

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Civil
Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés, (LTMGP)

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT
Domaine : Sciences et Technologies Filière : Génie Civil
Spécialité : Génie Civil

Présentée par
HAMMOUDI Abdelkader
Thème

Prédiction des propriétés du béton recyclé par la méthodologie des surfaces de réponse et des réseaux de neurones artificiels.

Soutenue le : 08/07/2021

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr MAZA Mustapha	Professeur	Univ. de Bejaia	Président
Mr MOUSSACEB Karim	Professeur	Univ. de Bejaia	Rapporteur
Mr TAHAKOURT Abdelkader	Professeur	Univ. de Bejaia	Examinateur
Mr BENSEBTI Salah eddine	MCA	Univ. de Constantine1	Examinateur
Mr BELEBCHOUHE Cherif	MCA	Univ. de Constantine 1	Examinateur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

Ce travail a été mené sous la direction de Mr. Karim MOUSSACEB, Professeur à l'université de Bejaia. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance, tant pour ses conseils, son intérêt et pour la confiance qu'il m'a accordée pendant ce projet de recherche.

Je souhaite associer à ces remerciements les membres du jury lesquels ont accepté d'évaluer ce projet de thèse. Puissent leurs commentaires, critiques et observations, issus d'expériences et compétences diverses, nous être constructifs pour la suite de nos travaux de recherche.

Je tiens à mon ami le docteur DAHMOUNE Farid qui m'a beaucoup aidé. Je tiens à remercier aussi toute l'équipe des doctorants, enseignants et personnels du département de génie civil avec qui, j'ai tissé des relations amicales plus que professionnelles.

Je remercie infiniment mes parents, mon frère, mes sœurs et ma femme qui ont consenti des sacrifices importants ayant permis la réalisation d'un travail passionnant mais chronophage.

Enfin, que tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Dédicaces

À mes parents

À mon frère et mes sœurs

À ma femme

À mon fils Abderahmane

Et à tous mes amis

Résumé

Le travail présenté dans ce manuscrit concerne la modélisation et la prédiction des propriétés du béton à base de béton recyclé par la méthode des surfaces de réponse et la méthode des réseaux de neurone artificiel. Pour ce faire, une campagne expérimentale a été faite suivant le plan composite central avec trois variables (teneur en ciment de 300 à 400 kg/m³, pourcentage du gravier recyclés de 0 à 100% et l'affaissement de 5 à 12 ± 1 cm). Les résultats en termes statistiques; écart relatif en pourcentage (ERP), erreur quadratique moyenne (EQM), racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de détermination ajusté ($R^2_{\text{ajusté}}$), révèlent que les deux approches RNA et MSR sont des outils puissants pour la prédiction des propriétés de béton. De plus, les modèles RNA et MSR sont très bien corrélés aux données expérimentales. Cependant, le modèle de réseau neuronal artificiel montre une meilleure précision.

Mots clés: Granulats recyclé, Prédiction, Modélisation, Méthodologie surface de réponse (MSR), Réseau de neurone artificiel (RNA).

Abstract

The work presented in this manuscript concerns the modeling and prediction of the properties of concrete based on recycled concrete by the response surface methodology and the artificial neuron network method. To do this, an experimental campaign was made following the central composite plan with three variables (cement content from 300 to 400 kg/m³, percentage of gravel recycled from 0 to 100% and slump from 5 to 12 ± 1 cm). The results in statistical terms; Percentage Relative Deviation (RDP), Mean Square Error (MSE), Root Mean Square Error (RMSE), Coefficient of Determination (R²), and Adjusted Coefficient of Determination (R²_{adjusted}), reveal that both RNA and MSR approaches are powerful tools for prediction of concrete properties. In addition, the RNA and MSR models correlate very well with the experimental data. However, the artificial neural network model shows better accuracy.

Keywords: Recycled Aggregates, Prediction, Modelization, Response Surface Methodology, Artificial Neural Network.

يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بنمذجة وتنبؤ خصائص الخرسانة المصنوعة من الخرسانة المعاد تدويرها بطريقة سطح الاستجابة وطريقة شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية. للقيام بذلك ، تم إجراء حملة تجريبية وفقًا للخطة المركزية المركبة بثلاثة متغيرات (محتوى الأسمت من 300 إلى 400 كجم / م³ ، والنسبة المئوية للحصى المعاد تدويره من 0 إلى 100 ٪ والهبوط من 5 إلى 12 ± 1 سم). النتائج من الناحية الإحصائية. النسبة المئوية للانحراف النسبي (RDP) ، متوسط الخطأ المربع (MSE) ، خطأ مربع متوسط الجذر (RMSE) ، معامل التحديد (R²) ، ومعامل التحديد المعدل (R²_{adjusted}) ، تكشف أن كلا من نهج RNA و MSR أدوات قوية للتنبؤ من خصائص الخرسانة. بالإضافة إلى ذلك ، ترتبط نماذج RNA و MSR جيدًا بالبيانات التجريبية. ومع ذلك ، فإن نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية يظهر دقة أفضل.

الكلمات المفتاحية: الحصى المعاد تدويره، تنبؤ، النمذجة، منهجية استجابة السطح، الشبكات العصبية الاصطناعية

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Sommaire	vi
Liste des abréviations	ix
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xiv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 GENERALITES SUR LES DECHETS	3
I.2.1 Définition du déchet	3
I.2.2 Déchets de la construction et de démolition.....	3
I.3 GESTION DES DECHETS DE LA CONSTRUCTION	4
I.3.1 Méthode de 3R	4
I.4 RECYCLAGE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION	6
I.4.1 Intérêts de recycler	7
I.5 PROPRIETES DES GRANULATS DU BETON RECYCLES	8
I.5.1 Mortier attaché et zone de transition interfaciale (ZTI)	8
I.5.2 Densité et porosité	9
I.5.3 Absorption d'eau	10
I.6 PROPRIETES DU BETON A BASE DE GRANULATS RECYCLES	11
I.6.1 Propriétés du béton à l'état frais.....	11
I.6.2 Propriétés du béton à l'état durci.....	12
I.7 PLANS D'EXPERIENCES.....	15
I.7.1 Terminologie	15

I.8	TYPES DE PLANS D'EXPERIENCES	17
I.8.1	Plans pour surface de Réponse (MSR).....	17
I.8.2	Plans factoriel.....	19
I.8.3	Plans de mélange.....	21
I.9	RESEAUX DE NEURONE ARTIFICIEL.....	22
I.9.1	Historique.....	22
I.9.2	Neurone biologique.....	22
I.9.3	Model de neurone formel.....	23
I.9.4	Architecteurs et types des réseaux de neurones.....	24
I.9.5	Apprentissage des réseaux de neurone.....	25
I.10	CONCLUSION	26
II.1	INTRODUCTION	27
II.2	MATERIAUX UTILISES.....	27
II.2.1	Ciment.....	27
II.2.2	Sable.....	28
II.2.3	Gravier.....	28
II.2.4	Eau de gâchage.....	29
II.3	CONSTRUCTION D'UN PLANS D'EXPERIENCE.....	30
II.4	PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	32
II.4.1	Affaissement.....	32
II.4.2	Masse volumique du béton frais.....	33
II.4.3	Résistance à la compression.....	34
II.4.4	Traction par fendage.....	35
II.4.5	Vitesse d'impulsion ultrasonique.....	36
II.5	CONCLUSION	37
III.1	INTRODUCTION	38
III.2	AFFAISSEMENT	38
III.2.1	Modélisation de l'affaissement par surface de réponse (MSR).....	39
III.2.2	Modélisation de l'affaissement par réseaux de neurone artificiels (RNA).....	41
III.2.3	Validation et comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA.....	43
III.3	MASSE VOLUMIQUE.....	44
III.3.1	Modélisation de la masse volumique par surface de réponse (MSR).....	45
III.3.2	Modélisation de la masse volumique par réseaux de neurone artificiels (RNA).	47

III.3.3	Validation et comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA	49
III.4	RESISTANCE A LA COMPRESSION.....	50
III.4.1	Modélisation de la résistance à la compression par surface de réponse (MSR)	50
III.4.2	Modélisation de la résistance à la compression par les réseaux de neurone artificiels (RNA).....	60
III.4.3	Validation et comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA	67
III.5	TRACTION PAR FENDAGE.....	69
III.5.1	Modélisation de la résistance à la compression par surface de réponse (MSR)	69
III.5.2	Modélisation de la résistance à la compression par les réseaux de neurone artificiels (RNA).....	73
III.5.3	Validation et comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA	76
III.6	VITESSE D'IMPULSION ULTRASONIQUE	77
III.6.1	Modélisation de la résistance à la vitesse d'impulsion ultrasonique par surface de réponse (MSR).....	77
III.6.2	Modélisation de la vitesse d'impulsion ultrasonique par les réseaux de neurone artificiels (RNA).....	79
III.6.3	Validation et comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA	81
III.7	CONCLUSION	82
	CONCLUSION GENERALE	85
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	87

Liste des abréviations

Notation	Définition
Aff	Affaissement
C	Ciment
E	Eau
E/C	Eau / Ciment
Ea	Eau ajouté
EQM	Erreur quadratique moyenne
ERP	Ecart relatif en pourcentage
Et	Eau total
Fc	Résistance à la compression
Ft	Résistance à la traction
GBR	Granulats de béton recyclé
GN	Granulats naturel
GR	Granulats recyclé
MSR	Méthode des surfaces de réponse
Mv	Masse volumique
PBB	Plans Box-Behnken
PCC	Plans Central Composite
R ²	Coefficient de détermination
R ² _{ajusté}	Coefficient de détermination ajusté
REQM	Racine de l'erreur quadratique moyenne
RNA	Réseau de neurone artificiel

S	Sable
S/G	Sable / Gravier
VIU	Vitesse d'impulsion ultrasonique
ZTI	Zone de transition interfaciale

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1. Pyramide de la méthode hiérarchique 3R.....	5
Figure I. 2. Interfaces du gravier recyclé.	8
Figure I. 3. Relation entre la teneur en mortier et la densité des GR (de Juan and Gutiérrez, 2009).....	10
Figure I. 4. Exemple d'un granulats de béton recyclé (GBR) (Bouarroudj, 2019).....	11
Figure I. 5. Représentation du domaine d'étude.	16
Figure I. 6. Représentation du domaine de facteur.....	16
Figure I. 7. Plans central composite.	18
Figure I. 8. Plans de Box-Behenken pour trois facteurs.....	19
Figure I. 9. Neurone biologique (Laurene, 1992).....	23
Figure I. 10. Représentation du neurone formel.....	23
Figure I. 11. Réseau neuronal perceptron multicouche non bouclé.	24
Figure I. 12. Réseau neuronal perceptron multicouche bouclé.	25

Chapitre II

Figure II. 1. Courbe granulométrique du ciment.....	27
Figure II. 2. Analyse granulométrique de sable et des graviers conformément à la norme NF P18-560.	28
Figure II. 3. Éprouvettes utilisées pour l'obtention du gravier recyclé.....	29
Figure II. 4. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.	33
Figure II. 5. Détermination de masse volumique du béton frais.	34
Figure II. 6. Essai de la résistance à la compression.	35
Figure II. 7. Essai de traction par fendage (essai brésilien).	36
Figure II. 8. Essai de l'ultrason.	37

Chapitre II

Figure III. 1. Comparaison entre les quantités d'eau (E_t) réelles et prédites avec la méthode MSR.	40
Figure III. 2. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites avec RNA de E_t ...	42
Figure III. 3. Comparaison entre la distribution des erreurs résiduelles obtenue par les deux modèles MSR et RNA.....	44
Figure III. 4. Comparaison entre les masses volumiques (M_v) réelles et prédites par la méthode MSR.....	46
Figure III. 5. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de M_v avec RNA.	48
Figure III. 6. Comparaison entre la distribution des erreurs résiduelles obtenue par les modèles RSM et ANN.....	50
Figure III. 7. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites, des résistances à la compression avec la méthode MSR à 7; 28 et 56 jours de.....	53
Figure III. 8. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56 jours, selon MSR en fonction de la quantité du ciment et du %GBR.	55
Figure III. 9. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56 ^{ième} jour, selon méthode MSR en fonction de ciment et Affaissement.....	57
Figure III. 10. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56 ^{ième} jour, selon la méthode MSR en fonction de l’Affaissement et %GBR.....	59
Figure III. 11. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites avec la méthode RNA de résistance à la compression à 7; 28 et 56 ^{ième} jour.....	63
Figure III. 12. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56 ^{ième} jour, selon la méthode RNA en fonction du Ciment et %GBR.....	64
Figure III. 13. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56 ^{ième} jour, selon la méthode RNA en fonction de l’Affaissement et Ciment.....	65
Figure III. 14. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56 ^{ième} jour, selon la méthode RNA en fonction de l’Affaissement et %GBR.....	66
Figure III. 15. Comparaison entre la distribution des erreurs résiduelles obtenue par les modèles MSR et RNA.....	68
Figure III. 16. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites avec la méthode MSR de la traction par fendage F_{t28}	70

Figure III. 17. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la traction à 28 jours, selon la méthode MSR.	72
Figure III. 18 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites avec RNA de F_{t28}	74
Figure III. 19. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la traction à 28 jours, selon la méthode RNA.	75
Figure III. 20. Comparaison entre la distribution des erreurs résiduelles obtenue par les modèles MSR et RNA.	77
Figure III. 21. Comparaison entre les valeurs de VIU réelles et prédites avec la méthode MSR	78
Figure III. 22. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites avec RNA de UPV.	81
Figure III. 23. Comparaison entre la distribution des erreurs résiduelles obtenue par les modèles MSR et RNA.	82

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II. 1. Composition chimique du ciment.	27
Tableau II. 2. Propriétés du sable et du gravier.	29
Tableau II. 3. Niveaux et valeurs réels et codés de modèle CCD.	30
Tableau II. 4. Le plan d'expérience en valeurs réelles et codés.	30
Tableau II. 6. Proportions du mélange pour 1m ³ de béton en [kg/m ³].	31

Chapitre III

Tableau III. 1. Quantité d'eau ajoutée pour atteindre l'affaissement désiré.	38
Tableau III. 2. Quantités d'eau réelles et prédite par la méthode MSR.	39
Tableau III. 3. Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) du PCC.	40
Tableau III. 4. Quantité d'eau réelle et prédite par la méthode RNA.	42
Tableau III. 5. Comparaison des performances de la méthodologie de surface de réponse et des réseaux de neurones artificiels.	43
Tableau III. 6. Masse volumique du béton frais.	44
Tableau III. 7. Masse volumique réels et prédite par la méthode MSR.	45
Tableau III. 8. Analyse de la variance (ANOVA) et statistique de modèle de régression complète pour les résultats expérimentaux.	47
Tableau III. 9. Masse volumique Mv prédite par la méthode RNA.	47
Tableau III. 10. Comparaison des performances de la méthodologie de surface de réponse et des réseaux de neurones artificiels.	49
Tableau III. 11. Résultats des résistances à la compression réelles et prédites par la méthode MSR.	50
Tableau III. 12. Analyse de la variance (ANOVA) et statistiques des modèles de régression complète pour les résultats expérimentaux.	51

Tableau III. 13. Résultats des résistances à la compression réelles et prédites par la méthode RNA.	62
Tableau III. 14. Comparaison des performances de la méthodologie de surface de réponse et des réseaux de neurones artificiels.	67
Tableau III. 15. Résultats de la résistance à la traction par fendage à 28 jours.....	69
Tableau III. 16. Analyse de la variance (ANOVA) et statistiques des modèles de régression complète pour les résultats expérimentaux.	70
Tableau III. 17. Résistance à la traction expérimentale et prédite par la méthode RNA.	73
Tableau III. 18. Comparaison des performances de la méthodologie de surface de réponse et des réseaux de neurones artificiels.	76
Tableau III. 19. Les résultats de VIU expérimentales et prédit par la méthode MSR.	78
Tableau III. 20. Analyse de la variance (ANOVA) et statistiques des modèles de régression complète pour les résultats expérimentaux.	79
Tableau III. 21. Vitesse d'impulsion ultrasonique prédit par la méthode RNA.....	79
Tableau III. 22. Comparaison des performances de la méthodologie de surface de réponse et des réseaux de neurones artificiels.	81

INTRODUCTION GENERALE

Le domaine de la construction connaît un développement rapide au cours de ces dernières décennies, faisant du béton le matériau le plus consommé au monde. La demande croissante du béton a induit à son tour une demande importante des granulats naturels. Par conséquent, les professionnels de la construction sont confrontés à une double problématique qui est l'approvisionnement du marché par la matière première et la préservation des ressources naturelles. D'autre part le secteur du bâtiment génère des quantités énormes de déchets chaque année qui cause des problèmes environnementaux en termes d'espace consommé pour les stocker, ainsi que la pollution visuelle.

La réutilisation et le recyclage des déchets de la construction et de démolition semble le seul moyen pour réduire les quantités des déchets et de préserver les ressources naturelles d'une part, et d'autre part satisfaire à la demande du marché en termes de granulats.

Cependant, les propriétés des granulats recyclés (GR) diffèrent des granulats naturels (GN) conventionnellement utilisés pour la confection du béton classique. Il est donc intéressant de comprendre l'influence de ces granulats sur les propriétés du béton sous différents dosages en ciment et pour différentes valeurs d'affaissement.

Le travail de thèse de doctorat présenté dans ce manuscrit a pour objectif la modélisation et la prédiction des propriétés du béton de granulats recyclés à l'état frais et durci. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode des surfaces de réponses (MSR) et la méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA) et cela pour différents dosages en ciment, différents pourcentages de GBR et différents affaissements.

Le manuscrit est composé de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons les différentes notions et généralités liées à notre travail de recherche. Dans un premier temps, nous avons présenté une étude bibliographique sur les granulats recyclés (GR) en matière de mortier adhérent et son influence sur les propriétés des granulats tels que la zone de transition interfaciale (ZTI), la densité et la porosité ainsi que l'absorption d'eau et aussi l'influence de ces granulats à leurs tours sur les propriétés du béton à l'état frais et durci. Puis nous avons exposé les deux méthodes de

prédiction utilisées dans cette thèse qui sont : la méthode des plans d'expériences et la méthode des réseaux de neurones artificiels.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques des matériaux utilisés dans un premier temps, puis dans un deuxième temps nous avons construit le plan d'expérience utilisé et au final nous avons présenté les différents essais utilisés.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et discussion des résultats obtenu durant cette l'étude.

Et en fin on termine ce manuscrit avec une conclusion générale et des perspectives de recherche envisagées.



I

Chapitre

Synthèse bibliographique

I.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre constitue une étude bibliographique répartie en trois parties. La première est dédiée à la présentation des déchets de la construction et les techniques de leurs gestions.

La seconde partie est dédiée à la présentation des propriétés des GR et l'influence de ces derniers sur les propriétés du béton à l'état frais et durci.

Tandis que la troisième partie est consacrée à la présentation de la méthode des plans d'expériences avec quelques types de plans ainsi que la méthode des réseaux de neurones artificiels.

I.2 GENERALITES SUR LES DECHETS

I.2.1 Définition du déchet

La notion de déchets peut être définie de différentes manières selon le domaine d'intérêt. La loi algérienne n° 01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, dans son troisième article définit le déchet comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer ».

I.2.2 Déchets de la construction et de démolition

Les déchets dans le secteur du bâtiment (construction, démolition, réhabilitation) sont très variés de par leurs natures, leurs provenances, leurs tailles...etc ; on y trouve aussi bien des matériaux naturels ou synthétiques, d'origines minérales, organiques ou métalliques, solides ou liquides.

Les déchets du bâtiment sont classés selon leur dangerosité et leur impact sur la santé et l'environnement en trois catégories :

❖ Déchets inertes (DI)

tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés

par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et /ou à l'environnement.

❖ **Déchets dangereux (DD)**

Les déchets dangereux sont des déchets contenant, des éléments toxiques ou dangereux pouvant présenter un impact sur la santé humaine ou l'environnement. Leur élimination nécessite des traitements particuliers dans des centres spécialisés. Le déchet est considéré dangereux s'il possède l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : explosif, hautement inflammable, irritant, nocif, toxique, corrosif, mutagène ou cancérigène.

❖ **Déchet non dangereux (DND)**

Les déchets non dangereux sont des déchets qui ne sont pas identifiés dans les caractéristiques des déchets dangereux. Ils sont souvent assimilés aux déchets ménagers car ils sont constitués des mêmes composants, tel que les papiers, cartons, plastiques, bois, métaux, verres, matières organiques, végétales ou animales, résultant de l'utilisation d'emballage, de rebuts ou de chutes de fabrication (Belebchouche, 2014)

I.3 GESTION DES DECHETS DE LA CONSTRUCTION

Pour résoudre le problème des déchets de construction et de démolition, de nombreuses stratégies et méthodes ont été élaborés par différents chercheurs.

Dans son ouvrage (Richardson, 2013) a soutenu qu'il existe deux méthodes pour traiter les déchets de construction. La première méthode consiste à minimiser les déchets en appliquant des techniques de réduction à la source aux phases de conception et d'approvisionnement du projet. Tandis que la deuxième méthode consiste à gérer les déchets inévitables qui sont déjà produits selon la méthode hiérarchiques (réutilisation, recyclage et élimination).

I.3.1 Méthode de 3R

La méthode 3R regroupe des actions (Réduire, Réutiliser et Recycler) qui constituent une méthode de gestion des produits de fin de vie et des déchets qui en découlent.

La méthode 3R hiérarchique des déchets est représentée sous la forme d'une pyramide rabattue (figure I. 1) De la plus importante et la plus souhaitable - Réduire est au sommet de la pyramide, elle est suivie de la deuxième priorité - Réutiliser, puis Recycler. Schématiquement, la méthode de la gestion durable des déchets 3R est représentée comme suit:

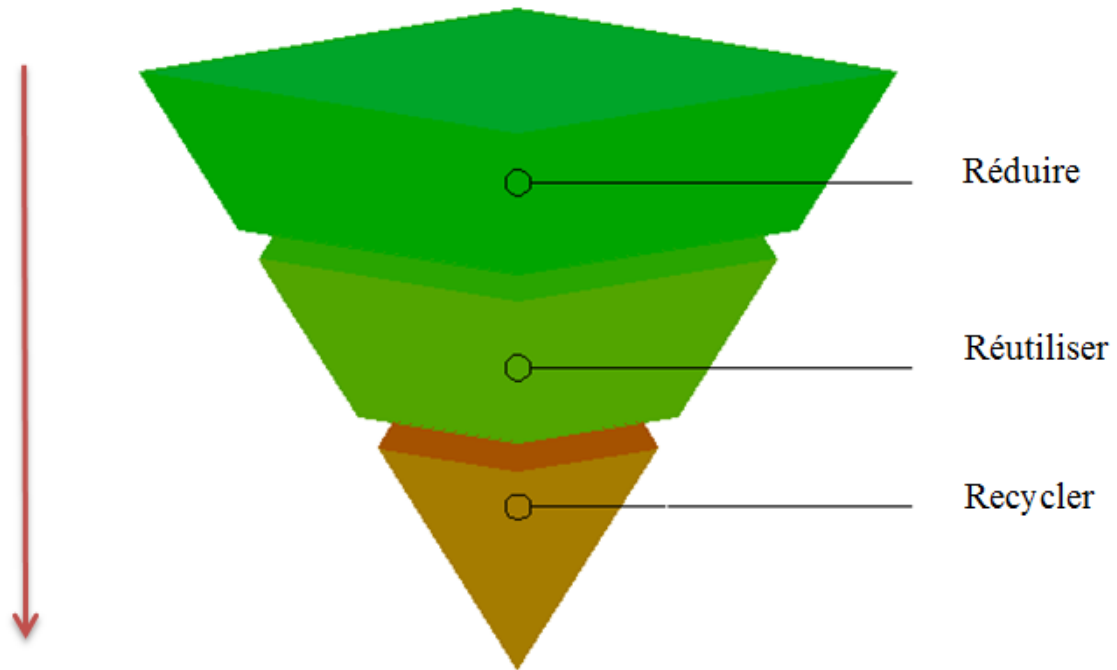


Figure I. 1. Pyramide de la méthode hiérarchique 3R.

