

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil

Laboratoire de Construction et Environnement (LCE)

Projet de fin d'études

en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Civil

Thème :

Utilisation des réseaux de neurones pour la simulation du comportement des matériaux : réalisation d'un ciment à prise réglable.

Réalisé par :
BENAMEUR Mohamed Yacine
RAHAL Moncef Razine

Encadré par :
Pr. BALI Abderrahim
Dr. SILHADI Kamel

Promotion Juin 2012

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Pasteur Hassen Badi BP182 El-Harrach
16200 Alger (Algérie)
Tel : 213 21 52 53 01/03 – Fax :213 21 52 29 73
www.enp.edu.dz

Remerciements

Nous adressons nos vifs remerciements à nos encadreurs le Professeur Abderrahim BALI et le Docteur Kamel SILHADI pour l'appui scientifique et pour leur présence durant la préparation de notre projet de fin d'études ainsi que pour toutes les connaissances qu'ils nous ont transmises durant ces trois années.

Nous tenons à remercier le Professeur BENYOUCEF du département de génie chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique pour l'aide précieuse qu'il nous a apporté lors de nos recherches sur les réseaux de neurones, de même nous adressons nos plus chaleureux remerciements à Monsieur CHAID, enseignant à l'Université Mohamed Bouguerra de Boumerdes pour sa disponibilité.

Une mention spéciale à Monsieur Ahmed El Mostefa YADI qui nous a soutenus et prodigué son aide précieuse lors de l'utilisation de ses résultats.

Que les membres du jury trouvent ici l'expression de toute notre gratitude pour nous avoir fait l'honneur d'accepter l'examen de notre projet.

Il nous serait impardonnable d'oublier de remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et plus particulièrement nos enseignants de spécialité et notre chef de département le Dr.MITICHE-KETTAB pour tout le savoir qu'ils nous ont transmis, pour leur disponibilité et leurs efforts.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, que tous ceux qui ont su nous soutenir durant sa préparation, que toutes ces personnes trouvent ici l'expression de nos plus chaleureux remerciements.

Dédicace :

À mes parents, en témoignage de ma reconnaissance et mon amour, eux qui m'ont tant appris abondamment donné et même trouvé un prénom original, ils sont et seront toujours un modèle à suivre.

À ma chère sœur Narimane qui reste une « petite » sœur adorable.

À ma Mima et mon tonton Mani que dieu leur prête longue vie.

À YasMine, Yacine, Tahar, Soumeya, Sofiane, Othmane, Nadjib, Meriem, Mehdi, Lyes, Lotfi, Les Walids, Les Nazims B et S, Houssam, Ghalib, Dolly, Boulma, Amine, Anis. Amis ou camarades d'un jour, certains surement compagnons de toujours, pour tous les bons moments passés et à venir.

À la mémoire de mon grand-père et de ma grand-mère qu'ils reposent en paix.

Je dédie ce mémoire

Moncef Razine

À mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

À ma chère sœur Nassima, et mon cher frère Abdelkrim.

À toute ma famille, et tout particulièrement Mam, Tonton Mourad, Tata Lila, Selma et Mehdi.

À Selma, Amine, Dhikra, Ghalib, Meriem, Moncef, Sarah, Soumeya, Walid et tous mes amis qui m'ont soutenu de près ou de loin.

À mes camarades Houssam, Lotfi, Mehdi, Nadjib, Nazim et Walid pour les bons moments passés au cours de ces trois dernières années.

Je dédie ce mémoire.

Yacine

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تطبيق الشبكات العصبونية للمساعدة في تطوير إسمنت ذات أخذ قابل للتعديل ويتكون من خليط من الاسمنت البورتلاندي والاسمنت الألومني. الخلائط تتشكل من إسمنتين من منطقة الجزائر العاصمة (الرايس حميدو، مفتاح) و إسمنت من بني صاف مع نسب مختلفة من الأسمنت الألوميني. وتألف عملنا من التحقق من انطباق محاكاة مقاومة الاسمنت باستخدام شبكات عصبونية "FeedForward" بفضل "مجموعة أدوات الشبكات العصبونية" من MATLAB® نسخة B11. البيانات التجريبية المستخدمة في مشروعنا هي نتيجة للعمل على تطوير الاسمنت ذات أخذ قابل للتعديل الذي أجري في عام 1997 في المعهد الوطني لمواد البناء ببومرداس من طرف أحمد مصطفى يادي .

كلمات البحث : الشبكات العصبونية, MATLAB, المحاكاة الإسمنت, إسمنت ذات أخذ قابل للتعديل.

Résumé

Le but de ce travail est la mise en application des réseaux neuronaux pour l'aide à l'élaboration d'un ciment à prise réglable constitué d'un mélange de ciments Portland et de ciment Alumineux. Les mélanges sont constitués de deux ciments de la zone d'Alger (Rais Hamidou, Meftah) et d'un ciment de Beni-Saf avec des pourcentages divers de ciment alumineux. Notre travail a consisté en la vérification de l'applicabilité puis en la simulation des résistances des ciments à l'aide de réseaux neuronaux FEEDFORWARD par l'utilisation du «neural network toolbox» du logiciel MATLAB® version 11B. Les données expérimentales utilisées au cours de notre projet sont le fruit d'un travail portant sur l'élaboration de ciments à prise réglable réalisé en 1997 à l'Institut National des Matériaux de Construction de Boumerdes par Ahmed El Mostefa YADI.

Mots clefs : Réseaux de neurones, MATLAB, Simulation, Ciments, Ciment alumineux, Prise réglable.

Abstract

The purpose of this work is the use of the neural networks for the preparation of an adjustable setting time cement, constituted of a mixture of Portland cement and High Alumina cement. The blended mixtures are constituted by two cements from Algiers region (Rais Hamidou, Meftah) and cement from Beni-saf with different percentages of additions. Those blended cements were tested and the best mixture was selected. Our work consisted on checking of the applicability and afterward the simulation of the strengths of the cements with the use of FEEDFORWARD neural networks simulated with the neural network tool box of MATLAB®, version 11B. The experimental data used during our work come from a thesis about the preparation of an adjustable setting time cement, done in 1997 at "Institut National des Matériaux de Construction, Boumerdes" by Ahmed El Mostefa Yadi.

Key words: Neural Networks, MATLAB, Simulation, Cements, High aluminates cement, setting time cement.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	vi
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les ciments	
I.1. Introduction	3
I.2. Généralités	3
I.3. Constitution du ciment	4
I.4. Composants du ciment	4
I.5. Mécanismes réactionnels	6
I.6. Evolution physico-chimique de la pâte de ciment	8
I.7. Les différents types de ciment courants	10
I.8. Ciments à prise rapide	12
I.8.1. Ciment prompt naturel (CNP) NF P 15-314	12
I.8.2. Utilisation d'adjuvants associés au ciment	13
I.8.3. Mélange d'un ciment alumineux et un ciment Portland	13
I.9. Conclusion	14
Chapitre II : Les ciments alumineux	
II.1. Introduction	15
II.2. Définition	15
II.3. Propriétés et domaine d'utilisation	16
II.4. Constituants et hydratation	19
II.5. Phénomène de conversion	20
II.6. Comparaison avec le ciment Portland	22
II.7. Conclusion	22
Chapitre III : Caractéristiques et démarche de sélection des ciments d'AEM YADI	
III.1. Introduction	23
III.2. Méthodologie d'expérimentation de M. YADI	23

III.3. Ciment purs choisis	23
III.3.1 Analyse chimique des ciments purs	24
III.3.2 Propriétés physiques et rhéologiques	26
III.3.3 Propriétés mécaniques	26
III.3.4 Observations et conclusions	27
III.4. Etude des mélanges ciment alumineux- ciments purs	27
III.4.1. Consistance normale des pâtes	28
III.4.2. La prise	28
III.4.3. Intervalle de prise ou durée de prise	30
III.5. Mélanges présélectionnés	33
III.6. Etude des mélanges sélectionnés	37
III.7. Conclusion	41

Chapitre IV : Les réseaux de neurones artificiels

IV.1. Introduction	42
IV.2. Généralités.....	42
IV.3. Principe de base.....	42
IV.4. Parcimonie.....	43
IV.5. Analogie biologique	43
IV.6. Composants d'un RNA	44
IV.6.1. Les poids synaptiques	45
IV.6.2. Les fonctions d'activation.....	45
IV.7. Apprentissage d'un RNA	45
IV.7.1. L'apprentissage supervisé	46
IV.7.2. L'apprentissage non supervisé	46
IV.7.3. Les algorithmes d'apprentissage.....	47
IV.7.3.1. La règle delta (apprentissage par correction d'erreur).....	47
IV.7.3.2. La règle de Hebb.....	47
IV.8. Les différents types de RNA	48
IV.8.1. Les réseaux de neurones non bouclés (Feedforward)	48
IV.8.1.1. Le perceptron.....	49
IV.8.1.2. Les perceptrons multicouches (PMC)	50

IV.8.1.3. Les réseaux de neurones à fonctions radiales de base (RBF).....	50
IV.8.1.4. Comparaison entre RBF et PMC	51
IV.8.2. Les réseaux de neurones bouclés (Feedback)	52
IV.9. Conclusion	53
 Chapitre V : Architecture et modélisation	
V.1. Introduction	54
V.2. Choix de l'architecture	54
V.2.1. Choix du type de réseau	54
V.2.2. Choix de la structure du réseau	55
V.2.3. Choix des fonctions d'activation	55
V.2.4. Choix de l'algorithme d'apprentissage	56
V.3. Démarche suivie	57
V.3.1. ETAPE 1 Présélection des meilleurs mélanges	57
V.3.1.1. Mélanges du ciment Rais-Hamidou.....	57
V.3.1.2. Mélanges du ciment Meftah	67
V.3.2. ETAPE 2 Sélection du mélange optimal.....	75
V.3.2.1. Première approche	76
V.3.2.2. Deuxième approche	80
V.4. Interprétation des résultats et conclusion	85
 Conclusion générale	 87
Références bibliographiques	89
Annexes	91

Liste des tableaux

Tableau I- 1: Constituants des ciments courants et leurs notations conventionnelles.....	11
Tableau I- 2: Evolution des résistances garanties du ciment prompt naturel selon la norme NF P 15-314	13
Tableau I- 3 Valeurs minimales garanties (en MPa) des résistances à la compression et la flexion des ciments alumineux selon la norme NF P 15-315.....	14
Tableau II- 1 : Propriétés et domaines d'utilisation des ciments alumineux	18
Tableau II- 2: Tableau comparatif entre le ciment portland et le ciment alumineux	22
Tableau III- 1: Type et classe de résistance des ciments choisis.....	24
Tableau III- 2: Composition chimique des ciments utilisés	24
Tableau III- 3: Composition chimique des ciments utilisés.....	24
Tableau III- 4: Compositions minéralogiques potentielles du ciment alumineux selon les six variantes de calcul de la méthode de J.CALLEJA	25
Tableau III- 5: Composition minéralogique du ciment alumineux	26
Tableau III- 6: Propriétés physiques et rhéologiques des ciments utilisés.....	26
Tableau III- 7: Résistances à la flexion et à la compression des ciments purs.	27
Tableau III- 8: Résistances à la flexion et à la compression du ciment alumineux	27
Tableau III- 9: Pourcentage de Gypse selon les différents ciments	30
Tableau III- 10: Composition des mélanges présélectionnés pour les essais mécaniques.....	33
Tableau III- 11: Résistances à la compression et à la flexion des mélanges Rais-Hamidou présélectionnés en fonction du taux de ciment alumineux.....	34
Tableau III- 12: Résistances à la compression et à la flexion des mélanges Meftah présélectionnés en fonction du taux de ciment alumineux.....	35
Tableau III- 13: Résistances à la compression et à la flexion des mélanges Beni-Saf présélectionnés en fonction du taux de ciment alumineux.....	36
Tableau III- 14: Propriétés physiques et rhéologiques des mélanges retenus.....	38
Tableau III- 15: Propriétés mécaniques des mélanges de Rais Hamidou et de Meftah	39
Tableau III- 16: Comparatif du rapport Silicate tricalcique C3S, sulfo-aluminate de calcium ($r = C3S/S^\circ$) et de la résistance à la compression à 28 jours.....	40
Tableau IV - 1: Tableau récapitulatif des diverses fonctions d'activation	45
Tableau IV - 2 : Tableau récapitulatif des divers algorithmes d'apprentissage.....	47
Tableau IV - 3: Tableau récapitulatif des différents types de RNA et de leurs domaines d'utilisation.....	52
Tableau V - 1 Proportions de ciment alumineux dans les mélanges présélectionnés	57
Tableau V - 2 Valeurs de temps prises en compte pour la phase de présélection (R-H)	57
Tableau V - 3 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH30.....	58
Tableau V - 4 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH35.....	60
Tableau V - 5 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH40.....	62
Tableau V - 6 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH45.....	64
Tableau V - 7 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH50.....	66
Tableau V - 8 Valeurs de temps prises en compte pour la phase de présélection (MFT).....	67

Tableau V - 9 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de MFT15	68
Tableau V - 10 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de MFT20	70
Tableau V - 11 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de MFT25	72
Tableau V - 12 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de MFT30	74
Tableau V - 13 Proportions de ciment alumineux dans les mélanges sélectionnés	75
Tableau V - 14 Valeurs de temps prises en compte pour la phase de sélection.....	75
Tableau V - 15 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH35 (première approche de sélection).....	76
Tableau V - 16 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de MFT20 (première approche de sélection).....	78
Tableau V - 17 Valeurs de temps prises en compte pour la simulation de la phase de sélection (deuxième approche).....	80
Tableau V - 18 Valeurs de temps prises en compte pour l'apprentissage de la phase de sélection (R-H) (deuxième approche)	80
Tableau V - 19 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation des mélanges R-H (deuxième approche de sélection)	80
Tableau V - 20 Valeurs de temps prises en compte pour l'apprentissage de la phase de sélection (MFT) (deuxième approche).....	82
Tableau V - 21 Architecture du réseau utilisé pour la modélisation des mélanges MFT (deuxième approche de sélection).....	83
Tableau V - 22 Valeurs du coefficient de corrélation de la simulation des mélanges R-H (étape de présélection).....	85
Tableau V - 23 Valeurs du coefficient de corrélation de la simulation des mélanges MFT (étape de présélection).....	85
Tableau V - 24 Valeurs du coefficient de corrélation de la simulation de l'étape de présélection.....	85

Liste des figures

Figure I- 1: Aiguilles d'ettringite, plaque de Portlandite – Microscopie source [LERN]	7
Figure I- 2 : Cristaux de Portlandite entourés de gel CSH – Microscopie électronique à balayage [LERM]	7
Figure I- 3: Développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment Portland	8
Figure I- 4: Evolution physico-chimique de la pâte de ciment.	9
Figure II- 1 : De gauche à droite : Ciment AL (71% Al, 51% Al, 40% Al)	16
Figure II- 2: Les différentes phases du processus d'hydratation des ciments alumineux.....	20
Figure II- 3: Hydrates hexagonaux métastable C_2AH_8 , microscopie électronique [Source LERM]	21
Figure II- 4: Hydrates hexagonaux métastable CAH_{10}	21
Figure II- 5: Hydrates hexagonaux cubiques stables C_3AH_6 , microscopie électronique [Source LERM]	21
Figure II- 6: Différentes températures de réaction et volume occupé par les hydrates de calcium.[12].....	22
Figure III- 1 : Evolution de la consistance des mélanges.....	28
Figure III- 2: Courbe d'évolution des débuts de prise des trois types de mélanges	29
Figure III- 3: Evolution comparée du début et de la durée de prise pour les mélanges du CEM II -Rais Hamidou	30
Figure III- 4: Evolution comparée du début et de la durée de prise pour les mélanges de CEM I-Meftah.....	31
Figure III- 5: Evolution comparée du début et de la durée de prise pour les mélanges de CEM IV-Béni-Saf	32
Figure III- 6: Evolution comparée de la résistance à la compression des mélanges de ciments Rais-Hamidou.....	35
Figure III- 7: Evolution comparée de la résistance à la compression des mélanges de ciments de Meftah.....	36
Figure III- 8: Evolution comparée de la résistance à la compression des mélanges de ciments de Béni-Saf.....	37
Figure III- 9 Evolution de la résistance à la compression pour les mélanges retenus.....	40
Figure IV - 1 Les différents composants d'un neurone biologique	43
Figure IV - 2 Analogie entre les neurones biologiques et artificiels.....	44
Figure IV - 3 Allure générale d'un réseau de neurones artificiels	44
Figure IV - 4 Allure générale d'un réseau de neurones de type Feedforward.....	49
Figure IV - 5 Schéma représentatif d'un perceptron simple.....	49
Figure IV - 6 Schéma représentatif d'un perceptron multicouche.....	50
Figure IV - 7 Schéma représentatif d'un réseau RBF.....	51
Figure V - 1 Schéma représentatif de l'architecture globale des RNA utilisés	56
Figure V - 2 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH30 présélectionné.....	58

Liste des figures

Figure V - 3 Courbe de régression linéaire du mélange RH30 présélectionné	59
Figure V - 4 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH35 présélectionné.....	60
Figure V - 5 Courbe de régression linéaire du mélange RH35 présélectionné	61
Figure V - 6 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH40 présélectionné.....	62
Figure V - 7 Courbe de régression linéaire du mélange RH40 présélectionné	63
Figure V - 8 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH45 présélectionné.....	64
Figure V - 9 Courbe de régression linéaire du mélange RH45 présélectionné	65
Figure V - 10 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH50 présélectionné.....	66
Figure V - 11 Courbe de régression linéaire du mélange RH50 présélectionné	67
Figure V - 12 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT15 présélectionné.....	68
Figure V - 13 Courbe de régression linéaire du mélange MFT15 présélectionné	69
Figure V - 14 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT20 présélectionné.....	70
Figure V - 15 Courbe de régression linéaire du mélange MFT20 présélectionné	71
Figure V - 16 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT25 présélectionné.....	72
Figure V - 17 Courbe de régression linéaire du mélange MFT25 présélectionné	73
Figure V - 18 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT30 présélectionné.....	74
Figure V - 19 Courbe de régression linéaire du mélange MFT30 présélectionné	75
Figure V - 20 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH35 sélectionné (première approche)	77
Figure V - 21 Courbe de régression linéaire du mélange RH35 sélectionné (première approche).....	78
Figure V - 22 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT20 sélectionné (première approche)	79
Figure V - 23 Courbe de régression linéaire du mélange MFT20 sélectionné (première approche).....	79
Figure V - 24 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH30 sélectionné (deuxième approche).....	81
Figure V - 25 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH35 sélectionné (deuxième approche)	81
Figure V - 26 Courbe de régression linéaire des mélanges Rais-Hamidou sélectionnés (deuxième approche).....	82
Figure V - 27 Courbe de régression linéaire des mélanges Meftah sélectionnés (deuxième approche).....	83

Figure V - 28 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT20 sélectionné (deuxième approche)	84
Figure V - 29 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT25 sélectionné (deuxième approche)	84
Figure V - 30 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH33 comparées à RH35	86
Figure V - 31 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH33 comparées à RH35	86

Introduction Générale

Introduction générale

Composant essentiel des bétons, les ciments sont les principaux liants utilisés dans le domaine de la construction. Leur fabrication et leur commercialisation qui sont sujettes à diverses inflations en font un matériau d'une importance stratégique.

Les ciments se subdivisent en plusieurs catégories en fonction de leur domaine d'utilisation et des principales caractéristiques recherchées lors de leur mise en œuvre. Mise à part les ciments classiques plusieurs procédés de fabrication de ciments sont développés afin d'en améliorer les performances en tenant compte des impératifs locaux.

Le processus de création de nouveaux ciments fait intervenir une multitude de paramètres et nécessite une batterie de tests et d'essais dont les résultats ne peuvent pas être retrouvés en utilisant des lois analytiques ; l'expérience y est donc essentielle bien que laborieuse et onéreuse.

Le développement de nouveaux outils mathématiques et la naissance de méthodes de calcul numérique basés sur l'intelligence artificielle et les sciences cognitives a permis l'émergence de méthodes de calculs et de modélisation telles que les réseaux de neurones artificiels (RNA).

Ceux-ci ont vite fait l'unanimité dans les différentes disciplines des sciences et de l'ingénierie grâce à leur efficacité, fiabilité et robustesse pour la résolution de problèmes complexes non descriptibles sous forme analytique. Ceci ouvre la voie à l'utilisation de processus de développement se basant à la fois sur une expérimentation ciblée et moins coûteuse couplée à un travail de simulation, qui peut prendre en compte des résultats de travaux antérieurs.

Dans l'optique de mettre en application l'outil neuronal dans les phases de développement d'un ciment, nous nous sommes proposés de procéder à la modélisation du comportement de ciments à prise rapide.

Aussi, notre travail s'est basé sur les recherches menées en 1997 par Ahmed El Mostefa YADI lors de son travail effectué dans le cadre de son mémoire de magister qui a traité de l'élaboration d'un ciment à prise rapide en élaborant des mélanges de ciments Portland et de ciment alumineux.

Notre travail se compose de cinq chapitres dont le premier a pour but de présenter succinctement les principes fondamentaux en ce qui concerne les caractéristiques principales des ciments ordinaires et leur processus d'hydratation.

En second lieu nous nous sommes rapidement intéressés aux ciments alumineux en mettant en évidence la spécificité de leur hydratation et leur complémentarité en mélange avec des ciments portland ordinaires, chose nécessaire pour pouvoir appréhender la démarche d'AEM YADI que nous avons explicité dans le troisième chapitre.

Après nous être focalisé sur la compréhension de la partie ciment, il nous était nécessaire au travers du quatrième chapitre de présenter les caractéristiques et le fonctionnement des réseaux de neurones qui constituent l'essence même de notre projet.

Enfin, après s'être imprégnés de la théorie, nous sommes passés dans le dernier chapitre à la mise en application de celle-ci, dans le but de montrer l'applicabilité des RNA dans la simulation des résistances des mélanges.

CHAPITRE I

Généralités sur les ciments

I.1. Introduction :

Jouant le rôle de liant dans la majorité des bétons, le ciment a un rôle prédominant dans la résistance ainsi que la durabilité des bétons.

Notre objectif au travers ce chapitre est de traiter les différentes définitions, caractéristiques et normes inhérentes aux ciments et ce, en rappelant les bases et techniques nécessaires à la compréhension des différentes phases par lesquelles passe la pâte de ciment.

En premier lieu, nous traiterons des ciments et de leur méthode de fabrication en général, puis nous passerons aux ciments courants et leurs composés qui sont pour la plupart à base de ciment Portland.

En second lieu, nous nous intéresserons aux ciments à prise rapide pour enfin terminer par une étude des mécanismes réactionnels ayant lieu dans les différentes phases du ciment.

I.2. Généralités :

Le terme ciment vient du latin "*caementum*" qui signifie pierre de construction.

Connu depuis l'antiquité il a été utilisé par les égyptiens, les grecs et les romains comme liant sous forme de chaux mélangée à de l'argile.

Matière poudreuse finement broyée constituée d'un mélange de calcaire et de divers oxydes métalliques, le ciment hydraulique se transforme en une gangue en présence d'eau et passe d'un état visqueux à solide par l'augmentation de la cohésion entre ses grains pour atteindre sa résistance finale après quelques jours.

Le phénomène d'hydratation du ciment n'a été expliqué qu'à partir du 19ème siècle au travers des travaux de Louis VICAT qui ont permis de comprendre certains mécanismes régissant la prise et le durcissement de la pâte de ciment.

L'Anglais Joseph ASPADINE a été le premier à déposer en 1824 un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il nomma ciment Portland du fait de sa similitude avec la couleur des pierres des carrières de Portland situées en Manche.

Sujet complexe, le ciment est un matériau polyphasé dont chacune des phases constitutives réagit différemment et dont les produits sont difficilement caractérisés du fait de leur caractère amorphe ou nanocristallin. [1].

Le raidissement ainsi que la prise de la pâte de ciment peuvent être contrôlés en modifiant la nature et les proportions de certains constituants qui jouent un rôle dans l'hydratation.

I.3. Constitution du ciment :

La composition de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec de la silice (SiO₂), de l'alumine (Al₂O₃) et de l'oxyde de fer (Fe₂O₃).

La chaux nécessaire est fournie par des roches calcaires, l'alumine et la silice. L'oxyde de fer vient quant à lui des argiles. Ces matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaires, argiles ou marnes et contiennent d'autres oxydes en plus de ceux déjà mentionnés.

Le constituant principal du ciment est le clinker qui est obtenu par cuisson au moins jusqu'à fusion partielle d'un mélange préalablement fixé de chaux vive (CaO) (75 à 80%), de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃) et d'oxyde de fer (Fe₂O₃) provenant d'argiles (20 à 25%).[1]

Le clinker est ensuite concassé, broyé et mélangé avec du gypse (4%) pour obtenir du ciment Portland.

D'autres types de ciment peuvent être obtenus grâce au rajout lors de la phase de broyage d'éléments minéraux secondaires, tels que :

- Laitier (Résidus des hauts fourneaux en sidérurgie) (S)
- Pouzzolanes (Roches volcaniques) (Z)
- Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W)
- Schistes calcinés (T)
- Calcaires (L, LL)
- Fumée de silice (D)
- Sulfate de calcium

I.4. Composants du ciment :

La majorité des liants hydrauliques ont pour composés chimiques principaux des silicates, des aluminates, des silico-aluminates et fero-aluminates de calcium que l'on symbolise respectivement par C_xS_y, C_xA_y, C_xA_yS_z, C_xA_yF_z, où x,y,z auront des valeurs variables indépendantes.

On note que pour que les composants du ciment réagissent entre eux en présence d'eau, il faut qu'ils aient subi un traitement thermique afin d'avoir une réactivité [2].

On distinguera les oxydes purs qui forment les éléments de base d'un ciment et les composés complexes qui eux varient d'un ciment à un autre.

I.4.1. Les oxydes purs essentiels :

L'oxyde de calcium CaO : Usuellement appelé « chaux vive », il est obtenu par calcination du calcaire CaCO₃ à 825°C. L'oxyde de calcium cristallise dans le système cubique. Il

constitue une base énergétique qui se combine à la silice, l'alumine et l'oxyde de fer sans nécessité de fusion (réaction métamorphique solide-solide). [3]

La silice SiO_2 : Au contraire de la chaux, la silice est polymorphe et se présente fréquemment dans la nature sous les variétés cristallines que sont les quartzs α et β , la tridymite σ , et la cristobalite β ainsi que sous quelques formes vitreuses ou cryptocristallines. [4]

L'hydratation de la silice ne nécessite pas de grandes températures ou pressions. Ainsi en présence de vapeurs d'eau saturées, à la température voisine de 180°C , la silice même cristallisée, réagit avec la chaux pour former des hydrosilicates.

L'alumine Al_2O_3 : Oxyde amphotère qui existe à l'état naturel sous diverses formes cristallines. La plus grande proportion de ce composé se retrouve sous forme combinée surtout avec la silice pour former des silicates anhydres ou hydratés très répandus constituant les roches de la famille des argiles.

L'oxyde de fer Fe_2O_3 : Oxyde amphotère donnant des sels ferriques et des ferrites [4], l'oxyde de fer Fe_2O_3 est la forme la plus intéressante pour le cimentier car facilement réductible.

I.4.2. Les composés complexes :

Les silicates de calcium C_xS_y : Se présentant sous quatre formes, CS , C_3S_2 , C_3S , C_2S , les deux derniers constituent les composés les plus caractéristiques des ciments et montrent de nombreuses formes allotropiques.

Le silicate tricalcique ou alite (C_3S) se présente sous l'aspect de cristaux polygonaux (parallélépipédiques hexagonaux), fréquemment monocliniques. En s'hydratant, il développe des résistances initiales élevées.

Le silicate bi-calcique ou bélite (C_2S) possède quatre variétés allotropiques α , α' , β et γ .

La forme β ou larnite est la forme active la plus fréquente : celle-ci peut cependant dans certaines conditions (refroidissement lent) se transformer en variété inactive γ [4]. Le C_2S est responsable des résistances à long terme.

Les aluminates de calcium C_xA_y : Se présentant sous cinq variétés CA_6 , C_3A_5 , CA , C_5A ou C_{12}A_7 et C_3A , les trois derniers sont caractéristiques des aluminates qui se retrouvent dans les ciments et particulièrement dans le ciment alumineux.

Les ciments Portland ne contiennent que l'aluminate tricalcique C_3A .

Les silico-aluminates de calcium, $\text{C}_x\text{A}_y\text{S}_z$: Se présentent essentiellement sous la forme de deux combinaisons que sont l'anorthite artificielle CAS_2 et la géhlénite C_2AS .

Les ferrites et aluminoferrites de calcium, $C_xA_yF_z$: Ils peuvent être classés parmi les minéraux accessoires dont les plus répandus sont l'aluminoferrite de calcium C_4AF ou brownmillérite et les ferrites mono-calciques CF et di-calciques C_2F .

Leur caractéristique essentielle est une faible réactivité hydraulique [4]

I.5. Mécanismes réactionnels :

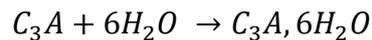
La prise et le durcissement du ciment sont le résultat de réactions qui se passent dès le gâchage du ciment et se poursuivent dans le temps.

Extrêmement complexes, ces réactions ont été énoncées en partie pour la première fois par Louis VICAT lors de son étude sur l'hydratation du ciment anhydre.

A partir du moment où le ciment a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte obtenue sont évolutives dans le temps.

Nous tâcherons de décrire dans ce qui suit la chronologie des réactions d'hydratation qui ont lieu dans la majorité des ciments Portland ainsi que l'évolution physico-chimique de la pâte de ciment.

Première réaction : Hydratation du C_3A



Fortement exothermique, cette réaction rapide entraîne la dissolution du C_3A et sa recristallisation, ce qui cause un raidissement de la pâte en quelques minutes et est responsable des problèmes de prise-éclair.

Afin de palier à ce phénomène chaotique, du gypse est ajouté en petites quantités pour réagir avec le C_3A et donner un composé insoluble, l'ettringite dont la formule chimique est $((CaO)_6 (Al_2O_3) (SO_3)_3, 32H_2O)$ ou $C_3A_3CSH_{32}$.

Composé minéral, l'ettringite se développe à la surface de l'aluminate tricalcique et forme une couche écran constituée d'aiguilles hexagonales ou bâtonnets qui ralentissent la pénétration de l'eau dans le grain de C_3A .

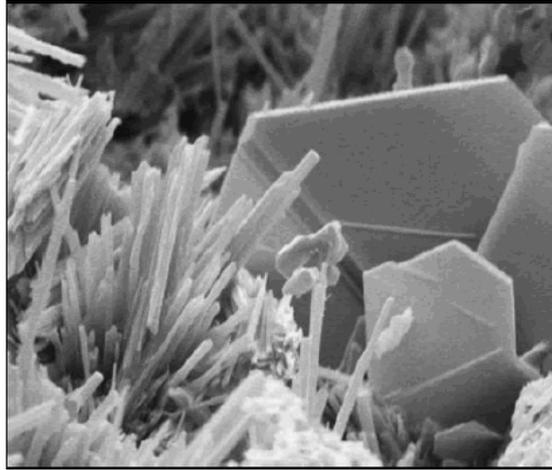
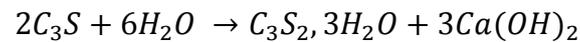


Figure I- 1: Aiguilles d'ettringite, plaque de Portlandite – Microscopie source [LERN]

Seconde réaction : Hydratation de l'alite



Cette réaction assure la résistance à court terme des ciments. [5]

Aussi rapide que la première réaction, l'hydratation de l'alite libère de la Portlandite qui va se combiner avec l'aluminate tricalcique durant la troisième étape, ainsi que des silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui ont le comportement d'un gel et dont l'enchevêtrement comblera les interstices capillaires.

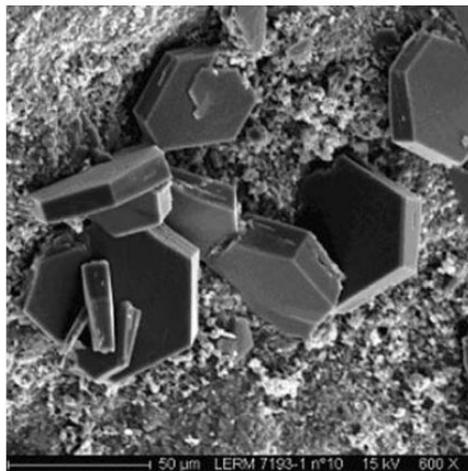
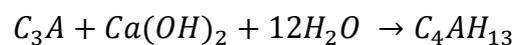


Figure I- 2 : Cristaux de Portlandite entourés de gel CSH – Microscopie électronique à balayage [LERM]

Troisième étape : Combinaison de la Portlandite et de l'aluminate tricalcique :

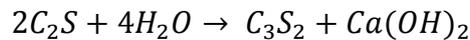


Cette combinaison peut avoir lieu dès le début de l'hydratation en présence de chaux libre.

Quatrième étape : Hydratation des silicates bi-calciques et de l'aluminoferrite tétra-calcique.

