants si l'on veut obtenir d'autres types de ciments que le ciment Portland.

Les grains de ciment étant récupérés à la sortie du broyeur sont expédiés vers des silos de stockage. Ces silos sont cylindriques et de capacité pouvant aller jusqu'à 10.000 tonnes à l'abri de l'humidité. Il quitte l'usine soit mis en sac de 50kg généralement, soit en vrac.

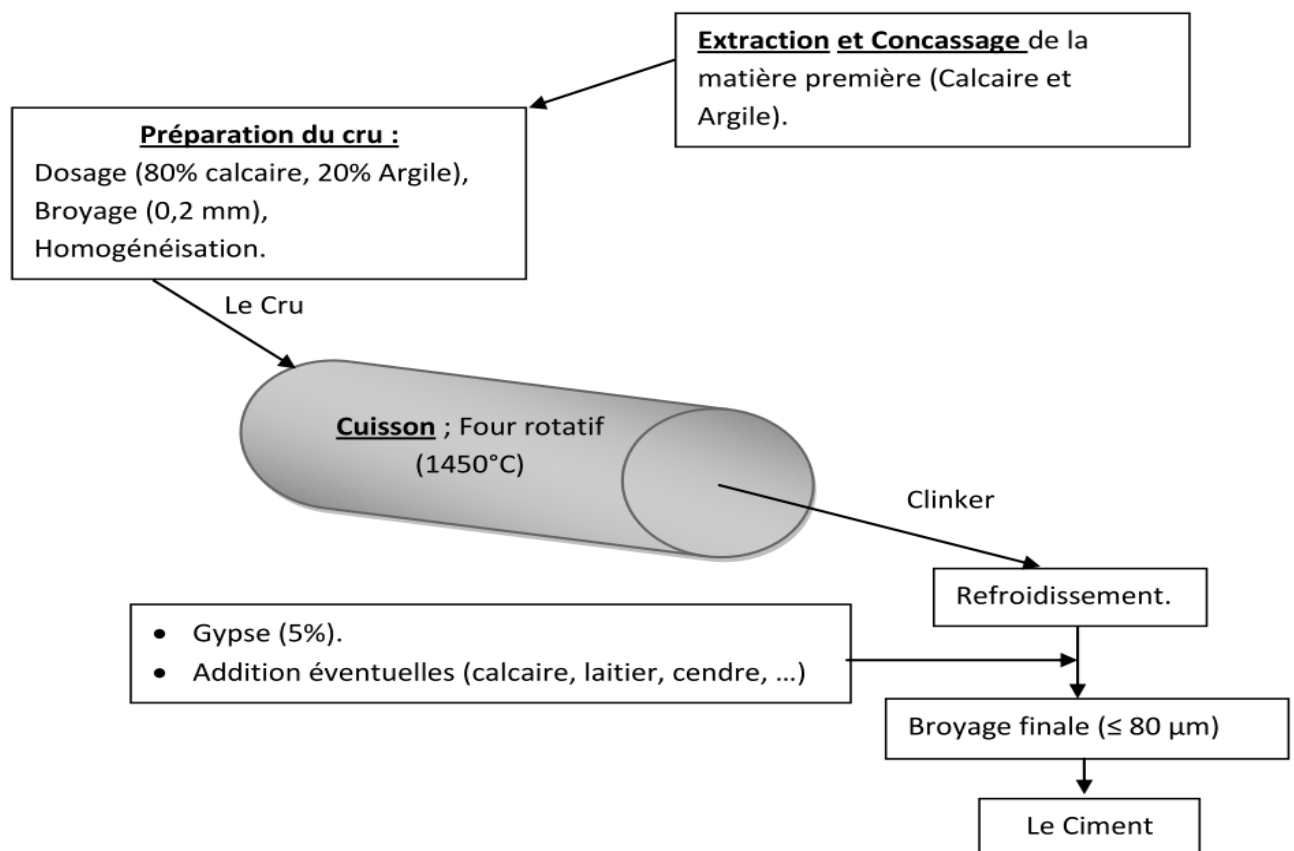


Figure 1: Schéma du procédé de fabrication du ciment [11]

## II.7. Hydratation du ciment portland [10]

La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau

Henri Le Chatelier a décrit les trois phénomènes qui concourent au phénomène de prise :

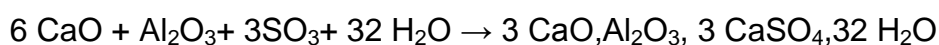
- ✓ la dissolution des constituants du ciment dans l'eau,
- ✓ la formation des solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates,
- ✓ la précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides intergranulaires.

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et, éventuellement, celles de ses composants secondaires.

Comme le ciment est composé principalement de  $C_3S$ , c'est l'hydratation du  $C_3S$  qui contrôle la cinétique globale de l'hydratation. Il existe cependant une synergie entre les différentes réactions.

Période 1 : réactions initiales

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le  $C_3S$  et le  $C_3A$  des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables) : les ions entrent en solution.



Période 2 : période dormante

Où la pâte pure (ciment et eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à quelques heures suivant la nature du ciment). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent; mais sont ralenties grâce aux ajouts de gypse.

## Période 3 : Début et fin de prise

Après une ou deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide. Le temps de début de prise est déterminé à l'instant où l'aiguille de Vicat ( $S = 1 \text{ mm}^2$ , masse = 300 g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment.

## Période 4 : Durcissement

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très lentement; mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.



Figure 2 : phases d'hydratation du ciment

Les mécanismes complexes à l'origine de la création des différents produits de l'hydratation que sont les silicates et les aluminates sont l'adsorption, l'hydrolyse, la dissolution, la solvatation et la cristallisation.



### Chapitre III. LES AJOUTS CIMENTAIRES [13]

#### III.1. Généralités

Les ajouts cimentaires sont des poudres fines, dont la granulométrie ne dépasse pas 80  $\mu\text{m}$ , ajoutées au ciment pour réduire le coût de production, diminuer les émissions de  $\text{CO}_2$  et/ou améliorer les propriétés du béton.

Par combinaison avec la chaux libérée par l'hydratation de  $\text{C}_2\text{S}$  et de  $\text{C}_3\text{S}$  et en présence d'eau, la plupart des ajouts minéraux peut donner des composées hydratées stables.

Selon la réaction pouzzolanique :

Pouzzolane + chaux + eau  $\rightarrow$  Silicate de calcium hydraté ou CSH

Remarquons que, plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide.

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux, appelée Portlandite, par suite de la réaction d'hydratation du  $\text{C}_2\text{S}$  et du  $\text{C}_3\text{S}$  (30 % de la masse anhydre du ciment). La chaux qui ne réagit pas diminue la résistance de la pâte.

Dans un béton, le seul aspect positif de la présence de chaux est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier.

Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformée en C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète.

Ces ajouts jouent le rôle suivant: d'après leur composition ils se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker.

Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker.

### III.2. Classification des ajouts cimentaires

Les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes selon la norme [ENV 2006]

#### III.2.1 Les ajouts cimentaires inertes

Ce sont des matériaux quasiment inertes, inorganiques naturels ou synthétiques sélectionnés selon leur composition granulométrique afin d'améliorer les propriétés des ciments.

Les particules les plus fines jouent le rôle de micro agrégat servant à remplir les pores de la pâte de ciment.

On distingue les fillers calcaires et les poussières.

##### III.2.1.1. Les fillers calcaires

Ils sont obtenus par broyage ou pulvérisation de certaines roches. Ils se différencient les uns des autres par leurs propriétés physico-chimiques.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

##### III.2.1.2. La poussière

C'est une matière à particules fines avec une finesse comprise entre 7000 et 9000cm<sup>2</sup>/g. Elle est récupérée à la sortie du four lors de son passage avec la fumée. Les caractéristiques des ciments composés avec la poussière est comparable à celle du ciment sans ajouts.

Plus le pourcentage de cet ajout augmente, plus le temps de prise, le fluage et le retrait augmente.

#### III.2.2 Les ajouts minéraux actifs

Ils peuvent présenter des propriétés hydrauliques pouzzolaniques et/ou les deux à la fois. Les plus importants sont :

- Les pouzzolanes ;
- Les cendres volantes ;
- Les laitiers de haut fourneau ;
- Les fumées de silice ;

- ....

#### *III.2.2.1 La pouzzolane*

Ce sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir avec la chaux en présence d'eau pour donner des composés hydratés stables possédant des propriétés liantes et très peu soluble dans l'eau.

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux.

#### *III.2.2.2 Les cendres volantes*

Ce sont des particules pulvérulentes récupérés dans les gaz émises par les chaudières des centrales thermiques qui fonctionnent au charbon pulvérisés. Ils peuvent être de nature silico-alumineux (W) ou calcique (V). Dans le premier cas, ils présentent des propriétés pouzzolaniques. Dans le second, des propriétés hydrauliques.

#### *III.2.2.3 Les laitiers de haut fourneau*

Ce sont des matériaux issus de l'industrie de la fonte dans les hauts fourneaux. Ils sont composés principalement de chaux, de silice, d'alumine et de magnésie.

#### *III.2.2.4 Les fumées de silice*

Ce sont particules sphériques très fines ayant une très haute teneur en silice, issue de l'industrie de fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.

### **III..3. Avantages d'utilisation des ajouts cimentaires**

La substitution d'une partie du ciment par une ou plusieurs ajouts minéraux peut présenter des avantages sur le plan économique, technique.et environnemental.

#### *III.3.1. Intérêt du point de vue économique*

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. On sait que la transformation du cru en clinker nécessite beaucoup d'énergie, cela nous permet donc de réduire la consommation en combustible lors de la cuisson.

### **III.3.2. Intérêt du point de vue technique**

On sait que l'un des rôles des ajouts est de remplir les vides inter granulaires. Cela contribue à la résistance des mortiers et des bétons.

Les ciments composés présentent souvent l'avantage sur le ciment Portland, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques. Les actions chimiques sont réduites quand la portlandite est moins abondante, soit qu'elle est diluée (ciment au laitier), soit qu'elle est consommée (ciment aux cendres ou à la pouzzolane naturelle).

Pourtant, la réduction de la teneur en clinker se suit d'une réduction proportionnelle de la teneur en  $C_3A$  du mélange, cela conduira à un risque de dégradation sulfatique du ciment.

L'introduction d'ajout peut jouer un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.

### **III.3.3. Intérêt du point de vue environnemental**

La diminution de la quantité de clinker se traduit par une diminution de celle du  $CO_2$  rejeté dans l'atmosphère (1 tonne de clinker produite = 1 tonne de  $CO_2$  rejeté dans l'atmosphère).

De plus, pour certains ajouts, leur utilisation permet de valoriser des sous-produits encombrants et néfastes à l'environnement.

## Chapitre IV. LES BASALTES

**IV.1. Définition [14] [15]**

Le terme basalte a été utilisé par Pline l'Ancien pour décrire une roche « noire et dure » d'Éthiopie « quem vocant basaltem », ce qui rend plausible la dérivation à partir de l'adjectif bsalt, qui signifie cuit, en éthiopien ancien.

Le basalte est une roche volcanique issue d'un magma qui s'est rapidement refroidi au contact de l'air ou de l'eau. C'est la roche la plus abondante en termes de volume à la surface de notre planète, le constituant principal de la couche supérieure de la croûte océanique environ 60% de la surface terrestre, qui s'étend sur une profondeur moyenne de 30 km.

**IV.2. Caractéristiques physiques : [16]**

Le basalte est une roche magmatique, effusive de couleur sombre, d'aspect compact et de dureté variable selon le degré de cristallisation, lourde d'une densité voisine de 3 et difficile à casser. Quelques minéraux sont visibles à l'œil nu.

**IV.3. Structure :**

Le basalte est une roche de structure microlitique.

**IV.4. Composition chimique :**

Du point de vue géochimique, la composition des basaltes est assez constante : elle est caractérisée par des teneurs élevées en fer, magnésium et calcium.

Le tableau suivant donne la composition chimique moyenne des basaltes.

Tableau 10: teneur moyenne des éléments chimiques dans le basalte [16]

Elements[%]	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
basalte	49.20	15.74	10.92	0.20	9	11	2.91	1.10	1.84

**IV.5. Composition minéralogique :**

Les principaux minéraux rencontrés dans le basalte sont:

- Les plagioclases (50%) ;
- Les pyroxènes (25 à 40%) ;
- Les olivines (10 à 25%) ;
- Les magnétites (2 à 3%).

#### IV.6. Classification des basaltes [17]

Les basaltes se classent par leur taux de saturation en silice.

Lorsque le basalte n'atteint pas le plan de saturation de la silice, de la néphéline  $[\text{SiAlO}_4]\text{Na}$  est exprimée. C'est le domaine des basanites, et, à l'approche du plan de saturation, celui du basalte alcalin à olivines. Au-delà du plan de saturation, c'est le domaine tholéiitique, avec le basalte tholéiitique, si le quartz n'est pas exprimé, et le quartz tholéiite sinon.

##### IV.6.1. La basanite

La basanite est caractéristique du volcanisme intraplaques ponctuel et de faible volume.

##### IV.6.2. Le basalte alcalin à olivine

On trouve le basalte alcalin à olivine dans le volcanisme intraplaques océanique et continental lorsque celui-ci est de faible volume.

##### IV.6.3. Le basalte tholéiitique

Le basalte tholéiitique (ou olivine tholéiite, ou tholéiite à olivine) constitue les fonds océaniques. Il se trouve également dans le volcanisme intraplaques océanique et continental. Il contient un orthopyroxène normatif (non exprimé).

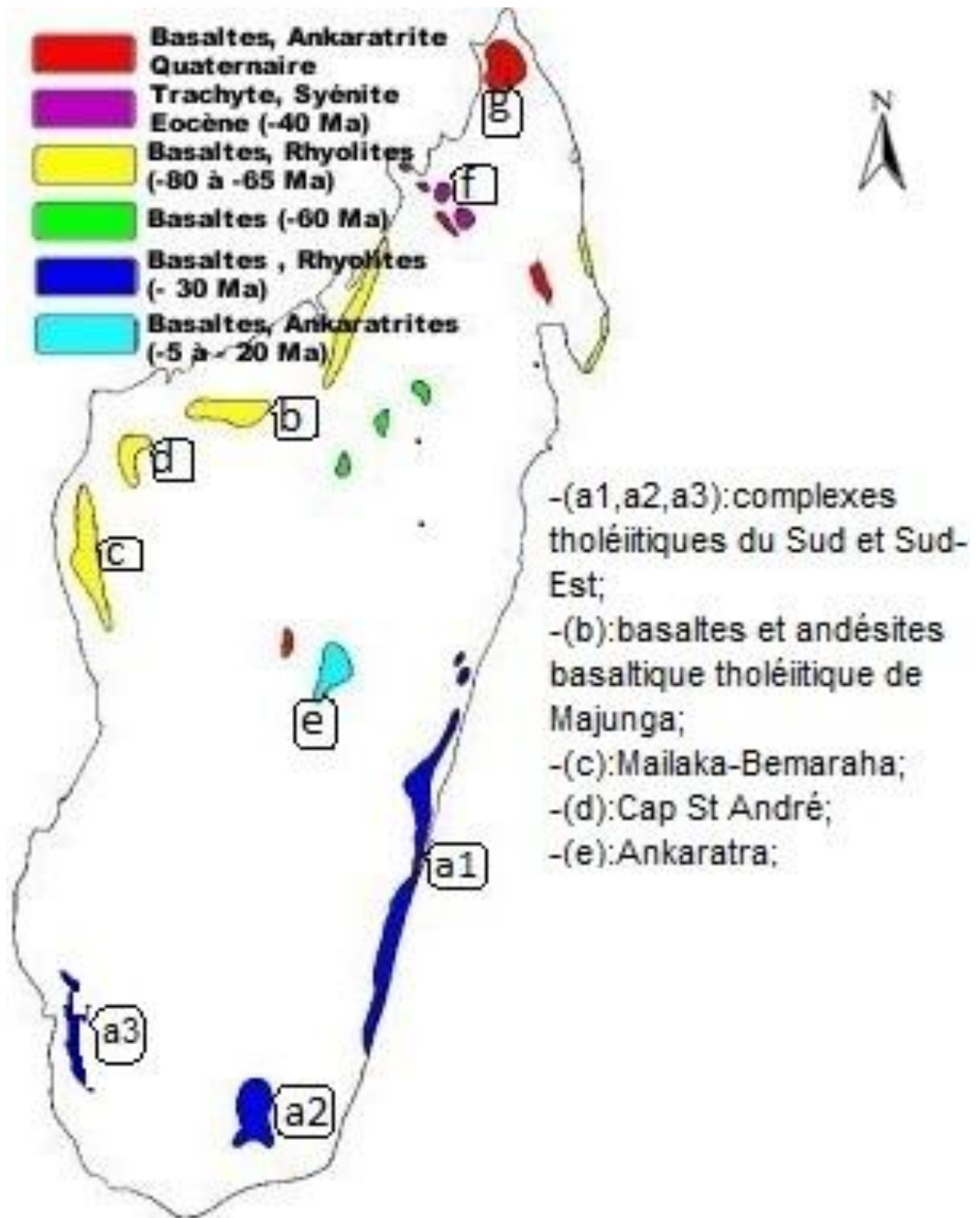
#### IV.7. Principaux gisement à Madagascar [18]

Les gisements les plus connus sont ceux qui sont situés à Ambondromifehy au nord du pays, à Soamiakatra-Mandrosohasina (volcanisme basaltique de l'Ankaratra) au centre et à Vatomandry dans la partie orientale de l'île.

On trouve les roches volcaniques surtout dans la partie Sud-Ouest de Madagascar.

Des épanchements basaltiques souvent prismés forment un affleurement sensiblement Nord-Sud de 200km de long et quelques kilomètres de large. Ces coulées de type basaltes des plateaux s'étendent vers l'ouest jusqu'au milieu du Canal de Mozambique vers le Sud, jusqu'aux environs du Cap Sainte Marie.

Au nord de Tuléar, en particulier à Betsioky Nord, on y trouve des necks de basanites accompagnés de coulées à faible extension.



Source : Le Volcanisme Malgache [25]

Figure 3 : Principaux Gisement de basalte à Madagascar

Tableau 11: composition chimique moyenne des basaltes de la partie Sud-Ouest de Madagascar.[18]

Eléments chimiques	A	B	C	D	G
SiO <sub>2</sub>	49.78	47.01	45.81	42.98	41.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.8	13.23	15.71	14.55	13.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.4	4.09	1.42	1.26	1.68
FeO	9.32	8.46	9.48	8.43	11.20
MnO	-	-	0.18	0.16	0.20
MgO	4.64	8.21	8.81	9.96	8.10
CaO	9.60	11.32	10.19	10.85	10.71
Na <sub>2</sub> O	2.70	2.4	2.87	3.34	3.13
K <sub>2</sub> O	0.86	0.57	0.75	1.56	1.75
TiO <sub>2</sub>	3.2	1.99	1.61	1.77	3.63

A : tholéites à quartz ; B : tholéites à olivine ; C : filons de basaltes alcalins ;  
D : filons de basanites ; G : necks de basanites

Source : [18]

#### IV.8. Utilisation [19]

Jusqu'à maintenant, les basaltes ne sont utilisés que comme pierre de construction. Mais certains les utilisent en tant que granulats pour béton.



