

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES PHOTOS.....	VI
LISTE DES ABREVIATIONS.....	VII
INTRODUCTION	1
PARTIE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
CHAPITRE.I CONTEXTE DE L’ETUDE	3
CHAPITRE.II LES CIMENTS	6
CHAPITRE.III LES AJOUTS CIMENTAIRES.....	19
PARTIE II MODELISATION	24
CHAPITRE.IV PRESENTATION DE LA METHODE DES MOINDRES CARRES	26
CHAPITRE.V NOTION DE PROGRAMMATION ET PRESENTATION DU LOGICIEL MATLAB	32
CHAPITRE.VI PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION	40
PARTIE III ETUDE EXPERIMENTALE.....	63
CHAPITRE.VII ETUDE DE REPRODUCTIBILITE DES ESSAIS.....	64
CONCLUSION	88
BIBLIOGRAPHIE	89
ANNEXES	i
TABLES DES MATIERES	iii

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les différentes phases du clinker	7
Tableau 2: Les cinq types de ciments courants	10
Tableau 3: Classe de résistance	11
Tableau 4: Désignation des différents types de ciments en fonction de leur composition	12
Tableau 5: Composition chimique moyenne des ciments (en % massique) [4][5]	13
Tableau 6: Domaines d'utilisation des différents types de ciments [9]	17
Tableau 7: Linéarisation des modèles non linéaires	29
Tableau 8: Résistance à la compression CPA-C	41
Tableau 9: Coefficient de régression CPA-C	42
Tableau 10: Ecarts pour les ciments CPA-C: Valeurs Expérimentales - Modèles	43
Tableau 11: Résistance à la compression CPA-P	44
Tableau 12: Coefficient de régression CPA-P	44
Tableau 13: Ecarts pour les ciments CPA-P: Valeurs Expérimentales - Modèles	46
Tableau 14: Résistance à la compression CPA-L	47
Tableau 15: Coefficient de régression CPA-L	48
Tableau 16: Ecarts pour les ciments CPA-L: Valeurs Expérimentales - Modèles	49
Tableau 17: Résistance à la compression CPA-R [1]	51
Tableau 18: Coefficient de régression CPA-R	51
Tableau 19: Ecarts pour les ciments CPA-R : Valeurs Expérimentales - Modèles	53
Tableau 20: Résultats obtenus avec les ciments CPA-R-P[1]	54
Tableau 21: Résultats obtenus avec les ciments CPA-R-L	55
Tableau 22: Résultats obtenus avec les ciments CPA-R-P/CPA-R-L	55
Tableau 23: Résultats obtenus avec les ciments CPA-P-L	57
Tableau 24 : Résultats obtenus avec les ciments CPA-P-C	57
Tableau 25: Résultats obtenus avec les ciments CPA-P-L/CPA-P-C	57
Tableau 26: Résultats obtenus avec les ciments CPA-L-C	59
Tableau 27: Résultats obtenus avec les ciments CPA-L-C	59
Tableau 28: Coefficient de régression: 3 ajouts	60
Tableau 29: Analyses chimiques des matériaux	71
Tableau 30: Résultats obtenus	72
Tableau 31: Ecarts enregistrés : cubique-cylindrique	73
Tableau 32: Modélisation de la reproduction des essais sur le ciment CPA-C	75
Tableau 33: Tableau de comparaison de la reproduction des meilleurs résultats	83

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Courbe de régression	26
Figure 2: Interface utilisateur de Matlab	34
Figure 3: Interface principal	36
Figure 4: Interface entrée de données.....	38
Figure 5: Résistance à la compression en fonction de la teneur en cipolin.....	43
Figure 6: Ecart en fonction de taux de substitution du ciment par le cipolin.....	44
Figure 7: Résistance à la compression en fonction de la teneur en pouzzolane.....	46
Figure 8: Ecart en fonction de taux de substitution du ciment par la pouzzolane.....	47
Figure 9: Résistance à la compression en fonction de la teneur en latérite.....	49
Figure 10: Ecart en fonction de taux de substitution du ciment par la latérite.....	50
Figure 11: Résistance à la compression en fonction de la teneur en cendre de bal de riz.....	52
Figure 12: Ecart en fonction de taux de substitution du ciment par le cendre de balle de riz..	53
Figure 13: Moule cubique 4*4*16	68
Figure 14: Modélisation des écarts à 7 jours.....	74
Figure 15: Modélisation des écarts à 14 jours.....	74
Figure 16: Modélisation des écarts à 28 jours.....	75
Figure 17: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 7 jours.....	76
Figure 18: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 14 jours.....	77
Figure 19: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 28 jours.....	78
Figure 20: Modélisation de la reproduction des essais CPA-P à 7 jours	79
Figure 21: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 14 jours.....	80
Figure 22: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 28 jours.....	80
Figure 23: Modélisation de la reproduction des essais CPA-L à 7 jours	82
Figure 24: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 28 jours.....	82
Figure 25:Reproduction des meilleurs résultats à 7 jours	83
Figure 26: Reproduction des meilleurs résultats à 14 jours	84
Figure 27: Reproduction des meilleurs résultats à 14 jours	84
Figure 28: Surfaçage des éprouvettes.....	87

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Pouzzolane naturelle	20
Photo 2: Latérite calcinée	21
Photo 3: Cendre de balle de riz	22
Photo 4: Cipolins broyés	23
Photo 5: Balance.....	66
Photo 6: Malaxeur	67
Photo 7: Cône de Marsh	67
Photo 8: Bassin de conservation des éprouvettes.....	69
Photo 9: Appareil de mesure de la résistance à la flexion.....	70
Photo 10: Presse à béton.....	71

LISTE DES ABREVIATIONS

C : Cipolin

CPA 45 : Ciment Portland Artificiel

E : Ecart

LAGEOTEC: Laboratoire Géotechnique de l'Océan Indien

L : Latérite calcinée

P : Pouzzolane

R : Cendre de balle de riz

Rc : Résistance à la compression

T : Taux de substitution du ciment

WBCSD : World Business Council for Sustainable Development

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

INTRODUCTION

Le ciment est un des matériaux très utilisés. Presque tous les travaux de génie civil l'utilisent. Cependant sa production engendre de problème majeur à l'environnement. Elle dégage une quantité importante de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. C'est pour cette raison que beaucoup de recherches dans ce sens ont été entreprises pour limiter la dégradation de l'environnement.

C'est dans ce souci que le mémoire intitulé : « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES » réalisé par ANDRIARINONY Faniry Rosas a été entreprise. Il traite essentiellement la substitution d'une partie du principal composant du ciment, qu'est le clinker par des ajouts cimentaires [1].

Notre étude se concentrera sur l'étude de la modélisation et de la reproduction des essais. Partant des résultats trouvés dans l'ouvrage sus cité, nous essayerons de modéliser les résultats obtenus. Pour cela nous avons recours à la méthode des moindres carrés pour l'approximation des données numériques. Nous étudierons par la suite la reproductibilité des essais.

L'utilisation de l'outil informatique, en l'occurrence la programmation informatique est bel et bien adéquate pour faciliter les tâches liées à l'étude. Vu l'immensité des calculs relatifs à notre étude, elle permettra d'automatiser les traitements et l'analyse des données. Les principaux avantages sont le gain de temps et une grande précision.

Ainsi, nous avons choisi pour titre : « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITION MINERALES : MODELISATION ET ETUDE DE REPRODUCTIBILITE DES ESSAIS ». Par commodité, cet ouvrage a été divisé en trois parties :

- ❖ La première est consacrée à l'étude des généralités et des rappels bibliographiques sur le ciment et ajouts cimentaires ;
- ❖ Dans la deuxième, nous exposons en détail la modélisation, la programmation et leur application sur les données du premier ouvrage ;
- ❖ Tandis que la troisième traitera l'étude de la reproductibilité des essais.

PARTIE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE.I CONTEXTE DE L'ETUDE [2]

I.1 VUE GENERALE

L'industrie cimentière est fortement émettrice de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone CO₂), provenant des besoins en énergie calorifique, mais aussi du procédé de fabrication du ciment. La problématique des changements climatiques incite à rechercher tous les moyens pour réduire les émissions de CO₂ et pour économiser de l'énergie. Cette recherche doit se doubler d'une nouvelle démarche de substitution des produits traditionnellement fabriqués (clinker) par des produits présentant des caractéristiques voisines.

D'une façon générale, les pays en développement suivent les progrès technologiques et économiques réalisés dans les pays industrialisés avec un certain retard. De même, la réglementation locale sur les émissions suit progressivement les normes des pays industrialisés. Il est cependant souhaitable que toutes les mesures pouvant réduire les consommations énergétiques, et donc les émissions d'effluents gazeux, soient mises en œuvre le plus rapidement possible dans ces pays.

I.2 LES EMISSIONS DE CO₂

I.2.1. Les émissions de CO₂ de l'industrie du ciment

D'après une étude menée par le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), l'industrie cimentière est responsable de 5% des émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine. Pour l'industrie du ciment ces émissions sont principalement de deux sortes : émissions énergétiques et émissions de procédé.

Les émissions énergétiques sont liées à la production de l'énergie thermique nécessaire à la fabrication du clinker.

Les émissions de procédé sont dues au fait que le CO₂ fait partie des produits de la réaction chimique qui transforme le carbonate de calcium en clinker (décarbonatation du carbonate de calcium). A ces deux sources principales il faut ajouter les émissions dues au transport des matières premières et à la consommation d'électricité.

1.2.2. Les émissions énergétiques

1.2.2.1 Présentation

Les émissions énergétiques représentent environ 40% des émissions totales d'une cimenterie. Elles sont surtout dues à la combustion des matières fossiles (principalement charbon et coke de pétrole) destinée à fournir l'énergie nécessaire pour maintenir la très haute température des fours à clinker.

1.2.2.2 Efficacité énergétique

En raison des politiques d'économies d'énergie dans les années 70, l'efficacité énergétique des cimenteries a été améliorée dans certains pays développés. Au Japon par exemple, l'énergie nécessaire à la production du clinker a diminué de 30% entre les années 1973 et 1990, ces politiques ont eu pour effet secondaire de diminuer les émissions énergétiques des cimenteries concernées.

1.2.2.3 Energie de substitution

Parallèlement à l'augmentation de la rentabilité énergétique des cimenteries, les producteurs utilisent de plus en plus les déchets comme combustibles de substitution (pneus usés, boues de curage, vieux papiers, huiles usagées ...). Ils permettent ainsi de valoriser ces produits qui auraient de toute façon dû être incinérés en dégageant du CO₂. En Europe, la part des combustibles de substitution dans la production de l'énergie thermique était de 10% en 1995, elle dépasse maintenant les 50% dans certaines régions.

1.2.2.4 Des progrès achevés

Pour des raisons économiques évidentes (prix du pétrole ...) la réduction des quantités de combustibles fossiles nécessaires à la production d'une tonne de ciment fait partie des priorités de nombreuses cimenteries. Malgré de grandes disparités entre les pays, les progrès dans ce domaine sont importants et atteignent maintenant leur limite dans plusieurs pays.

Pour ces raisons, on ne traitera pas plus en détail les émissions de CO₂ énergétiques dans cette étude. On se concentrera sur les émissions de procédé pour lesquelles des progrès énormes et des avancées technologiques majeurs sont encore réalisables.

1.2.3. Emission de procédé

1.2.3.1 Présentation

Du point de vue des émissions de CO₂, le ciment Portland a le double inconvénient de nécessiter une température de cuisson élevée (1450°C), obtenue majoritairement par la combustion de combustibles fossiles (ce qui représente 0.28 t CO₂ / t ciment) mais aussi de présenter en cours de préparation une réaction de décarbonatation (la calcite (CaCO₃), qui constitue 80% de la matière première se transforme en CaO en perdant une molécule de CO₂ qui se dégage, soit 0.52 t CO₂ / t ciment).

Ainsi, pour un ciment Portland, le bilan des émissions est en moyenne de 0.8 t CO₂ / t ciment (varie de 0.6 à 0.9 suivant le ciment) ce qui fait de l'industrie cimentière une des principales industries émettrices de gaz à effet de serre. Compte tenu des taxes envisagées sur les émissions de CO₂, le prix du ciment, et en particulier du ciment sans ajout (CEM I), devrait donc augmenter significativement.

1.2.3.2 Ciments mélangés

Pour réduire les émissions de procédé, il faut diminuer la part de clinker dans le ciment, ce qui conduit à remplacer une partie du CaCO₃ par d'autres matériaux et donne ce que l'on appelle des ciments mélangés. On peut ainsi aller jusqu'à des taux de substitution de 30% par tonne de ciment, diminuant d'autant les émissions de procédé.

Cependant, d'une manière plus générale, l'amélioration du bilan des émissions en CO₂ du ciment peut être plus facilement réalisée par la substitution partielle d'une partie du clinker par d'autres constituants présentant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques. Compte tenu de sa disponibilité, il est probable que des pouzzolanes naturelles, ou activées thermiquement, voient leur utilisation augmentée dans ces ciments, surtout dans des pays en voie de développement.

CHAPITRE.II LES CEMENTS [3]

II.1. DEFINITION

II.1.1. *Les ciments*

Les ciments sont des liants hydrauliques : ils se combinent avec l'eau en donnant des composés hydratés stables qui leur confèrent une résistance mécanique. Ils sont constitués essentiellement de silicates et aluminates de calcium. Ils sont obtenus par la cuisson à haute température (1400-1500°C) de mélanges dosés de calcaire et d'argile et se présentent sous formes de poudres inodores, grises en général.

II.1.2. *Les ciments à haute résistances*

Selon la norme AFNOR NF P 15 301 de 1981, les ciments à hautes résistances sont des ciments dont la résistance à la compression des mortiers normaux à 28 jours a une valeur moyenne à 65 MPa.

Selon la nouvelle norme européenne NF EN 197-1 de janvier 2001, ce sont des ciments dont la résistance à la compression des mortiers normaux à 28 jours a une valeur minimale supérieure à 52,5 MPa.

En général, ce sont des ciments à prise rapide et à faible retrait (début de prise inférieure à 1 heure à 20°C ; retrait environ 1 mm/m).

II.2. LES CONSTITUANTS DU CIMENT

Ils présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes :

- Des propriétés hydrauliques : ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu soluble 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 hydrates 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 : CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃.

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

C_3S : 45 à 65 %

C_2S : 10 à 30 %

C_3A : 05 à 15 %

C_4AF : 05 à 15 %

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

Tableau 1: Les différentes phases du clinker

Minéral pur	Formule chimique	Notation	Minéral présent dans le clinker
Silicate tricalcique	$3 CaO, SiO_2$	C_3S	Alite
Silicate bicalcique	$2 CaO, SiO_2$	C_2S	Bélite
Aluminate tricalcique	$3 CaO, Al_2O_3$	C_3A	Célite
Aluminate ferrite	$2CaO, pAl_2O_3, (1-p) Fe_2O_3$	C_4AF	Alumino-ferrite tetracalcique

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.

II.2.2.1. Laitier granulé de haut fourneau

Il est obtenu par refroidissement rapide de la scorie provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Le laitier de haut fourneau doit présenter des propriétés hydrauliques latentes pour convenir à son emploi en cimenterie.

II.2.2.2. Pouzzolanes naturelles

Ce sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement, soit par activation thermique, des propriétés pouzzolaniques.

II.2.2.3. Cendres volantes

Ce sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudière alimentées au charbon pulvérisé. Elles peuvent être de nature silico-alumineuse ou calcique. Dans le premier cas elles présentent des propriétés pouzzolaniques, dans le second des propriétés hydrauliques.

II.2.2.4. Schistes calcinés

Sous réserve de caractéristiques convenables définies dans la norme, ils peuvent être utilisés. Dans ce cas ils contiennent des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate monocalcique, de même que la chaux libre et du sulfate de calcium. Finement broyés, ils montrent de fortes propriétés hydrauliques et des propriétés pouzzolaniques.

II.2.2.5. Calcaires

Ce sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure à 75%. Ils sont ajoutés en tant que « fines » au ciment.

II.2.2.6. Fumées de silice

Ce sont des particules très fines (environ $1\mu\text{m}$) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production du silicium et d'alliage de ferrosilicium.

II.2.3. Les constituants secondaires

Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou dérivés du processus de fabrication du 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.2.3.1 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. La quantité totale des additifs doit être inférieure ou au plus égale à 1% en masse (exception faites des pigments). La

production des additifs organiques, sous forme d'extraits secs, doit être inférieure à 0,5% en masse du ciment.

II.2.3.2 Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium, généralement du gypse ou de l'anhydrite doit être ajouté en faible quantité (4-5%) aux autres constituants du ciment lors de sa fabrication pour réguler la prise.

II.3. NORMALISATION ET CLASSIFICATION

II.3.1 Les ciments et la normalisation

L'objectif de la normalisation est de répondre à un souci de qualité et de régularité des ciments, grâce à des spécifications rigoureuses de leurs compositions et de leurs caractéristiques.

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 membres de l'union Européenne (EU), par exemple, utilisent la même norme (EN 197-1) dans le domaine des ciments.

A Madagascar, les normes en vigueur et utilisées par les laboratoires sont celles publiées par l'AFNOR.

L'évolution des ciments a justifié en 1978 l'homologation de la norme AFNOR NF P15 301 (appliqué en 1981), qui définit et classe la plupart des ciments selon des spécifications conformes aux textes réglementaires. Cette norme a été révisée en 1994 en vue de l'élaboration d'une norme commune européenne ; la nouvelle norme conservait cependant les exigences de la norme précédente de 1981.

II.3.2 La norme européenne EN 197-1

La norme de référence des ciments est la norme européenne EN 197-1 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 psycho-chimiques ;

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

II.3.2.1 Désignation et marquage :

Les ciments courants bénéficient d'un double marquage CE et NF qui atteste :

- Pour le marquage CE, que les produits sont conformes aux réglementations européennes en matière de santé, de sécurité et de respect de l'environnement, et sont donc réglementairement aptes à l'usage ;
- Pour le marquage NF associé à CE, que les produits bénéficient de garanties complémentaires (de l'AFNOR) sur leur composition, leur performance et leur contrôle.

Dans la norme NF EN 197-1, les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion des constituants (tableau 02)

Tableau 2: 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

II.3.2.2 Classe de résistance

Un mode de classification des ciments les plus utilisés 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 de la résistance normale du ciment 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 196-1 et exprimée en MPa. (Tableau 03)

Tableau 3: Classe de résistance

Désignation de la classe	Résistance à la compression [MPa]		
	A 2 jours	A 28 jours	
	Limite inférieure	Limite inférieure	Limite supérieure
32.5N 32.5R	- ≥ 10	≥32.5	≤ 52.5
42.5N 42.5R	≥ 10 ≥ 20	≥42.5	≤ 62.5
52.5N 52.5R	≥ 20 ≥30	≥52.5	-
Sous classe N : Normale Sous classe R : Résistance au jeune âge élevée			

Remarque :

a. Pour l'ancienne norme NF P 15 301 jusqu'en 1994, les classes de résistances étaient définies par la valeur moyenne de la résistance normale du ciment à 28 jours. C'est le mode de classification encore en vigueur à Madagascar :

- 35 (n'a pas de correspondance dans la nouvelle norme) ;
- 45 et 45R (32.5 N 32.5 R) ;
- 55 et 55 R (42.5 N et 42.5R) ;
- HP et HPR (52.5N et 52.5R)

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

II.3.3 Les ciments de la norme NF EN 197-1 (ciments courants)

Les ciments de la norme NF EN 197-1 sont définis comme courants, à l'instar des autres ciments plus spécifiques, dans la composition, la fabrication et/ou l'utilisation. Le tableau suivant donne une description détaillée des différents types de ciments courants selon cette norme.

Tableau 4: Désignation des différents types de ciments en fonction de leur composition

	Cim Port- land	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA- CEM I	CPJ- CEM II/A	CPJ- CEM II/B	CHF- CEM III/A	CHF- CEM III/B	CLK- CEM III/C	CPZ- CEM IV/A	CPZ- CEM IV/B	CLC- CEM V/A	CLC- CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6% ≤	21% ≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	Total	Total	*	*	*	10% ≤	36%	18% ≤	31%
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*	Total ≤35%	Total ≤55%	Total ≤30%	Total ≤55%
Fumée de Silice (D)	*			*	*	*	(fumée ≤10%)	(fumée ≤10%)	*	*
Cendres calciques (W)	*	(fumée	Fumée	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	de	De	*	*	*	*	*	*	*
Calcaire (L)	*	silice	Silice	*	*	*	*	*	*	*
		≤	≤							
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		10%)	10%)							

II.4. CARACTERISTIQUES DES CIMENTS

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 principaux oxydes : CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ ;
- Les éléments secondaires : MgO, SO₃, Na₂O, K₂O, Cl⁻

Elle est la base de calcul de la composition minéralogique.

Plusieurs auteurs donnent des compositions chimiques types des ciments Portland ; nous pouvons citer R.H. BOGUE et PAPADAKIS [4].

Tableau 5: Composition chimique moyenne des ciments (en % massique) [4][5]

Auteur	Teneur	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PF
BOGUE	Minimum	20	3,4	2,7	62	1	1	0,8
	Maximum	25	6	4,3	64	3	3	3
PAPADAKIS	Minimum	19	2	1	62	0	1	0,2
	Maximum	25	9	5	67	3	3	1,3

II.4.1.2 Hydraulicité

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

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

II.4.1.3 Chaux de saturation

C'est la quantité maximale de chaux qui peut être fixée par les constituants acides (SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃) contenus dans le mélange :

Pour un mélange normal :

$$\text{CaO}_{\text{sat}} = 2,8 \text{ SiO}_2 + 1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

II.4.1.4 Modules et valeurs requises

Tout ciment est caractérisé par trois grandeurs :

- le module 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 attendues du ciment.

II.4.1.4.1. Module de chaux MC

C'est le rapport, exprimé en pourcentage, de la teneur en chaux du ciment sur la chaux de saturation :

$$MC = 100CaO/CaO_{sat}$$

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 ce mélange.
- Si $MC > 100$, il existe forcément de la *chaux libre*, non combinée, dans le mélange.

II.4.1.4.2. Module de silice MS :

Il renseigne sur le rapport entre la quantité de silicates et celle d'aluminates contenus dans le ciment ou le clinker.

$$MS = SiO_2 / Al_2O_3 + Fe_2O_3$$

MS varie de 1,8 à 3,4 pour les ciments en général, et de 2,2 à 2,5 pour les ciments Portland courants.

II.4.1.4.3. Module d'alumine (ou oxydique) MA :

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

$$MA = Al_2O_3 / Fe_2O_3$$

- Si $MA > 0,638$, le ciment est normal et contient du C_3A et du C_4AF ;
- Si $MA < 0,638$, le ciment est dit « riche en fer », et contient du C_2F au lieu de 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.4.2 Caractéristiques physiques [6] [7] [8]

II.4.2.1. Couleur

Elle varie avec la composition chimique des matières premières (particulièrement la teneur en oxydes 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 couleurs, et particulièrement les ciments blancs obtenus par l'utilisation de matières premières très pures et de combustibles fluides.

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

Elle est caractérisée par la surface développée totale de tous les grains contenus dans une gamme de ciment. La notion la plus utilisée est la surface spécifique de BLAINE notée SSB.

Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette grandeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm^2/g .

II.4.2.3. Densités

- 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 1kg/L en moyenne pour un ciment.

- Poids spécifique

Il 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 3,15kg/L suivant le type de ciment. Un ciment de faible poids spécifique ($d < 2,9$) 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 au début de prise est déterminé par l'instant où l'aiguille de VICAT de 1mm² 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 1heure.

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 soit dépassée 10mm/m 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 0,8mm/m ou à 1mm/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 mécaniques :

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. Quelquefois il y a lieu de déterminer la résistance à la traction par flexion et la résistance à l'usure.

Conformément 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.

II.5. DOMAINES D'UTILISATIONS :

Les ciments tirent leurs principaux domaines d'utilisation dans la confection de mortiers et de bétons ainsi que d'autres produits dérivés. A partir des différents types de ciment et en fonction de leur dosage, il est possible d'obtenir une infinité de bétons aux caractéristiques pouvant varier en fonction du type de ciment, de la nature et des caractéristiques des granulats, de leur mélange, des colorants, des adjuvants, de la mise en œuvre, des traitements ultérieurs...

Le béton peut s'adapter aux exigences de chaque réalisation par ses performances comme par ses aspects : on peut, à volonté, lui demander une résistance aux chocs, à l'usure, aux agents agressifs, ainsi que des caractéristiques de légèreté ou de lourdeur, d'isolation phonique et/ou thermique, d'étanchéité, une durable accrue, un bel aspect... Le béton, application majeure du ciment, est présent dans tous les types de construction, qu'il s'agisse de logements, d'écoles, d'hôpitaux, de bureaux, d'usines, d'ateliers, ou d'espaces commerciales... Il est aussi présent dans de nombreuses applications routières mais aussi, et surtout, dans des grands ouvrages d'arts... A titre indicatif, nous donnons dans le tableau 6 les principales applications des différents types de ciment avec les recommandations y afférentes.

Tableau 6: 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 de chapes -Ouvrages de faible épaisseur
CEM IV/A ou B	-Construction sous-marine et souterraine en béton et béton armés -Etanchéité et résistance à l'eau	-Travaux aériens -Bétonnage par temps froid
CNP	-Travaux à prise rapide : scellement, aveuglement de voie d'eau -Travaux en milieu agressif	Tout autre emploi

CA	<ul style="list-style-type: none"> -Doublure des appareils thermiques -Mortier et béton réfractaire -Bétonnage par temps froid -Pieux d'essai en béton armé 	<ul style="list-style-type: none"> -Bétonnage par temps chaud -Travaux de masse -Présence d'eau alcaline -Mélange avec d'autres ciments
CLX	<ul style="list-style-type: none"> -Travaux de maçonnerie -Présence d'eau quelque peu agressive -Travaux en génie rural -Tous travaux souterrains 	<ul style="list-style-type: none"> -Travaux en élévation -Travaux de béton armé
CM	<ul style="list-style-type: none"> -Maçonnerie -Agglomérés 	<ul style="list-style-type: none"> -Travaux de béton armé
CN	<ul style="list-style-type: none"> -Petits Travaux de bétonnage -Maçonnerie -Enduits -Agglomérés -Présence d'eau quelque peu agressive 	<ul style="list-style-type: none"> -Travaux de béton armé
(ES) (PM)	<ul style="list-style-type: none"> -Travaux de fondation à décoffrage rapide -Présence d'eaux agressives 	<ul style="list-style-type: none"> -Présence d'eau acide -Ouvrage soumis au gel -Mélange avec d'autres ciments
(CP)	<ul style="list-style-type: none"> -Travaux de béton armé souterrains -Travaux en eau agressives -Travaux hydrauliques 	<ul style="list-style-type: none"> -Travaux en élévation -Enduits et chapes -Ouvrages de faibles épaisseurs

CHAPITRE.III LES AJOUTS CIMENTAIRES

III.1. LES POUZZOLANES

Une pouzzolane est un matériau siliceux, alumineux ou ferrugineux, n'ayant aucune propriété liante en lui-même, mais qui, sous certains états de cristallinité et de structure peut réagir en présence de chaux et d'eau à température et pression normales pour donner un ciment.