Les deux réactions étant lentes et faiblement exothermiques, elles sont traitées durant la même étape.

L'hydratation des silicates bi-calciques permet d'atteindre une haute résistance à long terme et ce, grâce aux CSH qui pénètrent plus en profondeur en comblant les interstices déjà comblés par l'hydratation du C_3S .



L'hydratation de l'aluminoferrite tétra-calcique forme un produit indéfini qui ne joue pas un grand rôle dans la résistance du ciment.



La figure ci-dessous présente le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment Portland.

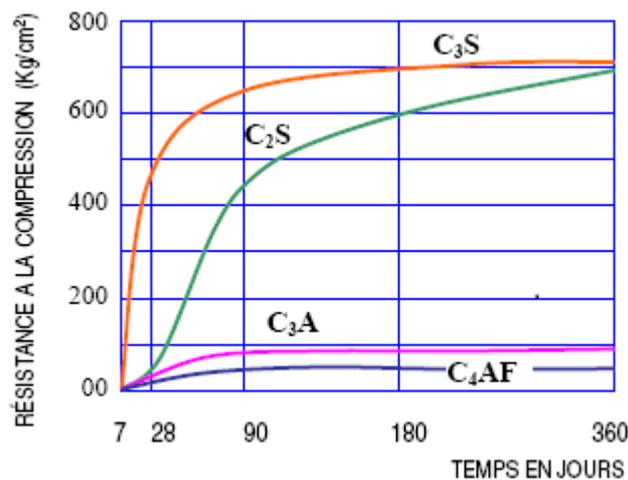


Figure I- 3: Développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment Portland

I.6. Evolution physico-chimique de la pâte de ciment :

L'hydratation du ciment conduit à la modification de la consistance de la pâte de ciment qui passe par les 4 étapes énumérées ci-dessous et que l'on tâchera d'expliciter dans ce qui suit.

1. Le gâchage.
2. La prise
3. Le début du durcissement
4. La suite du durcissement

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau. Le C_3S et le C_3A réagissent en premier pour produire des

composés hydratés et la couche écran d'ettringite qui se forme ralentit les réactions d'hydratation. [5].

Dans le cas des silicates de calcium C_3S et C_2S , la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de $Ca(OH)_2$ en plaquettes hexagonales alors que les silicates de calcium hydratés (CSH) forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment.

Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains.

Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise.

Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel. La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le durcissement qui commence.

La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles et d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment [7].

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés. L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

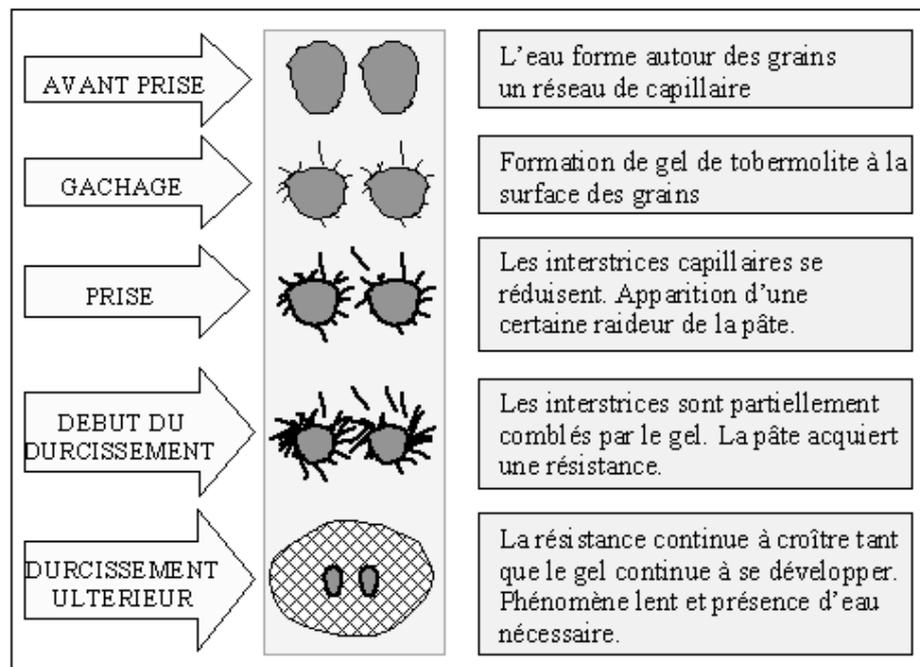


Figure I- 4: Evolution physico-chimique de la pâte de ciment.

I.7. Les différents types de ciment courants :

Le développement de l'usage du ciment Portland surtout depuis la généralisation de l'usage du béton amena le besoin de spécification du produit et d'essais de performances sur lesquels s'accorder.

" L'objet de l'essai du ciment est de s'assurer de sa valeur en tant que matériau de construction et, autant que possible, des caractéristiques qu'on peut attendre qu'il développe dans sa mise en œuvre pratique. " [8]

Illustrant parfaitement la nécessité d'avoir un système normatif pour les ciments, cette citation a été faite quelque années avant la création de la première association des producteurs de ciment en Allemagne en 1877 et l'apparition de spécifications sur les ciments dans différents pays sous l'impulsion des pouvoirs publics.

Après plusieurs versions et de multiples modifications, les normes régissant les ciments sont devenues internationalement utilisées. On distingue trois tendances :

- Les normes américaines.
- Les normes européennes vers lesquelles tendent les normes françaises(NF).
- Les normes anglaises

Nous suivrons l'environnement normatif français dans ce qui suit de notre travail.

Les ciments peuvent être classifiés selon deux critères:

- Selon leur composition **NF EN 197-1**.
- Selon leurs résistances. **NF P 15-301**

Ces deux critères sont fortement dépendants et il est nécessaire de se baser sur les deux pour classifier un ciment.

Nous commencerons par expliciter la classification selon la composition pour ensuite passer à la classification par résistance.

La norme française **NF EN 197-1** classe les ciments courants en cinq types principaux, le type indiquant la composition de ciment en termes de clinker et de composants minéraux et fixant les limites des proportions des constituants.

Les proportions des constituants sont rapportées à l'ensemble formé par les clinkers et les autres constituants. On aura donc par convention :

$$\text{Clinker} + \text{Autres constituants} + \text{Constituants secondaire} = 100$$

On distingue cinq ciments courants dont on spécifiera l'ancienne et la nouvelle dénomination:

- **Ciment Portland ordinaire** CPA – CEM I
- **Ciment Portland composé aux ajouts** CPJ –CEM II qui existe en cinq nuances subdivisées en plusieurs sous classes.
- **Ciment de haut fourneau** CHF qui existe en trois nuances CHF-CEM III/A, CHF-CEM III/B, CHF-CEM III/C.
- **Ciment pouzzolanique** CPZ- CEM IV /A ou B.
- **Ciment au laitier et aux cendres** CLC-CEM V/ A ou B.

Le tableau ci-dessous liste les constituants du ciment et leurs notations conventionnelles. En annexe se trouve le tableau donnant la composition de chacun des 27 ciments ordinaires industriels (**Annexe I**) [6]

Tableau I- 1: Constituants des ciments courants et leurs notations conventionnelles

Constituants	Notation	Constituants	Notation
Clinker	K	Cendres volantes calciques	W
Laitier granulé de haut fourneau	S	Schistes calcinés	T
Fumée de silice	D	Calcaires	L
Pouzzolanes naturelles	Z	Fillers (constituants secondaire)	F
Cendres volantes siliceuses	V		

La norme NF P 15-301 classe les ciments suivant leur résistance normale à vingt huit jours et suivant leur résistance normale à deux jours dite résistance au jeune âge. La résistance normale est la résistance à la compression mesurée sur mortier conformément à la norme NF EN 196-1.

Il existe trois classes de résistance normale à vingt huit jours (32.5 - 42.5 - 52.5) désignées par leur valeur caractéristique inférieure exprimée en MPa.

Pour chaque classe de résistance normale à 28 jours, il existe deux classes de résistance au jeune âge appelées ordinaire ou élevée, la seconde est distinguée par la lettre R venant après l'indication de la classe de résistance normale à vingt huit jours.

Exp : Ciment CM III/B 42.5-24-R : Ciment de haut fourneau avec 80% de laitier, résistance normale à 28 jours de 42.5 Mpa, résistance élevée à 2 jours.

En complément à ces deux façons de classer les ciments, trois normes spécifient les ciments courants adaptés à des environnements ou à des usages spécifiques :

- Ciments pour travaux à la mer (**NF P 15-317**).

- Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (**NF P 15-319**).
- Ciments à teneur en sulfates limitée pour béton précontraint (**NF P 15-318**).

Trois autres types de ciments ne sont pas considérés comme des ciments courants mais revêtent une importance capitale du fait de leurs caractéristiques spécifiques. Ils disposent de leurs propres normes de classification et d'utilisation :

- Ciment alumineux fondu (**NF P 15-315**).
- Ciment prompt naturel (**NF P 15-314**).
- Ciment à maçonner (**NF P 15-307**).

Etant considérés comme des ciments à prise ou durcissement rapide, les deux premiers ciments cités seront traités avec plus de détails dans le sous-chapitre qui suit.

I.8. Ciments à prise rapide :

L'industrie cimentaire met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur un grand nombre de ciments qui répondent à des caractéristiques bien définies. Parmi ces caractéristiques, il est possible d'atteindre des résistances élevées au jeune âge, permettant la réalisation de béton à durcissement rapide pour différentes utilisations.

La production de ciments à prise et durcissement rapides est possible selon différents procédés, notamment les trois les plus répandus :

- Fabrication de ciment prompt naturel.
- Utilisation d'adjuvants associés au ciment.
- Mélange d'un ciment Portland et d'un ciment Alumineux.

On traitera ces procédés succinctement et l'on approfondira dans un chapitre indépendant la partie relative aux ciments alumineux.

I.8.1. Ciment prompt naturel (CNP) NF P 15-314:

Le ciment prompt naturel à prise et durcissement rapides résulte de la cuisson à température modérée d'un calcaire argileux de composition régulière extrait de bancs homogènes, suivie d'un broyage très fin.

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

Cette composition minéralogique lui confère des propriétés particulières de prise rapide (de quelques minutes à une demi-heure), et de résistance aux eaux acides.

La norme **NF P 15 -314** définit un seul ciment prompt naturel dont elle spécifie les caractéristiques physiques, le temps de prise et l'évolution de la résistance. Le début de prise étant inférieur à 4 minutes justifie son nom de prompt. [6]

Le tableau qui suit reprend les résistances mesurées du ciment prompt naturel sur mortier 1/1 (1350g de sable, 1350g de ciment, 510g d'eau conformément à la norme **NF EN 196-1**):

Tableau I- 2: Evolution des résistances garanties du ciment prompt naturel selon la norme NF P 15-314

Âge	15min	1h	3h	24h	7j	28j
Résistance (MPa)	4	6	8	10	14	19

I.8.2. Utilisation d'adjuvants associés au ciment :

Se basant sur le système « CaO- Al₂O₃ -SiO₂-SO₃», plusieurs recherches ont tenu compte de la modification du comportement des ciments Portland en lui associant des adjuvants qui joueront le rôle de retardateurs de prise ou d'accélérateurs de prise.

I.8.3. Mélange d'un ciment alumineux et un ciment Portland :

Constaté depuis le début de l'utilisation des ciments alumineux, le procédé consistant à mélanger du ciment alumineux à du ciment Portland ordinaire pour obtenir un liant à prise réglable a commencé à être utilisé en 1950 (Robson [9]).

Le mélange étant sujet à des problèmes de stabilité nécessite une parfaite maîtrise de chacun des constituants et de leur proportion.

Nous présenterons dans ce qui suit une courte description des ciments alumineux ou ciments alumineux fondus (CA) ainsi que leur contexte normatif, le chapitre suivant les traitera plus en détails.

Le ciment alumineux fondu est un liant hydraulique qui résulte de la mouture, après cuisson jusqu'à la fusion, d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice, dans des proportions telles que le ciment obtenu renferme au moins 30% de sa masse d'alumine.

Il se caractérise par deux propriétés qui sont :

- Son temps de prise compris entre 2h30 et 3h30 mais, dès la fin de prise, sa résistance à la compression, mesurée sur un mortier préparé avec un rapport E/C égal à 0.4 augmente très rapidement pour atteindre environ 40MPa à 6heures.
- Son hydratation ne donnant pas lieu à la formation d'hydroxyde de calcium, ce qui confère au béton une bonne tenue aux eaux pures, aux eaux sulfatées et à l'eau de mer.

La norme **NF P 15-315** définit un seul ciment alumineux dont elle spécifie certaines caractéristiques chimiques, le temps de prise et la résistance. Le rapport alumine/chaux doit être compris entre 0.85 et 1.4, la teneur en alumine supérieur à 30% et le rapport E/C doit être faible < 40%

Les résistances nominales doivent être supérieures à des valeurs minimales garanties que l'on donnera dans le tableau suivant :

Tableau I- 3: Valeurs minimales garanties (en MPa) des résistances à la compression et la flexion des ciments alumineux selon la norme NF P 15-315.

Âge	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)
6H	30	4.0
24H	50	5.5

I.9. Conclusion :

Etant donné la nature de notre projet de fin d'études qui traite de l'élaboration d'un ciment à prise réglable par la fabrication de mélanges de ciments Portland et alumineux, il était nécessaire de rappeler les notions élémentaires relatives aux ciments afin de mieux comprendre le comportement des mélanges dans la suite de notre travail, et d'avoir des résultats de référence sur lesquels se baser.

CHAPITRE II

Les ciments alumineux

II.1. Introduction

Reconnus dans le domaine de la construction pour leur durcissement rapide et leur grande résistance chimique qui en font un liant de choix pour la réalisation de bétons résistants à des conditions extrêmes, les mélanges de ciment portland avec des ciments alumineux ouvrent la possibilité à l'élaboration de ciments à prise et durcissement rapide.

Propriété essentielle que l'on utilisera au cours de notre travail, il nous est apparu important de consacrer un chapitre spécifique aux ciments alumineux.

Nous commencerons par une définition ainsi qu'un bref rappel historique, puis nous listerons leurs différentes caractéristiques physiques. Nous traiterons ensuite succinctement des utilisations possibles de ces ciments et de leurs constituants ainsi que de leurs mécanismes d'hydratation pour enfin expliquer le phénomène de conversion des hydrates qui cause une baisse notable des résistances au long terme.

II.2. Définition

Le ciment alumineux CA ou ciment aux aluminates de calcium CAC fut inventé par Jules BIED [10], directeur scientifique des Ciments LAFARGE au début du XX siècle afin de palier au problème de l'attaque du C_3A par les sulfates qui cause une expansion et un gonflement menant à la détérioration des bétons à base de ciment Portland ordinaire.

Le ciment alumineux est un ciment à base d'aluminates de calcium dont le produit d'hydratation repose essentiellement sur le mélange d'alumine/aluminium(III) et d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) qui donne des phases alumineuses.

Ainsi, au contraire des ciments Portland qui contiennent des silicates de calcium, les ciments alumineux contiennent des aluminates de calcium qui ne libèrent pas de chaux au cours de leur hydratation [11]. Cette spécificité de l'hydratation particulière du ciment alumineux conduit à une évolution des résistances très sensible à la température et offre plusieurs propriétés spéciales au béton ou au mortier alumineux. On citera entre autres :

- Une fin de prise ainsi qu'un durcissement rapide,
- Une résistance chimique élevée,
- Une résistance élevée à l'usure,
- Une résistance aux températures élevées,
- Une accélération de prise par temps froid.

La fabrication industrielle a débuté en France à partir de 1918. Aux débuts de la production de ciment d'aluminate de calcium, un procédé de fonte ou fusion fut utilisé, d'où à l'origine le nom de CIMENT FONDU®. [12].

Aujourd'hui, ils sont produits au moyen de deux procédés haute température où les compositions à base d'aluminates de calcium (clinkers) sont formées à l'état liquide ou solide dans des fours de fusion et des fours de frittage.[13]

Pour rappel, le ciment alumineux est obtenu par fusion d'un mélange de calcaire (CaCO_3) et de bauxite(Al_2O_3), puis par broyage fin du produit ainsi obtenu.

Ceci permet d'avoir les caractéristiques suivantes :

- **Surface spécifiques Blaine** qui est supérieure à $2500\text{cm}^2/\text{gr}$.
- **Couleur** : La couleur des ciments d'aluminates de calcium est largement due à sa teneur en fer, mais pas seulement. Les produits dotés d'une teneur en alumine moindre, de l'ordre de 40 à 50 %, présentent des teintes plus foncées que les produits très purs possédant plus de 70% d'alumine ont un haut degré de blancheur.



Figure II- 1 : De gauche à droite : Ciment AL (71% Al, 51% Al, 40% Al)

- **Alcalinité du pH** : En solution, les ciments d'aluminate de calcium ont un comportement alcalin (pH 10-11,5).

II.3. Propriétés et domaine d'utilisation

Créé dans le but d'avoir une absence totale de C_3A et de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ afin d'éviter l'attaque par les sulfates, il s'est avéré que la multitude de propriétés qu'offrent les aluminates de calcium contenus dans les ciments alumineux permettent une exploitation dans de nombreuses autres applications.

Cette polyvalence permet de concevoir des systèmes dans lesquels l'aluminate de calcium se comporte davantage comme un réactif chimique et permet d'obtenir les propriétés suivantes:

II.3.1. Résistance dans des environnements agressifs

Le mécanisme de corrosion est complexe mais en général la résistance à la corrosion est liée à la présence d'hydroxydes de calcium lixiviables. Le procédé d'hydratation des ciments alumineux ne libère ni ne génère d'hydroxyde de calcium. Par conséquent, ils ne sont pas très sensibles aux attaques chimiques. Il existe de nombreux cas dans lesquels une excellente résistance à l'eau de mer est démontrée.

Dans certaines conditions les systèmes à base d'aluminate de calcium peuvent présenter une corrosion faible face à différents acides. [14]

II.3.2. Résistance à l'abrasion

Les fortes résistances développées par les systèmes contenant de l'aluminate de calcium contribuent fortement à leur résistance à l'abrasion. Des tests comparatifs ont montré que les mortiers à base de CA ont une meilleure résistance à l'abrasion qu'un mortier comparable fait à partir d'autres ciments

II.3.3. Résistance au cycle gel-dégel

L'utilisation de béton contenant du ciment d'aluminate de calcium a démontré une excellente résistance aux cycles de gel-dégel à condition que le béton soit de bonne qualité et correctement mis en œuvre.

II.3.4. Résistance aux températures et aux chocs thermiques

La résistance aux températures ou réfractarité d'un ciment ou d'une composition d'aluminate de calcium donnée dépend en grande partie de sa composition chimique.

Le point de fusion de l' $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ passe à sa forme liquide à 1400°C tandis que les ciments Portland ont une température de fusion de 500°C .

La plage de températures d'utilisation indiquée par les fabricants est de -180° à $+1100^\circ\text{C}$ [15]

II.3.5. Prise rapide en mélange

Les ciments alumineux ont un début d'une prise plutôt lente et comparable aux ciments ordinaires (entre 2h et 4h) ; c'est surtout la fin de prise qui intervient rapidement.

Le potentiel de prise rapide du ciment alumineux est dû à sa capacité à produire des réactions d'hydratation rapides avec d'autres liants hydrauliques ou accélérateurs spécifiques. Cette propriété de prise rapide, très utile, est exploitée dans de nombreuses applications sur des chantiers ainsi que dans des produits composés.

Les ciments alumineux ont aussi la capacité à accélérer la prise des ciments Portland de manière si efficace que le temps de prise du mélange peut varier de plusieurs minutes à la prise éclair. Le rapport exact entre le dosage et le temps de prise induit dépend des caractéristiques spécifiques du ciment Portland.

II.3.6. Durcissement rapide

Le durcissement rapide est une propriété fondamentale des ciments d'aluminate de calcium et la première application industrielle de l'aluminate de calcium tirait parti de cette propriété.

On peut obtenir en 24 heures des résistances avec les ciments d'aluminates de calcium que l'on arrive tout juste à atteindre en 28 jours avec le ciment Portland.[16]

Cela est dû à une hydratation rapide des ciments d'aluminates de calcium et à la formation d'une structure d'hydrates sur un intervalle de temps court. [12]

II.3.7. Séchage rapide

Le durcissement rapide de mélanges contenant du ciment alumineux consomme une grande quantité d'eau pendant le processus d'hydratation.

Les aluminates de calcium réagissent aux sulfates et forment de l'ettringite ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) qui consomme 32 molécules d'eau. Il en résulte une consommation d'eau rapide et importante, qui réduit le temps de séchage des compositions préparées. Cette propriété est exploitée dans plusieurs applications.

II.3.8. Résistance au rétrécissement

Le rétrécissement des aluminates de calcium dû à l'hydratation et au séchage est similaire à celui du ciment Portland excepté qu'il se produit sur un intervalle de temps bien plus court en raison des réactions d'hydratation plus rapide des ciments d'aluminates de calcium. [13]

II.3.9. Chaleur d'hydratation

La chaleur d'hydratation des ciments d'aluminates de calcium est du même ordre de grandeur que le ciment Portland (460j/kg). Toutefois, la chaleur est libérée à beaucoup plus court terme.

De plus, cette hausse de température a un intérêt pratique pour le béton puisque c'est un moyen d'obtenir une résistance définitive relativement vite après le durcissement initial.

II.3.10. Domaines d'utilisation

Tableau II- 1: Propriétés et domaines d'utilisation des ciments alumineux

Propriétés	Domaines d'utilisation
Résistance à la corrosion et aux attaques bactériennes	Réseau d'égouts, usines d'assainissement, pétrochimie, agro-alimentaire et industries chimiques (bassins de décantation, planchers, canaux d'effluents, fosses à soufre). Béton de structures exposées aux eaux marines et aux eaux souterraines
Fin de prise rapide : durcissement	Intervention d'urgence sur zones circulées (exp : autoroutes, pistes d'aéroport où l'inactivité causera une perte logistique).
Chaleur d'hydratation	Bétonnage par temps froids (-10°C)
Résistance aux hautes températures	Incinérateurs, chaudières, bassins de rétention de produits inflammables, cimenteries, cokeries, industrie métallurgique en général (stockage de pièces chaudes, zones de fusion, d'oxycoupage)
Résistance aux chocs	Barrages, évacuateurs de crues, déversoirs, collecteurs et écluses, béton projeté
Résistance aux chocs thermiques :	Applications réfractaires pour protéger des zones sujettes à de grandes fluctuations de température.

II.4. Constituants et hydratation

Le principal constituant du ciment d'aluminates de calcium est l'aluminate mono-calcique ($\text{CaO Al}_2\text{O}_3$, ou CA dans la notation cimentaire). Ses autres constituants sont le dialuminate de calcium CA_2 et l'hepta-aluminate-dodéca-calcique C_{12}A_7 ainsi que différentes aluminoferrites de calcium (C4AF, etc), le silicate bi-calcique et le silico-aluminate de calcium. [11]

D'autres phases peuvent être présentes comme le C_2AS (gehlénite), ou le CT (titanate de calcium).

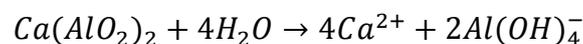
L'hydratation du ciment alumineux produit des aluminates de calcium hydratés et du trihydrate d'alumine insoluble, sans libérer de portlandite. C'est cette absence de portlandite qui lui confère sa résistance à de nombreux agents agressifs.

En présence d'eau, les phases d'aluminate de calcium anhydres réagissent et forment des hydrates. Physiquement parlant, c'est le développement de ces hydrates sous la forme de cristaux entrelacés qui donne au ciment alumineux son pouvoir liant.

Contrairement au ciment Portland où l'hydratation prend lieu à la surface des particules puis se développe progressivement, l'hydratation des ciments alumineux se déroule pour sa part en trois étapes : dissolution, nucléation et précipitation, ce qui fait que les phases anhydres disparaissent pour entrer complètement en solution.

Les types et quantités d'hydrates qui se forment dépendent de facteurs tels que la minéralogie initiale et de paramètres extérieurs tels que la température et la quantité d'eau ajoutée.

La première réaction qui a lieu est la dissolution des aluminates de calcium en ions Ca^{2+} et $\text{Al}(\text{OH})_4^-$:



Cette dissolution continue jusqu'à la saturation de la solution [17]. Ensuite, survient la période d'induction qui consiste en un processus de nucléation (formation de germes) dont la durée dépend de la constitution du ciment en particulier en C_{12}A_7 et au cours de laquelle les concentrations restent constantes.

La nucléation se termine par la précipitation massive des hydrates qui est suivie par une chute des concentrations

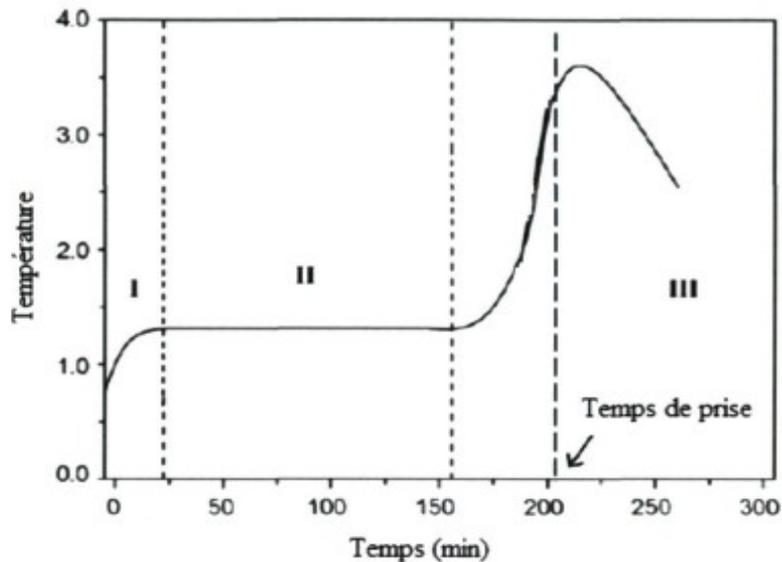


Figure II- 2: Les différentes phases du processus d'hydratation des ciments alumineux.

À partir de la prise, l'hydratation se poursuit très rapidement durant les 2 à 4 premières heures: pour un rapport E/C de l'ordre de 0,40, la résistance mécanique croît d'environ 15 MPa par heure durant les deux premières heures, puis ralentit en raison de la densification du matériau et du manque d'eau libre.

Pour une pâte à rapport E/C = 0,40, le degré d'hydratation de la phase CA peut facilement atteindre 80 % dès le premier jour. [11]

Avec un rapport E/C = 0,40 et à 80 % d'hydratation, les calculs stœchiométriques indiquent qu'il reste moins de 4 % d'eau libre dans la pâte de ciment soit moins de 1 % dans le béton. Ceci est confirmé par des mesures de l'eau libre par la méthode de la bombe à carbure (ou évaporation à 110 °C). Cette hydratation rapide entraîne également une forte exothermie, la chaleur d'hydratation étant dégagée en quelques heures.[11]

II.5. Phénomène de conversion

A une température inférieure à 30°C, l'hydratation du ciment d'aluminates de calcium commence par la formation d'hydrates hexagonaux métastables (CAH_{10} et C_2AH_8). Avec l'élévation de la température, les hydrates hexagonaux se transforment en hydrates cubiques stables ($C_3AH_6 + AH_3$). Cette évolution inévitable est connue sous le nom de conversion.



Figure II- 4: Hydrates hexagonaux métastable CAH_{10}

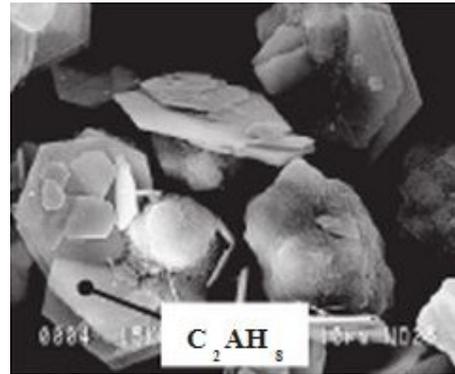


Figure II- 3: Hydrates hexagonaux métastable C_2AH_8 , microscopie électronique [Source LERM]

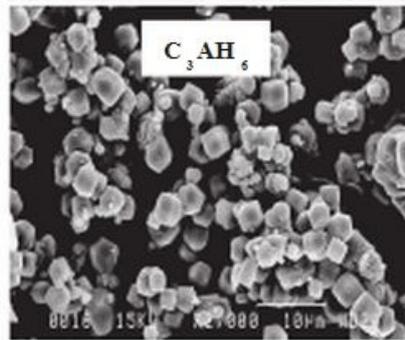
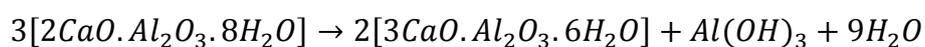
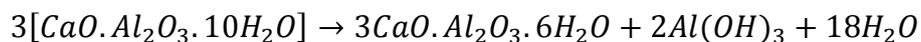


Figure II- 5: Hydrates hexagonaux cubiques stables C_3AH_6 , microscopie électronique [Source LERM]

Les réactions de conversion durent longtemps en conditions normales de température et de pression et peuvent être exprimées de la sorte :



La température joue un rôle primordial : à titre d'exemple autour de $40^\circ C$ la conversion s'effectue en quelque mois, à $70^\circ C$ la conversion complète s'effectuera en quelques heures.

Si les températures d'hydratation sont assez élevées, les hydrates hexagonaux ne sont pas détectés et seuls apparaissent les hydrates cubiques stables.

La densité des hydrates stables étant plus élevée que celle des hydrates métastables (figure II-6 ci dessous), le volume qu'ils occupent est plus faible : la conversion s'accompagne donc d'une modification de la microstructure et d'une augmentation de la porosité, ce qui causera une baisse notable des résistances.

L'eau libérée par la dissolution des aluminates hexagonaux n'est que partiellement combinée lors de la formation des aluminates cubiques. Il reste donc de l'eau libre disponible pour poursuivre l'hydratation des anhydres.

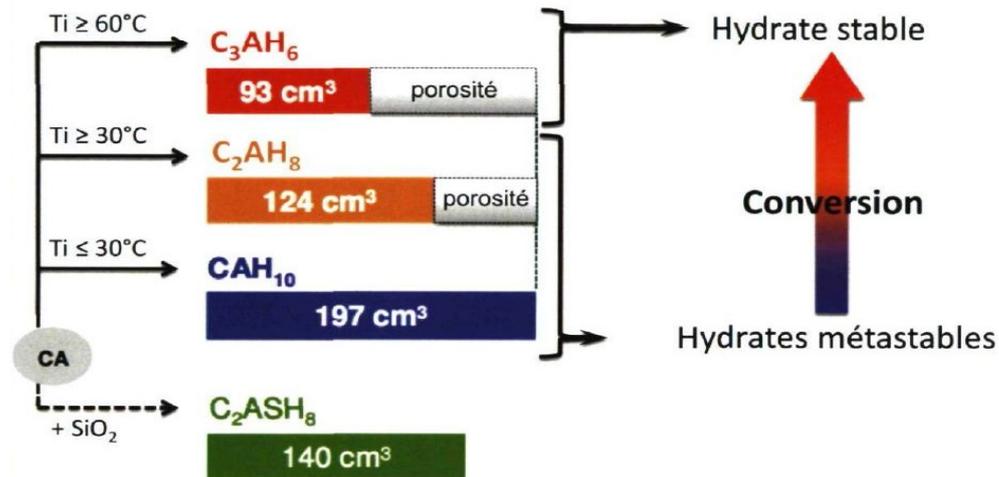


Figure II- 6: Différentes températures de réaction et volume occupé par les hydrates de calcium.[12]

II.6. Comparaison avec le ciment Portland

Après avoir énuméré les différentes propriétés des ciments alumineux, voici une rapide comparaison entre les ciments Portland ordinaires et les ciments alumineux.

Tableau II- 2: Tableau comparatif entre le ciment portland et le ciment alumineux

Ciment Portland	Ciment Alumineux
Système chaux/silice	Système alumine/chaux
Propriétés réactives dépendent de l'ajout de gypse	Propriétés réactives dépendent de la composition chimique, de la minéralogie et de la finesse
Temps de prise similaire	Ne contient pas de la chaux libre.
Faible résistance à la chaleur	Durcissement plus rapide pour les aluminates de calcium.
	Meilleure résistance à l'abrasion et à la corrosion Risque de conversion

II.7. Conclusion

Offrant une palette d'avantages incontestables que ce soit en termes de résistance mécanique ou chimique, le ciment alumineux reste malgré tout limité pour être utilisé seul dans des applications structurales du fait de la possibilité de conversion des hydrates et qui quand bien même après contrôle du phénomène, serait trop coûteux à utiliser à 100%.

Possédant une complémentarité et montrant des caractéristiques intéressantes en mélange avec le ciment Portland, AEM YADI a mené un travail de recherche pour élaborer un mélange optimal de ciment portland de la région centre d'Alger et de ciment alumineux. Nous traiterons plus en détails ces mélanges dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

**Caractéristiques et
démarche de
sélection des
ciments d'AEM YADI**

III.1. Introduction

Dans l'optique d'expérimenter des mélanges de ciments Portland ordinaires avec un ciment alumineux, il est nécessaire de connaître les caractéristiques des ciments purs utilisés, pour ensuite effectuer les mélanges et choisir une population en fonction de propriétés précises qu'on mesurera par la suite.