❖ Réduire

La réduction peut être considérée comme l'étape centrale de la gestion des déchets de la construction. La meilleure façon de réduire les déchets est de ne pas les produire et par conséquent, cette étape doit être lancée à un stade précoce de la conception du projet. Par exemple en augmentant la durée de vie des matériaux par allongement de leurs durabilités vis-à-vis des agressions extérieures ou aussi par rationnement de l'approvisionnement des chantiers par les quantités des matériaux nécessaires pour chaque phase de projet afin de limiter le gaspillage de ces matériaux.

❖ Réutiliser

La deuxième règle consiste en la réutilisation des produits. Il s'agit de réutiliser les produits qu'on peut récupérer et leur donner une seconde vie dans des travaux secondaires.

Dans le cadre de la présente étude, le déchet considéré est le béton. Le béton concassé peut être réutilisé dans plusieurs travaux, comme sous-couche et base dans la construction de routes, construction de routes temporaires ou comme matériau de drainage... etc.

Similaires au béton plusieurs déchets de construction peuvent être réutilisés tel que la brique, la tuile, la boiserie, le plâtre (le gypse augmente le niveau de calcium dans le compost et peut

également aider à neutraliser l'acidité qui pourrait être présente dans le mélange de compost)... etc.

❖ **Recycler**

Le recyclage est un aspect important de la gestion des déchets de la construction, même s'il s'agit de la dernière option préférable dans la hiérarchie 3R, il reste le procédé environnemental le plus visible pour les citoyens. Le recyclage implique la transformation d'un matériau, article ou un déchet en un autre produit. Grâce au recyclage, l'utilisation de matières premières ou de ressources est réduite, ce qui à son tour économise de l'énergie et réduit la pollution.

Cette composante avait fait l'objet d'une attention considérable au niveau international avant même l'introduction de l'initiative 3R.

Le béton est un matériau entièrement recyclable qui possède un large domaine de réutilisation / recyclage. De nombreuses études ont été menées sur le recyclage du béton. Ces dernières ont montré une très bonne efficacité de recyclage du béton comme agrégats dans différents types de béton.

I.4 RECYCLAGE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Dans le passé, les quantités des déchets générés par les êtres humains n'étaient pas très importantes en raison de la faible densité de population et du fait qu'il y avait très peu d'utilisation des ressources naturelles. Ainsi, les déchets courants étaient principalement des cendres et des déchets humains et biodégradables, et ceux-ci étaient débarrassés dans le sol, avec un effet environnemental minimal.

Avec l'arrivée de l'industrie, la gestion des déchets est devenue une priorité en raison de l'augmentation de la population et de la délocalisation massive des personnes de la campagne vers les villes industrielles. De ce fait, l'augmentation conséquente des déchets industriels et ménagers d'une part et du fait de leur complexité (nombreuses formes de déchets) d'autre part, les déchets constituent une vraie menace pour la santé de l'homme et de l'environnement.

En Algérie, le secteur du bâtiment génère environ 54 million de tonne/an ([AND Agence Nationale des déchets, 2012](#)). Bien que c'est une quantité assez importante, elle reste, proportionnellement, sans danger du point de vue toxicité vu que les déchets du bâtiment sont

dans leur majorité inerte. Néanmoins, ces énormes quantités de déchets provoquent une pollution visuelle et occupent des espaces considérables d'où l'intérêt de leur recyclage.

I.4.1 Intérêts de recycler

❖ Le recyclage économise l'énergie

L'utilisation des produits recyclés comme matière première dans un nouveau produit permet d'économiser beaucoup d'énergie. Car l'extraction de la matière première pour la fabrication d'un nouveau produit consomme beaucoup d'énergie. Par ailleurs, le transport des matières premières naturelles depuis leur origine est une source importante de consommation des énergies qui pourrait être économisée en recyclant les produits utilisés, à condition que ces derniers ne nécessitent pas de transport.

❖ Le recyclage crée de l'emploi

Le recyclage peut créer des emplois pour de nombreuses personnes, allant des personnes spécialisées et qualifiées aux simples ouvriers, réduisant ainsi les problèmes de chômage. Cela aura un impact positif sur la société.

❖ Le recyclage préserve les ressources naturelles

Le recyclage est le traitement et l'utilisation d'anciens produits pour la production de nouveaux produits contribuant ainsi, dans une large mesure, à la sauvegarde des ressources naturelles.

À titre d'exemple, la production du béton a un impact considérable sur l'environnement en termes d'épuisement des ressources naturelles pour la production des agrégats mais aussi en termes de consommation énergétique (extraction, transformation, transport, etc.). Ainsi, recycler ce produit (le béton) contribuera d'une façon significative à la préservation des ressources naturelles et à l'économie d'énergies.

❖ Le recyclage optimise les espaces de stockage des déchets

Le recyclage peut être une solution efficace pour économiser les espaces de stockage. Dans une décharge, différents types de déchets sont déversés et certains sont inertes, comme est le cas des matériaux de construction. Cependant, il est possible, grâce à un recyclage approprié, de faire bon usage de ces déchets et d'économiser ainsi de l'espace pour les décharges.

I.5 PROPRIETES DES GRANULATS DU BETON RECYCLES

I.5.1 Mortier attaché et zone de transition interfaciale (ZTI)

Le problème des granulats de béton recyclé (GBR) se trouve dans le mortier attaché (figure I. 2) qui influe sur les propriétés de béton. Ce mortier attaché forme le point critique des GBR qui est composé de pores et fissures microscopiques, qui influent considérablement sur la résistance de béton recyclé (BR).

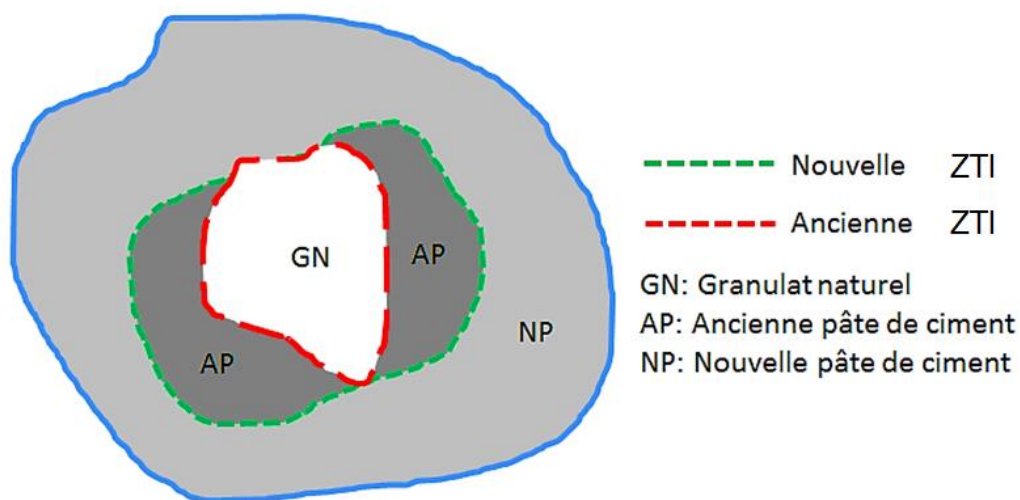


Figure I. 2. Interfaces du gravier recyclé.

Ces pores et fissures augmentent l'absorption d'eau, ce qui réduit la quantité d'eau disponible pour l'hydratation à la zone de transition interfaciale du GBR. D'où résulte la mauvaise qualité des GBR ce qui entrave leur utilisation dans les applications de qualité supérieure.

de Juan & Gutiérrez (2009) ont conclu que la quantité du mortier attaché est liée à la taille des granulats ainsi qu'à la résistance du béton parent.

La zone de transition interfaciale ou ZTI (Zone de Transition Interfaciale) entre la pâte de ciment et les granulats joue un rôle important dans la résistance mécanique du béton. Dans un béton typique, l'espacement moyen entre les particules d'agrégats est de 75 à 100 μm (Tam et al., 2005). En supposant une épaisseur de 40 μm pour l'ZTI, il a été estimé que l'ZTI représente 20% à 40% du volume total de la matrice cimentaire (Tam et al., 2005).

L' ZTI est généralement la partie la plus faible dans un béton. La faiblesse de L' ZTI empêche la réalisation d'une action composite dans le béton à résistance élevée. De ce fait, le

béton régresse à un niveau de contrainte inférieur à celui de l'un des deux composants (granulats et matrice de mortier).

Dans un béton conventionnel l'unique ZTI se situe entre la pâte du mortier et les agrégats, tandis que le béton à base de granulats recyclé possède deux zones ZTI, l'une entre le GR et la nouvelle pâte de ciment (nouveau ZTI) et l'autre entre le GN et l'ancien mortier attaché (ancienne ZTI) (Miren, 2004). D'où l' ZTI constitue le maillon faible de GBR

Néanmoins, la qualité des granulats recyclés n'affecte pas la résistance de béton recyclé lorsque le rapport d'eau est élevé. Dans le cas d'un béton à rapport eau-ciment élevé, où l'ancienne ZTI est plus résistante que la nouvelle ZTI, la résistance du GBR est égale à celui du béton d'agrégats normal. En revanche, dans le cas d'un faible rapport eau-ciment, où l'ancienne ZTI est plus faible que la nouvelle ZTI, la résistance du GBR est inférieure à celle du béton d'agrégats normal (Suvash Chandra, 2011).

I.5.2 Densité et porosité

La densité est un paramètre important pour la confection et le contrôle de certaines propriétés de béton. Les résultats rapportés dans la littérature (de Juan and Gutiérrez, 2009) montrent que la densité des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels qui est due à la pâte de mortier adhérent au granulat naturel.

Une relation entre la densité et le pourcentage de mortier adhérent a été proposée par (de Juan and Gutiérrez, 2009) (Figure I. 3). Les résultats montrent que la densité diminue à mesure que le pourcentage de mortier adhérent augmente. Ceci est dû à la pâte de ciment poreuse qui est moins dense.

Une autre comparaison a été aussi faite entre la densité et la dimension des granulats (Gómez-Soberón, 2002). Les résultats obtenus montrent que la densité des granulats recyclés augmente avec l'augmentation de la dimension des granulats.

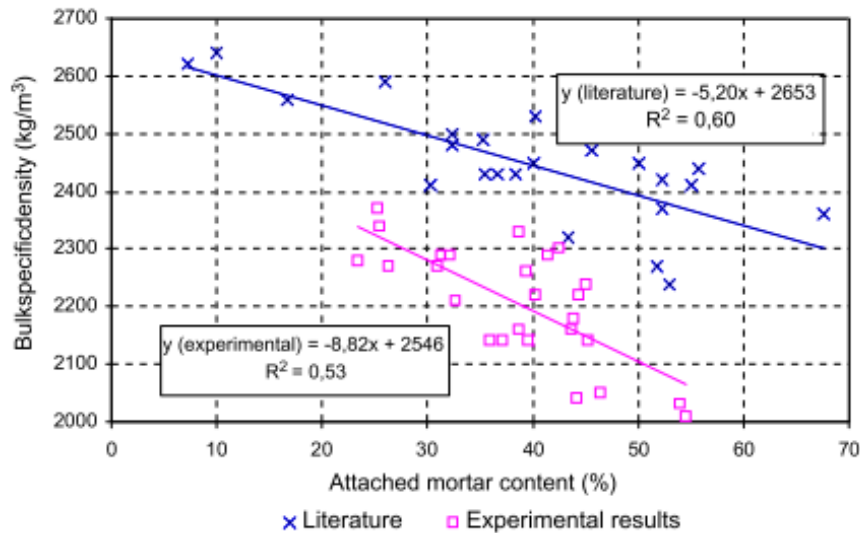


Figure I. 3. Relation entre la teneur en mortier et la densité des GR (de Juan and Gutiérrez, 2009).

I.5.3 Absorption d'eau

La capacité d'absorption des granulats recyclé élevé par rapport aux granulas naturel est due à la pâte de mortier attaché (Rao et al., 2007). La porosité importante de cette dernière est l'origine de sa haute absorption d'eau. La variation de la capacité d'absorption d'eau rapportée dans diverses références est due à la variation de la teneur en pâte de ciment dans cet agrégat. De Juan (2004) rapporte que l'absorption d'eau de l'agrégat naturel est comprise entre 0 et 4%, tandis que pour le mortier adhérent, elle est comprise entre 16 et 17%, pour donner une absorption d'eau des GBR entre 1,65 et 13%, avec une moyenne de 5,32 % (González-Taboada et al., 2016).

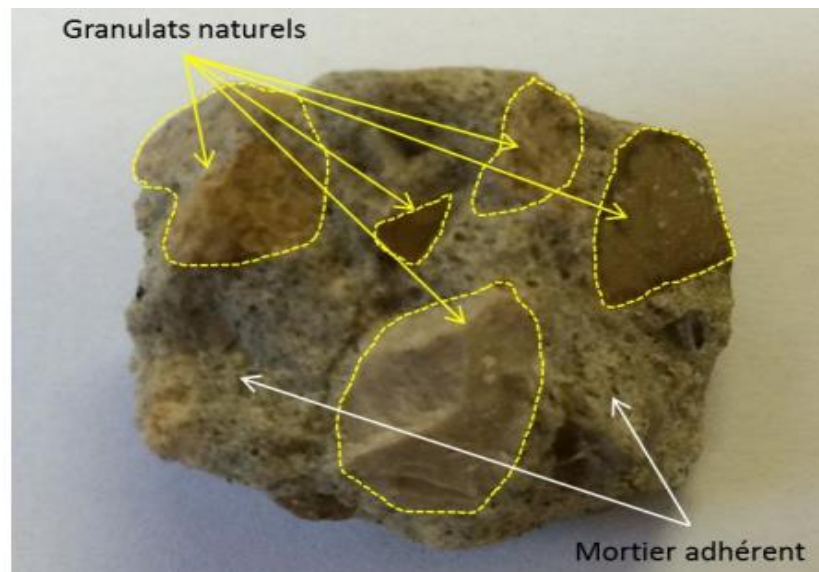


Figure I. 4. Exemple d'un granulat de béton recyclé (GBR) (Bouarroudj, 2019).

I.6 PROPRIETES DU BETON A BASE DE GRANULATS RECYCLES

I.6.1 Propriétés du béton à l'état frais

L'affaissement est l'une des caractéristiques recherchées lors de la formulation du béton. Cette propriété dépend de plusieurs facteurs (Kisku et al., 2017; Poon et al., 2004) à savoir :

- La taille des agrégats ;
- La teneur en humidité des agrégats ;
- L'absorption d'eau, et ;
- La forme et la texture des agrégats.

Vue la porosité et l'absorption importante des GR par rapport aux granulats naturel, l'affaissement du béton recyclé est inférieur au béton classique pour une même quantité d'eau.

Pour remédier à la diminution de l'affaissement, des auteurs ont proposé d'ajouter une quantité d'eau correspondante à la différence d'absorption d'eau entre les granulats naturel et les granulats recyclés et il s'avère que cela améliore significativement l'ouvrabilité du béton frais (Rao et al., 2007).

L'eau peut être ajoutée de différentes manières, soit par présaturation des granulats avant le malaxage, soit par compensation en ajoutant directement l'eau d'absorption dans l'eau

de gâchage (Ferreira et al., 2011). Néanmoins un malaxage excessif (pendant plus de 30 s) peut conduire à une ségrégation de béton recyclé (Debieb et al., 2010).

(Kou and Poon, 2013) et Mefteh et al. (2013) ont étudié l'effet des conditions d'humidité des granulats sur l'ouvrabilité et ont rapporté que l'affaissement initial et la perte d'affaissement dépendent de la teneur en humidité des agrégats. Il était évident d'après les résultats que les agrégats séchés au four entraînaient un affaissement initial plus élevé et une perte d'affaissement plus rapide, tandis que les agrégats séchés à l'air et saturés en surface avaient des affaissements initiaux et des pertes d'affaissement normaux.

La masse volumique en parallèle est affectée par l'incorporation des GR à mesure que le ratio de remplacement des GN par des GR augmente. La diminution de la masse volumique est le résultat de la diminution de celle des granulats. De plus, l'augmentation de la teneur en air du béton recyclé entraîne une réduction supplémentaire de la densité du béton frais (Rao et al., 2007).

I.6.2 Propriétés du béton à l'état durci

A. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est la propriété la plus essentielle du béton durci qui influence la dureté, la durabilité et les performances du béton (Kisku et al., 2017). Les propriétés du béton recyclé dépendent de nombreux facteurs tels que le rapport liant/eau, les différentes propriétés des GR, les propriétés du mortier adhérent, l'approche de malaxage et les propriétés des adjuvants utilisés (Kisku et al., 2017).

Il a été établi dans la littérature que le béton confectionné à partir des GR pour un même rapport E/C présente une diminution de la résistance, à mesure que le ratio de remplacement des granulats naturel par les granulats recyclés augmente, de l'ordre de 10% par rapport à celle d'un béton ordinaire (Gonzalez-Fonteboa and Martinez-Abella, 2008; Kou and Poon, 2008; Metropolitan, 2000; Rahal, 2007).

Dans certaines études, il a été souligné que la diminution de la résistance à la compression est supérieure à 10%. Dans ses travaux, (Nixon, 1978) a observé une diminution supérieure à 20%. Plus encore, d'autres travaux parlent de réduction entre 12 et 25% lorsque 25 à 30% (Corinaldesi, 2011; Etxeberria et al., 2007a) ou 100% des granulats naturels ont été remplacés par des granulats recyclés (Li et al., 2009; Rahal, 2007).

Cependant, et pour un taux de remplacement inférieur à 25%, une influence négligeable est observée dans certaines études (Abd Elhakam et al., 2012; Etxeberria et al., 2007b; Fonseca et al., 2011). Ceci, peut être attribué à la bonne qualité des granulats recyclés (Abd Elhakam et al., 2012).

L'augmentation du ratio E/C a un effet inverse sur la résistance à la compression du béton. En effet, plus E/C augmente la résistance à la compression diminue. Mais cette tendance a été remarquée pour des rapports E/C petits. Pour E/C diminuer à 0,4 la valeur de la résistance chute de 25%.

Tandis que pour un rapport E/C élevé (Katz, 2003) a constaté que la résistance est similaire lorsque E/C est entre 0,6 et 0,75 même pour un taux de remplacement de 75%. (Rao, 2005) a constaté que la résistance reste inchangée même pour 100% de substitution, à condition que le rapport E/C soit supérieur à 0,55.

L'influence d'un rapport E/C petit sur la résistance à la compression a été expliquée par la fragilité de zone de transition interfaciale (ZTI) qui ne dispose pas d'une quantité d'eau suffisante entre le vieux mortier et l'agrégat. À cet effet, cette ZTI devient la zone de rupture.

Il a été constaté aussi que l'état hydrique initial des gravillons recyclés avant le malaxage a une influence sur la résistance à la compression. Dans leur étude, (Poon et al., 2004) ont étudié l'influence de l'état humide des agrégats recyclés sur la résistance à la compression. Ils ont constaté que les formulations contenant des agrégats recyclés saturés présentent une diminution de la résistance à la compression. Ils ont ainsi attribué cette diminution au ressuage de béton lors de sa vibration. En effet, l'eau présente à l'intérieur des agrégats recyclés peut se déplacer vers la matrice cimentaire créant ainsi un rapport E/C local relativement élevé au voisinage des particules. Ce qui peut affaiblir la liaison entre les agrégats recyclés et la matrice de ciment. En contrepartie les formulations contenant des agrégats recyclés secs présentent une augmentation de la résistance, l'eau se déplace de la matrice cimentaire vers les agrégats recyclés entraînant les particules de ciment qui s'accumulent sur la surface des agrégats recyclés. En conséquence, une liaison plus forte peut se former entre la matrice de ciment et les particules d'agrégats en particulier à un âge précoce (Poon et al., 2004).

B. Traction par fendage

L'une des méthodes utilisées pour la détermination de la traction est l'essai de traction par fendage. Il a été observé que la résistance à la traction par fendage du béton dépend de

plusieurs facteurs tels que le taux de substitution des granulats recyclés, la qualité des granulats recyclés et le rapport E/C.

Des études sur l'effet des taux de substitution des agrégats naturels par des agrégats recyclés sur la résistance à la traction ont montré que l'augmentation du remplacement réduit la résistance à la traction.

(Rao, 2005) a observé une réduction de la résistance de 15 à 20% par rapport au béton de référence pour 100% de remplacement.

Dans leurs études (de Brito and Robles, 2010) ont rapporté que le taux de substitution des agrégats naturels par des agrégats recyclés a un effet légèrement moins important sur la diminution de la traction par fendage.

Tandis que d'autres études montrent que, jusqu'à 30% de substitution, la résistance à la traction par fendage du béton recyclé reste inchangé (Fonseca et al., 2011) ou même supérieure à celle du béton ordinaire (Dilbas et al., 2014; Etxeberria et al., 2007b)

C. Vitesse d'impulsion ultrasonique

L'ultrason est une méthode d'essai non destructive rapide et peu coûteuse. Elle nous permet d'évaluer les qualités d'un béton telles que, sa résistance et ses performances élastiques.

Plusieurs études ont rapporté l'influence des agrégats recyclés sur la vitesse d'impulsion ultrasonore (VIU) du béton.

(Chakradhara Rao et al., 2011) ont observé une baisse de VIU à mesure que le remplacement du GN par les GBR augmentait. La même tendance a été remarquée par (Kou and Poon, 2015) et (Kwan et al., 2012). Cependant, cette diminution a été limitée avec l'augmentation de la résistance à la compression du béton d'origine (Kou and Poon, 2015) et elle s'améliore aussi avec l'âge de durcissement (Kwan et al., 2012).

La diminution de VIU du béton préparé avec des agrégats recyclés pourrait être assignée à la faible densité et à la porosité élevée des agrégats recyclés par rapport aux agrégats naturels, vu que la vitesse de l'impulsion ultrasonique traversant un matériau solide dépend de la densité et les propriétés élastiques du matériau (Kou and Poon, 2015).

Néanmoins, pour 75% de remplacement de gravier naturel par du gravier recyclé (Zega and Di Maio, 2009) n'ont remarqué aucune diminution des VIU par rapport au béton témoin.

I.7 PLANS D'EXPERIENCES

Un plan d'expérience est l'organisation d'une séquence d'essais expérimentaux pour obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences et la meilleure précision possible sur les repenses calculées par le model (Goupy, 2016).

La théorie des plans d'expériences fut la fusion entre l'expérimentale et les outils statistiques. Ronald Aylmer Fisher fut le premier qui a développé cette méthode en l'utilisant dans le domaine agronomique en 1919 (Fisher, 1925).

I.7.1 Terminologie

❖ Facteur

On appelle facteur toute variable, obligatoirement contrôlable, susceptible d'influencer la réponse observée. La différence fondamentale entre la notion classique de variable et celle de facteur est le fait que tout facteur doit pouvoir être varié sans difficulté (Walter, 2009).

❖ Réponse

On qualifie de réponse expérimentale une manifestation mesurable que l'on observe lorsqu'on fait varier les paramètres étudiés. Un phénomène peut être éventuellement décrit par plusieurs réponses expérimentales (Droesbeke et al., 1997).