CLASSIFICATIONS [10]

On distingue deux types de pouzzolanes :

- Les pouzzolanes naturelles qui proviennent pour la plus grande partie des roches volcaniques dans lesquelles le constituant amorphe est le verre produit lors de la fusion ;
- Les pouzzolanes artificielles : les couramment employées sont les cendres volantes des centrales thermiques, les laitiers de haut fourneau, les bauxites et les argiles calcinées.

III.1.1. Les pouzzolanes naturelles

Le terme pouzzolane désigne tout matériau tant naturel qu'artificiel riche en silice et alumine apte à réagir à température ambiante avec la chaux en solution aqueuse afin de donner naissance à des produits ayant des propriétés liantes, principalement des silicates et aluminates de calcium. [11]

La pouzzolane n'est autre que les projections volcaniques, c'est une roche naturelle possédant une texture scoriacée, alvéolaire. Ce sont des matériaux légers de densité inférieure à 1, poreux, abrasifs, réfractaires et isolants. [12]

Les pouzzolanes sont des cendres trachytiques, rhyolitiques, leucitiques, ou rarement basaltiques, claires et friables, représentant l'élément fin de certaines projections volcaniques riches en silices et aluminés et donnant des propriétés hydrauliques mélangées avec de la chaux, formant alors masse. [13]

- Les pouzzolanes, en général, sont des produits riches en éléments colloïdaux (silice, alumine,...) aptes à donner soit des composés hydrauliques avec de la chaux, soit des gels, suivant des processus d'ailleurs souvent indirects.

- La présence de chaux libre apparaît nécessaire qu'il s'agisse d'une union directe de cette base avec les éléments acides de la pouzzolane, ou qu'il s'agisse d'un intermédiaire permettant l'hydratation et la précipitation des gels hydratés.



Photo 1: Pouzzolane naturelle

III.1.2. LES POUZZOLANES ARTIFICIELLES

III.1.2.1. Définition [14]

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

Exemple de pouzzolanes artificielles : les argiles et schistes argileux calcinés, les cendres volantes de centrales thermiques, les cendres de balle de riz, les laitiers de haut fourneau, la bauxite calcinée...

III.1.2.2. Constituants actifs des pouzzolanes artificielles

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

Au point de vue chimique, la silice, l'alumine et l'oxyde de fer peuvent devenir actifs par le traitement thermique. Il faut remarquer que ces oxydes à l'état actif ne se trouvent pas nécessairement séparés, mais peuvent se trouver sous forme de combinaison.

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.

III.1.2.3. Latérites calcinées

III.1.2.3.1. Définition [15]

Le mot latérite vient du mot latin « later » qui signifie brique. BUCHMAN en 1807 le décrit comme étant un matériau ferrugineux utilisé dans la construction.

L'ancienne définition basée sur le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1.33$ s'est longtemps imposée ; quoique souvent contestée. Et selon MUKERJI les latérites sont des terres très altérées qui contiennent des proportions importantes mais très variables d'oxydes de fer et d'aluminium, ainsi que du quartz et d'autres minéraux.



Photo 2: Latérite calcinée

III.1.2.3.2. Constituants des latérites

Les latérites sont constituées de :

- FER qui se présente sous forme de goethite (FeOOH ou $\text{FeO}_3, \text{H}_2\text{O}$), d'hématite (Fe_2O_3), ou de magnétite (FeO_4).
- L'ALUMINE qui se présente sous forme d'oxyde. La gibbsite ou hydragillite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) est le minéral le plus fréquent ; le boehmite (AlOOH) est au moins reconnu et souvent en quantité moindre. L'aluminium existe également sous une forme combinée à la silice dans la kaolinite ($\text{SiO}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$) pour la demi maille. Le silicium est de ce fait un constituant habituellement sous forme de combinée. Il se présente aussi sous forme de quartz.
- Le TITANE qui est sous forme d'ilménite FeTiO_3 .
- Le MANGANESE qui apparait sous forme d'oxyde en faible quantité.

III.1.2.4. CENDRE DE BALLE DE RIZ [15]

La silice SiO_2 se trouve à l'état naturel dans le quartz. Elle se trouve comme composant minérale dans diverses roches telles que les roches magmatiques, métamorphiques, sédimentaires. C'est un élément très répandu mais à des proportions différentes.



Photo 3: Cendre de balle de riz

Son extraction à partir de ces roches nécessite de l'énergie et de la technologie conséquente. Mais la silice se trouve aussi dans les végétaux et d'après les recherches effectuées, l'extraction de la silice à partir de la balle de riz est la plus facile. Et la teneur en silice de la cendre est plus élevée par rapport aux autres végétaux.

La cendre de balle de riz est une silice active qui contient généralement de la silice. Elle a pour formule générale SiO_2 et elle existe sous deux états différents :

- Etat anhydre SiO_2 : cristallisé
amorphe
- Etat hydraté $\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$ avec n variable (entre 3 et 4)

La silice s'applique à des solides naturels synthétiques dont l'unité est le tétraèdre SiO_4 . C'est l'organisation spatiale de ces tétraèdres qui va définir la structure amorphe ou cristalline des composés.

III.2. LE CIPOLIN [16]

III.2.1 Définition

Les cipolins sont des roches sédimentaires, facilement solubles dans l'eau, composées majoritairement de calcaire (CaCO_3) qui est utilisé dans la fabrication de chaux et d'ajout dans l'industrie du ciment.



Photo 4: Cipolins broyés

III.2.2 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 50 à 60 MPa.

III.2.3 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 dolomie, l'aragonite, la silice, la sidérite et l'argile, qui influent sur sa couleur. En général blanc, le cipolin existe aussi dans des teintes jaune, gris ou brun.

Certes, le ciment est un matériau incontournable jusqu'à l'heure actuelle dans la construction dans le pays, mais sa production industrielle est un facteur intervenant à la dégradation de l'environnement. En effet les gaz dégagés causent des troubles à l'écologie. Du fait, notre étude bibliographique nous a fournie des données permettant de trouver des alternatives par l'introduction des ajouts cimentaires dont les pouzzolanes aussi bien naturelles qu'artificielles qui sont abondantes dans le pays.

PARTIE II MODELISATION

INTRODUCTION

Un problème physique en sciences de l'ingénieur se présente sous la forme d'un système matériel pour lequel il faut résoudre ou prévoir le comportement associé à une fonction donnée. Sa résolution peut être d'une manière expérimentale à travers une expérience acquise après plusieurs essais. Elle peut être aussi menée d'une manière théorique exacte ou approchée. Dans ce cas, il faut lui associer un modèle mathématique qui n'est pas unique pour un système donné, mais il dépend en particulier du résultat recherché. Une fois le modèle mathématique établi, il faut procéder à sa résolution. Cette résolution peut être quelque fois analytique exacte, mais dans la majeure partie des cas elle est numérique approchée.

Dans cette partie, on essaiera de modéliser la résistance à la compression des liants mélangés en fonction des teneurs en ajouts. Partant des données de l'ouvrage : « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES » réalisés par ANDRIARINONY Faniry Rosas, on effectuera des approximations des données expérimentales par des fonctions analytiques. Cela nécessite un grand nombre de calcul et pour faciliter les tâches, l'élaboration d'un outil de calcul est recommandée.

CHAPITRE.IV PRESENTATION DE LA METHODE DES MOINDRES CARRES [17] [18] [19] [20]

La régression multiple peut être utilisée à plusieurs fins:

- Trouver la meilleure équation linéaire de prévision (modèle) et en évaluer la précision et la signification.
- Estimer la contribution relative de deux ou plusieurs variables explicatives sur la variation d'une variable à expliquer; déceler l'effet complémentaire ou, au contraire, antagoniste entre diverses variables explicatives.

On a pour objectif de faire une approximation d'une fonction numérique $\{y(x_i)/i = 1, n\}$ par une fonction analytique. Pour ce faire, il faut minimiser la distance d entre la fonction réelle y et son modèle y^* .

Soit donc à minimiser la norme :

$$d = \|y - y^*\|$$

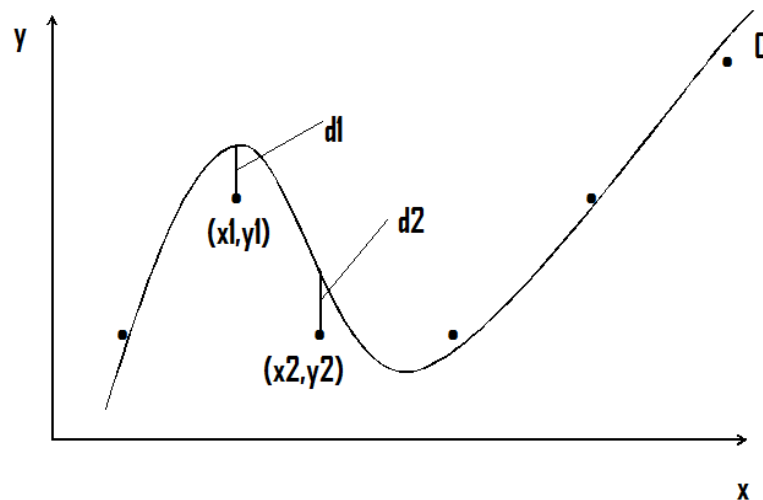


Figure 1: Courbe de régression

Trois normes sont couramment utilisées pour l'approximation d'un ensemble de données numériques (x_i, y_i) : la norme de Laplace L_1 , la norme euclidienne L_2 , la norme du minimax de Laplace-Tchebychef L_3 .

Par définition :

Norme de Laplace L_1

$$\|y - y^*\| = \sum_{i=1}^n |y_i - y_i^*|$$

Norme euclidienne L_2

$$\|y - y^*\| = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2$$

Norme du minimax de Laplace-Tchebychef L_3

$$\|y - y^*\| = \max_{i=1,n} |y_i - y_i^*|$$

La meilleure approximation dans le sens de la méthode des moindres carrés sera donc celle qui minimisera la norme euclidienne L_2 .

En résumé, la méthode des moindres carrés est une méthode utilisée pour faire une approximation d'un ensemble de données numériques par une fonction analytique minimisant la norme euclidienne d entre la fonction numérique et son modèle.

IV.2.1 Construction du système d'équations

La forme générale du modèle linéaire est

$$y^* = \sum_{j=1}^m c_j f_j(x_i) \quad i = 1, n$$

Où c_j représente les paramètres à déterminer

$f_j(x_i)$ constituent un sous espace vectoriel de dimension m , elles sont fonctions de plusieurs variables.

Il faut donc minimiser d , soit

$$F = \|y^* - y\| = \left\| y^* - \sum_{j=1}^m c_j f_j(x_i) \right\| \quad i = 1, n$$

Par suite

$$F = \|y^* - y\| = \sum_{j=1}^m (y^* - c_j f_j(x_i))^2 \quad i = 1, n$$

Pour minimiser cette quantité, il faut calculer le gradient de l'expression précédente pour ensuite l'égaliser à zéro et on obtient par la suite un système de m équations à m inconnues.

$$\frac{\partial F}{\partial c_1} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial c_2} = 0, \quad \dots, \quad \frac{\partial F}{\partial c_{j-1}} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial c_j} = 0$$

Il est à noter qu'il est souvent nécessaire de faire une approximation d'un ensemble de données par un modèle qui n'est pas linéaire. On a recours dans ces cas à des fonctions de la forme :

$$y_i^* = f(x_i, c_1, c_2, \dots, c_m) \quad i = 1, n$$

Où les paramètres $[c_1, c_2, \dots, c_m]$ apparaissent sous forme non linéaire.

La démarche de résolution est parallèle à celle employée pour les modèles linéaires, mais le système d'équations algébriques obtenu est non linéaire et sa résolution est relativement plus difficile. Pour cela trois options sont possibles :

- linéarisation analytique du modèle ;
- linéarisation numérique ponctuelle du modèle par des méthodes de type Newton ;
- linéarisation numérique ponctuelle utilisant les méthodes d'optimisation directe.

La méthode des moindres carrés est simple lorsque le modèle est linéaire et relativement compliquée dans le cas contraire.

Toutefois, un grand nombre de formes non linéaires peuvent être linéarisées par un simple changement de variable. Voici quelques exemples :

Tableau 7: Linéarisation des modèles non linéaires

Forme originale	Forme linéarisée
$y = a + bx^n$	$y = a + bx^n$
$y = a x^b$	$\ln y = \ln a + b \ln x$
$y = a e^{bx^n}$	$\ln y = \ln a + bx^n$
$y = a b^{x^n}$	$\ln y = \ln a + \ln bx^n$
$y = \frac{x^n}{a + bx^m}$	$\frac{x^n}{y} = a + bx^m$
$y = x(a + bx)$	$y = ax + bx^2$
$y = a + \frac{b}{x^n}$	$y = a + b \frac{1}{x^n}$

etc...

IV.2.2 Résolution du système d'équations par la méthode de Gauss

Pour résoudre les systèmes d'équations de n équations à n inconnues, on peut passer par la méthode directe ou par la méthode itérative. Parmi les méthodes itératives, la méthode de Gauss est la plus appropriée dans notre cas. Cette méthode a un avantage sur le nombre d'opérations et au temps de calcul.

IV.2.2.1 Théorème de Gauss

La méthode de Gauss consiste à transformer le système linéaire $AX=B$ de n équations à n inconnues, en un système équivalent $A'X'=B'$ où A' devient une matrice triangulaire supérieure. La résolution de ce système est immédiate avec l'algorithme suivant :

$$x_i = \frac{1}{a_{ii}} \left[b_i - \sum_{j=i+1}^n a_{ij}x_j \right] \quad i = n, n-1, \dots, 1$$

La triangularisation est effectuée par des combinaisons linéaires des équations.

IV.2.2.2. Description de la méthode

Supposons que la matrice A est régulière (inversible) et les éléments de la première colonne ne sont pas tous nuls.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix}$$

Supposons que a_{11} est non nul (après avoir éventuellement permuté les deux premières équations), on élimine x_1 dans les équations 2,3,..., n en retranchant à la i -ème équation la première équation multipliée par $\frac{a_{i1}}{a_{11}}$. On obtient ainsi un nouveau système linéaire.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a'_{22} & \dots & a'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & a'_{n2} & \dots & a'_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b'_2 \\ \dots \\ b'_n \end{bmatrix}$$

Le déterminant de ce système est égal à celui de la matrice A .

On peut donc supposer que $a'_{22} \neq 0$, et on élimine x_2 dans les équations 3,4,..., n.

De même, on élimine x_i dans les équations $i+1, \dots, n$ et on obtient finalement une matrice triangulaire supérieure telle que

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a'_{22} & \dots & a'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha'_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b'_2 \\ \dots \\ \beta_n \end{bmatrix}$$

D'une autre manière :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i$$

Où $i = 1, n$

$$a_{ij} = 0 \text{ si } j < i$$

IV.2.2.3. Règle du pivot maximum

Notons que l'utilisation de la règle du pivot maximum améliore les résultats de la méthode de Gauss. En effet lors des combinaisons des équations on peut être amené à soustraire deux nombres très voisins. Ce qui, compte tenu du nombre limité de chiffres utilisés, entraîne une perte de précision pouvant conduire à des résultats complètement faux. Pour cela pour éliminer x_k on ne tire plus de la k-ème équation mais de la i-ème équation, avec i est l'indice qui correspond au plus grand des nombres $|a_{kk}|, |a_{(k+1)k}|, \dots, |a_{nk}|$

Si $i > k$, on permute les équations i et k avant de procéder à l'élimination.

IV.2.3 Validité du modèle

Le modèle obtenu est inexact mais il constitue une représentation satisfaisante de la réalité. Le modèle peut nous donner une idée voire une connaissance se rapprochant des phénomènes existants. Et c'est dans cet esprit que la modélisation est entreprise.

Pour apprécier la validité d'ensemble d'un modèle, il faut calculer communément le coefficient de corrélation multiple R. Par définition son carré est le rapport de la variance de Y expliquée par le modèle à la variance totale de Y.

Soient :

- Y : valeur mesurée
- Y* : valeur estimée

$$R^2 = \frac{Y^t * Y^*}{Y^t * Y}$$

Ce coefficient de corrélation indique la proportion de la réponse Y expliquée par le modèle. Par exemple si $R^2 = 0.95$, nous pouvons dire que 95% de la variation des Y_i est expliquée par notre modèle.

L'approximation des données par la méthode des moindres carrées s'accompagne d'un grand nombre de calcul. Ainsi, l'utilisation de l'outil informatique est un atout majeur pour la modélisation. Ce qui nous amène à passer à la partie suivante qui est la notion de programmation.

abstraction des mécanismes de bas niveau de la machine, de sorte que le code source représente une solution pouvant être écrite et comprise par un être humain.

V.2. PHASES DE CREATION D'UN PROGRAMME

La création d'un programme passe par quatre étapes bien distinctes :

- Conception ;
- Codage ;
- Transformation du code source ;
- Test du programme.

V.2.1. Conception

Cette phase consiste en la définition du but du programme. Ensuite on détermine les données qu'il va traiter nommées « données d'entrées », la méthode à employer (décrit à l'aide d'un algorithme), et le(s) résultat(s) « données de sortie ». C'est dans cette partie du travail que l'algorithme sera développé.

V.2.2. Codage

Une fois l'algorithme défini, l'étape suivante est de coder le programme. Le codage dépend de l'architecture sur laquelle va s'exécuter le programme, de compromis temps-mémoire, et d'autres contraintes. Ces contraintes vont déterminer quel langage de programmation doit-on utiliser pour convertir l'algorithme en code source.

V.2.3. Transformation du code source

Le code source n'est jamais utilisable tel quel. Il est généralement écrit dans un langage de « haut niveau », compréhensible pour l'homme, mais pas pour la machine.

Pour ce faire il y a d'une part ce qu'on appelle compilation qui est une opération qui consiste à vérifier la syntaxe du programme source (c'est-à-dire si l'écriture du programme source suit les règles du langage utilisé). S'il n'y a pas de message d'erreur après la compilation, on obtient le programme objet qui est exécutable par la machine. Sinon on corrige le ou les erreurs jusqu'à obtenir le fameux programme objet. L'interpréteur joue le même rôle que le compilateur sauf qu'il interprète ligne par ligne le programme source contrairement au compilateur qui compile la totalité du programme source.

V.2.4. Test du programme

C'est l'une des étapes les plus importants de la création d'un programme. En principe, tout programmeur se doit de vérifier chaque partie d'un programme et de les tester.

V.3. PRESENTATION DE MATLAB [21]

Matlab, acronyme de MATrix LABoratory, est un environnement informatique simple et pratique qui a été conçu par Mathworks afin de fournir un environnement de calcul matriciel simple, efficace, interactif et portable. Comme son nom l'indique, l'élément de base est une matrice dont la dimension n'a pas à être fixée. Matlab est un outil puissant qui permet la résolution de nombreux problèmes en beaucoup moins de temps qu'il en faudrait pour les formuler en C ou en Pascal. Son interface-utilisateur varie légèrement selon la version de Matlab mais en général elle est constituée d'une fenêtre de commande, une autre affichant l'historique de la session et une dernière affichant la structure des répertoires accessibles par Matlab.

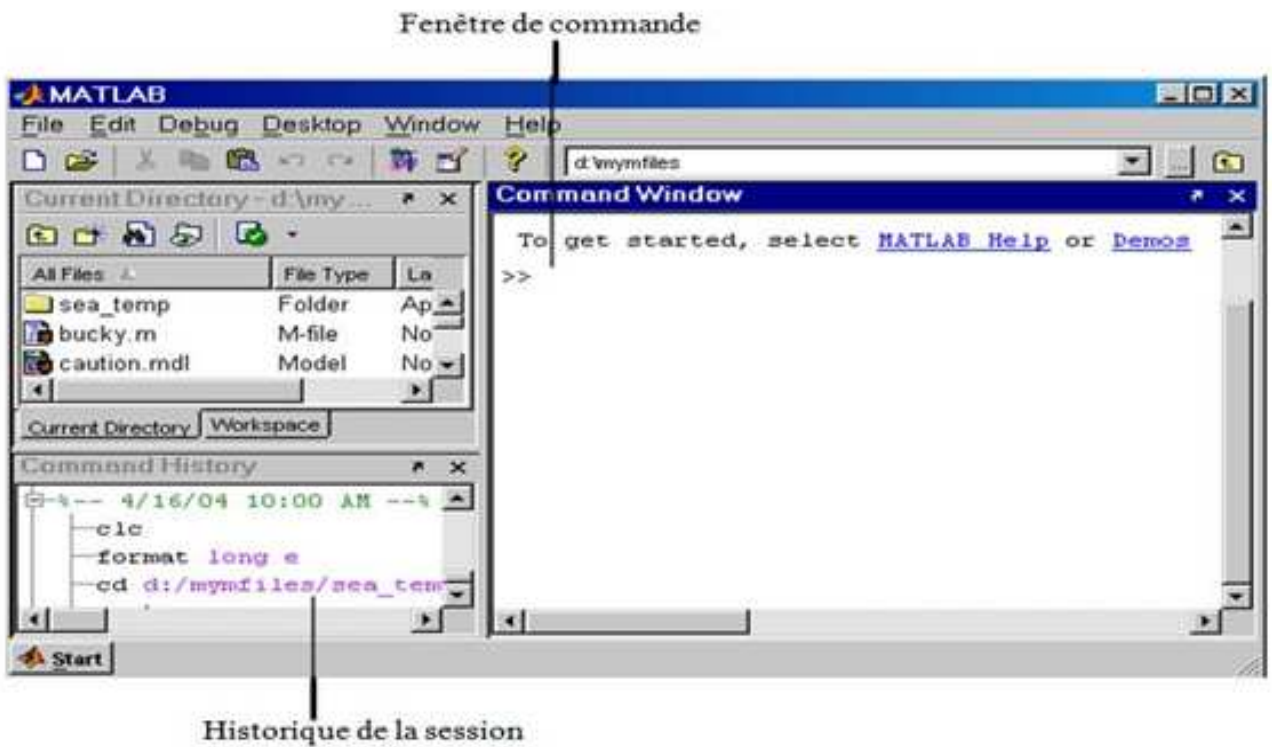


Figure 2: Interface utilisateur de Matlab

Matlab est utilisé dans l'algèbre linéaire et calcul matriciel, résolution des équations non linéaires, équations linéaires, équations différentielles, optimisation mathématique, analyse statistique, traitement de signal, simulation et acquisition de données...

Matlab est constitué d'un noyau relativement réduit, capable d'interpréter puis évaluer les expressions numériques matricielles qui lui sont adressées :

- soit directement au clavier depuis une fenêtre de commande ;
- soit sous forme de séquences d'expressions ou scripts enregistrées dans des fichiers-texte appelés m-files et exécutées depuis la fenêtre de commande. En effet les scripts sont des fichiers où sont stockés des séquences d'instructions pour ne pas avoir à taper plusieurs fois les même séquences d'instructions ;
- soit plus rarement sous forme de fichiers binaires générés à partir d'un compilateur C ou fortran.

Beaucoup de fonctions sont préalablement intégrées dans Matlab. Elles sont regroupées dans en paquetage ou toolboxes (boite à outils). Pour les fonctions spécifiques qui ne sont pas fournies par Matlab, elles peuvent être élaborées et enregistrées dans un fichier séparé et peuvent être appelées de la même façon que les fonctions existantes.

Le principal avantage de l'utilisation de cet environnement informatique réside sur le fait qu'il est un langage interprété. Il n'est pas nécessaire de compiler un programme avant de l'exécuter et toute commande tapée dans la fenêtre de commande est immédiatement exécutée. La réponse est tout de suite affichée et stockée dans la variable « ans ». Il n'est pas aussi nécessaire lors de la manipulation de déclarer les variables. C'est pour cette facilité de manipulation que s'est basé notre choix de faire appel à Matlab pour les calculs relatifs à notre modélisation.

V.4. UTILISATION DE LA PROGRAMMATION

Ce paragraphe a pour objet de décrire le fonctionnement du logiciel permettant de faire une approximation des données numériques par des fonctions analytiques. Nous l'avons de ce fait appelé « ADN2MC 1.0 » l'acronyme de « approximation de données numériques : méthode des moindres carrés, première version ».

Le logiciel ADN2MC 1.0 permet de modéliser des données numériques. En effet il calcule les coefficients de régression à partir des valeurs mesurées (valeurs expérimentales) comme données d'entrée.

Il permet également de calculer de manière automatique la variable dépendante à partir de la fonction modèle tout en entrant la valeur des variables explicatives.

Enfin il offre à son utilisateur un moyen d'apprécier la validité de l'approximation faite par les courbes montrant les écarts des valeurs mesurées-valeurs estimées.

V.4.1. Manipulation du logiciel

V.4.2.1. Installation

La première chose à faire pour utiliser un logiciel est certainement l'installer. Le présent logiciel fonctionne en copiant tout simplement dans la machine le programme. Toutefois, il est impératif d'installer au préalable une version avancée du langage de programmation.

V.4.2.2. Lancement du logiciel



Pour lancer le logiciel, il suffit de double-cliquer sur l'icône (cf la figure ci-dessus) et la fenêtre principale s'ouvre.