Dans ce chapitre, nous traiterons de la caractérisation des ciments choisis par **Monsieur YADI Ahmed El Mostafa** pour ses expérimentations réalisées au cours de son travail de magister portant sur l'élaboration d'un ciment à prise rapide. Ensuite nous exposerons la façon dont la présélection a été faite pour terminer par une étude des mélanges présélectionnés.

III.2. Méthodologie d'expérimentation de M. YADI

La présélection de M.YADI [4] a été réalisée en quatre étapes consécutives :

1. Etude des caractéristiques des ciments purs choisis.
2. Etude du temps de la consistance et des temps de prise des mélanges ciments alumineux ciments purs en effectuant des incréments successives.
Chaque ciment Portland a été mélangé avec du ciment alumineux en des proportions incrémentées par palier de 5%, soit 19 compositions pour chacun des ciments de Rais-Hamidou et Meftah (5% à 95%) et 14 compositions pour le ciment de Beni-Saf (5% à 70%).
3. Sélection des mélanges qui ont présenté des débuts de prise allant de 7 à 35min et étude d'essais de résistances.
4. Conduite d'essais supplémentaires sur les mélanges ayant passé le critère de résistance et dont les caractéristiques mécaniques ont été testées ainsi que les caractéristiques rhéologiques

Chaque étape sera traitée séparément dans les paragraphes qui suivent.

III.3. Ciment purs choisis

Le choix des ciments courants s'est porté sur trois ciments : deux ciments de la région d'Alger (Ciment- Rais Hamidou et Ciment -Meftah) et un ciment pouzzolanique (Béni-Saf).

Le ciment alumineux utilisé provient d'un lot homogène de Ciment fondu (LAFARGE-France) importé en Juillet 1995.

Le tableau ci-dessous donne la dénomination des ciments utilisés ainsi que leur classe de résistance.

Tableau III- 1: Type et classe de résistance des ciments choisis

Ciment	Ancienne Dénomination	Nouvelle dénomination	Classe de résistance
Rais Hamidou (RH)	CPJ	CEM II	42.5
Meftah (MFT)	CPA	CEM I	42.5R
Beni-Saf (BS)	CPZ	CEM IV	42.5
Alumineux (Al)	CA	CA	-

Nous tacherons de présenter au travers cette partie les différentes caractéristiques des ciments utilisés, en commençant par leur composition chimique et leur composition minéralogique pour ensuite donner leurs propriétés physiques, rhéologiques et mécaniques .

III.3.1 Analyse chimique des ciments purs

L'analyse chimique des différents ciments se présente comme suit:

Tableau III- 2: Composition chimique des ciments utilisés

Ciments	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PF	CaO _L	RI	Na ₂ O	K ₂ O
R-Hamidou	18.66	2.87	3.57	61.56	1.27	2.40	8.58	3.24	2.68	0.28	0.39
Meftah	20.85	2.98	5.50	63.25	1.24	2.70	1.42	0.27	0.95	-	-
Béni-Saf	25.72	4.27	7.12	53.72	1.60	2.17	-	0.13	5.25	-	-
Alumineux	3.54	13.47	40.43	37.96	0.54	0.10	0.73	-	-	0.04	0.37

* CaO_L : chaux libre.

En suivant la méthode de BOGUE pour les trois ciments Portland courants et une méthode de calcul basée sur les travaux de J.TALABER et J CALLEJA pour le ciment alumineux, ces compositions chimiques ont permis de déterminer par la suite la composition minéralogique des ciments utilisés.

a) Composition minéralogique des ciments courants en suivant la méthode de BOGUES :

Tableau III- 3: Composition chimique des ciments utilisés

Ciments / Composants	% C ₃ S	%C ₂ S	%C ₃ A	%C ₄ AF	% C ₁₂ A ₇	% CA	% Reste
Rais Hamidou	59.25	13.67	6.96	9.06	-	-	11.06
Meftah	55.50	15.27	9.81	9.06	-	-	10.36
Béni-Saf	52.27	24.33	7.02	11.31	-	-	4.77

/

Rmq : La composition minéralogique du ciment de Béni-Saf montre de fortes teneurs en C_2S et en C_4AF ainsi qu'une faible teneur en C_3S , ce qui laisse présager une hydraulicité plus faible à moyen terme.

b) Composition minéralogique du ciment alumineux :

Du fait de la « complexité » des systèmes de phases, la détermination de la composition du ciment alumineux nécessite une approche différente que celles usuellement utilisées dans le calcul des compositions des ciments courants.

Pour notre ciment alumineux dont les composants majeurs varient dans les limites suivantes :

Alumine : 39-42% Chaux : 39-42% Silice : 1.5-6% Fer : 9-18% ,

M. YADI a choisi de suivre les méthodes de calcul proposées par J.CALLEJA [18] et expérimentées sur un ciment fondu espagnol de composition chimique analogue.

La méthode de J.CALLEJA développe six méthodes de calcul, chacune adaptée à différents types de paragenèses minérales:

- i. Méthode 1 : Paragenèse minérale constituée de CA- $C_{12}A_7$ - C_4AF - C_2S .
- ii. Méthode 2 : Paragenèse minérale constituée de CA- $C_{12}A_7$ - C_6A_2F - C_2S .
- iii. Méthode 3 : Paragenèse minérale constituée de CA- C_4AF - C_2AS - C_2S .
- iv. Méthode 4 : Paragenèse minérale constituée de CA- C_6A_2F - C_2AS - C_2S .
- v. Méthode 5 : Paragenèse minérale constituée de CA- $C_{12}A_7$ - C_4AF .
- vi. Méthode 6 : Paragenèse minérale constituée de CA- $C_{12}A_7$ - C_6A_2F .

Ces méthodes nous donnent les compositions minéralogiques potentielles du ciment alumineux suivantes :

Tableau III- 4:Compositions minéralogiques potentielles du ciment alumineux selon les six variantes de calcul de la méthode de J.CALLEJA

Méthode	Teneurs (%)					
	CA	$C_{12}A_7$	C_2AS	C_2S	C_6A_2F	C_4AF
1	69.2	24.9	-	10.2	-	41
2	74.5	-48.4	-	10.2	59	-
3	35.1	-	24.6	-5.3	-	40.9
4	8.4	-	48	-23	59	-
5	49.3/43.2	7.8	-	-	-	40.9
6	48.4	-15.7	-	-	59	-

Ainsi au travers de ces méthodes de calcul, il est apparu que seuls les résultats obtenus par la méthode 1 et 5 étaient viables. Au vu des caractéristiques de notre ciment et grâce à l'analyse par diffraction X, la meilleure combinaison semble être la 5^{ème} malgré une incertitude quant à la proportion d'aluminate mono-calcique pour laquelle nous considérerons que la quantité 49.3% comme étant la plus adéquate.

La composition minéralogique du ciment alumineux retenue pour la suite sera :

Tableau III- 5: Composition minéralogique du ciment alumineux

CA	C ₁₂ A ₇ -	C ₂ AS	C ₂ S	C ₆ A ₂ F	C ₄ AF
49.3/43.2	7.8	-	-	-	40.9

III.3.2 Propriétés physiques et rhéologiques

Les essais pour caractériser les propriétés physiques et rhéologiques des ciments utilisés ont été effectués sur des échantillons purs (100%) conformément aux normes AFNOR ,de:

- La masse volumique : M_v (g/cm³)
- La surface spécifique Blaine : SSB (cm²/g)
- L'expansion : (mm)
- La consistance normale : CN (%)
- Les délais de début et de fin de prise : (h : min)

Le tableau suivant fournit les résultats de ce travail :

Tableau III- 6:Propriétés physiques et rhéologiques des ciments utilisés

Ciments/Propriétés	Propriétés physiques			Propriétés rhéologiques		
	M _v	SSB	Expansion	CN	Délais de prise	
					Début	Fin
Rais Hamidou	1.010	2932	2.5	26	3 :27	5 :52
Meftah	1.043	3343	0.5	24.5	2 :59	4 :54
Béni-Saf	1.004	3931	2	26.5	2 :55	4 :50
Alumineux	1.150	4612	-	25	3 :48	4 :30

III.3.3 Propriétés mécaniques

De même que pour les propriétés physiques et rhéologiques, les propriétés mécaniques (résistance à la flexion et résistance à la compression) ont été mesurées par M.YADI selon les normes AFNOR à 02, 07 et 28 jours:

Tableau III- 7:Résistances à la flexion et à la compression des ciments purs.

Ciment	Résistance à la flexion (MPa)			Résistance à la compression (MPa)		
	02 j	07 j	28 j	02 j	07 j	28 j
Rais Hamidou	3	6	7	13	26	39
Meftah	5	7	8	19	37	47
Beni-Saf	5	7	8	19	37	47

Ayant des résistances qui évoluent plus rapidement au jeune âge les ciments alumineux doivent être testés aux échéances suivantes (6 h, 01 j, 03 j, 28 j).

Tableau III- 8:Résistances à la flexion et à la compression du ciment alumineux

Ciment	Résistance à la flexion (MPa)				Résistance à la compression (MPa)			
	6h	01j	03j	28j	6h	01j	03j	28j
Alumineux	2.5	5	8	10	19	68	75	79

III.3.4 Observations et conclusions

Au vu des différentes analyses et mesures effectuées, on peut observer que :

- Les ciments de Meftah et de Béni-Saf « plus propres » présentent une surface spécifique voisine de 4000 cm²/g, ce qui leur donne de meilleures performances mécaniques et rhéologiques.
- Les ciments MFT et BS présentent des résistances plus élevées que celle prévues par leur classe, contrairement au ciment RH dont la résistance est légèrement inférieure à celle de sa classe.
- Le ciment alumineux de par sa prise rapide développe des résistances élevées dès le jeune âge, ce qui nécessite de faire des mesures à brève échéance.

III.4. Etude des mélanges ciment alumineux- ciments purs

Les mélanges ciment alumineux-ciment Portland ont subi une batterie d'essais afin de pouvoir effectuer la première présélection qui, comme précisé précédemment, est basée sur la consistance et le temps de prise.

Ces différents essais ont été réalisés selon les normes suivantes pour un rapport E/C de 0.32.

- NF P15-402 pour le temps de prise.
- NF P 15-473 pour la consistance.
- NF P 15-431 pour la prise.
- NF EN-196/6 qui traite des particularités relatives aux liants à prise rapide.

III.4.1. Consistance normale des pâtes

Le graphique suivant montre l'évolution de la consistance des pâtes des mélanges de ciment en fonction du taux de ciment alumineux.

Le tableau contenant les valeurs des consistances normales de chaque mélange se trouvent en annexe (**Annexe II**)

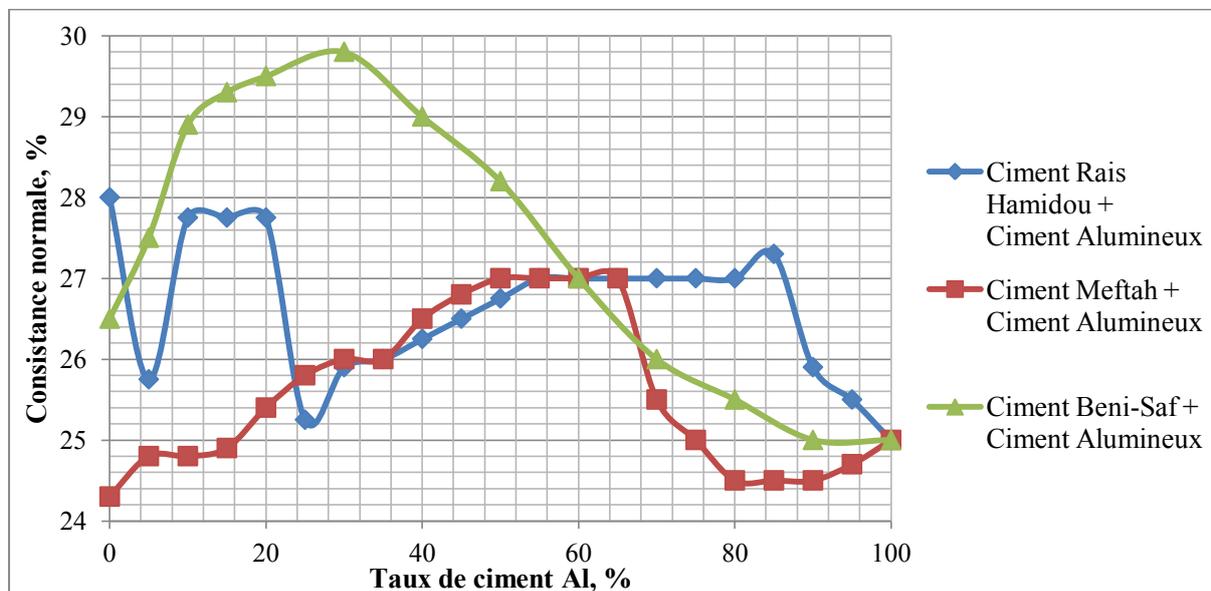


Figure III- 1 : Evolution de la consistance des mélanges

On remarque à travers l'allure des trois graphes de la variation de la consistance normale des mélanges que deux phases se distinguent pour chacun des trois types de mélange :

1. Première phase de 0 à 60-70% de ciment alumineux :
La courbe des mélanges avec le ciment de Béni-Saf se démarquent par une forte croissance et se détachent des deux autres courbes de Meftah et Rais-Hamidou qui ont une faible croissance.
2. Deuxième phase de 60 – 70% à 100% :
Stabilisation des résultats qui tendent vers la valeur de C.N du ciment alumineux pur qui est de 25%.

Le ciment de Béni-Saf dont la surface spécifique cause une demande d'eau supérieure et cause une accélération de l'hydratation des aluminates ; d'autre part la présence de silice pouzzolanique et l'enchaînement d'un plus grand nombre de réactions active la demande en eau et cause donc la croissance de la consistance jusqu'à 30%.

III.4.2. La prise

Étant le critère de présélection principal, nous accorderons une importance particulière à analyser en détail les résultats obtenus au travers cette étape.

Le graphique ci-dessous représente les courbes des début de prise des trois types de mélanges avec un axe des ordonnées sous format logarithmique.

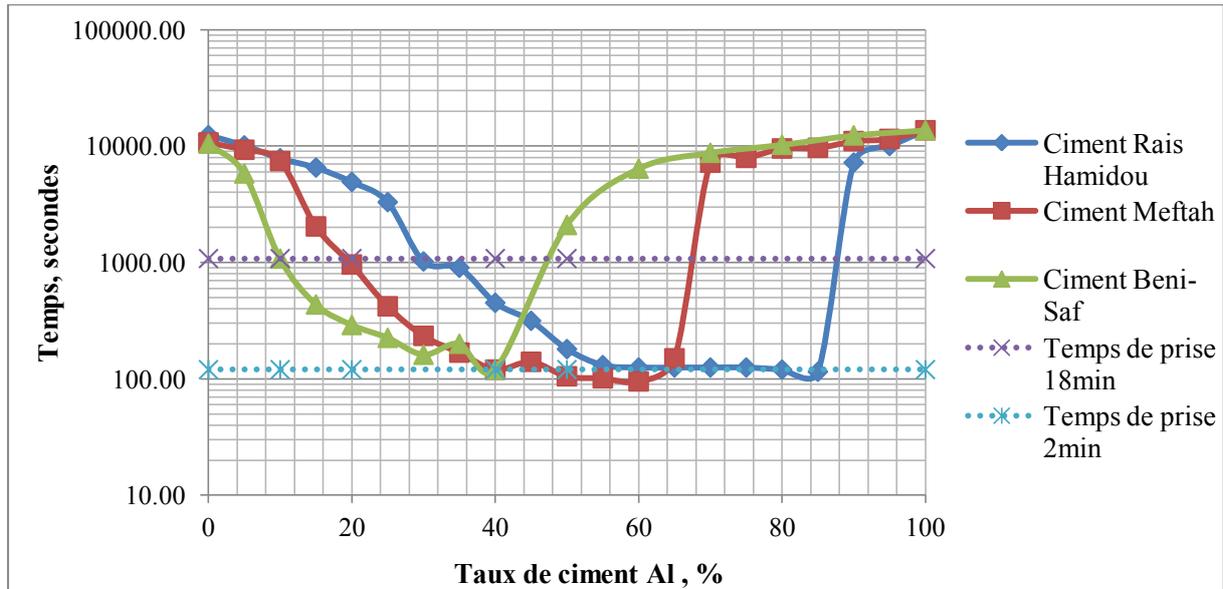


Figure III- 2: Courbe d'évolution des début de prise des trois types de mélanges

On observe que la prise se déclenche approximativement à la même période pour les trois ciments à l'état pur, et commence à se déclencher plus tôt dès ajout de ciment alumineux.

On peut également distinguer sur chacune des courbes trois phases distinctes du début de prise que l'on tâchera d'interpréter par la suite :

1. Accélération plus ou moins forte du temps de début de prise et qui se caractérise par une accélération qui suit un palier d'inactivité moyennement court (inférieur à 25% pour les ciments de Rais Hamidou et de Meftah et inférieur de 5% pour le ciment Béni-Saf).
2. Apparition d'états de prise rapide sur un palier plus au moins large pour les ciments Meftah et Rais Hamidou (respectivement [40%-60%] et [55%-90%] d'ajout de ciment alumineux) et serré pour Béni-Saf ([30%-35%] d'ajout de ciment alumineux).
3. Ralentissement du temps de prise et apparition d'un palier particulier pour chaque ciment qui tend vers le temps de début de prise du ciment alumineux pur.

Enfin on remarque que le ciment de Béni-Saf nécessite un ajout de ciment alumineux variant entre 10% et 30% pour avoir un temps de prise qui se situe entre 2 et 18minutes, au contraire des deux autres ciments qui nécessitent des taux d'ajout plus élevés en ciment alumineux pour se situer dans la plage de début de prise 2-18 minutes, soit respectivement [30% à 85%] pour Rais Hamidou et [20% à 65 %] pour Meftah.

Interprétation des courbes

L'accélération de prise est causée par une multitude de phénomènes qui trouvent leur explication dans les phénomènes d'hydratation du ciment Portland. Nous basant sur ces

mécanismes, nous sommes parvenus aux interprétations suivantes qui concordent avec les justifications données par M.YADI :

- Le taux important de chaux libre dans le ciment de Rais Hamidou cause une sursaturation en chaux de la phase liquide qui facilite l'apparition de l'ettringite et sa durabilité ce qui se traduit par une accélération du temps de prise.
- Le sulfate de calcium présent dans le ciment et plus spécifiquement la présence d'anhydrite accélère la prise en retardant la formation de l'ettringite et cause un phénomène de fausse prise en accroissant l'hydratation de l'aluminate tricalcique, ce que nous remarquons dans le ciment Béni-Saf.
- Le rapport gypse/C₃A influence le temps de prise et les durées des périodes dormantes, pour rappel :

Tableau III- 9: Pourcentage de Gypse selon les différents ciments

Ciments/Composé	%C ₃ A	Gypse
Rais Hamidou	6.96	<11%
Meftah	9.81	<10%
Béni-Saf	7.02	<4%

III.4.3. Intervalle de prise ou durée de prise

Afin d'étayer le travail réalisé quant au début de prise et pouvoir localiser les taux d'ajouts qui causent une accélération des débuts de prise tout en réduisant la durée du temps de prise M.YADI a réalisé une comparaison sur la variation du temps de début de prise et la durée de prise pour les trois ciments.

III.4.3.a. Ciment Rais-Hamidou

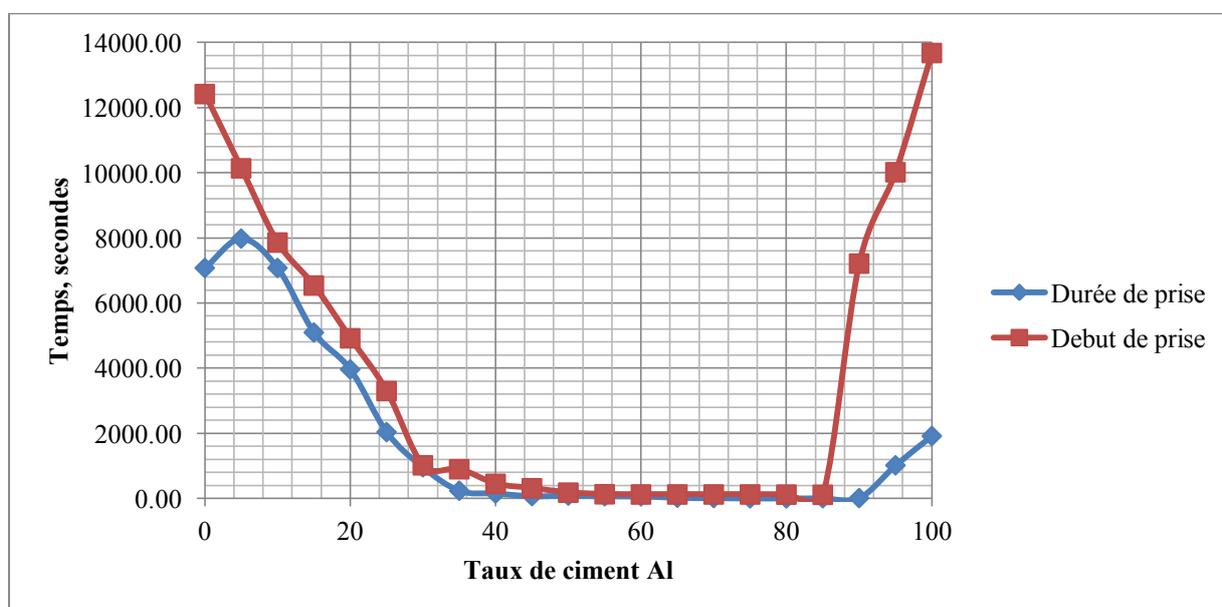


Figure III- 3: Evolution comparée du début et de la durée de prise pour les mélanges du CEM II-Rais Hamidou

La courbe ci-dessus fait apparaître trois phases distinctes reliant l'évolution du temps de début de prise et l'évolution de la durée de prise selon les proportions des mélanges.

1. Décroissance rapide pour des taux d'ajout de 0 à 35% de ciment alumineux qui montre une baisse rapide du temps de prise et de la durée de prise qui suivent un comportement similaire.
2. Palier qui va de 35% à 90% où les durées de prise et le temps de début de prise sont très courts variant entre 3 et 7 minutes (**Annexe III**).
3. Décrochage de la durée de prise qui remonte aux valeurs du ciment alumineux tandis que le temps de début de prise reste dans les limites du ciment alumineux

Globalement dans le cas des mélanges ciment alumineux / ciment Rais Hamidou, on observe que jusqu'à 85% d'ajout, l'accélération de la durée de prise va de pair avec la prise, chose qui s'inverse totalement au delà où l'on remarque que le début de prise et la durée de prise prennent des allures totalement différentes.

M.YADI souligne dans son mémoire l'effet retardateur de durée de prise et impute cet effet au sulfo-aluminate tétracalcique faiblement basique qui cause l'accélération de l'hydratation de l'aluminate monocalcique et ce sur la base des publications de [19]et [20].

III.4.3.b. Ciment Meftah

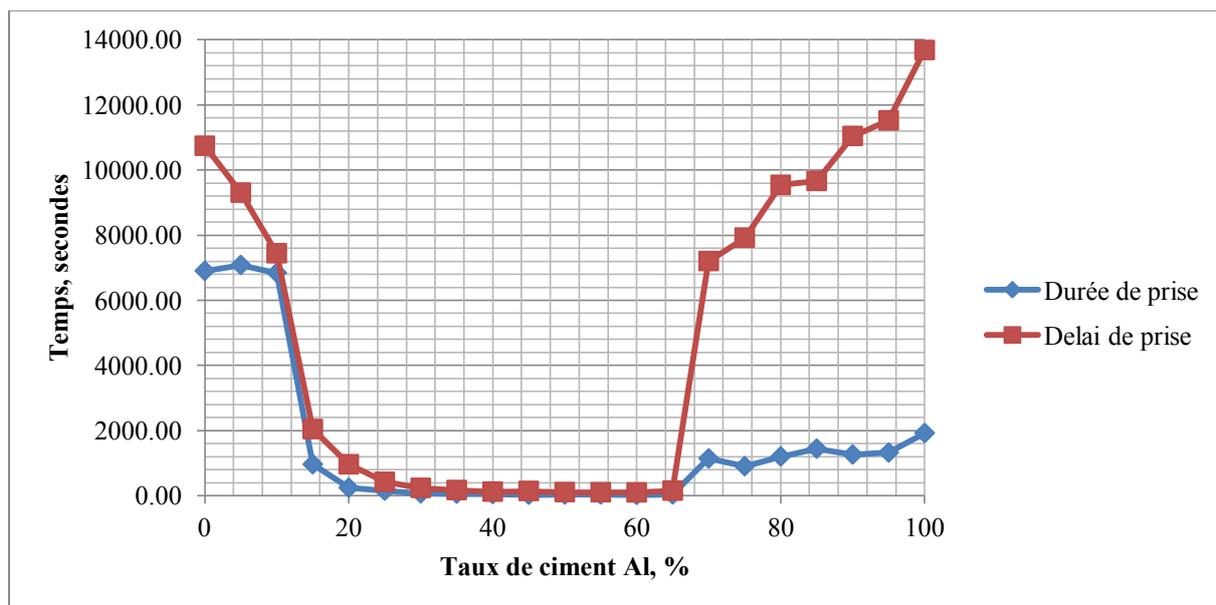


Figure III- 4: Evolution comparée du début et de la durée de prise pour les mélanges de CEM I-Meftah

Pareillement que pour les mélanges du ciment Rais Hamidou, la comparaison des courbes d'évolution du début et de la durée de prise des mélanges Meftah fait apparaître clairement trois phases similaires distinctes selon les proportions des mélanges mais selon des pourcentages différents.

1. Décroissance rapide pour des taux d'ajout de 0 à 20% de ciment alumineux qui montrent une baisse rapide du temps de prise et de la durée de prise qui suivent un comportement similaire.
2. Palier qui va de 20% à 65% où les durées de prise et le temps de début de prise sont très courts variant entre 3 et 7 minutes (**Annexe III**).
3. Décrochage à partir de 65% de la durée de prise qui remonte aux valeurs du ciment alumineux, le temps de durée de prise restant dans les limites du ciment alumineux

Globalement dans le cas des mélanges ciment alumineux /ciment Meftah, on observe que jusqu'à 65% d'ajout, l'accélération de la durée de prise va de pair avec la prise chose qui s'inverse totalement au-delà de ce pourcentage où l'on remarque que le début de prise et la durée de prise suivent une allure totalement différente pour rejoindre les valeurs du ciment alumineux pur.

M.YADI a expliqué l'inactivité du ciment alumineux dans les mélanges à faible taux (inférieur à 10% d'ajout de ciment alumineux) par le faible taux de silicate tricalcique contenu dans le ciment de Meftah ainsi que par le manque d'hydroxyde de calcium contrairement au ciment de Rais Hamidou.

Concernant les mélanges aux taux de ciment alumineux élevés (supérieurs à 65%) et qui caractérisent la dernière partie de la courbe, M. YADI justifie l'accélération du délai de prise par la présence des carbonates contenus dans le ciment de Meftah.

III.4.3.c. Ciment Béni-Saf

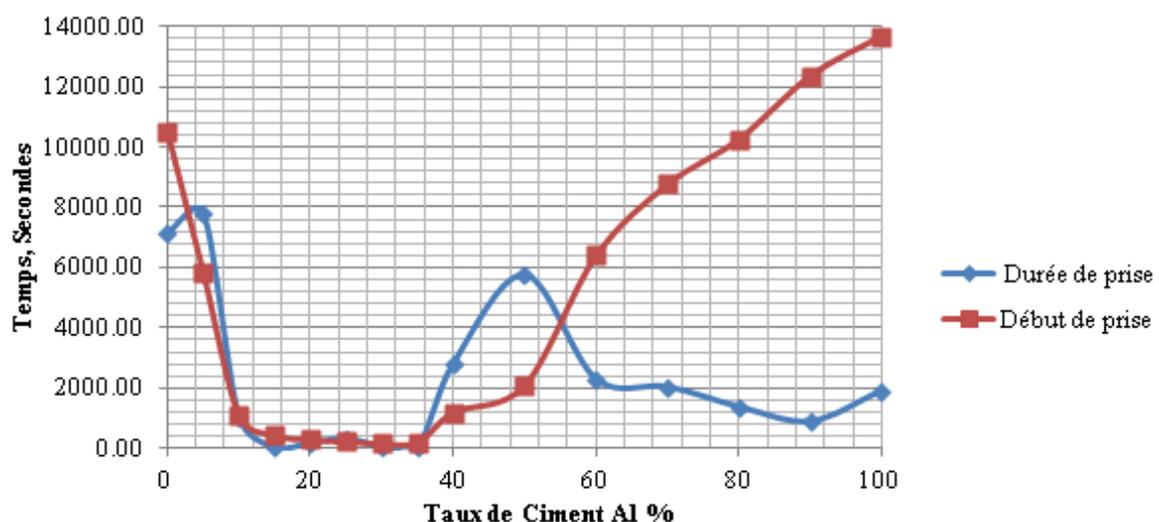


Figure III- 5: Evolution comparée du début et de la durée de prise pour les mélanges de CEM IV-Béni-Saf

On remarque de prime abord que contrairement aux deux autres mélanges, l'évolution de la durée de prise des mélanges avec le ciment de Béni-Saf est bien plus complexe.

La phase où les deux courbes ont la même allure et qui montre l'accélération du temps et du délai prise s'arrête à 30%, contrairement aux deux autres ciments.

La seconde constatation est que l'évolution troisième phase est totalement différente des précédant mélanges.

Pour 50% d'ajout, le délai de prise est voisin de celui du ciment pouzzolanique, puis il redescend et suit l'allure du ciment alumineux.

Devant ces résultats M.YADI a effectué un double contrôle pour confirmer l'augmentation du délai de prise à partir de 40%.

Il explique les différentes phases de la sorte :

Première phase, [0 à 30 %] d'ajout de ciment alumineux : L'hydroxyde de chaux et les sulfates se trouvent en quantités suffisantes pour permettre la formation de l'ettringite et l'aluminate tétra-calcique qui favorisent une prise rapide.

Deuxième phase, [30% à 50%] : Les réactions d'hydratation sont ralenties par la réduction de l'hydroxyde de chaux et des sulfates causée par la silice active contenue dans le ciment pouzzolanique, ce qui induit un brusque ralentissement de la prise et du durcissement.

Troisième phase, à partir de 50% de ciment alumineux : Le temps de prise continue à augmenter avec la baisse du délai de prise, ce qui montre que le caractère du ciment alumineux prédomine dans cette partie.

L'analyse des trois figures dans leur ensemble permet de faire ressortir le caractère primordial de la présence d'hydroxyde de chaux dans le ciment Portland qui influe dans la diminution de la durée de prise.

Etant libéré par l'hydratation du C_3S , l'hydroxyde de chaux est présent en plus grande quantité dans le ciment de Rais Hamidou et confirme donc l'interprétation faite par YADI.

III.5. Mélanges présélectionnés

En se basant sur les résultats de prise obtenus, seuls les mélanges ayant une prise rapide comprise dans la fourchette 35min-7minutes ont été présélectionnés pour subir des essais mécaniques.

Les onze mélanges répondant au critère instauré sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III- 10:Composition des mélanges présélectionnés pour les essais mécaniques

Ciments	Taux de ciment alumineux associé (%)				
Rais Hamidou	30	35	40	45	50
Meftah	20	25	30	35	-
Beni-Saf	10	15	-	-	-

Ces onze mélanges ont été utilisés pour la constitution de mortiers afin de réaliser des éprouvettes aux fins de tests d'épreuves de compression et de flexion.

Les essais de résistances à la compression et à la flexion ont été réalisés sur chaque éprouvette pour les échéances suivantes : début de prise + 2 heures, 6h, 24h, 7jours (168h).

III.5.a. Ciment Rais Hamidou

Tableau III- 11: Résistances à la compression et à la flexion des mélanges Rais-Hamidou présélectionnés en fonction du taux de ciment alumineux.

Ciment Portland %	Ciment Alumineux %	Résistance à la compression				Résistance à la flexion			
		DP +2h	6h	24h	7j	DP+2	6h	24h	7j
70	30	3.6	12.9	17.1	29.6	1.3	3.6	4.3	6
65	35	14.3	17.5	19.6	23.6	3.2	3.9	5.2	6
60	40	8.9	12.1	14.6	23.9	2.8	3.4	4.5	5.9
55	45	6.8	11.1	15	22.5	1.9	3.1	4.1	5.4
50	50	5	10.4	19.3	25	1.6	3	4.8	5.3

Afin de bien situer le mélange ayant les meilleurs caractéristiques, les courbes d'évolution de la résistance à la compression et à la flexion ont été tracées en fonction du taux de ciment alumineux pour les différents âges, elles se trouvent en **Annexe IV** ainsi que celle de la résistance à la flexion des mélanges

L'observation des deux courbes montre que le mélange contenant 35% de ciment alumineux possède les meilleures résistances aux courtes échéances que ce soit pour la compression ou la flexion.