## Chapitre V. LES POUZOLANES

### V.1. Définition : [20]

Une pouzzolane est un matériau siliceux, alumineux ou ferrugineux, n'ayant aucune propriété liante en lui-même, mais qui possède la propriété de réagir à température ordinaire avec la chaux hydratée pour former des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes.

Selon la norme ASTM sur les ciments (désignation C340-58 T), la définition est pratiquement similaire :

La pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux ou silico-alumineux, qui ne possède pas de propriétés liantes, mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.

### V.2. Types de pouzzolanes [3] [21]

Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories : les matériaux naturels et les matériaux artificiels.

#### V.2.1. Pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles proviennent des éruptions volcaniques. Ce sont des matériaux possédant des propriétés pouzzolaniques à l'état naturel qui peuvent être améliorées par un traitement approprié d'activation. On distingue :

##### V.2.1.1. Verre volcanique

Roche provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium.

##### V.2.1.2. Tufs volcaniques compacts

Ce type de roche est le même que la pouzzolane de type verre volcanique mais elle a subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydrothermiques se traduit par la formation des minéraux zéolithiques de composition chimique variable. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte.

### V.2.1.3. Produits pyroclastiques

Ce type de roche est d'origine volcanique et elles sont sédimentaires par leur mode de dépôt. Les pyroclastes sont, en générales, tous matériaux fragmentés produit par les éruptions d'un volcan.

Selon l'état sous lequel la lave est émise, les produits pyroclastiques peuvent se subdiviser en plusieurs catégories :

- Les cendres,
- Le lapilli,
- Pierre ponce,
- Les bombes ou blocs,
- Les scories.

### V.2.2. Les pouzzolanes artificielles

Ce sont des matériaux dont l'activité pouzzolanique apparaît seulement après un traitement approprié, en particulier thermique.

#### V.2.2.1. Cendres volantes

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques.

On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO). Les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8%, celles allant de 8% à 20% et celles supérieures à 20%. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus les propriétés d'auto-cimentation sont bonnes. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90%.

#### V.2.2.2. Laitier granulé de haut fourneau

Le laitier granulé de haut fourneau est un produit composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, qui provient de fusion du minerai de fer dans un haut fourneau, et qui est obtenu par refroidissement rapide à l'eau pour former des particules vitreuses granulées, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment.

Les analyses minéralogiques de laitier granulé de haut fourneau indiquent que la teneur en verre varie de 80 % à 100 %.

#### V.2.2.3. Argiles calcinées

Obtenues par cuisson d'argiles à une température variant de 600° à 900° C, puis elle est moulue à la finesse du ciment.

L'argile de base utilisée est en grande partie constituée de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine dans un état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique.

#### V.2.2.4. Fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ 0,1µm) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.

### V.3. Activité pouzzolanique [3] [20]

#### V.3.1. Définition de l'activité pouzzolanique

L'activité pouzzolanique est l'aptitude des pouzzolanes à fixer de la chaux à la température ambiante, pour former des composés ayant des propriétés hydrauliques, elle joue un rôle sur les propriétés des liants pouzzolaniques.

L'activité pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts :

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer ;
- La rapidité de fixation de l'hydroxyde de calcium par la pouzzolane.

Les différents matériaux pouzzolanique possèdent tous la propriété, selon la définition :

- de réagir avec la chaux en présence d'eau ;
- de former par cette réaction des produits aux propriétés liantes.

L'influence de la silice et de l'alumine ne peut pas être négligée, la silice participe dans le mélange par la fixation de la chaux et l'alumine augmente la résistance mécanique du matériau à court terme.

Cette définition peut servir pour distinguer l'existence de la réaction pouzzolanique et l'influence mécanique du système, plus particulièrement sur les résistances mécaniques.

### V.3.2. Réactions pouzzolaniques

Les matériaux pouzzolaniques présentent la caractéristique de pouvoir réagir plus ou moins rapidement avec la chaux. Il en résulte essentiellement des silicates de calcium hydratés et/ou des aluminates de calcium hydratés.

Réaction pouzzolanique :

Pouzzolane + chaux + eau  $\longrightarrow$  Silicates de calcium hydraté + Aluminates de calcium hydraté

En fait les réactions pouzzolaniques sont plus complexes. Elles exigent notamment une certaine mobilité ionique des constituants acides tels que la silice et l'alumine présents dans les réseaux superficiels de la pouzzolane. C'est pourquoi les matériaux contenant de la silice ou de l'alumine ne présentent pas toujours des propriétés pouzzolaniques.

### V.3.3. Essais mécaniques

Pour déterminer l'efficacité d'une pouzzolane, on peut simplement comparer la résistance mécanique de deux séries d'éprouvettes de mortier. On remplace dans la première série une partie du ciment (exemple 30%) par de la pouzzolane et dans l'autre par une poudre inerte. Si les résultats des essais (par exemple de compression) effectués sur les éprouvettes des mélanges ciment + pouzzolane donnent des résistances supérieures, alors, la pouzzolane est active.

### V.3.4. Constituants actifs des pouzzolanes naturelles [22]

En général, la portion active des pouzzolanes est constituée par les phases amorphes ou vitreuses. L'activité des phases amorphes ou vitreuses provient d'une altération des minéraux originaux subséquente à une exposition prolongée à l'eau contenant du CO<sub>2</sub> et à la vapeur d'eau surchauffée.

L'activité pouzzolanique des pouzzolanes naturelles peut être aussi due au caractère zéolithique de leurs constituants tels que l'analcime Na<sub>2</sub>O.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.4SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O. Pour les tufs volcaniques dont la teneur en eau est élevée, l'activité pouzzolanique provient des composés zéolithiques, tandis que pour ceux dont la teneur en eau

d'hydratation est faible et dont la solubilité dans les acides et les bases est plus élevée, la phase vitreuse jouerait le rôle prédominant. Pour les roches sédimentaires possédant une structure poreuse et une grande surface interne, l'activité repose sur la teneur élevée en silice hydraté.

#### V.3.5. Constituants actifs des pouzzolanes artificielles

Les argiles ne manifestent une activité pouzzolanique qu'après un traitement thermique dans un domaine de température bien déterminé. Ce domaine de température correspond à une dégradation partielle ou complète de leur structure. L'activité pouzzolanique diminue à nouveau si l'on dépasse ce domaine de température.

Pour les cendres volantes c'est plutôt la finesse de la poudre qui détermine l'activité pouzzolanique et que la finesse est en relation avec la teneur en charbon du combustible de départ.

#### V.4. Caractéristiques de la Pouzzolane [3] [23]

##### Couleur

Elle varie du noir au rouge, marron à gris exceptionnellement jaune. La couleur des pouzzolanes est liée au rapport des pourcentages pondéraux des oxydes ferreux et ferriques, soit :

$$f = \frac{FeO}{Fe_2O_3}$$

- Si  $f < 0,02$ , la coloration est uniformément rouge pour les matériaux réduits à l'état de fine ;
- Si  $f$  est voisine 0,10, la coloration vire au brun ;
- Si  $f$  atteint 0,27 ; les produits sont de couleur noire.

##### Densité : 0,8-1,3

##### Porosité en % : 60-70

##### pH : 6,5-7

Tableau 12: Composition chimique moyenne de la pouzzolane [23]

Compositions	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Teneur Maximale	40-42%	15-30%	10-15%

### V.5. Différentes utilisations de la pouzzolane [3]

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation, les principaux domaines sont les suivants:

#### V.5.1. L'agriculture :

La pouzzolane est utilisée pour l'amendement de certains sols. Elle est riche en silice, en alcalino-terreux, offre pour certaines cultures l'avantage d'un milieu bien aéré, ainsi qu'un meilleur enracinement, un meilleur arrachage, la facilité de reprise des plantes, la réduction du risque de carences et de maladies.

#### V.5.2. Applications routières :

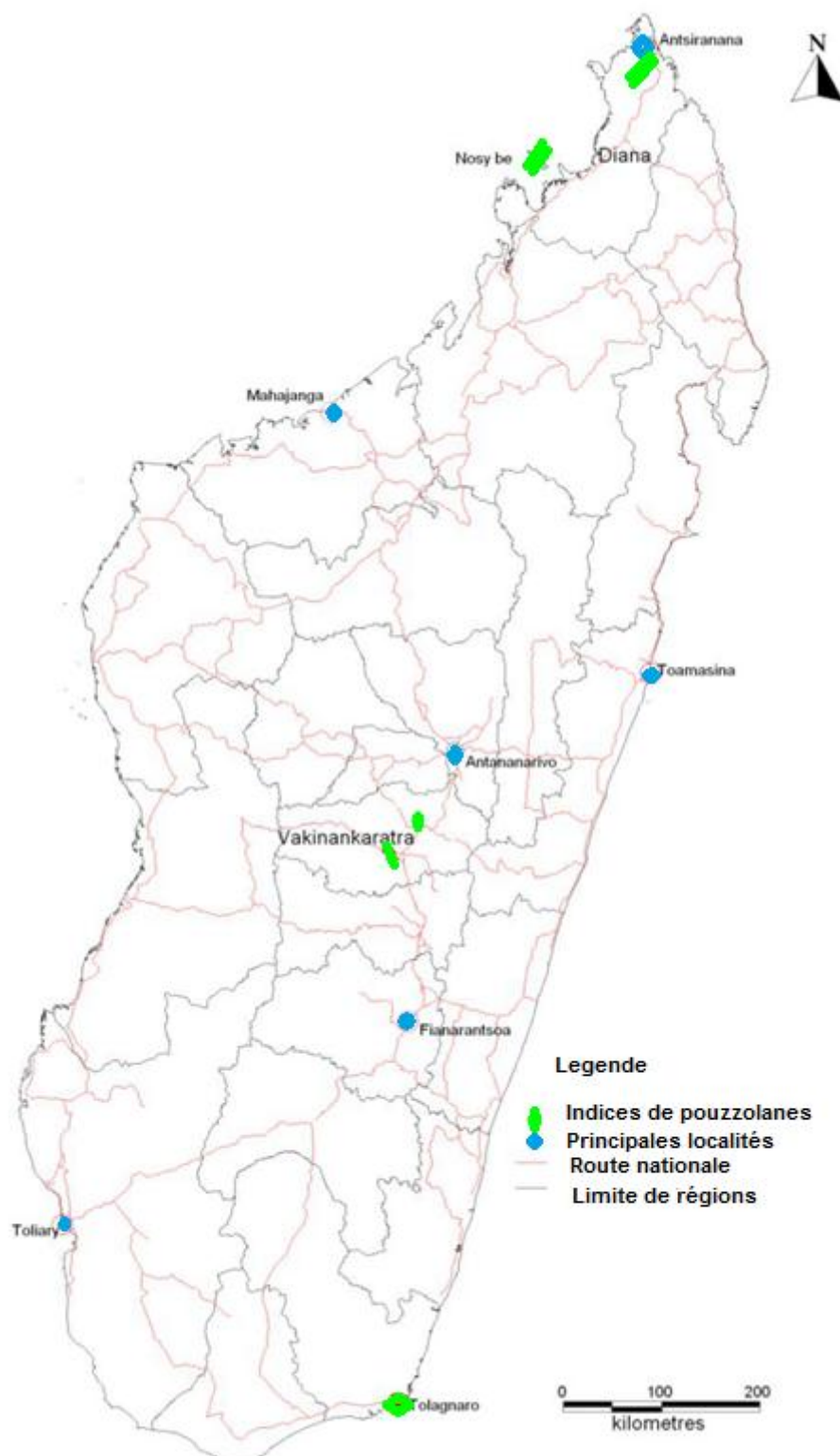
Elle sert pour le sablage des routes verglacées. Utilisée comme couches de base pour itinéraires routiers hors-gel (la porosité globale de la pouzzolane empêche la formation de lentilles de glaces et évite donc la mise en place de barrières de dégel).

#### V.5.3. Dans l'industrie :

La pouzzolane est utilisée dans la fabrication de ciment, de béton léger et les parpaings comme constituant secondaire (la structure alvéolaire de la pouzzolane confère une faible densité au béton pour une qualité mécanique donnée), les boisseaux de cheminées, les filtres divers et fosses septiques.

## V.6. Gisements des pouzzolanes [3]

Pouzzolanes de Madagascar



Source : SIGM – Direction de la Géologie

Figure 4: Carte de la localisation des indices de pouzzolanes à Madagascar

Les pouzzolanes naturelles sont localisées à Madagascar dans les régions suivantes:

- Région d'Antsiranana
- Ile Nosy Be
- Région de l'Itasy
- Région de l'Ankaratra
- Région de l'Ankaizina

#### V.6.1. Massif d'Ambre ou Antsiranana

Le massif volcanique de la montagne d'Ambre renferme diverses variétés de pouzzolane.

- Piton rouge ; Lapillis scoriacés rubéfiés, très altérés, pouzzolane rouge,
- Pic Janson : Lapillis scoriacés, légers, pouzzolane grise
- Maromby : Lapillis scoriacés légers, pouzzolane grise
- Station forestière de Roussettes : Lapillis légers altérés et rubéfiés, pouzzolane jaune.

Quelques caractéristiques des pouzzolanes d'Antsiranana :

#### ❖ Composition chimique

Tableau 13: Composition chimique moyenne des pouzzolanes d'Antsiranana  
(en % massique) [3]

	Piton Rouge	Pic Janson	Maromby	Roussettes
SiO <sub>2</sub>	40,30	40,80	33,80	34,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,30	27,80	28,80	21,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,30	11,70	13,50	14,80
CaO	3,00	10,00	8,10	4,10
MgO	4,60	4,60	5,20	8,80

#### ❖ Densité

Tableau 14: Masse volumique apparente des pouzzolanes d'Antsiranana [3]

	Piton Rouge	Pic Janson	Maromby	Roussettes
Densité apparente (T/m <sup>3</sup> )	1,1	1,1	1,1	-



### V.6.2. Ile de Nosy Be

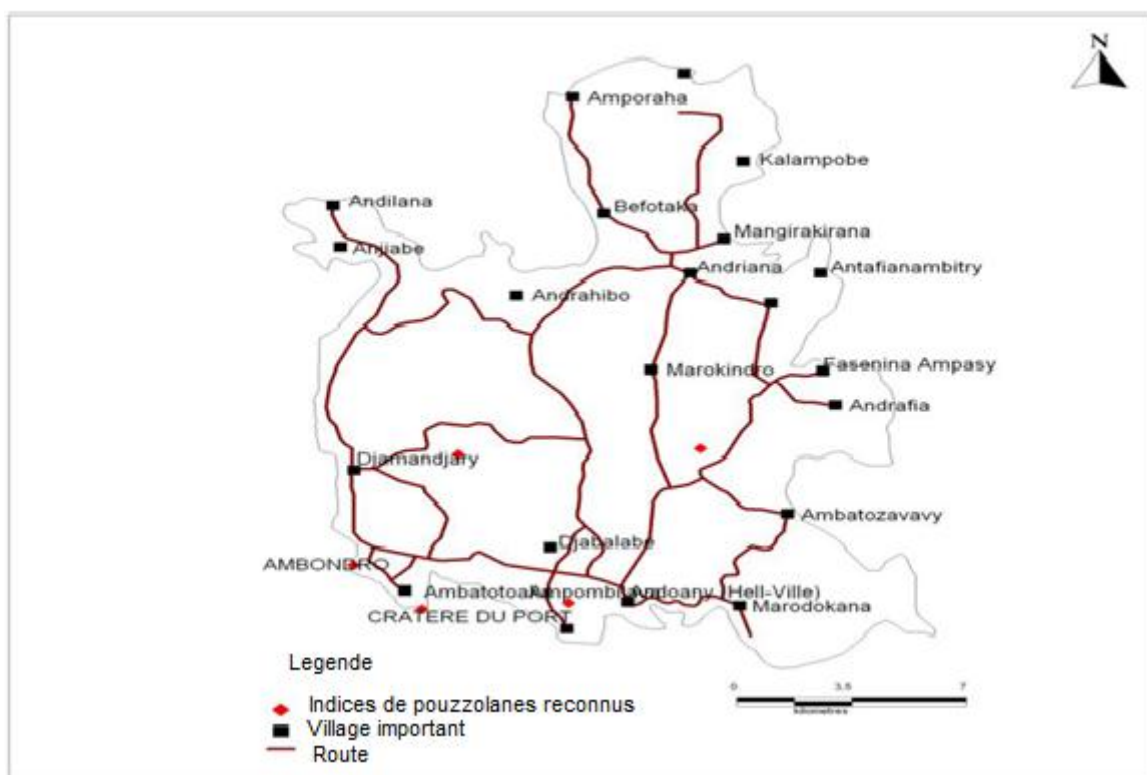
Carrière d'Ampambilava : ce sont des lapillis scoriacées altérés et erre rouge, pouzzolane brun rouge,

Carrière de la Vanille : ce sont des lapillis basaltiques denses, pouzzolane noire,

Carrière de Port de cratère : ce sont des lapillis scoriacés et cendres, pouzzolane gris-chocolat,

Carrière d'Androadroatra : ce sont des pouzzolanes rubéfiées brun rouge.

Les indices de pouzzolanes de Nosy be



Source : [3]

Figure 5: Carte illustrant les localités riches en pouzzolanes : Nosy-Be

Quelques caractéristiques des pouzzolanes de Nosy-Be

❖ Composition chimique

Tableau 15: Composition chimique moyenne des pouzzolanes de Nosy-Be  
(en % massique) [3]

	Ambondro	Port du cratère	Vanille	Ampombilava	Androadroatra
SiO <sub>2</sub>	38,40	39,80	42,10	31,50	39,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,00	28,50	29,00	29,00	24,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,80	9,40	9,70	15,30	11,00
TiO <sub>2</sub>	2,80	2,80	2,50	3,90	2,40
CaO	8,50	10,40	9,40	3,00	9,20
MgO	10,50	3,90	4,10	2,00	5,10

❖ Densité

Tableau 16: Masse volumique apparente des pouzzolanes de Nosy-Be [3]

	Ambondro	Port du cratère	Vanille	Ampambilava	Androadroatra
Densité apparente (T/m <sup>3</sup> )	1,7	1,3	1,6	1,1	-

V.6.3. Massif d'Ankaratra

Les indices de pouzzolanes dans la région du Vakinankaratra



Source : [3]

Figure 6: Localisation du gisement de pouzzolane à Betafo

Les pouzzolanes sont extrêmement très abondantes, le long de la route Antsirabe-Betafo, au pied des grands volcans de Betafo. Il a été fait plusieurs analyses qui montrent des compositions variant entre 30% et 40% de silice, 20% à 30% d'alumine. On peut rencontrer des lapillis sans argile, les lapillis et cendres, des lapillis grossiers, des lapillis et cinérites et des projections hétérogènes.

Le tableau suivant donne la composition chimique des pouzzolanes d'Antsirabe (volcan de Betafo, route d'Antsirabe).