Sur cette première interface se trouve quatre menus principaux, à savoir :

- ✓ INFORMATION
- ✓ DONNEES
- ✓ MODELISER
- ✓ ESTIMER

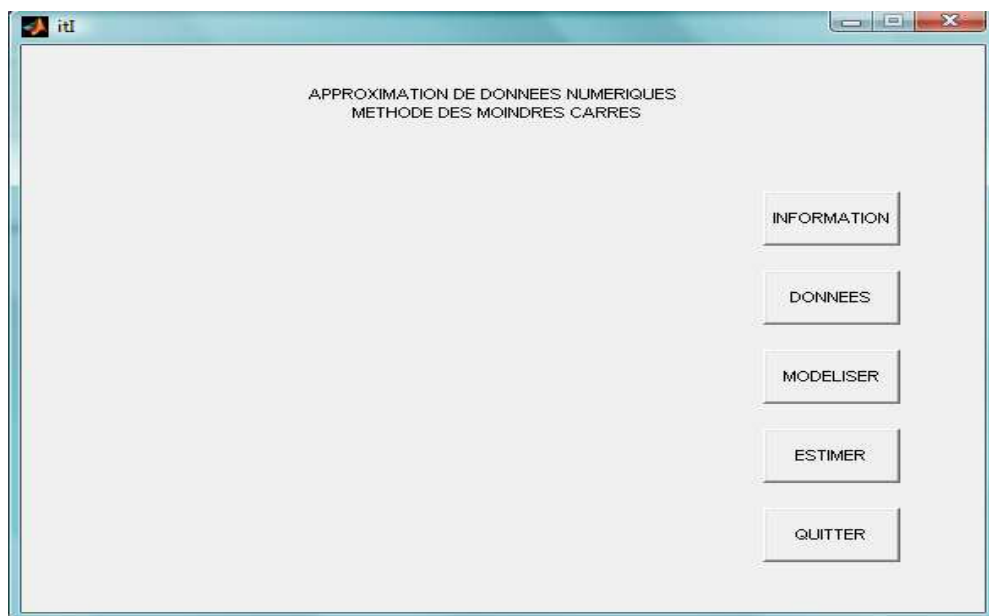


Figure 3: Interface principal

V.4.2.2.1. Menu : Information

Dans cette rubrique se trouvent les informations concernant le logiciel. On y trouve également des directives sur l'utilisation du logiciel.

V.4.2.2.2. Menu : Données

Une des tâches effectuées par le logiciel est la modélisation. Elle consiste à trouver des fonctions analytiques pouvant représenter une « réalité ». Une « réalité » qui n'est régie par aucune règle connue mais connue seulement par quelques valeurs expérimentales. De ce fait, la modélisation part de ces valeurs expérimentales ou mesurées pour aboutir à une fonction analytique régissant la variation de la variable dépendante en fonction des variables explicatives.

Pour modéliser c'est-à-dire pour déterminer la fonction modèle, les coefficients de régression et tracer les courbes représentatives des valeurs estimées et les valeurs mesurées, on passe par le menu DONNEES. Ensuite on entre les valeurs mesurées et/ou expérimentales et on choisit dans la menu déroulant « fonction modèle » une fonction susceptible de donner de bonne approximation. Ceci étant, on clique sur ENREGISTRER.

La fonction du bouton ENREGISTRER est avant tout, comme son nom l'indique enregistre les données dans le répertoire de travail. Mais le fait de cliquer sur ce bouton enclenche déjà le calcul afférant à la modélisation.

Ainsi, c'est au tour du menu MODELISER de nous montrer les résultats de cette modélisation. C'est dans l'interface qui s'ouvre en cliquant le menu MODELISER qui nous montre les résultats de la modélisation, en l'occurrence:

- les paramètres de régression ;
- le coefficient de corrélation ;
- la fonction modèle ;
- courbe avec valeurs mesurées et estimées.

V.4.2.2.3. Menu : Estimer

Pour entrer les valeurs des variables explicatives dont le but est de déterminer la valeur de la variable dépendante, on passe par le menu ESTIMER . Dans cette interface, des places sont aménagées pour l'entrée de ces valeurs.

Pour effectuer l'estimation on procède comme suit :

- Appeler la fonction modèle voulue ;
- Entrer les variables explicatives ;

- Cliquer sur ESTIMER et les résultats s'affichent sur la partie droite.

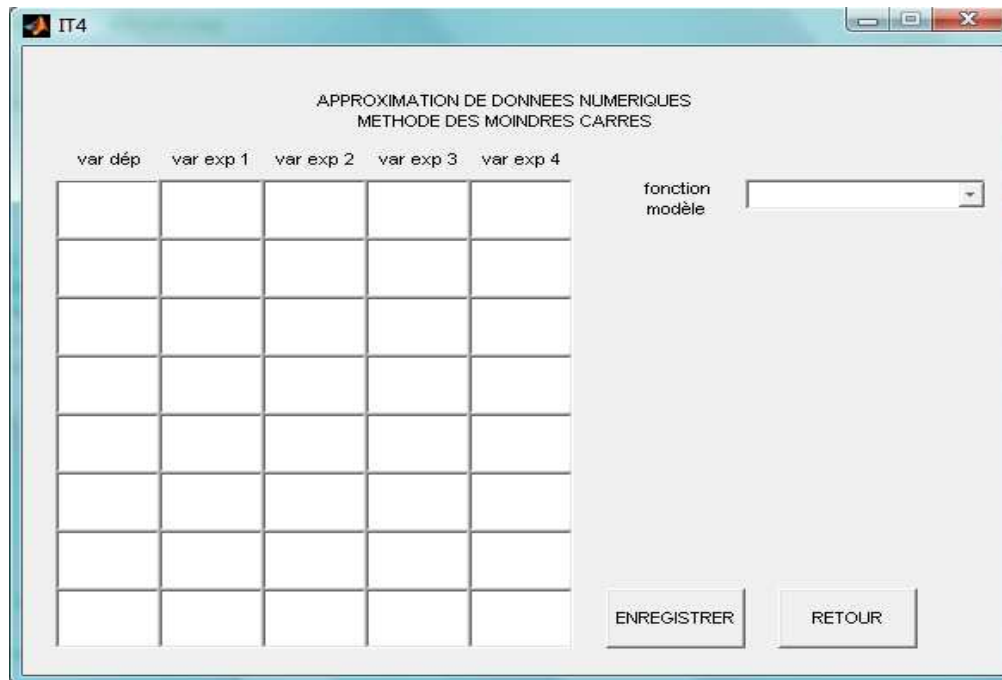


Figure 4: Interface entrée de données

V.4.2.3. Avantages de son utilisation

La programmation est un outil développé pour faciliter et pour permettre de calculer dans un bref délai les traitements des données. Elle diminue les tâches et les opérations qui se répètent plusieurs fois et souvent ennuyeux dans les activités. Dans ce souci que l'idée de développer le logiciel est née.

Dans leurs travaux, les chercheurs sont souvent amenés à faire des approximations des données numériques par des fonctions analytiques dans le but de prévoir et prédire le comportement et les phénomènes qui suivront la recherche. Ces résultats ne sont parfois connus qu'à partir de données expérimentales. Le logiciel ainsi créé va lui éviter ces tâches répétitives. La méthode des moindres carrés est la méthode utilisée pour cette application.

Un exemple de l'application de ce logiciel est l'étude des ciments écologiques polyadditionnés des minérales traités dans cet ouvrage. Des règles et théorème mettant en relation la nature et le taux des ajouts dans les ciments mélangés avec la résistance mécanique n'existent pas. Seules les expériences effectuées nous indiquent des résultats. Ainsi le logiciel va jouer un rôle important dans l'étude. En effet, il permettra de trouver une bonne approximation à partir de laquelle peut être estimée la propriété mécanique du ciment mélangé en fonction de ses composants. On peut par la suite produire selon les propriétés mécaniques voulues ces types de liant.

Ceci n'est qu'une des applications possibles du logiciel mais le domaine d'utilisation est large. Son utilisation ne se limite en aucun domaine, il peut être utilisé dans la sociologie, démographie, surtout dans l'ingénierie etc.

Un autre intérêt de l'utilisation de ce logiciel est la conservation des données. Lors de la manipulation, les données d'entrée sont enregistrées dans le répertoire de travail. Ce qui va permettre à l'utilisateur d'accéder à ces données et résultats à tout moment sans se soucier de sauvegarder.

CHAPITRE.VI PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

Des recherches concernant les ciments écologiques avec polyadditions minérales ont été déjà effectuées. Le but des recherches est de réduire l'émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère lors de la fabrication du ciment. C'est durant la cuisson du principal constituant du ciment qu'est le clinker, que cette émission de gaz nocifs à l'environnement est la plus importante. Une des solutions envisageables est la diminution de la quantité du clinker dans le ciment pour aboutir à de nouveau type de liant utilisable dans les grands ouvrages. Pour cela les essais consistent en la substitution d'une partie du ciment CPA par d'autres matières, en l'occurrence trois minéraux considérés avoir certaines propriétés pouzzolaniques : cendre de balle de riz, pouzzolane naturelle et la laterite calcinée ; et une simple filler : le cipolin. La teneur en ajouts cimentaires varient de 0 à 80 %. Ces ciments mélangés font ensuite l'objet des essais mécaniques pour être comparés avec le ciment CPA pur.

VI.1. CIMENTS MELANGES AVEC UN AJOUT

Une approximation de ces données par des fonctions analytiques par la méthode des moindres carrés utilisant l'outil de calcul développé précédemment nous conduit aux résultats suivants:

La fonction analytique servant de modèle est fonction de la teneur en ciment et des minéraux. Pour les ciments avec un ajout, elle est à 2 variables qui sont la teneur en ciment et la teneur en ajout. Le modèle utilisé qui donne la meilleure approximation est:

$$R = a_1 x_1^2 x_2^2 + a_2 x_1^2 x_2 + a_3 x_1 x_2^2 + a_4 x_1^2 + a_5 x_2^2 + a_6 x_1 x_2 + a_7 x_1 + a_8 x_2 + a_9$$

R désigne la résistance à la compression

x_1 désigne la teneur en ciment en pourcentage

x_2 désigne la teneur en ajout, ici c'est le cipolin

VI.2. CIMENT MELANGES AVEC DU CIPOLIN

Les résultats obtenus lors de la substitution d'une partie du ciment CPA par le cipolin sont donnés dans le tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8: Résistance à la compression CPA-C

Echantillons	Composition (%)		Rc (MPa)		
	CPA	C	7 jours	14 jours	28 jours
CPA	100	0	11,9	14,4	23
C05	95	5	16,69	18,5	21,89
C10	90	10	15,24	18,1	21,01
C15	85	15	13,9	16,73	20,24
C20	80	20	18,51	21,3	25,98
C25	75	25	8,6	10,96	15,86
C30	70	30	8,64	10,27	17,52

Source : ANDRIARINONY Faniry Rosas « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES » Mémoire d'ingénieur en Science et Ingénierie des Matériaux 2008 à l'ESPA.

Après avoir calculer les coefficients de regressions, nous avons pu avoir les modèles suivants :

$$7\text{jours} : R = 1,05 \cdot 10^{-05} x_1^2 x_2^2 + 3,43 \cdot 10^{-05} x_1^2 x_2 + 1,79 \cdot 10^{-03} x_1 x_2^2 + 6,15 \cdot 10^{-03} x_1^2 + 5,27 \cdot 10^{-02} x_2^2 + 8,21 \cdot 10^{-03} x_1 x_2 + -1,81 \cdot 10^{-01} x_1 + 6,02 \cdot 10^{-01} x_2 + -3,10 \cdot 10^{+01}$$

$$14\text{jours} : R = 4,59 \cdot 10^{-05} x_1^2 x_2^2 + 2,29 \cdot 10^{-04} x_1^2 x_2 + -6,24 \cdot 10^{-03} x_1 x_2^2 + 1,19 \cdot 10^{-02} x_1^2 + 2,53 \cdot 10^{-01} x_2^2 + 3,47 \cdot 10^{-02} x_1 x_2 + -5,98 \cdot 10^{-01} x_1 + -3,53 \cdot 10^{+00} x_2 + -4,43 \cdot 10^{+01}$$

$$28\text{jours} : R = 1,56 \cdot 10^{-04} x_1^2 x_2^2 + 8,54 \cdot 10^{-04} x_1^2 x_2 + -2,00 \cdot 10^{-02} x_1 x_2^2 + 3,69 \cdot 10^{-02} x_1^2 + 8,03 \cdot 10^{-01} x_2^2 + 2,01 \cdot 10^{-02} x_1 x_2 + -1,82 \cdot 10^{+00} x_1 + -6,35 \cdot 10^{+00} x_2 + -1,64 \cdot 10^{+02}$$

Et les coefficients de régression sont les suivants :

Tableau 9: Coefficient de régression CPA-C

	7 jours	14 jours	28 jours
a1	$1,05.10^{-05}$	$4,59.10^{-05}$	$1,56.10^{-04}$
a2	$3,43.10^{-05}$	$2,29.10^{-04}$	$8,54.10^{-04}$
a3	$-1,79.10^{-03}$	$-6,24.10^{-03}$	$-2,00.10^{-02}$
a4	$6,15.10^{-03}$	$1,19.10^{-02}$	$3,69.10^{-02}$
a5	$5,27.10^{-02}$	$2,53.10^{-01}$	$8,03.10^{-01}$
a6	$8,21.10^{-03}$	$3,47.10^{-02}$	$2,01.10^{-02}$
a7	$-1,81.10^{-01}$	$-5,98.10^{-01}$	$-1,82.10^{+00}$
a8	$6,02.10^{-01}$	$-3,53.10^{+00}$	$-6,35.10^{+00}$
a9	$-3,10.10^{+01}$	$-4,43.10^{+01}$	$-1,64.10^{+02}$

Avec ces équations, nous avons calculé les coefficients de corrélation multiple pour pouvoir apprécier la qualité des modèles. Les valeurs des coefficients de corrélation R^2 sont :

- ❖ 0.9882 (7 jours)
- ❖ 0.9822 (14 jours)
- ❖ 0.9882 (28 jours)

Vu ces valeurs, nous pouvons en conclure que nous avons de bon modèle, plus de 98% des résistances sont expliquées par nos modèles quel que soit l'âge des éprouvettes. La courbe représentant en même temps les valeurs expérimentales et les valeurs obtenues à partir des modèles nous aidera encore plus à voir la compatibilité des modèles avec les faits réels.

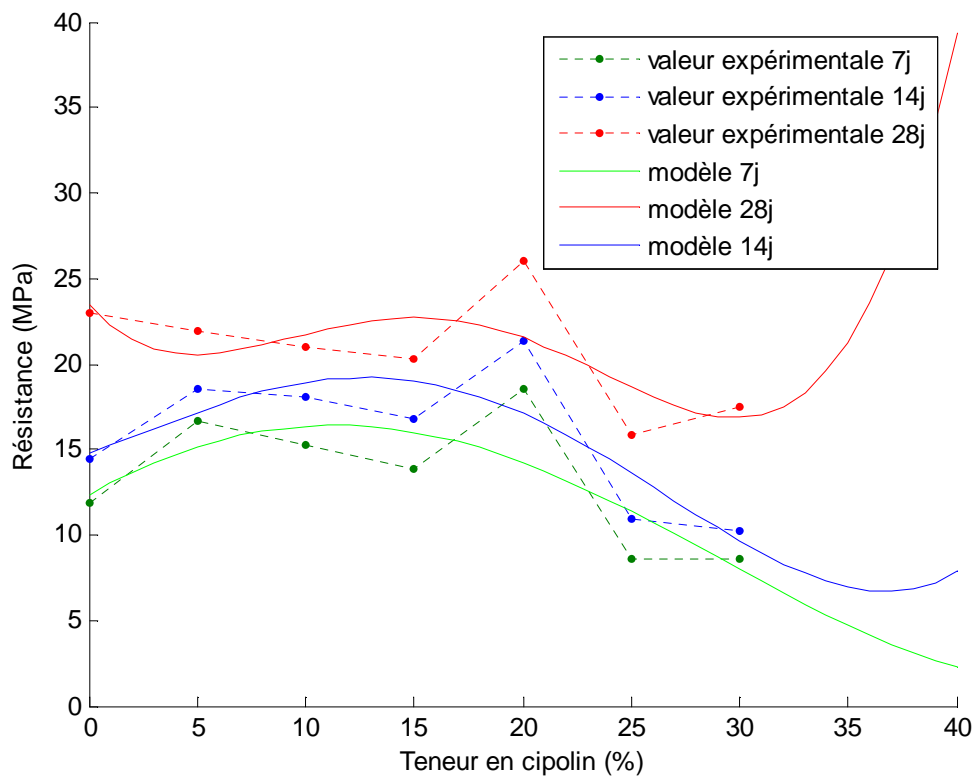


Figure 5: Résistance à la compression en fonction de la teneur en cipolin

Tableau 10: Ecart pour les ciments CPA-C: Valeurs Expérimentales - Modèles

C(%)	Rc (MPa) C								
	7 jours			14 jours			28 jours		
	exp	modèle	Ecart	exp	modèle	écart	exp	modèle	écart
0	11,9	12,34	-0,44	14,4	14,79	-0,39	23	23,39	-0,39
5	16,69	15,16	1,53	18,5	17,18	1,32	21,89	20,56	1,33
10	15,24	16,37	-1,13	18,1	18,91	-0,81	21,01	21,75	-0,74
15	13,9	16	-2,1	16,73	18,99	-2,26	20,24	22,71	-2,47
20	18,51	14,23	4,28	21,3	17,1	4,2	25,98	21,54	4,44
25	8,6	11,39	-2,79	10,96	13,64	-2,68	15,86	18,67	-2,81
30	8,64	7,99	0,65	10,27	9,66	0,61	17,52	16,88	0,64

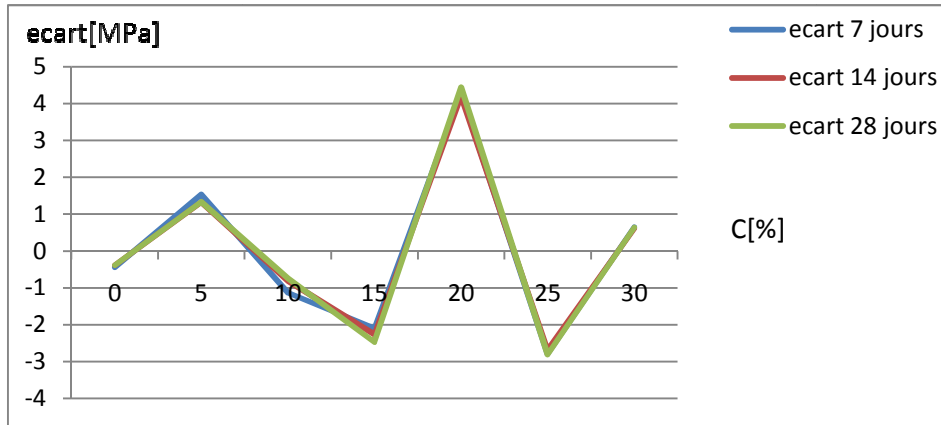


Figure 6: Ecart en fonction de taux de substitution du ciment par le cipolin

VI.3. CIMENT MELANGE AVEC DE LA POUZZOLANE

Tableau 11: Résistance à la compression CPA-P

Echantillons	Composition (%)		Rc (MPa)		
	CPA	P	7 jours	14 jours	28 jours
CPA	100	0	11,9	14,4	23
P10	90	10	10,73	13,29	17,78
P20	80	20	12,06	15,37	25,7
P30	70	30	9,94	11,1	14,09
P40	60	40	6,41	9,72	12,99
P60	40	60	2,19	4,68	6,41
P80	20	80	1,74	2,4	3,34

Source : ANDRIARINONY Faniry Rosas « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES » Mémoire d'ingénieur en Science et Ingénierie des Matériaux 2008

Notons comme précédent :

R désigne la résistance à la compression

x_1 désigne la teneur en ciment en pourcentage

x_2 désigne la teneur en ajout, ici c'est la pouzzolane

$$R = a_1 x_1^2 x_2^2 + a_2 x_1^2 x_2 + a_3 x_1 x_2^2 + a_4 x_1^2 + a_5 x_2^2 + a_6 x_1 x_2 + a_7 x_1 + a_8 x_2 + a_9$$

Tableau 12: Coefficient de régression CPA-P

7 jours	14 jours	28 jours
---------	----------	----------

a1	$1,19.10^{-06}$	$4,39.10^{-07}$	$2,31.10^{-07}$
a2	$1,19.10^{-06}$	$2,46.10^{-04}$	$3,78.10^{-04}$
a3	$7,06.10^{-05}$	$1,60.10^{-04}$	$2,71.10^{-04}$
a4	$-2,38.10^{-04}$	$8,40.10^{-03}$	$1,09.10^{-02}$
a5	$7,74.10^{-04}$	$-1,18.10^{-03}$	$1,89.10^{-03}$
a6	$-2,05.10^{-02}$	$-1,60.10^{-02}$	$-2,32.10^{-02}$
a7	$2,55.10^{-01}$	$-7,78.10^{-01}$	$-9,60.10^{-01}$
a8	$2,17.10^{-01}$	$1,29.10^{-01}$	$-1,60.10^{-01}$
a9	$2,17.10^{-01}$	$7,93.10^{+00}$	$8,72.10^{+00}$

7jours :
$$R = 1,19.10^{-06}x_1^2x_2^2 + 1,19.10^{-06}x_1^2x_2 + 7,06.10^{-05}x_1x_2^2 + -2,38.10^{-04}x_1^2 + 7,74.10^{-04}x_2^2 + -2,05.10^{-02}x_1x_2 + 2,55.10^{-01}x_1 + 2,17.10^{-01}x_2 + 2,17.10^{-01}$$

14jours :
$$R = 4,39.10^{-07}x_1^2x_2^2 + 2,46.10^{-04}x_1^2x_2 + 1,60.10^{-04}x_1x_2^2 + 8,40.10^{-03}x_1^2 + -1,18.10^{-03}x_2^2 + -1,60.10^{-02}x_1x_2 + -7,78.10^{-01}x_1 + 1,29.10^{-01}x_2 + 7,93.10^{+00}$$

28jours :
$$R = 2,31.10^{-07}x_1^2x_2^2 + 3,78.10^{-04}x_1^2x_2 + 2,71.10^{-04}x_1x_2^2 + 1,09.10^{-02}x_1^2 + 1,89.10^{-03}x_2^2 + -2,32.10^{-02}x_1x_2 + -9,60.10^{-01}x_1 + -1,60.10^{-01}x_2 + 8,72.10^{+00}$$

Les valeurs des coefficients de corrélation R2 sont :

- ❖ 0.9948 (7 jours)
- ❖ 0.9940 (14 jours)
- ❖ 0.9697 (28 jour)

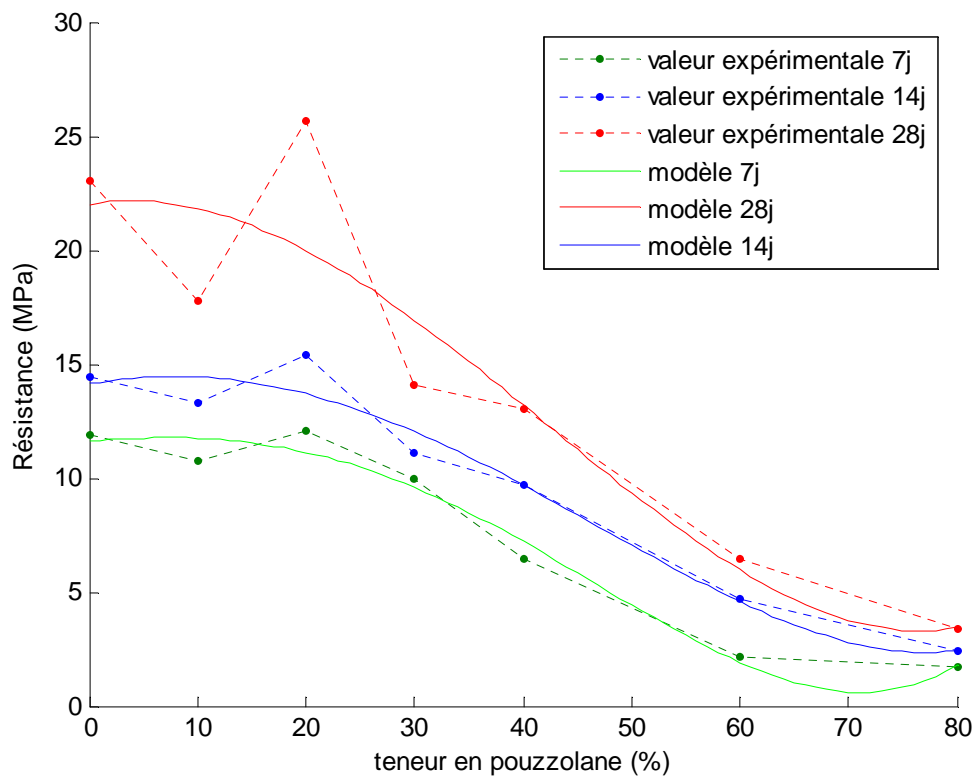


Figure 7: Résistance à la compression en fonction de la teneur en pouzzolane

Tableau 13: Ecart pour les ciments CPA-P: Valeurs Expérimentales - Modèles

P(%)	Rc (MPa) P								
	7 jours			14 jours			28 jours		
	exp	modèle	écart	exp	modèle	écart	exp	modèle	écart
0	11,9	11,61	0,29	14,4	14,12	0,28	23	22,01	0,99
10	10,73	11,74	-1,01	13,29	14,43	-1,14	17,78	21,81	-4,03
20	12,06	11,12	0,94	15,37	13,69	1,68	25,7	19,96	5,74
30	9,94	9,58	0,36	11,1	12,02	-0,92	14,09	16,93	-2,84
40	6,41	7,22	-0,81	9,72	9,7	0,02	12,99	13,2	-0,21
60	2,19	1,92	0,27	4,68	4,57	0,11	6,41	5,97	0,44
80	1,74	1,78	-0,04	2,4	2,42	-0,02	3,34	3,43	-0,09

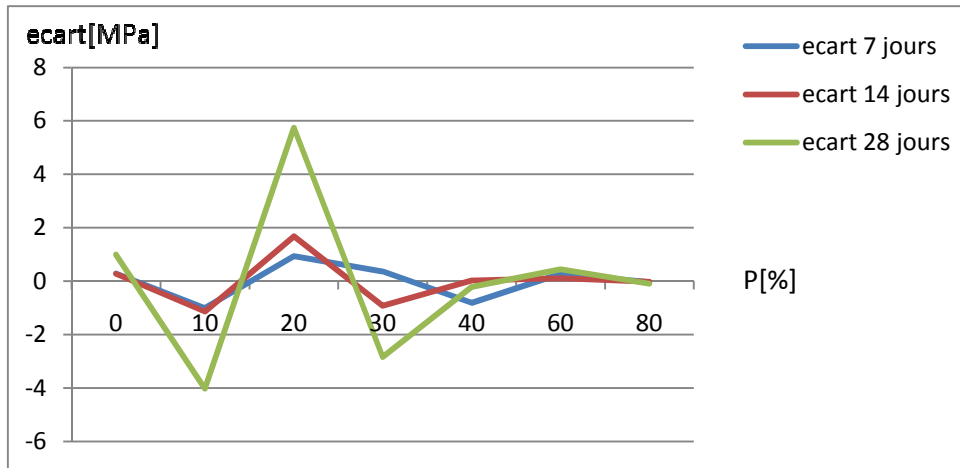


Figure 8: Ecart en fonction de taux de substitution du ciment par la pouzzolane

VI.4. CIMENT MELANGE AVEC LATERITE

Tableau 14: Résistance à la compression CPA-L

Echantillons	Composition (%)		Rc (MPa)		
	CPA	L	7 jours	14 jours	28 jours
CPA	100	0	11,9	14,4	23
L10	90	10	13,8	17,4	21,36
L20	80	20	17,5	19,2	25,5
L30	70	30	16,2	17,9	24
L40	60	40	11,25	15,32	18,65
L60	40	60	6,4	7,5	17,5
L80	20	80	1,6	2	8