A partir de 24h on constate que les 5 ciments ont approximativement la même résistance à quelques écarts près.

Afin de mieux visualiser la cinétique de l'évolution des résistances, les deux figures ont été reprises en fonction du temps et ont permis de confirmer le choix du mélange avec 35% de ciment alumineux comme étant la composition optimale pour notre mélange à base de ciment Rais-Hamidou. Le mélange à 30% a été également retenu : Bien que n'ayant pas d'aussi bonnes résistances au jeune âge, il se démarque tout de même des autres mélanges.

YADI suppose que la baisse des résistances mécaniques à partir de 40% d'ajout est due au développement intense des aluminates mono et bi-calciques (CAH₁₀, C₂AH₈) et leur transformation rapide, pour ce qui est des résistances au long terme les derniers mélanges 45%-50% s'améliorent après le démarrage de l'hydratation des silicates de calcium dans les mélanges.

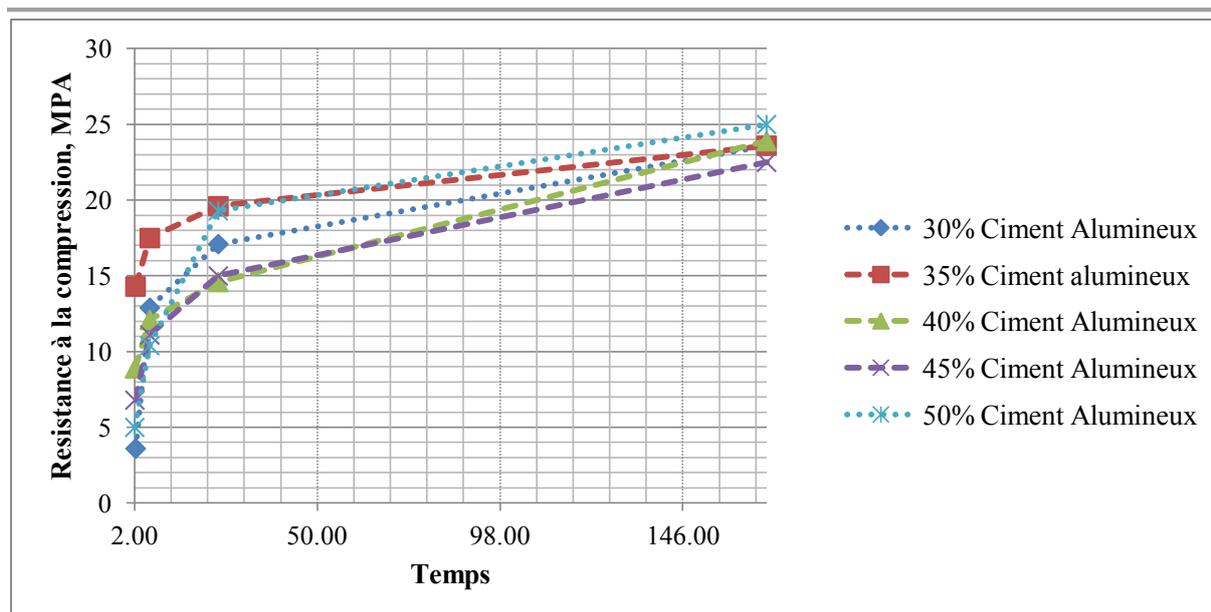


Figure III- 6: Evolution comparée de la résistance à la compression des mélanges de ciments Rais-Hamidou

III.5.b. Ciment Meftah

Tableau III- 12: Résistances à la compression et à la flexion des mélanges Meftah présélectionnés en fonction du taux de ciment alumineux

Ciment Portland %	Ciment Alumineux %	Résistance à la compression				Résistance à la flexion			
		DP +2h	6h	24h	7j	DP +2h	6h	24h	7j
85	15	0	0	7.8	3.4	0	0	2.4	7
80	20	2.0	3.2	3.5	26.6	11.1	1.3	1.4	5.5
75	25	3.7	4.0	4.6	21.8	1.6	1.8	1.8	5.1
70	30	0.9	4.3	7.3	21.8	0.7	1.8	2.3	5.1

Tout comme lors de la sélection du mélange optimal Rais Hamidou, le critère de sélection est l'évolution des résistances aux courtes échéances.

Afin de bien situer le mélange ayant les meilleures caractéristiques, les courbes d'évolution de la résistance à la compression et à la flexion ont été tracées en fonction du taux de ciment alumineux pour les différents âges. Elles se trouvent en **Annexe V** ainsi que celle de la résistance à la flexion des mélanges

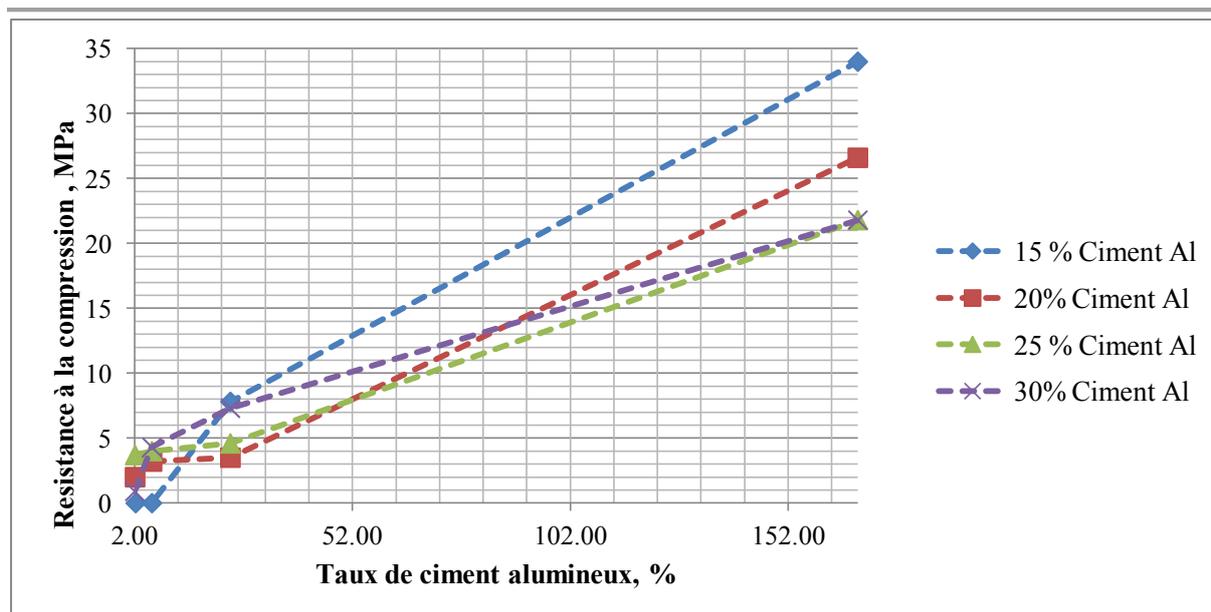


Figure III- 7: Evolution comparée de la résistance à la compression des mélanges de ciments de Meftah

On remarque que le mélange à 15% de ciment alumineux montre des résistances nulles au jeune âge et est d'office éliminé.

Au travers des deux courbes précédentes il apparaît clairement que les compositions répondant au mieux au jeune âge sont celles contenant 20% et 25 % de ciment alumineux et qui se démarquent jusqu'à 6h. Ensuite, toutes les résistances convergent vers les mêmes valeurs, chose que l'on peut aisément remarquer au travers les courbes de l'évolution comparée des résistances en fonction du temps.

Toutefois il est à noter que les résistances obtenues sont faibles en comparaison avec celle d'un ciment prompt, cette faiblesse pouvant être expliquée par les deux phénomènes cristallogéniques suivants :

1. La quantité importante de gypse fragilise la structure et permet la formation d'une grande quantité d'ettringite causant des gonflements qui provoquent des tensions inter-cristallines.[12]]
2. L'augmentation du ciment alumineux cause une augmentation des cristaux d'hydro-aluminates métastables ($CAH_{10}C_2AH_6$) dont la conversion fragilise la structure.

III.5.c. Ciment Beni-Saf

Tableau III- 13: Résistances à la compression et à la flexion des mélanges Beni-Saf présélectionnés en fonction du taux de ciment alumineux.

Ciment Portland %	Ciment Alumineux %	Résistance à la compression				Résistance à la flexion			
		DP +2h	6h	24h	7j	DP +2h	6h	24h	7j
90	10	1.3	1.6	3.0	29	0.4	0.7	1.6	6.4
85	15	5	2.1	4.7	15.4	0.8	1.1	1.2	3.9

On remarque que malgré une augmentation des résistances à 7 jours, celles au jeune âge sont beaucoup trop faibles.

Vu que seulement deux mélanges ont été testés, il n'est pas nécessaire de tracer les graphes représentant l'évolution des résistances en fonction du taux de ciment alumineux, l'évolution des résistances dans le temps est suffisante.

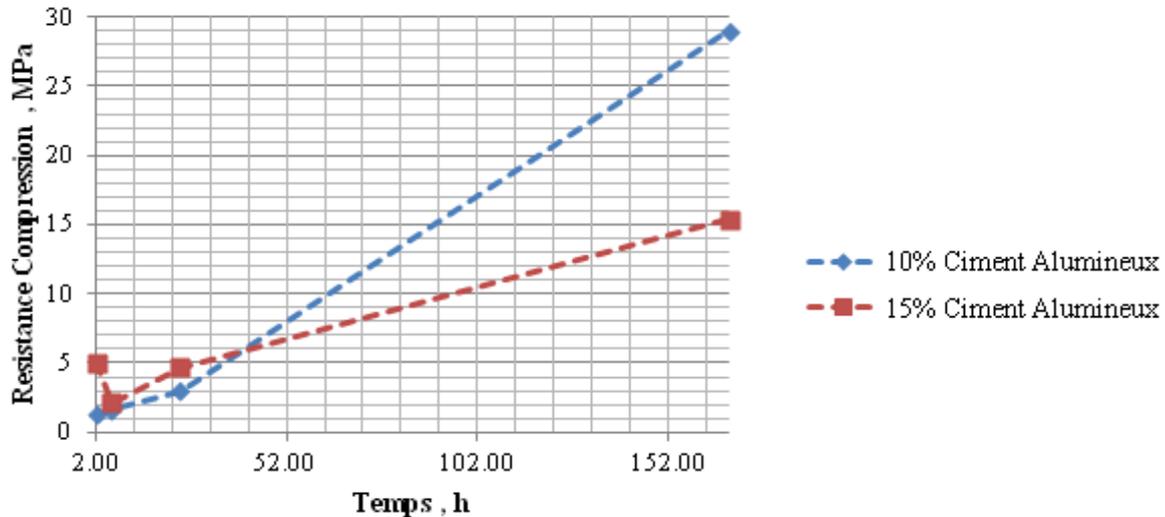


Figure III- 8: Evolution comparée de la résistance à la compression des mélanges de ciments de Béni-Saf

Au vu des faibles résistances développées par ces mélanges au jeune âge, il apparaît que la combinaison ciment pouzzolanique-ciment alumineux n'est pas envisageable pour la mise au point d'un ciment à prise rapide.

Il est à noter que le ciment Béni-Saf est le plus pauvre en C_3S qui comme souligné précédemment participe à la prise rapide et au durcissement en favorisant la libération de l'hydroxyde de chaux ainsi que le C_4AH_{13} .

En plus de cet aspect le ciment Béni-Saf comporte des teneurs élevées en silice et en fer qui influent négativement sur l'hydraulicité des aluminates de calcium en fixant d'une part, une partie de l'alumine et en formant d'autre part des composés inertes ou à faible capacité liante tels que les alumino-ferrites hydratés de calcium.

III.6. Etude des mélanges sélectionnés :

En adéquation avec les résultats des résistances obtenus par les essais mécaniques, quatre ciments (Rais Hamidou 30%,35% ; Meftah 20%,25%) ont été sélectionnés pour passer les essais finaux qui consistaient en la détermination de leurs caractéristiques physiques et mécaniques en milieu normal:

- a. Caractéristiques physique et rhéologiques.
 - i. Masse volumique.
 - ii. Surface spécifique Blaine.

- iii. Expansion
- iv. Consistance normale.
- v. Mesure du retrait
- vi. Mesure du gonflement.
- vii. Mesure de la stabilité.

b. Caractéristiques mécaniques :

Les mélanges ont été testés cette fois ci aux échéances suivantes (DP + 2h, 6h , 24h , 7jours (168h) et 28 jours (672h) pour la compression et la flexion.

Les mélanges montrant les meilleurs comportements seront retenus pour des essais supplémentaires en milieu acide.

III.6.1 Caractéristiques physiques et rhéologiques des mélanges -sélectionnés

Les différents essais ont été réalisés conformément aux normes AFNOR en vigueur en 1997.

Leurs résultats sont reportés dans le tableau ci-dessous

Tableau III- 14:Propriétés physiques et rhéologiques des mélanges retenus

Mélanges	Propriétés physiques			Propriétés rhéologiques						
	Masse volumique (g/cm ³)	SSB (cm ² /g)	Expansion (mm)	CN %	Retrait μm/m		Gonflement μm/m		Délais de prise	
					2 j	7 j	2 j	7 j	Début	Fin
RH-35	2.99	3998	1.0	26	80	480	320	400	15 :00	19 :00
RH-30	2.99	4223	0.0	25.9	980	1200	1080	1200	17 :00	33 :00
MFT-25	3.11	3146	1.0	25.8	550	580	80	80	7:00	9:30
MFT-20	3.06	3071	0.0	25.4	260	900	200	440	16:00	20:00

▪ **La stabilité :**

La mesure de la stabilité a été effectuée par la mesure de l'expansion à chaud.

On observe une expansion faible ou quasiment nulle sur les 4 mélanges : Elle ne dépasse pas les 1mm, ce qui est largement en dessous de la valeur limite recommandée de 10mm. La justification proposée est le délai pris pour l'hydratation des oxydes de calcium et probablement ceux de magnésium .

▪ **Le retrait :**

Les valeurs du retrait sur les ciments RH30 à deux jours et MFT 20 ,25 à sept jours sont nettement au dessus des valeurs admissibles à 28jours selon les spécifications de la norme NF P 15-301 ; Il a donc été inutile de mesurer le retrait à 28jours.

Avec des retraits de 80 et 480 μ m/m, le ciment RH35 est le seul qui est dans les limites à 2 et 7 jours et a donc été testé à 28jours. Sa valeur de retrait est alors de 640 μ m/m, ce qui reste dans les limites admises.

▪ **Le gonflement :**

L'évolution du gonflement est relativement faible pour les quatre mélanges avec une évolution du gonflement nulle (pour le ciment MFT-25 qui est le seul à être dans la limite normalisée à 28jours (250 μ m), Les trois autres ciments dépassent largement les valeurs autorisées et ce même sans évolution.

Comme souligné dans le chapitre II – Ciment alumineux, l'inconvénient majeur des mélanges ciments Portland /ciment alumineux est le gonflement excessif obtenu, ce qui est confirmé au travers les résultats cités ci-dessus.

III.6.2 Caractéristiques mécaniques des mélanges sélectionnés

De la même manière que lors de l'étape précédente, les mélanges ont été testés en utilisant un mortier composé de sable normalisé et un rapport E/C=0.32.

Les essais ont été réalisés aux échéances suivantes (Début de prise + 2h « DP + 2h»,6h ,24h, 7j (168h), 28j (672h)) et sont consignés dans le tableau ci-dessous pour les ciments de Rais Hamidou et de Meftah.

Tableau III- 15:Propriétés mécaniques des mélanges de Rais Hamidou et de Meftah

Composé	Résistances à la compression (MPa)					Résistances à la flexion (MPa)				
	DP + 2 h	6h	24h	7j	28j	DP + 2 h	6h	24h	7j	28j
Rais Hamidou 30	5.2	14.4	15.1	23.8	41.1	1.2	3.6	4.4	5.7	7.1
Rais Hamidou 35	14.4	17	18.3	20.2	37.5	3.3	4.4	4.4	5.6	7.5
Meftah 20	2.9	3.1	4.5	17.5	33.4	1.1	1.4	1.4	4.3	8.0
Meftah 25	4.3	4.5	4.7	12.3	30.1	1.4	1.8	1.8	3.6	7.3

Les graphiques ci-dessous permettent de visualiser l'évolution des résistances dans le temps pour les 4 mélanges. Afin d'en faciliter la lecture, nous avons opté pour une échelle semi logarithmique en abscisse.

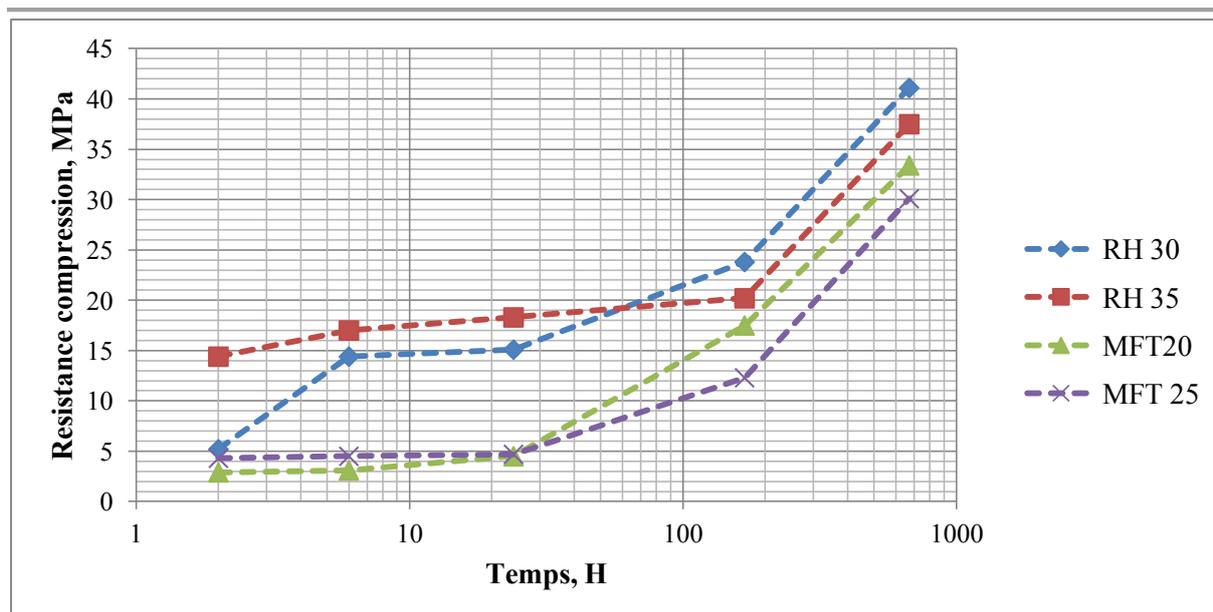


Figure III- 9 Evolution de la résistance à la compression pour les mélanges retenus

Les résultats de l'évolution des résistances à la flexion se trouvent en Annexe VI

Les résultats obtenus sont en concordance avec les conclusions tirées précédemment quant au rôle du C_3S , du carbonate de calcium et de la chaux libre.

De même pour le rapport $r = C_3S/S^\circ$ qui comme précisé précédemment accélère l'hydratation du C_3S et entraîne une meilleure résistance à 28 jours.

Le tableau qui suit étaye ces affirmations en montrant que la résistance à la compression est dans tous les cas fonction du ratio C_3S/S° .

Tableau III- 16: Comparatif du rapport Silicate tricalcique C_3S , sulfo-aluminat de calcium ($r = C_3S/S^\circ$) et de la résistance à la compression à 28 jours

Composé	$r = C_3S/S^\circ$	Rc (Mpa)
RH 30	24.69	41.1
RH 35	24.68	37.5
MFT 20	20.57	33.4
MFT 25	20.49	30.1

Il apparaît donc au travers ces diverses étapes que les mélanges ciment alumineux-ciment Meftah à 20% et Rais Hamidou à 30%, étant donné leur comportement vis-à-vis du retrait et du gonflement, montrent trop de « points négatifs ». Ils sont donc d'office éliminés pour l'étude complémentaire du comportement en milieu acide.

Le ciment de Meftah à 25% d'ajout au bon comportement vis-à-vis du retrait et du gonflement montre toutefois des résistances trop faibles au jeune âge.

À cette étape du processus de sélection, au vu de caractéristiques relevées, le mélange ciment Rais-Hamidou /ciment alumineux à 35% apparaît être la composition optimale.

M. YADI au cours de son travail a maintenu les ciments RH30 et MFT25 pour subir les tests en milieu acide en plus du ciment RH35 et des ciments MFT, RH et alumineux pur.

Les résultats obtenus par M. YADI lors de ces essais ont montré que le ciment RH35 réagissait d'une meilleure façon aux milieux acides que les mélanges RH30 ou MFT 25.

Du point de vue résistance, le mélange RH à 35% de ciment alumineux était le seul à avoir une reprise des résistances après 90 jours contrairement à tous les autres ciments qui montraient une décroissance des résistances à partir de 28 jours.

Ceci peut être expliqué par la présence de carbonate de calcium ainsi que la finesse de mouture des ajouts de poussière du ciment RH35 :

Le carbonate de calcium empêche partiellement les transformations des aluminates et évite relativement l'apparition d'une porosité inter granulaire par laquelle s'infiltrerait la solution acide.

La finesse de mouture des ajouts permet pour sa part d'accroître la compacité de l'éprouvette et ainsi limiter les infiltrations acides.

Pour ce qui est de la dégradation au contact des acides, l'observation macroscopique lui a permis de constater que le ciment RH 35 était le second moins dégradé après le ciment alumineux pur qui ne montrait qu'une corrosion superficielle.

III.7. Conclusion

La démarche de M. YADI lui a permis de sélectionner le mélange RH 35 qui est apparu comme étant le meilleur en termes de développement des résistances et de comportement rhéologique dans les plages des valeurs testées.

N'excluant pas la possibilité que le mélange choisi ne soit pas le mélange réellement optimal nous nous proposons de modéliser à l'aide de réseaux de neurones le comportement des mélanges de ciments, ce qui nous permettrait de simuler les propriétés de mélanges non testés.

CHAPITRE IV

Les réseaux de neurones artificiels

IV.1. Introduction

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont devenus en l'espace de quelques années des outils extrêmement précieux dans les différents domaines de l'industrie et de l'ingénierie.

Notre objectif à travers ce chapitre est de présenter les principales définitions et caractéristiques de ces outils. Nous préciserons par la suite les divers éléments qui les composent et leurs rôles dans le fonctionnement d'un réseau de neurone.

Nous commencerons par quelques définitions et principes de bases pour ensuite nous intéresser aux différents composants et opérations des RNA. Enfin, nous passerons en revue leurs principaux types.

IV.2. Généralités

Selon Gérard Dreyfus, un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie". [21]

Les réseaux de neurones artificiels sont donc des réseaux fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. [22]

IV.3. Principe de base

Le principe de base des réseaux de neurones consiste à injecter une ou plusieurs variables qui composent le vecteur (ou matrice) d'entrée dans le but d'obtenir la modélisation d'une grandeur donnée.

Ce principe dit de « boîte noire » consiste à introduire des entrées et récolter des sorties, sans pour autant tenir compte des étapes intermédiaires. Il permet au réseau, à partir d'une base de données dite « d'apprentissage » et d'un groupe de valeurs ciblées, toutes deux connues, d'établir une relation entre ces entrées et la grandeur à modéliser. La notion d'apprentissage sera étudiée en détail plus loin dans ce document.

A partir de là, un réseau qui a effectué un apprentissage de bonne facture sera en mesure de généraliser cette relation à des entrées jusque là jamais rencontrées. Cette propriété en fait un approximateur universel particulièrement intéressant, de par son caractère *parcimonieux*.

IV.4. Parcimonie

Le nombre de données nécessaires pour ajuster un modèle mathématique dépend directement du nombre de ses paramètres ajustables ; ce nombre croît exponentiellement avec le nombre de variables lors de l'utilisation d'approximateurs linéaires par rapport à leurs paramètres, alors qu'il croît linéairement pour les approximateurs non linéaires par rapport à leur paramètres, ce qui est le cas des RNA.

Cette propriété nommée « parcimonie » caractérise les réseaux de neurones et fait qu'au cours de l'apprentissage, le nombre d'exemples nécessaires à l'ajustement des paramètres du réseau, pour calquer la relation qui existe entre les entrées et les sorties soit moindre.

Les réseaux de neurones artificiels présentent donc un avantage indéniable par rapport aux techniques usuelles d'approximation. En effet, dans le cadre d'une modélisation non linéaire, les RNA parviennent à réaliser des modèles de précision très appréciable avec moins de données expérimentales.

Ces données étant généralement synonymes de tests, expériences ou processus industriel dont la collecte peut être longue et coûteuse, l'intérêt de cet aspect parcimonieux apparaît alors clairement au travers de cette économie temporelle et financière.

IV.5. Analogie biologique

Il est clair que l'idée même de réseaux neuronaux artificiels est inspirée du traitement d'informations qui a lieu au niveau des neurones biologiques.

Dans le cerveau humain, l'apprentissage s'effectue au travers d'un réseau de neurones où chaque neurone biologique est une cellule comportant des ramifications appelées *dendrites* qui permettent aux informations de véhiculer de l'extérieur vers le corps du neurone (*soma*). Cette information est alors traitée par le neurone et transférée au travers de l'*axone* au neurone suivant. La jonction entre deux neurones est appelée *synapse*. (Figure IV-1)

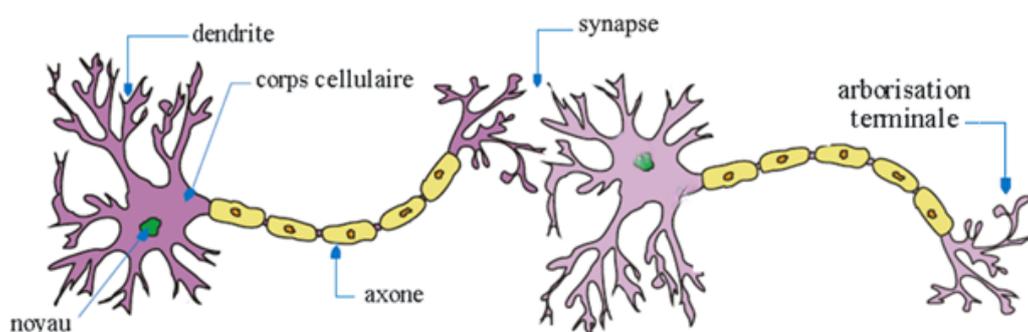


Figure IV - 1 Les différents composants d'un neurone biologique

Une résistance synaptique variable affecte le flux d'informations entre deux neurones biologiques. Les dendrites, recueillent, via les synapses, les signaux électrochimiques ou les potentiels d'action venant d'autres cellules ou de l'extérieur. Si le potentiel somatique dépasse

un certain seuil, il y a émission d'un potentiel d'action, qui correspond à une oscillation électrique très brève.

L'analogie avec le neurone artificiel est donc la suivante : il reçoit des données en entrée analogues aux impulsions électrochimiques reçues par les dendrites d'un neurone biologique. Ces entrées peuvent être les sorties d'autres neurones, ou des entrées de signaux extérieurs. La valeur de la sortie résulte du calcul de la somme des entrées, pondérées par des coefficients (dits poids synaptiques) et du calcul d'une fonction non linéaire bornée de cette somme pondérée. [23]

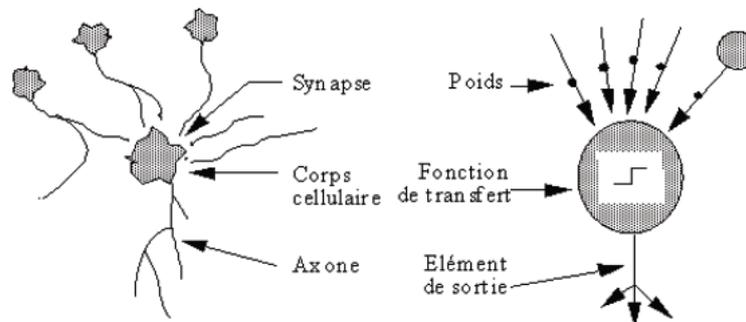


Figure IV - 2 Analogie entre les neurones biologiques et artificiels

IV.6. Composants d'un RNA

Un réseau de neurones artificiels typique se compose de manière générale d'une couche d'entrée, où sont injectées les valeurs d'entrée du réseau, d'une couche de sortie, qui donne les valeurs finales, ainsi qu'une ou plusieurs couches intermédiaires dites « couches cachées ».

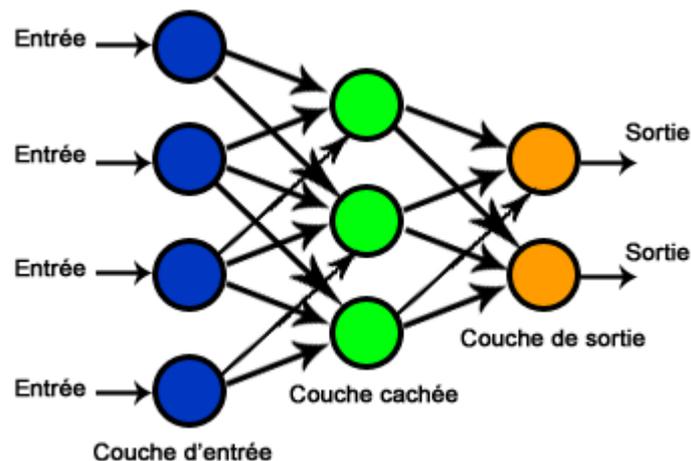


Figure IV - 3 Allure générale d'un réseau de neurones artificiels

Au niveau de chaque connexion inter-neuronale, on retrouve les divers éléments constitutifs du réseau, tels que les poids synaptiques, les biais et les fonctions d'activation.

IV.6.1. Les poids synaptiques

La notion de poids synaptiques implique le fait d'accroître la contribution de certains aspects d'un phénomène (ou d'une base de données) afin d'obtenir un résultat donné. Ceci peut être effectué en leur accordant « plus de poids » durant l'analyse, et ce au moyen de coefficients.

IV.6.2. Les fonctions d'activation

La fonction d'activation (appelée également « fonction de seuillage », ou encore « fonction de transfert ») d'un neurone artificiel définit le rendement de ce neurone, donné à partir d'une entrée ou un ensemble d'entrées.

Diverses fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone sont énumérées dans la figure ci-dessous. Les trois les plus utilisées étant les fonctions «seuil» (en anglais «hard limit»), «linéaire» et «sigmoïde». [24]

Tableau IV - 1: Tableau récapitulatif des diverses fonctions d'activation

Nom de la fonction	Relation d'entrée/sortie	Icône	Nom Matlab
seuil	$a = 0$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$		hardlim
seuil symétrique	$a = -1$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$		hardlims
linéaire	$a = n$		purelin
linéaire saturée	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $0 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$		satlin
linéaire saturée symétrique	$a = -1$ si $n < -1$ $a = n$ si $-1 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$		satlins
linéaire positive	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $n \geq 0$		poslin
sigmoïde	$a = \frac{1}{1+\exp^{-n}}$		logsig
tangente hyperbolique	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$		tansig
compétitive	$a = 1$ si n maximum $a = 0$ autrement		compet

IV.7. Apprentissage d'un RNA

La phase d'apprentissage représente l'aspect le plus intéressant des réseaux de neurones artificiels. Bien qu'il existe des réseaux qui n'apprennent rien, ceux-ci ne présentent que très peu d'intérêt. En effet, ils se contentent de réaliser une combinaison d'informations provenant de plusieurs voies de traitement.

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. [22]

Dans la plupart des algorithmes d'apprentissage utilisés, les paramètres modifiés sont les poids synaptiques des connexions (W_i). Le réglage de ces variables permet au réseau d'établir une relation entre ses entrées et ses sorties, en accordant les résultats du réseau aux valeurs cibles qu'on lui soumet (par exemple reconnaître une croix).

Cette opération peut être réalisée de deux façons. La première dite « apprentissage supervisé » consiste à effectuer une comparaison entre les valeurs de sortie (output) et celles ciblées (target). La seconde, quant à elle appelée « apprentissage non supervisé » adapte la force de ses connexions en détectant les régularités statistiques des entrées.

Ces deux types d'apprentissage sont détaillés dans la partie suivante.

A l'issue de l'apprentissage, les poids sont fixés : on peut dès lors utiliser le réseau (il sait reconnaître une croix même si elle est bruitée ou détériorée).

IV.7.1. L'apprentissage supervisé

Le principe de ce type d'apprentissage est simple et se présente sous deux phases.

La première est l'apprentissage proprement dit ; elle consiste à présenter au réseau de neurones un vecteur ou un ensemble de vecteurs d'entrée, en lui imposant d'autres vecteurs comme sortie ciblée (appelées valeurs cibles).

La seconde phase est la phase de test, pendant laquelle une nouvelle base de données est présentée au réseau. Ces valeurs n'ayant jamais été rencontrées auparavant, on pourra alors observer les performances du réseau et les évaluer par le pourcentage d'erreur.