❖ Domaine expérimental et domaine d'étude

Pour bien comprendre la construction des plans d'expériences et l'interprétation des résultats, une présentation géométrique est préconisée. Lorsqu'il y a n facteurs, il faut raisonner dans des espaces à n dimensions, lorsque n est égale à deux facteurs (x et y) et à deux niveaux (+1 et -1), le domaine expérimental est le plan x - y dans lequel toutes les valeurs de x et de y sont possibles (Goupy and Creighton, 2016). Mais, en général, un expérimentateur limite les variations des facteurs étudiés (Boudjeniba, 2006).

On appelle domaine d'étude tous les points de la surface délimitée par les niveaux bas et haut de chaque facteur (Goupy and Creighton, 2016).

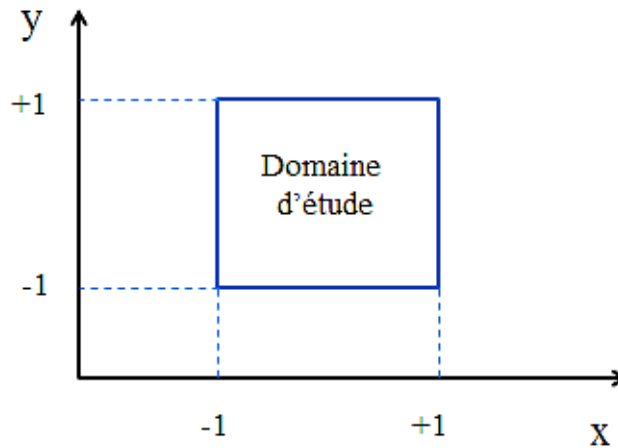


Figure I. 5. Représentation du domaine d'étude.

❖ Domaine d'un facteur

Lors de l'expérimentation, l'expérimentateur limite la variation d'un facteur entre deux bornes. Les valeurs inférieures et supérieures sont baptisées, niveau bas (A_{inf}) et niveau haut (A_{sup}) respectivement (Figure I. 6).

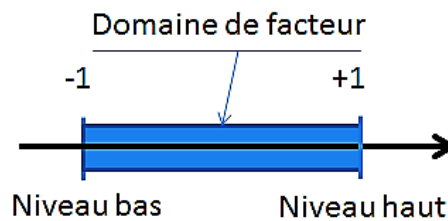


Figure I. 6. Représentation du domaine de facteur.

Lors de la construction d'un plan d'expérience, les facteurs peuvent être représentés par des valeurs réelles ou des valeurs codées. Le passage de valeurs réelles aux valeurs codées et inversement ce fait par la formule suivante :

$$x_j = \frac{A_j - A_j^0}{\Delta A_j}, j=1, 2, 3 \dots, k \quad (\text{Eq.I.1})$$

$$A_j^0 = \frac{A_{j \text{ sup}} + A_{j \text{ inf}}}{2} \text{ et } \Delta A_j = \frac{A_{j \text{ sup}} - A_{j \text{ inf}}}{2} \quad (\text{Eq.I.2})$$

Avec :

- $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$: Valeurs codées ;
- $A_1, A_2, A_3, \dots, A_k$: Valeurs réels ;
- $A_1^0, A_2^0, A_3^0, \dots, A_k^0$: Valeurs réelles correspondantes au centre de niveau ;
- ΔA_j : Intervalle de variation ;

- A_{inf} : Valeur inférieure de la variable réelle ;
- A_{sup} : Valeur supérieure de la variable réelle.

I.8 TYPES DE PLANS D'EXPERIENCES

I.8.1 Plans pour surface de Réponse (MSR)

La méthode des surfaces de réponses, ou RSM (« response surface methodology ») est un ensemble de méthodes mathématiques et statistiques permettant d'évaluer les relations entre un groupe de variables indépendantes (paramètres d'entrées) et une ou plusieurs réponses (paramètres de sorties). Cette méthode est généralement utilisée lorsqu'il existe plusieurs paramètres d'entrées qui affectent une ou plusieurs réponses (sorties) (Dahmoune et al., 2015; Hammoudi et al., 2019).

La méthode des surfaces de réponses peut aboutir à deux objectifs :

- Le premier est de trouver la réponse optimale, lorsqu'il y a plus d'une réponse, il est important de trouver un compromis qui ne favorise pas une seule réponse ;
- Le deuxième est de prédire la réponse en fonction de la variation des entrées.

Les plans d'expériences pour surface de réponse sont des plans qui donnent une répartition de points pour estimer la réponse quadratique d'une réponse en fonction de diverses variables.

Il existe plusieurs types de plans pour surface de réponse dont, les plans centraux composites (PCC) et les plans Box-Behnken (PBB), sont les plus utilisés.

Le modèle mathématique utilisé avec les plans pour surfaces de réponse pour prédire les réponses et décrit la relation entre les variables indépendantes s'agit d'un polynôme de second degré (Equation I.3).

$$Y = B_0 + \sum_i^k B_i X_i + \sum_i^k B_{ii} X_i^2 + \sum_{ij}^k B_{ij} X_i X_j + E \quad (\text{Eq.I.3})$$

Avec : Y qui représente la réponse. B_0 la constante polynomiale. B_i , B_{ii} et B_{ij} sont les coefficients des termes linéaire, quadratique et d'effet d'interaction, respectivement.

❖ Plan central composite

Le plan central composite PCC (Central Composite Design) (Figure I. 7) est le plan de surface de réponse le plus connu. Cette conception permet d'estimer les paramètres de régression polynomiale de second degré pour une réponse donnée.

Le PCC nécessite trois types d'essai, c'est-à-dire des essais factoriels 2^k (partie factorielle), des essais axiaux $2k$ (partie axiale) et des essais centraux n_c (partie centrale). k étant le nombre de facteurs étudiés.

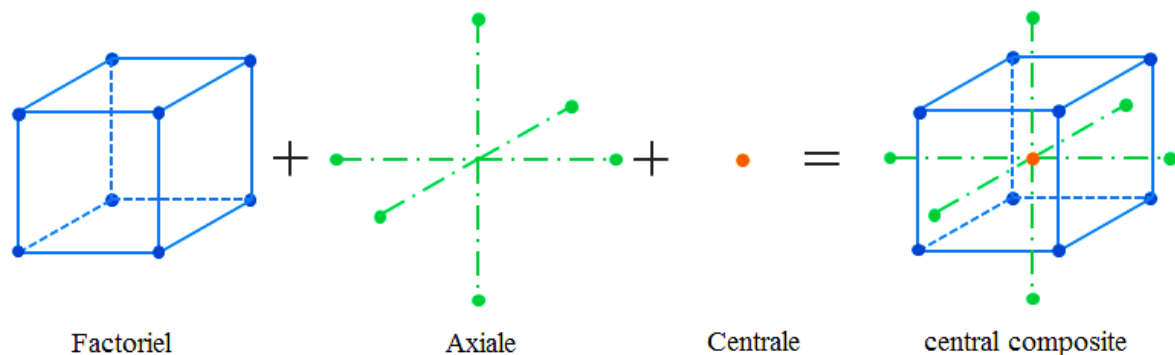


Figure I. 7. Plans central composite.

Avec :

- La partie **factorielle** contenant tous les sommets de cube $[-1,1]$;
- La partie **axiale** contenant les points situés sur les axes du repère à une même distance α du centre du domaine expérimental qui dépend du type de PCC ;
- La partie **centrale** contenant n_0 éventuelles répliques du centre du domaine expérimental.

Le nombre total n d'essais à réaliser est la somme des essais de la partie factoriel (2^k), de la partie axiale ($2k$) et de la partie centrale (n_c). Le nombre n des essais d'un plan composite est donné par la relation suivante :

$$n = 2^k + 2k + n_c \quad (\text{Eq.I.4})$$

Sur la base de la position des points factoriels et axiaux on distingue trois types de plans CCD.

❖ Plans Box-Behnken

En 1960 Box et Behnken ont proposé des plans qui permettent d'établir directement des modèles du second degré. Les facteurs ont trois niveaux (-1,0 et +1) (Goupy and Creighton, 2016). Ce type de conception a été introduit afin de limiter la taille de l'expérimentation à mesure que le nombre de paramètres augmente (Macro, 2013). Pour trois facteurs les points expérimentaux sont représentés au milieu des arrêtes d'un cube. Ce qui donne douze essais auxquels on rajoute trois points au centre ce qui donne quinze essais comme illustré sur la Figure I. 8 (Goupy and Creighton, 2016).

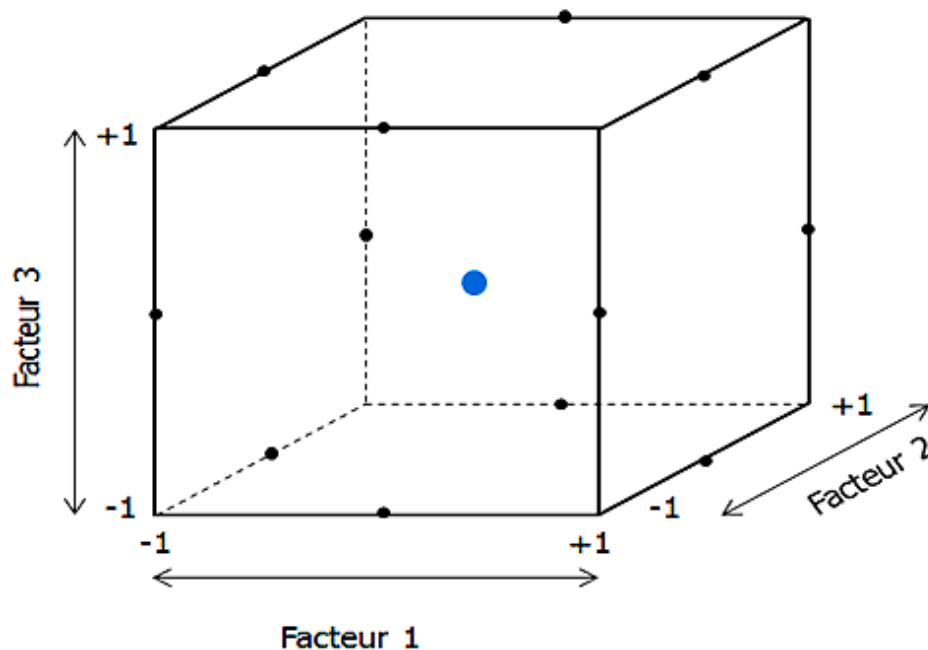


Figure I. 8. Plans de Box-Behnken pour trois facteurs.

I.8.2 Plans factoriel

❖ Plans factoriel complet

Les plans factoriels sont utilisés dans les expériences contenant plusieurs facteurs où il est nécessaire d'étudier leur l'impact et leurs combinaisons sur le processus.

Les plans factoriels complets sont des plans à deux niveaux 2^k comptant k facteurs chacun prend deux niveaux. Les facteurs peuvent être quantitatifs ou qualitatifs avec des niveaux correspondant aux niveaux « haut » et « bas » d'un facteur ou peut-être la présence et l'absence d'un produit chimique (Rarljan et al., 2007).

Le modèle mathématique adopté, à priori, est un polynôme de premier degré qui prend en compte la constante du modèle a_0 , les effets de chaque facteur a_i et toutes les interactions entre les facteurs pris deux à deux a_{ij} , trois à trois, quatre à quatre (Equation I.5).

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots + \sum a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{Eq.I.5})$$

❖ Plans factoriel fractionnaires

L'utilisation des plans factoriels fractionnaires est particulièrement populaire dans les expériences de criblage lorsque l'expérimentateur suppose que certaines interactions d'ordre élevé sont négligeables. Des informations sur les effets principaux et les interactions d'ordre faible peuvent être obtenues en exécutant seulement une fraction de l'expérience factorielle complète.

Les expériences de criblage sont généralement réalisées aux premiers stades de l'étude lorsqu'il est probable qu'un nombre important de facteurs initialement pris en compte ont peu ou pas d'effet sur la réponse. Les facteurs identifiés comme significatifs sont ensuite étudiés de manière plus approfondie dans des expériences ultérieures. L'approche utilisée pour générer des fractions est basée sur des générateurs d'alias.

Considérons une situation dans laquelle quatre facteurs, chacun a deux niveaux, mais les expérimentateurs ne peuvent pas se permettre d'exécuter les $2^3 = 8$ combinaisons. Ils peuvent cependant se permettre de réaliser quatre essais. Cette restriction suggère l'utilisation d'une demi-fraction d'un plan 2^3 . Par conséquent, une matrice de 2^{3-1} combinaisons sera réalisée.

Considérons le plan 2^3 et son modèle mathématique (Eq. I.6) :

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 + a_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (\text{Eq.I.6})$$

Si on effectue 4 essais, on obtient un système de quatre équations à 8 inconnues. Pour réduire le nombre d'inconnues, on introduit 4 contrastes (l_0, l_1, l_2, l_3), les coefficients sont aliasés dans les contrastes.

Avec: $l_0 = a_0 + a_{123}$, $l_1 = a_1 + a_{23}$, $l_2 = a_2 + a_{13}$, $l_3 = a_3 + a_{12}$

On obtient alors l'équation suivante :

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 + a_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (\text{Eq.I.7})$$

Avec : $y = l_0 + l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3 x_3$

I.8.3 Plans de mélange

Les premiers plans de mélange ont été développés par Scheffe (Scheffé, 1963). Les plans de mélange sont une extension des plans d'expériences classiques (plans factoriels, plans pour surfaces de réponse, etc.). Les facteurs sont des constituants ou des proportions dans la conception du mélange. Par définition, les fractions constituantes du mélange sont totalisées à 100 % (Eq. I.8) et chaque fraction constituante du mélange est comprise entre 0 et 100% (équation I.9).

$$\sum_{x=1}^u x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 100\% \quad (\text{Eq.I.8})$$

$$0 \leq x_i \leq 100\% \quad (\text{Eq.I.9})$$

Cela signifie que l'on peut choisir en toute liberté le niveau d'un facteur quels que soient les niveaux déjà attribués aux autres. En général, l'étude des réponses en fonction des proportions des constituants du mélange, comme la somme de ces proportions, est toujours égale à 100 %. Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés du mélange. Dans cette situation les facteurs ne sont pas indépendants et cela entraîne des problèmes particuliers.

En combinant les observations sur le coefficient β_0 avec la contrainte de l'équation I.9, Scheffe est arrivé aux modèles canoniques montrés dans les équations I.10 et I.11.

$$y = \sum_{x=1}^u \beta_i^* x_i \quad (\text{Eq.I.10})$$

$$y = \sum_{x=1}^u \beta_i^* x_i + \sum_{i < j}^u \sum_{j > i}^u \beta_{ij}^* x_i x_j \quad (\text{Eq.I.11})$$

I.9 RESEAUX DE NEURONE ARTIFICIEL

I.9.1 Historique

Les réseaux de neurones artificiels ont été initiés en 1943 par (Mcculloch and Pitts, 1990). Ils ont représenté le neurone biologique par un modèle simplifié communément appelé neurone formel. Ce concept fut ensuite mis en réseau en 1958 par (Rosenblatt, 1958) par une couche d'entrée et une couche de sortie. C'est l'origine du perceptron. Peu après dans les années 60 Widrow et Hoff (Widrow and Hoff, 1960) développent le modèle de l'adaline (Adaptive Linear Element), ce dernier devient par la suite, le modèle de base des réseaux de neurones multicouches.

A partir 1969 jusqu'aux années 80, les recherches sur les réseaux de neurones ont été pratiquement abandonnées lorsque M. Minsky et S. Papert ont publié le livre « Perceptrons » (Marvin and Seymour, 1969) où ils ont démontré les limites théoriques du perceptron, en particulier, l'impossibilité de traiter les problèmes non linéaires par ce modèle (Chamekh, 2010).

En 1982 Hopfield (Widrow and Hoff, 1960) a fini par démontrer l'intérêt des réseaux de neurones entièrement connectés (Eric and Patrick, 1991). En parallèle, Werbos en 1975 (Werbos, 1975) a conçu un mécanisme d'apprentissage pour les réseaux multicouches de type perceptron à savoir la rétropropagation (Back-Propagation). Cet algorithme qui permet de propager l'erreur vers les couches cachées est popularisé en 1986 dans un livre "Parallel Distributed Processing" par (McClelland et al., 1986). Depuis les recherches dans ce domaine ne cesse d'accroître et leurs applications s'étalent dans plusieurs domaines.

I.9.2 Neurone biologique

Les neurones sont des unités cellulaires qui permettent l'interprétation et le traitement de l'information. Les humains naissent avec pas moins de 100 milliards de neurones, la quasi-totalité des neurones se trouvent dans le cerveau (Laurene, 1992).

Le neurone biologique est composé de trois composantes à savoir le corps cellulaire qui est appelé le soma, les dendrites et l'axone, comme illustré en figure I. 9.

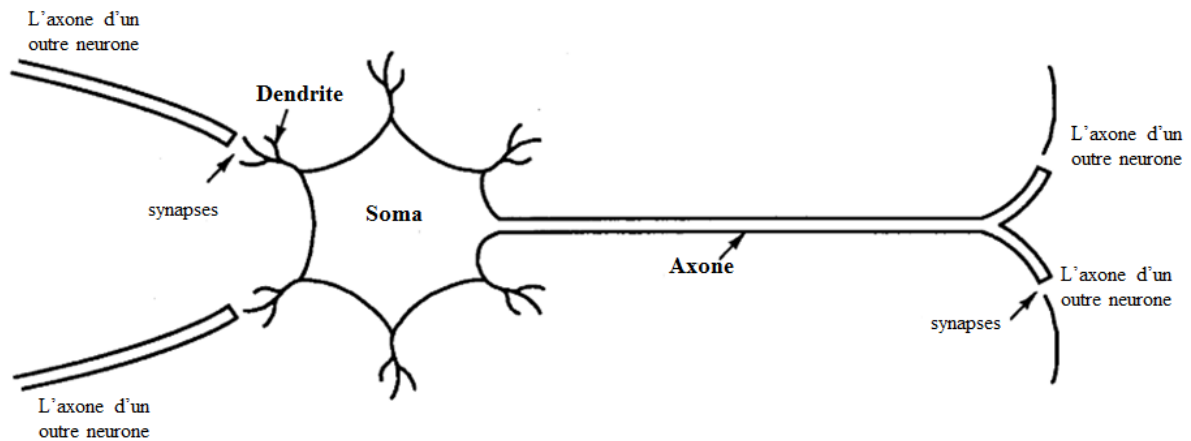


Figure I. 9. Neurone biologique (Laurene, 1992).

I.9.3 Model de neurone formel

Le modèle de neurone formel du Macculloch et Pitts (Mcculloch and Pitts, 1990) s'agit d'une présentation mathématique de neurone biologique (Figure I. 10). Il s'agit d'un système qui reçoit un nombre de variables d'entrées en provenance de neurones amont qui sont appelés les entrées. Chacune de ces entrées est associée à un poids de connexion (W) différent de l'autre en fonction de la force de connexion (Figure I. 10).

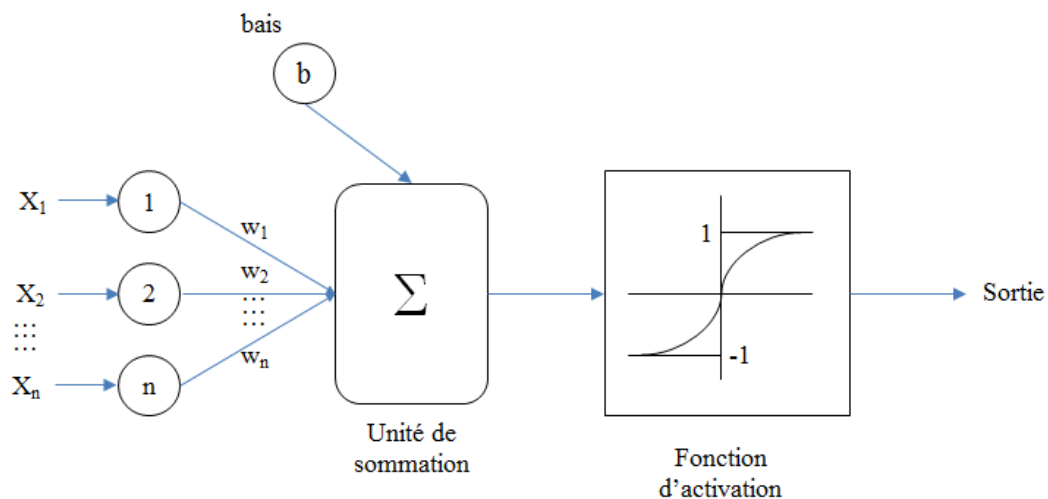


Figure I. 10. Représentation du neurone formel.

Le neurone formel est doté d'une sortie unique, qui est le résultat de la somme des entrées pondérées par les poids de connexion définie par la fonction (Eq.I-12) et le calcul d'une fonction d'activation définie par la fonction sigmoïdale (Eq.I-13).

$$H = \sum_{i=1}^n X_i W_i + b \quad (\text{Eq.I-12})$$

$$Y = f(H) = \frac{1}{1 + e^{-H}} \quad (\text{Eq.I-13})$$

I.9.4 Architecteurs et types des réseaux de neurones

❖ Réseaux de neurones non bouclés (Statiques)

Un réseau de neurones non bouclés est un ensemble de neurones connectés entre eux d'où l'information circule seulement des entrées d'un réseau vers la sortie, autrement dit, il n'y a pas de boucle de retour (Marcos et al., 1987). Le modèle le plus simple des réseaux de neurones non bouclés est le perceptron multicouche (PMC) (Figure I. 11) qui est le model utilisé dans ce présent travail.

Le perceptron multicouche est un réseau neuronal à une action directe composé de plusieurs couches interconnectées dont les couches sont empilées les unes sur les autres comme le montre la figure I. 11. Chaque neurone d'une couche est connecté à un neurone de la couche suivante, les neurones de la couche cachée possèdent une fonction d'activation qui est généralement non linéaire (Eq. I-12) (Assesment, 2011).

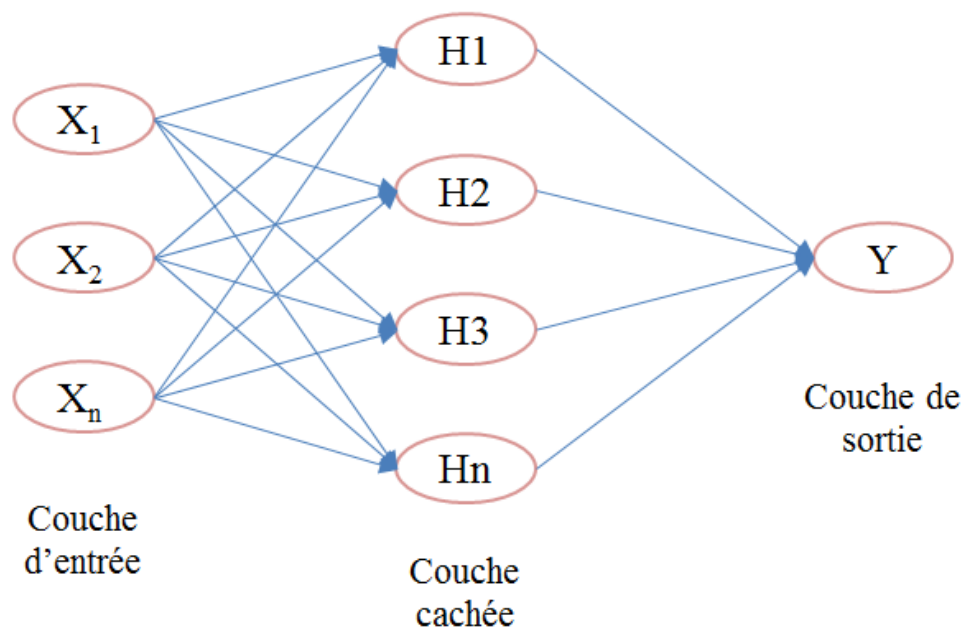


Figure I. 11. Réseau neuronal perceptron multicouche non bouclé.