Source : ANDRIARINONY Faniry Rosas « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES » Mémoire d'ingénieur en Science et Ingénierie des Matériaux 2008

Notons comme précédent :

R désigne la résistance à la compression

x_1 désigne la teneur en ciment en pourcentage

x_2 désigne la teneur en ajout, ici c'est latérite

$$R = a_1 x_1^2 x_2^2 + a_2 x_1^2 x_2 + a_3 x_1 x_2^2 + a_4 x_1^2 + a_5 x_2^2 + a_6 x_1 x_2 + a_7 x_1 + a_8 x_2 + a_9$$

Tableau 15: Coefficient de régression CPA-L

	7 jours	14 jours	28 jours
a1	$1,02.10^{-07}$	$9,13.10^{-07}$	$-1,28.10^{-06}$
a2	$2,76.10^{-04}$	$1,07.10^{-04}$	$9,83.10^{-05}$
a3	$1,57.10^{-04}$	$-3,85.10^{-05}$	$1,55.10^{-04}$
a4	$1,57.10^{-04}$	$1,35.10^{-03}$	$-2,15.10^{-04}$
a5	$-2,01.10^{-03}$	$-3,67.10^{-03}$	$-1,74.10^{-03}$
a6	$-1,99.10^{-02}$	$-8,17.10^{-03}$	$-5,72.10^{-03}$
a7	$-2,70.10^{-01}$	$-6,78.10^{-02}$	$2,57.10^{-01}$
a8	$2,53.10^{-01}$	$3,86.10^{-01}$	$6,23.10^{-02}$
a9	$8,53.10^{-01}$	$7,64.10^{+00}$	$-1,27.10^{+00}$

L'évolution de la résistance à la compression en fonction des teneurs en ciment et latérites calcinées peut être donc modélisée de la manière suivante :

$$7\text{jours : } R = 1,02.10^{-07} x_1^2 x_2^2 + 2,76.10^{-04} x_1^2 x_2 + 1,57.10^{-04} x_1 x_2^2 + 1,57.10^{-04} x_1^2 + - 2,01.10^{-03} x_2^2 + -1,99.10^{-02} x_1 x_2 + -2,70.10^{-01} x_1 + 2,53.10^{-01} x_2 + 8,53.10^{-01}$$

$$14\text{jours : } R = 9,13.10^{-07} x_1^2 x_2^2 + 1,07.10^{-04} x_1^2 x_2 + -3,85.10^{-05} x_1 x_2^2 + 1,35.10^{-03} x_1^2 + - 3,67.10^{-03} x_2^2 + -8,17.10^{-03} x_1 x_2 + -6,78.10^{-02} x_1 + 3,86.10^{-01} x_2 + 7,64.10^{+00}$$

$$28\text{jours : } R = -1,28.10^{-06} x_1^2 x_2^2 + 9,83.10^{-05} x_1^2 x_2 + 1,55.10^{-04} x_1 x_2^2 + -2,15.10^{-04} x_1^2 + - 1,74.10^{-03} x_2^2 + -5,72.10^{-03} x_1 x_2 + 2,57.10^{-01} x_1 + 6,23.10^{-02} x_2 + -1,27.10^{+00}$$

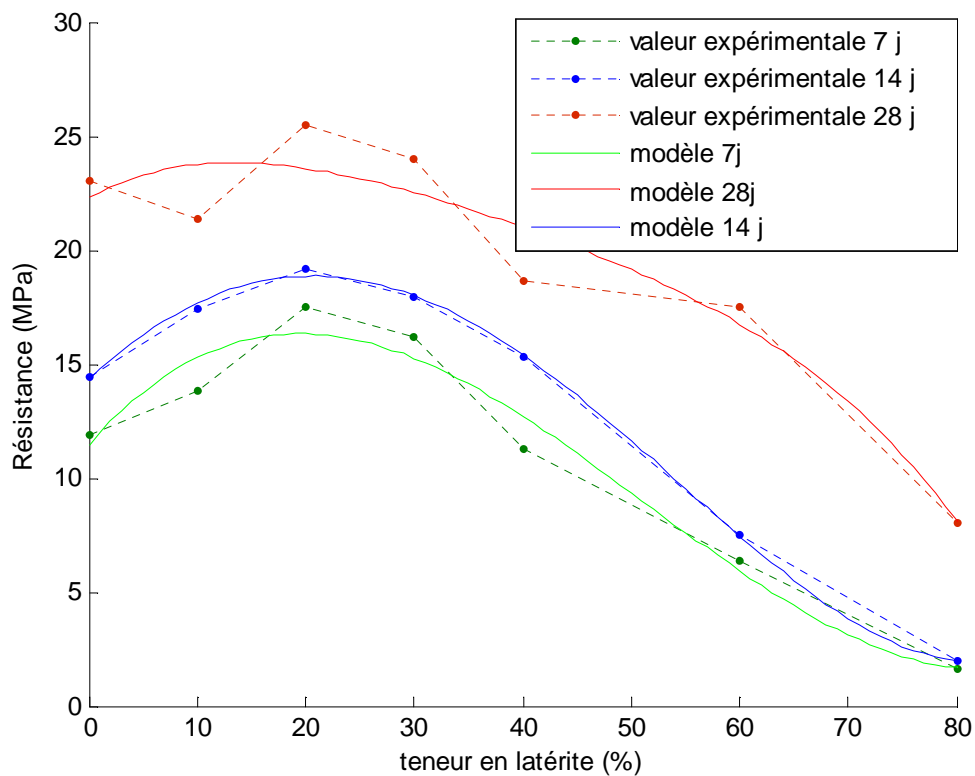


Figure 9: Résistance à la compression en fonction de la teneur en latérite

Les valeurs des coefficients de corrélation R^2 sont :

- ❖ 0.9935 (7 jours)
- ❖ 0.9998 (14 jours)
- ❖ 0.9938 (28 jours)

Tableau 16: Ecart pour les ciments CPA-L: Valeurs Expérimentales - Modèles

L(%)	Rc (MPa) L								
	7 jours			14 jours			28 jours		
	exp	modèle	écart	exp	modèle	écart	exp	modèle	écart
0	11,9	11,46	0,44	14,4	14,33	0,07	23	22,29	0,71
10	13,8	15,27	-1,47	17,4	17,67	-0,27	21,36	23,75	-2,39
20	17,5	16,33	1,17	19,2	18,86	0,34	25,5	23,58	1,92
30	16,2	15,26	0,94	17,9	17,99	-0,09	24	22,52	1,48
40	11,25	12,72	-1,47	15,32	15,4	-0,08	18,65	21	-2,35
60	6,4	5,93	0,47	7,5	7,45	0,05	17,5	16,75	0,75
80	1,6	1,68	-0,08	2	2,01	-0,01	8	8,13	-0,13

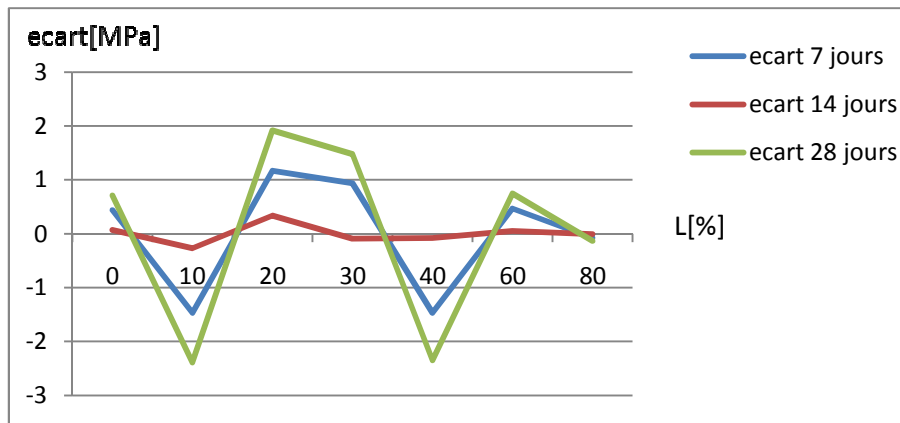


Figure 10: Ecart en fonction de taux de substitution du ciment par la latérite

VI.5. CIMENT AVEC DU CENDRE DE BALLE DE RIZ

Tableau 17: Résistance à la compression CPA-R [1]

Echantillons	Composition (%)		Rc (MPa)		
	CPA	R	7 jours	14 jours	28 jours
CPA	100	0	11,9	14,4	23
R10	90	10	11,71	13,62	17,36
R20	80	20	7,51	10,23	14,15
R30	70	30	4,11	6,07	8,95
R40	60	40	2,12	4,51	6,96
R60	40	60	1,51	3,1	4,95
R80	20	80	1,1	1,28	1,38

Source : ANDRIARINONY Faniry Rosas « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES »

Notons comme précédemment :

R désigne la résistance à la compression

x_1 désigne la teneur en ciment en pourcentage

x_2 désigne la teneur en ajout, ici c'est la cendre de balle de riz

$$R = a_1 x_1^2 x_2^2 + a_2 x_1^2 x_2 + a_3 x_1 x_2^2 + a_4 x_1^2 + a_5 x_2^2 + a_6 x_1 x_2 + a_7 x_1 + a_8 x_2 + a_9$$

Tableau 18: Coefficient de régression CPA-R

	7 jours	14 jours	28 jours
a1	$-3,74.10^{-06}$	$-3,46.10^{-06}$	$-1,76.10^{-06}$
a2	$3,45.10^{-05}$	$2,69.10^{-04}$	$-8,73.10^{-05}$
a3	$1,67.10^{-04}$	$4,00.10^{-04}$	$3,25.10^{-05}$
a4	$2,98.10^{-03}$	$1,71.10^{-03}$	$-4,13.10^{-03}$
a5	$-4,84.10^{-03}$	$-7,58.10^{-03}$	$-2,15.10^{-03}$
a6	$-4,61.10^{-04}$	$-2,80.10^{-02}$	$1,72.10^{-03}$
a7	$-3,28.10^{-01}$	$-1,24.10^{-01}$	$7,38.10^{-01}$
a8	$1,27.10^{-01}$	$4,46.10^{-01}$	$1,51.10^{-01}$
a9	$1,50.10^{+01}$	$9,81.10^{+00}$	$-9,63.10^{+00}$

$$7\text{jours : } R = -3,74.10^{-06} x_1^2 x_2^2 + 3,45.10^{-05} x_1^2 x_2 + 1,67.10^{-04} x_1 x_2^2 + 2,98.10^{-03} x_1^2 + -4,84.10^{-03} x_2^2 + -4,61.10^{-04} x_1 x_2 + -3,28.10^{-01} x_1 + 1,27.10^{-01} x_2 + 1,50.10^{+01}$$

$$14\text{jours : } R = -3,46.10^{-06} x_1^2 x_2^2 + 2,69.10^{-04} x_1^2 x_2 + 4,00.10^{-04} x_1 x_2^2 + 1,71.10^{-03} x_1^2 + -7,58.10^{-03} x_2^2 + -2,80.10^{-02} x_1 x_2 + -1,24.10^{-01} x_1 + 4,46.10^{-01} x_2 + 9,81.10^{+00}$$

$$28\text{jours : } R = -1,76.10^{-06} x_1^2 x_2^2 + -8,73.10^{-05} x_1^2 x_2 + 3,25.10^{-05} x_1 x_2^2 + -4,13.10^{-03} x_1^2 + -2,15.10^{-03} x_2^2 + 1,72.10^{-03} x_1 x_2 + 7,38.10^{-01} x_1 + 1,51.10^{-01} x_2 + -9,63.10^{+00}$$

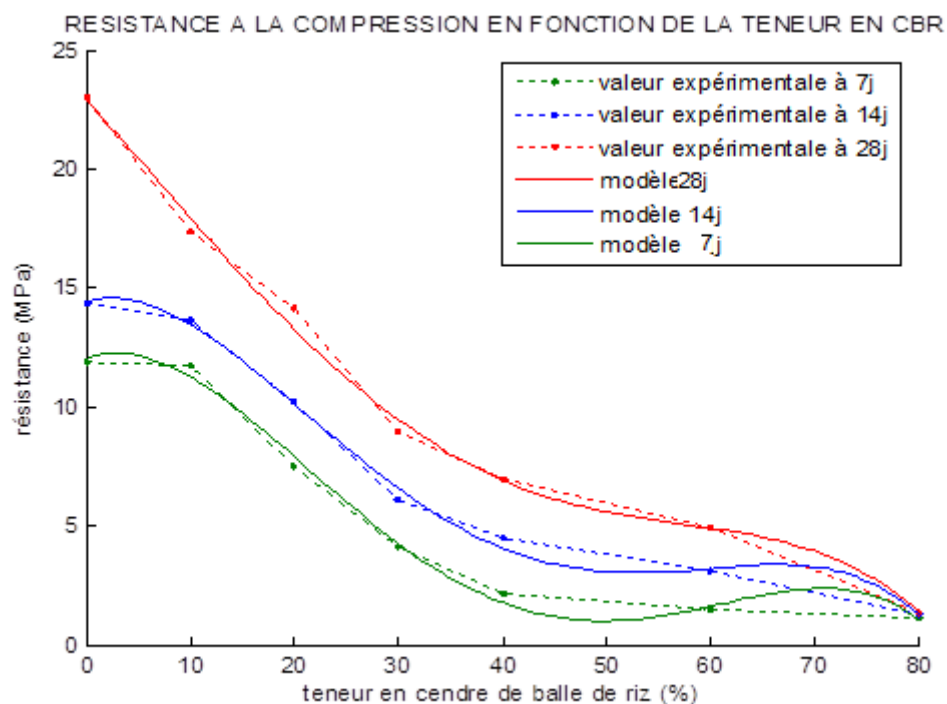


Figure 11: Résistance à la compression en fonction de la teneur en cendre de bal de riz

Les valeurs des coefficients de corrélation R^2 sont :

- ❖ 0.9985 (7 jours)
- ❖ 0.9992 (14 jours)
- ❖ 0.9988 (28 jours)

Les valeurs des coefficients de corrélations sont de bons signes pour les ciments CPA-R. la modélisation, d’après ces valeurs, se rapproche de la modélisation parfaite car plus de 99% des résistances sont expliquées par le modèle.

Tableau 19: Ecart pour les ciments CPA-R : Valeurs Expérimentales - Modèles

R(%)	Rc (MPa) R								
	7 jours			14 jours			28 jours		
	exp	modèle	écart	exp	modèle	écart	exp	modèle	écart
0	11,9	12,02	-0,12	14,4	14,46	-0,06	23	22,85	0,15
10	11,71	11,28	0,43	13,62	13,48	0,14	17,36	17,97	-0,61
20	7,51	7,91	-0,4	10,23	10,15	0,08	14,15	13,25	0,9
30	4,11	4,26	-0,15	6,07	6,58	-0,51	8,95	9,46	-0,51
40	2,12	1,78	0,34	4,51	4,07	0,44	6,96	6,93	0,03
60	1,51	1,63	-0,12	3,1	3,21	-0,11	4,95	4,9	0,05
80	1,1	1,08	0,02	1,28	1,26	0,02	1,38	1,39	-0,01

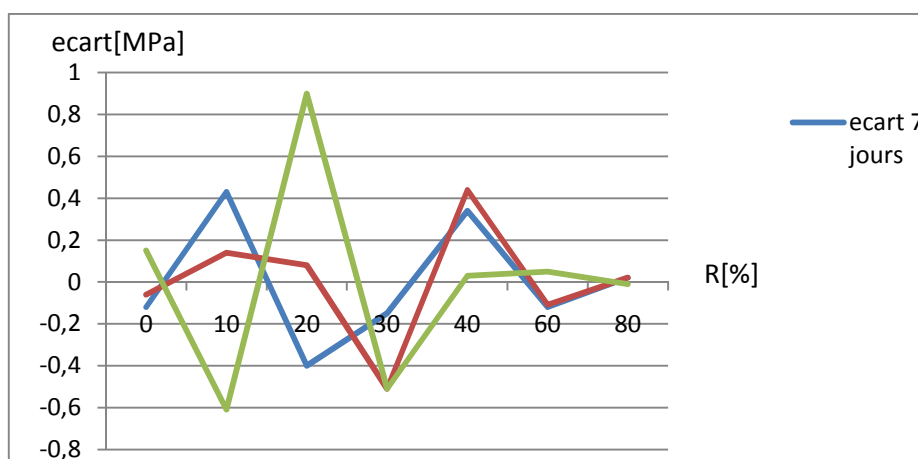


Figure 12: Ecart en fonction de taux de substitution du ciment par la cendre de balle de riz

Les écarts entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont minimales pour les ciments CPA-C, ils ne dépassent pas l'unité. Ils varient pour tous les cas de 0,02 à 0,9 MPa. Les deux courbes représentatives sont presque superposées.

Les différences entre les valeurs ne sont pas extraordinaires du fait que la modélisation n'est pas une représentation parfaite de la réalité mais elle approche tout simplement du réel. Néanmoins, les différences ne doivent pas être trop grandes pour que les modèles soient exploitables. Concernant les ciments mélangés avec un ajout cimentaire, la valeur maximale des différences est rencontrée pour les ciments mélangés avec 20% de pouzzolane naturelle à l'âge de 28 jours qui remonte à 5,74 MPa.

Les coefficients de corrélations pour la modélisation des résistances à la compression des ciments mélangés avec un seul ajout cimentaire sont tous acceptables. Ils sont compris entre 0,9697 et 0,9998. On peut en conclure que dans tous les cas, plus de 95% de la variation des

résistances à la compression de ces ciments sont expliquées par notre modèle. Ce qui est un bon résultat.

VI.6. CIMENT MELANGES AVEC DEUX ET TROIS AJOUTS

Dans cette deuxième série de ciments mélangés, on étudiera les ciments auxquels on a substitués une partie du CPA par plus de un ajout. On utilisera les mêmes ajouts utilisés précédemment. A savoir les pouzzolanes naturelles, pouzzolanes artificielles qui sont la latérite calcinée et les cendres de balle de riz, et le filler cipolin. Deux à trois ajouts sont utilisés simultanément. Le taux de remplacement de ciment varie de 0 à 40%. On étudiera par la suite la résistance à la compression de ces liants en fonction de la teneur en ajouts.

Les fonctions modèles utilisées pour représenter leurs résistances à la compression sont respectivement :

- Ciment mélangés à deux ajouts :

$$R = a_1 x_1^2 x_2^2 x_3^2 + a_2 x_1^2 x_2 x_3^2 + a_3 x_1 x_2^2 x_3^2 + a_4 x_1^2 x_3^2 + a_5 x_2^2 x_3^2 + a_6 x_1 x_2 x_3^2 + a_7 x_1 x_3^2 + a_8 x_2 x_3^2 + a_9 x_3^2 + a_{10} x_1^2 x_2^2 x_3 + a_{11} x_1^2 x_2 x_3 + a_{12} x_1 x_2^2 x_3 + a_{13} x_1^2 x_3 + a_{14} x_2^2 x_3 + a_{15} x_1 x_2 x_3 + a_{16} x_1 x_3 + a_{17} x_3 x_2 + a_{18} x_3 + a_{19} x_1^2 x_2^2 + a_{20} x_1^2 x_2 + a_{21} x_1 x_2^2 + a_{22} x_1^2 + a_{23} x_2^2 + a_{24} x_1 x_2 + a_{25} x_1 + a_{26} x_2 + a_{27}$$

Tableau 20: Résultats obtenus avec les ciments CPA-R-P[1]

Echantillons	Composition(%)			Rc(MPa)		
	CPA	R	P	7 jours	14 jours	28 jours
CPA	100	0	0	11,9	14,4	23
RPL5	90	5	5	11,88	14,04	18,36
R15P5	80	15	5	11,06	14,48	19,64
R10P10	80	10	10	11,75	17,76	25,15
R5P15	80	5	15	11,48	19,96	24,8
R25P5	70	25	5	5,53	13,27	15,81
R15P15	70	15	15	9,13	16,53	19,5
R5P25	70	5	25	12,03	19,18	21,08
R30P10	60	30	10	4,63	8,57	9,95
R20P20	60	20	20	9,56	10	17,25
R10P30	60	10	30	8,4	11,3	12,56

Source : ANDRIARINONY Faniry Rosas « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES » Mémoire d'ingénieur en Science et Ingénierie des Matériaux 2008

Tableau 21: Résultats obtenus avec les ciments CPA-R-L

Echantillons	Composition(%)			Rc(MPa)		
	CPA	R	L	7 jours	14 jours	28 jours
CPA	100	0	0	11,9	14,4	23
R5L5	90	5	5	15,37	16,08	16,47
R15L5	80	15	5	12,88	14,78	15,25
R10L10	80	10	10	15,81	19,09	25,34
R5L15	80	5	15	14,32	15,17	18,46
R25L5	70	25	5	10,61	13,93	15,62
R15L15	70	15	15	8,34	10	12,05
R5L25	70	5	25	9,06	10,09	11,44
R30L10	60	30	10	6,19	7,99	8,56
R20L20	60	20	20	7,13	8,01	9,06
R10L30	60	10	30	7,24	9,45	9,51

Source : ANDRIARINONY Faniry Rosas « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES » Mémoire d'ingénieur en Science et Ingénierie des Matériaux 2008

Tableau 22: Coefficients de régression CPA-R-P/CPA-R-L

coef	Riz Pouzzolane			coef	Riz Latérite		
	7jours	14 jours	28 jours		7	14	28
a1	$-9,33.10^{-08}$	$5,41.10^{-08}$	$-5,24.10^{-08}$	a1	$5,29.10^{-08}$	$7,23.10^{-08}$	$1,25.10^{-07}$
a2	$-1,66.10^{-06}$	$1,01.10^{-06}$	$-3,78.10^{-06}$	a2	$-2,60.10^{-06}$	$-4,48.10^{-06}$	$-7,22.10^{-06}$
a3	$2,58.10^{-06}$	$-3,41.10^{-06}$	$1,19.10^{-05}$	a3	$4,91.10^{-06}$	$8,98.10^{-06}$	$1,34.10^{-05}$
a4	$1,62.10^{-05}$	$3,80.10^{-06}$	$3,93.10^{-05}$	a4	$-3,54.10^{-05}$	$-4,57.10^{-05}$	$-7,02.10^{-05}$
a5	$2,38.10^{-04}$	$3,50.10^{-05}$	$-1,85.10^{-04}$	a5	$-3,11.10^{-05}$	$-3,04.10^{-05}$	$-1,00.10^{-04}$
a6	$5,08.10^{-04}$	$-3,56.10^{-04}$	$-7,51.10^{-04}$	a6	$-2,93.10^{-04}$	$-6,26.10^{-04}$	$-1,46.10^{-03}$
a7	$9,31.10^{-04}$	$-2,77.10^{-03}$	$-1,53.10^{-03}$	a7	$-3,31.10^{-04}$	$-9,20.10^{-04}$	$-1,37.10^{-03}$
a8	$-2,02.10^{-02}$	$1,03.10^{-02}$	$4,03.10^{-02}$	a8	$1,17.10^{-02}$	$2,65.10^{-02}$	$6,41.10^{-02}$
a9	$-2,12.10^{-01}$	$2,57.10^{-01}$	$1,13.10^{-01}$	a9	$2,02.10^{-01}$	$3,44.10^{-01}$	$6,21.10^{-01}$
a10	$-1,55.10^{-22}$	$2,39.10^{-23}$	$1,12.10^{-22}$	a10	$4,95.10^{-23}$	$2,56.10^{-22}$	$3,01.10^{-22}$
a11	$-4,54.10^{-06}$	$6,50.10^{-05}$	$1,42.10^{-04}$	a11	$9,41.10^{-05}$	$1,42.10^{-04}$	$3,34.10^{-04}$

a12	$-3,47 \cdot 10^{-04}$	$8,34 \cdot 10^{-05}$	$1,87 \cdot 10^{-04}$
a13	$-6,58 \cdot 10^{-04}$	$5,39 \cdot 10^{-04}$	$8,16 \cdot 10^{-04}$
a14	$1,31 \cdot 10^{-02}$	$1,13 \cdot 10^{-03}$	$-1,97 \cdot 10^{-02}$
a15	$2,49 \cdot 10^{-03}$	$-5,11 \cdot 10^{-03}$	$-6,53 \cdot 10^{-03}$
a16	$-3,27 \cdot 10^{-02}$	$3,04 \cdot 10^{-02}$	$-4,74 \cdot 10^{-02}$
a17	$-9,89 \cdot 10^{-02}$	$1,13 \cdot 10^{-01}$	$3,10 \cdot 10^{-01}$
a18	$5,88 \cdot 10^{+00}$	$-5,58 \cdot 10^{+00}$	$-4,34 \cdot 10^{+00}$
a19	$-2,30 \cdot 10^{-05}$	$2,90 \cdot 10^{-05}$	$1,01 \cdot 10^{-05}$
a20	$5,13 \cdot 10^{-04}$	$-7,11 \cdot 10^{-04}$	$-1,24 \cdot 10^{-03}$
a21	$1,18 \cdot 10^{-04}$	$5,07 \cdot 10^{-04}$	$-4,84 \cdot 10^{-04}$
a22	$-5,45 \cdot 10^{-03}$	$3,80 \cdot 10^{-03}$	$3,90 \cdot 10^{-03}$
a23	$1,49 \cdot 10^{-01}$	$-2,07 \cdot 10^{-01}$	$-1,02 \cdot 10^{-01}$
a24	$1,92 \cdot 10^{-02}$	$1,79 \cdot 10^{-03}$	$2,45 \cdot 10^{-02}$
a25	$4,02 \cdot 10^{-01}$	$-2,83 \cdot 10^{-01}$	$-1,72 \cdot 10^{-01}$
a26	$-4,89 \cdot 10^{+0}$	$3,52 \cdot 10^{+00}$	$5,97 \cdot 10^{+00}$
a27	$2,62 \cdot 10^{+01}$	$4,69 \cdot 10^{+00}$	$1,22 \cdot 10^{+00}$

a12	$-3,00 \cdot 10^{-05}$	$9,92 \cdot 10^{-05}$	$2,46 \cdot 10^{-04}$
a13	$-2,41 \cdot 10^{-04}$	$-7,18 \cdot 10^{-04}$	$-8,05 \cdot 10^{-04}$
a14	$-1,54 \cdot 10^{-03}$	$-1,31 \cdot 10^{-02}$	$-2,35 \cdot 10^{-02}$
a15	$-4,12 \cdot 10^{-03}$	$-3,52 \cdot 10^{-03}$	$-1,35 \cdot 10^{-02}$
a16	$9,40 \cdot 10^{-02}$	$1,94 \cdot 10^{-01}$	$3,12 \cdot 10^{-01}$
a17	$2,24 \cdot 10^{-02}$	$-4,17 \cdot 10^{-02}$	$2,27 \cdot 10^{-01}$
a18	$-3,93 \cdot 10^{+00}$	$-7,97 \cdot 10^{+00}$	$-1,66 \cdot 10^{+01}$
a19	$2,16 \cdot 10^{-05}$	$3,16 \cdot 10^{-05}$	$7,15 \cdot 10^{-05}$
a20	$-2,54 \cdot 10^{-04}$	$-2,80 \cdot 10^{-04}$	$-1,15 \cdot 10^{-03}$
a21	$-2,30 \cdot 10^{-04}$	$-5,90 \cdot 10^{-04}$	$-5,19 \cdot 10^{-04}$
a22	$-6,78 \cdot 10^{-05}$	$4,59 \cdot 10^{-03}$	$1,20 \cdot 10^{-02}$
a23	$-6,21 \cdot 10^{-02}$	$-8,87 \cdot 10^{-02}$	$-2,52 \cdot 10^{-01}$
a24	$-3,68 \cdot 10^{-02}$	$-9,92 \cdot 10^{-02}$	$-1,23 \cdot 10^{-01}$
a25	$4,37 \cdot 10^{-02}$	$3,98 \cdot 10^{-02}$	$-5,18 \cdot 10^{-01}$
a26	$2,48 \cdot 10^{+00}$	$7,33 \cdot 10^{+00}$	$1,09 \cdot 10^{+01}$
a27	$8,21 \cdot 10^{+00}$	$-3,55 \cdot 10^{+01}$	$-4,55 \cdot 10^{+01}$