Tableau 17: Composition chimique moyenne des pouzzolanes d'Antsirabe  
(route Betafo) (en % massique) [3]

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	MgO	Perte au feu
1	38,00	30,7	12,6	2,4	9,8	5,5	6,0
2	30,6	26,7	14,1	1,8	3,4	5,4	17,9
3	34,6	24,0	13,7	2,2	5,7	4,8	15,0
4	26,4	28,5	15,1	2,2	3,0	5,1	20,6
5	28,6	23,3	15,2	3,1	3,6	6,2	19,9

#### V.6.4. Sambaina

Les carrières les plus exploitées sont celles situées près de Morarano, à Antanimena au Nord de Mandrosohasina, Faravohitra, Nord Tsaramody, Sahabe.

Tableau 18: Composition chimique moyenne des pouzzolanes de Sambaina  
(en % massique) [3]

	Sambaina	Morarano	1 km Nord Tsaramody	Faravohitra	Sahabe
SiO <sub>2</sub>	35,90	35,30	59,00	30,70	35,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,20	36,00	27,40	33,70	34,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,20	9,20	5,10	15,10	9,40
TiO <sub>2</sub>	1,60	1,80	0,50	3,20	1,80
CaO	0,20	0,20	0,50	1,40	0,20
MgO	trace	Trace	trace	trace	trace

#### V.6.5. Faratsiho

A Faratsiho, il y a divers affleurements de pouzzolanes naturelles analogues à celle du bassin de Sambaina, surtout vers Miandrivazo et Soavinandriana.

#### V.6.6. Le massif de l'Itasy

Le massif de l'Itasy est situé sur les Hautes Terres Centrales Malagasy. Les principaux gisements aux environs de Mananasy sont classés parmi le type d'éruption vulcanien. Les laves peu fluides se solidifient rapidement aux abords du cratère, les nouvelles éruptions se sont manifestées par des projections violentes de laves pulvérisées en cendres, ponces, roches bulbeuses.

#### V.6.7. Le massif d'Ankaizina

Sur le plateau de Bemanevika s'est développé le massif de l'Ankaizina au cours de périodes distinctes: secondaire, tertiaire, quaternaire. Les gîtes remarquables dans cette zone sont: Les gîtes d'Ambodisantrakely, les gîtes de Betainkankana, les gîtes d'Ankajaniambo

### V.7. Conclusion

Vu que l'effet pouzzolanique pouvait être obtenu non seulement à partir de matériaux naturels notamment d'origine volcanique et d'origine sédimentaire mais aussi à partir de matériaux artificiels tels que: cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumée de silice et autres, la pouzzolane en générale, se définit comme étant un ajout minéral actif d'origine naturelle ou artificielle riche en silice et en alumine

Les pouzzolanes naturelles sont des produits émis essentiellement par une lave vitreuse, On peut citer comme produit provenant généralement d'une lave vitreuse, les formations volcaniques.

Selon beaucoup de chercheurs, la réaction pouzzolanique est liée à certaines exigences chimiques et physiques. En effet l'activité pouzzolanique est vérifiée par le taux de fixation de la chaux et le temps nécessaire qu'il faut. On distingue deux catégories d'essais qui caractérisent les propriétés des pouzzolanes, comme étant un matériau riche en silice et l'alumine capable de réagir avec la chaux et former des produits aux caractères liant, de sorte à influencer les caractéristiques mécaniques. Ces essais se basent essentiellement sur les déterminations chimiques, et s'appuient sur les méthodes physiques et mécaniques.

## Chapitre VI. LE CIPOLIN [24]

**VI.1. Définition**

Les cipolins sont des roches sédimentaires, facilement solubles dans l'eau, composées majoritairement de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) qui est utilisé dans la fabrication de chaux et d'ajout dans l'industrie du ciment.

**VI.2. Propriétés du cipolin****VI.2.1. Caractéristiques mécaniques**

Les caractéristiques mécaniques des cipolins sont importantes à l'usage dans les bâtiments et travaux publics.

Sa résistance à la compression est environ de 50 à 60 MPa.

**VI.2.2. Composition chimique et couleur**

Il est composé d'au moins 70% de calcite et peut contenir quelques autres minéraux dont les plus courants sont la dolomite, l'aragonite, la silice, la sidérite et l'argile, qui influent sur sa couleur. En général blanc, le cipolin existe aussi dans des teintes de jaune, gris ou brun.

**VI.3. Gisements de cipolin****VI.3.1. Mahajanga**

Les cipolins de Mahajanga forment des bancs puissants se prêtant bien à l'ouverture des carrières, donc une exploitation facile et rationnelle.

Le tableau ci-dessous montre la composition chimique moyenne du cipolin de Mahajanga.

Tableau 19 : composition chimique moyenne du cipolin de Mahajanga  
(en % massique) [26]

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	PF
1,80	1.80	1,20	30,70	18.10	46,00

### VI.3.2. Région d'Ambatondrazaka

Les cipolins de cette région sont connus et exploités depuis longtemps pour la fabrication de chaux et pour l'empierrement des routes. Il est situé à 1 km au Sud de la voie ferrée (3 km à l'Ouest d'Ambatondrazaka).

Les analyses effectuées sur des échantillons représentatifs ont donné les résultats suivant :

Tableau 20: Les analyses des échantillons des cipolins à Ambatondrazaka  
(en % massique) [24]

Echantillons%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	PF	Total
Ambato	7,80	2,50	1,40	47,70	1,70	38,10	99,2
	6,20	1,45	0,65	49,70	2,00	39,30	99,3
	9,00	1,65	1,05	46,50	2,20	37,80	98,2

### VI.3.3. Ibity

La région de l'Ibity, à 26 km au Sud d'Antsirabe, renferme les plus importantes occurrences de cipolin calcaire non dolomitique de la région centrale. Les affleurements de cipolins présentent 150 à 280 m de largeur.

Tableau 21: Résultats des analyses d'échantillons de cipolins à la carrière d'Ibity  
(en % massique) [24]

Echantillon	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	7,15	6,35	8,10	5,30	4,70	9,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,84	0,92	1,09	0,69	1,27	1,97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,91	0,58	0,71	0,51	0,43	0,63
CaO	46,80	49,85	45,35	54,20	51,70	46,80
MgO	3,80	1,45	5,60	1,40	0,80	1,70
NaO	0,36	0,26	0,20	0,20	0,14	0,26
K <sub>2</sub> O	0,38	0,30	0,49	0,50	0,30	0,96

### VI.3.4. Dans la région Sud-Ouest de Madagascar

Les calcaires de la région SUD-OUEST de Madagascar se présentent en bancs puissants, subhorizontaux avec des réserves inépuisables.

La localité de Soalara présente des réserves inépuisables de calcaire affleurant en falaise sur une hauteur de 50 à 80 m.

Les compositions chimiques du calcaire de Soalara, résultat d'analyses effectuées par Henri.BESAIRIE, sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 22 : Pourcentage massique des constituants chimiques du calcaire de Soalara [27]

Echantillon	1	2	3
SiO <sub>2</sub>	0,80	1,24	0,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20	0,20	0,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,40	0,44	0,05
CaO	55,10	54,88	56,00
MgO	0,50	trace	0,45
PF	43,10	43,10	43,70

## Deuxième partie : ETUDES EXPERIMENTALES



## Chapitre VII. LES MATERIAUX UTILISES

## VII.1. Types et provenances

Les matières premières utilisées pour cette étude sont : le ciment (BINANI de type CEMI), le basalte, le cipolin et une pouzzolane naturelle.

## VII.1.1. Le basalte

Les basaltes qu'on a utilisés pour cette étude sont les basaltes de Toamasina.



Photos 1: basalte broyé

## VII.1.2. Pouzzolanes naturelles

Elle provient de la région d'Antsirabe, précisément sur la route nationale 34 (RN 34) menant à Betafo. Elle est de couleur gris-noir, de forme scoriacée et appartient aux types des projections dites lapillis.



Photos 2 : pouzzolane broyée

## VII.1.3. Cipolins

On utilise du cipolin qui vient de Mahajanga du fait que c'est un bon ajout pour le ciment et est assez riche en  $\text{CaCO}_3$ .



Photos 3 : Cipolin broyé

#### VII.1.4. Le ciment

Le ciment Portland CEM I, classe de résistance 42,5 N, de marque «BINANI», a été utilisé dans le cadre de l'étude comparative des résistances en compression des mortiers obtenus.

### VII.2. Méthodes de caractérisation

#### VII.2.1. Détermination des caractéristiques physiques

##### VII.2.1.1. Teneur en eau $W$ (%) (Humidité) :

C'est le rapport, exprimé en pourcentage du poids d'eau que le matériau contient au poids de ces éléments secs, après dessiccation à 105°C jusqu'au poids constant.

- Mode opératoire

Plusieurs méthodes peuvent être réalisées pour la mesure de ce paramètre. Celle que nous avons adoptée pour sa simplicité, consiste à prendre un échantillon finement broyé et tamisé de masse connue (environ 100g), à le dessécher à l'étuve jusqu'à avoir un poids constant. Le séchage s'effectue dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures.

Soit  $P_0$  le poids initial du matériau et  $P$  le poids obtenu exempt de toute eau d'adsorption, l'expression de la teneur en eau est :

$$w\% = \frac{P_0 - P}{P_0} \times 100$$

##### VII.2.1.2. Densités :

###### a. Masse volumique apparente $\rho$

La masse volumique apparente du matériau est mesurée en utilisant un déversoir.



Photos 4: Déversoir

- Mode opératoire

- Peser un récipient vide de masse P1 et de volume connu V,
- Verser à l'intérieur du moule l'échantillon par couches successives, en le répartissant sur toute la surface et sans tassement,
- araser avec soin à l'aide d'une réglette plate,
- peser le récipient rempli : P2.

Soient P le poids de l'échantillon en (g) avec  $P = P2 - P1$  et  $\rho$  la masse volumique apparente en (g/cm<sup>3</sup>).

On obtient alors la masse volumique apparente par la formule suivante :

$$\rho = \frac{P}{V}$$

**b. Poids spécifique  $\gamma$**

Par définition, la masse volumique absolue  $\gamma$  est le poids d'une quantité de matériau tel que le volume réellement occupé par la matière solide est égal à l'unité.

Le poids spécifique est mesuré à l'aide d'un pycnomètre.

- Mode opératoire

- Prélever une masse représentative du matériau  $M \geq 200 \text{ D max}$
- Dessécher totalement l'échantillon à 105°C
- Quarter l'échantillon, la masse soumise à l'essai ne doit pas être inférieure à 30 Dmax
- Peser un pycnomètre vide de masse (Po)
- Remplir le pycnomètre d'eau jusqu'au trait repère et peser l'ensemble (P2)
- Peser une masse sèche (P) du matériau
- Vider et sécher parfaitement le pycnomètre

- Remplir au quart le pycnomètre d'eau
- Placer un entonnoir et verser lentement le matériau
- Agiter l'ensemble afin de dégazer le matériau
- Compléter en eau et laisser reposer au minimum 15 minutes
- Compléter à l'aide d'une pissette jusqu'au trait repère
- Peser l'ensemble (P3).

Soient :

- p : poids de l'échantillon (g)
- V : volume de l'échantillon (cm<sup>3</sup>)
- $\gamma$  : le poids spécifique de l'échantillon (g/cm<sup>3</sup>)

$$\gamma = \frac{p}{V}$$

#### VII.2.1.3. Analyse granulométrique

Cette analyse est faite par la méthode classique de tamisage, suivie d'une sédimentométrie pour la fraction inférieure à 80  $\mu\text{m}$  (ou 50  $\mu\text{m}$ ).

C'est une méthode qui consiste à faire passer une masse bien déterminé d'échantillon à travers une série de tamis de différents modules. Les refus sont pesés.

On en déduit les tamisas, on peut alors tracer la courbe représentant les tamisas cumulés en fonction de l'ouverture des tamis ou de leur module AFNOR.

#### VII.2.1.4. Surface spécifique de Blaine

C'est la surface totale développée par les grains de poudre de masse unitaire.

Sa détermination se fait à l'aide d'un Perméabilimètre de Blaine ; on obtient la Surface Spécifique de Blaine (SSB).

La SSB est déterminée par la mesure du temps de perméabilité de l'échantillon considéré.

On a :

$$SSB = 15.71 \times \frac{\sqrt{t}}{r\sqrt{\eta}}$$

Avec :

- SSB : surface spécifique ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ).
- t : temps de perméabilité (s)
- $\gamma$ : poids spécifique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- $\eta$  : viscosité de l'air à la température d'essai (poises)

### VII.2.2. Détermination des caractéristiques chimiques

#### VII.2.2.1. Teneur en eau de constitution

L'eau de constitution est déterminée après l'élimination de l'eau d'adsorption.

#### VII.2.2.2. Composition chimique élémentaire

##### a. Détermination de la teneur en $\text{SiO}_2$ :

Pour déterminer la teneur en silice, 1 gramme d'échantillon est attaqué par 35  $\text{cm}^3$  d'acide chlorhydrique (HCl) concentrée et 5 gouttes d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) concentrée.

On le fait bouillir quelques minutes puis on y ajoute de la solution de gélatine à 2.5%. Après un repos de 5 minutes, l'ensemble est filtré.

On a le fer, l'aluminium, le magnésium, le calcium, le titane, le nickel dans le filtrat et la silice libre et combinée dans le résidu.

Ce dernier est calciné à 1050 °C puis pesé.

Soit P la masse obtenue.

$$\% \text{ silice libre et combinée} = P \times 100$$

##### b. Détermination de la teneur en $\text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Pour déterminer la teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 100ml de filtrat issus du dosage des insolubles et silice sont ajoutés d'une solution d'ammoniaque en légère excès (20ml) puis, portés à l'ébullition jusqu'à élimination de l'excès d'ammoniaque.

On laisse reposer 30mn, après apparition d'une précipité orange on filtre, puis on calcine le résidu à 900°C.

Soit P le poids obtenu :

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ et } \text{Fe}_2\text{O}_3 = P \times 2 \times 100$$

**c. Détermination de la teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  :**

Pour déterminer la teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , on prend le résidu d' $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , le dissout dans 10ml d'HCl puis porter à l'ébullition.

Ajouter quelque ml de  $\text{Cl}_2\text{Sn}$ , laisser refroidir et ajouter 10ml de  $\text{Cl}_2\text{Hg}$ . Ajouter encore 200ml d'eau distillé froide ,10ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  puis 5ml de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

Verser dans la solution 6 à 8 gouttes de diphénylamine

Filtrer avec une solution de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  jusqu'à virage violette.

Soit V le volume de la solution  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , la teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  exprimé en % est :

$$\text{Fe}_2\text{O}_3(\%) = \frac{V \times 2 \times 7,98 \times 100}{1000}$$

**d. Teneur en CaO**

On utilise le filtrat obtenu lors du dosage d' dosage d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  et de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Le principe est de précipiter les ions  $\text{Ca}^{2+}$  sous forme d'oxalate qui est ensuite calciné. On reprend le filtrat lors du dosage de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . On le porte à l'ébullition. On ajoute doucement goûte à goûte 10ml d'une solution saturée d'oxalate d'ammonium; on laisse se reposer, on filtre, on lave à l'eau bouillante, on procède à une calcination pendant 30mn.

Soit P la masse obtenue :

$$\% \text{CaO} = P \times 2 \times 100$$

**e. Teneur en CaO libre**

Pour déterminer la teneur en chaux libre, 1 g d'échantillon est introduit dans une fiole jaugée de 100 ml, que l'on remplit ensuite par une solution d'eau sucrée à 10%. La solution est ensuite agitée pendant 15mn et filtrée sur un papier filtre rapide. On prélève  $25\text{cm}^3$  du filtrat qui sont versés dans un vase à précipiter, puis on ajoute quelques gouttes de phénophtaléine et on titre par l'acide sulfurique de concentration 4,373 g/l jusqu'à un virage de la coloration rouge violacé vers incolore.

Le nombre de millilitres employé indique directement la teneur centésimale en chaux libre.

f. Les valeurs requises

Ce sont des valeurs constitués par trois modules, en relation étroite avec la composition chimique et la composition minéralogique du ciment.

Ce sont :

-Le module de chaux MC :  $MC = \frac{CaO \times 100}{CaO_{sat}}$

-Le module de silice MS :  $MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$

- Le module d'alumine MA :  $MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$

*Composition minéralogique potentielle*

C'est uniquement pour le ciment. Pour déterminer la composition minéralogique, on applique la formule de BOGUES qui correspond aux valeurs requises.

En général, pour le mélange normal,  $MC < 100$  et  $MA > 0.635$

$$C_4AF = 3.04 Fe_2O_3$$

$$C_3A = 2.65 Al_2O_3 - 1.69 Fe_2O_3$$

$$C_3S = 4.07 CaO - (7.61 SiO_2 + 6.72 Al_2O_3 + 1.43 Fe_2O_3)$$

$$C_2S = 2.87 SiO_2 - 0.75 C_3S$$

## Chapitre VIII. PRATIQUES DES ESSAIS NORMALISES

## VIII.1. Essais physiques

## VIII.1.1. eau de gâchage

## VIII.1.1.1. Objectif de l'essai :

C'est de déterminer la consistance normale de la pâte de notre liant.

## VIII.1.1.2. Matériels utilisés :

- appareil de Vicat
- malaxeur
- moule tronconique
- spatule



- chronomètre

Photos 5 : appareil de Vicat

## VIII.1.1.3. Manipulation :

- prendre 500g de notre liant

-le gâcher progressivement avec de l'eau et malaxer jusqu'à obtention d'une pâte normale

Tableau 23: Mode de malaxage :

Durée des opérations	Opérations effectuées
90s	Malaxage à petite vitesse (liant + eau ajoutée progressive)
15s	Repos Raclage de la cuve
90s	malaxage à petite vitesse (liant +eau)

- remplir le moule de Vicat avec la pâte

- araser et bien aplatir la pâte à l'aide d'une règle métallique,

- effectuer l'essai sur l'appareil de Vicat avec la grande aiguille (sonde), on évalue l'eau de gâchage si la pénétration de la sonde est comprise entre 5mm et 7 mm,

L'eau de gâchage est calculée selon la formule :



$$\text{eau de gâchage} = \frac{\text{quantité d'eau versée}}{\text{quantité de ciment}} \times 100$$

### VIII.1.2. - Mesure du temps de prise

#### VIII.1.2.1. Objectif de l'essai :

C'est de savoir la vitesse de prise du liant.

#### VIII.1.2.2. Matériels utilisés :

- Appareil de Vicat
- aiguille de Vicat
- malaxeur
- moule tronconique
- spatule
- chronomètre

#### VIII.1.2.3. Manipulation :

Prendre la pâte de consistance normale qui vient d'être déterminée, l'immerger dans de l'eau à température ambiante.

L'origine du temps correspond au temps de détermination de l'eau de gâchage.

Le début de prise correspond au temps où l'enfoncement de l'aiguille de Vicat dans la pâte s'arrête à  $4\text{mm} \pm 1$  du fonds du moule.

Le fin de prise c'est quand l'aiguille ne peut plus pénétrer dans la pâte.

### VIII.1.3. - Surface spécifique de Blaine

#### VIII.1.3.1. Objectif de l'essai :

L'objectif de notre essai est de déterminer la finesse de l'échantillon, d'apprécier la surface totale des grains contenus dans une masse unitaire de la poudre du liant.