❖ Réseaux de neurone bouclé (récurrents)

Un réseau de neurones bouclé (Figure I. 12) est schématisé par un graphe des connexions qui est cyclique. 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 (un tel chemin est désigné sous le terme de "cycle"). Ainsi, un retard entier multiple de l'unité de temps choisie est attaché à chaque connexion d'un réseau de neurones bouclé (ou à chaque arrête de son graphe)(Abdessalem, 2007). Une grandeur à un instant donné ne peut pas être fonction de sa propre valeur au même instant. Tout cycle du graphe du réseau doit avoir un retard non nul.

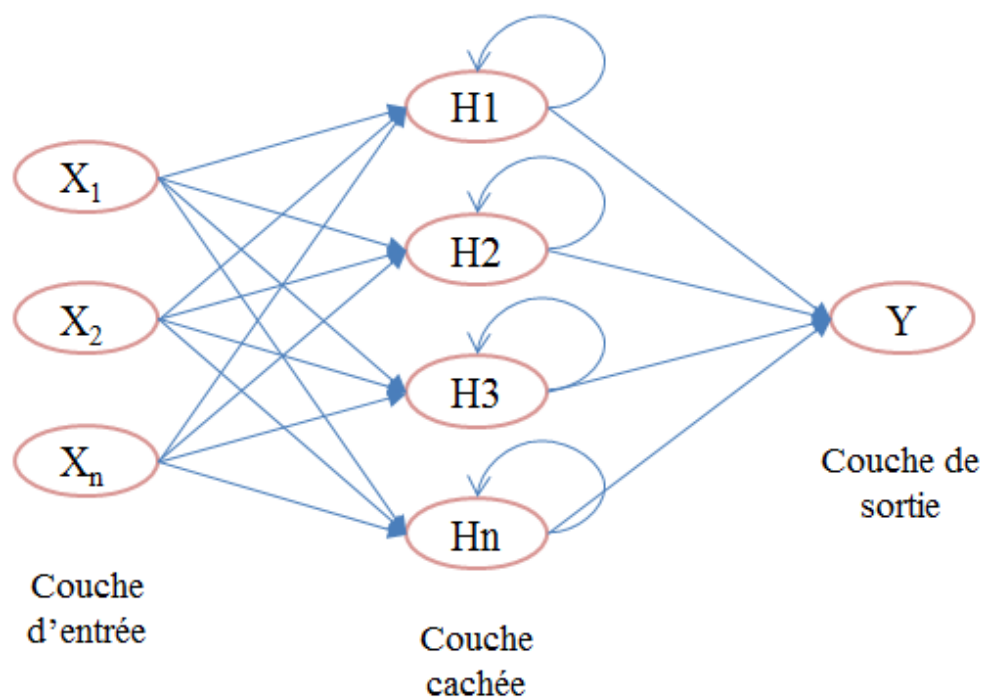


Figure I. 12. Réseau neuronal perceptron multicouche bouclé.

I.9.5 Apprentissage des réseaux de neurone

❖ Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé, dit aussi avec professeur consiste à mettre en face à face un groupe de variables appelés variables explicatives ou prédicteurs et un autre en général constitué d'une seule variable, appelée variable cible ou à prédire. L'objectif, en effet, est

d'apprendre le lien entre les variables explicatives et la variable à prédire grâce à des algorithmes d'apprentissage et de le traduire sous forme de modèle (Hammoud, 2017).

La plupart des algorithmes d'apprentissage des réseaux de neurones formels sont des algorithmes d'optimisation : Ils cherchent à minimiser par des méthodes d'optimisation non linéaire une fonction coût qui constitue une mesure de l'écart entre les réponses réelles du réseau et ses réponses désirées. Cette optimisation se fait de manière itérative, en modifiant les poids synaptique en fonction du gradient de la fonction coût : Le gradient est estimé par une méthode spécifique aux réseaux de neurones, dite méthode de rétro propagation, puis il est utilisé par l'algorithme d'optimisation proprement dit. Les poids sont initialisés aléatoirement avant l'apprentissage, puis modifiés itérativement jusqu'à obtention d'un compromis satisfaisant entre la précision de l'approximation sur l'ensemble d'apprentissage et la précision de l'approximation sur un ensemble de validation disjoint du précédent.

❖ **Apprentissage non supervisé**

Ce type d'apprentissage est utilisé lorsqu'on dispose d'un ensemble de données, représentées par des vecteurs de grandes dimensions et on cherche à les regrouper selon des critères de ressemblance qui sont inconnus a priori. Ce type de tâche est connu en statistique sous le nom de méthodes "d'agrégation". Il n'y a pas là, donc de "professeur", puisque c'est au réseau de découvrir les ressemblances entre les éléments de la base de données et les classer selon des critères de ressemblances.

I.10 CONCLUSION

Cette synthèse bibliographique nous a permis d'établir un état de l'art général quant aux déchets de la construction et de démolition et les techniques de leurs gestions, les propriétés des granulats recyclés et leurs influences sur les propriétés du béton frais et durci.

Nous avons aussi vu à travers cette synthèse bibliographique quelque type des plans d'expériences à savoir: les plans pour les surfaces de réponses, les plans factoriels et les plans de mélanges. Et aussi nous avons donné quelques généralités sur les réseaux de neurones artificiels.

II

Chapitre

Matériels et méthodes

II.1 INTRODUCTION

Ce deuxième chapitre porte sur la présentation et la caractérisation de différents matériaux utilisés, ainsi que sur le protocole expérimental et sur les différents essais réalisés dans le cadre de cette thèse à l'instar de l'affaissement, de la masse volumique, l'essai de compression et de traction et de l'ultrason.

II.2 MATERIAUX UTILISES

II.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est de type CEMII/A-M 42.5N conformément à la norme [NF EN 197-1](#) avec une surface Blaine de $4299 \text{ cm}^2/\text{g}$ et une masse volumique de 3150 kg/m^3 . Le ciment est produit par la cimenterie d'AIN El KBIRA. Sa composition chimique et sa courbe granulométrique sont présentées dans le [tableau II. 1](#) et la [figure II. 1](#) respectivement.

Tableau II. 1. Composition chimique du ciment.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
(%)	19,73	3,92	4,29	60,24	1,62	1,80	0,32	0,14	0,001

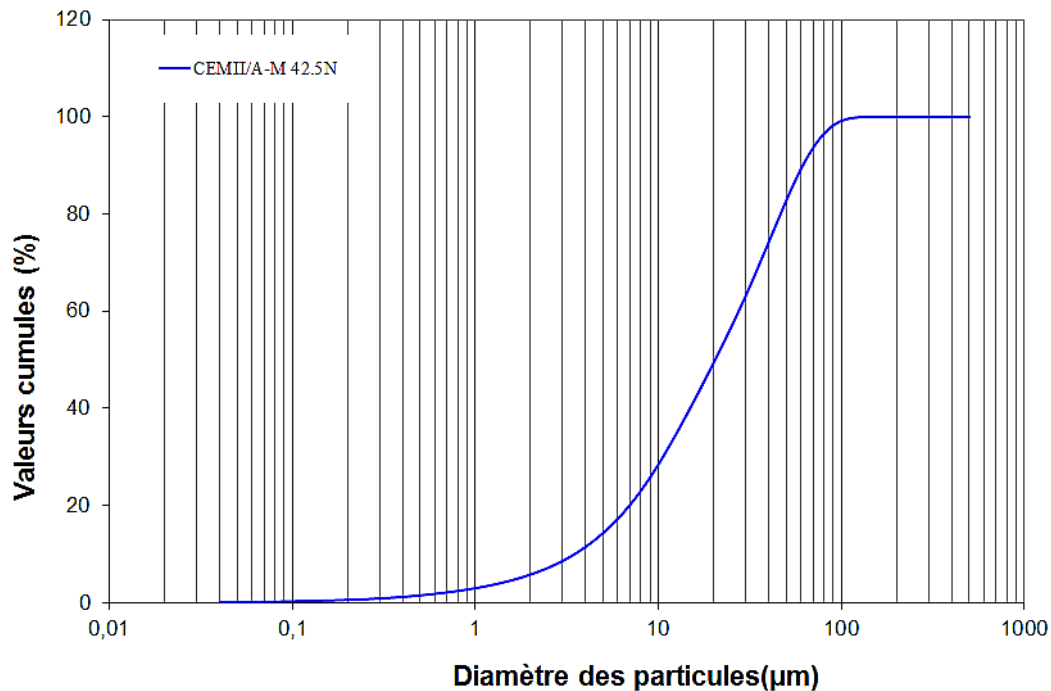


Figure II. 1. Courbe granulométrique du ciment.

II.2.2 Sable

Le sable utilisé est un sable concassé de nature calcaire provenant de la carrière d'AIN ROUA. Les propriétés physiques et l'analyse granulométrique sont présentées sur la [figure II. 2](#) et dans le [tableau II. 2](#) respectivement.

II.2.3 Gravier

❖ Gravier naturel

Les graviers proviennent de la carrière d'AIN ROUA. Trois classe granulaire sont utilisés (3/8, 8/15 et 15/25). Il s'agit d'un produit concassé issue d'une roche calcaire.

La [figure II. 2](#) et le [tableau II. 2](#) illustrent respectivement la distribution granulométrique et les propriétés mécaniques des graviers naturels.

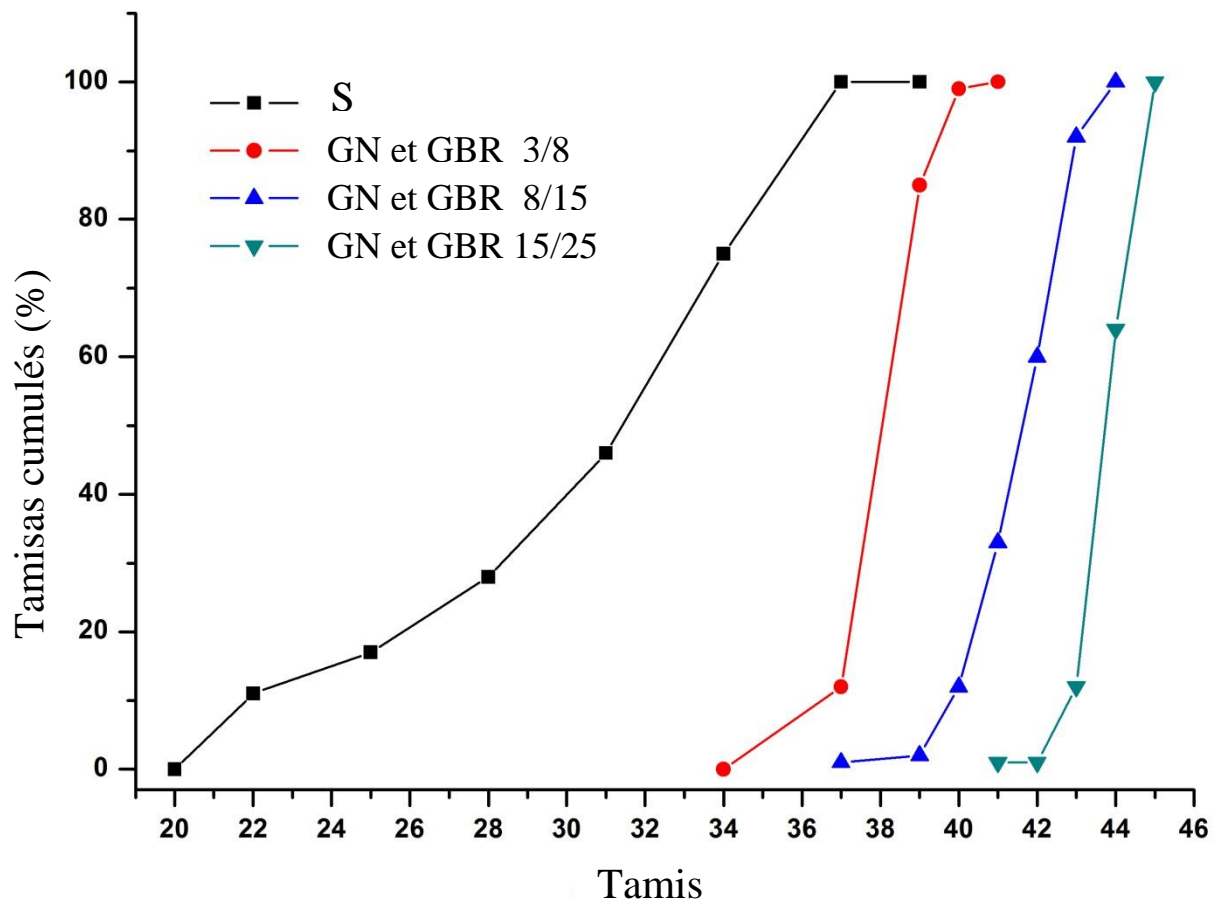


Figure II. 2. Analyse granulométrique de sable et des graviers conformément à la norme NF P18-560.

Tableau II. 2. Propriétés du sable et du gravier.

Propriétés	Norme	GN			GR			S
		4/8	8/16	16/25	4/8	8/16	16/25	0/4
Densité (kg/m ³)	NF P18-554	2630	2630	2630	2439	2407	2390	2615
Module de finesse	NF P18-598	-	-	-	-	-	-	3,23
absorption d'eau (%)	NF P18-554	0,6	0,4	0,4	4,6	5,1	5,5	1,0

❖ Gravier recyclé

Les granulats recyclés sont obtenus par concassage du béton avec un concasseur à mâchoires au niveau de la carrière de l'entreprise SNTP (Adrar Ufarnu). Le béton concassé est un béton ordinaire issu d'éprouvettes récupéré au niveau des laboratoires d'analyse des matériaux (Figure II. 3).

Après le concassage, les granulats ont été criblés de façon à avoir la même distribution granulométrique avec le gravier naturel pour éviter l'influence de la granulométrie sur les résultats.



Figure II. 3. Éprouvettes utilisées pour l'obtention du gravier recyclé.

II.2.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des différentes formulations est une eau potable qui provient du réseau de distribution.

II.3 CONSTRUCTION D'UN PLANS D'EXPERIENCE

Pour étudier l'influence de plusieurs facteurs à la fois sur les propriétés du béton, nous avons choisi la méthode des plans d'expériences.

Le plan utilisé dans ce travail est le plan composite central à l'aide d'un logiciel dédié principalement pour l'analyse des plans d'expérience **JMP Pro 13**. Le plan d'expérience régissant la présente étude est un plan à trois facteurs indépendants en l'occurrence le pourcentage de gravier recyclé, dosage en ciment et l'affaissement et chaque facteur est arrêté à deux niveaux.

La validation du plan d'expérience élaboré pour cette étude est additionné de trois points centraux qui sont appelés communément points contrôles ([Tableau II. 3](#)).

Tableau II. 3. Niveaux et valeurs réels et codés de modèle CCD.

Variables	Symbole	Unité	Niveaux de facteurs codés		
			-1	0	+1
C	X ₁	Kg/m ³	300	350	400
% GBR	X ₂	%	0	50	100
Aff	X ₃	Cm	5±1	8.5±1	12±1

Avec :

- C : ciment ;
- % GBR : pourcentage de gravier recyclé ;
- Aff : affaissement.

Le plan construit en valeurs codés et réels est illustré sur le [Tableau II. 4](#).

Tableau II. 4. Le plan d'expérience en valeurs réelles et codés.

Formulation	Variables indépendantes					
	Valeurs réelles			Valeurs codés		
	C	% GBR	Aff	X1	X2	X3
Form 1	300	0	5	-1	-1	-1
Form 2	300	0	12	-1	-1	12
Form 3	300	100	5	-1	+1	-1
Form 4	300	100	12	-1	+1	+1
Form 5	400	0	5	+1	-1	-1
Form 6	400	0	12	+1	-1	+1
Form 7	400	100	5	+1	+1	-1
Form 8	400	100	12	+1	+1	+1
Form 9	300	50	8,5	-1	0	0
Form 10	400	50	8,5	+1	0	0
Form 11	350	0	8,5	0	-1	0
Form 12	350	100	8,5	0	+1	0

Form 13	350	50	5	0	0	-1
Form 14	350	50	12	0	0	+1
Form 15	350	50	8,5	0	0	0
Form 16	350	50	8,5	0	0	0
Form 17	350	50	8,5	0	0	0

Pour déterminer les quantités des matériaux des formulations, une étude préliminaire a été réalisée sur l'une des formulations du plan expérimental à savoir la formulation (**form11**): C = 350 kg, GBR = 0% et affaissement = 8.5 ± 1 cm). Pour déterminer le rapport sable/gravier (S/G) optimal, nous avons utilisé dans un premier temps, la méthode de dreux-gorisse (Bernier, 2004) puis nous l'avons optimisée par la méthode Baron-Lesage, qui conduit à un affaissement souhaité avec le moins d'eau possible. Il convient de noter que pour éviter l'influence de la propreté et de la teneur en eau des agrégats sur l'interprétation des résultats, les graviers naturels et recyclés ainsi que le sable ont été lavés et séchés à une température de 105 °C .

Après quelques tests de mélanges, le rapport S/G optimal a été estimé à S/G = 1,7 puis celui-ci a été maintenu fixe pour toutes les autres formulations. Les quantités des autres formulations avec 100% d'agrégats naturels ont été ajustées pour que la somme des volumes soit égale à l'unité (soit 1m³), tout en conservant les mêmes rapports des classes granulaires que la formulation de référence (Form11). Le remplacement du gravier naturel par du gravier recyclé a été effectué en substituant un pourcentage de GN par son volume équivalent de GBR. L'absorption d'eau des granulats recyclés étant supérieure à celle des granulats naturels, le manque d'eau nécessaire pour atteindre l'affaissement souhaité a été pris en compte par la compensation en eau. La composition de chaque formulation produite est indiquée dans le [tableau II. 5](#).

Tableau II. 5. Proportions du mélange pour 1m³ de béton en [kg/m³].

Formulation	Composants								
	E	C	S	GN 3/8	GN 8/16	GN 16/25	GBR 3/8	GBR 8/16	GBR 16/25
Form 1	194,00	300,00	692,81	124,04	610,41	458,66	-	-	-
Form 2	212,00	300,00	675,16	117,70	579,44	434,58	-	-	-
Form 3	243,00	300,00	692,81	-	-	-	112,00	544,17	405,25
Form 4	252,00	300,00	675,16	-	-	-	109,15	530,31	394,92
Form 5	195,00	400,00	659,30	114,93	565,83	424,37	-	-	-
Form 6	218,00	400,00	640,00	111,52	549,00	411,75	-	-	-
Form 7	239,00	400,00	659,00	-	-	-	106,59	517,86	385,65
Form 8	256,00	400,00	636,75	-	-	-	102,94	500,14	372,46

Form 9	225,00	300,00	683,00	59,53	293,10	219,80	55,22	268,20	199,70
Form 10	227,00	400,00	647,54	56,44	277,87	208,40	52,35	254,31	189,39
Form 11	207,00	350,00	663,80	115,72	569,69	427,27	-	-	-
Form 12	248,00	350,00	663,80	-	-	-	107,31	521,39	388,28
Form 13	220,00	350,00	676,55	58,97	290,32	217,74	54,69	265,70	197,87
Form 14	235,00	350,00	657,97	57,09	281,06	210,79	52,94	257,23	191,56
Form 15	229,00	350,00	660,86	57,61	283,59	212,69	53,42	259,54	193,28
Form 16	229,00	350,00	660,86	57,61	283,59	212,69	53,42	259,54	193,28
Form 17	229,00	350,00	660,86	57,61	283,59	212,69	53,42	259,54	193,28

II.4 PROCEDURE EXPERIMENTALE

II.4.1 Affaissement

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams (P18-451) (Figure II. 4) permet d'évaluer la maniabilité du béton. L'essai consiste à remplir le moule tronconique en trois couches. Chaque couche est piquée 25 fois d'une manière uniforme. A la fin du remplissage, on arase la borne supérieure du moule en roulant la tige de piquage de façon à éviter le compactage supplémentaire du béton. Immédiatement, on démoule le cône en le soulevant lentement à la verticale. Ensuite, on mesure le point le plus haut du béton affaissé



Figure II. 4. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

II.4.2 Masse volumique du béton frais

L'essai de masse volumique réelle du béton frais a été réalisée suivant la norme **NF EN 12350-6**. Cette propriété permet de vérifier le rendement volumique de la formulation en le comparant à celle obtenue théoriquement. L'essai a été réalisé dans un récipient dont la capacité volumique est de 8 litres de telle sorte que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble du matériau (**Figure II. 5**). Le serrage a été réalisé au moyen d'une table vibrante jusqu'à ce que les grosses bulles d'air ne soient plus présentes à la surface du béton.

La masse volumique est la différence entre la pesée du récipient vide et plein divisé par le volume du récipient. La masse volumique, exprimée en kg/m^3 , qui doit être plus ou moins égale à la masse volumique théorique.

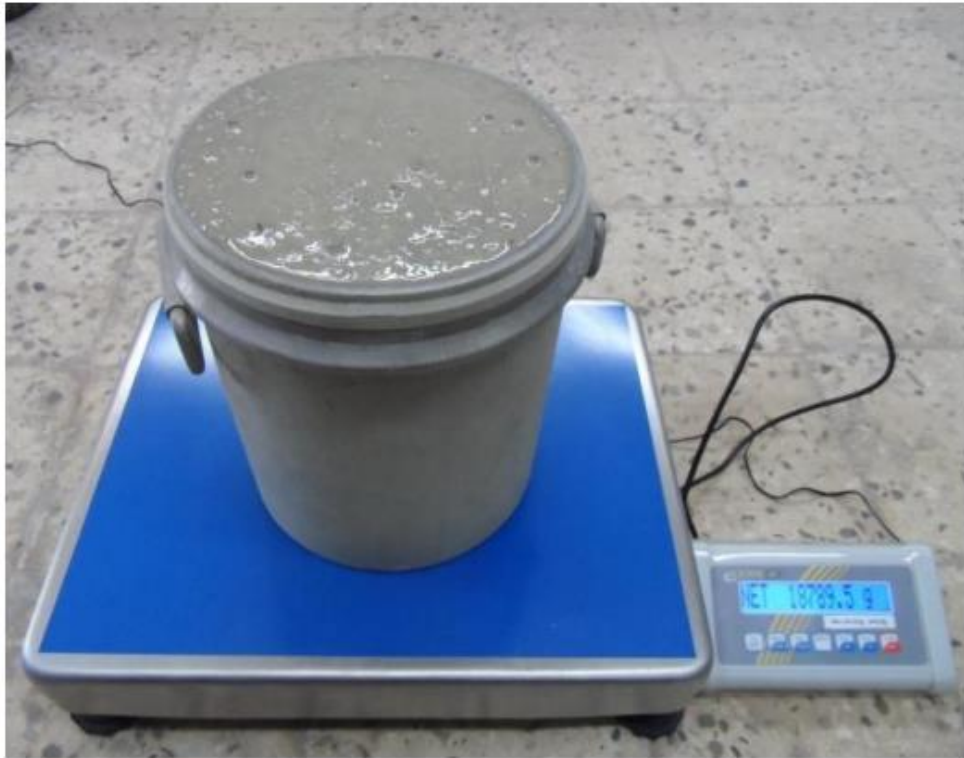


Figure II. 5. Détermination de masse volumique du béton frais.

II.4.3 Résistance à la compression

L'essai de la résistance à la compression (Figure II. 6) a été conduit suivant la norme NF EN 12390-3. L'essai a été réalisé sur des éprouvettes cubiques de dimensions $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ avec une presse hydraulique de capacité 2000 KN.

Après démoulage. Les éprouvettes ont été mise en cure dans l'eau à une température ($T=20^\circ\text{C}$) jusqu'à l'âge de l'écrasement (7, 28 et 56 jours).