Tableau 23: Résultats obtenus avec les ciments CPA-P-L

Echantillons	Composition(%)			Rc(MPa)		
	CPA	P	L	7 jours	14 jours	28 jours
CPA	100	0	0	11,9	14,4	23
P5L5	90	5	5	11,24	16,62	20,29
P15L5	80	15	5	12,83	19,75	25,34
P10L10	80	10	10	9,8	10,97	20,15
P5L15	80	5	15	7,32	13,22	16,75
P25L5	70	25	5	10,26	15,45	17,97
P15L15	70	15	15	8,98	16,2	21
P5L25	70	5	25	6,14	10,07	14,64
P30L10	60	30	10	10,05	12,82	13,1
P20L20	60	20	20	8,34	9,84	13,16
P10L30	60	10	30	9,95	10,56	11,27

Source : ANDRIARINONY Faniry Rosas « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS

ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES » Mémoire d'ingénieur en Science et Ingénierie des Matériaux 2008

Tableau 24 : Résultats obtenus avec les ciments CPA-P-C

Echantillons	Composition(%)			Rc(MPa)		
	CPA	P	C	7 jours	14 jours	28 jours
CPA	100	0	0	11,9	14,4	23
P25C5	70	25	5	15,34	15,38	15,42
P20C10	70	20	10	16,05	20,01	25,15
P15C15	70	15	15	14,59	15,27	16,58
P10C20	70	10	20	10,91	11,82	13,15
P5C25	70	5	25	11,28	13,63	15,2

Source : ANDRIARINONY Faniry Rosas « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS

ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES » Mémoire d'ingénieur en Science et Ingénierie des Matériaux 2008

Tableau 25: Coefficients de régression CPA-P-L/CPA-P-C

Coef	Pouzzolane Latérite			Coef	Pouzzolane Cipolin		
	7	14	28		7	14	28
a1	$-8,85.10^{-08}$	$-3,30.10^{-07}$	$-5,11.10^{-07}$	a1	$1,76.10^{-06}$	$-1,43.10^{-06}$	$8,35.10^{-07}$
a2	$1,17.10^{-06}$	$6,67.10^{-06}$	$4,22.10^{-06}$	a2	$8,84.10^{-05}$	$-1,37.10^{-04}$	$1,35.10^{-05}$
a3	$-2,12.10^{-07}$	$-6,26.10^{-06}$	$1,64.10^{-06}$	a3	$1,64.10^{-03}$	$-1,09.10^{-03}$	$7,70.10^{-05}$

a4	$1,04 \cdot 10^{-05}$	$8,68 \cdot 10^{-05}$	$6,57 \cdot 10^{-05}$
a5	$-1,70 \cdot 10^{-05}$	$1,24 \cdot 10^{-04}$	$8,01 \cdot 10^{-04}$
a6	$2,11 \cdot 10^{-04}$	$7,60 \cdot 10^{-04}$	$7,01 \cdot 10^{-04}$
a7a	$1,13 \cdot 10^{-03}$	$2,04 \cdot 10^{-03}$	$1,59 \cdot 10^{-03}$
a8	$-8,18 \cdot 10^{-03}$	$-2,22 \cdot 10^{-02}$	$-2,58 \cdot 10^{-02}$
a9	$-1,55 \cdot 10^{-01}$	$-6,86 \cdot 10^{-01}$	$-5,63 \cdot 10^{-01}$
a10	$-9,46 \cdot 10^{-23}$	$-8,20 \cdot 10^{-23}$	$9,49 \cdot 10^{-23}$
a11	$-2,43 \cdot 10^{-05}$	$-2,69 \cdot 10^{-04}$	$-2,09 \cdot 10^{-04}$
a12	$-1,79 \cdot 10^{-04}$	$9,02 \cdot 10^{-05}$	$4,11 \cdot 10^{-05}$
a13	$2,65 \cdot 10^{-04}$	$2,01 \cdot 10^{-04}$	$-1,28 \cdot 10^{-03}$
a14	$1,09 \cdot 10^{-02}$	$-4,63 \cdot 10^{-04}$	$-4,53 \cdot 10^{-03}$
a15	$3,27 \cdot 10^{-04}$	$1,20 \cdot 10^{-02}$	$1,85 \cdot 10^{-02}$
a16	$-9,49 \cdot 10^{-02}$	$-1,89 \cdot 10^{-01}$	$-3,63 \cdot 10^{-02}$
a17	$9,36 \cdot 10^{-02}$	$-2,29 \cdot 10^{-02}$	$-4,43 \cdot 10^{-01}$
a18	$4,10 \cdot 10^{+00}$	$9,81 \cdot 10^{+00}$	$7,94 \cdot 10^{+00}$
a19	$-1,48 \cdot 10^{-05}$	$-6,53 \cdot 10^{-05}$	$-5,62 \cdot 10^{-05}$
a20	$3,73 \cdot 10^{-04}$	$1,49 \cdot 10^{-03}$	$1,62 \cdot 10^{-03}$
a21	$5,90 \cdot 10^{-04}$	$-4,13 \cdot 10^{-04}$	$-4,25 \cdot 10^{-04}$
a22	$-4,43 \cdot 10^{-03}$	$-2,74 \cdot 10^{-03}$	$-7,23 \cdot 10^{-03}$
a23	$4,52 \cdot 10^{-02}$	$2,97 \cdot 10^{-01}$	$2,92 \cdot 10^{-01}$
a24	$2,14 \cdot 10^{-02}$	$6,37 \cdot 10^{-02}$	$-9,62 \cdot 10^{-03}$
a25	$3,11 \cdot 10^{-01}$	$2,65 \cdot 10^{-01}$	$1,30 \cdot 10^{+00}$
a26	$-3,80 \cdot 10^{+00}$	$-8,66 \cdot 10^{+00}$	$-5,76 \cdot 10^{+00}$
a27	$2,51 \cdot 10^{+01}$	$1,52 \cdot 10^{+01}$	$-3,42 \cdot 10^{+01}$

a4	$-2,42 \cdot 10^{-03}$	$2,09 \cdot 10^{-03}$	$-3,07 \cdot 10^{-04}$
a5	$-1,23 \cdot 10^{-01}$	$8,27 \cdot 10^{-02}$	$-1,10 \cdot 10^{-02}$
a6	$1,06 \cdot 10^{-02}$	$-6,21 \cdot 10^{-03}$	$1,66 \cdot 10^{-04}$
a7a	$-1,31 \cdot 10^{-01}$	$-3,47 \cdot 10^{-02}$	$-6,31 \cdot 10^{-03}$
a8	$-9,02 \cdot 10^{-01}$	$6,06 \cdot 10^{-01}$	$-7,61 \cdot 10^{-02}$
a9	$8,96 \cdot 10^{+00}$	$-6,90 \cdot 10^{+00}$	$1,06 \cdot 10^{+00}$
a10	$1,71 \cdot 10^{-20}$	$-6,78 \cdot 10^{-21}$	$6,66 \cdot 10^{-22}$
a11	$-3,04 \cdot 10^{-04}$	$1,41 \cdot 10^{-03}$	$4,45 \cdot 10^{-05}$
a12	$-1,27 \cdot 10^{-02}$	$5,72 \cdot 10^{-03}$	$-5,39 \cdot 10^{-04}$
a13	$-7,68 \cdot 10^{-02}$	$6,21 \cdot 10^{-02}$	$-4,80 \cdot 10^{-03}$
a14	$1,17 \cdot 10^{+00}$	$-8,89 \cdot 10^{-01}$	$5,50 \cdot 10^{-02}$
a15	$-2,43 \cdot 10^{-01}$	$6,83 \cdot 10^{-02}$	$-1,46 \cdot 10^{-02}$
a16	$6,21 \cdot 10^{+00}$	$-2,89 \cdot 10^{+00}$	$4,90 \cdot 10^{-01}$
a17	$1,44 \cdot 10^{+00}$	$3,68 \cdot 10^{+00}$	$6,42 \cdot 10^{-01}$
a18	$3,17 \cdot 10^{+02}$	$-1,34 \cdot 10^{+02}$	$1,65 \cdot 10^{+01}$
a19	$-6,13 \cdot 10^{-04}$	$6,06 \cdot 10^{-04}$	$-1,04 \cdot 10^{-04}$
a20	$-4,99 \cdot 10^{-03}$	$-5,00 \cdot 10^{-03}$	$-1,25 \cdot 10^{-03}$
a21	$4,29 \cdot 10^{-02}$	$-2,68 \cdot 10^{-02}$	$1,07 \cdot 10^{-02}$
a22	$8,12 \cdot 10^{-02}$	$-3,61 \cdot 10^{-02}$	$1,08 \cdot 10^{-02}$
a23	$3,47 \cdot 10^{+00}$	$-1,58 \cdot 10^{+00}$	$2,12 \cdot 10^{-01}$
a24	$8,66 \cdot 10^{-01}$	$-4,13 \cdot 10^{-01}$	$1,04 \cdot 10^{-01}$
a25	$-1,23 \cdot 10^{+00}$	$4,95 \cdot 10^{-01}$	$-4,30 \cdot 10^{-01}$
a26	$-1,27 \cdot 10^{+02}$	$6,13 \cdot 10^{+01}$	$-1,61 \cdot 10^{+01}$
a27	$-6,77 \cdot 10^{+02}$	$3,26 \cdot 10^{+02}$	$-4,16 \cdot 10^{+01}$

Tableau 26: Résultats obtenus avec les ciments CPA-L-C

Echantillons	Composition(%)			Rc(MPa)		
	CPA	L	C	7 jours	14 jours	28 jours
CPA	100	0	0	11,9	14,4	23
L25C5	70	25	5	4,68	9,45	13,37
L20C10	70	20	10	5,94	15,35	25,02
L15C15	70	15	15	3,7	10,35	19,67
L10C20	70	10	20	3,92	10,87	12,26
L5C25	70	5	25	4,58	6,53	13,26

Tableau 27: Coefficients de régression CPA-L-C

Coef	Latérite-Cipolin			Coef	Latérite-Cipolin		
	7	14	28		7	14	28
a1	$4,95.10^{-06}$	$-1,10.10^{-06}$	$-4,40.10^{-06}$	a14	$1,45.10^{-01}$	$5,52.10^{-02}$	$-1,07.10^{-01}$
a2	$-9,63.10^{-06}$	$-6,37.10^{-05}$	$1,61.10^{-05}$	a15	$-3,53.10^{+00}$	$-2,03.10^{+00}$	$3,35.10^{+00}$
a3	$-1,62.10^{-03}$	$-7,66.10^{-04}$	$2,54.10^{-03}$	a16	$-5,41.10^{-01}$	$-1,48.10^{+00}$	$-3,08.10^{+00}$
a4	$2,03.10^{-03}$	$2,20.10^{-03}$	$-4,62.10^{-03}$	a17	$-1,73.10^{+02}$	$-9,17.10^{+01}$	$1,56.10^{+02}$
a5	$8,84.10^{-02}$	$5,88.10^{-02}$	$-1,56.10^{-01}$	a18	$5,08.10^{-04}$	$3,47.10^{-04}$	$-5,02.10^{-04}$
a6	$-6,51.10^{-03}$	$3,89.10^{-03}$	$5,10.10^{-03}$	a19	$-4,00.10^{-03}$	$5,99.10^{-03}$	$4,00.10^{-03}$
a7	$-7,06.10^{-02}$	$-4,06.10^{-02}$	$1,66.10^{-01}$	a20	$-2,14.10^{-02}$	$-3,75.10^{-02}$	$2,14.10^{-02}$
a8	$2,64.10^{-01}$	$-1,29.10^{-01}$	$9,23.10^{-02}$	a21	$-3,79.10^{-02}$	$-4,12.10^{-02}$	$3,83.10^{-02}$
a9	$-4,74.10^{-01}$	$-4,95.10^{+00}$	$9,24.10^{+00}$	a22	$-1,65.10^{+00}$	$-1,54.10^{+00}$	$1,51.10^{+00}$
a10	$-5,99.10^{-21}$	$-9,68.10^{-22}$	$5,57.10^{-21}$	a23	$-4,11.10^{-01}$	$-4,96.10^{-01}$	$3,67.10^{-01}$
a11	$3,28.10^{-04}$	$6,43.10^{-04}$	$-1,34.10^{-03}$	a24	$5,50.10^{-01}$	$6,81.10^{-01}$	$-5,35.10^{-01}$
a12	$1,08.10^{-02}$	$-1,44.10^{-03}$	$-5,26.10^{-03}$	a25	$6,17.10^{+01}$	$7,18.10^{+01}$	$-5,78.10^{+01}$
a13	$5,65.10^{-02}$	$2,80.10^{-02}$	$-6,76.10^{-02}$	a26	$3,36.10^{+02}$	$3,58.10^{+02}$	$-3,07.10^{+02}$
				a27	$1,45.10^{-01}$	$5,52.10^{-02}$	$-1,07.10^{-01}$

○ Ciment mélangés à trois ajouts :

$$\begin{aligned}
R = & a_1 x_1^2 x_2^2 x_3^2 x_4^2 + a_2 x_1^2 x_2 x_3^2 x_4^2 + a_3 x_1 x_2^2 x_3^2 x_4^2 + a_4 x_1^2 x_3^2 x_4^2 + a_5 x_2^2 x_3^2 x_4^2 + a_6 x_1 x_2 x_3^2 x_4^2 + \\
& a_7 x_1 x_3^2 x_4^2 + a_8 x_2 x_3^2 x_4^2 + a_9 x_3^2 x_4^2 + a_{10} x_1^2 x_2^2 x_3 x_4^2 + a_{11} x_1^2 x_2 x_3 x_4^2 + a_{12} x_1 x_2^2 x_3 x_4^2 + a_{13} x_1^2 \\
& x_3 x_4^2 + a_{14} x_2^2 x_3 x_4^2 + a_{15} x_1 x_2 x_3 x_4^2 + a_{16} x_1 x_3 x_4^2 + a_{17} x_3 x_2 x_4^2 + a_{18} x_3 x_4^2 + a_{19} x_1^2 x_2^2 x_4^2 + a_{20} x_1^2 \\
& x_2 x_4^2 + a_{21} x_1 x_2^2 x_4^2 + a_{22} x_1^2 x_4^2 + a_{23} x_2^2 x_4^2 + a_{24} x_1 x_2 x_4^2 + a_{25} x_1 x_4^2 + a_{26} x_2 x_4^2 + a_{27} x_4^2 + a_{28} x_1^2 x_2^2 \\
& x_3^2 x_4 + a_{29} x_1^2 x_2 x_3^2 x_4 + a_{30} x_1 x_2^2 x_3^2 x_4 + a_{31} x_1^2 x_3^2 x_4 + a_{32} x_2^2 x_3^2 x_4 + a_{33} x_1 x_2 x_3^2 x_4 + a_{34} x_1 x_3^2 x_4 + \\
& a_{35} x_2 x_3^2 x_4 + a_{36} x_3^2 x_4 + a_{37} x_1^2 x_2^2 x_3 x_4 + a_{38} x_1^2 x_2 x_3 x_4 + a_{39} x_1 x_2^2 x_3 x_4 + a_{40} x_1^2 x_3 x_4 + a_{41} x_2^2 x_3 \\
& x_4 + a_{42} x_1 x_2 x_3 x_4 + a_{43} x_1 x_3 x_4 + a_{44} x_3 x_2 x_4 + a_{45} x_3 x_4 + a_{46} x_1^2 x_2^2 x_4 + a_{47} x_1^2 x_2 x_4 + a_{48} x_1 x_2^2 x_4 + \\
& a_{49} x_1^2 x_4 + a_{50} x_2^2 x_4 + a_{51} x_1 x_2 x_4 + a_{52} x_1 x_4 + a_{53} x_2 x_4 + a_{54} x_4 + a_{55} x_1^2 x_2^2 x_3^2 + a_{56} x_1^2 x_2 x_3^2 + a_{57} x_1 \\
& x_2^2 x_3^2 + a_{58} x_1^2 x_3^2 + a_{59} x_2^2 x_3^2 + a_{60} x_1 x_2 x_3^2 + a_{61} x_1 x_3^2 + a_{62} x_2 x_3^2 + a_{63} x_3^2 + a_{64} x_1^2 x_2^2 x_3 + a_{65} x_1^2 x_2 \\
& x_3 + a_{66} x_1 x_2^2 x_3 + a_{67} x_1^2 x_3 + a_{68} x_2^2 x_3 + a_{69} x_1 x_2 x_3 + a_{70} x_1 x_3 + a_{71} x_3 x_2 + a_{72} x_3 + a_{73} x_1^2 x_2^2 + a_{74} x_1^2 \\
& x_2 + a_{75} x_1 x_2^2 + a_{76} x_1^2 + a_{77} x_2^2 + a_{78} x_1 x_2 + a_{79} x_1 + a_{80} x_2 + a_{81}
\end{aligned}$$

Avec : R : résistance à la compression

x_1 : teneur en ciment

- x_i : teneur en ajout numéro i
- a_j : coefficient de régression

Tableau 27: Coefficient de régression: 3 ajouts

Coef	Riz Pouzzolane Latérite		
	7jours	14 jours	28jours
a1	$1,29.10^{-06}$	$-9,87.10^{-07}$	$1,75.10^{-06}$
a2	$-2,87.10^{-06}$	$-7,71.10^{-06}$	$1,45.10^{-05}$
a3	$3,18.10^{-04}$	$-1,47.10^{-04}$	$3,74.10^{-04}$
a4	$2,40.10^{-06}$	$1,47.10^{-06}$	$-2,97.10^{-06}$
a5	$-3,05.10^{-02}$	$1,74.10^{-02}$	$-3,84.10^{-02}$
a6	$1,81.10^{-03}$	$-1,70.10^{-03}$	$3,55.10^{-03}$
a7	$-4,17.10^{-03}$	$2,21.10^{-03}$	$-3,23.10^{-03}$
a8	$-8,61.10^{-02}$	$1,24.10^{-01}$	$-2,43.10^{-01}$
a9	$2,69.10^{-01}$	$-9,38.10^{-02}$	$7,31.10^{-02}$
a10	$-8,68.10^{-20}$	$1,01.10^{-19}$	$-3,13.10^{-19}$

Coef	Riz Pouzzolane Latérite		
	7jours	14jours	28jours
a42	$-1,85.10^{-02}$	$5,84.10^{-03}$	$-2,98.10^{-02}$
a43	$-1,14.10^{-01}$	$8,58.10^{-02}$	$-1,21.10^{-01}$
a44	$1,95.10^{+00}$	$-1,31.10^{+00}$	$3,92.10^{+00}$
a45	$2,34.10^{+00}$	$-4,04.10^{-01}$	$1,26.10^{+01}$
a46	$-3,79.10^{-05}$	$2,72.10^{-05}$	$4,44.10^{-05}$
a47	$6,76.10^{-04}$	$8,69.10^{-05}$	$-3,81.10^{-04}$
a48	$2,65.10^{-03}$	$-5,43.10^{-03}$	$1,76.10^{-02}$
a49	$-1,84.10^{-03}$	$2,84.10^{-03}$	$-1,01.10^{-02}$
a50	$1,61.10^{-01}$	$-2,60.10^{-01}$	$3,34.10^{-01}$
a51	$4,21.10^{-02}$	$-4,68.10^{-02}$	$1,41.10^{-01}$

a11	$1,11 \cdot 10^{-05}$	$-8,59 \cdot 10^{-06}$	$-1,32 \cdot 10^{-05}$
a12	$-1,12 \cdot 10^{-04}$	$5,39 \cdot 10^{-05}$	$-3,39 \cdot 10^{-05}$
a13	$-2,57 \cdot 10^{-05}$	$-8,73 \cdot 10^{-05}$	$1,75 \cdot 10^{-04}$
a14	$2,98 \cdot 10^{-03}$	$8,32 \cdot 10^{-04}$	$-3,86 \cdot 10^{-03}$
a15	$-1,43 \cdot 10^{-03}$	$1,94 \cdot 10^{-04}$	$6,28 \cdot 10^{-04}$
a16	$3,68 \cdot 10^{-04}$	$6,09 \cdot 10^{-03}$	$-7,82 \cdot 10^{-04}$
a17	$4,33 \cdot 10^{-02}$	$2,03 \cdot 10^{-02}$	$7,86 \cdot 10^{-03}$
a18	$5,72 \cdot 10^{-01}$	$-4,28 \cdot 10^{-01}$	$5,68 \cdot 10^{-01}$
a19	$4,79 \cdot 10^{-07}$	$2,44 \cdot 10^{-06}$	$-4,07 \cdot 10^{-06}$
a20	$5,76 \cdot 10^{-05}$	$-3,74 \cdot 10^{-05}$	$7,93 \cdot 10^{-05}$
a21	$-2,59 \cdot 10^{-04}$	$1,86 \cdot 10^{-04}$	$-8,46 \cdot 10^{-04}$
a22	$-2,14 \cdot 10^{-04}$	$1,31 \cdot 10^{-04}$	$8,97 \cdot 10^{-05}$
a23	$3,05 \cdot 10^{-03}$	$-2,19 \cdot 10^{-02}$	$8,40 \cdot 10^{-02}$
a24	$-3,50 \cdot 10^{-03}$	$3,09 \cdot 10^{-03}$	$-7,60 \cdot 10^{-03}$
a25	$-6,25 \cdot 10^{-03}$	$2,52 \cdot 10^{-03}$	$-9,01 \cdot 10^{-03}$
a26	$9,90 \cdot 10^{-03}$	$4,62 \cdot 10^{-02}$	$-3,98 \cdot 10^{-02}$
a27	$1,27 \cdot 10^{+00}$	$-5,20 \cdot 10^{-01}$	$7,60 \cdot 10^{-01}$
a28	$2,97 \cdot 10^{-08}$	$-1,33 \cdot 10^{-10}$	$-2,08 \cdot 10^{-10}$
a29	$5,31 \cdot 10^{-06}$	$-3,55 \cdot 10^{-06}$	$-3,28 \cdot 10^{-06}$
a30	$-2,39 \cdot 10^{-05}$	$-1,59 \cdot 10^{-05}$	$6,01 \cdot 10^{-05}$
a31	$-2,40 \cdot 10^{-05}$	$-2,60 \cdot 10^{-05}$	$9,00 \cdot 10^{-05}$
a32	$1,85 \cdot 10^{-03}$	$-2,59 \cdot 10^{-03}$	$1,24 \cdot 10^{-02}$
a33	$5,72 \cdot 10^{-04}$	$-5,89 \cdot 10^{-04}$	$1,66 \cdot 10^{-03}$
a34	$1,59 \cdot 10^{-03}$	$-3,95 \cdot 10^{-04}$	$2,23 \cdot 10^{-04}$
a35	$-1,31 \cdot 10^{-02}$	$5,08 \cdot 10^{-02}$	$-1,01 \cdot 10^{-01}$
a36	$6,91 \cdot 10^{-02}$	$-6,21 \cdot 10^{-02}$	$2,90 \cdot 10^{-01}$

a52	$3,35 \cdot 10^{-01}$	$-4,28 \cdot 10^{-01}$	$5,13 \cdot 10^{-01}$
a53	$-1,11 \cdot 10^{+00}$	$8,26 \cdot 10^{-01}$	$-3,99 \cdot 10^{+00}$
a54	$2,32 \cdot 10^{+01}$	$-2,68 \cdot 10^{+01}$	$8,58 \cdot 10^{+01}$
a55	$1,92 \cdot 10^{-06}$	$-9,68 \cdot 10^{-07}$	$1,10 \cdot 10^{-06}$
a56	$2,32 \cdot 10^{-05}$	$9,26 \cdot 10^{-06}$	$-9,58 \cdot 10^{-06}$
a57	$-3,63 \cdot 10^{-04}$	$8,70 \cdot 10^{-05}$	$-1,13 \cdot 10^{-04}$
a58	$2,77 \cdot 10^{-04}$	$-1,95 \cdot 10^{-04}$	$4,10 \cdot 10^{-04}$
a59	$2,05 \cdot 10^{-03}$	$-1,69 \cdot 10^{-02}$	$7,28 \cdot 10^{-02}$
a60	$-9,01 \cdot 10^{-04}$	$1,22 \cdot 10^{-03}$	$-1,07 \cdot 10^{-02}$
a61	$3,73 \cdot 10^{-02}$	$-3,23 \cdot 10^{-02}$	$8,08 \cdot 10^{-02}$
a62	$-1,86 \cdot 10^{-01}$	$1,59 \cdot 10^{-01}$	$-2,93 \cdot 10^{-01}$
a63	$-6,46 \cdot 10^{-01}$	$-5,54 \cdot 10^{-01}$	$2,04 \cdot 10^{+00}$
a64	$-5,78 \cdot 10^{-18}$	$6,67 \cdot 10^{-18}$	$-2,08 \cdot 10^{-17}$
a65	$-1,19 \cdot 10^{-03}$	$1,45 \cdot 10^{-03}$	$-2,05 \cdot 10^{-03}$
a66	$7,01 \cdot 10^{-03}$	$-8,07 \cdot 10^{-03}$	$1,57 \cdot 10^{-02}$
a67	$5,62 \cdot 10^{-03}$	$-4,79 \cdot 10^{-03}$	$9,12 \cdot 10^{-03}$
a68	$-1,10 \cdot 10^{-01}$	$4,82 \cdot 10^{-02}$	$4,03 \cdot 10^{-01}$
a69	$1,05 \cdot 10^{-01}$	$-7,28 \cdot 10^{-02}$	$1,73 \cdot 10^{-01}$
a70	$-1,26 \cdot 10^{-01}$	$1,39 \cdot 10^{-01}$	$2,14 \cdot 10^{-01}$
a71	$-3,10 \cdot 10^{+00}$	$3,34 \cdot 10^{+00}$	$-1,58 \cdot 10^{+01}$
a72	$-1,75 \cdot 10^{+01}$	$2,09 \cdot 10^{+01}$	$-4,82 \cdot 10^{+01}$
a73	$-4,28 \cdot 10^{-04}$	$4,84 \cdot 10^{-04}$	$-7,06 \cdot 10^{-04}$
a74	$-2,08 \cdot 10^{-03}$	$8,20 \cdot 10^{-03}$	$-1,37 \cdot 10^{-02}$
a75	$5,13 \cdot 10^{-02}$	$-6,41 \cdot 10^{-02}$	$1,54 \cdot 10^{-01}$
a76	$6,68 \cdot 10^{-02}$	$-6,75 \cdot 10^{-02}$	$2,00 \cdot 10^{-01}$
a77	$-2,43 \cdot 10^{+00}$	$2,15 \cdot 10^{+00}$	$-7,51 \cdot 10^{+00}$

a37	$1,55.10^{-18}$	$-1,79.10^{-18}$	$5,58.10^{-18}$
a38	$-1,23.10^{-04}$	$9,76.10^{-05}$	$-5,38.10^{-04}$
a39	$3,58.10^{-04}$	$5,37.10^{-04}$	$-3,07.10^{-03}$
a40	$-4,37.10^{-03}$	$2,86.10^{-03}$	$-1,05.10^{-02}$
a41	$7,87.10^{-02}$	$-7,29.10^{-02}$	$1,11.10^{-01}$

a78	$-6,39.10^{-01}$	$6,13.10^{-01}$	$-1,50.10^{+00}$
a79	$-6,39.10^{+00}$	$6,68.10^{+00}$	$-1,97.10^{+01}$
a80	$1,84.10^{+00}$	$2,59.10^{+00}$	$-2,52.10^{+01}$
a81	$-1,67.10^{+01}$	$2,15.10^{+01}$	$-7,74.10^{+00}$

REMARQUE

Certes, la courbe nous donne en première impression la qualité de l'approximation. Or le traçage de la courbe représentative des fonctions est pour notre cas désormais impossible vue que les fonctions sont à trois variables pour les ciments avec deux ajouts et quatre variables pour ceux avec trois ajouts à savoir le taux de ciment, les taux respectifs des ajouts. Ce qui constitue un hyperplan.