L'intérêt des réseaux neuronaux réside précisément dans leur capacité intrinsèque à la généralisation, c'est-à-dire leur aptitude à bien se comporter sur des vecteurs qu'ils n'ont pas appris. [25]

IV.7.2. L'apprentissage non supervisé

Il consiste à découper l'ensemble des vecteurs d'entrées en classes d'équivalence, sans qu'il soit nécessaire de donner au réseau neuronal les noms de classes pour chaque exemple. Cette classification automatique ressemble à certaines méthodes utilisées en analyse de données.

La séparation en classes d'équivalence s'opère par mesure de ressemblance entre les vecteurs proposés. La contrainte que l'on doit imposer au réseau neuronal est le nombre de classes d'équivalence. Pendant la phase d'apprentissage, le réseau neuronal construit une topologie de l'espace des vecteurs d'entrées. [25]

IV.7.3. Les algorithmes d'apprentissage

IV.7.3.1. La règle delta (apprentissage par correction d'erreur)

La correction d'erreur désigne la correction de l'erreur observée en sortie. L'apprentissage par correction des erreurs consiste à minimiser un indice de performance E basé sur les signaux d'erreur $e(\tau)_i$ qui est l'erreur entre ce qu'on obtient $y_k(x)$ et ce qu'on voudrait obtenir t_k , dans le but de faire converger les sorties du réseau avec ce qu'on voudrait qu'elles soient. Un critère très usuel est la somme des erreurs quadratiques E . Il faut changer les poids de réseau dans une direction qui diminue E , c'est-à-dire dans le sens opposé au gradient. On parle alors d'une direction de «descente» donnée par :

$$\Delta \mathbf{w}^{(\tau)} = -\eta \nabla E^{(\tau)} \quad (1)$$

Où η est appelée le taux d'apprentissage et $\eta \nabla E^{(\tau)}$ désigne le gradient de E par rapport à ces paramètres libres (les poids w) au temps τ , la règle (1) est dite de «descente du gradient». [26]

IV.7.3.2. La règle de Hebb

On peut formuler l'énoncé de Hebb sous la forme d'une règle d'apprentissage donnée par

$$\Delta w_j^{(\tau-1)} = \eta p_j^{(\tau)} a^{(\tau)} \quad (2)$$

Où η est une constante positive qui détermine la vitesse de l'apprentissage, $p_j^{(\tau)}$ correspond à l'activité pré-synaptique (l'entrée j du neurone) au temps τ , et $a^{(\tau)}$ à l'activité post-synaptique (sortie du neurone) à ce même temps τ . [26]

Le tableau IV-2 résume les principales caractéristiques des algorithmes d'apprentissage de rétro propagation implantés dans MATLAB [27]

Tableau IV - 2 : Tableau récapitulatif des divers algorithmes d'apprentissage

Algorithme	Caractéristiques
Descente du gradient	
Descente du gradient simple (<i>traingd</i>)	Descente du gradient de base. Réponse lente; peut être utilisée pour apprentissage en mode séquentiel
Descente du gradient avec moment (<i>traingdm</i>)	Descente du gradient avec moment. Le moment permet à un réseau de répondre non seulement au gradient local, mais aussi aux tendances récentes dans la surface d'erreur. Sans moment un réseau peut être coincé dans un minimum local peu profond. Plus rapide que <i>traingd</i> , ne peut être utilisée que pour apprentissage en mode séquentiel
Descente du gradient avec taux d'apprentissage variable (<i>traingda</i>)	Taux d'apprentissage variable. Plus rapide que <i>traingd</i> , mais ne peut être utilisée que pour apprentissage en mode batch. Utilise des règles heuristiques pour la variation du taux d'apprentissage

Descente du gradient avec moment et taux d'apprentissage variable (<i>trainidx</i>)	Descente du gradient avec inertie (momentum) et taux d'apprentissage variable
Descente des gradients conjugués	
Descente des gradients conjugués avec la méthode de mise à jour de Fletcher-Reeves (<i>traincgf</i>)	Il possède la plus petite mémoire de stockage parmi les algorithmes de gradient conjugués.
Descente des gradients conjugués avec la méthode de mise à jour de Polak-Ribière (<i>traincgp</i>)	Nécessite une mémoire de stockage légèrement plus grande que <i>traincgf</i> . Convergence plus rapide sur quelques problèmes.
Descente des gradients conjugués avec la méthode de reprises Powell-Beale (<i>traincgb</i>)	Nécessite une mémoire de stockage légèrement plus grande que <i>traincgp</i> . Convergence Généralement plus rapide.
Scaled conjugate gradient (<i>trainscg</i>)	Le seul algorithme de gradients conjugués qui n'exige aucune recherche de ligne. Très bon algorithme d'apprentissage en général.
Quasi-Newton	
BFGS quasi-Newton (<i>trainbfg</i>)	Il exige le stockage d'une approximation de la matrice Hessienne et nécessite plus de calcul à chaque itération que les algorithmes de gradients conjugués, mais possède habituellement une convergence plus rapide.
Sécante à un pas (<i>trainoss</i>)	Cet algorithme exige moins de stockage et calcul par époque que l'algorithme BFGS. On peut considérer cela un compromis entre des algorithmes de quasi-Newton complets et des algorithmes de gradients conjugués.
Levenberg-Marquardt	
Levenberg-Marquardt (<i>trainlm</i>)	C'est l'algorithme d'apprentissage le plus rapide pour les réseaux de taille modérée. Il a la caractéristique de réduction de mémoire pour l'utilisation quand l'échantillon d'apprentissage est grand.
Régularisation	
Régularisation Bayésienne (<i>trainbr</i>)	Mise à jour des poids et des biais selon l'optimisation de Levenberg-Marquardt. Il réduit au minimum une combinaison d'erreurs quadratiques et des poids et détermine ensuite la combinaison correcte afin de produire un réseau avec une capacité de généralisation meilleure. Ce processus est appelé la régularisation Bayésienne. Il réduit la difficulté de déterminer l'architecture de réseau optimum.

IV.8. Les différents types de RNA

Si l'on désire classer les réseaux de neurones, on peut, dans un premier temps les regrouper en deux grandes familles, à savoir les réseaux de neurones *non bouclés* et les réseaux de neurones *bouclés*.

IV.8.1. Les réseaux de neurones non bouclés (Feedforward)

Un réseau de neurones non bouclé réalise une (ou plusieurs) fonctions algébriques de ses entrées, par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones. [28]

Ces réseaux dits « feedforward » sont représentés graphiquement par un ensemble de neurones "connectés" entre eux, l'information circulant des entrées vers les sorties sans "retour en arrière".

Si l'on représente le réseau comme un graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les "connexions" entre ceux-ci, le graphe d'un réseau non bouclé est *acyclique*. Le terme de "connexions" est une métaphore : dans la très grande majorité des applications, les réseaux de neurones sont des formules algébriques dont les valeurs numériques sont calculées par des programmes d'ordinateurs, non des objets physiques (circuits électroniques spécialisés) ; néanmoins, le terme de connexion, issu des origines biologiques des réseaux de neurones, est passé dans l'usage, car il est commode quoique trompeur. [28]

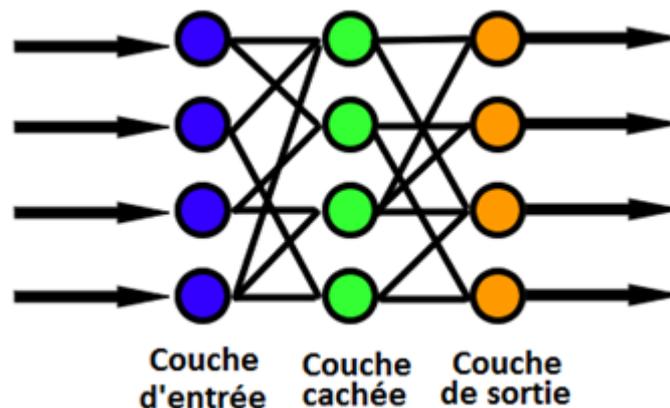


Figure IV - 4 Allure générale d'un réseau de neurones de type Feedforward

IV.8.1.1. Le perceptron

Il est possible de définir le perceptron comme étant le type de réseau de neurones le plus simple, il s'agit d'un classifieur linéaire composé uniquement d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie.

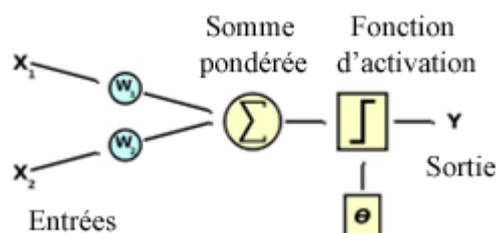


Figure IV - 5 Schéma représentatif d'un perceptron simple

IV.8.1.2. Les perceptrons multicouches (PMC)

Le perceptron multicouche est un réseau orienté de neurones artificiels organisé en couches où l'information voyage dans un seul sens, de la couche d'entrée vers la couche de sortie.

La figure IV-6 donne l'exemple d'un réseau contenant une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie. La couche d'entrée représente toujours une couche virtuelle associée aux entrées du système. Elle ne contient aucun neurone. Les couches suivantes sont des couches de neurones. Dans l'exemple illustré, il y a trois entrées, trois neurones sur la première couche cachée, quatre neurones sur la deuxième et deux neurones sur la couche de sortie. Les sorties des neurones de la dernière couche correspondent toujours aux sorties du système.

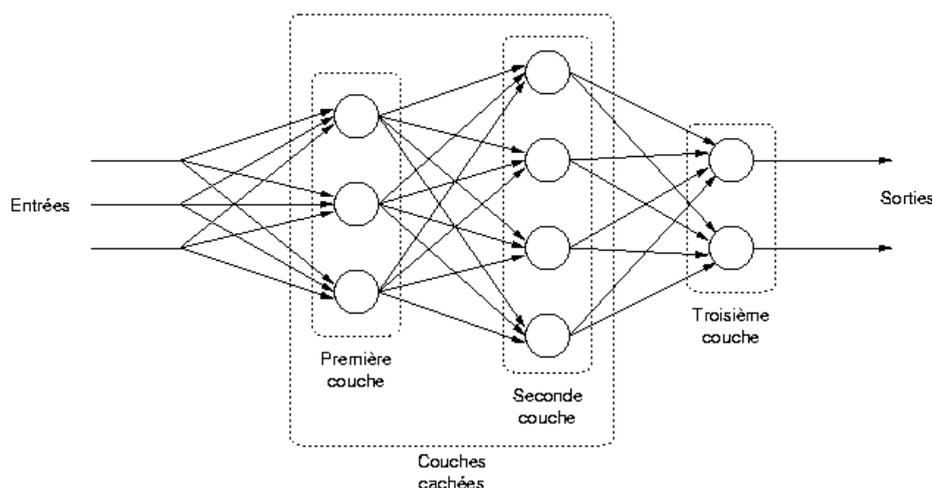


Figure IV - 6 Schéma représentatif d'un perceptron multicouche

Dans le cas général, un perceptron multicouche peut posséder un nombre de couches quelconque et un nombre de neurones (ou d'entrées) par couche également quelconque.

Les neurones sont reliés entre eux par des connexions pondérées. Ce sont les poids de ces connexions qui gouvernent le fonctionnement du réseau et « programment » une application de l'espace des entrées vers l'espace des sorties à l'aide d'une transformation non linéaire.

La création d'un perceptron multicouche pour résoudre un problème donné passe donc par l'inférence de la meilleure application possible telle que définie par un ensemble de données d'apprentissage constituées de paires de vecteurs d'entrées et de sorties désirées. Cette inférence peut se faire, entre autre, par l'algorithme dit de rétropropagation. [29]

Les fonctions d'activation utilisées pour ce type de réseau sont principalement des fonctions sigmoïdes.

IV.8.1.3. Les réseaux de neurones à fonctions radiales de base (RBF)

L'idée générale des réseaux RBF dérive de la théorie d'approximation des fonctions, ces réseaux sont une architecture Feedforward puissante. La raison de son application vient du

fait que le réseau utilise des fonctions gaussiennes standard qui sont à symétrie radiale. Son apprentissage est basé sur l'algorithme K-means et l'algorithme des moindres carrés. [29]

Les réseaux de neurones RBFs, sont principalement utilisés pour résoudre des problèmes d'approximation de fonctions dans des espaces de grandes dimensions.

Pour des raisons de simplicité, nous avons décidé de faire une petite dualité entre le réseau RBF et le PMC, en précisant les ressemblances et les différences entre les deux types des réseaux. Ce choix est justifié par la popularité des PMCs et leur vaste utilisation dans les applications industrielles. Un réseau de neurone de type RBF est un PMC spécial, son architecture est identique à celle d'un PMC à une seule couche cachée (Figure IV-7).

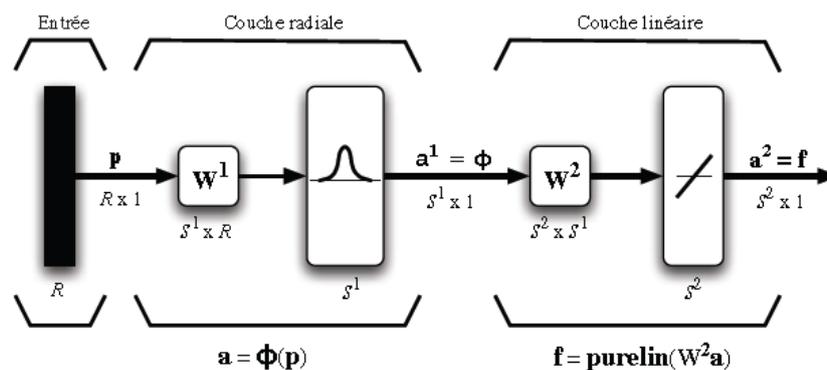


Figure IV - 7 Schéma représentatif d'un réseau RBF

IV.8.1.4. Comparaison entre RBF et PMC

Différences :

- **Le nombre de couches cachées :** Fixé à un seul dans le cas des réseaux RBF, ce nombre peut varier selon les cas étudiés avec l'utilisation des PMC, afin d'obtenir plus de précision.
- **La fonction d'activation :** Le réseau RBF utilise toujours une fonction dite à base radiale (fonction gaussienne).
- **Les poids synaptiques :** Les poids entre la couche d'entrée et la couche cachée dans les modèles neuronaux de type RBF sont toujours d'une valeur d'unité, c'est-à-dire que l'information inscrite sur la couche d'entrée sera retransmise sans distorsion vers les neurones de la couche cachée.

Similitudes :

- **La fonction de sortie :** Généralement une simple fonction linéaire qui renvoie une sommation pondérée des valeurs calculées par les neurones de la couche cachée. Bien sur, ce n'est pas toujours le cas, parfois l'utilisation d'autres fonctions pourrait être plus adéquate dans un problème donné.

- **Le sens des connexions :** Les deux réseaux sont de type Feedforward, les connexions suivent le même sens et ne sont pas récurrentes. Chaque neurone est entièrement connecté aux neurones de la couche suivante.
- **L'apprentissage :** L'apprentissage supervisé est utilisé aussi bien pour les RBF que pour les PMC pour le calcul des poids.

IV.8.2. Les réseaux de neurones bouclés (Feedback)

Un réseau de neurone est donc dit bouclé ou récurrent lorsque des sorties de neurones d'une couche sont connectées aux entrées d'une couche d'indice inférieur. Autrement dit, lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ.

La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même ; cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération. Ainsi, à chaque connexion d'un réseau de neurones bouclé est attachée, outre un poids comme pour les réseaux non bouclé, un retard, multiple entier de l'unité de temps choisie. [23]

Les réseaux de neurones bouclés les plus couramment utilisés sont les cartes auto-organisatrices de Kohonen et les mémoires associatives de Hopfield.

Ces deux types de réseaux sont utilisés respectivement pour le codage d'informations et l'optimisation d'images.

Le tableau IV-3 récapitule les différents types de réseaux de neurones ainsi que leurs domaines d'utilisations respectifs :

Tableau IV - 3: Tableau récapitulatif des différents types de RNA et de leurs domaines d'utilisation

	Types de réseaux	Domaine d'application
Feed-Forward	Perceptron monocouche	<ul style="list-style-type: none"> • Classification linéaire.
	PMC	<ul style="list-style-type: none"> • Classification non linéaire. • Approximation de fonction. • Contrôle. • Reconnaissance de formes et de paroles.
	RBF	<ul style="list-style-type: none"> • Classification non linéaire. • Approximation de fonction. • Contrôle. • Reconnaissance de formes et de paroles.
Feed-Back	Cartes auto-organisatrices	<ul style="list-style-type: none"> • Projection non linéaire des données. • Compression des données.
	Mémoires associatives	<ul style="list-style-type: none"> • Problèmes d'optimisation. • Reconnaissance de formes et de paroles.

IV.9. Conclusion :

Utilisables pour résoudre une large gamme de problèmes d'ingénierie, les réseaux de neurones s'imposent comme des outils performants caractérisés par la non nécessité d'avoir des relations théoriques entre les différentes variables. En outre grâce à ce principe de boîte noire, on peut réaliser des approximations de précisions accrue pour peu que l'on ait à notre disposition une base d'apprentissage de taille et de pertinence adéquates.

Au travers cette initiation à l'utilisation des réseaux de neurones, il nous est apparu l'adéquation de la méthode avec notre problème. Les notions théoriques acquises au cours de ce chapitre nous ont donné les outils suffisants pour choisir l'architecture à utiliser lors de la modélisation.

CHAPITRE V

Architecture et modélisation des réseaux de neurones

V.1. Introduction

Un réseau de neurones artificiels comporte de nombreux éléments dont seul un réglage minutieux permet d'obtenir des résultats satisfaisants.

Nous nous proposons donc dans ce chapitre de procéder en premier lieu à la réalisation de l'architecture de réseaux neuronaux optimaux en tenant compte de tous les réglages à apporter.

La seconde partie de ce chapitre sera consacrée à la mise en pratique des réseaux obtenus pour la modélisation du comportement des mélanges de ciments réalisés par AEM YADI [4] et enfin la simulation de résultats non testés.

V.2. Choix de l'architecture

Il est avant tout nécessaire de préciser qu'il n'existe pas de méthode prédéfinie permettant de trouver le modèle neuronal optimal pour la résolution d'un problème d'ingénierie donné.

On peut toutefois résumer les principaux éléments à définir comme suit :

- Le type de réseau.
- La structure du réseau (nombre de couches cachées et de neurones par couche cachée).
- Les fonctions d'activation.
- L'algorithme d'apprentissage.

V.2.1. Choix du type de réseau

Les deux types de réseaux de neurones de type feedforward préconisés pour l'approximation de fonctions sont les Perceptron Multicouches (PMC) et les réseaux à Fonction Radiale de Base (RBF).

Notre choix s'est basé sur l'étude comparative effectuée dans le chapitre 3 entre ces deux familles de RNA.

Nous avons retenu le choix des réseaux PMC en raison de la nécessité d'utiliser des fonctions d'activation de type sigmoïde (alors que les fonctions utilisées dans les réseaux RBF sont de type gaussiennes) ainsi que pour pouvoir optimiser nos résultats en utilisant plus d'une couche cachée, chose impossible avec les réseaux à fonction radiale de base. [23]

V.2.2. Choix de la structure du réseau

Le choix de la structure d'un réseau de neurones se résume en la détermination de deux paramètres : le nombre de couches cachées et le nombre de neurones compris dans chaque couche.

La détermination du premier paramètre a été effectuée par expérimentation. En effectuant les premières simulations sous MATLAB à l'aide d'une seule couche cachée, les résultats obtenus étaient relativement bons, mais nécessitaient de grands nombres de neurones (> 40).

Nous avons donc étendu notre architecture à deux couches cachées, ce qui nous a permis d'une part d'optimiser la mémoire utilisée (réduction du nombre de neurones) et d'autre part d'avoir une plus grande précision dans nos résultats.

Quant au nombre de neurones composants chaque couche cachée, toutes nos recherches bibliographiques nous ont conduits à la même conclusion, à savoir qu'il fallait procéder par tâtonnements afin de trouver le nombre optimal de neurones, garantissant des résultats d'une précision appréciable.

Dans le but de contourner ce problème qui aurait conduit à une perte de temps considérable, nous avons alors élaboré une fonction sous MATLAB qui crée et teste les réseaux de neurones correspondant à toutes les combinaisons de nombre de neurones par couche, jusqu'à une borne supérieure déterminée par l'utilisateur.

Notre fonction a donc effectué 400 essais pour chaque simulation, afin de calculer des réseaux de neurones contenant au maximum 20 neurones pour chaque couche.

L'erreur sur la simulation de chaque réseau est calculée par la méthode des moindres carrés (en anglais Mean Squared Error, fonction *mse* sur MATLAB) et est ensuite stockée. La comparaison entre ces valeurs nous fournira donc la combinaison optimale de neurones sur la première et la deuxième couche cachée de notre réseau.

V.2.3. Choix des fonctions d'activation

Dans le cadre d'une approximation de fonction non linéaire, les fonctions d'activation utilisées dans les couches cachées sont de type sigmoïde. Ceci a restreint notre recherche à deux fonctions : logarithme sigmoïde (*logsig*) et tangente sigmoïde (*tansig*).

Notre choix s'est porté sur la fonction *tansig* car elle produit des valeurs positives et négatives contrairement au *logsig*, ce qui permet d'avoir un apprentissage plus rapide. [23]

Quant à la couche de sortie, la fonction d'activation utilisée est linéaire (*purelin*).

V.2.4. Choix de l'algorithme d'apprentissage

Les algorithmes d'apprentissage utilisés pour la résolution de problèmes d'approximation ne sont en fait que des algorithmes d'optimisation, le but étant de trouver les valeurs optimales des poids synaptiques.

Nous avons utilisé dans notre étude l'un des algorithmes les plus utilisés pour ce type de problèmes qui est celui de retro propagation de l'erreur. Cet algorithme comprend deux étapes :

- La première étape commence par l'initialisation des poids. Le signal se déplace ensuite de l'entrée vers la sortie et aboutit à un résultat, forcément erroné car à ce niveau, les poids restent inchangés. L'erreur à la sortie de tous les neurones est enfin calculée.
- Dans la deuxième étape, le signal se propage dans le sens inverse, c'est-à-dire de la couche de sortie vers celle d'entrée, d'où le nom de « retro propagation ». Au niveau de chaque neurone, le gradient de l'erreur est calculé pour permettre la correction des poids selon la règle Delta dont nous avons parlé dans le quatrième chapitre de ce document. [23]

Ce processus itératif converge vers des erreurs très faibles, donnant des résultats satisfaisants, comme nous le verrons plus loin.

Il existe plusieurs classes d'algorithmes de retro propagation, selon la méthode d'optimisation. Pour les réseaux de taille modérée comme le notre, l'utilisation de l'algorithme de Levenberg-Marquardt est préconisée, c'est donc sur celui-ci que notre choix s'est porté.

La figure V-1 représente l'architecture type du réseau de neurones à deux couches utilisées dans nos travaux, le nombre de neurones par couche variant selon le cas étudié pour avoir des résultats optimaux.

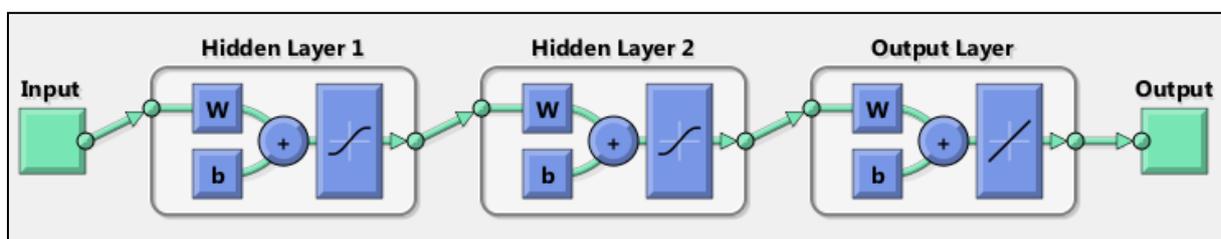


Figure V - 1 Schéma représentatif de l'architecture globale des RNA utilisés

V.3. Démarche suivie

V.3.1. ETAPE 1 : Présélection des meilleurs mélanges

Comme décrit précédemment dans la démarche entreprise par M. YADI, la première étape de notre travail consiste à extraire à partir des neuf mélanges Rais-Hamidou et Meftah présélectionnés, les mélanges optimaux, sur le critère des meilleures résistances en compression et en flexion.

Les pourcentages des proportions sont précisés dans le tableau V-1 :

Tableau V- 1 : Proportions de ciment alumineux dans les mélanges présélectionnés

Rais-Hamidou (RH)	30%	35%	40%	45%	50%
Meftah (MFT)	15%	20%	25%	30%	-

Pour ce faire, et en utilisant les réseaux de neurones, notre démarche a consisté en la simulation d'un dosage en ciment alumineux, dans le but de prévoir le comportement d'autres proportions, non testées.

Dans cette optique, notre base d'apprentissage est composée en entrée de tous les dosages (excepté celui simulé) ainsi que des valeurs de temps associées aux mesures de résistances. Dans le but d'avoir une base d'apprentissage plus conséquente, nous avons procédé à une interpolation pour extraire plus de données en temps et en résistances.

En sortie, c'est-à-dire comme données ciblées, nous aurons les valeurs de résistances à la compression et à la flexion.

On aura donc un réseau à deux entrées et deux sorties.

V.3.1.1. Mélanges du ciment Rais-Hamidou

V.3.1.1.a. Simulation du mélange RH30

Dans ce cas, la base d'apprentissage se compose en entrée des dosages en ciment alumineux suivant : 35%, 40%, 45% et 50%. Les temps sont compris dans une plage de données allant de 2 à 168 heures (7jours) répartis comme suit (Tableau V-2):

Tableau V- 2: Valeurs de temps prises en compte pour la phase de présélection (R-H)

Temps (heures)							
2	4	6	8	12	24	36	168

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 6 neurones pour la première couche cachée, et 8 pour la seconde.

Tableau V- 3 : Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH30

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	6	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	8	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-2 et V-3 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

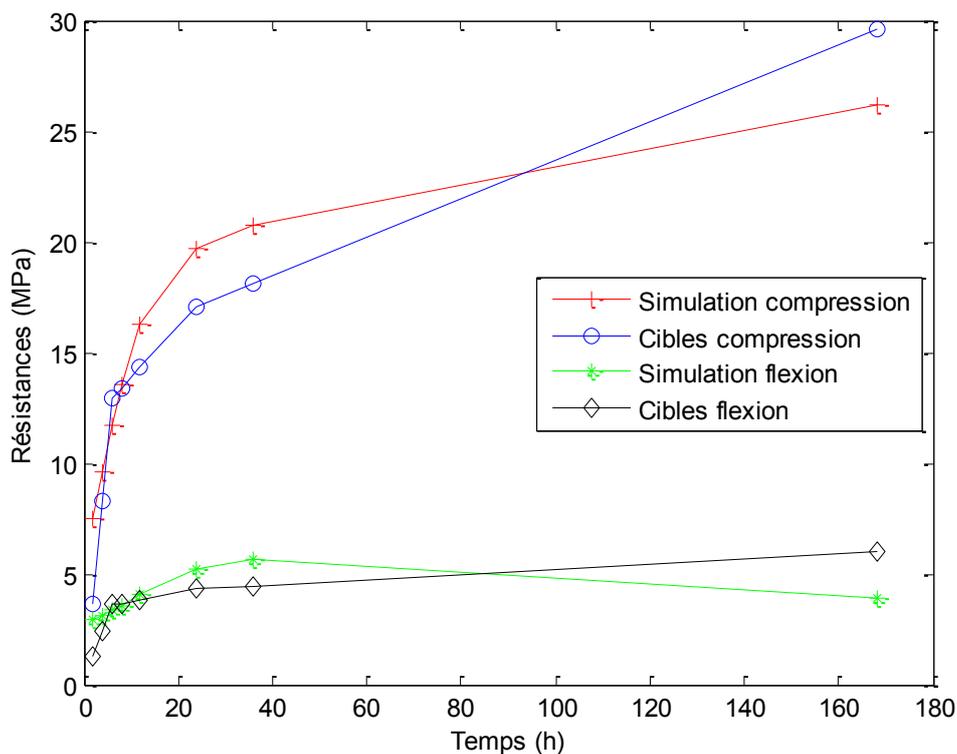


Figure V - 2 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH30 présélectionné

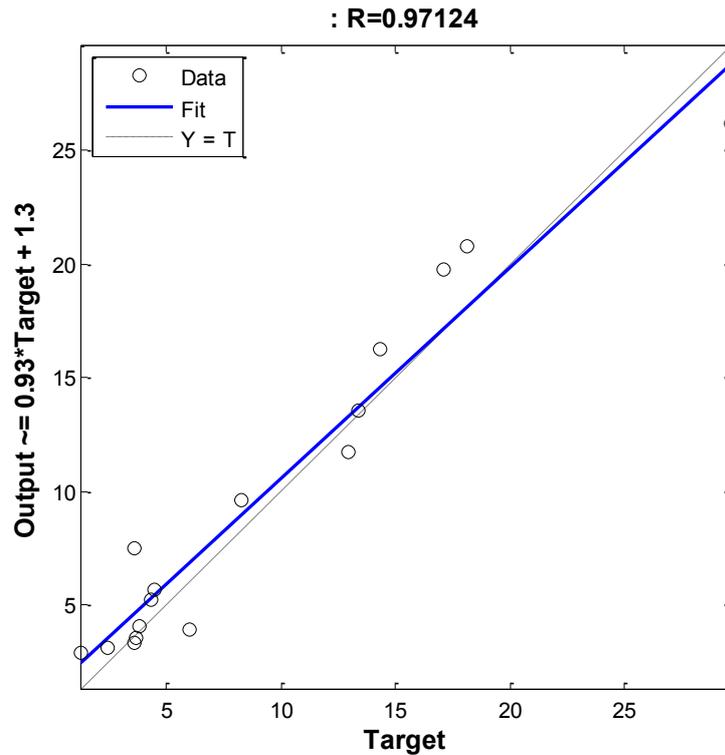


Figure V - 3 Courbe de régression linéaire du mélange RH30 présélectionné

V.3.1.1.b. Simulation du mélange RH35

Dans ce cas, la base d'apprentissage se compose en entrée des dosages en ciment alumineux suivants : 30%, 40%, 45% et 50%. Les temps sont compris dans une plage de donnée allant de 2 à 168 heures (7jours) répartis comme précédemment.

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 9 neurones pour la première couche cachée, et 3 pour la seconde.

Tableau V- 4: Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH35

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	9	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	3	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-4 et V-5 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

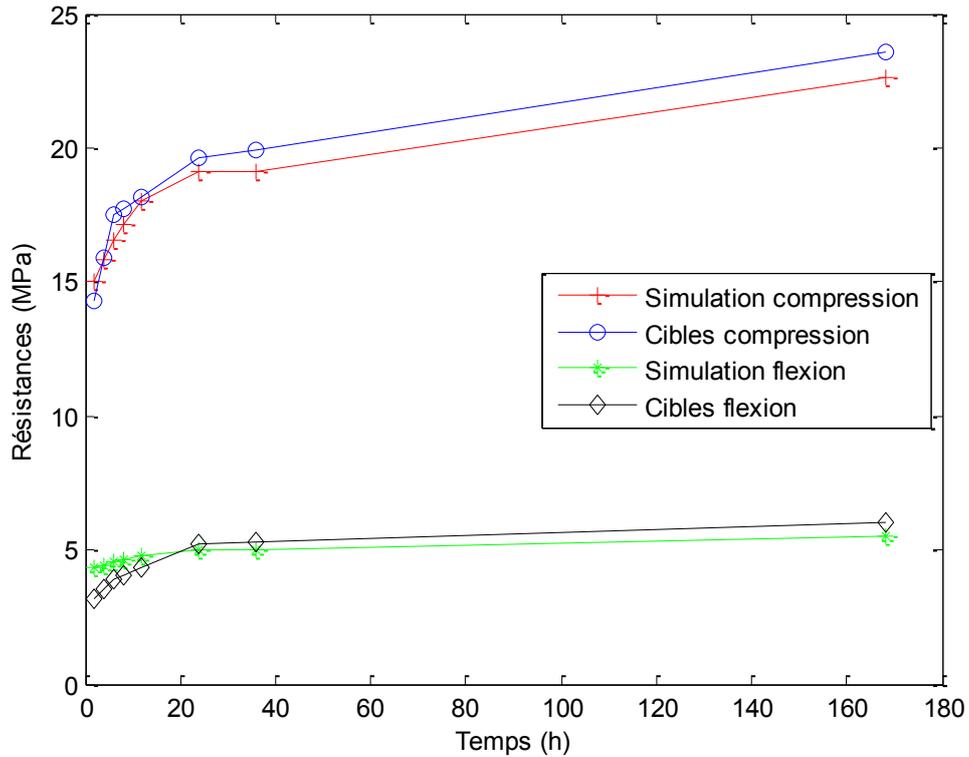


Figure V - 4 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH35 présélectionné

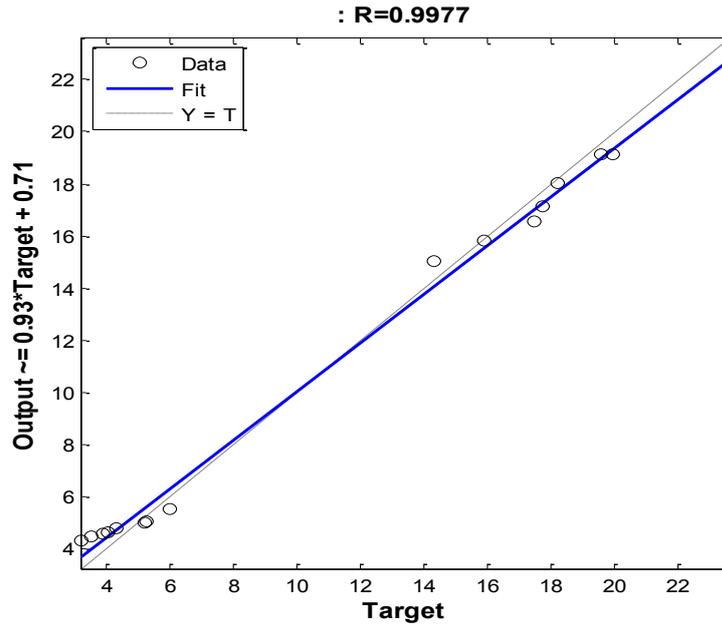


Figure V - 5 Courbe de régression linéaire du mélange RH35 présélectionné

V.3.1.1.c. Simulation du mélange RH40

Dans ce cas, la base d'apprentissage se compose en entrée des dosages en ciment alumineux suivants : 30%, 35%, 45% et 50%. Les temps sont compris dans une plage de donnée allant de 2 à 168 heures (7jours) répartis comme précédemment.