#### VIII.1.3.2. Matériels utilisés :

- Un appareil appelé « Perméabilimètre de Blaine ».
- Une balance de précision ;
- Un viscosimètre ;
- Un chronomètre précis à 0,2 s près ;

Des rondelles de papier filtrent adaptées au diamètre de la cellule ;

Un thermomètre précis à 0,1°C près pour mesurer la température de l'air.

#### VIII.1.3.3. Manipulation :

- peser l'échantillon à une masse égale à  $(0.9035 \cdot V)$  (en g) ;
- placer un disque perforée au fond de la cellule suivit d'un disque neuf de papier filtre ;
- verser l'échantillon dans la cellule ;
- appliquer un autre disque de papier filtre sur l'échantillon et tasser au moyen d'un piston ;
- enduire de vaseline la partie ronde de la cellule et la placer sur le viscosimètre en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour bien répartir la vaseline ;
- retirer le piston lentement ;
- vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur ;
- ouvrir le robinet, puis aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur. Fermer le robinet ;
- mesurer à l'aide d'un chronomètre le temps écoulé lors de la descente du liquide du deuxième trait au troisième trait (temps de viscosité) ;
- noter la température de la pièce ;
- faire trois essais et prendre la moyenne des 3 temps.

La surface spécifique est mesurée par la formule :

$$SSB = 15.71 * \frac{\sqrt{t}}{\rho \sqrt{\eta}}$$

SSB : Surface spécifique (cm<sup>2</sup>/g).

t : Temps mesuré en secondes.

$\rho$  : Masse volumique (g/cm<sup>3</sup>).

$\eta$  : Viscosité de l'air à la température d'essai

## VIII.2. Essais mécaniques

### VIII.2.1. Résistance mécanique à la compression :

Les mesures de résistance mécanique à la compression nous renseignent sur la solidité et la cohésion du matériau.

Les propriétés mécaniques du matériau sont acquises par hydratation du ciment principalement au cours de la prise, laquelle correspond à la cristallisation et à l'organisation des hydrates formés en une structure mécaniquement résistante.

### VIII.2.2. Mesure de résistance mécanique :

Les essais de résistance mécanique ont été réalisés au laboratoire national des travaux publics et du bâtiment. On a effectué un écrasement par flexion et un écrasement par compression.

### VIII.2.3. Préparation des échantillons :

Les éprouvettes prismatiques de dimension 4\*4\*16 sont obtenues à partir de gâchées du mortier préparée.

24heures après confection, les éprouvettes sont démoulées ; conservées dans un bain d'eau et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%.et à température de  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .



Photos 6 : conservation des éprouvettes

A l'âge requis, les éprouvettes seront écrasées afin de déterminer la résistance à la traction par flexion ( $R_T$ ).

Les mesures donnent accès à la charge maximale à la rupture et la résistance à la traction est donnée par la relation :

$$R_T = \frac{3}{2} \times \frac{1}{a^3} \times F_c$$

Avec :  $R_T$  : la résistance à la traction (en MPa)

$F_c$  : la charge maximale à la rupture (en N)

$a$ : arête de l'éprouvette (40mm)

$l$ : 2/3 de la hauteur de l'éprouvette (106.7mm)

Ensuite on mesure la résistance à la compression simple ( $R_c$ ) sur les deux moitiés d'éprouvettes provenant de l'essai de traction qui est obtenue par la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{S}$$

Avec :  $R_c$  : la résistance à la compression (en MPa)

$F_c$  : la charge maximale à la rupture en compression (en N)

$S$  : section de l'éprouvette avec  $S = 40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$

## Chapitre IX. PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES

### IX.1. Caractéristiques du basalte

#### IX.1.1. Caractéristiques physiques et chimiques du basalte

Les tableaux suivants donnent les caractéristiques physiques et chimiques du basalte

Tableau 24: caractéristiques physiques du basalte

Caractéristiques physiques	
Teneur en eau	0.57%
Masse volumique apparente	1.15T/m <sup>3</sup>
Poids spécifique	2.93T/m <sup>3</sup>
couleur	gris
Surface spécifique Blaine	3047cm <sup>2</sup> /g

Tableau 25: composition chimique du basalte

Composition chimique (%)	
SiO <sub>2</sub>	39.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.40
CaO	9.60
MgO	0.40
SO <sub>3</sub>	0.70

D'après ce résultat, on constate que le basalte qu'on a utilisé n'atteint pas le plan de saturation de la silice (teneur en SiO<sub>2</sub> ≈45%). Par rapport à la littérature, on peut donc dire que notre basalte appartient au domaine des basanites.

#### IX.1.2. Analyse granulométrique

Le résultat de l'analyse granulométrique du basalte est donné dans le tableau suivant :

Tableau 26: Résultat de l'analyse granulométrique du basalte

Diamètre équivalent (µm)	40	50	63	71	80
Module AFNOR	17	18	19	19.5	20
Passant cumulé(%)	65	81	90	97	100

### Courbe granulométrique

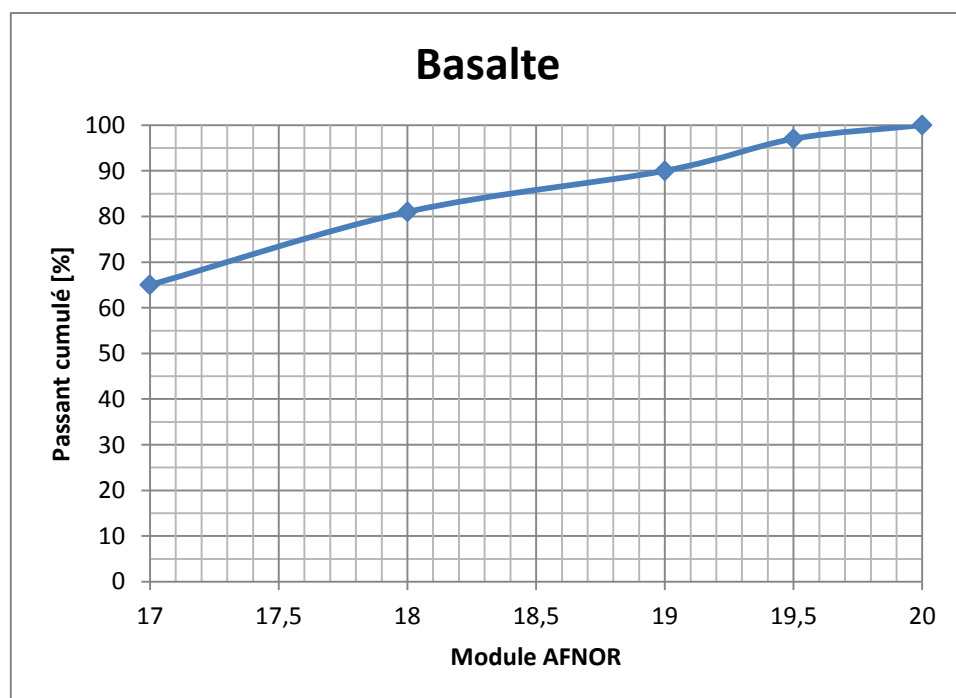


Figure 7 : courbe granulométrique du basalte

## IX.2. Caractéristiques de la pouzzolane

### IX.2.1. Caractéristiques physiques et chimiques de la pouzzolane

Les tableaux suivants donnent les caractéristiques physiques et chimiques de la pouzzolane

Tableau 27 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane

Caractéristiques physiques	
Teneur en eau	3.30%
Masse volumique apparente	0.99T/m <sup>3</sup>
Masse spécifique	2.17T/m <sup>3</sup>
couleur	Gris-noir
Surface spécifique Blaine	3970cm <sup>2</sup> /g

Tableau 28 : Composition chimique de la pouzzolane

Composition chimique (%)	
SiO <sub>2</sub>	52.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.88
CaO	2.60
MgO	Néant
SO <sub>3</sub>	0.50

Le résultat ci-dessus montre que la pouzzolane utilisée a une teneur en silice un peu élevée et une teneur en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> assez faible par rapport à la littérature.

### IX.2.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique de la pouzzolane broyée est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 29 : Analyse granulométrique de la pouzzolane

Diamètre équivalent ( $\mu\text{m}$ )	40	50	63	71	80
Module AFNOR	17	18	19	19.5	20
Passant cumulé(%)	69	77	85	96	100

#### Courbe granulométrique

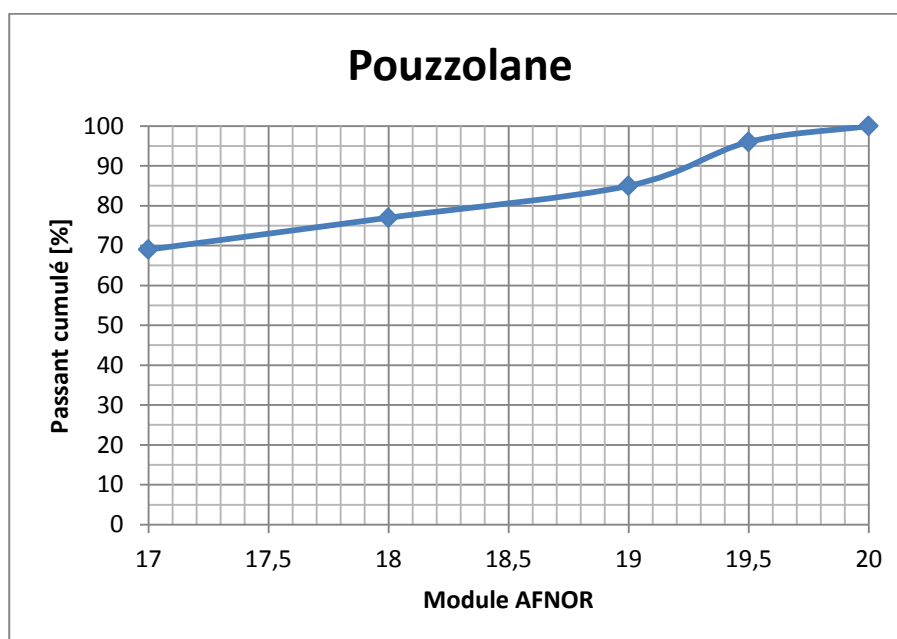


Figure 8 : Courbe granulométrique de la pouzzolane

### IX.3. Caractéristiques du cipolin

#### IX.3.1. Caractéristiques physiques et chimiques du cipolin

Les tableaux suivants donnent les caractéristiques physiques et chimiques du cipolin

Tableau 30 : Caractéristiques physiques du cipolin

Caractéristiques physiques	
Teneur en eau	0.68%
Masse volumique apparente	$1.00\text{T/m}^3$
Masse spécifique	$2.64\text{T/m}^3$
couleur	Blanc-jaunâtre
Surface spécifique Blaine	$3265\text{ cm}^2/\text{g}$

Tableau 31 : Composition chimique du cipolin

Composition chimique (%)	
SiO <sub>2</sub>	6.36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.28
CaO	50.93
MgO	6.73
SO <sub>3</sub>	1.1

Ce résultat montre que les teneurs en CaO et en SiO<sub>2</sub> du cipolin utilisé sont plus élevées que celle de la littérature.

### IX.3.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique du cipolin est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 32 : Analyse granulométrique du cipolin

Diamètre équivalent (μm)	40	50	63	71	80
Module AFNOR	17	18	19	19.5	20
Passant cumulé(%)	75	80	87	92	100

### Courbe granulométrique

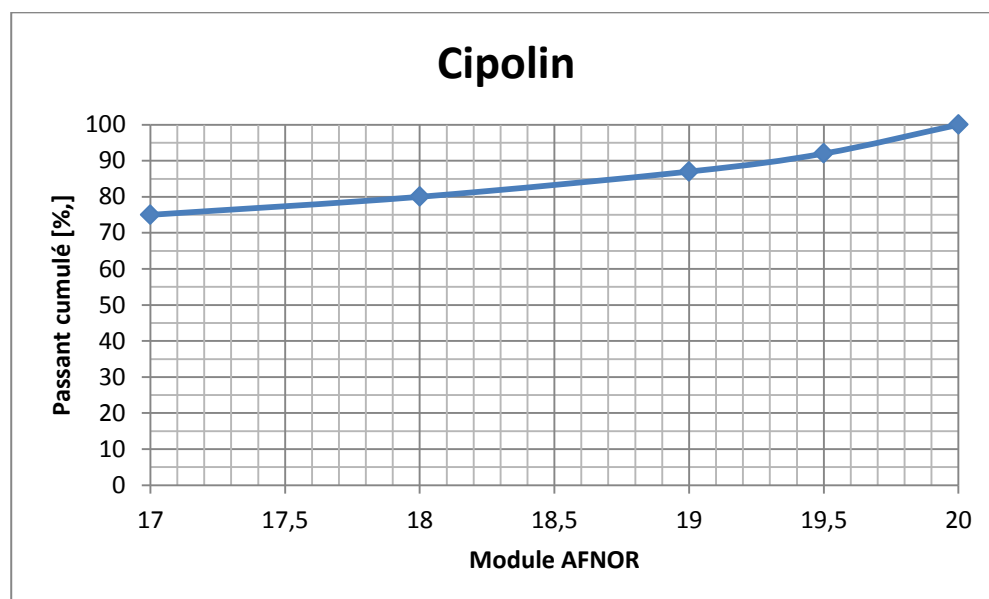


Figure 9: Courbe granulométrique du cipolin



#### IX.4. Caractéristiques du ciment BINANI

Le ciment utilisé est de classe 42,5 N dans la nouvelle norme Européenne NF EN 197–1. Ses principales caractéristiques sont données dans les tableaux suivants :

##### IX.4.1. Caractéristiques physiques

Tableau 33 : Caractéristiques physiques du CEM I

Teneur en eau	0%
couleur	gris
Densité apparente	1.02T/m <sup>3</sup>
Masse spécifique	3.12 T/m <sup>3</sup>
Classe vraie	44.4
SSB	3325 cm <sup>2</sup> /g

##### IX.4.2. Composition chimique :

Tableau 34 : Composition chimique du CEM I

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	CaO <sub>L</sub>	CaO <sub>comb</sub>	PF
Proportion en pourcentage massique	19,98	3.84	6.14	63,89	0.86	1.30	0.94	62,95	3.09

##### IX.4.3. Module et valeur requises

En tenant compte de la chaux libre effective et celle apportée par le gypse, on a les valeurs suivantes :

MC	MS	MA
94,78	2.00	1,60

##### IX.4.4. Composition minéralogique

Formule de BOGUE pour le mélange normal

$$C_4AF = 3,04 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$C_3A = 2,65 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1,69 (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$C_3S = 4,07 (\text{CaO}) - (7,61 \text{ SiO}_2 + 6,72 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,43 \text{ Fe}_2\text{O}_3)$$

$$C_2S = 2,87 (\text{SiO}_2) - 0,75 (C_3S)$$

$$\text{CaO}_L = \text{CaO}_{\text{tot}} - \text{CaO}_{\text{comb}} - 0.7 \text{ SO}_3$$

Tableau 35 : Composition minéralogique du ciment

Constituants	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> A	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	CaO <sub>L</sub>
% massique	11,67	9,78	61,23	11,42	0.99

## Chapitre X. ELABORATION DU CIMENT ECOLOGIQUE

Après avoir déterminé les caractéristiques des matières premières nous essayons de fixer les différents paramètres pour l'obtention du nouveau ciment. Pour ce faire, nous adoptons les règles ci –après:

- La méthodologie pour déterminer ces paramètres est l'expérimentation ou la mise en épreuve des différents procédés les plus connues. Ce qui nous permettra de fixer le mélange poly additionné optimal.
- Le principal critère du choix de l'optimum est la résistance mécanique.
- Le mélange optimal, qui constitue le nouveau ciment, sera comparé avec le CEM I 42,5 N témoin.

NOTATION: dans tout ce qui suit nous adoptons les notations suivantes:

- Pouzzolane: P ;
- Cipolin: C ;
- Basalte: B ;
- Ciment témoin: CEM I.

### **X.1. Ciments mélangés avec un seul ajout**

Nous allons substituer une partie du CEM I par d'autres matières: telles que le basalte, la pouzzolane et le cipolin.

Le but de l'étude est de déterminer lequel de ces additifs donnera le meilleur ciment mélangé, lorsqu'il est utilisé seul avec le CEM I, et dans quelle proportion. La substitution par l'additif va jusqu'à 20%. Les essais d'écrasement sont effectués à 2, 7 et 28 jours d'âge.

#### **X.1.1. Ciments mélangés CEM I – B**

On va remplacer progressivement une partie du ciment CEM I par le basalte: ce qui donne le ciment mélangé CEM I – B.

Les résultats obtenus sont notés dans le tableau suivant et l'évolution de la résistance des mélanges en fonction de la teneur en basalte est représentée par les figures ci-dessous.