Le résultat obtenu est la moyenne des résistances des trois éprouvettes pour chaque formulation à l'âge de l'essai.



Figure II. 6. Essai de la résistance à la compression.

II.4.4 Traction par fendage

L'essai de traction par fendage (essai brésilien) a été réalisé suivant la norme [NF EN 12390-6](#) sur des éprouvettes de dimensions $16 \times 32 \text{ cm}^2$ ([Figure II. 7](#)).



Figure II. 7. Essai de traction par fendage (essai brésilien).

L'éprouvette et les bandes de chargement ont été maintenues entre les plateaux de la presse à l'aide du gabarit de centrage (avec un centrage de 0,5mm près).

Une charge a été appliquée le long de la génératrice du cylindre avec une vitesse de chargement, égale à 10 daN/seconde, maintenue constante pendant toute la durée de l'essai. À partir de la charge maximale enregistrée au cours de l'essai, on calcule la résistance correspondante B en méga-pascals, par la relation suivante :

$$B = 067 \times \frac{F}{a \times h} \quad (\text{Eq.II.1})$$

Avec :

- F : charge maximale (KN) ;
- a : diamètre de l'éprouvette ;
- h : hauteur de l'éprouvette.

II.4.5 Vitesse d'impulsion ultrasonique

La mesure de la vitesse des ondes ultrasonores (VIU) a été effectuée d'une manière directe. La technique consiste à envoyer des ondes ultrasonores dans un matériau à l'aide d'un

générateur d'ondes ultrasonores relié à un capteur émetteur et un capteur récepteur (Figure II. 8). La vitesse ultrasonore directe est calculée par la moyenne de trois mesures effectuées dans les trois axes des faces opposées pour chaque éprouvette. De la vaseline a été appliqué sur la surface afin de faire joint entre les deux surfaces de contact.



Figure II. 8. Essai de l'ultrason.

Le temps de propagation des ondes ultrasonores dans le béton, noté T en μs , s'affiche sur l'écran de l'appareil. À partir du temps mesuré, la vitesse ultrasonore, notée V en m/s , est calculée pour chaque mesure par la relation suivante :

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{Eq.II.2})$$

Avec : L étant la distance considérée entre émetteur et récepteur.

II.5 CONCLUSION

Ce deuxième chapitre porte sur la présentation et la caractérisation de différents matériaux utilisés, ainsi que sur le protocole expérimental et sur les différents essais réalisés dans le cadre de cette thèse à l'instar de l'affaissement, de la masse volumique, l'essai de la résistance à la compression, l'essai de la traction par fendage et de l'ultrason.

III

Chapitre

Résultats et discussion

III.1 INTRODUCTION

La méthode des surfaces de réponse (MSR) et les réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été utilisés pour étudier les effets des paramètres du mélange sur les propriétés du béton. Ces techniques nous ont permis de déterminer une relation d'approximation et de prédiction entre les variables d'entrée (pourcentage de recyclé, dosage en ciment et l'affaissement) et les réponses de sortie à savoir la quantité d'eau utilisée pour avoir l'affaissement désiré, la masse volumique du béton, la résistance à la compression, la résistance à la traction et vitesse d'impulsion ultrasonique. Cette relation entre les paramètres indépendants et ceux dépendants est formulée par un polynôme de second degré et une fonction sigmoïdale en utilisant le plan d'expérience et réseaux de neurones artificielles respectivement. Ces équations permettront de prédire les réponses souhaitées.

III.2 AFFAISSEMENT

Dans notre étude, l'affaissement constitue l'un des facteurs contrôlable. Chaque formulation Le [tableau III. 1](#) montre les quantités de l'eau ajoutée pour atteindre les l'affaissement désiré. Toutefois, l'affaissement diminue lors de remplacement des GNs par des GBRs en raison de l'absorption élevée des GBRs.

Tableau III. 1. Quantité d'eau ajoutée pour atteindre l'affaissement désiré.

formulations	Valeurs réelles			E [kg/m ³]	E _a [kg/m ³]	E _t [kg/m ³]
	C [kg/m ³]	% GBR	Aff [cm]			
Form 1	300	0	5	194,00	0	194,00
Form 2	300	0	12	212,00	0	212,00
Form 3	300	100	5	194,00	49	243,00
Form 4	300	100	12	212,00	40	252,00
Form 5	400	0	5	195,00	0	195,00
Form 6	400	0	12	218,00	0	218,00
Form 7	400	100	5	195,00	44	239,00
Form 8	400	100	12	218,00	38	256,00
Form 9	300	50	8,5	204,00	21	225,00
Form 10	400	50	8,5	207,00	20	227,00
Form 11	350	0	8,5	207,00	0	207,00
Form 12	350	100	8,5	207,00	41	248,00
Form 13	350	50	5	194,00	26	220,00
Form 14	350	50	12	216,00	19	235,00
Form 15	350	50	8,5	207,00	22	229,00
Form 16	350	50	8,5	207,00	22	229,00
Form 17	350	50	8,5	207,00	22	229,00

Pour bien comprendre l'influence des différents facteurs sur l'affaissement du béton et prédire la quantité d'eau nécessaire pour atteindre l'affaissement souhaité. Nous avons modélisé la quantité d'eau total (E_t) par les deux méthodes MSR et RNA.

III.2.1 Modélisation de l'affaissement par surface de réponse (MSR)

L'application de MSR offre, sur la base de l'estimation des paramètres, l'équation Eq. III.1 entre la quantité d'eau (Y_{E_t}) et les variables indépendantes étudiées.

$$Y_{E_t} = 228,30 + 0,90X_1 + 21,2X_2 + 8,20X_3 - 0,88X_1X_2 + 1,63X_1X_3 - 1,87X_2X_3 - 1,77X_1^2 - 0,27X_2^2 - 0,27X_3^2 \quad (\text{Eq.III.1})$$

Le [tableau III. 2](#) et la [figure III.1](#) montrent les quantités d'eau expérimentales et prédites (E_t) par MSR pour chaque formulation afin d'atteindre l'affaissement souhaité. Indépendamment de l'analyse statistique, les valeurs prédites proches des quantités réelles montrent que la méthode MSR est efficace pour la prédiction de (E_t).

Tableau III. 2. Quantités d'eau réelles et prédite par la méthode MSR.

Formulation	E_t [kg/m ³]		
	Expérimentale	Prédite	Erreur absolue
Form 1	194,00	194,57	0,57
Form 2	212,00	211,47	0,53
Form 3	243,00	242,47	0,53
Form 4	252,00	251,87	0,13
Form 5	195,00	194,87	0,13
Form 6	218,00	218,27	0,27
Form 7	239,00	239,27	0,27
Form 8	256,00	255,17	0,83
Form 9	225,00	225,63	0,63
Form 10	227,00	227,43	0,43
Form 11	207,00	206,83	0,17
Form 12	248,00	249,23	1,23
Form 13	220,00	219,83	0,17
Form 14	235,00	236,23	1,23
Form 15	229,00	228,29	0,71
Form 16	229,00	228,29	0,71
Form 17	229,00	228,29	0,71

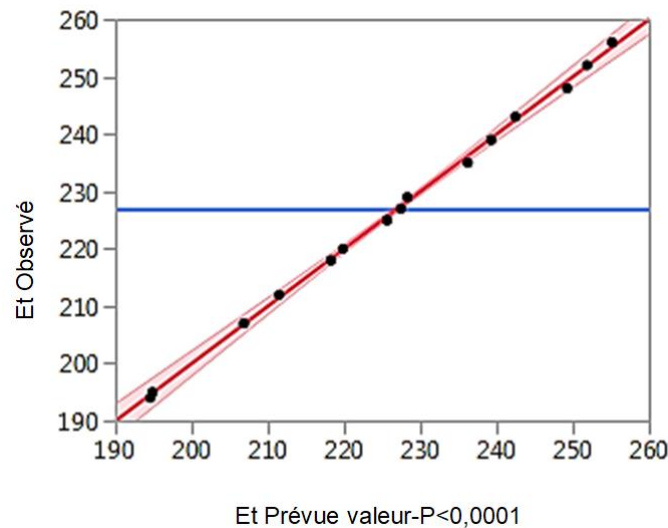


Figure III. 1. Comparaison entre les quantités d'eau (E_t) réelles et prédites avec la méthode MSR.

L'adéquation et la finesse du modèles a été testé par analyse de la variance (ANOVA), et les résultats ont indiqué que l'équation représentait adéquatement la relation réelle entre les variables indépendantes et les réponses (Tableau III. 3). Les résultats ANOVA pour E_t montrent une valeur $p < 0,0001$, ce qui signifie que le modèle est très significatif. Le coefficient de détermination (R^2) et $R^2_{\text{ajusté}}$ ont été calculés pour vérifier l'adéquation et finesse du modèle. La valeur de R^2 a été calculée à 0,99987 ce qui implique que plus 95% des données expérimentales étaient compatibles. L'utilisation de $R^2_{\text{ajusté}}$ permet d'évaluer l'adéquation et la pertinence du modèle. La valeur $R^2_{\text{ajusté}}$ corrige la valeur R^2 pour la taille de l'échantillon et pour le nombre de termes dans le modèle. La valeur de $R^2_{\text{ajusté}}$ qui est de l'ordre de 0.9970 est également élevée pour soutenir une signification élevée du modèle.

L'analyse ANOVA (Tableau III. 3) montre que les coefficients des paramètres étudiés sont significatifs, tandis que, les paramètres linéaires X_2 et X_3 sont hautement significatifs avec une valeur $p < 0,0001$. Cela est dû à la porosité élevée des GBR et la variation de l'affaissement de 5 cm à 12 cm pour le paramètre X_2 le paramètre X_3 respectivement.

Tableau III. 3. Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) du PCC.

	DL	E_t [kg/m^3]		
		Sc	Rapport-F	Valeur p
Modèle	9	5248,04	591,48	< 0,0001
X_1	1	8,100	8,22	0,0241
X_2	1	4494,400	4558,84	<0,0001
X_3	1	672,400	682,04	<0,0001
$X_1 X_2$	1	6,125	6,21	0,0414

$X_1 X_3$	1	21,125	21,43	0,0024
$X_2 X_3$	1	28,125	28,53	0,0011
X_1^2	1	8,371	8,49	0,0225
X_2^2	1	0,192	0,19	0,6724
X_3^2	1	0,192	0,19	0,6724
Résidus	7	6,901		
Défaut d'ajustement	5	6,901	0,00	>0,0000
Erreur pure	2	0,000		
R^2		0,9999		
R^2 ajusté		0,9970		
REQM		0,9929		
Total Corrigé	16	5254,94		

REQM: racine de l'erreur quadratique moyenne DL: degré de liberté

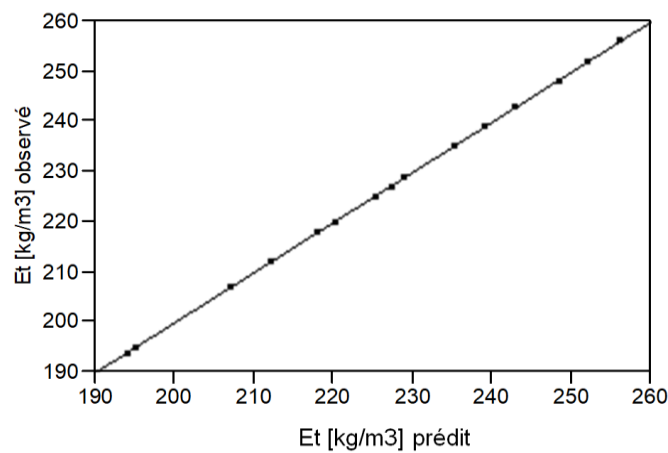
III.2.2 Modélisation de l'affaïssement par réseaux de neurone artificiels (RNA)

Les résultats obtenus à partir de la modélisation mathématique des essais expérimentaux de Et sont prédits à l'aide des équations (Eqs. III.2 - III.6) et ils sont présentés sur la [figure III. 2](#) et le [tableau III. 4](#). Plusieurs chercheurs dans leurs études à savoir : ([Demir, 2008](#); [Duan et al., 2013](#); [Łukasz et al., 2019](#)) ont utilisé des techniques d'intelligence artificielle pour prédire avec succès les propriétés du béton. Cependant, aucun d'entre eux n'a présenté une équation utilisable en pratique. Dans tous les cas, il est nécessaire d'utiliser un logiciel spécifique pour exécuter la méthode RNA et estimer les propriétés du matériau. Dans notre étude, comme le montre les équations (Eqs. III.2 - III.6), elles peuvent être utilisées avec des outils informatiques simples, sous forme de feuille de calcul (Excel, par exemple), en considérant les plages des variables présentées dans le [tableau III. 4](#), pour calculer la repense.

Les résultats obtenus par la méthode RNA comme le montre le [tableau III. 4](#) semble être très proche des valeurs expérimentales. Cette convergence entre les valeurs expérimentales et les valeurs obtenues par la méthode des réseaux de neurones nous permet de dire que la méthode des RNA est très efficace pour la prédiction des réponses.

Tableau III. 4. Quantité d'eau réelle et prédite par la méthode RNA.

Formulation	E _t [kg/m ³]		
	Expérimentale	Prédite	Erreur absolue
Form 1	194,00	193,97	0,03
Form 2	212,00	212,05	0,05
Form 3	243,00	242,88	0,12
Form 4	252,00	251,95	0,05
Form 5	195,00	195,07	0,07
Form 6	218,00	217,90	0,10
Form 7	239,00	238,90	0,10
Form 8	256,00	255,88	0,12
Form 9	225,00	225,15	0,15
Form 10	227,00	227,20	0,20
Form 11	207,00	207,04	0,04
Form 12	248,00	248,33	0,33
Form 13	220,00	220,09	0,09
Form 14	235,00	235,15	0,15
Form 15	229,00	228,82	0,18
Form 16	229,00	228,82	0,18
Form 17	229,00	228,82	0,18

**Figure III. 2.** Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites avec RNA de E_t

$$E_t = (((-1,048) + (1,515 * H1) - (0,956 * H2) + (1,988 * H3) - (1,541 * H4)) * 18,123) + 226,941 \quad (\text{Eq.III.2})$$

$$H1 = 1/(1 + \text{EXP}(-((1,637) - 0,806 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) + 0,849 * \left(\frac{\%GBR - 50}{39,528}\right) + 0,935 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.3})$$

$$H2 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-0,165) + 0,133 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) + 0,706 * \left(\frac{\%GBR - 50}{39,528}\right) - 1,631 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))))) \quad (\text{Eq.III.4})$$

$$H3 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-0,372) - 0,025 * ((C - 350)/39,528) + 1,567 * ((\%GBR - 50)/39,528) - 0,229 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))))) \quad (\text{Eq.III.5})$$

$$H4 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-1,010) - 0,893 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) - 1,020 * ((\%GBR - 50)/39,528) + 0,176 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))))) \quad (\text{Eq.III.6})$$

III.2.3 Validation et comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA

Une analyse statistique des paramètres de performance tels que le R carré (R^2), R carré ajusté ($R^2_{\text{ajusté}}$), écart relatif en pourcentage (ERP), erreur quadratique moyenne (EQM) et racine de erreur quadratique moyenne (REQM), ont été calculé par les équations présentées dans le [tableau III. 5](#). Les résultats de l'analyse statistique et de la comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA sont présentés aussi dans le [tableau III. 5](#).

Tableau III. 5. Comparaison des performances de la méthodologie de surface de réponse et des réseaux de neurones artificiels.

Équations de performance	Et [Kg/m ³]	
	MSR	RNA
$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_i)^2}$	0,9987	0,9999
$R^2_{\text{Ajusté}} = 1 - \left[(1 - R^2) * \frac{N - 1}{N - k - 1} \right]$	0,9970	0,9998
$\text{ERP} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_{i.\text{préd}} - Y_{i.\text{exp}}}{Y_{i.\text{exp}}} \right)$	0,00114	0,00096
$\text{EQM} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i.\text{préd}} - Y_{i.\text{exp}})^2}{N}$	0,4078	0,0212
$\text{REQM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i.\text{exp}} - Y_{i.\text{préd}})^2}{N}}$	0,6386	0,1734

REQM: racine de erreur quadratique moyenne ; EQM: erreur quadratique moyenne; ERP: écart relatif en pourcentage.

Les résultats obtenus montrent que le modèle RNA est plus performant que le modèle MSR. Bien que les valeurs des R^2 et $R^2_{ajusté}$ des deux méthodes MSR et RNA sont très proches, mais une légère supériorité du R^2 et $R^2_{ajusté}$ de la méthode RNA et observé par rapport à la méthode MSR avec des valeurs de (0,9999 ; 0,9998) et (0,9987 ; 0,9970) respectivement. Le [tableau III. 5](#) montre également que les valeurs de ERP ; EQM et REQM pour la méthode RNA sont nettement inférieure par rapport à la méthode MSR, ce qui implique que l'erreur de prédiction de la méthode RNA est minime par rapport à la méthode MSR.

Les résidus des méthodes MSR et RNA sont illustrés sur la [figure III. 3](#). La [figure III. 3](#) montre que la fluctuation des résidus est relativement faible. Cependant, la distribution des résidus de modèle RNA est relativement plus faible et régulières par rapport à MSR. indiquant que le modèle RNA a une capacité de modélisation plus élevée que le modèle MSR pour la prédiction de la quantité d'eau totale Et.

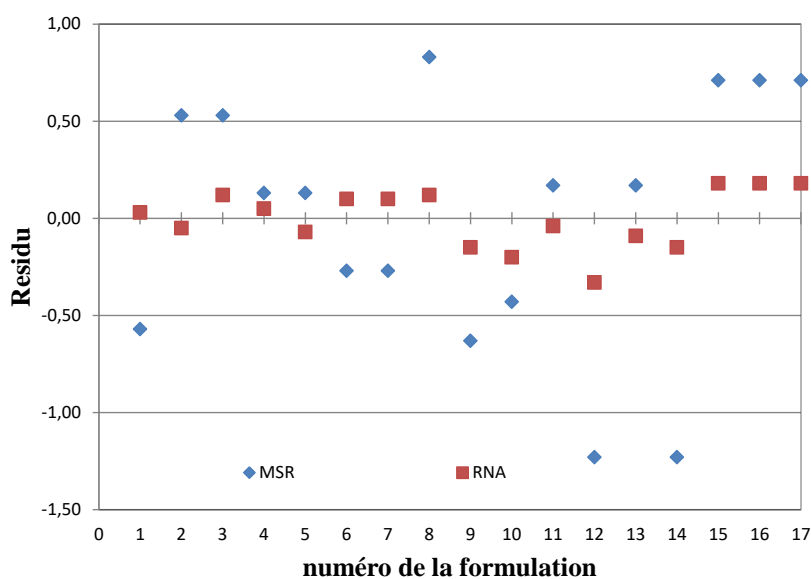


Figure III. 3. Comparaison entre la distribution des erreurs résiduelles obtenue par les deux modèles MSR et RNA.

III.3 MASSE VOLUMIQUE

Les masses volumiques du béton frais des différentes formulations sont rapportées dans le [tableau III. 6](#).

Tableau III. 6. Masse volumique du béton frais.

formulations	Valeurs réelles			M _v [kg/m ³]
	C [kg/m ³]	% GBR	Aff [cm]	
Form 1	300	0	5	2443
Form 2	300	0	12	2411

Form 3	300	100	5	2427
Form 4	300	100	12	2411
Form 5	400	0	5	2402
Form 6	400	0	12	2369
Form 7	400	100	5	2379
Form 8	400	100	12	2355
Form 9	300	50	8,5	2388
Form 10	400	50	8,5	2392
Form 11	350	0	8,5	2335
Form 12	350	100	8,5	2355
Form 13	350	50	5	2388
Form 14	350	50	12	2330
Form 15	350	50	8,5	2337
Form 16	350	50	8,5	2314
Form 17	350	50	8,5	2321

Les valeurs montrent une diminution de la masse volumique des formulations contenant des GBR par rapport aux formulations avec 100% des GN et cette diminution est due à la masse volumique des GBR qui est inférieure à celle des GN.

III.3.1 Modélisation de la masse volumique par surface de réponse (MSR)

La construction du modèle sur la base de l'estimation des paramètres donne la relation empirique (Eq. III.5) entre la masse volumique (Y_{Mv}) et les variables indépendantes étudiées.

$$Mv = 2334,45 - 18,3X_1 - 3,3X_2 - 16,3X_3 - 2,63X_1 X_2 - 1,125X_1 X_3 + 3,125X_2 X_3 + 47,71X_1^2 + 2,71X_2^2 + 16,71X_3^2 \quad (\text{Eq.III.5})$$

Le [tableau III. 7](#) illustre les masses volumiques prédites (M_v) par la méthode MSR pour chaque formulation. Les valeurs montrent des légers écarts entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. La [figure III. 4](#) montre clairement ces écarts légers entre les valeurs prédites et réelles.

Tableau III. 7. Masse volumique réels et prédite par la méthode MSR.

Formulation	Mv [kg/m ³]		
	Expérimentale	Prédite	Erreur absolue
Form 1	2443	2439	4
Form 2	2411	2402	9
Form 3	2427	2431	4
Form 4	2411	2407	4
Form 5	2402	2409	7
Form 6	2369	2368	1
Form 7	2379	2391	12
Form 8	2355	2369	14

Form 9	2388	2400	12
Form 10	2392	2369	23
Form 11	2335	2340	5
Form 12	2355	2333	22
Form 13	2388	2367	21
Form 14	2330	2334	4
Form 15	2337	2334	3
Form 16	2314	2334	20
Form 17	2321	2334	13

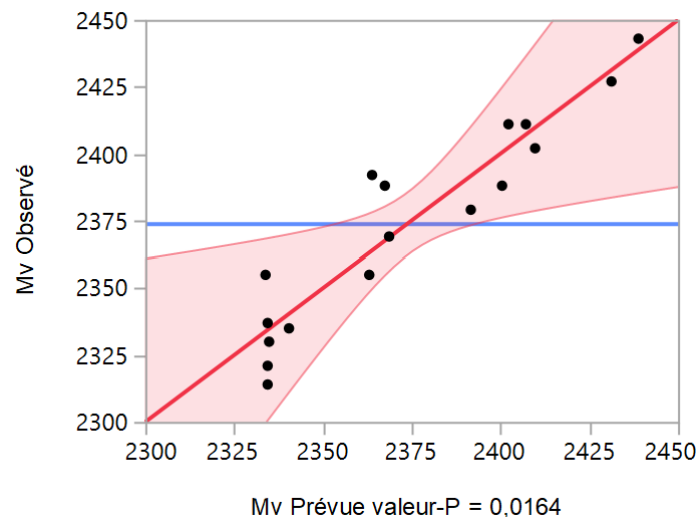


Figure III. 4. Comparaison entre les masses volumiques (M_v) réelles et prédites par la méthode MSR.

Les résultats ANOVA, présentés dans la [figure III. 4](#), montrent une valeur $p = 0,0164$ du modèle mathématique de la masse volumique (M_v), ce qui signifie que le modèle est très significatif et. Le coefficient de détermination R^2 et $R^2_{\text{ajusté}}$ ont été calculés pour vérifier l'adéquation et la finesse du modèle. La valeur de R^2 a été calculée à 0,8788 ce qui implique que plus 85% de la variation de la M_v est due aux paramètres étudiés. L'utilisation de $R^2_{\text{ajusté}}$ permet d'évaluer l'adéquation et la pertinence du modèle. La valeur $R^2_{\text{ajusté}}$ corrige la valeur R^2 pour la taille de l'échantillon et pour le nombre de coefficients dans le modèle. La valeur de $R^2_{\text{ajusté}}$ qui est de l'ordre de 0,7229 est également élevée pour soutenir une signification du modèle.