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 4 neurones pour la première couche cachée, et 2 pour la seconde.

Tableau V- 5: Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH40

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	4	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	2	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-6 et V-7 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

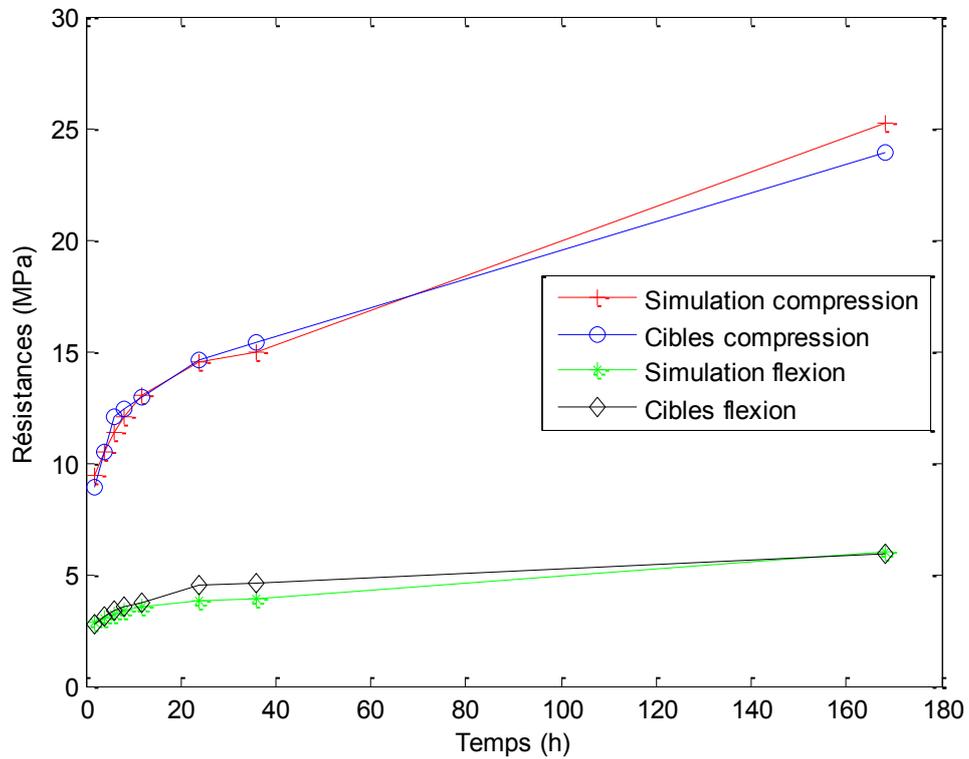


Figure V - 6 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH40 présélectionné

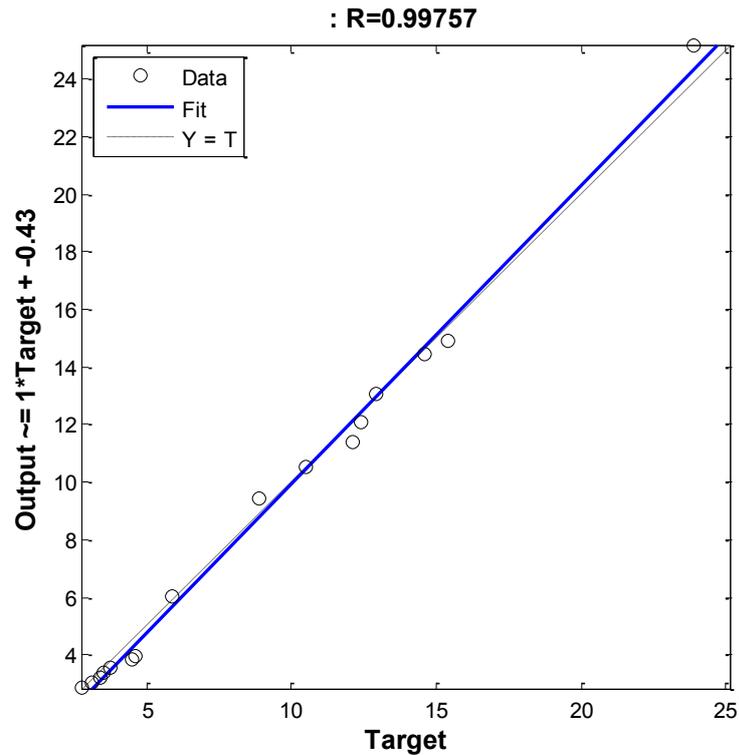


Figure V - 7 Courbe de régression linéaire du mélange RH40 présélectionné

V.3.1.1.d. Simulation du mélange RH45

Dans ce cas, la base d'apprentissage se compose en entrée des dosages en ciment alumineux suivants : 30%, 35%, 40% et 50%. Les temps sont compris dans une plage de donnée allant de 2 à 168 heures (7jours) répartis comme précédemment.

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 8 neurones pour la première couche cachée, et 12 pour la seconde.

Tableau V- 6: Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH45

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	8	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	12	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-8 et V-9 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

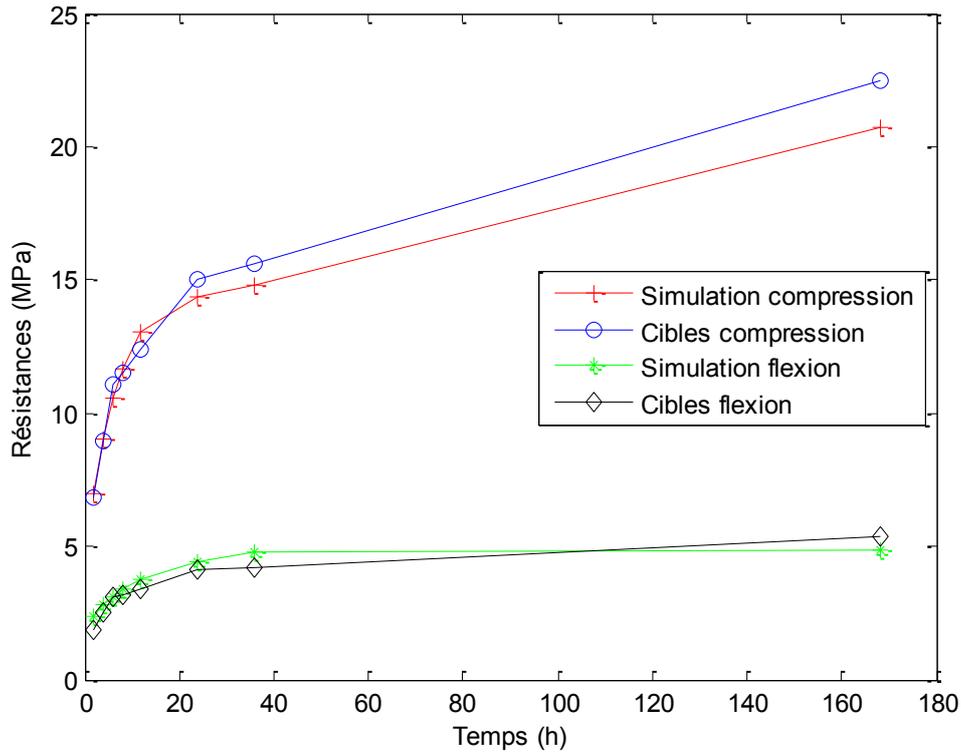


Figure V - 8 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH45 présélectionné

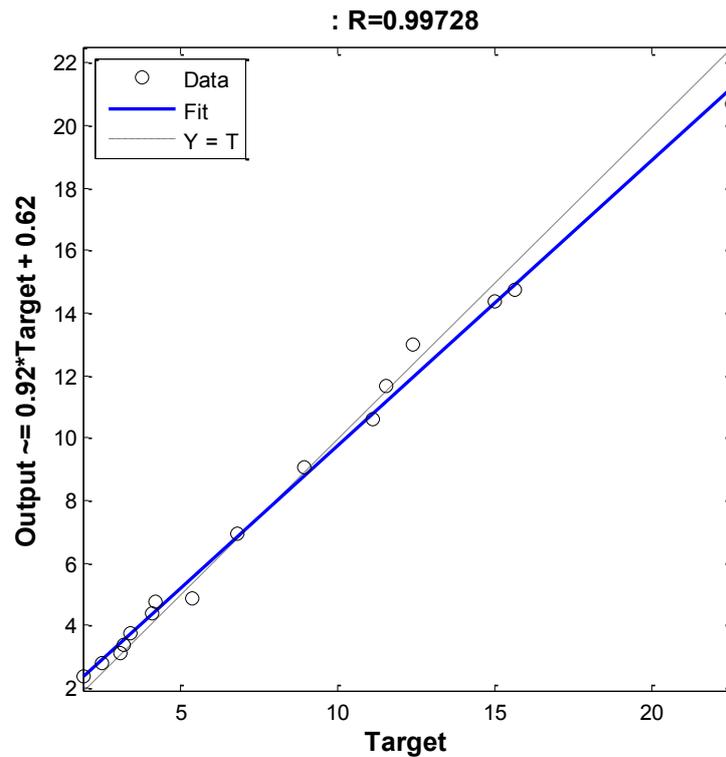


Figure V - 9 Courbe de régression linéaire du mélange RH45 présélectionné

V.3.1.1.e. Simulation du mélange RH50

Dans ce cas, la base d'apprentissage se compose en entrée des dosages en ciment alumineux suivants : 30%, 35%, 40% et 45%. Les temps sont compris dans une plage de donnée allant de 2 à 168 heures (7jours) répartis comme précédemment.

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 5 neurones pour la première couche cachée, et 10 pour la seconde.

Tableau V- 7: Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH50

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	5	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	10	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-10 et V-11 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

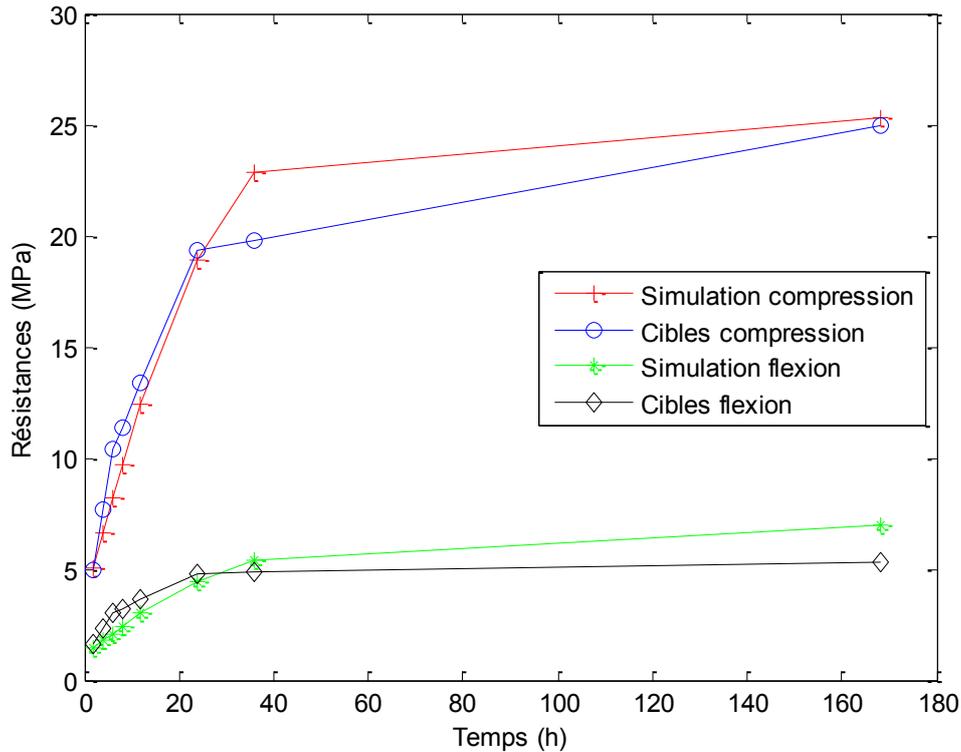


Figure V - 10 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH50 présélectionné

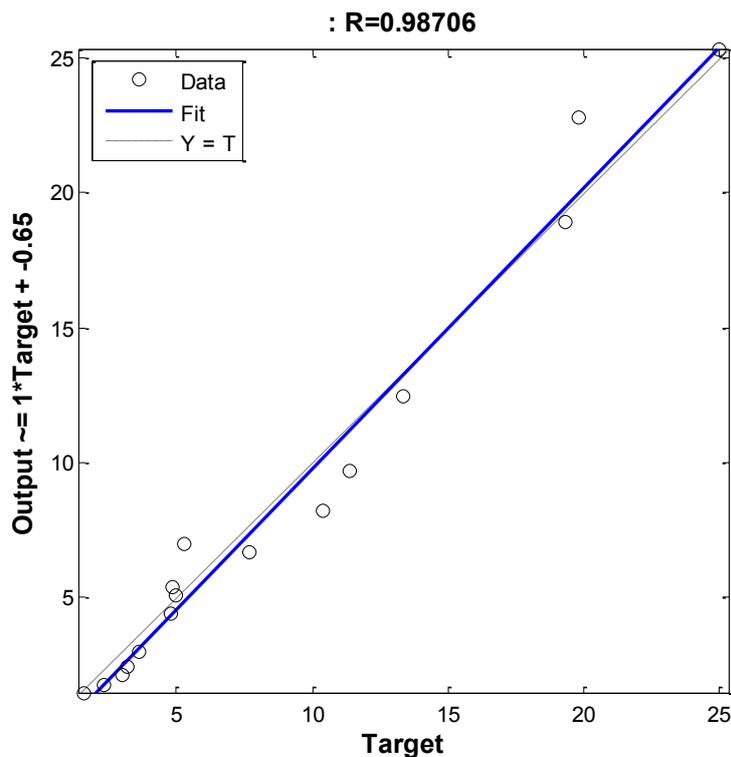


Figure V - 11 Courbe de régression linéaire du mélange RH50 présélectionné

V.3.1.2. Mélanges du ciment Meftah

V.3.1.2.a. Simulation du mélange MFT15

Dans ce cas, la base d'apprentissage se compose en entrée des dosages en ciment alumineux suivants : 20%, 25% et 30%. Les temps sont compris dans une plage de donnée allant de 2 à 168 heures (7jours) répartis comme suit (Tableau V-8) :

Tableau V- 8 : Valeurs de temps prises en compte pour la phase de présélection (MFT)

Temps (heures)							
2	4	6	8	12	24	36	168

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 14 neurones pour la première couche cachée, et 16 pour la seconde.

Tableau V- 9: Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de MFT15

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	14	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	16	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-12 et V-13 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

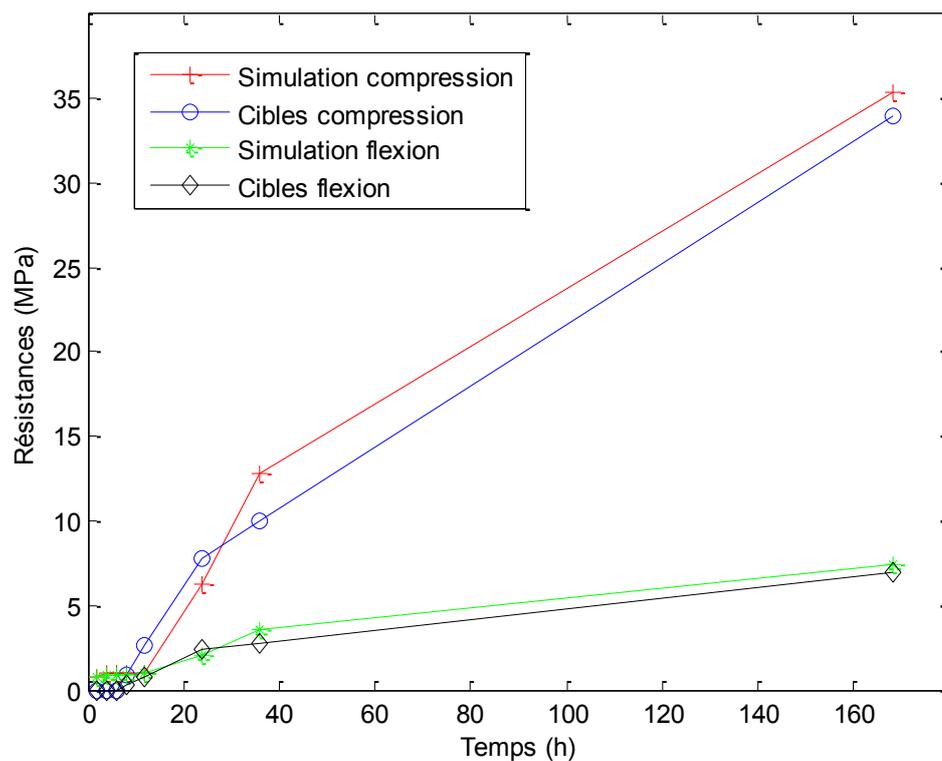


Figure V - 12 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT15 présélectionné

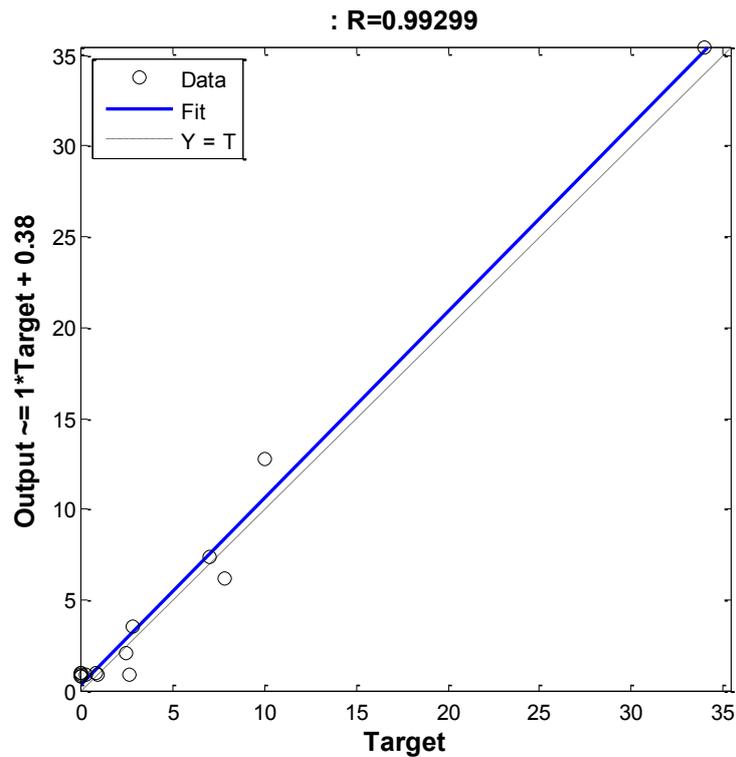


Figure V - 13 Courbe de régression linéaire du mélange MFT15 présélectionné

V.3.1.2.b. Simulation du mélange MFT20

Dans ce cas, la base d'apprentissage se compose en entrée des dosages en ciment alumineux suivants : 15%, 25% et 30%. Les temps sont compris dans une plage de donnée allant de 2 à 168 heures (7jours) répartis comme précédemment.

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 12 neurones pour la première couche cachée, et 4 pour la seconde.

Tableau V- 10 :Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de MFT20

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	12	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	4	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-14 et V-15 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

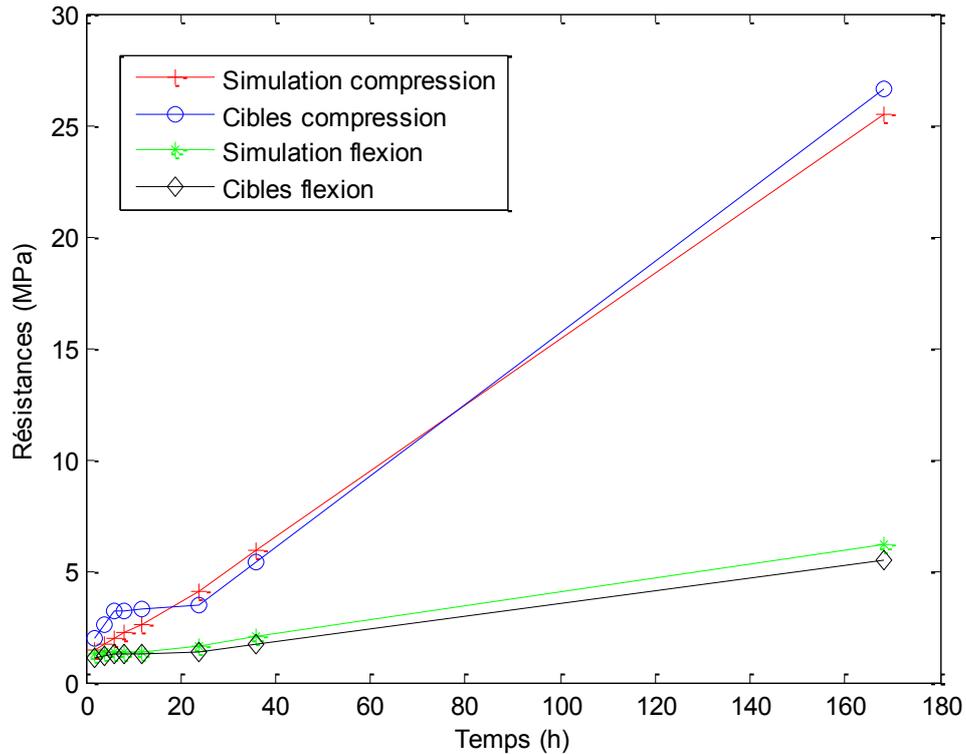


Figure V - 14 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT20 présélectionné

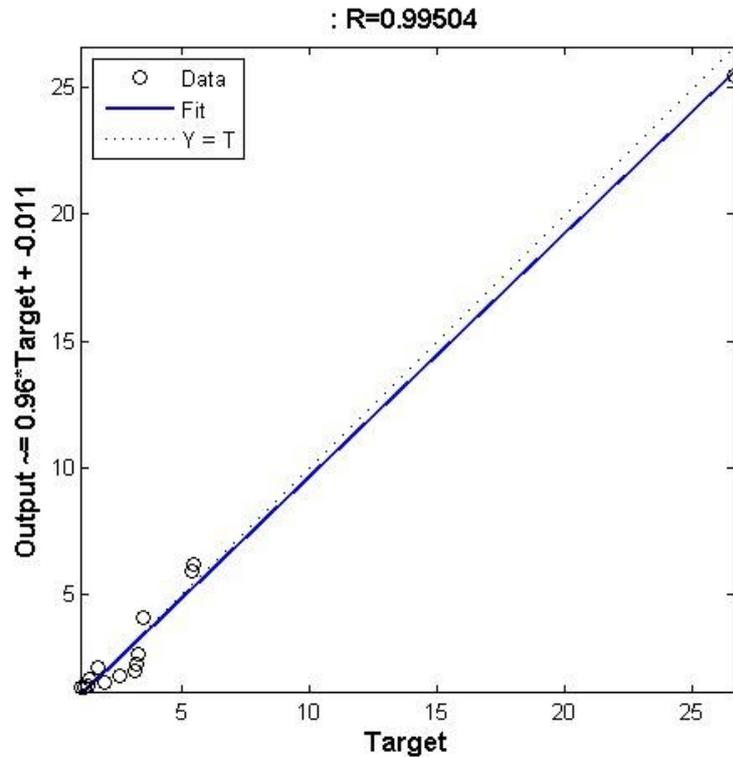


Figure V - 15 Courbe de régression linéaire du mélange MFT20 présélectionné

V.3.1.2.c. Simulation du mélange MFT25

Dans ce cas, la base d'apprentissage se compose en entrée des dosages en ciment alumineux suivants : 15%, 20% et 30%. Les temps sont compris dans une plage de donnée allant de 2 à 168 heures (7jours) répartis comme précédemment.

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 16 neurones pour la première couche cachée, et 3 pour la seconde.

Tableau V- 11: Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de MFT25

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	16	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	3	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-16 et V-17 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

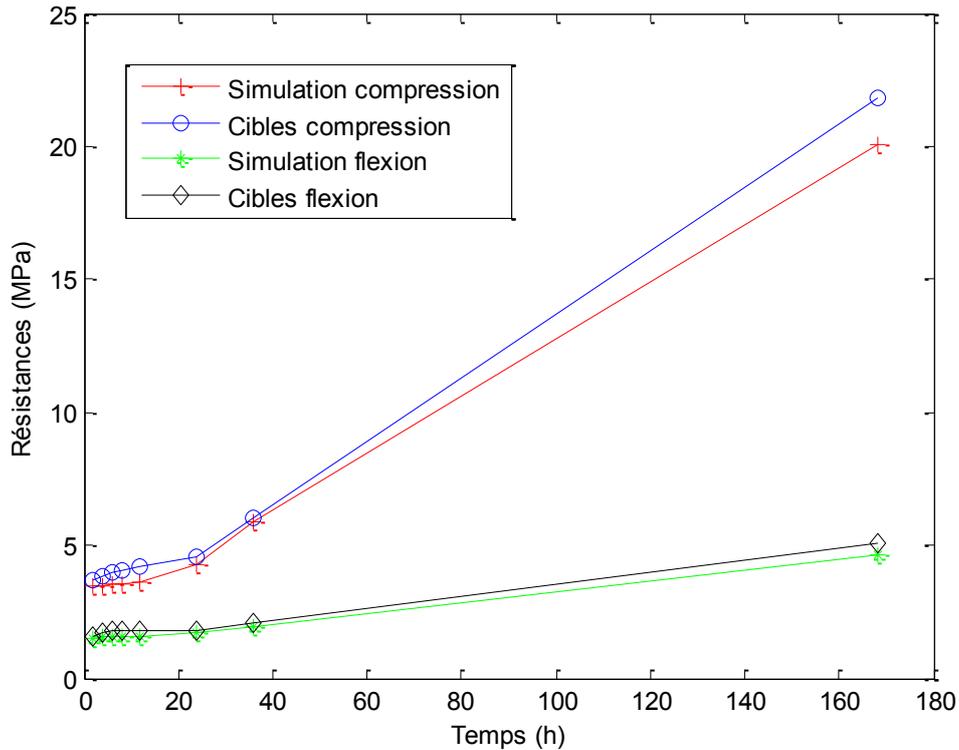


Figure V - 16 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT25 présélectionné

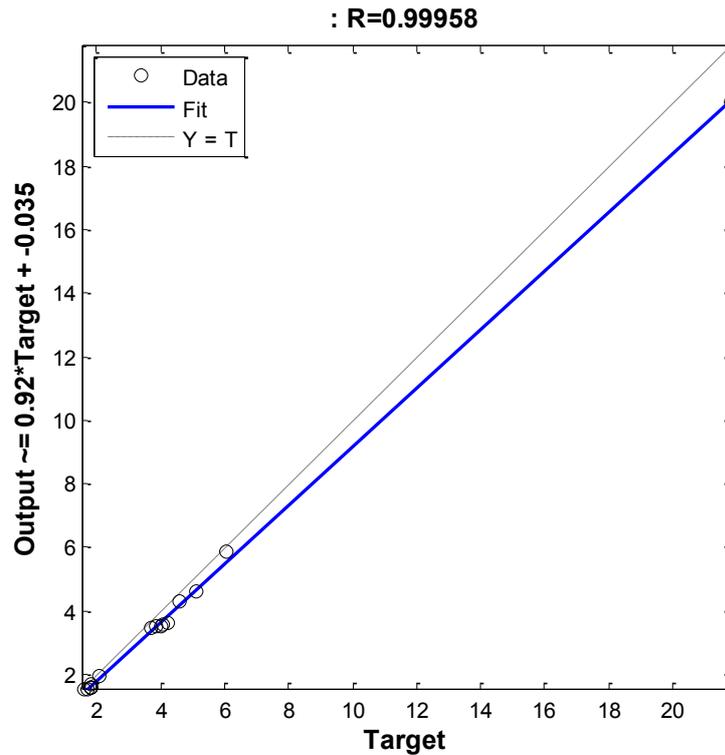


Figure V - 17 Courbe de régression linéaire du mélange MFT25 présélectionné

V.3.1.2.d. Simulation du mélange MFT30

Dans ce cas, la base d'apprentissage se compose en entrée des dosages en ciment alumineux suivants : 15%, 20% et 25%. Les temps sont compris dans une plage de donnée allant de 2 à 168 heures (7jours) répartis comme précédemment.

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 19 neurones pour la première couche cachée, et 7 pour la seconde.

Tableau V- 12: Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de MFT30

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	19	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	7	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-18 et V-19 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

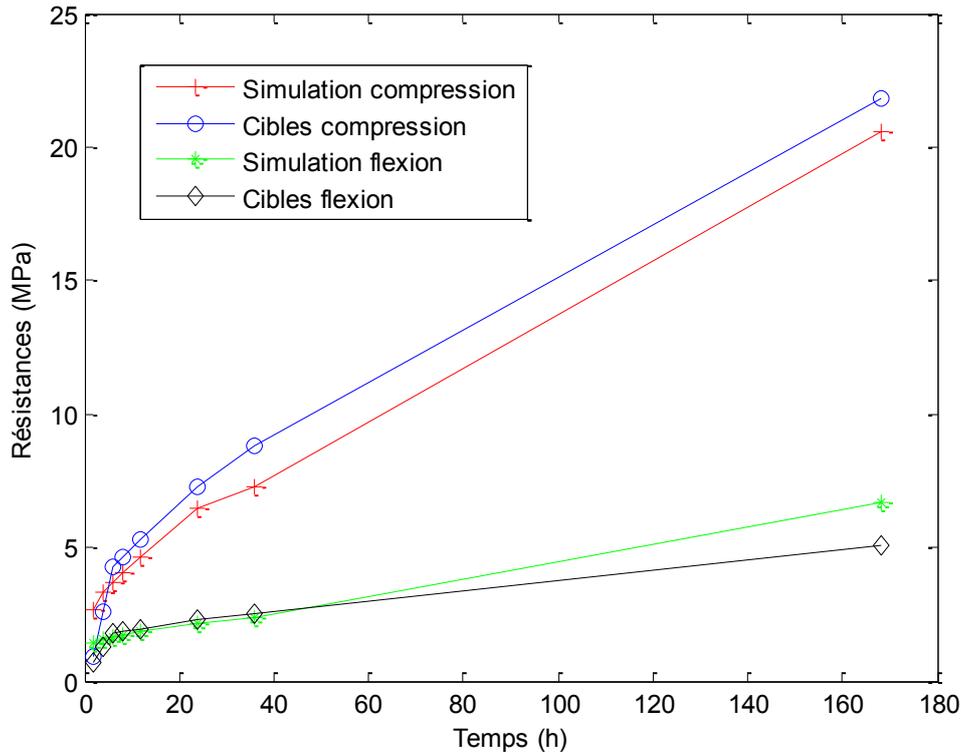


Figure V - 18 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT30 présélectionné

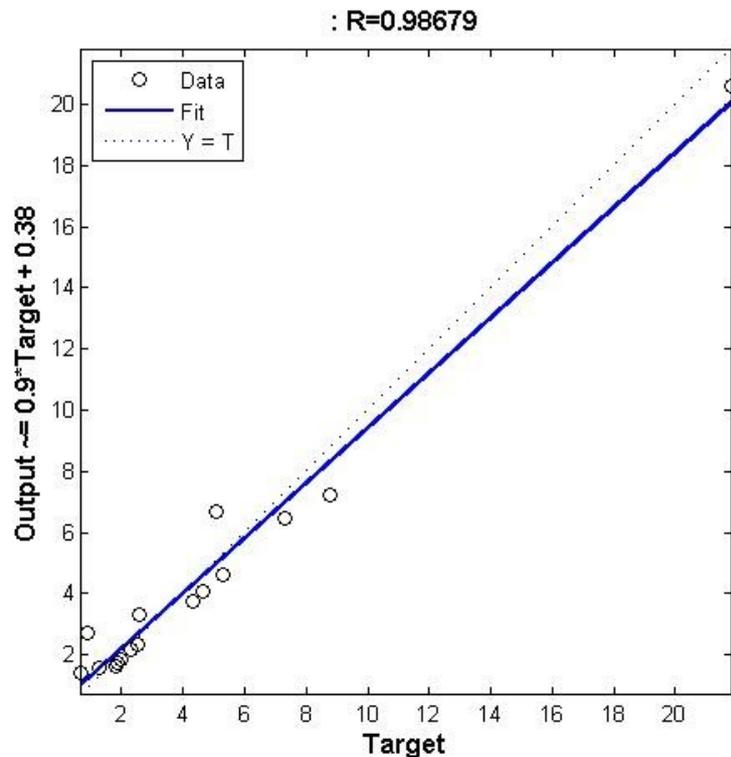


Figure V - 19 Courbe de régression linéaire du mélange MFT30 présélectionné

V.3.2.ETAPE 2 : Sélection du mélange optimal

Dans la deuxième étape de la démarche de M.YADI, l'étude s'est limitée aux 4 mélanges qui ont montré le meilleur comportement, deux pour le ciment de Rais-Hamidou, et deux pour le ciment de Meftah. Les proportions de ciment alumineux sont indiquées dans le tableau V-13 ci-dessous :

Tableau V- 13: Proportions de ciment alumineux dans les mélanges sélectionnés

Rais-Hamidou (RH)	30%	35%
Meftah (MFT)	20%	25%

Ces mélanges ont été étudiés vis-à-vis de la résistance à la compression et à la flexion, sur un intervalle de temps allant de 2 heures à 28 jours, réparti comme suit :

Tableau V- 14: Valeurs de temps prises en compte pour la phase de sélection

Temps (h)	2	4	6	8	12	24	36	72	96	168	672
-----------	---	---	---	---	----	----	----	----	----	-----	-----

La base d'apprentissage contiendra donc, comme dans la première étape les proportions de ciment alumineux ainsi que les valeurs du temps, et en sortie les résistances à la compression et à la flexion.