Tableau 36: Résultat des essais de compression du CEM I-B

Basalte [%]	0	5	10	15	20
2 J	20	14,5	12,2	13,75	10
7J	29,4	28,13	25	25,63	24,69
28J	44,4	41,08	39,2	38,2	35,45

Tableau 37 : Résultat des essais de traction par flexion du CEM I-B

Basalte [%]	0	5	10	15	20
2 J	3,1	2,55	2,63	2,5	2,38
7J	4,75	5,02	4,28	4,6	3,75
28J	7,19	6,5	6,13	5,13	6,25

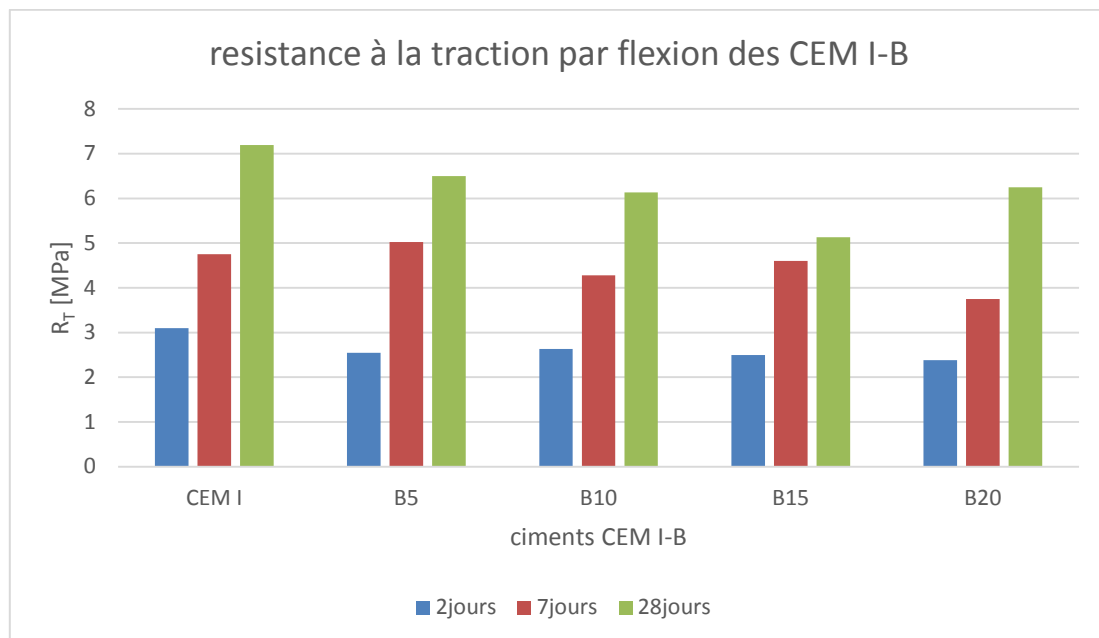


Figure 10 : Résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM I – B en fonction du temps

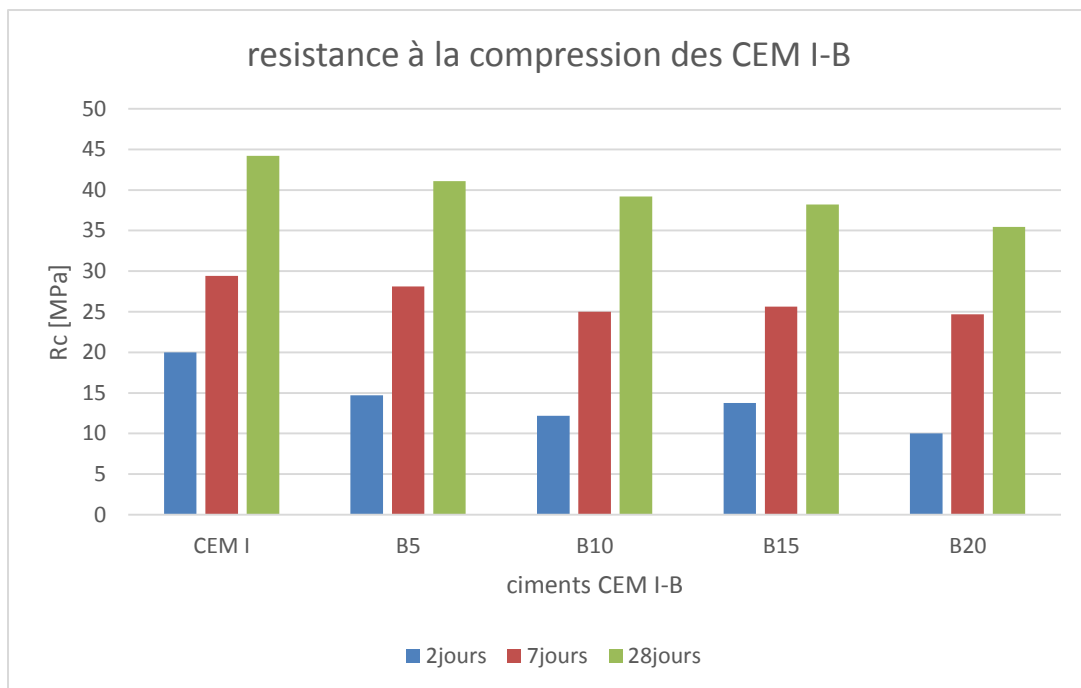


Figure 11 : Résistance à la compression des ciments mélangés CEM I – B en fonction du temps

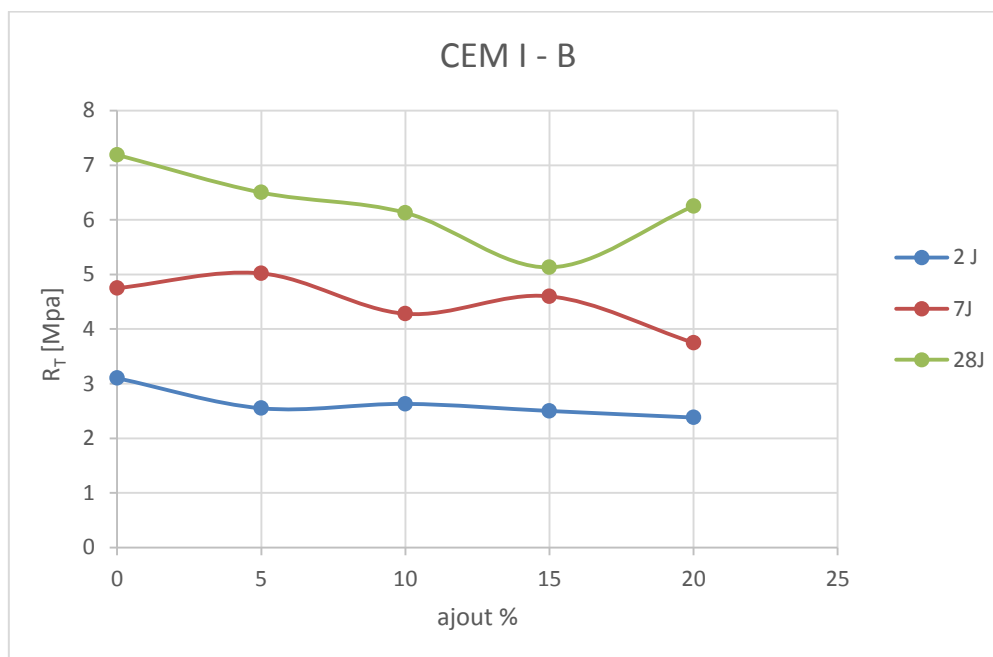


Figure 12 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM – B en fonction de la teneur en basalte

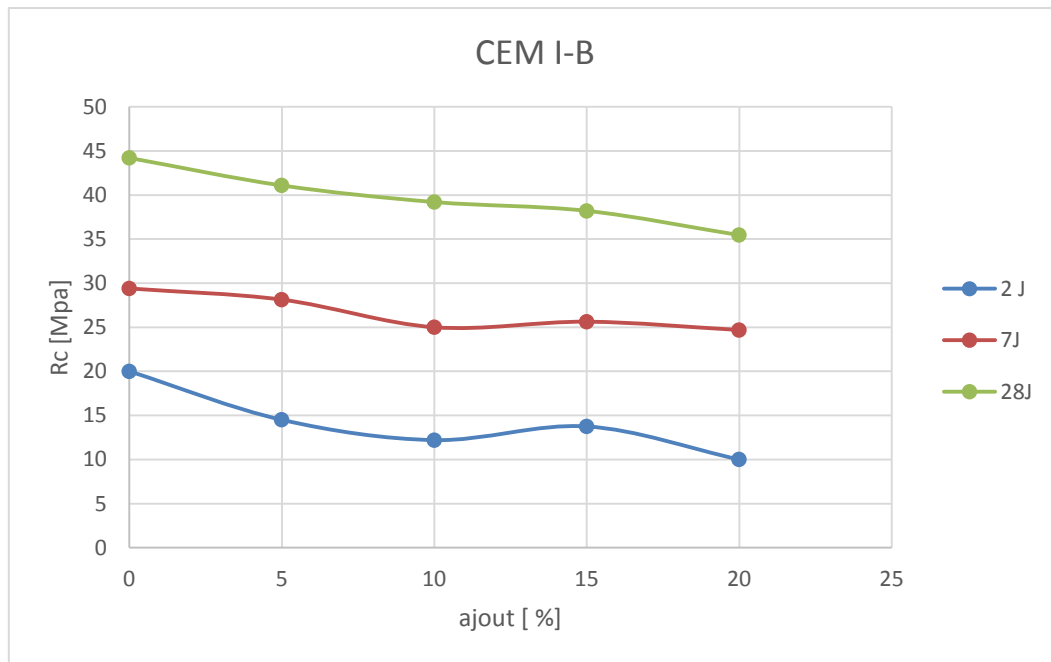


Figure 13: Evolution de la résistance à la compression des ciments mélangés CEM – B en fonction de la teneur en basalte

### INTERPRETATION :

D'après les résultats obtenus ci-dessus, on constate que le ciment mélangé avec 5% à 10% de basalte a une résistance mécanique proche du CEM I témoin.

On peut donc remplacer 5% à 10% du clinker par du basalte ultra fin.

#### X.1.2. Ciments mélanges CEM I – P

On va remplacer progressivement une partie du ciment CEM I par la pouzzolane: ce qui donne le ciment mélangé CEM I – P.

Les résultats obtenus sont notés dans le tableau suivant et l'évolution de la résistance des meilleurs mélanges en fonction du temps et de la composition est représentée par les figures ci-dessous.

Tableau 38: Résultat des essais de compression du CEM I-P

Pouzzolane [%]	0	5	10	15	20
2 J	20	16,25	15,85	10,7	10,63
7J	29,4	29,38	26,88	22,19	22,19
28J	44,4	45,25	40,7	39,2	35

Tableau 39: Résultat des essais de traction par flexion du CEM I-P

Basalte [%]	0	5	10	15	20
2 J	3,1	3,5	3	2,35	1,75
7J	4,75	5,31	4,5	4,3	4
28J	7,19	6,88	6,68	6,46	6,13

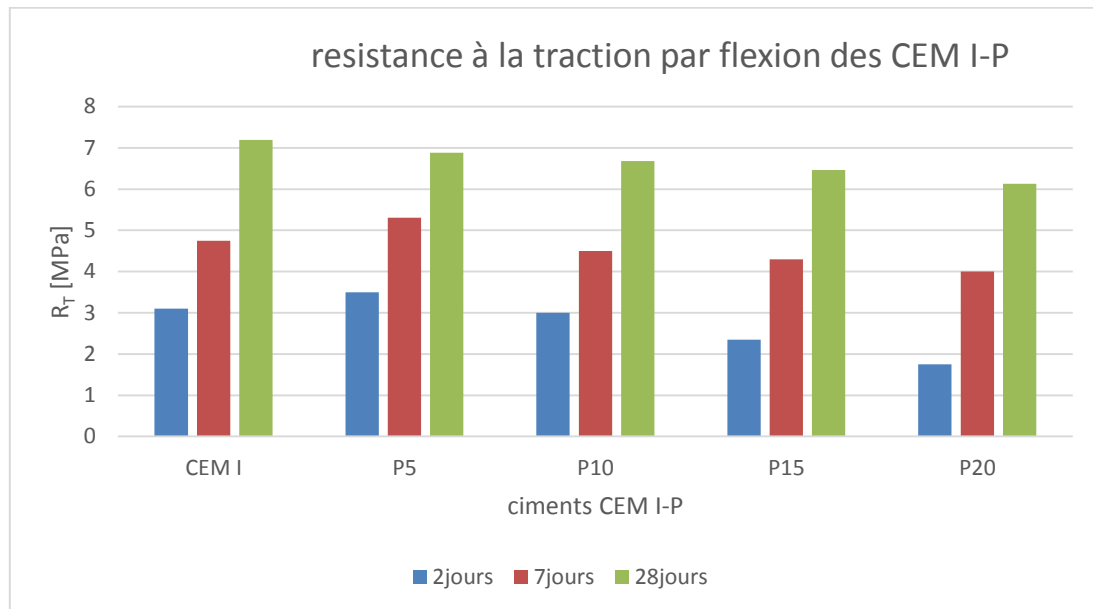


Figure 14 : Résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM I – P en fonction du temps

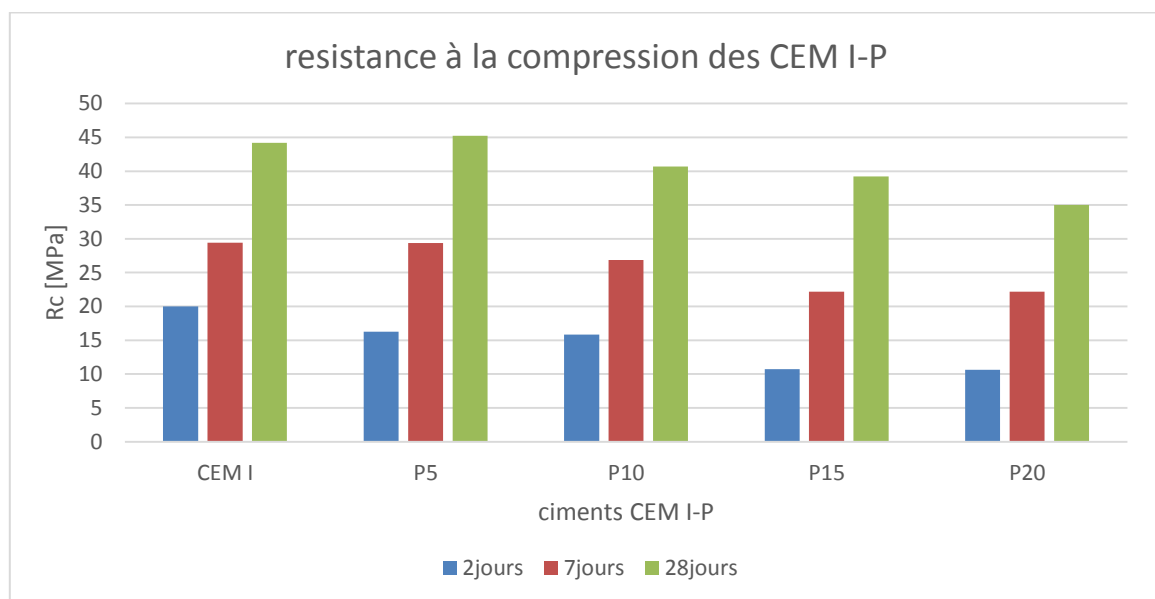


Figure 15 : Résistance à la compression des ciments mélangés CEM I – P en fonction du temps

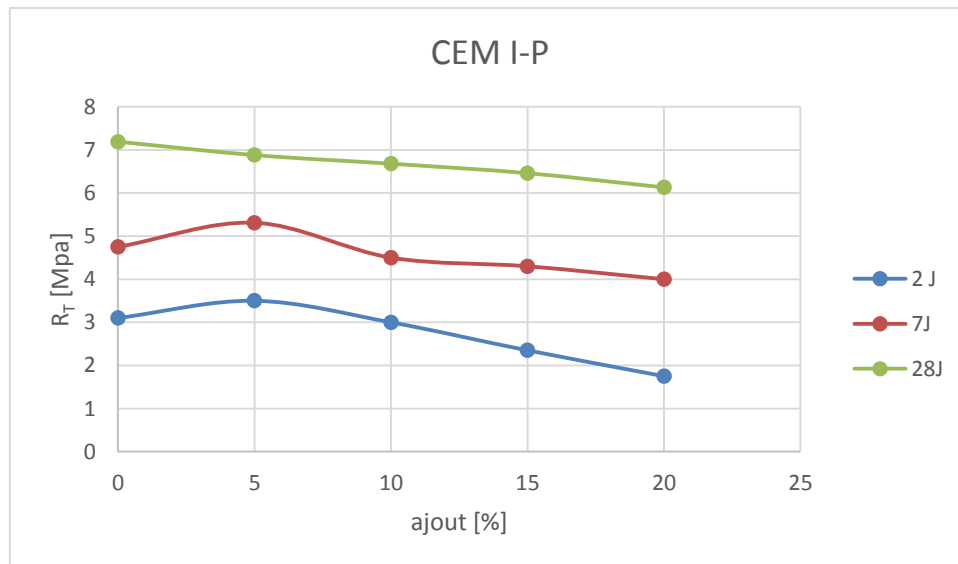


Figure 16: Evolution de la résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM – P en fonction de la teneur en pouzzolane

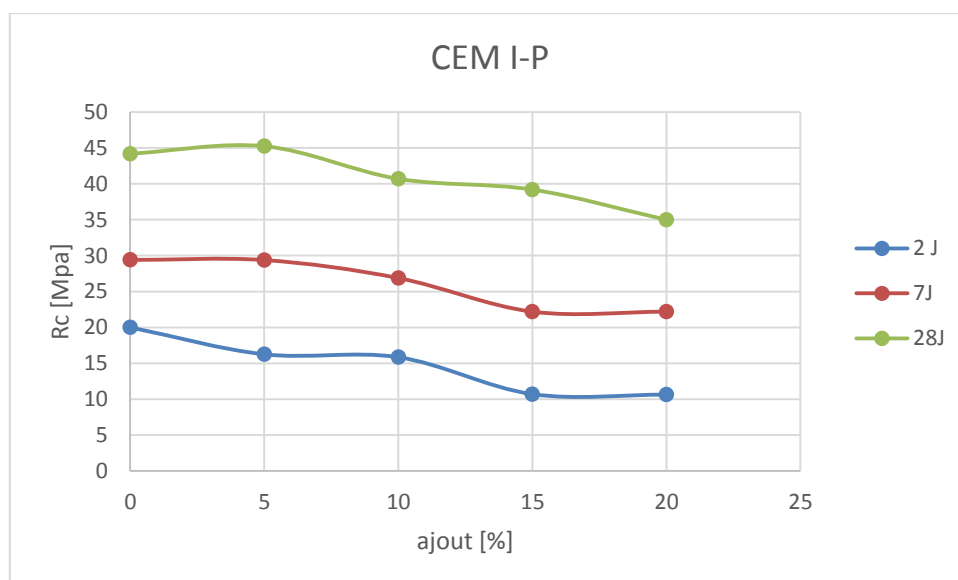


Figure 17 : Evolution de la résistance à la compression des ciments mélangés CEM – P en fonction de la teneur en pouzzolane

### INTERPRETATION :

Les résultats obtenus ci-dessus nous montrent que la substitution du clinker par 5% à 10% de pouzzolane présente une bonne résistance mécanique par rapport au CEM I témoin.

Il est alors possible de substituer 5% à 10% de pouzzolane au clinker.



### X.1.3. Ciments mélanges CEM I – C

On va remplacer progressivement une partie du ciment CEM I par le cipolin: ce qui donne le ciment mélangé CEM I – C.

Les résultats obtenus sont notés dans le tableau suivant et l'évolution de la résistance des meilleurs mélanges en fonction du temps et de la composition est représentée par les figures ci-dessous.