Il est évident que les fonctions montrées ci-dessus sont trop longues et complexes. On aurait pu avoir des résultats avec des fonctions simples et de courtes expressions. Mais ce sont les meilleures fonctions modèles parmi les autres fonctions en considérant les résultats obtenus. De plus, c'est l'ordinateur qui se charge des calculs liés au traitement des données. Soient 27 coefficients de régressions pour les ciments mélangés à deux ajouts contre 81 pour ceux avec trois ajouts. Ces fonctions modèles ont donné pour tous les cas de très bons résultats. On a pu avoir les mêmes valeurs en estimation qu'à la mesure. De ce fait, les coefficients de corrélations sont toujours les mêmes et égaux à l'unité. Ce qui veut dire que toute la variation de la variable dépendante qui est ici la résistance à la compression est expliquée par le modèle.

CONCLUSION

Les résultats précédents montrent bien que l'on peut bel et bien modéliser la résistance à la compression des ciments mélangés en fonction des taux de substitution du ciment pur par des ajouts cimentaires. On retrouve des valeurs très proches des valeurs mesurées (cas des ciments avec un seul ajout) voire les mêmes valeurs (cas des ciments avec trois ajouts). La question qui se pose est la suivante : si l'on prend des valeurs intermédiaires, des valeurs qui ne figurent pas parmi les données d'entrée, comment se comporterait le modèle.

PARTIE III ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE.VII ETUDE DE REPRODUCTIBILITE DES ESSAIS

Cette partie a pour but de réaliser des essais pour étudier les résultats quant aux valeurs ne figurant pas dans le premier ouvrage à partir desquelles la modélisation a été faite. Pour ce faire, nous partons de la caractérisation des matériaux, suivie de l'élaboration des éprouvettes pour en finir avec les essais mécaniques.

VII.1. CARACTERISATION DES MATERIAUX

Les résultats que nous attendons dépendent en grande partie des propriétés et les caractéristiques des matériaux utilisés. Il est alors primordial de connaître ces matériaux avant de procéder à la réalisation proprement dite de ces essais.

VII.1.1. Granulométrie-sédimentométrie

L'analyse granulométrique consiste à séparer les différentes particules constituant les matériaux selon leur dimension. Elle est effectuée par la méthode de tamisage suivi d'une sédimentométrie.

La méthode granulométrique utilisée pour les particules de dimensions supérieures à 50 μm est la méthode de tamisage. Elle consiste à déduire les tailles des particules les faisant passer dans des orifices de plus en plus petits.

On utilise des tamis constitué d'un maillage métallique définissant des trous carrés de dimensions normalisées. La dimension nominale de tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée.

Concernant les particules de dimensions inférieures à 50 μm , la méthode utilisée est la sédimentométrie. Elles sont étudiées en observant leur vitesse de chute dans un milieu fluide moins dense que ces particules. Et on rapporte les dimensions des particules aux ouvertures de tamis correspondants.

Les résultats sont représentés par la courbe granulométrique qui porte en abscisse les ouvertures de tamis et en ordonnée les pourcentages des passants cumulés.

VII.1.2. Poids spécifique

Appelé aussi masse volumique absolue, elle donne la masse d'une unité de volume absolu du corps c'est-à-dire on ne tient pas compte du volume du vide.

Pour la déterminer, on a besoin des matériels suivants :

- pycnomètre ;
- balance ;
- chiffons propres.

Noter : P₁ le poids du pycnomètre
 P₂ le poids du pycnomètre rempli d'eau
 P₃ le poids du pycnomètre contenant l'échantillon
 P₄ le poids du pycnomètre contenant de l'eau et l'échantillon

Il faut prendre les précautions pour qu'aucun élément fin ne soit perdu et bien essuyer avec les chiffons le pycnomètre.

On tire : le poids P de l'échantillon $P = P_3 - P_1$

- le volume V₁ du pycnomètre : $V_1 = (P_2 - P_1) / \text{masse volumique de l'eau}$;
- le volume V₂ de l'eau : $V_2 = (P_4 - P_3) / \text{masse volumique de l'eau}$;
- le volume V de l'échantillon : $V = V_1 - V_2$.

On en déduit :

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

VII.1.3. Mesure de la masse volumique apparente γ_d

Le but est de déterminer la masse d'une unité de volume apparente c'est-à-dire il faut tenir compte du vide.

Les matériels à utiliser sont :

- une moule de volume V ;
- une balance ;
- une règle.

le mode opératoire est :

- peser la moule et noter P₁ sa masse ;
- verser dans la moule de l'échantillon jusqu'à ce que celle-ci déborde tout autour en formant un cône ;
- araser avec la règle ;
- peser la moule remplie d'échantillon et noter P₂ sa masse.

On en déduit par la suite la masse P de l'échantillon :

$$P = P_2 - P_1$$

La masse volumique apparente s'obtient en faisant le rapport :

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

VII.2. CONFECTION DES EPROUVETTES

VII.2.1. *Matériels utilisés*

Pour la préparation des éprouvettes, des matériels spéciaux sont nécessaires. Pour notre cas les appareils et matériels utilisés sont :

- ❖ balance ;
- ❖ malaxeur ;
- ❖ spatule ;
- ❖ cône de Marsh.

VII.2.2. *Dosage*

Dans cette phase, selon leurs teneurs respectifs on compose le mélange des différents matériaux à savoir la pouzzolane naturelle, les pouzzolanes artificielles dont les cendres de balle de riz et la latérite calcinée et le filler cipolin.



Photo 5: Balance

VII.2.3. Malaxage

Une fois le liant obtenu, on le met dans le récipient en acier inoxydable du malaxeur d'une capacité de cinq litre (5 L) environ dans lequel est préalablement versée l'eau de gâchage. Après avoir réglé la vitesse de rotation du batteur, on le laisse tourner durant quelques minutes.



Photo 6: Malaxeur

VII.2.4. Mesure de la viscosité de la pâte

Pour cela on utilise un instrument appelé « cône de Marsh ». Le cône de Marsh est composé d'un entonnoir muni d'un filtre pour arrêter les grumeaux et d'un récipient jaugé. L'instrument est réalisé en plastique résistant insensible aux variations de température de manière à assurer une consistance volumétrique. Le cône de Marsh est utilisé en contrôle de routine pour déterminer la viscosité de coulis.

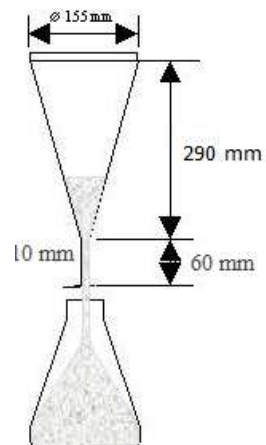


Photo 7: Cône de Marsh

On verse une quantité bien déterminée (dans la plupart des cas un litre (1L)) du mélange homogène sortie du malaxeur dans l'entonnoir et on mesure le temps que le mélange met pour couler à travers l'entonnoir. Dans notre cas on a retenu le mélange dont le temps d'écoulement est de soixante secondes (60s).

VII.2.5. Moulages des éprouvettes

Lors des essais, on a utilisé deux types de moule dont des moules prismatiques et des moules cylindriques. Les moules cylindriques sont à un élancement deux. Quant aux moules prismatiques, elles comportent trois compartiments horizontaux permettant la préparation simultanée de trois éprouvettes prismatiques de section transversale de 40 mm x 40 mm et de 160 mm de longueur. Ces derniers nous permettent de réaliser les essais portant sur la résistance mécanique à la compression. Les éprouvettes sont immédiatement versées dans les moules et on rase ensuite le bord. L'âge des éprouvettes est compté à partir du moment du malaxage du ciment et de l'eau.

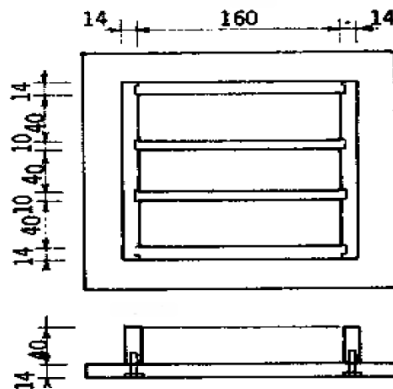


Figure 13: Moule cubique 4*4*16

VII.2.6. Conservations des éprouvettes

Le démoulage s'effectue avec précaution après 24 heures. Les éprouvettes sont étiquetées et sont ensuite immergées dans un bassin contenant de l'eau à une température de 20°C. Et elles ne sont retirées du bain qu'à environ 15 minutes avant la pratique des essais mécaniques.



Photo 8: Bassin de conservation des éprouvettes

VII.3. ESSAIS MECANIQUES

VII.3.1. Surfaçage : Méthode au mortier de soufre

Une rectification de l'éprouvette est des fois utile. Quand des imperfections de forme de l'éprouvette existent, par exemple deux surfaces opposées ne sont pas parfaitement parallèles, un surfaçage s'avère dans ce cas utile.

Avant le surfaçage, s'assurer que l'extrémité de l'éprouvette à surfacier est sèche, qu'elle est propre et que toutes les particules étrangères ont été éliminées.

Faire descendre verticalement l'une des extrémités de l'éprouvette dans un mortier de soufre en fusion préalablement déversé sur un plateau horizontal. Laisser durcir le mélange avant de répéter cette opération pour l'autre extrémité. Utiliser une hausse de surfaçage pour assurer que les deux surfaces sont parallèles et de l'huile minérale de démoulage comme démoulant pour les plateaux/moules.

VII.3.2. Résistance à la flexion

C'est un facteur important pour les éléments de structure (solives et poutres). Seules les éprouvettes de forme prismatique font l'objet de mesure de la résistance en flexion. Le protocole d'opération de l'essai est :

- essayer la surface de l'éprouvette pour éliminer toute humidité et tout corps étrangers sur sa surface ;
- placer l'éprouvette d'essai sur la machine, en vérifiant qu'elle est convenablement centrée ;

➤ braquer ensuite le levier de la machine de manière à laisser passer les billes de la machine et enregistrer le poids des billes correspondant à la rupture et enfin calculer la sollicitation y afférente.

Il est à noter que les deux parties obtenues après la casse sont passées ensuite au test de résistance à la compression.

La résistance à la flexion est exprimée à 0.1 MPa près, et est donnée par l'équation suivante :

$$R_{cf} = \frac{F * I}{d_1 * d_2^2}$$

Avec R_{cf} : la résistance en flexion, exprimée en méga pascals (MPa) ;

F : la charge maximale, exprimée en Newtons ;

I : est l'écartement entre les rouleaux d'appui, en millimètres ;

d_1 et d_2 : les dimensions latérales de l'éprouvette, en millimètres.4



Photo 9: Appareil de mesure de la résistance à la flexion

VII.3.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression influe énormément sur les fondations et l'appui principal des bâtiments.

Pour mesurer la résistance à la compression de l'éprouvette, on procède comme suit :

- ❖ premièrement, il faut éliminer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette et les petites particules se trouvant sur le plateau de la machine ;
- ❖ deuxièmement placer les éprouvettes bien droites et de façon à ce que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens du coulage ;

❖ troisièmement, elles sont chargées jusqu'à rupture dans la machine pour essai de compression et la charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression est enregistrée.

La résistance à la compression est exprimée à 0.5 MPa près, et est donnée par l'équation suivante :

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

Avec R_c : la résistance en compression, exprimée en mégapascals (MPa)

F : la charge maximale, exprimée en Newtons ;

A_c : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette



Photo 10: Presse à béton

VII.4. LES RESULTATS

Après avoir effectué les analyses des différents ajouts cimentaires, nous avons pu obtenir les résultats résumés dans le tableau suivant.

Tableau 28: Analyses chimiques des matériaux

Matériaux	Constituants					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PF
Pouzzolane	6,25	0,12	0,37	51,1	0,74	36,2
Latérites	18,01	30,12	28,75	-	0,75	18,45
Cendre de balle de riz	95,34	0,71	0,09	-	0,54	3,05
Cipolin	46,6	20	8,75	-	-	-

Pour étudier la reproductibilité des essais, quelques essais sont nécessaires. Pour cela on a confectionné des éprouvettes pour mesurer la résistance à la compression. Pour plus de précision et pour ne pas avoir d'ambiguïté, on a effectué trois écrasements pour la résistance à la flexion et six avec la presse à béton selon l'indication de la norme portant sur les essais sur les ciments. Et on a pris la moyenne. Ces essais ont été faits au laboratoire LAGEOTEC. Le tableau 29 suivant résume les résultats obtenus.

Tableau 29: Résultats obtenus

	7 jours		14 jours		28 jours	
	Cubique	Cylindrique	Cubique	Cylindrique	Cubique	Cylindrique
ciment pur	15,60	9,00	17,30	25,30	25,30	34,00
Cp20	13,13	13,67	15,90	16,02	26,57	28,43
Cp40	10,20	6,00	18,71	8,86	23,40	13,70
R35	6,30	7,00	9,26	13,57	13,90	16,00
L35	6,40	7,10	17,42	19,10	24,00	28,90
L20	11,20	15,58	14,50	18,30	21,30	26,42
P20	9,90	24,20	12,60	25,40	17,40	33,40
P35	5,60	5,80	11,58	21,40	23,30	32,80
P10L5R5	9,20	17,70	16,70	22,20	24,80	28,70
P5L10R5	9,50	17,40	14,20	22,20	25,10	30,60
P5L10R15	10,50	10,30	15,60	15,30	21,30	22,80
P25R17,5	7,60	4,50	9,61	8,03	19,30	19,30

VII.5. APPLICATION DE LA MODELISATION A CES RESULTATS

VII.5.1. *Ecart entre éprouvettes cylindriques et cubiques*

On ne retrouve pas les mêmes résultats avec les éprouvettes cubiques et cylindriques. La valeur absolue des différences entre les résultats varient de 0.12 à 16 MPa selon le tableau 30 suivant :

Tableau 30: Ecart enregistrés : cubique-cylindrique

Echantillon	7 jours	14 jours	28 jours
ciment pur	6,60	-8,00	-8,70
Cp20	-0,54	-0,12	-1,86
Cp40	4,20	9,85	9,70
R35	-0,70	-4,31	-2,10
L35	-0,70	-1,68	-4,90
L20	-4,38	-3,80	-5,12
P20	-14,30	-12,80	-16,00
P35	-0,20	-9,82	-9,50
P10L5R5	-8,50	-5,50	-3,90
P5L10R5	-7,90	-8,00	-5,50
P5L10R15	0,20	0,30	-1,50
P2,5R17,5	3,10	1,58	0,00
moyenne	-1,93	-3,53	-4,12

C'est le mélange composé de 20% de pouzzolane et 80% de ciment qu'on enregistre le plus de différence. A 28 jours les résultats obtenus avec les éprouvettes cylindriques sont bonnes par rapport aux cubiques, mais à l'âge de 7 et 14 jours, on ne peut pas tirer de conclusion. La moyenne des valeurs absolues de ces écarts est de 5 MPa. Dans tous les cas, le sens de variation des écarts enregistrés est le même (toutes les courbes sont concaves). La modélisation de ces écarts nous a permis de tracer les courbes suivantes :

A 7 jours, l'équation du parabole de regression est :

$$E = 1,21.10^{+01} + -4,98.10^{+00}t + 3,39.10^{-01}t^2$$

Avec E : ecart entre résistance à la compression (cubique-cylindrique)

t : taux de substitution du ciment

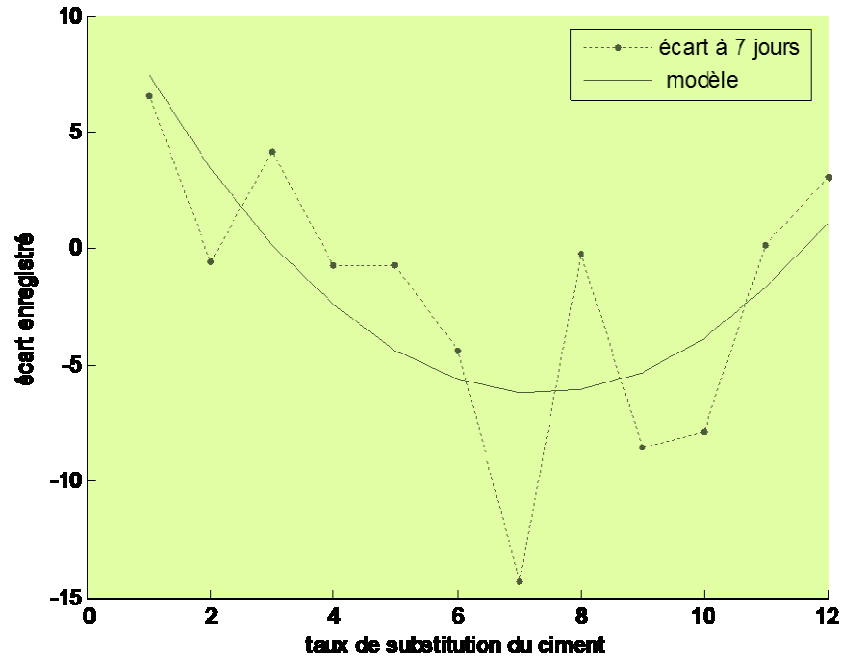


Figure 14: Modélisation des écarts à 7 jours

A 14 jours, l'équation du parabole de regression est

$$E = 3,29 \cdot 10^{+00} + -2,58 \cdot 10^{+00e} t + 1,83 \cdot 10^{-01} t^2$$

Avec E : ecart entre résistance à la compression (cubique-cylindrique)

t : taux de substitution du ciment

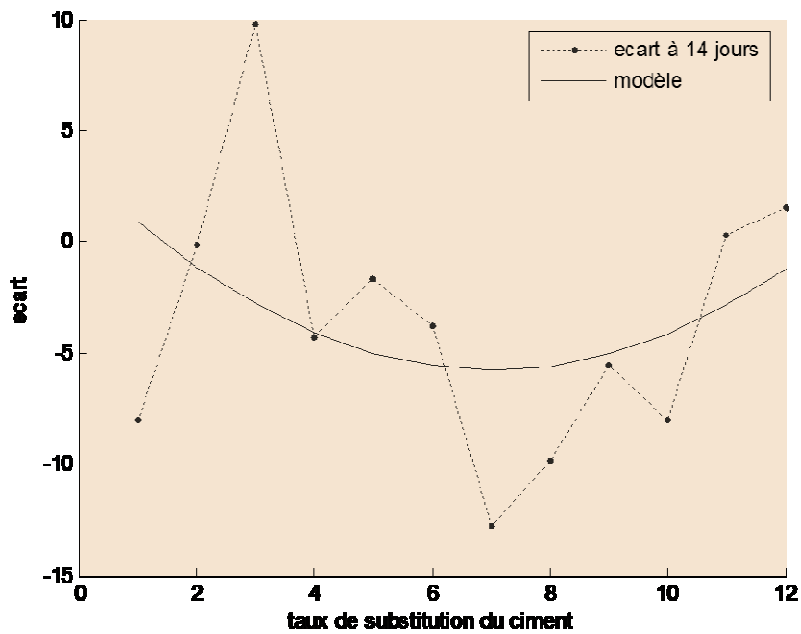


Figure 15: Modélisation des écarts à 14 jours

A 28 jours, l'équation du parabole de regression est

$$E = 2,13.10^{+00} + -2,42.10^{+00}t + 1,75.10^{-01}t^2$$

Avec E : ecart entre résistance à la compression (cubique-cylindrique)

t : taux de substitution du ciment

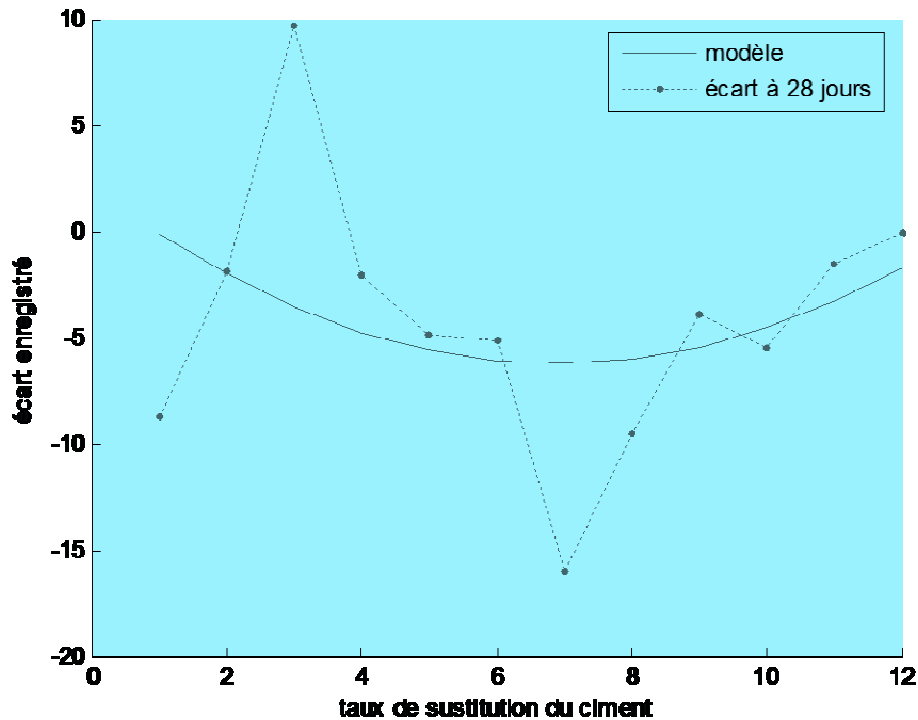


Figure 16: Modélisation des écarts à 28 jours

VII.5.2. Modélisation des résistances à la compression en fonction des teneurs en ajouts

La modélisation des résultats par la reproduction des essais nous donne les résultats suivants :


➤ CIMENT MELANGE AVEC DU CIPOLIN

Tableau 31: Modélisation de la reproduction des essais sur le ciment CPA-C

Echantillon	7 jours		14 jours		28 jours	
	cubique	cylindrique	cubique	cylindrique	cubique	Cylindrique
ciment	15,60	9,00	17,30	25,30	25,30	34,00
Cp20	13,13	13,67	15,90	16,02	26,57	28,43
Cp40	10,20	6,00	18,71	8,86	23,40	13,70

coeff	cubique			cylindrique		
a1	$-5,80.10^{-06}$	$-8,21.10^{-06}$	$-1,15.10^{-05}$	$7,14.10^{-08}$	$5,86.10^{-06}$	$1,68.10^{-05}$
a2	$-6,29.10^{-05}$	$-2,97.10^{-04}$	$-4,65.10^{-04}$	$-1,11.10^{-04}$	$-1,48.10^{-05}$	$4,63.10^{-04}$
a3	$-2,31.10^{-04}$	$-2,24.10^{-04}$	$-2,39.10^{-04}$	$-1,02.10^{-05}$	$1,74.10^{-04}$	$1,28.10^{-04}$
a4	$2,04.10^{-04}$	$-6,58.10^{-03}$	$-5,37.10^{-03}$	$-4,23.10^{-04}$	$4,60.10^{-03}$	$1,14.10^{-02}$
a5	$1,50.10^{-02}$	$1,57.10^{-02}$	$-1,47.10^{-03}$	$-1,62.10^{-02}$	$-2,30.10^{-02}$	$-2,22.10^{-02}$
a6	$1,07.10^{-02}$	$2,99.10^{-02}$	$4,50.10^{-02}$	$1,41.10^{-02}$	$-7,34.10^{-03}$	$-4,56.10^{-02}$
a7	$-1,17.10^{-01}$	$2,99.10^{-02}$	$-1,41.10^{-01}$	$-8,59.10^{-02}$	$-4,19.10^{-02}$	$-1,40.10^{-01}$
a8	$1,55.10^{-01}$	$-3,99.10^{-01}$	$2,17.10^{-01}$	$-1,09.10^{-02}$	$4,36.10^{-01}$	$4,06.10^{-01}$
a9	$2,52.10^{+01}$	$5,81.10^{+01}$	$9,31.10^{+01}$	$2,18.10^{+01}$	$-1,65.10^{+01}$	$-6,61.10^{+01}$