Compte tenu du faible nombre de mélanges pour chaque ciment, nous avons réalisé notre simulation selon deux approches différentes :

V.3.2.1. Première approche

En tout point similaire à la première étape de notre travail, cette approche consiste à retirer l'un des deux mélanges pour chaque ciment (RH35 pour le ciment Rais-Hamidou et MFT20 pour le ciment Meftah) pour le simuler, après avoir effectué l'apprentissage avec les données relatives au mélange restant.

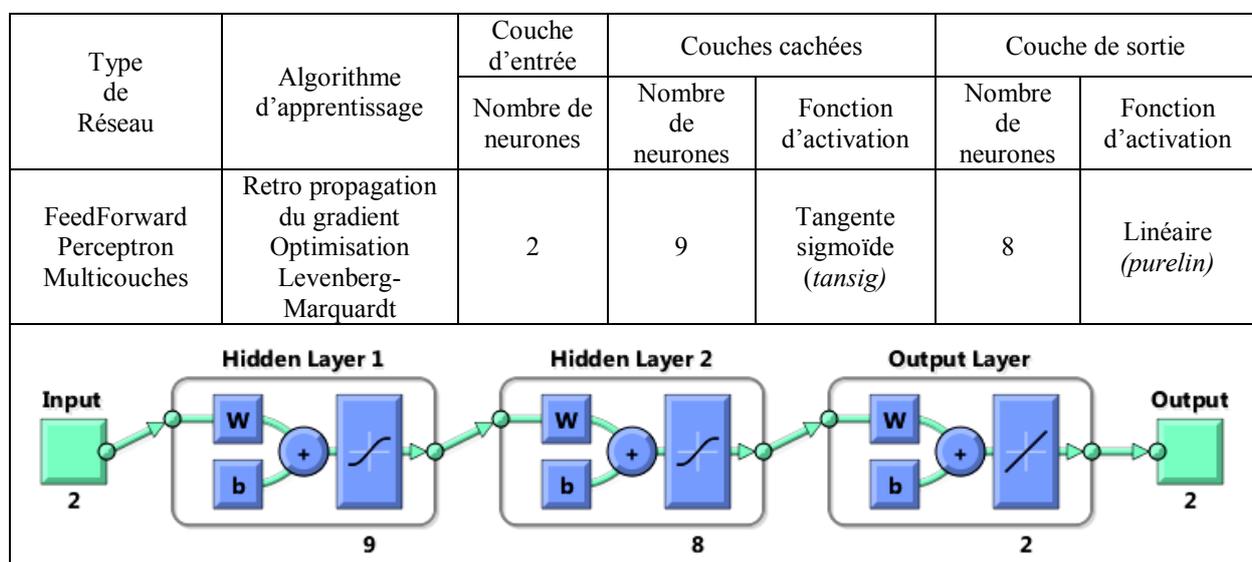
Bien qu'elle ait donné des résultats satisfaisants comme le montrent les figures qui suivent, nous avons jugé cette approche peu intéressante du fait que la base d'apprentissage se limite à une seule composition, et ne garantit donc pas une bonne capacité de généralisation.

V.3.2.1.a. Simulation du mélange RH35

La base d'apprentissage se compose donc en entrée du dosage unique en ciment alumineux de 30%. Les temps sont compris dans une plage de donnée allant de 2 à 672 heures (28 jours) répartis comme indiqué dans le tableau V-14.

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 9 neurones pour la première couche cachée, et 8 pour la seconde.

Tableau V- 15: Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de RH35 (première approche de sélection)



Les figures V-20 et V-21 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

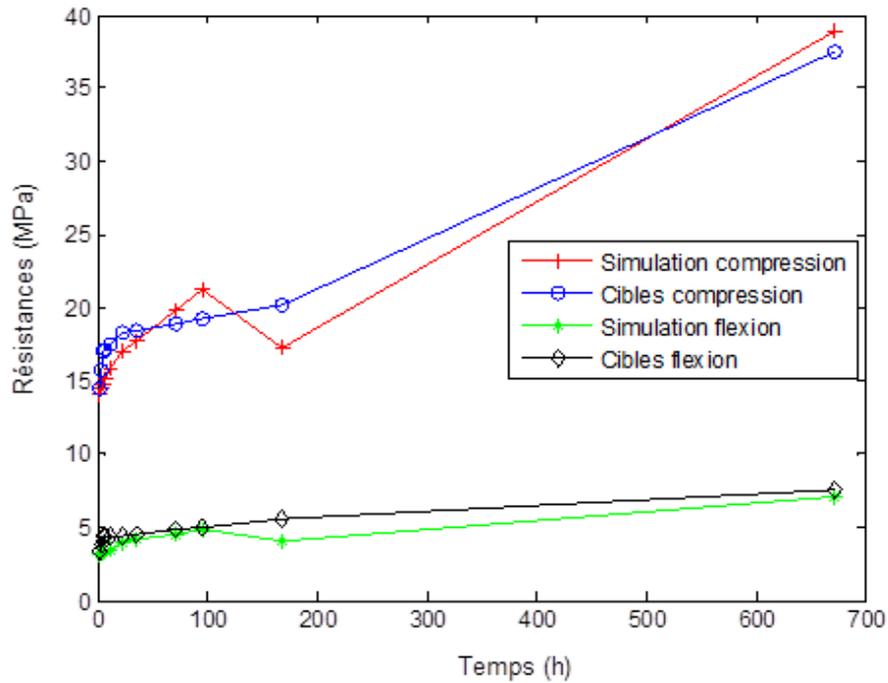


Figure V - 20 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH35 sélectionné (première approche)

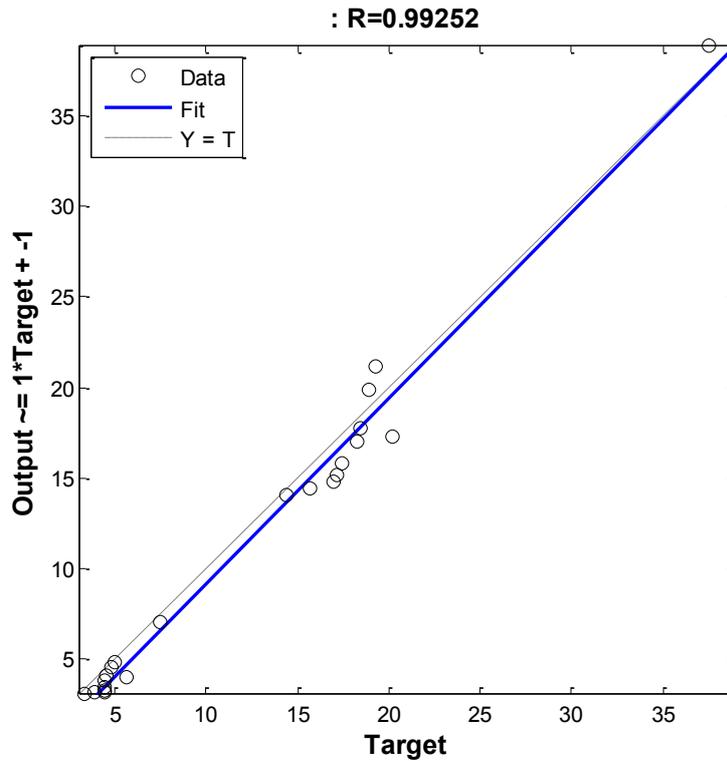


Figure V - 21 Courbe de régression linéaire du mélange RH35 sélectionné (première approche)

V.3.2.1.b.Simulation du mélange MFT20

La base d'apprentissage se compose donc en entrée du dosage unique en ciment alumineux de 25%. Les temps sont compris dans une plage de donnée allant de 2 à 672 heures (28 jours) répartis comme indiqué dans le tableau V-14.

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 13 neurones pour la première couche cachée, et 6 pour la seconde.

Tableau V- 16:Architecture du réseau utilisé pour la modélisation de MFT20 (première approche de sélection)

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	13	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	6	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-22 et V-23 représentent respectivement les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

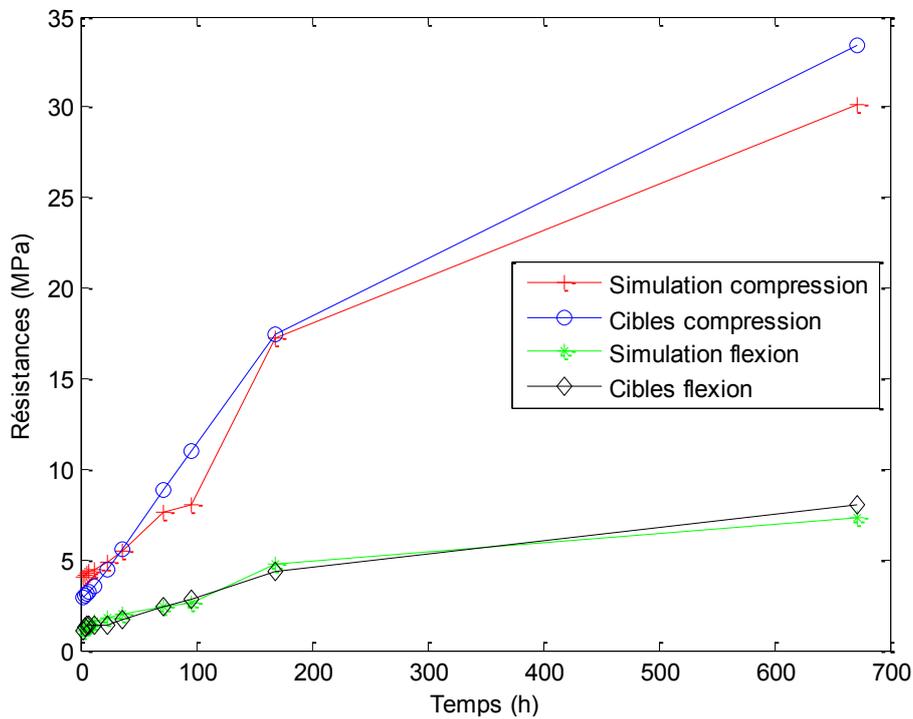


Figure V - 22 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT20 sélectionné (première approche)

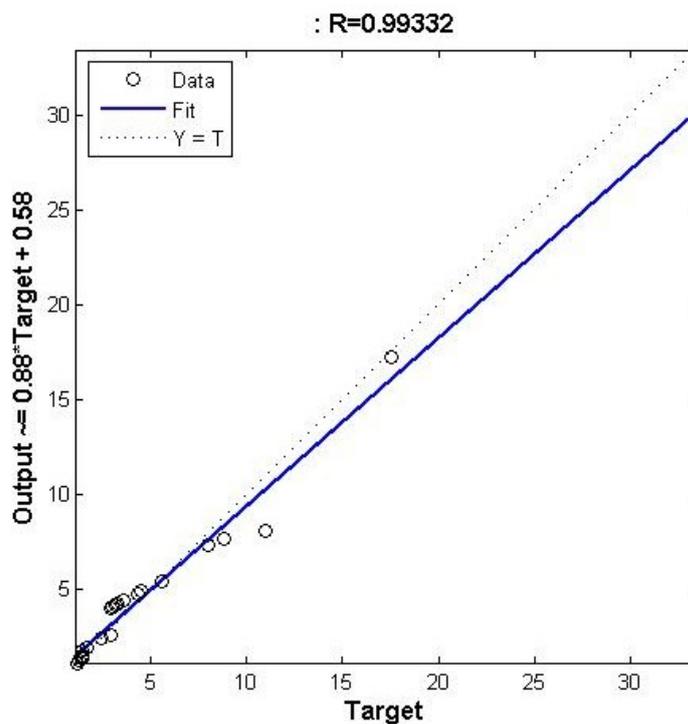


Figure V - 23 Courbe de régression linéaire du mélange MFT20 sélectionné (première approche)

V.3.2.2. Deuxième approche

Pour une meilleure capacité de généralisation sur les dosages en ciment alumineux, notre deuxième approche a consisté à retirer de la base d'apprentissage de chaque ciment, et pour chaque mélange une plage de données, relative à un intervalle de temps donné dans le tableau V-17.

Tableau V- 17: Valeurs de temps prises en compte pour la simulation de la phase de sélection (deuxième approche)

Temps (h)	8	12	24	36
-----------	---	----	----	----

Nous avons ensuite procédé à la simulation du comportement de chacun des 4 mélanges à ces valeurs de temps, vis-à-vis de la compression et de la flexion.

V.3.2.2.a. Simulation des mélanges du ciment Rais-Hamidou

La base d'apprentissage se compose en entrée des valeurs du taux de ciment alumineux des deux mélanges, c'est-à-dire 30% et 35%, ainsi que les valeurs de temps indiquées dans le tableau V-18.

Les valeurs cibles sont les résistances à la compression et à la flexion au temps t.

Tableau V- 18: Valeurs de temps prises en compte pour l'apprentissage de la phase de sélection (R-H) (deuxième approche)

Temps (h)	2	4	6	72	96	168	672
-----------	---	---	---	----	----	-----	-----

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 3 neurones pour la première couche cachée, et 4 pour la seconde.

Tableau V- 19: Architecture du réseau utilisé pour la modélisation des mélanges R-H (deuxième approche de sélection)

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	3	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	4	Linéaire (<i>purelin</i>)

The diagram illustrates a neural network architecture. It starts with an 'Input' layer with 2 nodes. This connects to 'Hidden Layer 1' which has 3 nodes. Each node in a hidden layer receives inputs from the previous layer, multiplied by weights (W), and a bias (b) is added. The result is passed through a sigmoidal activation function. 'Hidden Layer 2' has 4 nodes, following the same structure. Finally, the 'Output Layer' has 2 nodes, which receive inputs from the second hidden layer, multiplied by weights (W), and a bias (b) is added. The final result is passed through a linear activation function to produce the 'Output'.

Les figures V-24, V-25 et V-26 représentent les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI, ainsi que la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R.

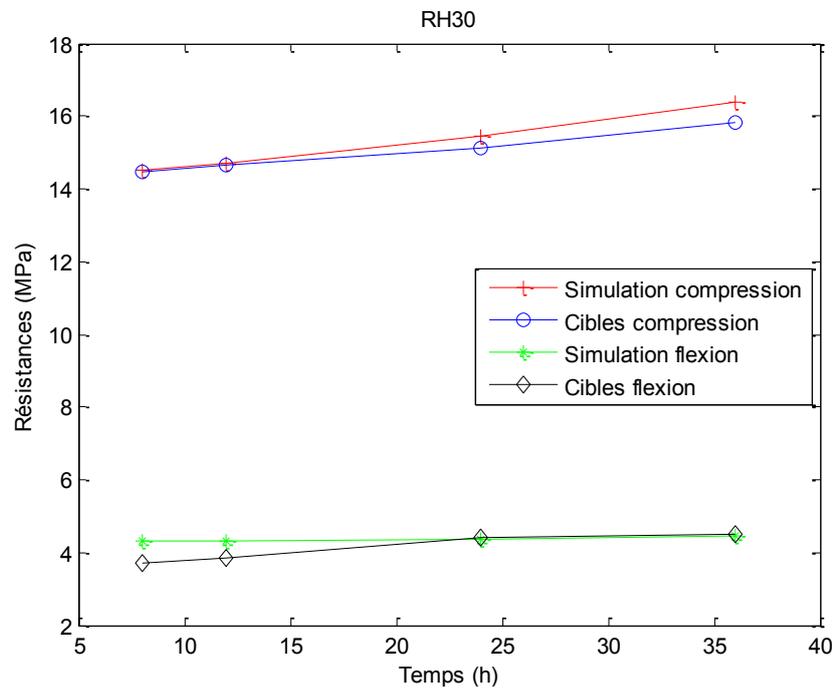


Figure V - 24 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH30 sélectionné (deuxième approche)

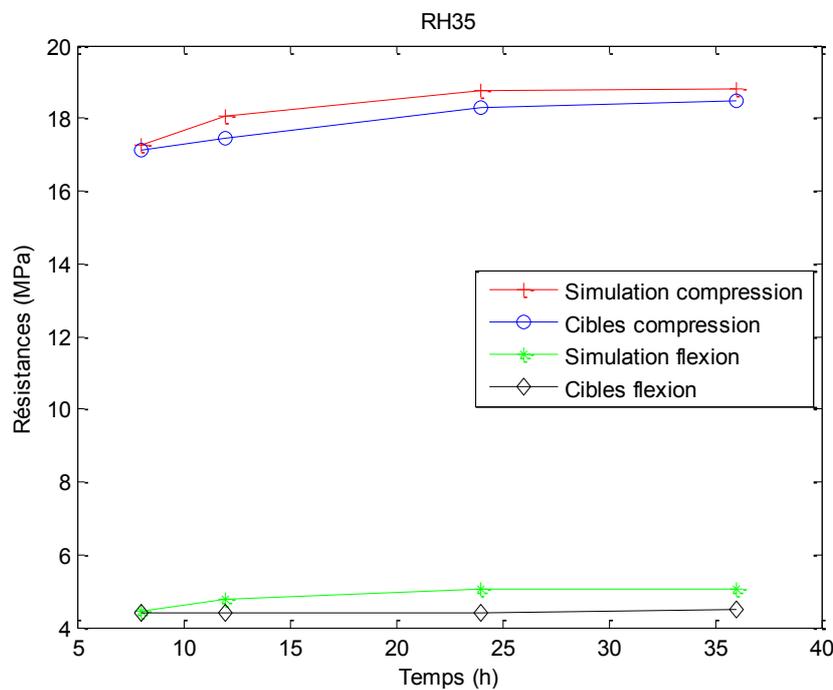


Figure V - 25 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH35 sélectionné (deuxième approche)

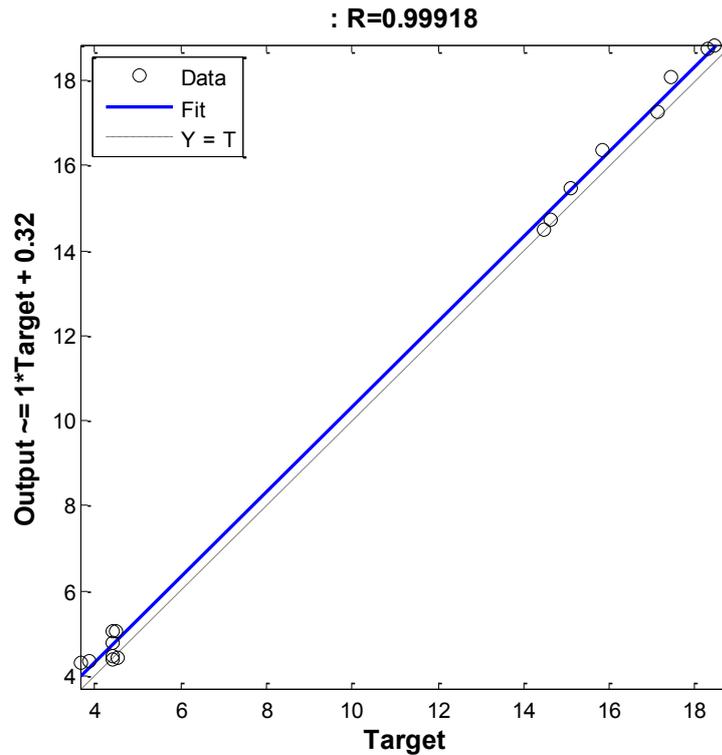


Figure V - 26 Courbe de régression linéaire des mélanges Rais-Hamidou sélectionnés (deuxième approche)

V.3.2.2.b. Simulation des mélanges du ciment Meftah

La base d'apprentissage se compose en entrée des valeurs du taux de ciment alumineux des deux mélanges, c'est-à-dire 20% et 25%, ainsi que les valeurs de temps indiquées dans le tableau V-20.

Les valeurs cibles sont les résistances à la compression et à la flexion au temps t.

Tableau V- 20: Valeurs de temps prises en compte pour l'apprentissage de la phase de sélection (MFT) (deuxième approche)

Temps (h)	2	4	6	72	96	168	672
-----------	---	---	---	----	----	-----	-----

Le meilleur résultat obtenu fut avec la combinaison de 9 neurones pour la première couche cachée, et 3 pour la seconde.

Tableau V- 21:Architecture du réseau utilisé pour la modélisation des mélanges MFT (deuxième approche de sélection)

Type de Réseau	Algorithme d'apprentissage	Couche d'entrée	Couches cachées		Couche de sortie	
		Nombre de neurones	Nombre de neurones	Fonction d'activation	Nombre de neurones	Fonction d'activation
FeedForward Perceptron Multicouches	Retro propagation du gradient Optimisation Levenberg-Marquardt	2	9	Tangente sigmoïde (<i>tansig</i>)	3	Linéaire (<i>purelin</i>)

Les figures V-27, V-28 et V-29 représentent la représentation de la corrélation sortie/cible avec la valeur du coefficient de corrélation R, ainsi que les sorties (résistances à la compression et à la flexion) simulées avec le réseau de neurones comparées aux valeurs expérimentales de M.YADI.

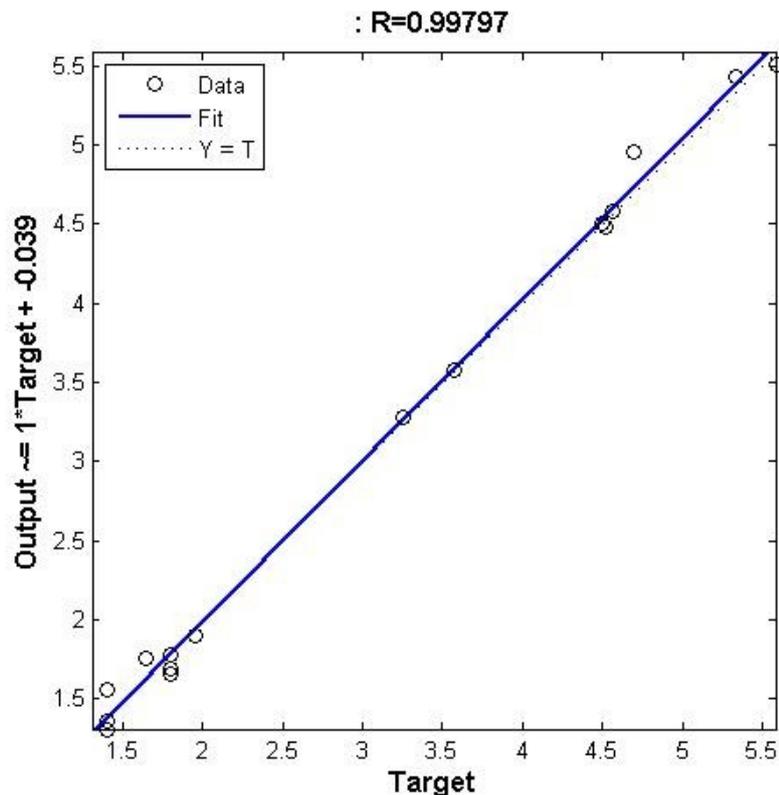


Figure V - 27 Courbe de régression linéaire des mélanges Meftah sélectionnés (deuxième approche)

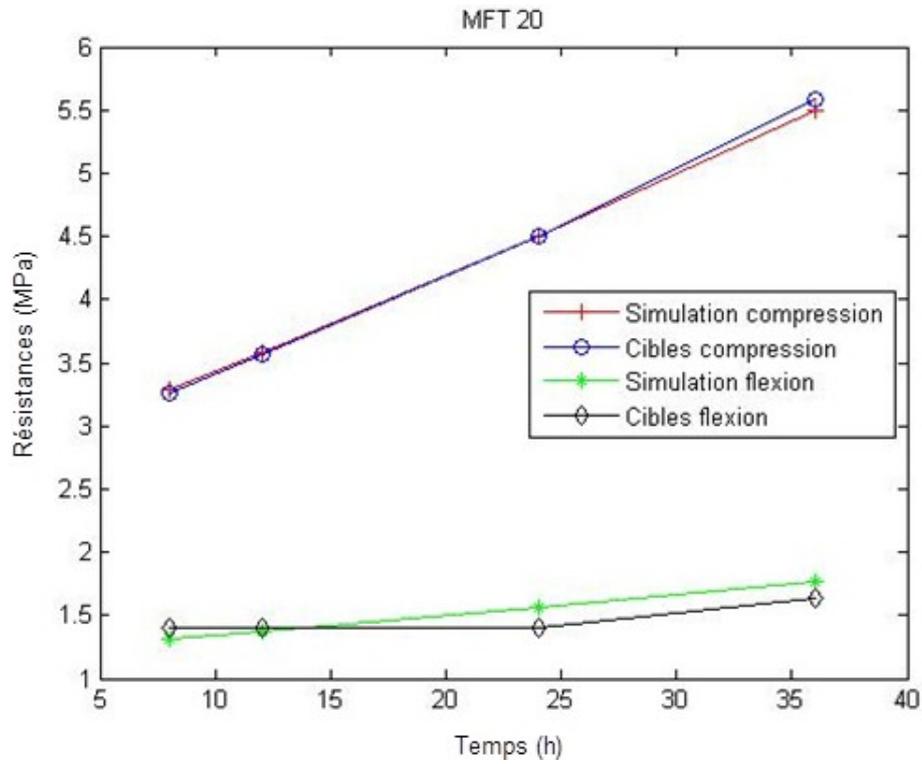


Figure V - 28 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT20 sélectionné (deuxième approche)

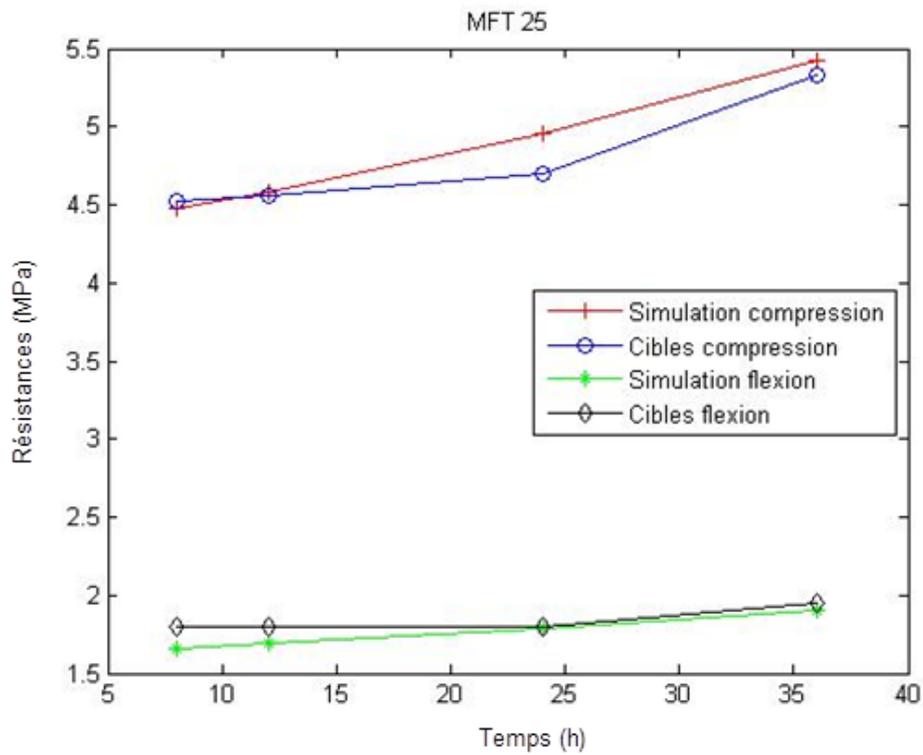


Figure V - 29 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange MFT25 sélectionné (deuxième approche)

V.4. Interprétation des résultats et conclusion

Au terme de ces multiples modélisations, nous pouvons effectuer les observations suivantes :

- Les valeurs du coefficient de corrélation R sont satisfaisantes et se situent toutes entre 0.9712 et 0.9996, sachant que ces valeurs peuvent être considérées comme admissibles à partir d'une valeur de $R=0.80$.

Les tableaux ci-dessous représentent les valeurs de ces coefficients R ainsi que de la valeur de R^2 correspondante.

Etape de présélection

Rais Hamidou

Tableau V- 22: Valeurs du coefficient de corrélation de la simulation des mélanges R-H (étape de présélection)

Mélange	R	R^2
30	0.9712	0.943
35	0.9977	0.995
40	0.9975	0.995
45	0.9972	0.994
50	0.9870	0.974

Meftah

Tableau V- 23: Valeurs du coefficient de corrélation de la simulation des mélanges MFT (étape de présélection)

Mélange	R	R^2
15	0.9929	0.9859
20	0.9995	0.9990
25	0.9996	0.9992
30	0.9867	0.9736

Etape de sélection

Tableau V- 24: Valeurs du coefficient de corrélation de la simulation de l'étape de présélection

Mélange	R	R^2
Rais-Hamidou	0.9991	0.998
Metfah	0.9979	0.996

- Il est à noter que pour une bonne capacité de généralisation, il est préférable d'avoir plus de données afin d'obtenir une bonne base d'apprentissage, ce qui nous est apparu lors de la simulation des mélanges sélectionnés.

De même, il est judicieux d'avoir des données étalées afin de permettre au réseau de neurones de simuler la loi de comportement dans la totalité de la plage étudiée.

A titre d'exemple, dans la partie de notre travail où l'on disposait du plus grand nombre de données, c'est-à-dire la phase de présélection, nous avons été en mesure d'essayer d'affiner la sélection effectuée par M.YADI en simulant des compositions intermédiaires hormis celles testées durant son travail de magister.

A titre d'exemple, les figures V-30 et V-31 représentent la simulation du comportement en compression et en traction des mélanges de Rais-Hamidou et de Meftah à des taux de ciment alumineux de 33% et 24%, respectivement.