Tableau 40: Résultat des essais de compression du CEM I-C

Cipolin [%]	0	5	10	15	20
2 J	20	16,34	13,75	11,86	10,63
7J	29,4	28,87	28	27	21,56
28J	44,4	44	41,7	39,5	37,13

Tableau 41: Résultat des essais de traction par flexion du CEM I-C

Cipolin [%]	0	5	10	15	20
2 J	3,1	3,2	2,63	2,3	1,63
7J	4,75	4,76	4,75	4,63	3,75
28J	7,19	6,79	6,75	6,39	6

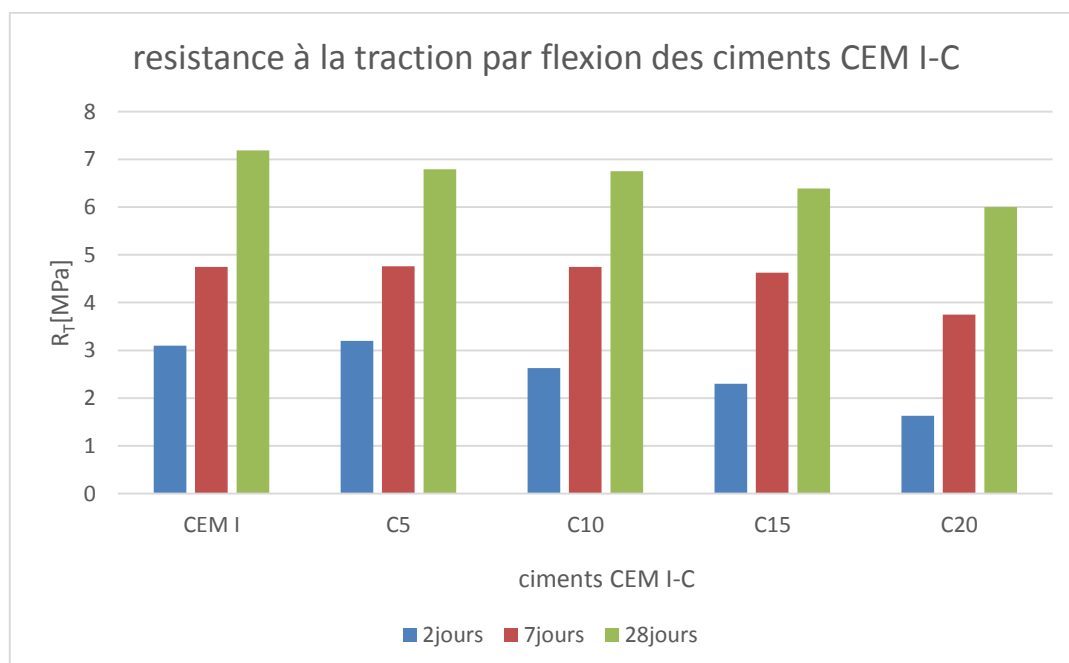


Figure 18 : Résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM I – C en fonction du temps

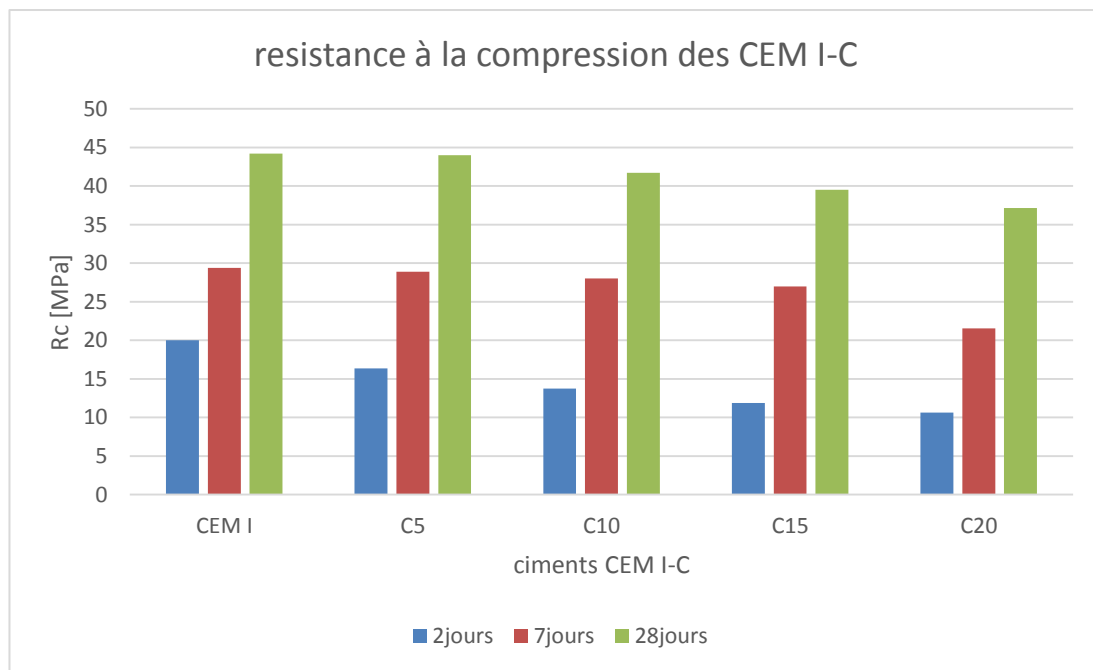


Figure 19 : Résistance à la compression des ciments mélangés CEM I – C en fonction du temps

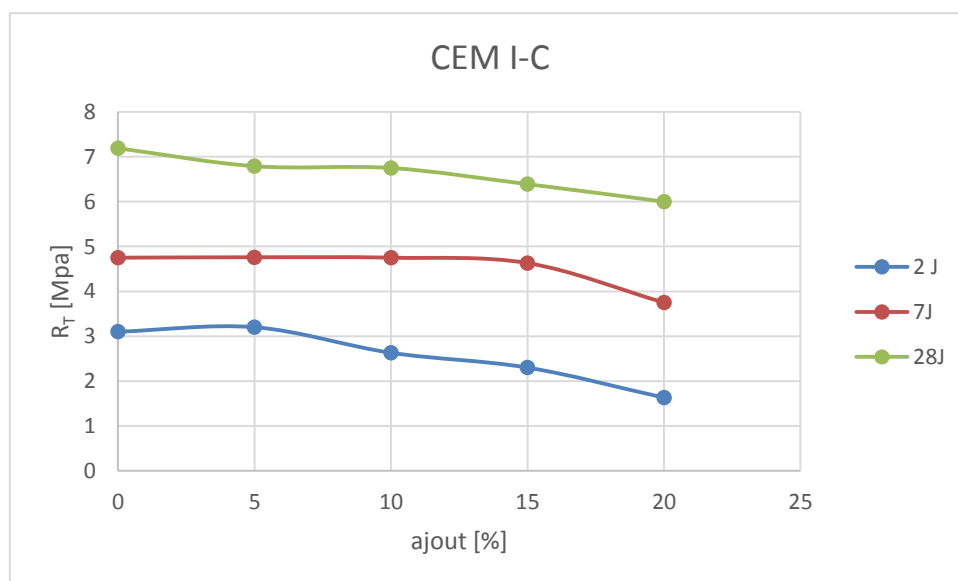


Figure 20 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM – C en fonction de la teneur en cipolin

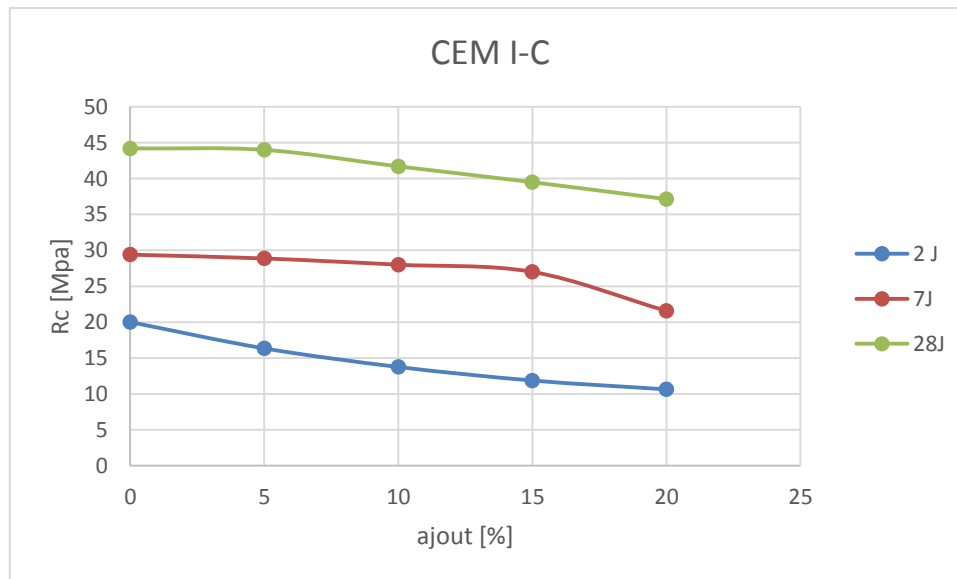


Figure 21 : Evolution de la résistance à la compression des ciments mélangés CEM – C en fonction de la teneur en cipolin

### INTERPRETATION :

D'après ces résultats, en comparaison avec le CEM I, on peut avoir une bonne caractéristique mécanique du ciment par ajout de 5% à 10% de cipolin dans le clinker.

On peut donc produire un ciment composé de 5% à 10% de cipolin.

#### X.1.4. Interprétation générale

Après avoir étudié en parallèle l'effet des différents pourcentages du basalte, de la pouzzolane et du cipolin pour un dosage en eau et en sable constant sur la résistance mécanique d'un mortier, les résultats obtenus nous permettent de faire une étude comparative des ciments mélangés avec un seul ajout entre eux et avec le CEM I témoin. Cette étude va nous montrer l'influence de l'ajout basalte dans le mélange par rapport à celles des autres ajouts.

La figure ci-après illustre l'ensemble des résultats obtenus à 28 jours avec les ciments mélangés à un seul ajout.

Tableau 42 : récapitulation des résultats des essais mécaniques à 28 jours :

Echantillons	CEMI	Basalte				Pouzzolane				Cipolin			
		B5	B10	B15	B20	P5	P10	P15	P20	C5	C10	C15	C20
Rc [MPa] à 28 jours	44	41	39	38	35	45	40	39	35	44	41	39	37

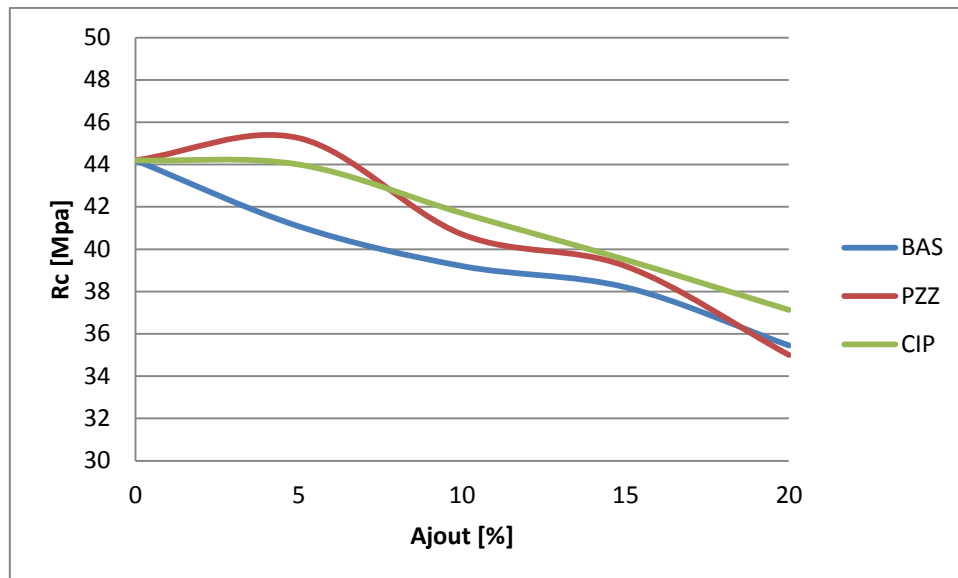


Figure 22 : Influence des ajouts sur la résistance mécanique des ciments mélangés à 28 jours

### Conclusion :

- ✓ Pour un mélange à 5% d'ajout, seul le basalte n'appartient pas à la classe 42,5N.
- ✓ Pour un mélange au-delà de 5% d'ajout, ils appartiennent tous à la classe 32,5N.
- ✓ Avec la pouzzolane ou le cipolin mélangé au clinker à une proportion 5%, on peut avoir un ciment d'aussi bonne performance mécanique que le CEM I ;
- ✓ Par contre, avec le basalte mélangé à 5% au clinker, on peut avoir un ciment de bonne performance mécanique mais inférieur à celle du CEM I.

### X.2. Ciments mélangés avec les trois ajouts

Pour cette série de ciments, nous allons mélanger les 3 ajouts afin de savoir la meilleure composition.

Les résultats obtenus sont notés dans le tableau suivant et l'évolution de la résistance des mélanges en fonction du temps et de la composition est représentée par les figures ci-dessous.

Tableau 43: Résultats des essais mécaniques des ciments mélangés avec 3 ajouts

Echantillons	Composition (%)				Rc (MPa)			Rt (MPa)		
	CEM I	B	P	C	2jours	7jours	28jours	2jours	7jours	28jours
CEM I	100	0	0	0	20	29.4	44.4	3.1	4.75	7.19
B5C5P5	85	5	5	5	13.44	21.25	35.88	2.81	4.22	5.95
B10C5P5	80	10	5	5	14.06	21.56	36.25	3	4.65	6.13
B5C10P5	80	5	10	5	15.50	25	37.75	2.75	4.25	6.40
B5C5P10	80	5	5	10	15	24.06	37.33	2.88	4.20	6.63
B10C10P10	70	10	10	10	11	21	32.75	1.75	3.20	5.38
B10C5P15	70	15	10	5	10.94	21.88	33.38	2.13	4.05	6
B5C15P10	70	5	15	10	10.62	23.13	37.13	2.13	4.06	6.13
B15C10P5	70	10	5	15	10.31	20.63	32.75	1.5	3.63	5.75

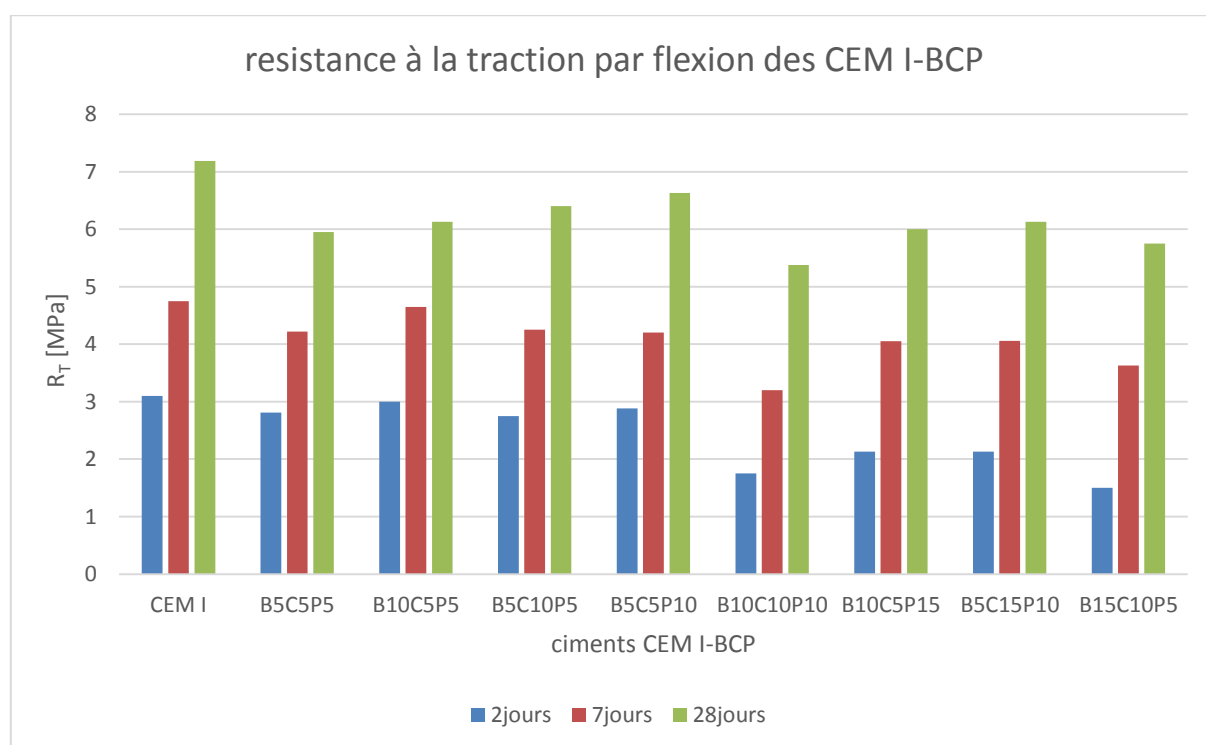


Figure 23: Résistance à la traction par flexion des ciments mélangés CEM I – BCP en fonction du temps

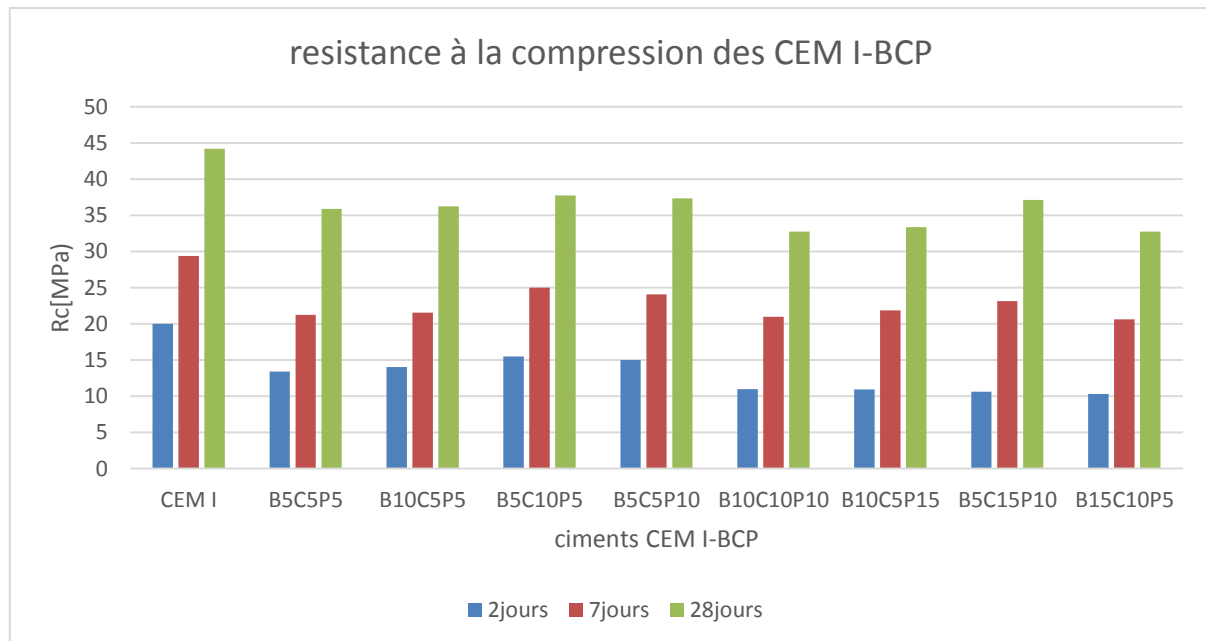


Figure 24 : Résistance à la compression des ciments mélangés CEM I – BCP en fonction du temps

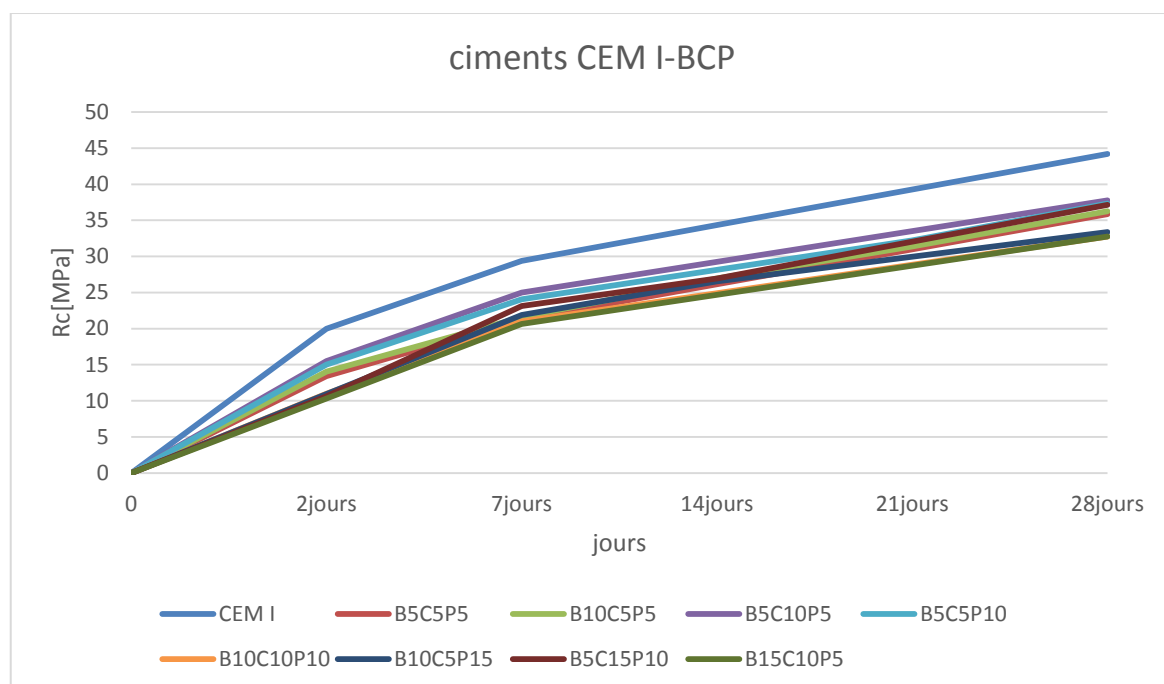


Figure 25 : Evolution de la résistance des ciments mélangés CEM I – BCP en fonction du temps

### INTERPRETATION :

En comparant les résultats des essais mécaniques des ciments composés de trois ajouts avec le CEM I, on constate que l'échantillon B5C10P5 est le plus performant des mélanges.