Les expressions et les courbes représentatives des fonctions modèles obtenues par la modélisation de la résistance à la compression en fonction des taux de substitution du ciment sont :

 Cubique 7 jours

$$R = -5,80E-06x_1^2 x_2^2 + -6,29E-05 x_1^2 x_2 + -2,31E-04 x_1 x_2^2 + 2,04E-04 x_1^2 + 1,50E-02 x_2^2 + 1,07E-02 x_1 x_2 + -1,17E-01x_1 + 1,55E-01 x_2 + 2,52E+01$$

 Cylindrique 7 jours

$$R = 7,14E-08 x_1^2 x_2^2 + -1,11E-04 x_1^2 x_2 + -1,02E-05 x_1 x_2^2 + -4,23E-04 x_1^2 + -1,62E-02 x_2^2 + 1,41E-02x_1 x_2 + -8,59E-02 x_1 + -1,09E-02 x_2 + 2,18E+01$$

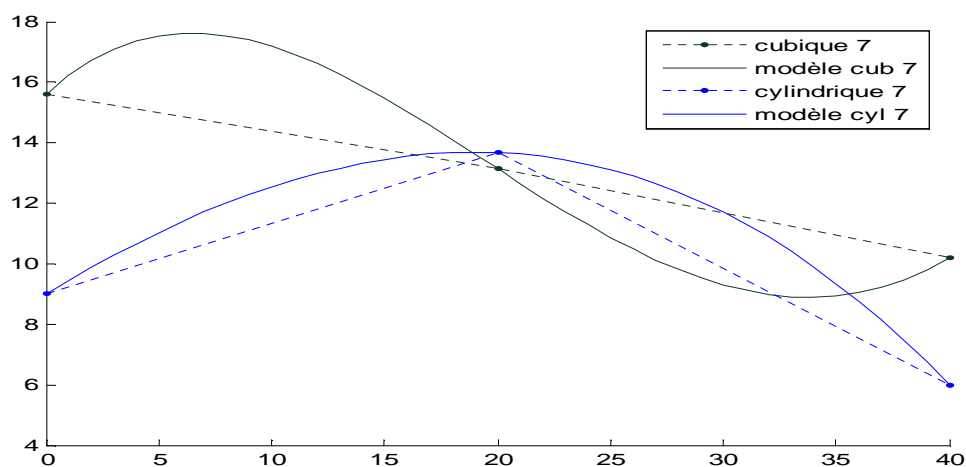




Figure 17: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 7 jours

 Cubique 14 jours

$$R = -8,21E-06 x_1^2 x_2^2 + -2,97E-04 x_1^2 x_2 + -2,24E-04 x_1 x_2^2 + 6,58E-03 x_1^2 + 1,57E-02 x_2^2 + 2,99E-02 x_1 x_2 + 2,99E-02 x_1 + -3,99E-01 x_2 + 5,81E+01$$

 Cylindrique 14 jours

$$R = 5,86E-06 x_1^2 x_2^2 + -1,48E-05 x_1^2 x_2 + 1,74E-04 x_1 x_2^2 + 4,60E-03 x_1^2 + -2,30E-02 x_2^2 + -7,34E-03 x_1 x_2 + -4,19E-02 x_1 + 4,36E-01 x_2 + -1,65E+0$$

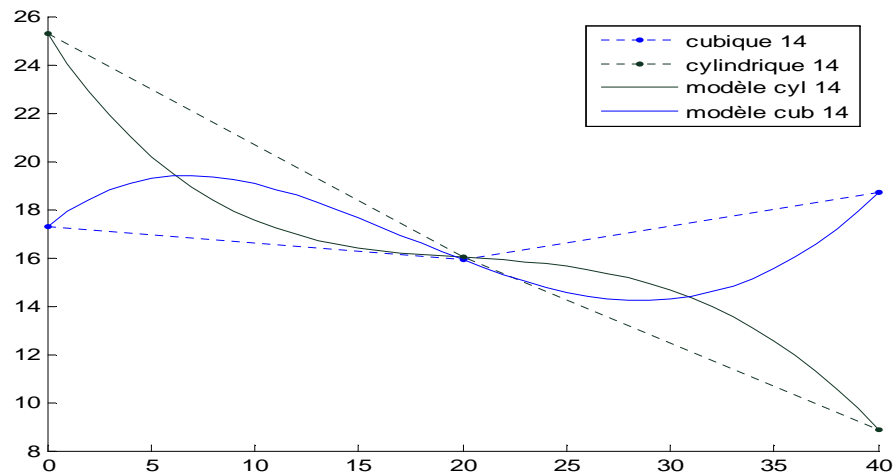


Figure 18: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 14 jours

 Cubique 28 jours

$$R = -1,15E-05 x_1^2 x_2^2 + -4,65E-04 x_1^2 x_2 + -2,39E-04 x_1 x_2^2 + -5,37E-03 x_1^2 + -1,47E-03 x_2^2 + 4,50E-02 x_1 x_2 + -1,41E-01 x_1 + 2,17E-01 x_2 + 9,31E+01$$

 Cylindrique 28 jours

$$R = 1,68E-05 x_1^2 x_2^2 + 4,63E-04 x_1^2 x_2 + 1,28E-04 x_1 x_2^2 + 1,14E-02 x_1^2 + -2,22E-02 x_2^2 + -4,56E-02 x_1 x_2 + -1,40E-01 x_1 + 4,06E-01 x_2 + -6,61E+01$$

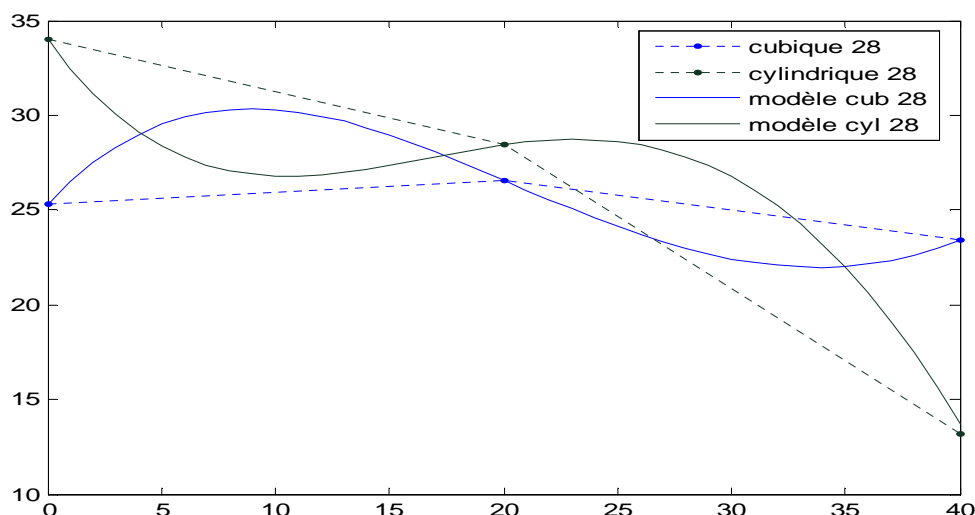



Figure 19: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 28 jours


➤ CIMENT MELANGE AVEC DE LA POZZOLANE

Echantillon	7 jours		14 jours		28 jours	
	cubique	cylindrique	cubique	cylindrique	cubique	cylindrique
ciment pur	15,60	9,00	17,30	25,30	25,30	34,00
P20	9,90	24,20	12,60	25,40	17,40	33,40
P35	5,60	5,80	11,58	21,40	23,30	32,80
coeff reg	cubique			cylindrique		
a1	$3,82.10^{-06}$	$-8,50.10^{-06}$	$-5,07.10^{-06}$	$7,78.10^{-06}$	$-1,18.10^{-05}$	$1,22.10^{-05}$
a2	$3,52.10^{-05}$	$-1,42.10^{-04}$	$-8,56.10^{-05}$	$3,04.10^{-04}$	$-4,49.10^{-04}$	$2,80.10^{-04}$
a3	$-8,87.10^{-05}$	$4,57.10^{-04}$	$6,58.10^{-04}$	$-2,70.10^{-04}$	$4,54.10^{-04}$	$-4,92.10^{-04}$
a4	$3,94.10^{-04}$	$-2,36.10^{-03}$	$1,73.10^{-03}$	$4,66.10^{-03}$	$-1,04.10^{-02}$	$7,16.10^{-03}$
a5	$-7,43.10^{-03}$	$-1,44.10^{-02}$	$-3,57.10^{-02}$	$-1,89.10^{-02}$	$-4,92.10^{-02}$	$-4,31.10^{-03}$
a6	$-1,10.10^{-02}$	$8,37.10^{-03}$	$-2,12.10^{-02}$	$-3,51.10^{-03}$	$1,81.10^{-02}$	$-4,34.10^{-02}$
a7	$5,13.10^{-02}$	$4,74.10^{-01}$	$-3,60.10^{-01}$	$-4,84.10^{-01}$	$1,54.10^{+00}$	$-8,52.10^{-01}$
a8	$2,96.10^{-01}$	$6,99.10^{-01}$	$2,11.10^{+00}$	$-7,37.10^{-01}$	$2,86.10^{+00}$	$1,40.10^{+00}$
a9	$6,53.10^{+00}$	$-6,51.10^{+00}$	$4,40.10^{+01}$	$1,08.10^{+01}$	$-2,47.10^{+01}$	$4,76.10^{+01}$

Les expressions et les courbes représentatives des fonctions modèles obtenues par la modélisation de la résistance à la compression en fonction des taux de substitution du ciment sont :

 *Cylindrique 7 jours*

$$R = 7,78E-06 x_1^2 x_2^2 + 3,04E-04 x_1^2 x_2 + -2,70E-04 x_1 x_2^2 + 4,66E-03 x_1^2 + -1,89E-02 x_2^2 + -3,51E-03 x_1 x_2 + -7,37E-01 x_1 + -7,37E-01 x_2 + 1,08E+01$$

 *Cubique 7 jours*

$$R = 3,82E-06 x_1^2 x_2^2 + 3,52E-05 x_1^2 x_2 + -8,87E-05 x_1 x_2^2 + 3,94E-04 x_1^2 + a_5 x_2^2 + -1,10E-02 x_1 x_2 + 5,13E-02 x_1 + 2,96E-01 x_2 + 6,53E+00$$

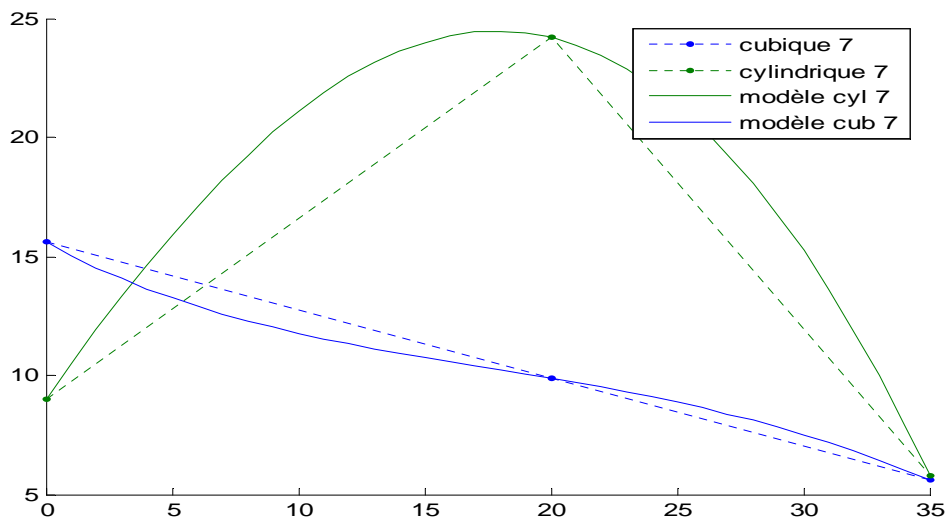


Figure 20: Modélisation de la reproduction des essais CPA-P à 7 jours

 *Cylindrique 14 jours*

$$R = -1,18E-05 x_1^2 x_2^2 + -4,49E-04 x_1^2 x_2 + 4,54E-04 x_1 x_2^2 + -1,04E-02 x_1^2 + -4,92E-02 x_2^2 + 1,81E-02 x_1 x_2 + 1,54E+00 x_1 + 2,86E+00 x_2 + -2,47E+01$$

 *Cubique 14 jours*

$$R = -8,50E-06 x_1^2 x_2^2 + -1,42E-04 x_1^2 x_2 + 4,57E-04 x_1 x_2^2 + -2,36E-03 x_1^2 + -1,44E-02 x_2^2 + 8,37E-03 x_1 x_2 + 4,74E-01 x_1 + 6,99E-01 x_2 + -6,51E+00$$

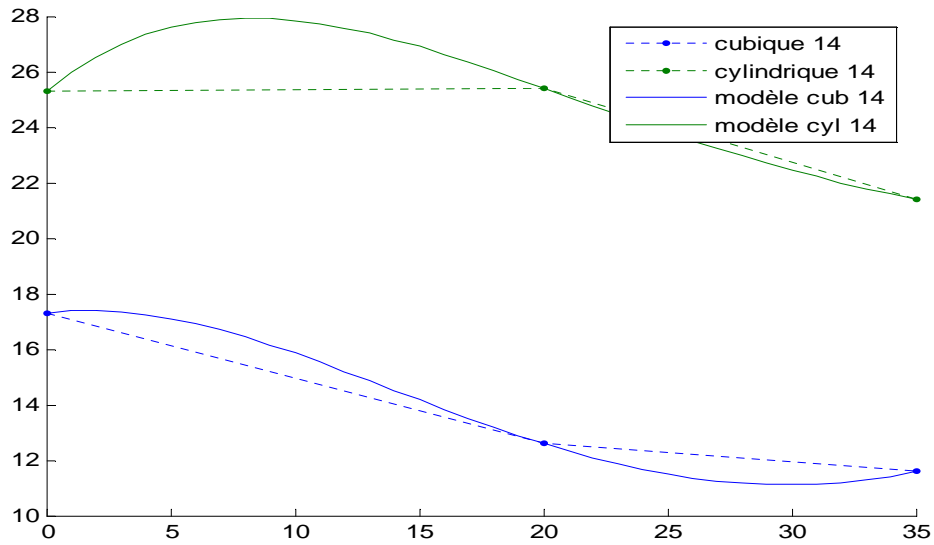


Figure 21: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 14 jours

+ *Cylindrique 28 jours*

$$R = 1,22E-05 x_1^2 x_2^2 + 2,80E-04 x_1^2 x_2 + -4,92E-04 x_1 x_2^2 + 7,16E-03 x_1^2 + -4,31E-03 x_2^2 + -4,34E-02 x_1 x_2 + -8,52E-01 x_1 + 1,40E+00 x_2 + 4,76E+01$$

+ *Cubique 28 jours*

$$R = -5,07E-06 x_1^2 x_2^2 + -8,56E-05 x_1^2 x_2 + 6,58E-04 x_1 x_2^2 + 1,73E-03 x_1^2 + -3,57E-02 x_2^2 + -2,12E-02 x_1 x_2 + -3,60E-01 x_1 + 2,11E+00 x_2 + 4,40E+01$$

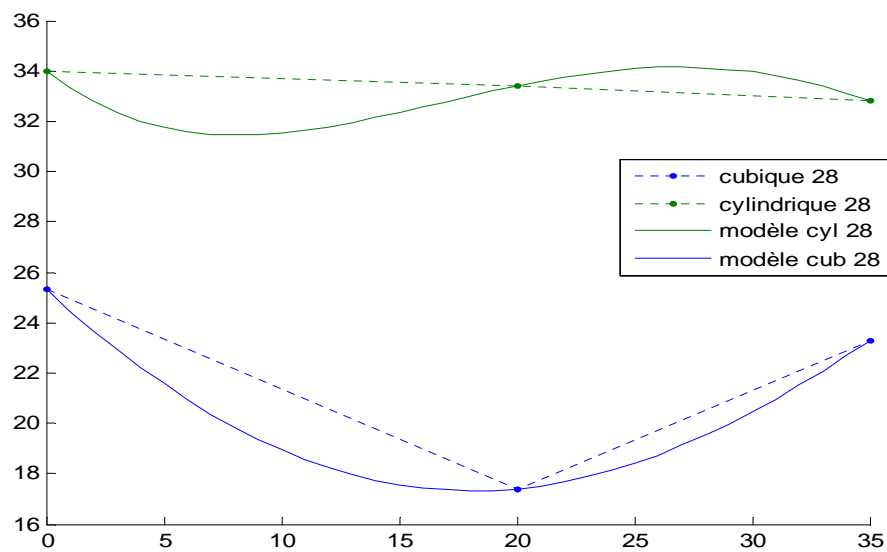


Figure 22: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 28 jours

➤ CIMENT MELANGE AVEC DE LA LATERITE

Echantillon	7 jours		14 jours		28 jours	
	cubique	cylindrique	cubique	cylindrique	cubique	cylindrique
ciment pur	15,60	9,00	17,30	25,30	25,30	34,00
L20	11,20	15,58	14,50	18,30	21,30	26,42
L35	6,40	7,10	17,42	19,10	24,00	28,90
coeff reg	cubique			cylindrique		
a1	$-2,35.10^{-06}$	$-2,84.10^{-06}$	$-1,54.10^{-05}$	$-2,80.10^{-06}$	$2,65.10^{-06}$	$6,36.10^{-06}$
a2	$-2,39.10^{-04}$	$-2,08.10^{-04}$	$-3,99.10^{-04}$	$-3,29.10^{-05}$	$-1,34.10^{-04}$	$-1,24.10^{-04}$
a3	$-1,76.10^{-04}$	$2,11.10^{-04}$	$3,41.10^{-04}$	$1,01.10^{-04}$	$1,85.10^{-04}$	$-3,20.10^{-04}$
a4	$-4,91.10^{-03}$	$-4,88.10^{-03}$	$-4,74.10^{-03}$	$-1,09.10^{-03}$	$3,09.10^{-04}$	$1,62.10^{-03}$
a5	$-6,23.10^{-03}$	$-1,49.10^{-02}$	$2,19.10^{-03}$	$-2,41.10^{-02}$	$-4,16.10^{-02}$	$-3,31.10^{-02}$
a6	$1,53.10^{-02}$	$6,65.10^{-03}$	$3,93.10^{-02}$	$6,00.10^{-03}$	$-2,17.10^{-02}$	$-3,50.10^{-02}$
a7	$9,91.10^{-01}$	$7,91.10^{-01}$	$1,19.10^{+00}$	$3,25.10^{-01}$	$-3,95.10^{-01}$	$-7,74.10^{-02}$
a8	$8,95.10^{-01}$	$8,97.10^{-01}$	$9,27.10^{-01}$	$8,67.10^{-01}$	$2,10.10^{+00}$	$3,79.10^{+00}$
a9	$-3,44.10^{+01}$	$-1,31.10^{+01}$	$-4,61.10^{+01}$	$-1,26.10^{+01}$	$6,17.10^{+01}$	$2,56.10^{+01}$

Les expressions et les courbes représentatives des fonctions modèles obtenues par la modélisation de la résistance à la compression en fonction des taux de substitution du ciment sont :

📊 Cubique 7 jours

$$R = -2,35E-06 x_1^2 x_2^2 + -2,39E-04 x_1^2 x_2 + -1,76E-04 x_1 x_2^2 + -4,91E-03 x_1^2 + -6,23E-03 x_2^2 + 1,53E-02 x_1 x_2 + 9,91E-01 x_1 + 8,95E-01 x_2 + -3,44E+01$$

📊 Cylindrique 7 jours

$$R = -2,80E-06 x_1^2 x_2^2 + -3,29E-05 x_1^2 x_2 + 1,01E-04 x_1 x_2^2 + -1,09E-03 x_1^2 + -2,41E-02 x_2^2 + 6,00E-03 x_1 x_2 + 3,25E-01 x_1 + 8,67E-01 x_2 + -1,26E+01$$

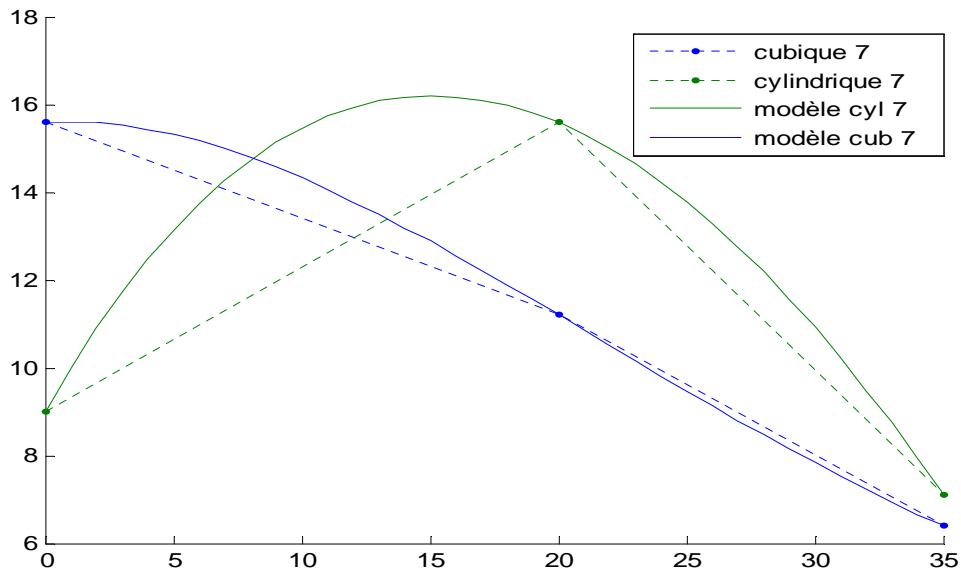


Figure 23: Modélisation de la reproduction des essais CPA-L à 7 jours

+ Cubique 28 jours

$$R = -1,54E-05 x_1^2 x_2^2 + -3,99E-04 x_1^2 x_2 + 3,41E-04 x_1 x_2^2 + -4,74E-03 x_1^2 + 2,19E-03 x_2^2 + 3,93E-02 x_1 x_2 + 1,19E+00 x_1 + 9,27E-01 x_2 + -4,61E+01$$

+ Cylindrique 28 jours

$$R = 6,36E-06 x_1^2 x_2^2 + -1,24E-04 x_1^2 x_2 + -3,20E-04 x_1 x_2^2 + 1,62E-03 x_1^2 + -3,31E-02 x_2^2 + -3,50E-02 x_1 x_2 + -7,74E-02 x_1 + 3,79E+00 x_2 + 2,56E+01$$

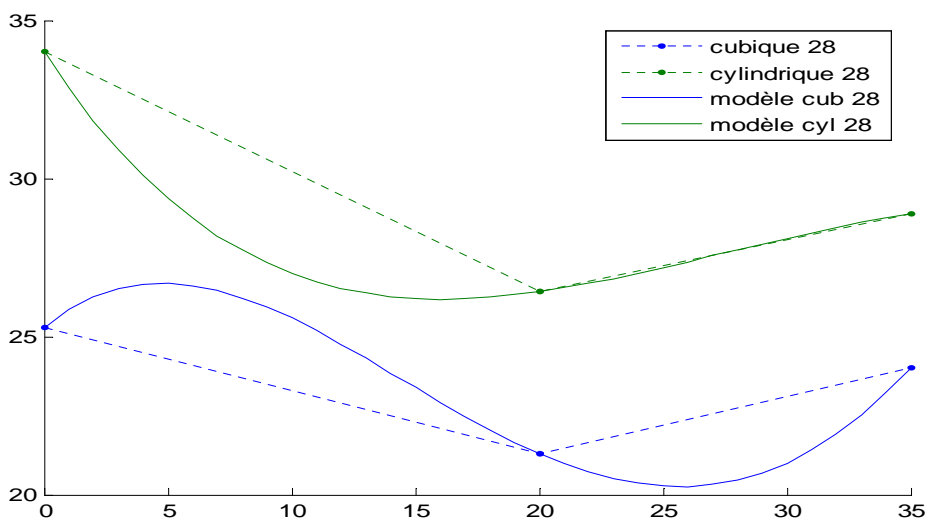


Figure 24: Modélisation de la reproduction des essais CPA-C à 28 jours

VII.6. COMPARAISON DES RESULTATS A CEUX DU PREMIER OUVRAGE

Dans le premier ouvrage, les critères de choix du mélange optimal sont :

- la résistance à 28 jours des échantillons : elle doit être comparable à celle du ciment pur
- la teneur totale en ajouts : elle doit être élevée pour mériter son nom de ciment écologique.