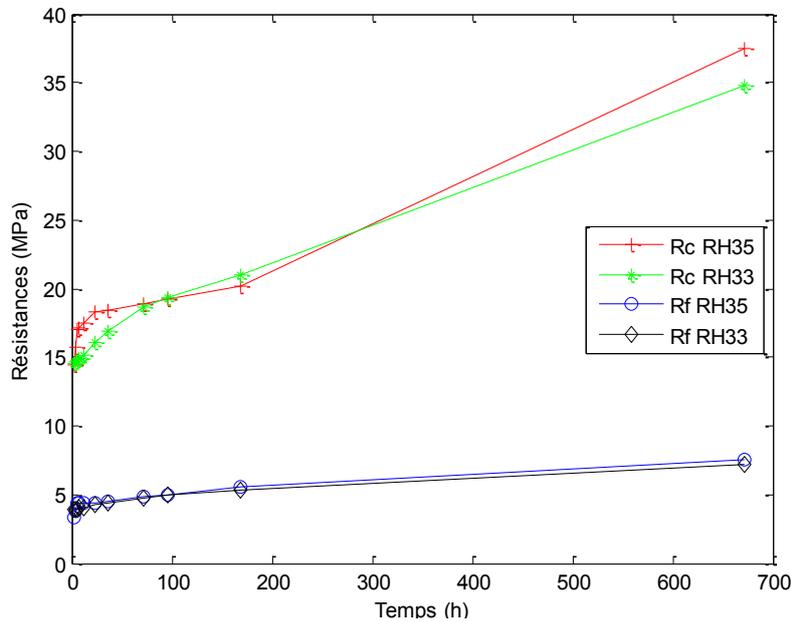


Figure V - 30 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH33 comparées à RH35

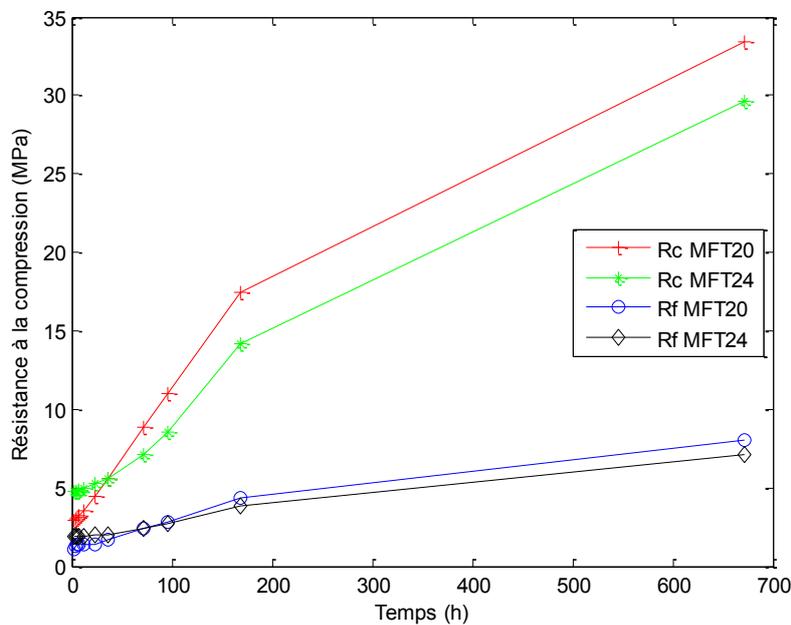


Figure V - 31 Courbes de résistances à la compression et à la flexion du mélange RH33 comparées à RH35

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de notre travail qui a porté sur l'utilisation de réseaux de neurones pour la modélisation du comportement de mélanges de ciment Portland et de ciment alumineux, les résultats que nous avons obtenus au travers des diverses simulations montrent une corrélation plus que satisfaisante des données expérimentales. En effet, les coefficients de corrélation R obtenus grâce aux différentes étapes de modélisation étaient tous d'une valeur supérieure à 0.95.

Cette performance est étroitement liée à la qualité de la phase d'apprentissage des réseaux. La base de données expérimentale doit vérifier les conditions suivantes :

- Être assez fournie pour que le réseau puisse mettre au point une loi de comportement représentative du phénomène expérimental.
- Être homogènement répartie pour être en mesure de réaliser aussi bien des interpolations que des extrapolations.

Ceci s'est confirmé au travers des différentes phases de modélisation illustrées dans le dernier chapitre de ce document. En effet, le cinquième chapitre qui a porté sur la sélection du mélange optimal, contenait des données principalement concentrées au jeune âge, et qui handicapait la simulation au moyen et long terme contrairement à la partie des mélanges aux ajouts traitée dans le sixième chapitre qui a présenté de meilleurs résultats (avec une valeur minimale du coefficient de corrélation $R = 0.9839$). Cette bonne performance découle de la taille adéquate et de la bonne répartition de la base d'apprentissage.

Il est évident que ces deux paramètres sont d'une importance capitale pour le bon fonctionnement d'un réseau de neurones, mais celui-ci doit également présenter une architecture appropriée, dont la détermination ne s'appuie pas sur des lois et des relations, mais ne peut être effectuée qu'au travers de nombreux tâtonnements dans le but de choisir la meilleure combinaison possible de fonctions d'activations, d'algorithme d'apprentissage, de nombre de neurones et de couches cachées.

Nous avons pu contourner ce tâtonnement par la mise en place d'un processus itératif qui essaye toutes les combinaisons possibles dans un domaine prédéfini dont le choix prend comme critère de sélection l'erreur minimale de l'ensemble des itérations. Dans notre cas, nous avons utilisé l'erreur quadratique moyenne (MSE) comme référence pour parvenir à déterminer le nombre de neurones optimal pour chaque couche.

De par la bonne corrélation des résultats obtenus avec les valeurs expérimentales, notre travail confirme l'applicabilité de l'utilisation des réseaux de neurones pour l'élaboration de nouveaux types de ciments. Applicabilité qui peut certainement s'étendre particulièrement aux matériaux de construction et de façon générale au génie civil.

Conclusion générale

En tenant compte de cela, de nouvelles perspectives s'ouvrent pour leur mise au point. Il serait en effet intéressant dans le cadre de travaux similaires de se focaliser sur une bonne répartition et un plus grand nombre d'essais pour un nombre plus restreint de mélanges ce qui nous donnera une meilleure base d'apprentissage.

En optant pour des essais non destructifs pour la caractérisation des matériaux lors de l'élaboration de nouveaux ciments, une méthodologie alternative à celle suivie par AEM YADI nous apparait comme étant moins onéreuse tout en restant aussi précise et en nous donnant la possibilité d'alimenter constamment le réseau de neurones avec de nouvelles données tout en tirant profit de la disponibilité des éprouvettes pour d'éventuels investigations complémentaires.

Bibliographie:

- [1] Jean-Pierre OLIVIER & Angélique VICHOT. La durabilité des bétons : Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 2008, 870p, ISBN 2-85978-434-9
- [2] Joseph ABDO. Dossier technique de l'ingénieur : Les ciments, Doc C920, Editions Techniques de l'ingénieur, 2009, 18p.
- [3] Emmanuelle ROQUE & Xavier GUILLOT, Dossier technique de l'ingénieur : Chaux Hydrauliques. , Doc C924 Editions Techniques de l'ingénieur.
- [4] Ahmed El Mostefa YADI. Contribution expérimentale à l'élaboration d'un ciment à prise réglable. Thèse de Magister en génie des matériaux, Boumerdes , INMC, 1997, 101p.
- [5] Axel CHRISTENSEN & Nicola SCARLETT & Ian C. MADSEN & al. «Real time study of cement and clinker phases hydration». The Royal Society of Chemistry, 2003, p1529-1536.
- [6] Association technique de l'industrie des liants hydrauliques. Guide pratique pour l'emploi des ciments, Eyrolles, 1998, ISBN 2-212-07217-1.
- [7] Noureddine RAFAI. « Cement matrix compounds », Ciments bétons plâtre chaux, 2008, n°890, p60-67.
- [8] David BUTLER. Portland cement: its manufacture, testing and use, E&FN Spon, 1899, 360p.
- [9] T. D. ROBSON. High-Alumina Cements and concretes, 1961, John Wiley & Sons, Inc. 263p.
- [10] BENSTED. « HIGH ALUMINA CEMENT - PRESENT STATE OF KNOWLEDGE », ZKG INTERNATIONAL, 1993, vol. 46, no. 91, p560-566.
- [11] H.FRYDA, F.SAUCIER, S.LAMBERET et al. La durabilité des bétons d'aluminates de calcium, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2008, p767-823.
- [12] Arnaud MULLER. Conversion et résistance en compression des ciments d'aluminates de calcium, Thèse Maitrise ès sciences en Génie Civil, Laval, Université de Laval, 2010, 108p.
- [13] KERNEOS ALUMINATE TECHNOLOGIES. Applications en génie civil [en ligne] Application en Génie Civil. Disponible sur : <<http://www.kerneos.com/Applications-genie-civil>> (consulté le 15/05/2012).
- [14] DUNSTER et al. An assessment of ageing calcium aluminate concrete from marine structures, 1997.
- [15] Charles FENTIMAN. Hydratation of carbo-aluminous cement at different temperatures, 1985.
- [16] De J. BARON et J. P. OLLIVIER. Les bétons. Bases de données pour leur formulation, Eyrolles, 1997, 522p.

- [17] Charles ALT & Lana WONG & Christopher PARR. Measuring castable rheology by exothermic profile, 2011
- [18] J CALLEJA. Calcul des compositions potentielles théoriquement possible des ciments alumineux in 7e congrès international de la chimie des ciments, 1980, Paris.
- [19] C.VERNET& COIL . Cinétique de l'hydratation du ciment Portland in 7eme congrès international de la chimie des ciments, 1980, Paris.
- [20] MEHTA. « Successful prevention of loss of strength in concrete made with high alumina cement », Intern Cement Chemistry, 1969, n°2, p151-152.
- [21] G. DREYFUS. « Les réseaux de neurones », Mécanique Industrielle et Matériaux, 1998, n°51, 19p.
- [22] C. TOUZET. Les réseaux de neurones artificiels introduction au connexionnisme, 1992, 129p
- [23] C. SI-MOUSSA. Modélisation des équilibres de phases à pression élevées par les réseaux de neurones artificiels. Thèse de doctorat en génie chimique, Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2010, 249p.

Annexes

Principaux types	Notation des 27 produits		Composition pourcentage en masse										Constituants secondaires	
			Constituants principaux											
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
						Naturelle	Naturelle calcinée	Silicieuse	Calcique					
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEMII/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEMII/B-V	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5

CEM II	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/A-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/A-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Ciment Portland composé (*)	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →									0-5
		CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →									0-5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique	CEM IV/A	65-98	-	← 11-35 →					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	← 36-55 →					-	-	-	0-5
CEM V	Ciment composé	CEM V/A	40-64	18-30	-	← 18-30 →		-	-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	← 31-50 →		-	-	-	-	-	0-5

(*) : Dans le cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux autres que le clinker doivent être déclarés dans la désignation du ciment

Annexe II- Valeurs de la consistance normale des mélanges.

Ciment AI (%)	Ciment RH (%)	Consistance (%)
100	0	28
95	5	25.75
90	10	27.75
85	15	27.75
80	20	27.75
75	25	25.25
70	30	25.9
65	35	26
60	40	26.25
55	45	26.5
50	50	26.75
45	55	27
40	60	27
35	65	27
30	70	27
25	75	27
20	80	27
15	85	27.3
10	90	25.9
5	95	25.5
0	100	25

Consistance normale des mélanges Rais
Hamidou

Ciment AI (%)	Ciment MFT (%)	Consistance (%)
100	0	24.3
95	5	24.8
90	10	24.8
85	15	24.9
80	20	25.4
75	25	25.8
70	30	26
65	35	26
60	40	26.5
55	45	26.8
50	50	27
45	55	27
40	60	27
35	65	27
30	70	25.5
25	75	25
20	80	24.5
15	85	24.5
10	90	24.5
5	95	24.7
0	100	25

Consistance normale des mélanges Meftah

Ciment AI (%)	Ciment BS (%)	Consistance(%)
0	100	26.5
5	95	27.5
10	90	28.9
15	85	29.3
20	80	29.5
30	70	29.8
40	60	29
50	50	28.2
60	40	27
70	30	26
80	20	25.5
90	10	25
100	0	25

Consistance normale des mélanges Beni Saf

Annexe III : Valeurs des délais de prise obtenus avec les différents mélanges.

Mélanges Rais-Hamidou

Taux de ciment Alumineux %	% RH	Début de prise [h :mn :s]	Fin de prise [h :mn :s]	Durée de prise [h :mn :s]
0	100	03:27:00	05:25:00	01:58:00
5	95	02:49:00	05:02:02	02:13:02
10	90	02:11:00	04:09:00	01:58:00
15	85	01:49:00	03:14:00	01:25:00
20	80	01:22:00	02:28:05	01:06:05
25	75	00:55:00	01:29:00	00:34:00
30	70	00:17:00	00:33:00	00:16:00
35	65	00:15:00	00:19:00	00:04:00
40	60	00:07:30	00:10:06	00:02:36
45	55	00:05:15	00:06:30	00:01:15
50	50	00:03:00	00:04:30	00:01:30
55	45	00:02:11	00:03:20	00:01:09
60	40	00:02:05	00:03:15	00:01:10
65	35	00:02:05	00:02:30	00:00:25
70	30	00:02:05	00:02:20	00:00:15
75	25	00:02:05	00:02:11	00:00:06
80	20	00:02:00	00:02:05	00:00:05
85	15	00:01:55	00:02:05	00:00:10
90	10	02:00:14	02:00:29	00:00:15
95	5	02:47:00	03:04:00	00:17:00
100	0	03:48:00	04:20:00	00:32:00

Délais de prise obtenus pour les mélanges à base de ciment RAIS HAMIDOU

Mélanges Meftah

Taux de ciment Alumineux %	%MFT	Début de prise [h : mm : s]	Fin de prise [h : mm : s]	Durée de prise [h : mm : s]
0	100	02:59:00	04:54:00	01:55:00
5	95	02:35:00	04:33:00	01:58:00
10	90	02:04:00	03:58:00	01:54:00
15	85	00:34:00	00:50:00	00:16:00
20	80	00:16:00	00:20:00	00:04:00
25	75	00:07:00	00:09:30	00:02:30
30	70	00:03:54	00:05:00	00:01:06
35	65	00:02:48	00:03:45	00:00:57
40	60	00:02:00	00:02:45	00:00:45
45	55	00:02:20	00:02:45	00:00:25
50	50	00:01:45	00:02:15	00:00:30
55	45	00:01:41	00:02:15	00:00:34
60	40	00:01:35	00:01:54	00:00:19
65	35	00:02:30	00:03:05	00:00:35
70	30	02:00:00	02:19:00	00:19:00
75	25	02:12:00	02:27:00	00:15:00
80	20	02:39:00	02:59:00	00:20:00
85	15	02:41:00	03:05:00	00:24:00
90	10	03:04:00	03:25:00	00:21:00
95	5	03:12:00	03:34:00	00:22:00
100	0	03:48	04:20:00	00:32:00

Délais de prise obtenus pour les mélanges à base de ciment MEFTH

Mélanges Beni-Saf

Taux de ciment Alumineux %	%BS	Début de prise [h: mm : s]	Fin de prise [h : mm :s]	Durée de prise [h : mm : s]
0	100	02:55:00	04:54:00	01:59:00
5	95	01:37:00	03:47:00	02:10:00
10	90	00:18:00	00:35:00	00:17:00
15	85	00:07:15	00:07:42	00:00:27
20	80	00:04:50	00:07:42	00:02:52
25	75	00:03:45	00:09:05	00:05:20
30	70	00:02:41	00:03:41	00:01:00
35	65	00:03:20	00:04:15	00:00:55
40	60	00:20:00	01:07:00	00:47:00
45	55	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré
50	50	00:35:00	02:11:00	01:36:00
55	45	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré
60	40	01:46:42	02:25:00	00:38:18
65	35	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré
70	30	02:26:00	03:00:00	00:34:00
75	25	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré
80	20	02:51:00	03:14:00	00:23:00
85	15	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré
90	10	03:26:00	03:41:00	00:15:00
95	5	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré
100	0	03:48	04:20:00	00:32:00

Délais de prise obtenus pour les mélanges à base de ciment BENI-SAF

Annexe IV : Evolution des résistances du ciment Rais Hamidou en fonction du taux de ciment alumineux, du temps, et résistance à la flexion.

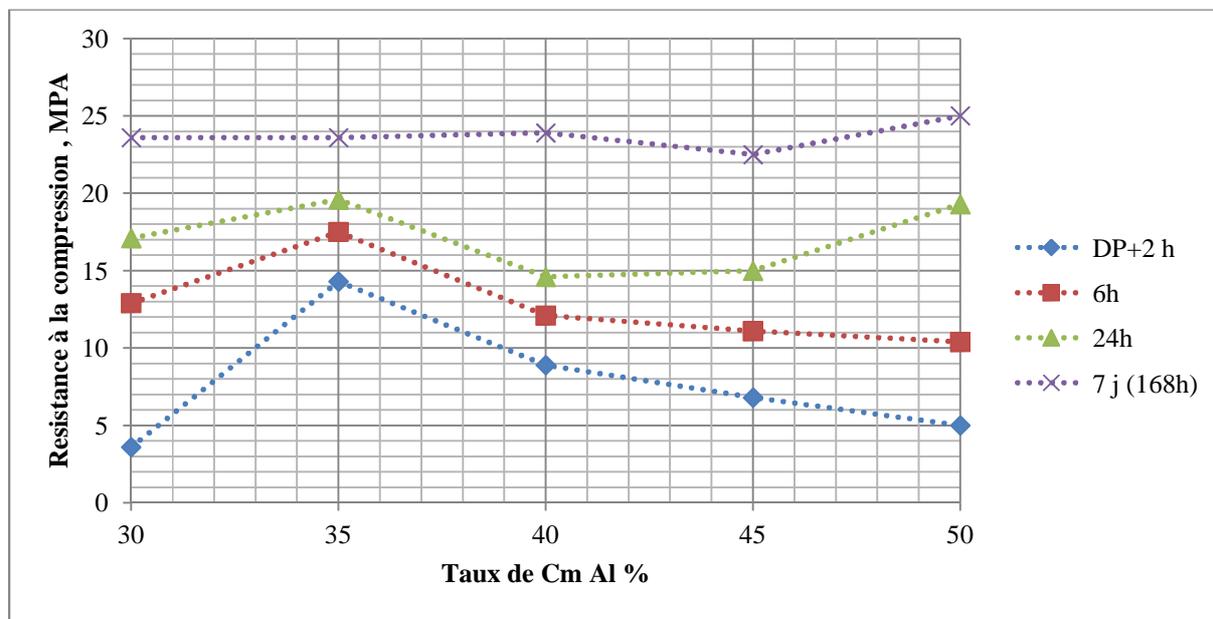


Figure A-IV: 1 Evolution de la résistance à la compression pour différents âges en fonction du taux de ciment alumineux - mélange Rais Hamidou

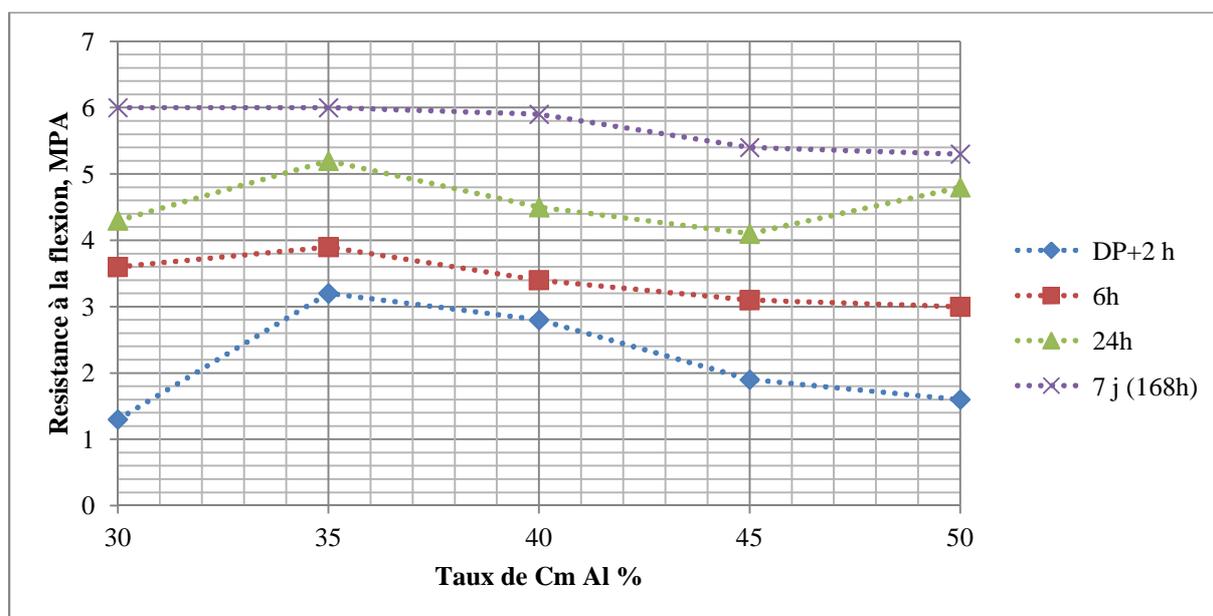


Figure A-IV: 2 : Evolution de la résistance à la flexion pour différents âges en fonction du taux de ciment alumineux - mélange Rais Hamidou

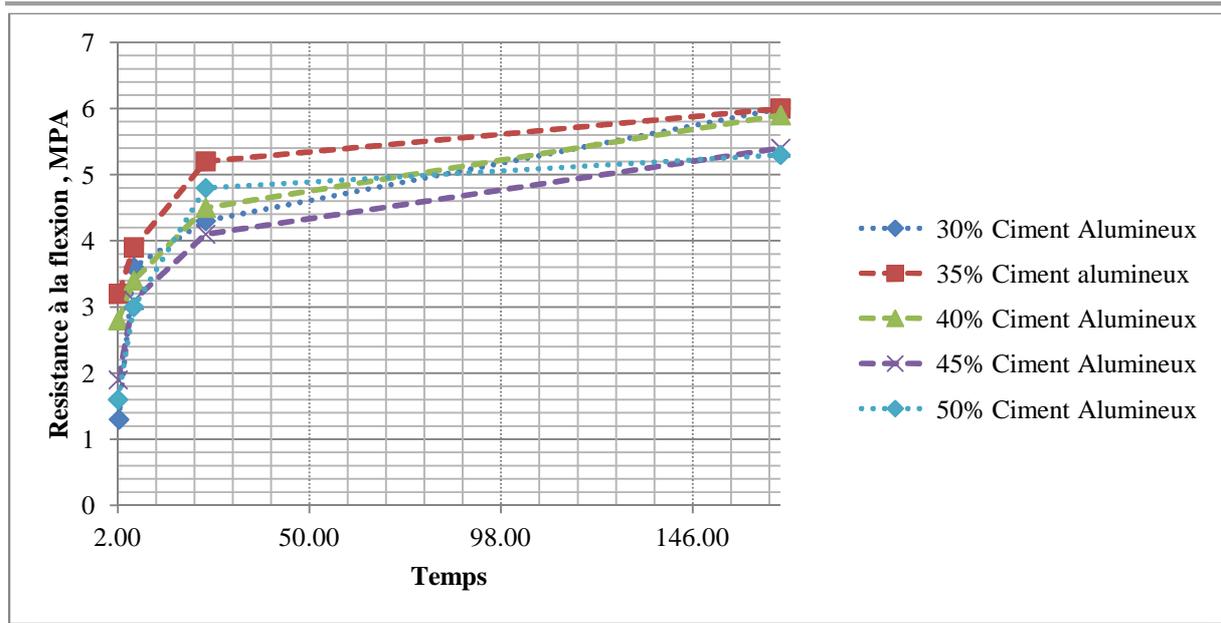


Figure A-IV: 3 Evolution comparé de la résistance à la flexion des mélanges de ciments Rais-Hamidou

Annexe V : Evolution des résistances du ciment Meftah en fonction du taux de ciment alumineux, du temps, et résistance à la flexion.

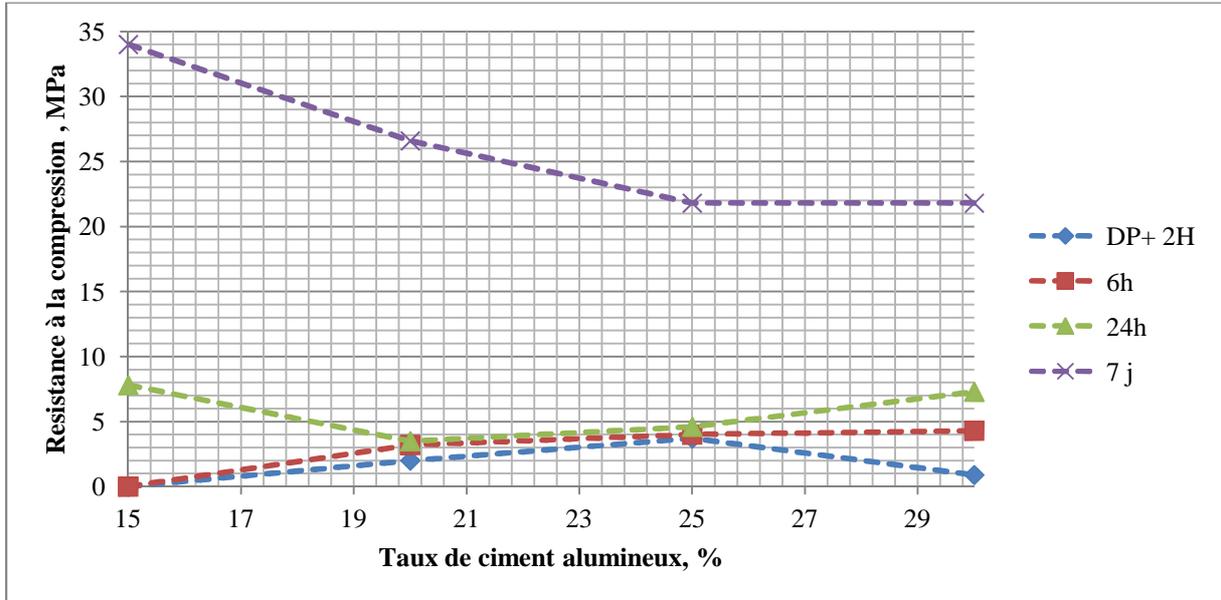


Figure A-V: 1 Evolution de la résistance à la compression pour différents âges en fonction du taux de ciment alumineux - mélange Meftah

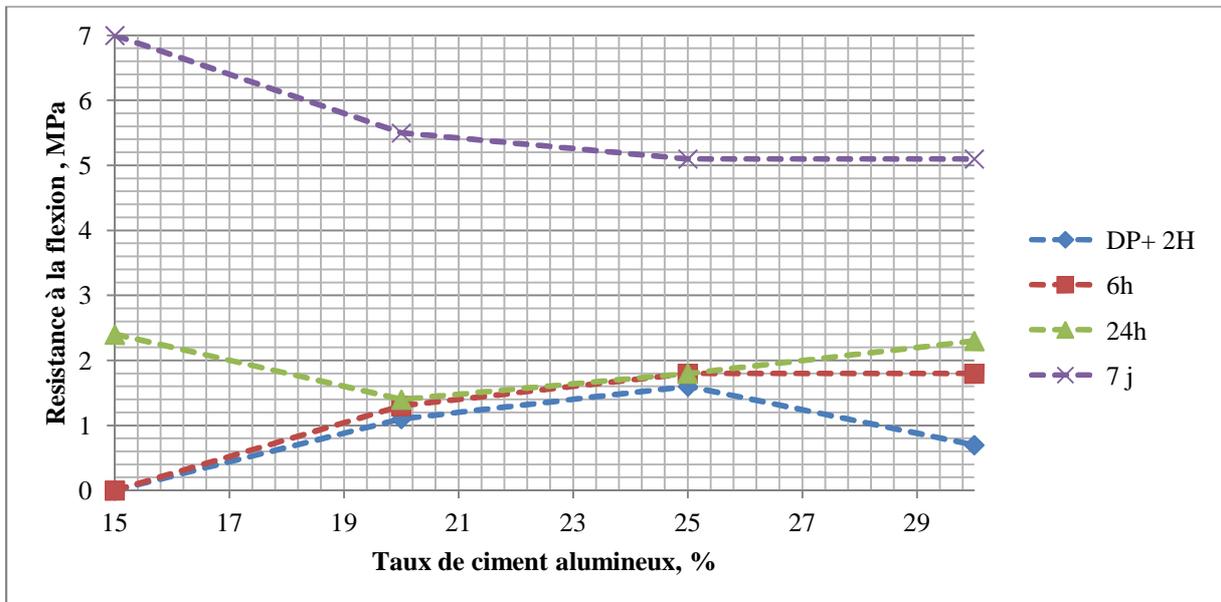


Figure A-V: 2 Evolution de la résistance à la flexion pour différents âges en fonction du taux de ciment alumineux - mélange Meftah

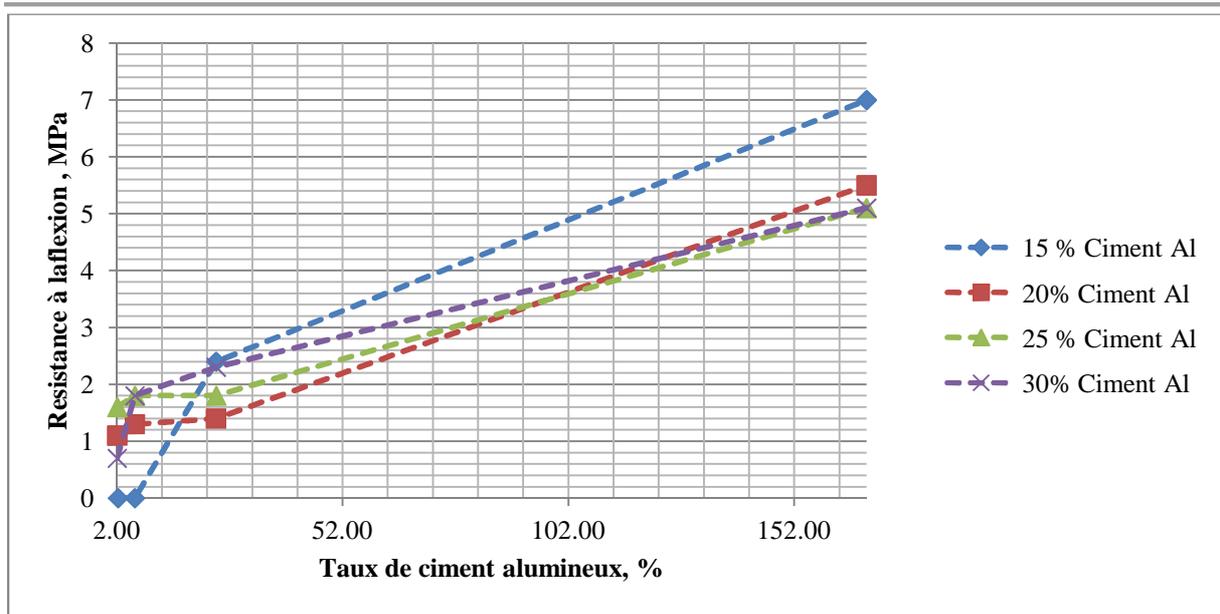


Figure A-V: 3 Evolution de la résistance à la compression pour différents âges en fonction du taux de ciment alumineux - mélange Rais Hamidou

Annexe VI: Evolution des résistances à la flexion des mélanges sélectionnés

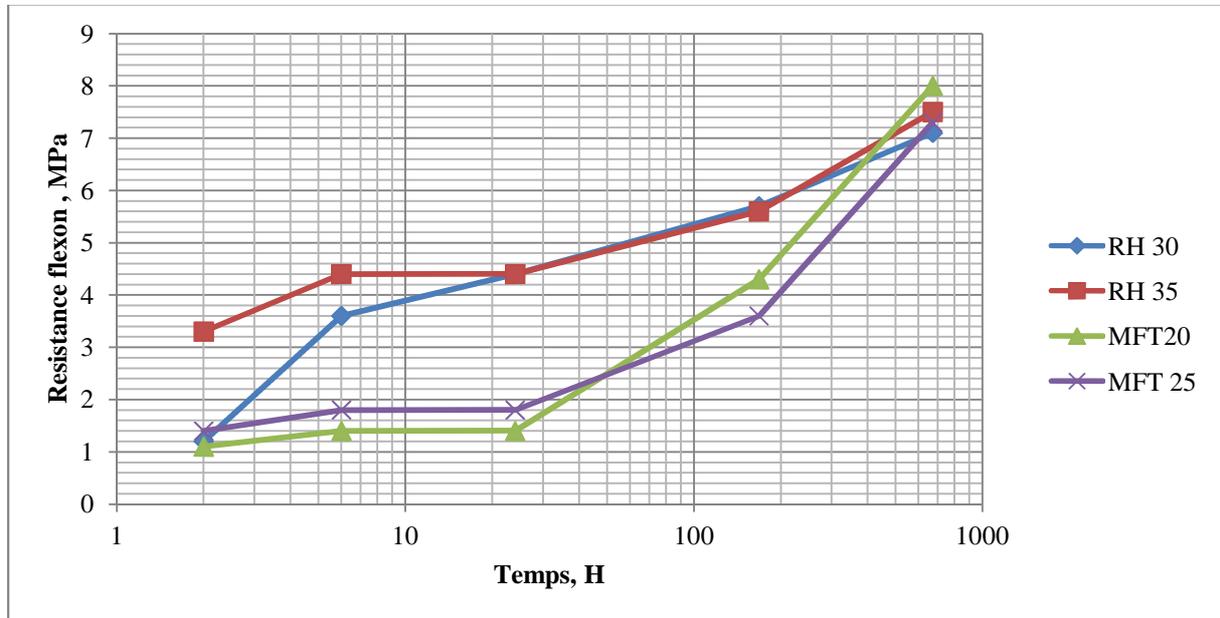


Figure A-VI : 1 Evolution des résistances à la flexion des mélanges sélectionnés