On en déduit qu'on peut mélanger le basalte avec d'autres ajouts et remplacer 20% du ciment sans ajout par les trois ajouts, basalte ; pouzzolane ; cipolin, avec les proportions respectives de 5%,5%,10%.

### **X.3. Les compositions optimales**

#### **X.3.1. Les critères de choix**

Puisque notre étude se base sur la comparaison de l'utilisation du basalte en tant qu'ajout cimentaire avec d'autres ajouts tels que la pouzzolane et le cipolin, donc on va faire notre choix sur les mélanges de basalte.

Le choix des compositions optimales se fait en tenant compte de deux critères :

- La résistance à 28 jours des échantillons : elle doit être comparable à celle du CEM I témoin ;
- La teneur totale en ajouts : elle doit être la plus élevée possible, pour que l'on puisse parler de ciment écologique.

Ces deux critères permettent d'obtenir un ciment aux performances mécaniques acceptables et qui est effectivement écologique par la réduction de la quantité de CO<sub>2</sub> produit pour sa fabrication en substituant le maximum possible de CEM I par d'autres matériaux non émetteurs de CO<sub>2</sub>.

A partir des résultats des essais en compression, voici un classement par ordre croissant des échantillons qui peuvent être considérés parmi les meilleures compositions.

- ciment mélangé avec un seul ajout :
  - ✓ B10
- Ciment mélange avec les trois ajouts à une proportion de 20%
  - ✓ B5C10P5

#### **X.3.2. Caractérisations des ciments choisis**

Nous donnons ces caractéristiques sous forme de tableau et nous essayons de faire une comparaison simple avec celles du ciment portland témoin.

Les caractéristiques physiques retenues pour cette comparaison sont :

- la densité apparente ;
- le poids spécifique ;
- la surface spécifique de Blaine ;
- l'eau de gâchage pour une consistance normale ;
- le temps de début de prise ;
- le temps de fin de prise.

#### X.3.2.1. Caractérisation du ciment B10 :

Ce nouveau ciment B10 est composé de 90% de CEM I et de 10 % de basalte broyé.

##### a. Résultats des essais physiques

Tableau 44: Comparaison des résultats des essais physiques de l'échantillon B10 et du CEM I témoin.

Propriétés	Ciment mélangé B10	CEM I
Densité apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	1.04	1.02
Poids spécifique [g/cm <sup>3</sup> ]	3.15	3.12
SSB [cm <sup>2</sup> /g]	3085	3325
Eau de gâchage [%]	25.8	26.6
Début de prise [mn]	177	182
Fin de prise [mn]	240	272

##### b. Résultats des essais mécaniques

Tableau 45: Comparaison des résultats des essais mécaniques de l'échantillon B10 et du CEM I témoin.

	Essais mécaniques			
	B10		CEM I	
	Rc [MPa]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Rt [MPa]
Ages (jours)				
2	12.2	2.63	20.00	3.10
7	25	4.28	29.40	4.75
28	39.2	6.13	44.40	7.19



D'après ces résultats, on peut obtenir un nouveau ciment composé de classe de résistance 32.5 N en remplaçant 10% du ciment CEM I par du basalte broyé.

#### X.3.2.2. Caractérisation du ciment B5C10P5 :

Ce nouveau ciment B5C10P5 est composé de 80% de CEM I et de 5% de basalte, de 10% de cipolin broyé et de 10% de pouzzolane.

##### a. Résultats des essais physiques

Tableau 46: Comparaison des résultats des essais physiques de l'échantillon B5C10P5 et du CEM I témoin.

Propriétés	Ciment mélangé B5C10P5	CEM I
Densité apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	1.02	1.02
Poids spécifique [g/cm <sup>3</sup> ]	3.10	3.12
SSB [cm <sup>2</sup> /g]	3196	3325
Eau de gâchage [%]	27.2	26.6
Début de prise [mn]	158	182
Fin de prise [mn]	216	272

##### b. Résultats des essais mécaniques

Tableau 47: Comparaison des résultats des essais mécaniques de l'échantillon B5C10P5 et du CEM I témoin.

Ages (jours)	Essais mécaniques			
	B5C10P5		CEM I	
	Rc [MPa]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Rt [MPa]
2	15.50	2.75	20.00	3.10
7	25.00	4.25	29.40	4.75
28	37.75	6.40	44.40	7.19

D'après ces résultats, on peut obtenir un nouveau ciment composé de performance mécanique dépassant un ciment de classe 32.5N en remplaçant 20% du ciment CEM I par 10% du cipolin broyé, 5% du basalte et 5% de pouzzolane.

**X.4. Conclusion :**

L'objectif dans cette étude était de rechercher des nouveaux ciments écologiques en substituant le clinker par des matériaux cimentaires tels que la pouzzolane, le basalte et le cipolin.

Après avoir analysé les caractéristiques physico-chimiques du CEM I et des additions minérales et après avoir procédé aux essais mécaniques de ces mêmes produits, nous sommes arrivés à la conclusion que, pour des finesses de produits équivalentes, on peut fabriquer un ciment composé de bonnes performances mécaniques en utilisant des matériaux locaux.

Le dosage optimal pour notre ciment composé avec un seul ajout est à 10% de basalte et celui à 3 ajouts est de 10% de cipolin, 5% de basalte et 5% de pouzzolane.

Ces ciments ont des performances mécaniques acceptables dépassant même la classe 32.5N et sont effectivement écologiques par la réduction de la quantité de CO<sub>2</sub> émise lors de sa production et sont aussi économiques par la réduction de la consommation de clinker de 10% à 20% ainsi que la dépense énergétique.

## CONCLUSION GENERALE

L'étude entreprise dans ce mémoire, nous indique qu'il est possible d'exploiter les gisements de ressources naturelles telles que la pouzzolane le cipolin et le basalte existant à Madagascar pour produire des ciments composés.

Dans la première partie de ce mémoire, les littératures techniques nous ont permis d'approfondir et de comprendre les connaissances théoriques de base sur le ciment et les ajouts cimentaires ainsi que les matériaux utilisés.

Dans la deuxième partie, afin de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> apportées par les industries cimentières, une solution peut être adoptée en substituant une partie du clinker ou du ciment portland par des ajouts cimentaires. Donc, nous avons essayé d'élaborer un nouveau ciment en remplaçant une partie du clinker par du basalte. Pour avoir les propriétés optimales, nous avons effectué des préparations telles que le broyage, le séchage et le tamisage. Beaucoup de tests, aussi bien chimiques que physiques, ont été effectués sur les matières premières.

Les résultats finals sont acceptables mais pour une amélioration, l'activation thermique du basalte et de la pouzzolane est envisageable.

Les compositions optimales sont obtenues en substituant 10% du clinker par le basalte, et en remplaçant 20% du clinker par 5% de basalte mélangé avec 10% de cipolin et 5% de pouzzolane.

Alors, on peut dire que la substitution du clinker par du basalte dans le ciment permet non seulement de diminuer considérablement les émissions des gaz à effet de serre mais aussi d'avoir des ciments de performances mécaniques exploitables. Cette nouvelle approche devrait permettre d'optimiser le dosage en CEM I, produit cher et difficile à produire, et de valoriser des ressources locales.

La production de ces ciments composés entraîne une diminution du prix de revient par rapport à celle du ciment portland.

Le remplacement d'une partie du CEM I par ces ajouts diminue de 10% à 20% le prix du ciment.

## *Conclusion générale*

---

Soit C, le prix de la tonne de ciment CEM I, avec C= 480000 Ariary et C' le prix des nouveaux ciments composés avec :

$$480000 - 0.2(480000) \leq C' \leq 480000 - 0.1(480000)$$

$$384000 \leq C' \leq 432000$$

Le prix de la tonne des nouveaux ciments composés varie de 384000 à 432000 Ariary.

## BIBLIOGRAPHIES

[1] Damien DEMAILLY. Atelier Changement climatique. « Les enjeux du développement durable au sein de l'industrie du ciment : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ». Rapport final Octobre 2005-Février 2006

[2] RAHARIJAONA Tovo Robin

Environnement Cours en 4ème année

Département S.M.M, E.S.P.A, Université d'Antananarivo, 2010

[3] BAOFIZA « Contribution à l'élaboration de ciment écologique » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'études approfondies en Science des Matériaux, 2010

[4] RANAIVONIRIVO Velomanantsoa Gabriely, Liants minéraux ; Cours de troisième année Science et Ingénierie des Matériaux – ESPA – 2008

[5] BERARD – BERGERY & all

« La fabrication du ciment Français » ; Eyrolles – 1993

[6] RANAIVONIRIVO Velomanantsoa Gabriely

« Contribution à l'étude des liants pouzzolaniques de synthèse à base des matériaux thermiquement activés à moyenne température » ;

Thèse de Docteur Ingénieur ; ESPA – Université d'Antananarivo / INSA Lyon ; 1992

[7] « Notes générales sur les caractéristiques des ciments et recommandation en pays tropicaux » ; Dunod – 1964

[8] CIMBETON, Fiches techniques ; Centre d'information de l'industrie cimentière

[9] Filières de l'HABITAT

« Le ciment est une matière grise stratégiques » ; Revue N°6 – Mars 1984

[10] L YCÉE C ANTAU A NGLET - EDC MATÉRIAUX

« Le ciment et ses applications »

[11] Dr Hadj SADOK, A.

« Chapitre II : LE CIMENT PORTLAND »

[12] HOLCIM : « conférence polytechnique Vontovorona »

[13] RABIALAHY Nedarivola Andreas « Contribution à l'étude de la valorisation des déchets de la chromite d'Andriamena dans le domaine cimentaire »

[14] Encyclopædia Universalis « BASALTE&GABBROS »

[15] THOMASAT « BASALTE »

[16] Mongo SUKULU « étude d'une roche volcanique : le basalte »

[17] WIKIPEDIA « Basalte »

[18] CHRISTIAN Nicollet « Le volcanisme dans le Sud-Ouest de Madagascar »

[19] GEOWIKI « le basalte »

[20] Monsieur Jacques FRACHEBOURG « Contribution à l'étude de quelques pouzzolanes naturelles et artificielles en vue de la fabrication des ciments de pouzzolanes »

[21] M. SILVEIRA

« Contribution à la valorisation des sols latéritiques : Ciment pouzzolanique de synthèse » ; 1984

[22] JACQUES FRACHEBOURG.

« Contribution à l'étude de quelque pouzzolane naturelle et artificielle en vue de la fabrication des ciments de pouzzolane ». 1965

[23] [www.plantes-carnivores.com](http://www.plantes-carnivores.com)

[24] ANDRIARINONY Faniry Rosas « Contribution à l'étude des ciments écologiques avec polyadditions minérales »

[25] FARITIET Eric « Les différents systèmes volcaniques Malgaches »

[26] RANOROMIHANTA Mahefamalala Tantely « Eude et fabrication de quelques enduits de finition et décoratifs »

[27] ANDRIAMANANTSOA Nirina « Caractérisation physico-chimique et valorisation du sable blanc du sud-ouest de Madagascar »

## ANNEXES

ANNEXE I

NOTATION DES CIMENTIERS

	Formule complète	Formule abrégée	Appellation courante
Eau	$H_2O$	H	Eau
Constituants chimiques	$CaO$ $SiO_2$ $Al_2O_3$ $Fe_2O_3$ $Na_2O, K_2O$ $MgO$ $CO_2$ $SO_3$ $CaSO_4$ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	C S A F N, K M $\bar{C}$ $\bar{S}$ $C\bar{S}$ $C\bar{S}H_2$	Chaux Silice Alumine Oxyde ferrique Alcalis Magnésie Dioxyde de carbone Trioxyde de soufre Sulfate de calcium (Anhydrite) Sulfate de calcium (gypse)
Constituants hydrauliques	$3CaO \cdot Al_2O_3$ $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ $3CaO \cdot SiO_2$ $2CaO \cdot SiO_2$ $CaO_{libre}$ $MgO$	$C_3A$ $C_4AF$ $C_3S$ $C_2S$ $CaO_I$	Aluminate tricalcique Aluminoferrite tetracalcique Silicate tricalcique Silicate bilcaccique Chaux libre Périclase
Constituants hydratés	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ $Ca(OH)_2$	$C_3S_2H_3$ $C_4AH_{13}$ $C_3AH_6$ $C_3ACS_3H_{31}$ CH	Silicate de calcium hydraté Aluminate de calcium hydraté Aluminate de calcium hydraté Sulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite) Chaux hydraté



ANNEXE II

**DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES ECHANTILLONS**

**POIDS SPECIFIQUES**

**POUR LE BASALTE**

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Poids du pycnomètre vide ( $P_1$ ) [g]	102	102	102
Poids du pycnomètre + d'eau ( $P_2$ ) [g]	207	207	207
Volume pycnomètre : $V_1 = P_2 - P_1$ [ml]	105	105	105
Poids pycnomètre + échantillon ( $P_3$ ) [g]	202	156,5	147
Poids pycnomètre + échantillon + eau ( $P_4$ ) [g]	274	243	236
Poids eau = $P_4 - P_3 = V_2$	72	86,5	89
Volume échantillon : $V = V_1 - V_2$	33	18,5	16
Poids échantillon : $P = P_3 - P_1$	100	54,5	45
Poids spécifiques $[g/cm^3] = \frac{P}{V}$	3,03	2,95	2,81
Moyenne poids spécifiques $[g/cm^3]$	2,93		

**POUR LE CIPOLIN**

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Poids du pycnomètre vide ( $P_1$ ) [g]	102	102	102
Poids du pycnomètre + d'eau ( $P_2$ ) [g]	207	207	207
Volume pycnomètre : $V_1 = P_2 - P_1$ [ml]	105	105	105
Poids pycnomètre + échantillon ( $P_3$ ) [g]	203,5	205	203
Poids pycnomètre + échantillon + eau ( $P_4$ ) [g]	271	268	272
Poids eau = $P_4 - P_3 = V_2$	67,5	63	69
Volume échantillon : $V = V_1 - V_2$	37,5	42	36
Poids échantillon : $P = P_3 - P_1$	101,5	103	101
Poids spécifiques $[g/cm^3] = \frac{P}{V}$	2,71	2,45	2,80
Moyenne poids spécifiques $[g/cm^3]$	2,64		

POUR LA POUZZOLANE

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Poids du pycnomètre vide ( $P_1$ ) [g]	102	102	102
Poids du pycnomètre + d'eau ( $P_2$ ) [g]	207	207	207
Volume pycnomètre : $V_1 = P_2 - P_1$ [ml]	105	105	105
Poids pycnomètre + échantillon ( $P_3$ ) [g]	203,5	202	236
Poids pycnomètre + échantillon + eau ( $P_4$ ) [g]	261	268,5	283
Poids eau = $P_4 - P_3 = V_2$	57,5	56,5	47
Volume échantillon : $V = V_1 - V_2$	47,5	48,5	58
Poids échantillon : $P = P_3 - P_1$	101,5	100	134
Poids spécifiques $[g/cm^3] = \frac{P}{V}$	2,14	2,06	2,31
Moyenne poids spécifiques $[g/cm^3]$	2,17		

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

LE BASALTE

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Volume du récipient vide [ml] : V	1000	1000	1000
Poids du récipient vide [g] : $P_1$	635	635	635
Poids du récipient + échantillon [g] : $P_2$	1773,5	1779,5	1800
Poids échantillon [g] : $P = P_2 - P_1$	1138,5	1144,5	1165
Masse volumique apparente $[g/ml] : \frac{P}{V}$	1,14	1,15	1,16
Moyenne masse volumique apparente $[g/ml]$	1,15		

LE CIPOLIN

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Volume du récipient vide [ml] : V	1000	1000	1000
Poids du récipient vide [g] : $P_1$	635	635	635
Poids du récipient + échantillon [g] : $P_2$	1645,5	1624,5	1630
Poids échantillon [g] : $P = P_2 - P_1$	1010,5	989,5	995
Masse volumique apparente $[g/ml] : \frac{P}{V}$	1,01	0,99	1,00
Moyenne masse volumique apparente $[g/ml]$	1,00		

## LA POUZZOLANE

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Volume du récipient vide [ml] : V	1000	1000	1000
Poids du récipient vide [g] : P <sub>1</sub>	635	635	635
Poids du récipient + échantillon [g] : P <sub>2</sub>	1600,5	1625	1650
Poids échantillon [g] : P=P <sub>2</sub> – P <sub>1</sub>	965,5	990	1015
Masse volumique apparente [g/ml] : $\frac{P}{V}$	0,97	0,99	1,02
Moyenne masse volumique apparente [g/ml]	0,99		

## TENEUR EN EAU

## LE BASALTE

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Poids du matériau humide [g]	51.5	55	60
Poids du matériau sec [g]	51.5	54.6	59.7
Teneur en eau [%]	0	0.73	0.5
Teneur en eau moyenne [%]	0.57		

## LE CIPOLIN

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Poids du matériau humide [g]	40.5	46	46
Poids du matériau sec [g]	40.2	45.6	45.8
Teneur en eau [%]	0.74	0.87	0.43
Teneur en eau moyenne [%]	0.68		

## LA POUZZOLANE

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Poids du matériau humide [g]	38.5	40	39
Poids du matériau sec [g]	37	38.73	37.9
Teneur en eau [%]	3.89	3.18	2.82
Teneur en eau moyenne [%]	3,30		