Tableau III. 8. Analyse de la variance (ANOVA) et statistique de modèle de régression complète pour les résultats expérimentaux.

	DL	Mv [kg/m ³]		
		Sc	Rapport-F	Valeur p
Modèle	9	18898,465	31,83	0,0164
X ₁	1	3348,90	8,12	0,0247
X ₂	1	108,9	0,26	0,6232
X ₃	1	2656,9	6,44	0,0388
X ₁ X ₂	1	55,125	0,13	0,7255
X ₁ X ₃	1	10,125	0,02	0,8799
X ₂ X ₃	1	78,125	0,18	0,6765
X ₁ ²	1	6098,94	14,79	0,0063
X ₂ ²	1	19,69	0,05	0,8332
X ₃ ²	1	748,22	1,81	0,2200
Résidus	7	2886,77		
Défaut d'ajustement	5	2608,77	3,75	0,2236
Erreur pure	2	278,00		
R ²		0,8788		
R ² ajusté		0,7229		
REQM		0,9929		
Total Corrigé	16	21785,235		

REQM: racine de l'erreur quadratique moyenne DL: degré de liberté

III.3.2 Modélisation de la masse volumique par réseaux de neurone artificiels (RNA).

Les résultats expérimentaux et prédites en utilisant la méthode RNA, pour Mv, sont présentés et illustrés sur le [tableau III. 9](#) et la [figure III. 5](#). Les valeurs prédites sont calculées avec les équations Eq.III.6 à Eq.III.10.

Tableau III. 9. Masse volumique Mv prédite par la méthode RNA.

Formulation	Mv [kg/m ³]		
	Expérimentale	Prédite	Erreur absolue
Form 1	2443	2443	0
Form 2	2411	2411	0
Form 3	2427	2427	0
Form 4	2411	2411	0
Form 5	2402	2402	0
Form 6	2369	2369	0
Form 7	2379	2379	0
Form 8	2355	2355	0
Form 9	2388	2388	0

Form 10	2392	2392	0
Form 11	2335	2335	0
Form 12	2355	2355	0
Form 13	2388	2388	0
Form 14	2330	2329	1
Form 15	2337	2324	13
Form 16	2314	2324	10
Form 17	2321	2324	3

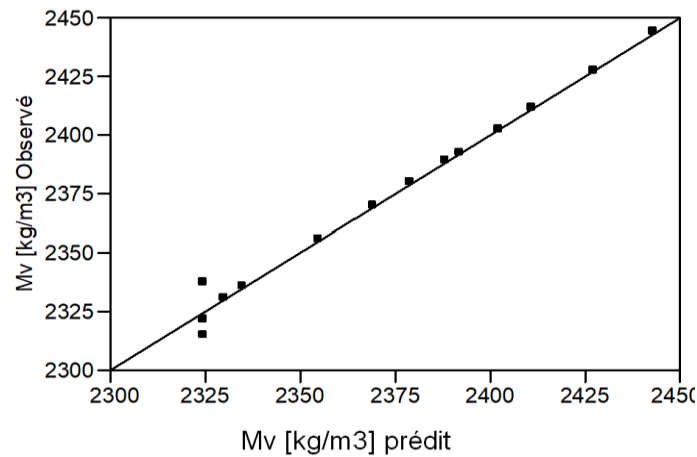


Figure III. 5. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de M_v avec RNA.

$$M_v = (((2,673) + (1,910 * H1) - (2,046 * H2) - (2,551 * H3) - (3,639 * H4)) * 38,580) + 2373,94 \quad (\text{Eq.III.6})$$

$$H1 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-0,792) - 0,269 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) - 1,887 * \left(\frac{\%GBR - 50}{39,528}\right) - 0,353 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.7})$$

$$H2 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-1,133) + 1,403 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) + 1,155 * \left(\frac{\%GBR - 50}{39,528}\right) + 1,817 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.8})$$

$$H3 = 1/(1 + \text{EXP}(-((1,334) - 1,867 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) - 0,864 * \left(\frac{\%GBR - 50}{39,528}\right) + 2,120 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))))) \quad (\text{Eq.III.9})$$

$$H4 = 1/(1 + \text{EXP}(-((1,619) + 2,952 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) - 0,052 * ((\%GBR - 50)/39,528) + 0,509 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))))) \quad (\text{Eq.III.10})$$

III.3.3 Validation et comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA

Les résultats de l'analyse statistique et de comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA sont énumérés dans [tableau III. 10](#).

Ils montrent que le modèle RNA est plus performant que le modèle MSR, indiquant que le modèle RNA a une capacité de modélisation plus élevée que les modèles MSR pour la prédiction de la masse volumique M_v .

Tableau III. 10. Comparaison des performances de la méthodologie de surface de réponse et des réseaux de neurones artificiels.

Performance equation	M_v [kg/m ³]	
	MSR	RNA
$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_i)^2}$	0,8788	0,9883
$R^2_{Aju} = 1 - \left[(1 - R^2) * \frac{N - 1}{N - k - 1} \right]$	0,7229	0,9729
$ERP = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_{i.pred} - Y_{i.exp}}{Y_{i.exp}} \right)$	0,00305	0,00029
$EQM = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i.pred} - Y_{i.exp})^2}{N}$	412,3986	23,1832
$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i.exp} - Y_{i.pred})^2}{N}}$	20,3076	4,8149

REQM: racine de erreur quadratique moyenne ; EQM: erreur quadratique moyenne; ERP: écart relatif en pourcentage.

Les résultats obtenus ([Tableau III. 10](#)) montrent que le modèle RNA est plus performant que le modèle MSR. Avec des valeurs des R^2 et $R^2_{ajusté}$ égale à (0,9883 ; 0,9720) pour la méthode MSR et (0,8788 ; 0,7229) pour la méthode RNA. ([Tableau III. 10](#)) montre également

que les valeurs de ERP ; EQM et REQM pour la méthode RNA sont nettement inférieure par rapport à la méthode MSR

. Les résultats présentés sur la [figure III. 6](#) montrent que les fluctuations des résidus sont relativement grandes pour la méthode MSR. Par contre, celles obtenues par la méthode MSR sont relativement faible et régulières.

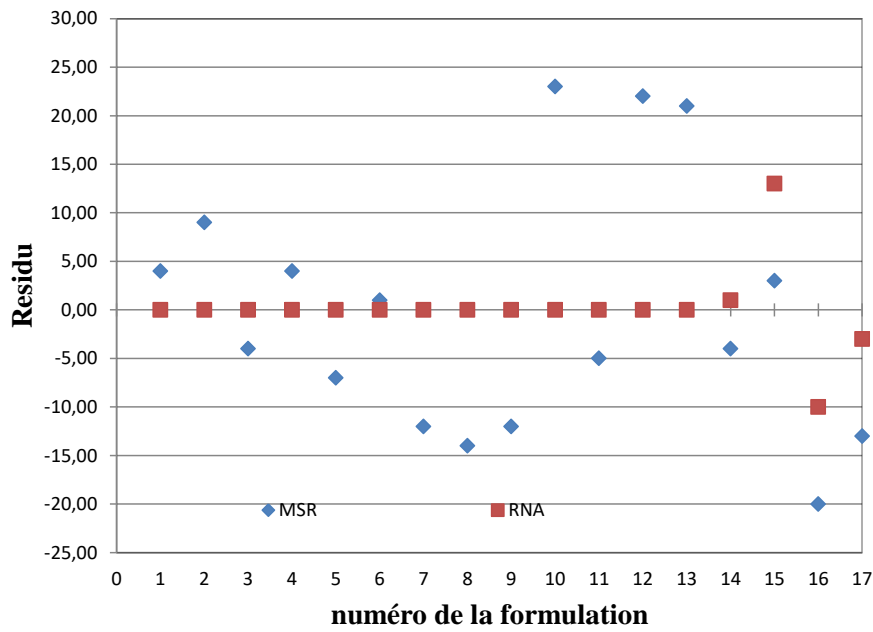


Figure III. 6. Comparaison entre la distribution des erreurs résiduelles obtenue par les modèles RSM et ANN.

III.4 RESISTANCE A LA COMPRESSION

III.4.1 Modélisation de la résistance à la compression par surface de réponse (MSR)

Le [tableau III. 11](#) montre les résultats expérimentaux de la résistance à la compression obtenus à 7 ; 28 et 56 jours de l'écrasement, ainsi que les résultats obtenus par la méthode MSR

Tableau III. 11. Résultats des résistances à la compression réelles et prédites par la méthode MSR.

Formulation	Fc [MPa] (7 jours)			Fc [MPa] (28 jours)			Fc [MPa] (56 jours)		
	Exp	Pré	Err abs	Exp	Pré	Err abs	Exp	Pré	Err abs
Form 1	21,10	20,94	0,16	30,64	31,12	0,48	36,47	36,16	0,31
Form 2	17,10	17,54	0,44	26,45	26,42	0,03	31,87	31,27	0,60
Form 3	15,98	16,55	0,43	25,21	25,23	0,02	28,61	28,50	0,11
Form 4	15,00	15,23	0,23	23,42	24,04	0,62	28,04	28,29	0,25
Form 5	33,16	33,13	0,03	49,41	49,00	0,41	53,23	52,92	0,31
Form 6	28,04	27,67	0,37	41,51	41,71	0,20	45,46	45,51	0,05
Form 7	25,52	25,27	0,25	37,94	38,20	0,26	40,10	40,64	0,54

Form 8	21,53	21,89	0,36	34,68	34,42	0,26	37,66	37,92	0,26
Form 9	16,83	15,75	1,08	25,89	24,79	1,10	28,52	29,28	0,76
Form 10	24,88	25,17	0,29	38,71	38,92	0,21	43,02	42,48	0,54
Form 11	22,62	22,74	0,91	34,91	34,66	0,25	37,77	38,94	1,17
Form 12	18,56	17,65	0,91	28,70	28,06	0,64	32,26	31,31	0,95
Form 13	21,23	21,10	0,13	34,67	34,30	0,37	38,06	38,24	0,18
Form 14	18,36	17,70	0,66	30,59	30,06	0,53	34,40	34,44	0,04
Form 15	18,60	18,88	0,22	30,86	30,82	0,04	34,69	34,85	0,16
Form 16	17,86	18,88	1,02	29,26	30,82	1,56	34,80	34,85	0,05
Form 17	18,60	18,88	0,28	30,55	30,82	0,27	35,49	34,85	0,36

Rc: Résistances à la compression ; Exp: Expérimentale ; Pré: Prédite ; Err abs: Erreur absolue

L'équation polynomiale du second ordre a été utilisée pour exprimer les réponses en employant les résultats expérimentaux obtenus sur la base du plan expérimental (PCC). Les équations finales obtenues en termes de facteurs codés pour le Fc7; Fc28 et Fc56 sont respectivement donnés par les équations (Eq.III.11), (Eq.III.12) et (Eq.III.13).

$$Y_{Fc7} = 18,88 + 4,71X_1 - 2,54X_2 - 1,69X_3 - 0,86X_1 X_2 - 0,51X_1 X_3 + 0,52X_2 X_3 + 1,57X_1^2 + 1,31X_2^2 + 0,51X_3^2 \quad (\text{Eq.III.11})$$

$$Y_{Fc28} = 30,87 + 7,26X_1 - 3,50X_2 - 3,32X_3 - 0,98X_1 X_2 - 0,40X_1 X_3 - 0,63X_2 X_3 + 0,94X_1^2 + 0,45X_2^2 + 1,27X_3^2 \quad (\text{Eq.III.12})$$

$$Y_{Fc56} = 34,78 + 6,80X_1 - 3,81X_2 - 2,30X_3 - 0,91X_1 X_2 - 0,38X_1 X_3 + 1,17X_2 X_3 + 0,91X_1^2 + 0,15X_2^2 + 1,37X_3^2 \quad (\text{Eq.III.13})$$

Le **tableau III. 12** montre les résultats de l'analyse de variance ANOVA pour le modèle d'ajustement obtenu. Les résultats de l'ANOVA indiquent que les équations représentent adéquatement la relation réelle entre les variables indépendantes et les réponses.

Tableau III. 12. Analyse de la variance (ANOVA) et statistiques des modèles de régression complète pour les résultats expérimentaux.

	DL	7 jours			28 jours			56 jours		
		Sc	Rapport-F	Valeur p	Sc	Rapport-F	Valeur p	Sc	Rapport-F	Valeur p
Modèle	9	358,31	59,49	< 0,0001	736,33	64,36	< 0,0001	736,33	77,70	< 0,0001
X ₁	1	221,75	331,12	<0,0001	527,66	415,20	<0,0001	527,66	463,47	<0,0001
X ₂	1	64,52	96,44	<0,0001	122,29	96,20	<0,0001	122,29	145,90	<0,0001
X ₃	1	28,66	42,90	0,0003	53,92	42,41	0,0003	53,92	53,27	0,0002
X ₁ X ₂	1	5,95	8,95	0,0205	7,68	6,04	0,0436	7,68	6,58	0,0373
X ₁ X ₃	1	2,10	3,18	0,1199	1,26	0,99	0,3519	1,26	1,16	0,3173

X ₂ X ₃	1	2,12	3,17	0,1184	3,18	2,50	0,1580	3,18	10,99	0,0129
X ₁ ²	1	6,62	9,87	0,0163	2,37	1,86	0,2144	2,37	2,21	0,1806
X ₂ ²	1	4,57	6,82	0,0348	0,53	0,42	0,5384	0,53	0,062	0,8105
X ₃ ²	1	0,70	1,05	0,3404	4,33	3,40	0,1076	4,33	5,02	0,0600
Résidus	7	4,69			5,59			5,59		
Défaut d'ajustement	5	4,33	4,74	>0,1833	7,46	2,07	>0,3568	7,46	1,29	>0,4906
Erreur pure	2	0,37			1,44			1,44		
R ²		0,9871			0,9881			0,9881		
R ² _{ajusté}		0,9705			0,9727			0,9727		
REQM		0,8187			1,1275			1,1275		
Total Corrigé	16	363,00			745,23			745,23		

Sc: Somme des carrés ; REQM: racine de erreur quadratique moyenne ; DL : degré de liberté

Les résultats de l'ANOVA pour (Fc7; Fc28 et Fc56) montrent une valeur $p < 0,0001$, ce qui implique que le modèle est hautement significatif. Les coefficients de détermination (R^2) et les coefficients ajustés ($R^2_{\text{ajusté}}$) ont été calculés pour vérifier l'adéquation et la fitness du modèle. Les valeurs de (R^2) et ($R^2_{\text{ajusté}}$) sont proches de 1, ce qui implique également qu'il existe une excellente corrélation entre les valeurs prédites et expérimentales (Figure III. 7).

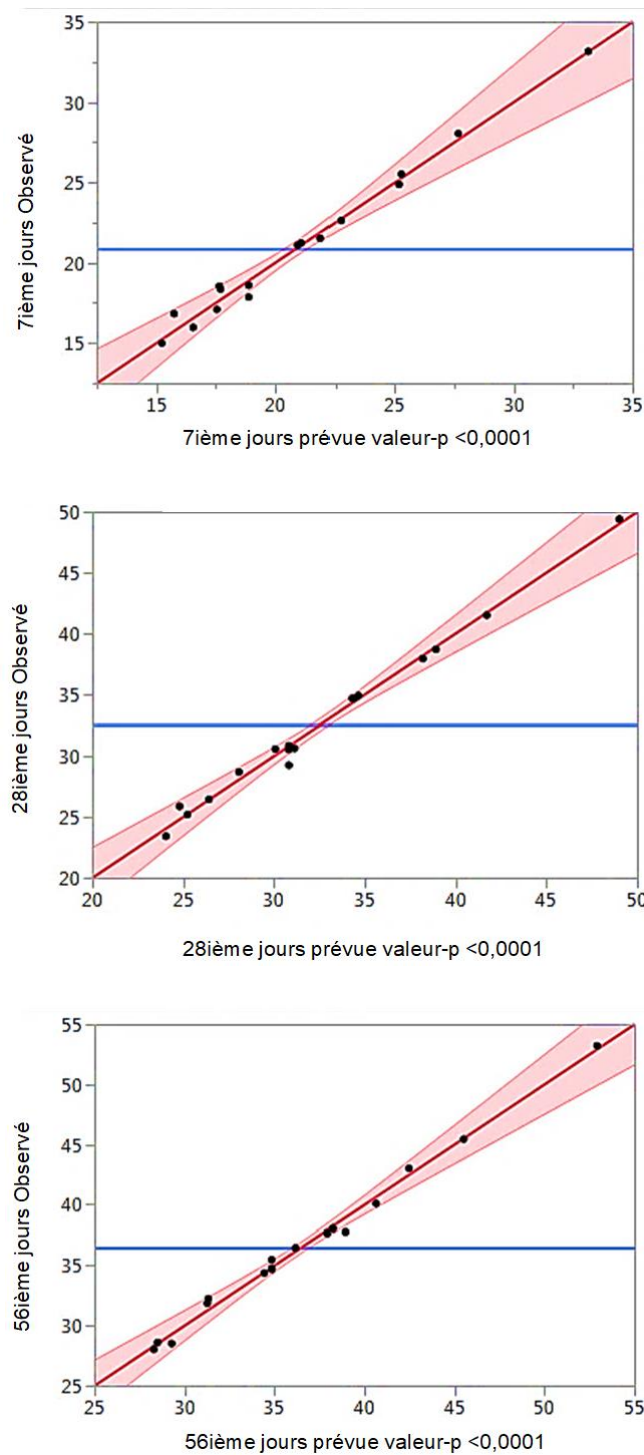


Figure III. 7. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites, des résistances à la compression avec la méthode MSR à 7; 28 et 56 jours de.

Comme indiqué dans le [tableau III. 12](#), les paramètres linéaires d'entrée (X_1 , X_2 et X_3) ont un effet significatif élevé sur la résistance à la compression pour 7, 28 et 56 jours ($p < 0,01$). Il est à noter que l'augmentation de la résistance à la compression à 7, 28 et 56 jours de 15,74 à 25,16 de 24,79 à 38,92 et de 29,28 à 42,48 MPa respectivement est due essentiellement à l'augmentation de la teneur en ciment de 300 à 400 kg / m³, pour une valeur de l'affaissement

(Aff) égale à 8,5cm et le pourcentage des GBR (% GBR) égale à 50%. Par contre, lorsque le % GBR et l'affaissement diminuent, la résistance à la compression augmente.

Les figures (III.8 ; III.9 et III.10) montrent les tracés de surface de réponse à 7, 28 et 56 jours de résistance à la compression en fonction des paramètres du procédé. Les graphiques ont été obtenus en esquissant la réponse (axe z) par rapport à deux variables indépendantes d'entrée (coordonnées x et y) et les autres variables indépendantes ont été considérées comme constantes à leurs niveaux nuls des plages de test. La résistance à la compression après 7, 28 et 56 jours dépend principalement de la teneur en ciment, du % GBR et de l'affaissement car son effet linéaire est hautement significatif avec $p < 0,01$ (Tableau III. 12). Les valeurs P à 0,05 et 0,01 ont été utilisées comme outil afin de vérifier la signification ou la très haute signification de chaque coefficient. Cependant, les interactions mutuelles ($X_1 X_2$) sont statistiquement significatives avec $p < 0,05$ (Tableau III. 12).

Il ressort aussi du tableau III. 12 que les coefficients des termes quadratiques (X_1^2 ; X_2^2 et X_3^2) après 7 et 56 jours respectivement, et les coefficients de produit croisé $X_2 X_3$ après 56 jours sont significatifs avec pour les valeurs de ($P < 0,05$) (Tableau III. 12). Tandis que, les autres coefficients ne sont pas significatifs pour les valeurs de ($P > 0,05$).

À partir de la figure III. 8 , lorsque le tracé de surface de réponse en 3-D a été développé pour les 7, 28 et 56^{ième} jours de résistance à la compression en faisant varier la teneur en ciment entre 300 et 400 kg / m³ et le % GBR entre 0 et 100% alors que l'affaissement est fixe ($8,5 \pm 1$ cm) ; la résistance à la compression du béton est passée de 15,38 à 29,87 de 22,48 à 44,0 et de 26,13 à 47,35 MPa à 7, 28 et 56^{ième} jours respectivement. Cependant, l'augmentation de la teneur en ciment et la diminution du % GBR améliore rapidement la résistance à la compression sur la plage étudiée après 7, 28 et 56 jours (Figure III. 8).

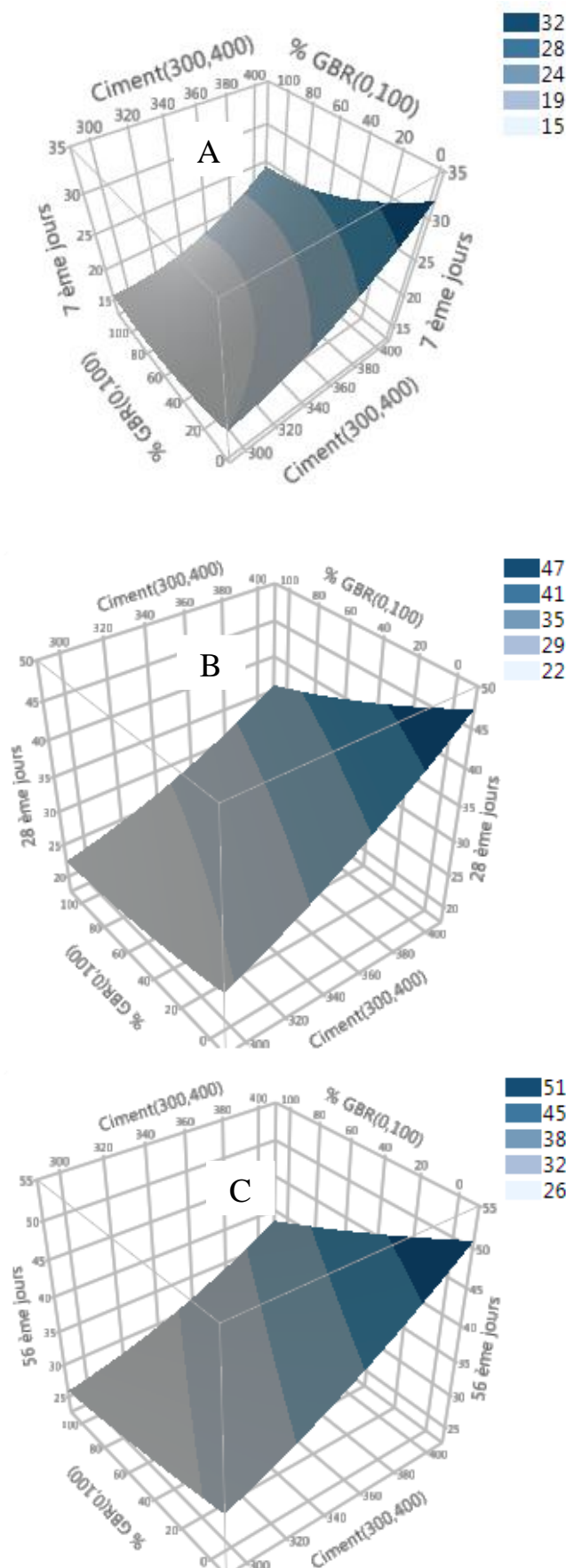


Figure III. 8. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56 jours, selon MSR en fonction de la quantité du ciment et du %GBR.

À partir du [tableau III. 12](#), nous pouvons constater que l'effet croisé de la teneur en ciment et % GBR ($X_1 X_2$) est significatif, pour les valeurs de P d'ordre 0,0205 ; 0,0436 et 0,0373 pour le 7^{ième}, 28^{ième} et 56^{ième} jour respectivement. L'augmentation de résistance à la compression du béton a été attribuée à l'augmentation de la teneur en ciment et à la diminution de l'eau nécessaire pour obtenir l'affaissement fixé à 8,5 cm, ce qui implique la diminution du rapport E/C.