Ce qui conduit l'auteur à retenir comme meilleurs résultats les ciments mélangés : R5P10L5, C20, P20, R5P5L10, R15P5L10 et L20. La reproduction de ces meilleurs résultats nous a donné nos résultats du tableau 32 suivant :

Tableau 32:tableau de comparaison de la reproduction des meilleurs résultats

Echantillon	7 jours			14 jours			28 jours		
	1 ^{er} ouvrage	reproduction		1 ^{er} ouvrage	reproduction		1 ^{er} ouvrage	reproduction	
ciment pur	11,90	15,60	9,00	14,40	17,30	25,30	23,00	25,30	34,00
Cp20	12,06	13,13	13,67	15,37	15,90	16,02	25,70	26,57	28,43
L20	17,50	11,20	15,58	19,20	14,50	18,30	25,50	21,30	26,42
P20	12,06	9,90	24,20	15,37	12,60	25,40	25,70	17,40	33,40
P10L5R5	13,91	9,20	17,70	21,72	16,70	22,20	26,37	24,80	28,70
P5L10R5	13,49	9,50	17,40	20,89	14,20	22,20	25,61	25,10	30,60
P5L10R15	10,25	10,50	10,30	13,94	15,60	15,30	24,07	21,30	22,80

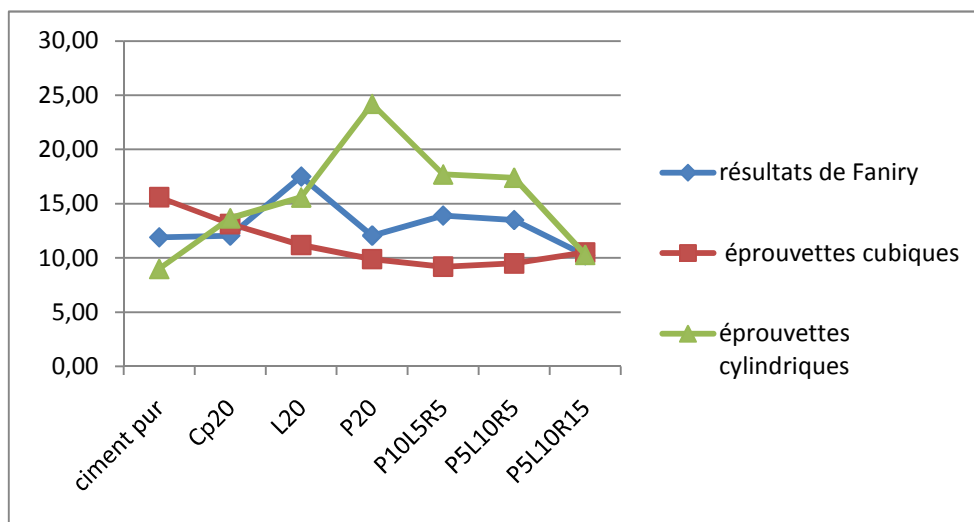


Figure 25:Reproduction des meilleurs résultats à 7 jours

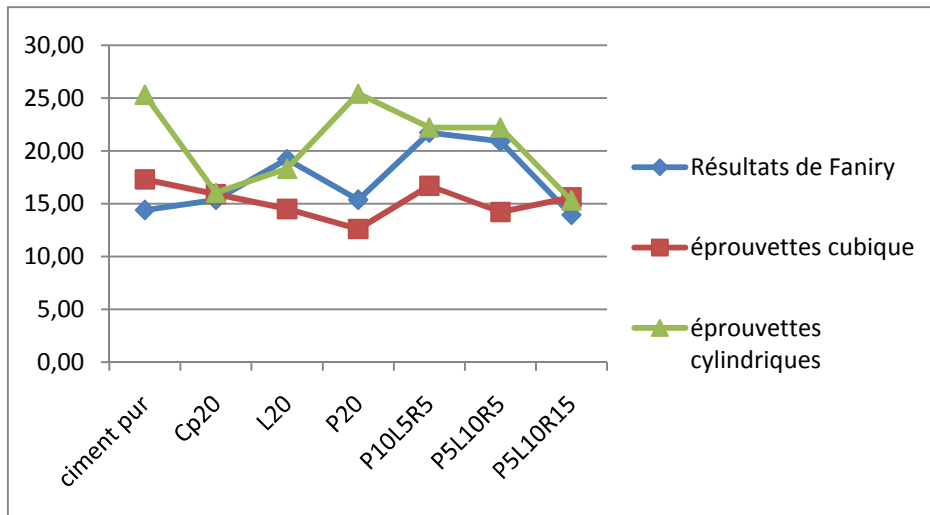


Figure 26: Reproduction des meilleurs résultats à 14 jours

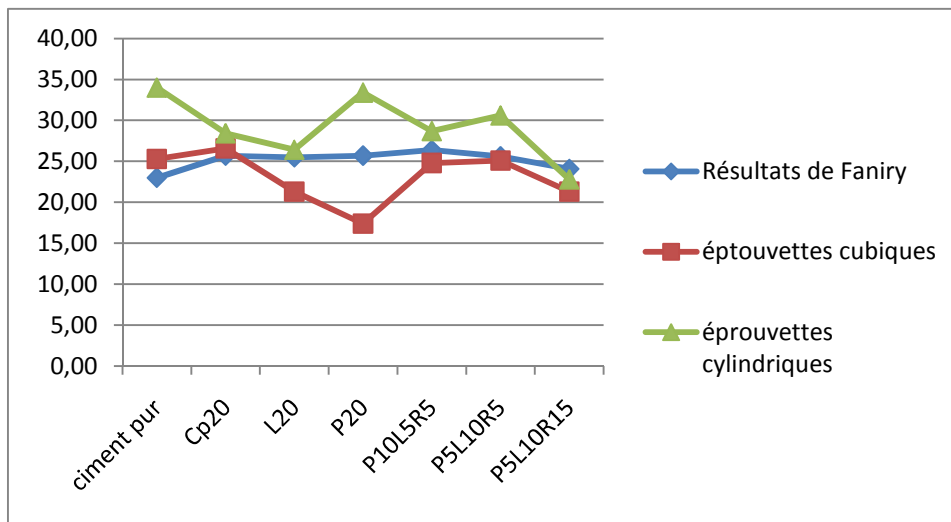


Figure 27: Reproduction des meilleurs résultats à 14 jours

D'après ces résultats, nous pouvons constater qu'aucune des valeurs ne se coïncident. Les résistances à la compression obtenues avec les éprouvettes cylindriques semblent avoir dépassées celles retrouvées dans le premier ouvrage et celles des éprouvettes cubiques. Les différences moyennes entre les différentes mesures est de l'ordre de 2.62 MPa. La plus grande différence observée est celle du ciment P20 à 7 jours, plus précisément entre les résultats du premier ouvrage et les éprouvettes cylindriques. On enregistre 12.14 MPa d'écart.

VII.7. INTERPRETATION DES RESULTATS

Les écarts entre les résultats peuvent être expliqués par une série de causes concourantes. Certaines sont de nature chimique et d'autre sont purement physique. Elles concernent surtout :

- les ajouts ;
- les ciments ;
- l'eau de gâchage ;
- les moules utilisées ;
- effet de forme.

VII.7.1. *Les ajouts*

La provenance des matières premières pour l'élaboration des ciments mélangés sont les même. En effet, les pouzzolanes naturelles proviennent de la région d'Antsirabe, dans le gisement d'Ivohitra : celui exploité par la société Holcim Madagascar. La latérite est celle de Vontovorona, le cipolin quant à lui provient de la région nord-ouest de l'île en l'occurrence dans la partie de Majunga, et enfin la balle de riz des rizeries d'Alakamisy. Les préparations de ces ajouts dans le premier ouvrage ont été reproduites pour la réalisation de nos essais.

Il est possible que la composition chimique de ces matériaux varie selon la partie du gîte d'où ils sont extraits.

VII.7.2. *Ciments*

VII.7.2.1 *Type de ciment*

Les ciments utilisés pour l'étude de ces ciments écologiques avec polyaddition de minérales sont de ciments CPA 45, classe 42.5 dans la nouvelle norme Européenne NF EN 197 – 1.

Dans l'ouvrage « *CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CIMENTS ECOLOGIQUES AVEC POLYADDITIONS MINERALES* », le ciment Portland Artificiel CPA 45 de marque « WOLF », produit japonais est le ciment utilisé. C'était un ciment utilisé et mis en vente à Madagascar à l'époque. Désormais, ce produit n'existe plus sur le marché local. On est alors contraint de changer le ciment par un autre type qui existe sur le marché. Et on a choisi le ciment CEM I 42.5N produit par la société HOLCIM Madagascar. Ce choix est fondé sur le fait que ce produit ne risque pas de manquer sur le marché d'ici peu de temps.

Faisant suite à cela, les compositions chimiques des deux ciments (produit local et produit japonais) ne sont pas les mêmes. Il y a des nuances sur la composition des deux ciments ; ce qui implique une variation de comportement en présence de corps étrangers qui sont ici les ajouts cimentaires. Ainsi, une différence entre les résultats attendus existe.

VII.7.2.2 Classe vraie

Une nuance existe entre la classe de résistance du ciment et la classe vraie de ciment. En effet, la classe de résistance des ciments est la classification suivant les résistances mécaniques simples, plus exactement la résistance à la compression simple. Pour cela, les ciments sont répartis en trois classes selon la valeur minimale de leur résistance normale à 28 jours.

En terme de classe vraie, on ne répartit plus les ciments en trois classes mais on retient la vraie valeur de sa résistance. De ce fait, deux ciments appartenant à la même classe, voire mêmes étiquettes sur les emballages et même fournisseur n'ont pas forcément la même classe vraie.

VII.7.3. Eau de gâchage

L'eau est essentielle dans le gâchage de ciment. En grande quantité, le mortier sera trop fluide et engendre un ressuage important, en petite quantité, tous les grains de ciments ne feront pas prise. Il est nécessaire alors d'avoir la bonne quantité d'eau.

Lors de notre manipulation, on s'est fixé à un temps d'écoulement pour le ciment pur et on a gardé par la suite le rapport E/C constant pour les mélanges. L'ouvrage par lequel nous sommes partis ne nous a pas fourni une donnée exacte sur la quantité d'eau pour effectuer le gâchage. Il n'est pas alors évident que les quantités d'eau utilisées pour l'élaboration des éprouvettes soient égales. D'où les écarts sur les résultats.

VII.7.4. Moule

Les résistances mesurées à partir des moules cylindriques et des moules cubiques ne sont pas les mêmes. En effet, pour les bétons à moule cylindrique, leur résistance est inférieure à celle à moule cubique. Un facteur cinq est à ajouter aux « moules cylindriques » pour qu'ils aient la même valeur qu'aux « moules cubiques ».

L'éclatement pour les moules cylindriques intervient à la mesure de la résistance à la compression de l'éprouvette. Ceci s'explique par des lois mécaniques simples.

VII.7.5. Effet de forme

Des imperfections de forme sont observées quand les éprouvettes sont démoulées. Ainsi on procède aux corrections. Ces corrections ne suffisent pas pour autant pour avoir des valeurs exactes de la résistance. La figure ci-dessous en est une illustration concrète :

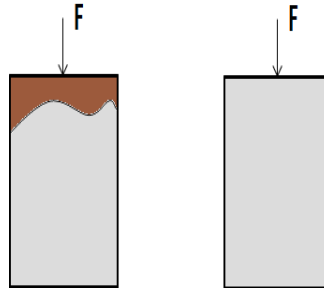


Figure 28: Surfaçage des éprouvettes

La première éprouvette a été enduite de mortier de soufre pour corriger les défauts de forme. Le mortier de soufre a une résistance élevée par rapport à l'éprouvette et il se comporte comme s'il fait partie de la presse à laquelle on mesure la résistance. La force ne s'applique plus sur une surface horizontale de l'éprouvette contrairement à la deuxième éprouvette. C'est pour cette raison qu'on n'aura pas les mêmes résistances.

VII.8. CONCLUSION

Les études effectuées nous ont montré des différences entre les résultats dans le premier ouvrage et la reproduction que nous avons faites. Elle s'observe même sur les essais de la reproduction. Ceci est le fruit de plusieurs paramètres : l'eau de gâchage qui joue un rôle important sur la prise du liant, la géométrie des moules en l'occurrence la forme et l'élancement ne sont pas les mêmes, l'imperfection des formes qui nous pousse à faire du surfaçage avec le mortier de soufre, et enfin les matériaux utilisés surtout le ciment qui ne proviennent pas de même fournisseur. Tous ces paramètres ont leur impact sur les résistances obtenues. Du fait, des perspectives de recherches s'ouvrent sur l'application des ciments polyadditionnés sur d'autres types de ciment que ce soit suivant leur classe ou suivant leurs types, mis en vente sur le marché. D'où l'importance de la normalisation des essais ou l'utilisation de témoin utilisé et confectionné dans les mêmes conditions.

CONCLUSION

Actuellement, les recherches portant sur les polluants de l'atmosphère sont nombreuses. Tout ceci dans le but de réduire leurs effets à long terme sur l'écologie. Un des axes de ces recherches est le ciment écologique avec polyadditions minérales visant à réduire l'émission de dioxyde de carbone des industries cimentaires par la substitution d'une partie du principal constituant du ciment par des ajouts cimentaires moins polluants. Cette substitution a un sens seulement dans le cas où elle permet d'avoir une bonne résistance comparable à celle du ciment pur.

Notre étude nous a permis de trouver des relations entre les résistances à la compression et les teneurs respectives des ajouts cimentaires. En effet, la modélisation par la méthode des moindres carrés pour l'approximation des données numériques partant des résultats trouvés dans le premier ouvrage [1] nous a offert l'opportunité d'avoir de bons modèles pouvant traduire les valeurs expérimentales allant de 95 % voire jusqu'à 100% pour les ciments mélangés avec trois ajouts. Plusieurs étapes sont parcourues pour arriver à ces résultats : le choix de la fonction modèle suivi de la détermination des coefficients de régressions par l'utilisation de l'outil de calcul développé sous MATLAB 7.0 et enfin la représentation graphique des courbes représentatives des modèles sur le même repère que les valeurs expérimentales à partir desquelles la modélisation a été faite. Cette dernière étape est pour apprécier la compatibilité des modèles avec la réalité.

Cependant les études expérimentales que nous avons effectués dans le but d'étudier la reproductibilité de ces essais et le comportement du modèle pour des valeurs autres que celles qui se trouvent dans le premier ouvrage ne nous ont pas permis d'atteindre notre objectif. Les causes sont les différences entre les divers paramètres de réalisation des essais à savoir principalement la nature des ciments, la géométrie des moules et des éprouvettes, l'eau de gâchage et la consistance des coulis. Mais un trait fort que nous pouvons tirer de ces essais est que les résultats de la reproduction avec les éprouvettes cylindriques ont largement dépassés ceux du premier ouvrage.

Ainsi donc, des études plus poussées et orientées sur divers types de ciments jouant sur les divers paramètres seront à entreprendre pour optimiser l'utilisation des ciments écologiques avec polyadditions minérales.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ANDRIARINONY Faniry Rosas : « *Contribution à l'étude des ciments écologiques avec polyadditions minérales* » 2008, mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur matériaux à l'ESPA Département SMM
- [2] DAMIEN Demailly, Atelier changement climatique, « *Les enjeux du développement durable au sein de l'industrie du ciment : réduction des émissions de CO₂* », Octobre 2005-Fevrier 2006
- [3] RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, cours de liants minérales 3eme année SIM (Science et Ingénierie des matériaux) à l'ESPA
- [4] BOGUE R.H., « *Chimie des ciments Portland* », Eyrolles-1976
- [5] PAPADAKIS « *Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre* », Dunod-1970
- [6] BERARD-BERGERY&all, « *La fabrication du ciment français* », Eyrolles-1976
- [7] RANAIVONIARIVO 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
- [8] DUMAS, « *Notes générales sur les caractéristiques des ciments et recommandation en pays tropicaux* », Dunod-1964
- [9] Filière de l'HABITAT, « *Le ciment est une matière grise stratégique* », revue N°6-Mars 1984
- [10] BICH Christelle, « *Contribution à l'activation thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activités pouzzolanique* » ; 2005, Thèse de Docteur en Génie civil de l'INSA Lyon
- [11] [www. Auverge. Volcan.com / liens htm](http://www.Auverge.Volcan.com/liens.htm)
- [12] RAKOTOZAFY Samuel, cours d'analyse numérique 4^{ème} année SIM à l'ESPA
- [13] MURRAY R. SPIEGEL, PROBABILITES ET STATISIQUE, SERIE SCHAUM 1991
- [14] www.Wikipédia.com
- [15] Aide MATLAB 7.0

ANNEXES

ANNEXE I: Résistance à la compression : éprouvettes cubiques

Echantillon	epr1 7j	epr2 7j	epr3 7j	epr1 14j	epr2 14j	epr3 14j	epr1 28j	epr2 28j	epr3 28j	moyenne 7	moyenne 14	moyenne 28
CPA 45	15,60	15,70	15,50	18,00	17,60	16,40	26,60	23,00	25,40	15,60	17,33	25,00
C20	3,00	3,30	3,10	15,40	16,10	16,20	26,30	26,30	27,10	3,13	15,90	26,57
L20	9,90	10,80	12,80	14,70	14,50	14,30	22,10	20,60	21,30	11,17	14,50	21,33
P20	11,30	9,40	8,90	12,80	12,30	12,80	17,40	17,50	17,30	9,87	12,63	17,40
P35	5,90	5,60	5,20	11,56	11,48	11,70	23,20	23,10	23,60	5,57	11,58	23,30
R35	6,30	6,50	6,20	9,00	9,54	9,24	13,90	13,80	13,90	6,33	9,26	13,87
C40	8,20	10,50	11,90	16,70	19,92	19,49	25,00	24,50	20,70	10,20	18,70	23,40
L35	6,50	6,50	6,30	6,58	12,03	9,16	23,50	24,10	24,30	6,43	9,26	23,97
P10L5R5	9,10	9,40	9,20	18,40	14,80	17,00	26,40	24,00	24,00	9,23	16,73	24,80
P5L10R5	10,50	8,60	9,40	13,00	14,70	14,80	24,00	26,00	25,30	9,50	14,17	25,10
P5L10R15	10,60	10,30	10,60	15,40	15,60	15,90	23,00	19,50	21,50	10,50	15,63	21,33
P2,5R17,5	7,70	7,50	7,60	13,20	18,50	15,00	18,70	20,00	19,10	7,60	15,57	19,27

ANNEXE II : Résistance à la compression : éprouvettes cylindriques

Echantillon	epr1 7j	epr2 7j	epr3 7j	epr1 14j	epr2 14j	epr3 14j	epr1 28j	epr2 28j	epr3 28j	moyenne 7	moyenne 14	moyenne 28
CPA 45	7,70	8,30	11,20	25,60	26,00	24,20	35,00	33,00	34,00	9,07	25,27	34,00
C20	14,00	15,90	18,16	26,30	28,65	24,76	32,10	35,00	34,90	16,02	26,57	34,00
L20	21,30	21,20	21,41	18,30	17,60	19,00	27,31	28,28	29,71	21,30	18,30	28,43
P20	25,10	23,50	24,90	24,90	25,60	25,70	32,50	33,10	33,90	24,50	25,40	33,17
P35	6,40	6,10	4,80	19,16	22,76	21,99	31,80	35,80	30,80	5,77	21,30	32,80
R35	7,10	6,90	7,00	12,96	13,78	13,96	16,90	14,60	16,40	7,00	13,57	15,97
C40	7,00	5,90	5,20	8,86	10,13	7,60	15,60	12,60	12,80	6,03	8,86	13,67
L35	7,30	7,00	6,90	19,30	18,90	19,10	28,60	27,90	30,30	7,07	19,10	28,93
P10L5R5	18,50	17,20	17,50	22,60	20,20	23,90	29,00	30,10	27,00	17,73	22,23	28,70
P5L10R5	17,20	18,50	16,60	22,60	20,20	23,70	31,90	31,20	29,60	17,43	22,17	30,90
P5L10R15	9,60	10,80	10,60	14,70	15,20	16,00	23,30	23,00	22,00	10,33	15,30	22,77
P2,5R17,5	7,30	6,80	6,40	14,90	15,60	11,40	14,50	16,30	13,50	6,83	13,97	14,77

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES PHOTOS.....	VI
LISTE DES ABREVIATIONS	VII
INTRODUCTION	1
PARTIE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	2
CHAPITRE.I CONTEXTE DE L'ETUDE [2].....	3
I.1 VUE GENERALE	3
I.2 LES EMISSIONS DE CO ₂	3
I.2.1. Les émissions de CO ₂ de l'industrie du ciment.....	3
I.2.2. Les émissions énergétiques	4
I.2.2.1 Présentation.....	4
I.2.2.2 Efficacité énergétique	4
I.2.2.3 Energie de substitution.....	4
I.2.2.4 Des progrès achevés.....	4
I.2.3. Emission de procédé.....	5
I.2.3.1 Présentation.....	5
I.2.3.2 Ciments mélangés	5
CHAPITRE.II LES CIMENTS [3].....	6
II.1. DEFINITION	6
II.1.1. Les ciments	6
II.1.2. Les ciments à haute résistances	6
II.2. LES CONSTITUANTS DU CIMENT	6
II.2.1. Le clinker.....	6
II.2.2. Les autres constituants principaux.....	7
II.2.2.1. Laitier granulé de haut fourneau	7
II.2.2.2. Pouzzolanes naturelles.....	7
II.2.2.3. Cendres volantes	8
II.2.2.4. Schistes calcinés	8

II.2.2.5. Calcaires.....	8
II.2.2.6. Fumées de silice.....	8
II.2.3. Les constituants secondaires.....	8
II.2.3.1 Les additifs.....	8
II.2.3.2 Sulfate de calcium.....	9
II.3. NORMALISATION ET CLASSIFICATION.....	9
II.3.1 Les ciments et la normalisation.....	9
II.3.2 La norme européenne EN 197-1.....	9
II.3.2.1 Désignation et marquage :	10
II.3.2.2 Classe de résistance.....	10
II.3.3 Les ciments de la norme NF EN 197-1 (ciments courants).....	11
II.4. CARACTERISTIQUES DES CIMENTS.....	13
II.4.1 Caractéristiques chimiques et minéralogique.....	13
II.4.1.1 Composition chimique élémentaire.....	13
II.4.1.2 Hydraulicité.....	13
II.4.1.3 Chaux de saturation.....	13
II.4.1.4 Modules et valeurs requises.....	14
II.4.1.4.1. Module de chaux MC.....	14
II.4.1.4.2. Module de silice MS :	14
II.4.1.4.3. Module d'alumine (ou oxydique) MA :	14
II.4.2 Caractéristiques physiques [6] [7] [8].....	15
II.4.2.1. Couleur.....	15
II.4.2.2. Finesse de mouture (NF EN 196-6).....	15
II.4.2.3. Densités.....	15
II.4.2.4. Début de prise (NF EN 196-3).....	16
II.4.2.5. Expansion (NF EN 196-3).....	16
II.4.2.6. Retrait (NF P 15 433).....	16
II.4.2.7. Eau de consistance normale.....	16
II.4.3 Caractéristiques mécaniques :	16
II.5. DOMAINES D'UTILISATIONS :.....	17
CHAPITRE.III LES AJOUTS CIMENTAIRES.....	19
III.1. LES POUZZOLANES.....	19
III.1.1. Les pouzzolanes naturelles.....	19

III.1.2. LES POUZZOLANES ARTIFICIELLES.....	20
III.1.2.1. Définition [14]	20
III.1.2.2. Constituants actifs des pouzzolanes artificielles.....	20
III.1.2.3. Latérites calcinées	21
III.1.2.3.1. Définition [15].....	21
III.1.2.3.2. Constituants des latérites.....	21
III.1.2.4. CENDRE DE BALLE DE RIZ [15].....	22
III.2. LE CIPOLIN [16]	22
III.2.1. DEFINITION.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2.2. Caractéristiques mécaniques.....	23
III.2.3. Composition chimique et couleur.....	23
PARTIE II MODELISATION	24
CHAPITRE.IV PRESENTATION DE LA METHODE DES MOINDRES CARRES [17]	
[18] [19] [20]	26
IV.2.1. Construction du système d'équations	27
IV.2.2. Résolution du système d'équations par la méthode de Gauss	29
IV.2.2.1. Théorème de Gauss.....	29
IV.2.2.2. Description de la méthode	30
IV.2.2.3. Règle du pivot maximum.....	31
IV.2.3. Validité du modèle.....	31
CHAPITRE.V NOTION DE PROGRAMMATION ET PRESENTATION DU LOGICIEL	
MATLAB	32
V.1. DEFINITIONS [17]	32
V.1.1. Programmation	32
V.1.2. Langage de programmation	32
V.2. PHASES DE CREATION D'UN PROGRAMME	33
V.2.1. Conception.....	33
V.2.2. Codage	33
V.2.3. Transformation du code source	33
V.2.4. Test du programme	34
V.3. PRESENTATION DE MATLAB [22].....	34
V.4. UTILISATION DE LA PROGRAMMATION	35
V.4.1. Manipulation du logiciel.....	36
V.4.2.1. Installation	36

V.4.2.2. Lancement du logiciel	36
V.4.2.2.1. Menu : Information	37
V.4.2.2.2. Menu : Modéliser et données	37
V.4.2.2.3. Menu : Estimer	37
V.4.2.3. Avantages de son utilisation	38
CHAPITRE.VI PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION.....	40
VI.1. CIMENTS MELANGES AVEC UN AJOUT	40
VI.2. CIMENT MELANGES AVEC DU CIPOLIN	41
VI.3. CIMENT MELANGE AVEC DE LA POUZZOLANE.....	44
VI.4. CIMENT MELANGE AVEC LATERITE.....	47
VI.5. CIMENT AVEC DU CENDRE DE BALLE DE RIZ.....	51
VI.6. CIMENT MELANGES AVEC DEUX ET TROIS AJOUTS	54
PARTIE III ETUDE DE REPRODUCTIBILITE DES ESSAIS	63
CHAPITRE.VII ETUDE DE REPRODUCTIBILITE DES ESSAIS.....	64
VII.1. CARACTERISATION DES MATERIAUX	64
VII.1.1. Granulométrie sédimentometrie	64
VII.1.2. Poids spécifique	64
VII.1.3. Mesure de la masse volumique apparente γ_d	65
VII.2. CONFECTION DES EPROUVETTES	66
VII.2.1. Matériels utilisés	66
VII.2.2. Dosage	66
VII.2.3. Malaxage	67
VII.2.4. Mesure viscosité	67
VII.2.5. Moulages des éprouvettes.....	68
VII.2.6. Conservations des éprouvettes.....	68
VII.3. ESSAIS MECANQUES	69
VII.3.1. Surfaçage : Méthode au mortier de soufre.....	69
VII.3.2. Résistance à la flexion	69
VII.3.3. Résistance à la compression	70
VII.4. LES RESULTATS	71
VII.5. APPLICATION DE LA MODELISATION A CES RESULTATS.....	72
VII.5.1. Ecart entre éprouvettes cylindriques et cubiques	72
VII.5.2. Modélisation des résistances à la compression en fonction des teneurs en ajouts	75

VII.6.	COMPARAISON DES RESULTATS A CEUX DU PREMIER OUVRAGE .	83
VII.7.	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	85
VII.7.1.	Les ajouts	85
VII.7.2.	Ciments.....	85
VII.7.2.1	Type de ciment.....	85
VII.7.2.2	Classe vraie	86
VII.7.3.	Eau de gâchage	86
VII.7.4.	Moule.....	86
VII.7.5.	Effet de forme	87
VII.8.	CONCLUSION	87
CONCLUSION	88
BIBLIOGRAPHIES	89
ANNEXES	i
TABLES DES MATIERES	iii