## ANNEXE III

**DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES CEMENTS****MESURE DE DENSITE APPARENTE**

POUR LE CIMENT CEM I 42,5 N

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Volume du récipient vide [ml] : V	1000	1000	1000
Poids du récipient vide [g] : P <sub>1</sub>	635	635	635
Poids du récipient + échantillon [g] : P <sub>2</sub>	1655,5	1665	1650
Poids échantillon [g] : P=P <sub>2</sub> – P <sub>1</sub>	1020.5	1030	1015
Masse volumique apparente [g/ml] : $\frac{P}{V}$	1.02	1.03	1,02
Moyenne masse volumique apparente [g/ml]	1.02		

POUR LE CIMENT B10

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Volume du récipient vide [ml] : V	1000	1000	1000
Poids du récipient vide [g] : P <sub>1</sub>	635	635	635
Poids du récipient + échantillon [g] : P <sub>2</sub>	1680,5	1681	1669
Poids échantillon [g] : P=P <sub>2</sub> – P <sub>1</sub>	1045,5	1046	1034
Masse volumique apparente [g/ml] : $\frac{P}{V}$	1.05	1.05	1,03
Moyenne masse volumique apparente [g/ml]	1.04		

POUR LE CIMENT B5C10P5

Essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
Volume du récipient vide [ml] : V	1000	1000	1000
Poids du récipient vide [g] : P <sub>1</sub>	635	635	635
Poids du récipient + échantillon [g] : P <sub>2</sub>	1650	1651	1650
Poids échantillon [g] : P=P <sub>2</sub> – P <sub>1</sub>	1015	1016	1015
Masse volumique apparente [g/ml] : $\frac{P}{V}$	1.02	1.02	1,02
Moyenne masse volumique apparente [g/ml]	1.02		

**POIDS SPECIFIQUES****POUR LE CIMENT CEM I 42,5 N**

Essais	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Poids de l'échantillon : P [g]	60	60	60
Volume de l'échantillon : V [cm <sup>3</sup> ]	19.5	19.2	19.1
Poids spécifique : $\rho = \frac{P}{V}$	3,08	3,13	3,14
Moyenne poids spécifique [T/m <sup>3</sup> ]	3.12		

**Le CIMENT B10**

Essais	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Poids de l'échantillon : P [g]	60	60	60
Volume de l'échantillon : V [cm <sup>3</sup> ]	19	19,2	19
Poids spécifique : $\rho = \frac{P}{V}$	3.16	3,13	3,16
Moyenne poids spécifique [T/m <sup>3</sup> ]	3.15		

**LE CIMENT B5C10P5**

Essais	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Poids de l'échantillon : P [g]	60	60	60
Volume de l'échantillon : V [cm <sup>3</sup> ]	19,4	19,3	19,4
Poids spécifique : $\rho = \frac{P}{V}$	3,09	3,11	3,09
Moyenne poids spécifique [T/m <sup>3</sup> ]	3.10		

**SURFACE SPECIFIQUE DE BLAINE****POUR LE CIMENT CEM I 42,5 N**Poids spécifique : 3.12 [g/cm<sup>3</sup>]

Masse du ciment considéré : 2.82 g

SSB= 3325 [cm<sup>2</sup>/g]**POUR LE CIMENT B10**Poids spécifique : 3.15 [g/cm<sup>3</sup>]

Masse du ciment considéré : 2.85 g

SSB= 3085 [cm<sup>2</sup>/g]

### **POUR LE CIMENT B5C10P5**

Poids spécifique : 3.10 [g/cm<sup>3</sup>]

Masse du ciment considéré : 2.80 g

SSB= 3196 [cm<sup>2</sup>/g]

### **EAU DE GACHAGE**

Mode Opérateur

-peser 500 g de ciment considéré

-prendre une quantité d'eau

L'eau de gâchage est déterminée à partir de l'enfoncement de la sonde si elle atteint 6±1mm. Si non, on recommence l'essai avec ajout de l'eau.

### **Détermination de l'eau de gâchage : E**

$$E = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse de ciment considérée}} \times 100$$

### **POUR LE CEM I 42,5 N**

Masse d'eau : 133 g

E=26.6 %

### **CIMENT B10**

Masse d'eau : 129 g

E= 25.8%

### **CIMENT B5C10P5**

Masse d'eau : 136 g

E= 27.2%

**DEBUT ET FIN DE PRISE**

Echantillons	CEM I 42,5 N	CIMENT B10	CIMENT B5C10P5
Début de prise [mn]	182	177	158
Fin de prise [mn]	272	240	216

## ANNEXE IV

**ESSAIS MECANQUES : ESSAIS DE RESISTANCE EN COMPRESSION, EN  
TRACTION ET EN FLEXION****CEM I 42,5N**

Ages (jours)	Essais mécaniques	
	Rc [MPa]	Rt [MPa]
2	20	3.1
7	29.4	4.75
28	44.2	7.19

**CIMENT B10**

Ages (jours)	Essais mécaniques	
	Rc [MPa]	Rt [MPa]
2	12.2	2.63
7	25	4.28
28	39.2	6.13

**CIMENT B5C10P5**

Ages (jours)	Essais mécaniques	
	Rc [MPa]	Rt [MPa]
2	15.5	2.75
7	25	4.25
28	37.75	6.40



# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	i
SOMMAIRE .....	a
LISTE DES TABLEAUX .....	c
LISTE DES FIGURES .....	d
LISTE DES PHOTOS .....	e
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS.....	f
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Première partie : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES.....	3
Chapitre I.    INDUSTRIE CIMENTIERE ET ENVIRONNEMENT .....	4
I.1.    Les émissions de CO <sub>2</sub> de l'industrie du ciment .....	4
I.1.1.    Les émissions énergétiques .....	4
I.1.2.    Les émissions de procédé .....	5
I.2.    Impacts environnementaux et mesures d'atténuation .....	5
I.2.1.    Etude d'impact environnemental (EIE) .....	6
I.2.1.1.    Impacts sur la santé publique.....	6
I.2.1.2.    Cas des ressources en eau.....	6
I.2.1.3.    Cas du sol.....	6
I.2.1.4.    Cas de zones côtières.....	6
I.2.1.5.    Cas de l'agriculture et élevage .....	7
I.2.2.    Mesures d'atténuation .....	7
Chapitre II.    GENERALITES SUR LES CEMENTS.....	8
II.1.    Définition du ciment .....	8
II.2.    Les constituants du ciment .....	8
II.2.1.    Le clinker .....	8
II.2.1.1.    Alite ou silicate tricalcique (C <sub>3</sub> S).....	9
II.2.1.2.    Bélite ou Silicate bicalcique (C <sub>2</sub> S) .....	9
II.2.1.3.    Celite ou Aluminate tricalcique (C <sub>3</sub> A).....	9
II.2.1.4.    Alumino-ferrite tetracalcique (C <sub>4</sub> AF) .....	9
II.2.2.    Les autres constituants principaux .....	9
II.2.3.    Les constituants secondaires .....	10
II.2.4.    Les additifs .....	10
II.2.5.    Sulfate de calcium .....	10
II.3.    Normalisation et classification du ciment .....	10
II.3.1.    Les normes ASTM .....	11

II.3.1.1. Les ciments Portlands- Norme ASTM C 150 .....	11
II.3.1.2. Les ciments hydrauliques composés-Norme ASTM C 595 .....	12
II.3.2. La norme Européenne EN 197-1 .....	12
II.3.2.1. Classes de résistance .....	13
II.3.2.2. Les ciments de la norme NF EN 197-1 (ciments courants) .....	14
II.3.2.3. Les ciments qui font l'objet d'autres normes .....	17
II.3.2.4. Caractéristiques complémentaires normalisés .....	18
II.4. Caractéristiques des ciments .....	19
II.4.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques .....	19
II.4.1.1. Composition chimique élémentaire .....	19
II.4.1.2. Composition minéralogique – Formule de BOGUE .....	22
II.4.2. Caractéristiques physiques .....	24
II.4.2.1. Couleur .....	24
II.4.2.2. Finesse de mouture (NF EN 196-6) .....	24
II.4.2.3. Densités .....	25
II.4.2.4. Début de prise (NF EN 196-3) .....	25
II.4.2.5. Expansion (NF EN 196 - 3) .....	25
II.4.2.6. Retrait (NF P 15 433) .....	25
II.4.2.7. Eau de consistance normale .....	26
II.4.3. Caractéristiques mécanique .....	26
II.5. Domaines d'utilisation .....	26
II.6. Fabrication du ciment .....	27
II.6.1. Aperçu général .....	27
II.6.2. Les différentes étapes de fabrication du ciment .....	29
II.6.2.1. Préparation du cru .....	29
II.6.2.2. Cuisson du cru .....	30
II.6.2.3. Refroidissement du clinker .....	31
II.6.2.4. Broyage du clinker .....	32
II.6.2.5. Traitement du clinker – conditionnement .....	32
II.7. Hydratation du ciment portland .....	33
Chapitre III. LES AJOUTS CIMENTAIRES .....	35
III.1. Généralités .....	35
III.2. Classification des ajouts cimentaires .....	36
III.2.1 Les ajouts cimentaires inertes .....	36
III.2.1.1. Les fillers calcaires .....	36
III.2.1.2. La poussière .....	36
III.2.2 Les ajouts minéraux actifs .....	36

III.2.2.1	La pouzzolane.....	37
III.2.2.2	Les cendres volantes .....	37
III.2.2.3	Les laitiers de haut fourneau .....	37
III.2.2.4	Les fumées de silice .....	37
III.3.	Avantages d'utilisation des ajouts cimentaires .....	37
III.3.1.	Intérêt du point de vue économique .....	37
III.3.2.	Intérêt du point de vue technique .....	38
III.3.3.	Intérêt du point de vue environnemental .....	38
Chapitre IV.	LES BASALTES .....	39
IV.1.	Définition .....	39
IV.2.	Caractéristiques physiques .....	39
IV.3.	Structure .....	39
IV.4.	Composition chimique .....	39
IV.5.	Composition minéralogique .....	39
IV.6.	Classification des basaltes .....	40
IV.6.1.	La basanite .....	40
IV.6.2.	Le basalte alcalin à olivine .....	40
IV.6.3.	Le basalte tholéitique .....	40
IV.7.	Principaux gisement à Madagascar .....	40
IV.8.	Utilisation .....	42
Chapitre V.	LES POUZOLANES .....	43
V.1.	Définition .....	43
V.2.	Types de pouzzolanes .....	43
V.2.1.	Pouzzolanes naturelles.....	43
V.2.1.1.	Verre volcanique.....	43
V.2.1.2.	Tufs volcaniques compacts.....	43
V.2.1.3.	Produits pyroclastiques.....	44
V.2.2.	Les pouzzolanes artificielles .....	44
V.2.2.1.	Cendres volantes.....	44
V.2.2.2.	Laitier granulé de haut fourneau .....	44
V.2.2.3.	Argiles calcinées.....	45
V.2.2.4.	Fumée de silice .....	45
V.3.	Activité pouzzolanique .....	45
V.3.1.	Définition de l'activité pouzzolanique .....	45
V.3.2.	Réactions pouzzolaniques .....	46
V.3.3.	Essais mécaniques.....	46

V.3.4.	Constituants actifs des pouzzolanes naturelles .....	46
V.3.5.	Constituants actifs des pouzzolanes artificielles .....	47
V.4.	Caractéristiques de la Pouzzolane .....	47
V.5.	Différentes utilisations de la pouzzolane .....	48
V.5.1.	L'agriculture .....	48
V.5.2.	Applications routières .....	48
V.5.3.	Dans l'industrie .....	48
V.6.	Gisements des pouzzolanes .....	49
V.6.1.	Massif d'Ambre ou Antsiranana .....	50
V.6.2.	Ile de Nosy Be .....	51
V.6.3.	Massif d'Ankaratra .....	52
V.6.4.	Sambaina .....	53
V.6.5.	Faratsiho .....	53
V.6.6.	Le massif de l'Itasy .....	54
V.6.7.	Le massif d'Ankaizina .....	54
V.7.	Conclusion.....	54
Chapitre VI.	LE CIPOLIN .....	55
VI.1.	Définition.....	55
VI.2.	Propriétés du cipolin .....	55
VI.2.1.	Caractéristiques mécaniques.....	55
VI.2.2.	Composition chimique et couleur .....	55
VI.3.	Gisements de cipolin .....	55
VI.3.1.	Mahajanga.....	55
VI.3.2.	Région d'Ambatondrazaka.....	56
VI.3.3.	Ibity.....	56
VI.3.4.	Dans la région Sud-Ouest de Madagascar .....	56
Deuxième partie :	ETUDES EXPERIMENTALES .....	58
Chapitre VII.	LES MATERIAUX UTILISES .....	59
VII.1.	Types et provenances.....	59
VII.1.1.	Le basalte .....	59
VII.1.2.	Pouzzolanes naturelles .....	59
VII.1.3.	Cipolins .....	59
VII.1.4.	Le ciment .....	60
VII.2.	Méthodes de caractérisation .....	60
VII.2.1.	Détermination des caractéristiques physiques .....	60
VII.2.1.1.	Teneur en eau W (%) (Humidité) .....	60

VII.2.1.2. Densités .....	60
VII.2.1.3. Analyse granulométrique .....	62
VII.2.1.4. Surface spécifique de Blaine .....	62
VII.2.2. Détermination des caractéristiques chimiques .....	63
VII.2.2.1. Teneur en eau de constitution .....	63
VII.2.2.2. Composition chimique élémentaire .....	63
Composition minéralogique potentielle .....	65
Chapitre VIII. PRATIQUES DES ESSAIS NORMALISES .....	66
VIII.1. Essais physiques .....	66
VIII.1.1. eau de gâchage .....	66
VIII.1.1.1. Objectif de l'essai .....	66
VIII.1.1.2. Matériels utilisés .....	66
VIII.1.1.3. Manipulation .....	66
VIII.1.2. - Mesure du temps de prise .....	67
VIII.1.2.1. Objectif de l'essai .....	67
VIII.1.2.2. Matériels utilisés .....	67
VIII.1.2.3. Manipulation .....	67
VIII.1.3. - Surface spécifique de Blaine .....	67
VIII.1.3.1. Objectif de l'essai .....	67
VIII.1.3.2. Matériels utilisés .....	67
VIII.1.3.3. Manipulation .....	68
VIII.2. Essais mécaniques .....	69
VIII.2.1. Résistance mécanique à la compression .....	69
VIII.2.2. Mesure de résistance mécanique .....	69
VIII.2.3. Préparation des échantillons .....	69
Chapitre IX. PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES ..	71
IX.1. Caractéristiques du basalte .....	71
IX.1.1. Caractéristiques physiques et chimiques du basalte .....	71
IX.1.2. Analyse granulométrique .....	71
IX.2. Caractéristiques de la pouzzolane .....	72
IX.2.1. Caractéristiques physiques et chimiques de la pouzzolane .....	72
IX.2.2. Analyse granulométrique .....	73
IX.3. Caractéristiques du cipolin .....	73
IX.3.1. Caractéristiques physiques et chimiques du cipolin .....	73
IX.3.2. Analyse granulométrique .....	74
IX.4. Caractéristiques du ciment BINANI .....	75

IX.4.1.	Caractéristiques physiques.....	75
IX.4.2.	Composition chimique .....	75
IX.4.3.	Module et valeur requises.....	75
IX.4.4.	Composition minéralogique .....	75
Chapitre X.	ELABORATION DU CIMENT ECOLOGIQUE.....	77
X.1.	Ciments mélangés avec un seul ajout.....	77
X.1.1.	Ciments mélangés CEM I – B.....	77
X.1.2.	Ciments mélangés CEM I – P .....	80
X.1.3.	Ciments mélangés CEM I – C.....	83
X.1.4.	Interprétation générale.....	85
X.2.	Ciments mélangés avec les trois ajouts .....	86
X.3.	Les compositions optimales .....	89
X.3.1.	Les critères de choix.....	89
X.3.2.	Caractérisations des ciments choisis .....	89
X.3.2.1.	Caractérisation du ciment B10 .....	90
X.3.2.2.	Caractérisation du ciment B5C10P5 .....	91
X.4.	Conclusion .....	92
	CONCLUSION GENERALE .....	93
	BIBLIOGRAPHIES .....	95
	ANNEXES.....	97
	ANNEXE I.....	I
	NOTATION DES CIMENTIERS.....	I
	ANNEXE II.....	II
	DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES ECHANTILLONS... II	
	ANNEXE III.....	V
	DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES CEMENTS.....	V
	ANNEXE IV .....	IX
	ESSAIS MECANQUES : ESSAIS DE RESISTANCE EN COMPRESSION, EN TRACTION ET EN FLEXION .....	IX
	TABLE DES MATIERES	

**Auteur:** NDRAINA Solofoniaina

**Titre:** "CONTRIBUTION A L'ETUDE DE FABRICATION DES CIMENTS ECOLOGIQUES-UTILISATION DU BASALTE COMME AJOUT CIMENTAIRE"

**Nombre de pages:** 97

**Nombre de tableaux:** 47

**Nombre de figures:** 25

**Nombre de photos:** 6

#### **RESUME**

Dans l'industrie cimentière, la recherche d'un liant moins coûteux en utilisant des déchets industriels et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure dans la fabrication du ciment. L'utilisation de ces ajouts naturels a pour effet de diminuer l'énergie nécessaire et la quantité de CO<sub>2</sub> émise dans l'atmosphère lors de la production de ciment.

L'objectif de notre travail consiste à optimiser une composition d'un ciment écologique en utilisant comme ajouts la pouzzolane, le basalte et le cipolin en proportion variable, en étudiant les propriétés physico-chimiques et l'influence sur le comportement mécanique des mortiers. Ceci permettra de sélectionner les dosages optimaux pour les ciments mélangés avec un seul ajout et ceux mélangés avec les trois ajouts, les plus performants, aussi bien du point de vue résistance mécanique que du point de vue durabilité. Afin d'aboutir à quelques améliorations concernant : l'environnement, l'économie, les propriétés physiques et le comportement mécanique. Les résultats tirés de ce travail de recherche confirment que le taux de 10% de basalte et le taux de 10% de cipolin mélangé avec 5% de pouzzolane et 5% de basalte semblent les plus efficaces.

**Mots clé :** clinker, pouzzolane, basalte, cipolin, propriété mécanique, ciment écologique

#### **ABSTRACT**

In cementing industry, the search for a less expensive binder by using industrial waste and natural resources became a major concern in the manufacture of cement. The use of these natural additions causes to decrease energy necessary and the quantity of CO<sub>2</sub> emitted in the atmosphere during the production of cement.

The objective of our work consists in optimizing a composition of ecological cement by using like additions pozzolana, basalt and the cipolin in variable proportion, by studying the physico-chemical properties and the influence on the mechanical behavior of the mortars. This will make it possible to select optimal proportionings for cements mixed with only one addition and those mixed with the three additions, most powerful, as well from the mechanical resistance point of view as from the durability point of view. In order to lead to some improvements concerning: environment, economy, physical properties and the mechanical behavior. The results drawn from this research task confirm that the rate of basalt 10% and the rate of 10% of cipolin mixed with 5% from pozzolana and basalt 5% seem most effective.

**Key words:** clinker, pozzolana, basalt, cipolin, mechanical property, cement ecological.

**Rapporteur:** Professeur, RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely

**Coordonnées de l'auteur:**

**Tel:** +261340819784

**E-mail :** ainansn@gmail.com