La [figure III. 8](#) montre également que l'influence des GBRs sur la résistance à la compression du béton recyclé lorsque le % GBR augmente, est plus importante lorsque la teneur en ciment est de 400 kg/m³. Ceci est probablement dû à la faible résistance de l'ancienne pâte de mortier adhérent aux agrégats naturels par rapport à la nouvelle pâte de mortier. Ce qui implique un début de rupture dans l'ancienne pâte de mortier ([Etxeberria et al., 2007b](#); [Silva et al., 2015](#)).

La [figure III. 9](#) décrit la résistance à la compression du béton en fonction de la teneur en ciment et de l'affaissement à un % GBR fixe (50%). Elle indique que la résistance maximale à la compression du béton peut être atteinte lorsque la teneur en ciment et l'affaissement sont respectivement de 400 kg / m³ et de 5 ± 1 cm après 7, 28 et 56^{ième} jour de durcissement. D'autre part, la même tendance a été enregistrée lorsque la teneur en ciment augmente jusqu'à 400 kg/m³ à 0% de GBR ([Figure III. 8](#)). Il est clair que l'interaction entre ces paramètres étudiés n'est pas significative $p > 0,05$.

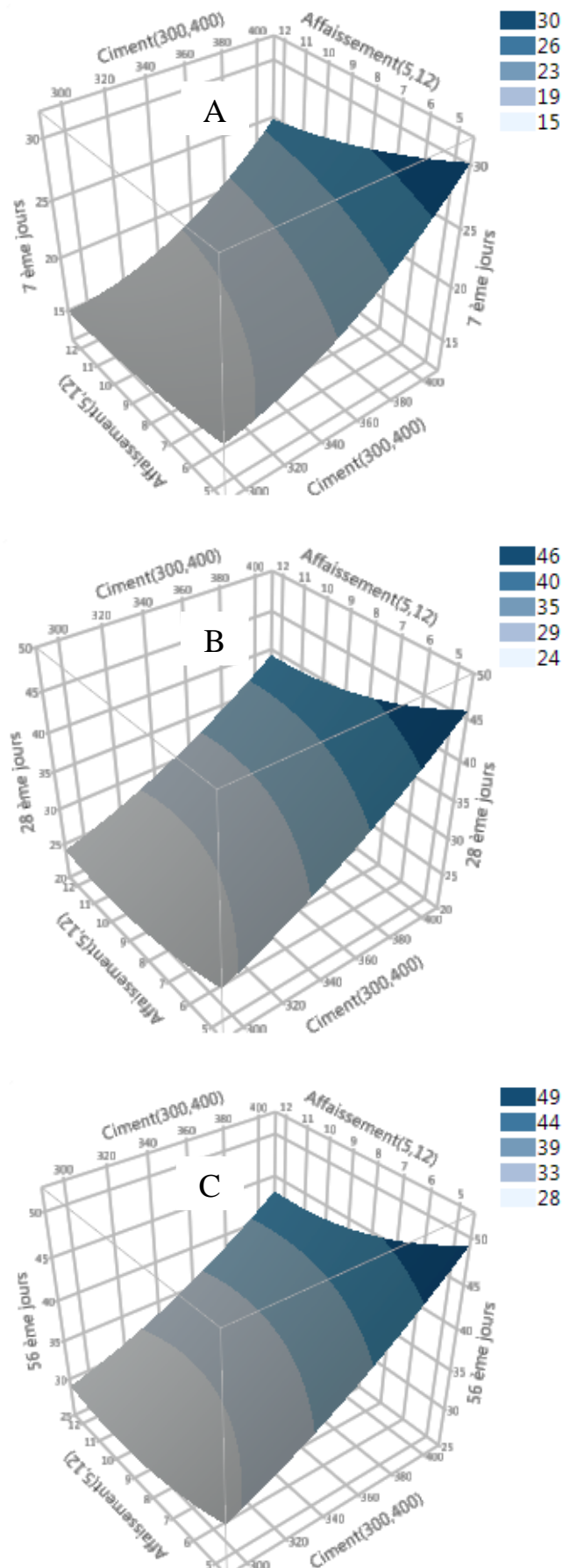


Figure III. 9. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56^{ème} jour, selon méthode MSR en fonction de ciment et Affaissement.

L'effet de l'interaction mutuelle entre le % GBR et l'affaissement est montré sur la [figure III. 10](#). Cet effet est significatif ($p = 0,0129$) avec un maximum de résistance à la compression du béton à 0% GBR et un affaissement de 5 cm à teneur en ciment fixe (350 kg/m^3) après 56 jours.

Cependant, les autres interactions mutuelles telles que $X_1 X_3$ et $X_1 X_2$ ne sont pas significatives. Les résultats indiquent que l'effet de % GBR et de l'affaissement sur la résistance à la compression est atteint après 56 jours. On sait que la qualité du béton diminue lorsque l'on augmente le % GBR. Cependant l'augmentation de l'affaissement nécessitait un faible pourcentage de GBR pour générer de bonnes résistances à la compression avec un affaissement élevé.

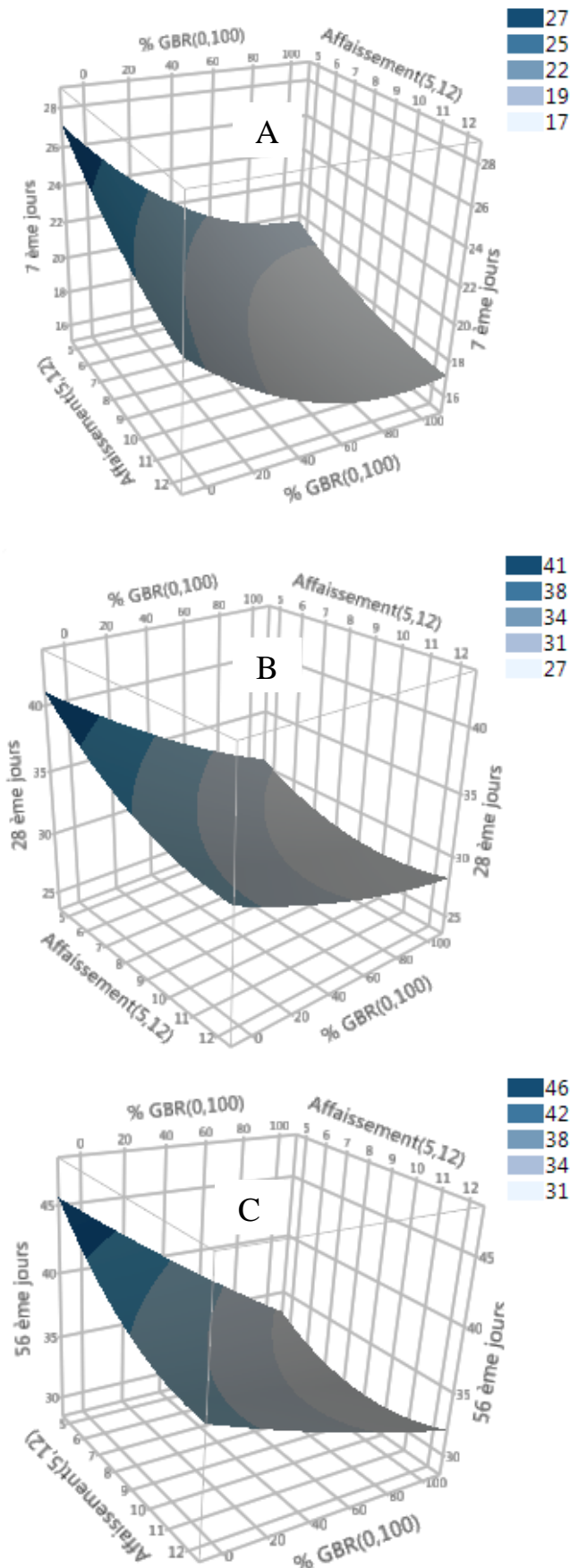


Figure III. 10. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56^{ème} jour, selon la méthode MSR en fonction de l’Affaissement et %GBR.

III.4.2 Modélisation de la résistance à la compression par les réseaux de neurone artificiels (RNA)

Les résultats obtenus en utilisant le modèle RNA pour Fc7, Fc28 et Fc56 ont été prédits en utilisant des équations. (III.14) à (III.18), (III.19) à (III.23) et (III.24) - (III.28) respectivement. Ainsi les résultats expérimentaux et prédits de la résistance à la compression à 7 ; 28 et 56 jours sont représenté dans le [tableau III. 13](#).

$$Fc7 = (((-0,613) + (1,5936 * H1) + (1,375 * H2) + (2,621 * H3) - (2,385 * H4)) * 4,768) + 20,881 \quad (\text{Eq.III.14})$$

$$H1 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-0,185) - 0,322 * ((C - 350)/39,528) - 0,135 * ((\%GBR - 50)/39,528) - 1,694 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.15})$$

$$H2 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-0,963) - 1,493 * ((C - 350)/39,528) + 0,002 * ((\%GBR - 50)/39,528) + 1,92 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.16})$$

$$H3 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-0,506) + 1,874 * ((C - 350)/39,528) + 0,532 * ((\%GBR - 50)/39,528) - 0,009 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.17})$$

$$H4 = 1/(1 + \text{EXP}(-((1,64) - 0,937 * ((C - 350)/39,528) + 1,812 * ((\%GBR - 50)/39,528) + 0,494 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.18})$$

$$Fc28 = (((-2,750) - (2,189 * H1) - (2,161 * H2) - (0,995 * H3) + (1,648 * H4)) * 6,638) + 32,553 \quad (\text{Eq.III.19})$$

$$H1 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-0,044) - 2,172 * ((C - 350)/39,528) - 0,513 * ((\%GBR - 50)/39,528) - 0,310 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.20})$$

$$H2 = 1/(1 + \text{EXP}(-((1,575) - 1,278 * ((C - 350)/39,528) + 0,839 * ((\%GBR - 50)/39,528) + 0,643 * ((Aff - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.21})$$

$$H3 = 1/(1 + \text{EXP}(-((0,750) + 0,623 * ((C - 350)/39,528) + 0,172 * ((\%GBR - 50)/39,528) - 1,306 * ((Aff - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.22})$$

$$H4 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-1,005) - 0,854 * ((C - 350)/39,528) - 1,138 * ((\%GBR - 50)/39,528) - 1,653 * ((Aff - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.23})$$

$$Fc56 = (((1,131) - (1,664 * H1) + (1,217 * H2) - (1,982 * H3) + (2,015 * H4)) * 6,469) + 36,497 \quad (\text{Eq.III.24})$$

$$H1 = 1/(1 + \text{EXP}(-((1,401) - 1,672 * ((C - 350)/39,528) + 0,253 * ((\%GBR - 50)/39,528) + 0,121 * ((Aff - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.25})$$

$$H2 = 1/(1 + \text{EXP}(-((0,725) + 1,946 * ((C - 350)/39,528) + 1,561 * ((\%GBR - 50)/39,528) - 0,182 * ((Aff - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.26})$$

$$H3 = 1/(1 + \text{EXP}(-((2,076) - 0,430 * ((C - 350)/39,528) + 0,892 * ((\%GBR - 50)/39,528) - 1,313 * ((Aff - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.27})$$

$$H4 = 1/(1 + \text{EXP}(-(-0,197 - 0,025 * ((C - 350)/39,528) - 0,959 * ((\%GBR - 50)/39,528) + 0,316 * ((Aff - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.28})$$

Tableau III. 13. Résultats des résistances à la compression réelles et prédites par la méthode RNA.

Formulation	Fc [MPa] (7 jours)			Fc [MPa] (28 jours)			Fc [MPa] (56 jours)		
	Exp	Pré	Err abs	Exp	Pré	Err abs	Exp	Pré	Err abs
Form 1	21,10	21,10	0,00	30,64	30,66	0,02	36,47	36,47	0,00
Form 2	17,10	17,10	0,00	26,45	26,45	0,00	31,87	31,82	0,05
Form 3	15,98	15,99	0,01	25,21	25,22	0,01	28,61	28,63	0,02
Form 4	15,00	15,00	0,00	23,42	23,44	0,02	28,04	27,99	0,05
Form 5	33,16	33,15	0,01	49,41	49,38	0,03	53,23	53,19	0,04
Form 6	28,04	28,03	0,01	41,51	41,50	0,01	45,46	45,43	0,03
Form 7	25,52	25,52	0,00	37,94	37,95	0,01	40,10	40,11	0,01
Form 8	21,53	21,53	0,00	34,68	34,70	0,02	37,66	37,64	0,02
Form 9	16,83	16,80	0,03	25,89	25,85	0,04	28,52	28,64	0,12
Form 10	24,88	24,89	0,01	38,71	38,71	0,00	43,02	43,06	0,04
Form 11	22,62	22,61	0,01	34,91	34,92	0,01	37,77	37,86	0,09
Form 12	18,56	18,53	0,03	28,70	28,66	0,04	32,26	32,29	0,03
Form 13	21,23	21,22	0,01	34,67	34,63	0,04	38,06	38,04	0,02
Form 14	18,36	18,34	0,02	30,59	30,53	0,06	34,40	34,47	0,07
Form 15	18,60	18,38	0,22	30,86	30,26	0,60	34,69	34,96	0,30
Form 16	17,86	18,38	0,52	29,26	30,26	1,00	34,80	34,96	0,16
Form 17	18,60	18,38	0,22	30,55	30,26	0,29	35,49	34,96	0,53

Rc: Résistances à la compression ; Exp: Expérimentale ; Pré: Prédite ; Err abs: Erreur absolue

La résistance à la compression simulée par le réseau de neurones artificiels a été comparée aux données réelles présentées dans le [tableau III.13](#). Afin de tester l'adéquation du modèle, les résultats obtenus par les réseaux de neurones artificiels et expérimentaux ont été représentés sur la [figure III. 11](#).

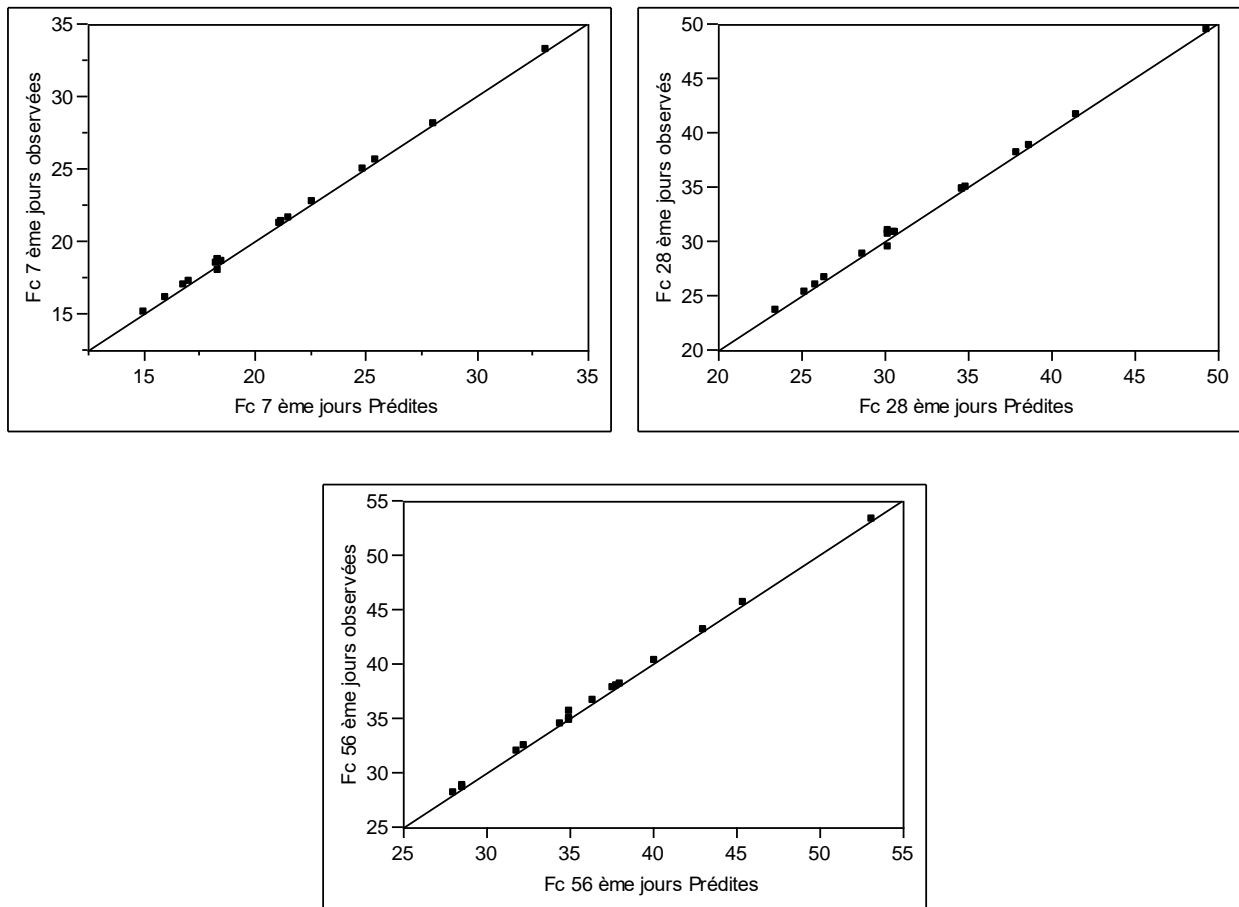


Figure III. 11. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites avec la méthode RNA de résistance à la compression à 7; 28 et 56^{ème} jour.

En fournissant au modèle RNA des matrices de paramètres de résistance à la compression à savoir : les paramètres d'entrer et les paramètres de sorties, il est possible de montrer l'effet de relation de chacune des variables indépendantes à l'aide du tracé de surface généré dans le logiciel JMP (Figure III. 12 ; Figure III. 13 et Figure III. 14). En utilisant la méthode similaire à celle du modèle MSR-PCC, la troisième variable indépendante de chaque graph a été fixée à sa valeur moyenne (350 kg / m³, 50% ou 8,5 cm) pour générer les tracés de surface et les résultats de cette étude peuvent être visualisés sur les figures (Figure III. 12 ; Figure III. 13 et Figure III. 14).

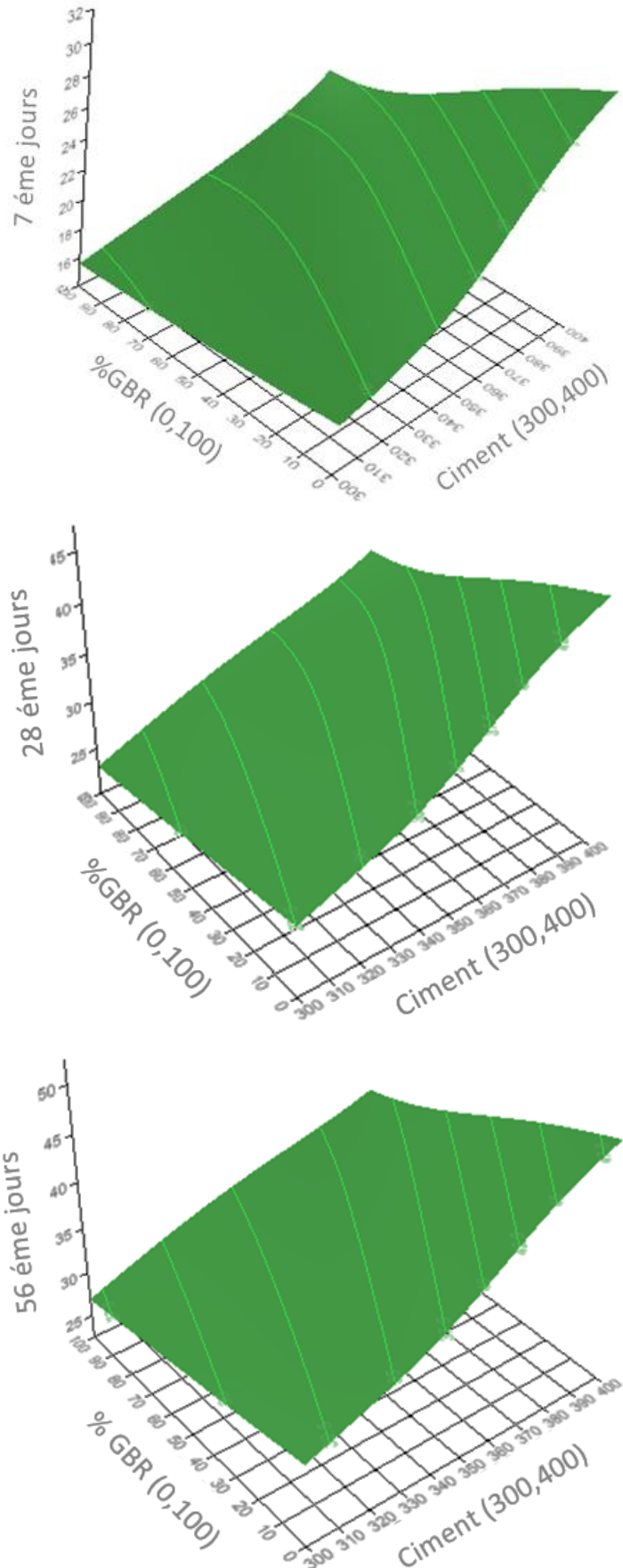


Figure III. 12. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56^{ème} jour, selon la méthode RNA en fonction du Ciment et %GBR.

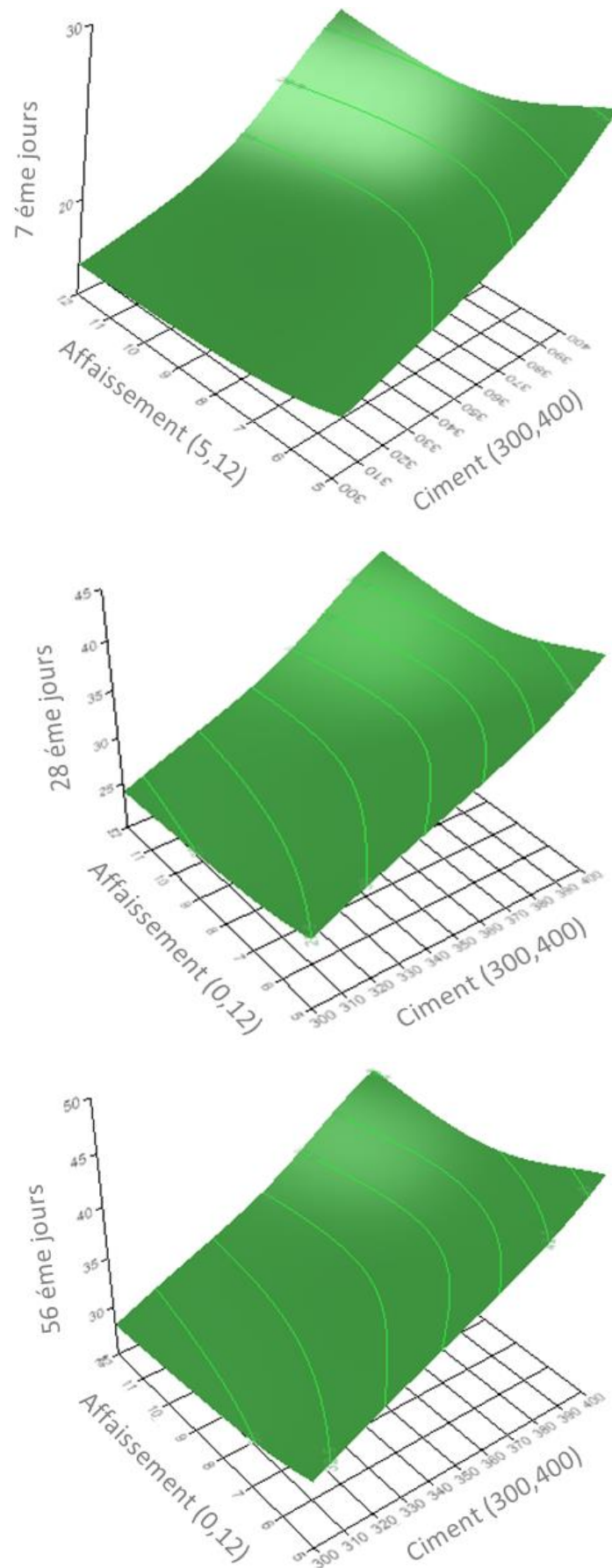


Figure III. 13. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56^{ième} jour, selon la méthode RNA en fonction de l’Affaissement et Ciment.

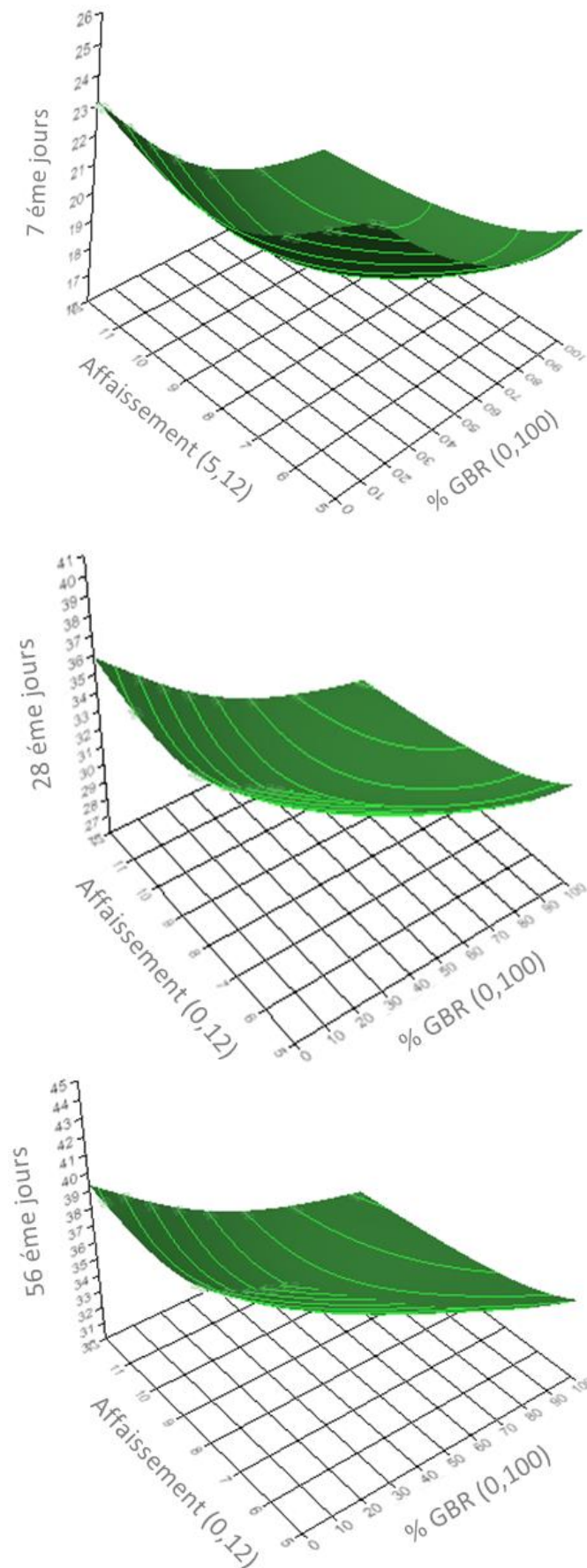


Figure III. 14. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la compression à 7, 28 et 56^{ème} jour, selon la méthode RNA en fonction de l’Affaissement et %GBR.

Il ressort clairement de la [figure III. 12](#) que l'augmentation de la teneur en ciment de 300 kg/m³ à 400 kg/m³ améliore la résistance à la compression du béton. Cela peut être expliqué par la forte adhérence créée entre le mortier et les agrégats. Cependant, cette force de liaison diminue lorsque le % GBR augmente et ceci est dû à la zone de transition interfaciale formée entre l'agrégat naturel et l'ancien mortier qui affaiblit la résistance de recyclé.

La [Figure III. 14](#) montre également que l'augmentation de l'affaissement affecte la résistance à la compression suite à l'augmentation de rapport E/C. la même tendance est observée lorsque le % GBR augmente, ce qui induit l'augmentation rapport E/C.

III.4.3 Validation et comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA

L'expérimentation basée sur la méthodologie de surface de réponse (MSR) et les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont devenus au cours de ces dernières années, les méthodologies les plus préférées pour la modélisation et l'optimisation des processus ([Dahmoune et al., 2015](#)). Afin de valider l'adéquation des modèles mathématiques, la corrélation entre les valeurs réelles et prévues ont été vérifiées. La bonne relation entre ces résultats a confirmé que les modèles mathématiques étaient satisfaisants pour refléter les résultats prévus. Les performances des modèles MSR et RNA construits ont également été mesurées statistiquement et indiquées dans le [tableau III. 14](#).

Tableau III. 14. Comparaison des performances de la méthodologie de surface de réponse et des réseaux de neurones artificiels.

Performance equation	Fc (7jours)		Fc (28jours)		Fc (56jours)	
	MSR	RNA	MSR	RNA	MSR	RNA
$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_i)^2}$	0,9871	0,9990	0,9880	0,9980	0,9900	0,9980
$R^2_{Aju} = 1 - \left[(1 - R^2) * \frac{N - 1}{N - k - 1} \right]$	0,9705	0,9977	0,9727	0,9960	0,9773	0,9978
$ERP = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_{i.pred} - Y_{i.exp}}{Y_{i.exp}} \right)$	0,05993	0,00784	0,05993	0,01668	-0,1501	-0,1596
$EQM = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i.pred} - Y_{i.exp})^2}{N}$	0,2749	0,02178	0,5364	0,086	0,3412	0,0404
$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i.exp} - Y_{i.pred})^2}{N}}$	0,8187	0,14759	1,1275	0,3487	0,9983	0,3726

REQM: racine de erreur quadratique moyenne ; EQM: erreur quadratique moyenne; ERP: écart relatif en pourcentage.

Le coefficient de détermination (R^2) pour Fc7 avec MSR et RNA est de 98,71 et 99,90% respectivement. La même chose a été observée pour Fc28 et Fc56 jours (Tableau III. 14). Le R^2 calculé par les méthodes RNA montre plus de précision que les méthodes MSR. À partir de tableau III. 14, l'analyse statistique des modèles MSR et RNA fournit des prédictions de bonne qualité. L'RNA montre toujours une nette supériorité par rapport à MSR et ce pour les capacités d'ajustement et d'estimation des données.

La figure III. 15 montre la distribution des résidus pour les deux techniques. Les variations des résidus sont assez faibles et régulières pour RNA par rapport à MSR. Le modèle MSR montre un écart plus élevé que celui de RNA. Il convient de noter que, même si la méthode MSR a l'avantage de : donner une équation de régression pour la prédiction; décrit les effets des paramètres expérimentaux ainsi que leurs interactions, La méthode RNA offre la possibilité de s'adapter à tout plan expérimental pour construire le modèle.

L'approche RNA est flexible et elle nous permet d'ajouter de nouvelles données expérimentales pour construire un modèle fiable (Dahmoune et al., 2015), et ainsi, il serait plus rationnel et cohérent d'interpréter la résistance à la compression des données de béton recyclé à travers un processus d'architecture RNA.

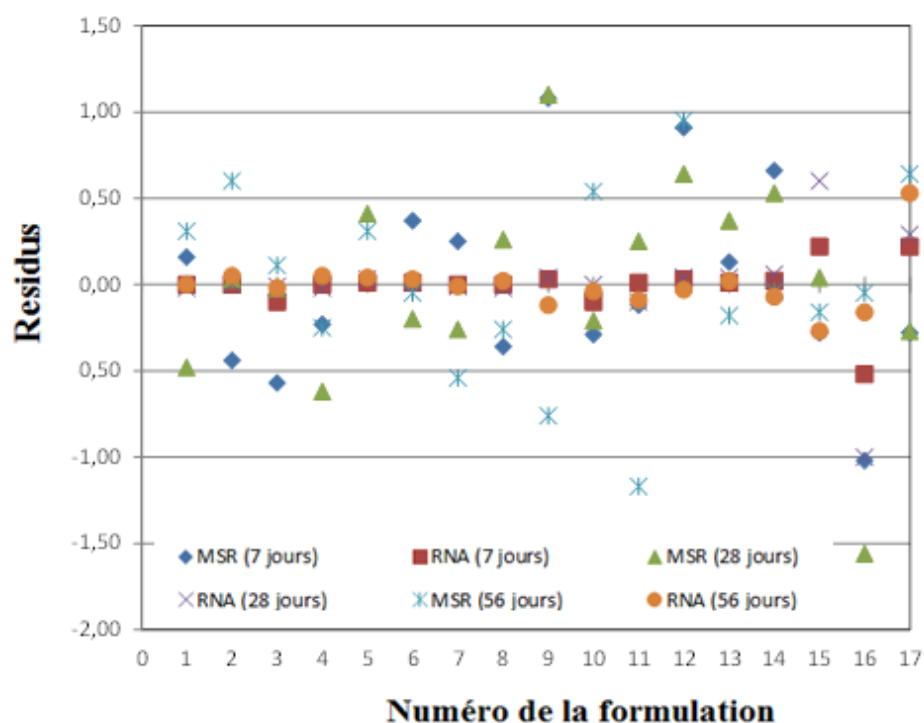


Figure III. 15. Comparaison entre la distribution des erreurs résiduelles obtenue par les modèles MSR et RNA.

III.5 TRACTION PAR FENDAGE

III.5.1 Modélisation de la résistance à la compression par surface de réponse (MSR)

Les informations enregistrées dans le [tableau III. 15](#) montrent les résultats expérimentaux et prédits de la traction par fendage obtenus à 28 jours de l'essai.

Tableau III. 15. Résultats de la résistance à la traction par fendage à 28 jours.

Formulations	C [kg/m ³]	% GBR	Aff [cm]	Ft28 [MPa]		
				Expérimentale	Prédite	Erreur absolue
Form 1	300	0	5	3,23	3,22	0,01
Form 2	300	0	12	2,34	2,43	0,09
Form 3	300	100	5	2,39	2,34	0,05
Form 4	300	100	12	2,08	2,15	0,07
Form 5	400	0	5	3,80	3,74	0,06
Form 6	400	0	12	3,20	3,27	0,07
Form 7	400	100	5	2,75	2,67	0,08
Form 8	400	100	12	2,79	2,81	0,02
Form 9	300	50	8,5	2,45	2,34	0,11
Form 10	400	50	8,5	2,88	2,93	0,05
Form 11	350	0	8,5	3,30	3,21	0,09
Form 12	350	100	8,5	2,50	2,53	0,03
Form 13	350	50	5	2,70	2,90	0,20
Form 14	350	50	12	2,84	2,58	0,26
Form 15	350	50	8,5	2,63	2,70	0,07
Form 16	350	50	8,5	2,81	2,70	0,11
Form 17	350	50	8,5	2,56	2,70	0,14

L'équation (III.29) représente l'équation polynomiale du second ordre utilisée pour exprimer la résistance à la traction par fendage. L'équation finale obtenue en termes de facteurs codés pour Ft28 est la suivante :

$$\begin{aligned}
 Y_{Ft28} = & 2,71 + 0,29X_1 - 0,34X_2 - 0,16X_3 - 0,04X_1 X_2 + 0,08X_1 X_3 \\
 & + 0,15X_2 X_3 - 0,07X_1^2 + 0,16X_2^2 + 0,03X_3^2
 \end{aligned}
 \tag{Eq.III.29}$$

Les résultats ANOVA pour Ft28 ([Tableau III. 16](#)) montrent une valeur p < 0,0032, ce qui signifie que le modèle est significatif. Le coefficient de détermination R² et R²_{ajusté} ont été calculés pour vérifier l'adéquation et finesse du modèle. La valeur de R² a été calculée à 0,9271, ce qui implique que plus 90% des données expérimentales étaient compatibles. Tandis-que R²_{ajusté} qui permet d'évaluer l'adéquation et la pertinence du modèle est de l'ordre de 0,8333. Indiquant que le modèle pourrait expliquer des changements des valeurs de la réponse à 83,33%

et que 16,67% de la variance totale ne pourraient pas être expliquée par ce modèle. La illustre parfaitement la corrélation entre les valeurs expérimentales et prédit de la traction par fendage, où la ligne rouge représente la droite du modèle et les points noirs représentent les valeurs expérimentales.

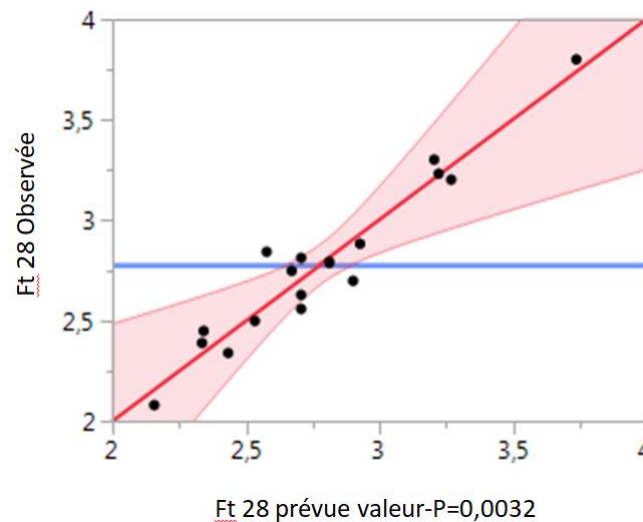


Figure III. 16. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites avec la méthode MSR de la traction par fendage Ft28.

L'analyse ANOVA (Tableau III. 16) montre que tous les paramètres linéaires (X_1 , X_2 et X_3) sont significatif avec des valeurs $p < 0,05$. Tandis-que seulement le paramètre ($X_2 X_3$) des produits croisés est significatif de avec une valeur $p = 0,0396$. Et aucun des coefficients quadratique n'est significatif dans les valeurs p sont supérieures à 0,05

Tableau III. 16. Analyse de la variance (ANOVA) et statistiques des modèles de régression complète pour les résultats expérimentaux.

	DL	Ft28 jours		
		Sc	Rapport-F	Prob>F
Modèle	9	2,60	9,89	0,0032
X_1	1	0,858	29,37	0,0010
X_2	1	1,129	38,63	0,0004
X_3	1	0,262	8,98	0,0200
$X_1 X_2$	1	0,016	0,55	0,4808
$X_1 X_3$	1	0,051	1,75	0,2272
$X_2 X_3$	1	0,186	6,67	0,0396
X_1^2	1	0,014	0,48	0,5109
X_2^2	1	0,071	2,43	0,1633
X_3^2	1	0,003	0,10	0,7635
Résidus	7	0,205		
Défaut d'ajustement	5	0,171	2,06	0,3583
Erreur pure	2	0,033		
R^2		0,9271		

$R^2_{\text{ajusté}}$		0,8333
REQM		0,171
Total Corrigé	16	2,805

Sc: Somme des carrés ; REQM: racine de erreur quadratique moyenne ; DL : degré de liberté

La [figure III. 17](#) montre les tracés de surface de réponse de résistance à la traction en fonction des paramètres du procédé. À partir de la [figure III. 17. A](#), lorsque le tracé de surface de réponse en 3-D a été développé pour le 28^{ième} jours de résistance à la traction en faisant varier le % GBR entre 0 et 100% et l'affaissement entre 5 et 12 cm alors que le dosage en ciment a été fixé à 350 kg/m³. La résistance à la traction du béton est passée de 3,55 à 2,56 MPa. La [figure III. 17. A](#) montre que l'influence des GBR sur la résistance à la traction est plus importante que l'influence de l'affaissement ce qui peut être confirmé par les valeurs p qui sont de l'ordre de 0,0004 pour X₂ et 0,0200 X₃.

La [figure III. 17. B](#) décrit la résistance à la traction en fonction des quantités du ciment et de l'affaissement avec un %GBR fixé 50%. La résistance à la traction augmente avec l'augmentation de dosage en ciment. Cependant la résistance à la traction diminue avec augmentation de l'affaissement en raison de la diminution de ratio E/C. la même tendance a été observé sur la [figure III. 17. C](#) où la résistance à la traction est en fonction du ciment et de %GBR à un affaissement fixé à 8,5cm. La résistance augmente avec l'augmentation du dosage en ciment et diminue avec l'augmentation de %GBR. Néanmoins, la chute de la résistance est plus importante lorsque le dosage en ciment est de 400 kg/m³ et cela est probablement dû à la faible résistance de l'ancienne pâte de mortier par rapport à la nouvelle pâte de mortier.

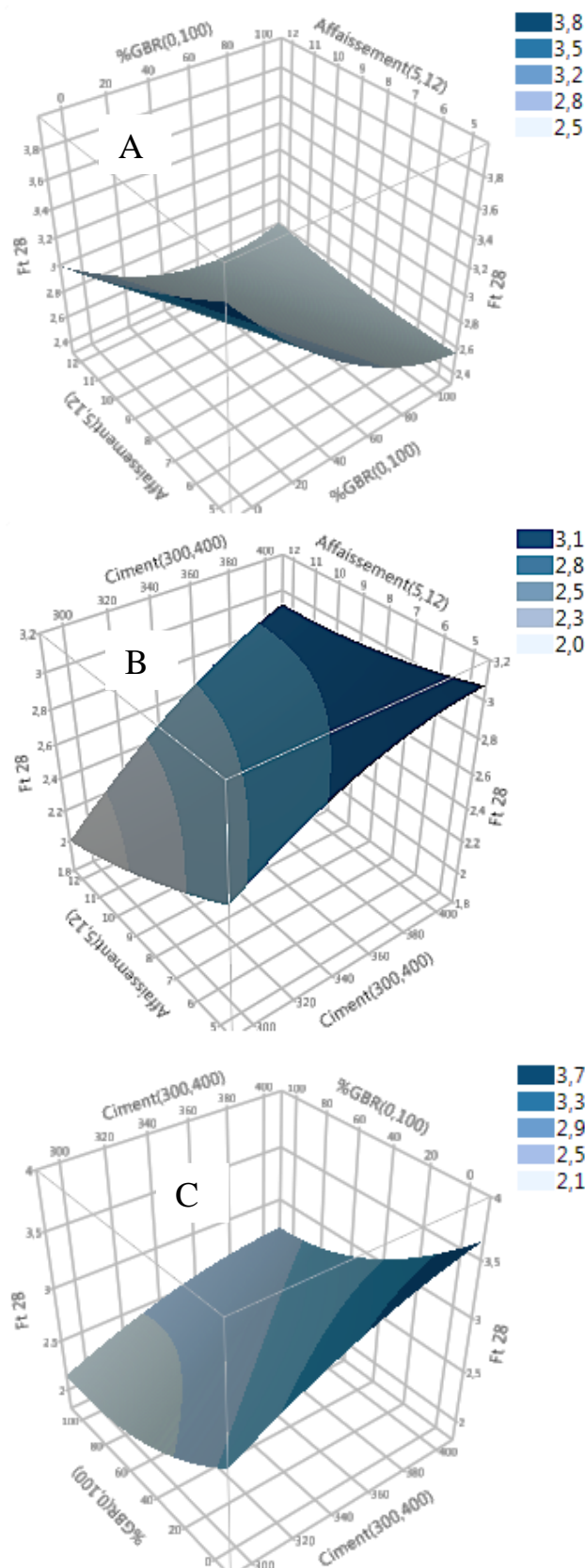


Figure III. 17. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la traction à 28 jours, selon la méthode MSR.

III.5.2 Modélisation de la résistance à la compression par les réseaux de neurone artificiels (RNA)

Le [tableau III. 17](#) montre les valeurs expérimentale et prédite par la méthode des réseaux de neurones artificiels de la résistance à la traction.

Tableau III. 17. Résistance à la traction expérimentale et prédite par la méthode RNA.

Formulation	Ft28 [MPa]		
	Expérimentale	Prédite	Erreur absolue
Form 1	3,23	3,23	0,00
Form 2	2,34	2,34	0,00
Form 3	2,39	2,39	0,00
Form 4	2,08	2,08	0,00
Form 5	3,80	3,80	0,00
Form 6	3,20	3,20	0,00
Form 7	2,75	2,75	0,00
Form 8	2,79	2,79	0,00
Form 9	2,45	2,45	0,00
Form 10	2,88	2,88	0,00
Form 11	3,30	3,30	0,00
Form 12	2,50	2,50	0,00
Form 13	2,70	2,70	0,00
Form 14	2,84	2,84	0,00
Form 15	2,63	2,67	0,04
Form 16	2,81	2,67	0,14
Form 17	2,56	2,67	0,11

Les valeurs prédites sont calculés avec les équations Eq.III.30 à Eq.III.34. Les équations offrent une très bonne précision de prédiction.

$$Ft28 = (((2,495) - (2,452 * H1) + (2,813 * H2) - (2,072 * H3) - (2,756 * H4)) * 0,419) + 2,779 \quad (\text{Eq.III.30})$$

$$H1 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-0,104) - 0,058 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) + 2,153 * \left(\frac{\%GBR - 50}{39,528}\right) - 1,221 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.31})$$

$$H2 = 1/(1 + \text{EXP}(-((0,915) + 1,098 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) - 0,189 * \left(\frac{\%GBR - 50}{39,528}\right) - 0,748 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.32})$$

$$H3 = 1/(1 + \text{EXP}(-((1,096) + 0,025 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) - 2,926 * ((\%GBR - 50)/39,528) - 1,059 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.33})$$

$$H4 = 1/(1 + \text{EXP}(-((1,391) - 0,545 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) + 1,302 * ((\%GBR - 50)/39,528) + 1,195 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.34})$$

La figure III. 18 illustre parfaitement la précision de la prédiction entre les valeurs expérimentales et prédite.

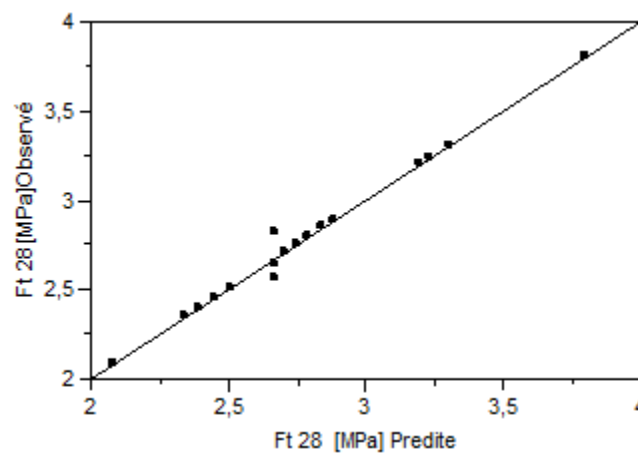


Figure III. 18 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites avec RNA de F_{t28} .

La figure III. 19 montre les tracés de la surface de repense de la résistance à la traction créer avec le logiciel JMP pour le modèle RNA. La figure III. 19. A illustre la résistance à la traction en fonction de l'affaissement et %GBR pour un dosage en ciment fixé à 350kg/m^3 . Il parait de la figure que l'augmentation de l'affaissement et du %GBR réduit la résistance à la traction à cause de la diminution de rapport E/C dû à la demande supplémentaire en l'eau. Cependant la figure III. 19. B et figure III. 19. C montrent que l'augmentation de dosage en ciment augmente la résistance à la traction et elle diminue lorsque %GBR et l'affaissement augmente.

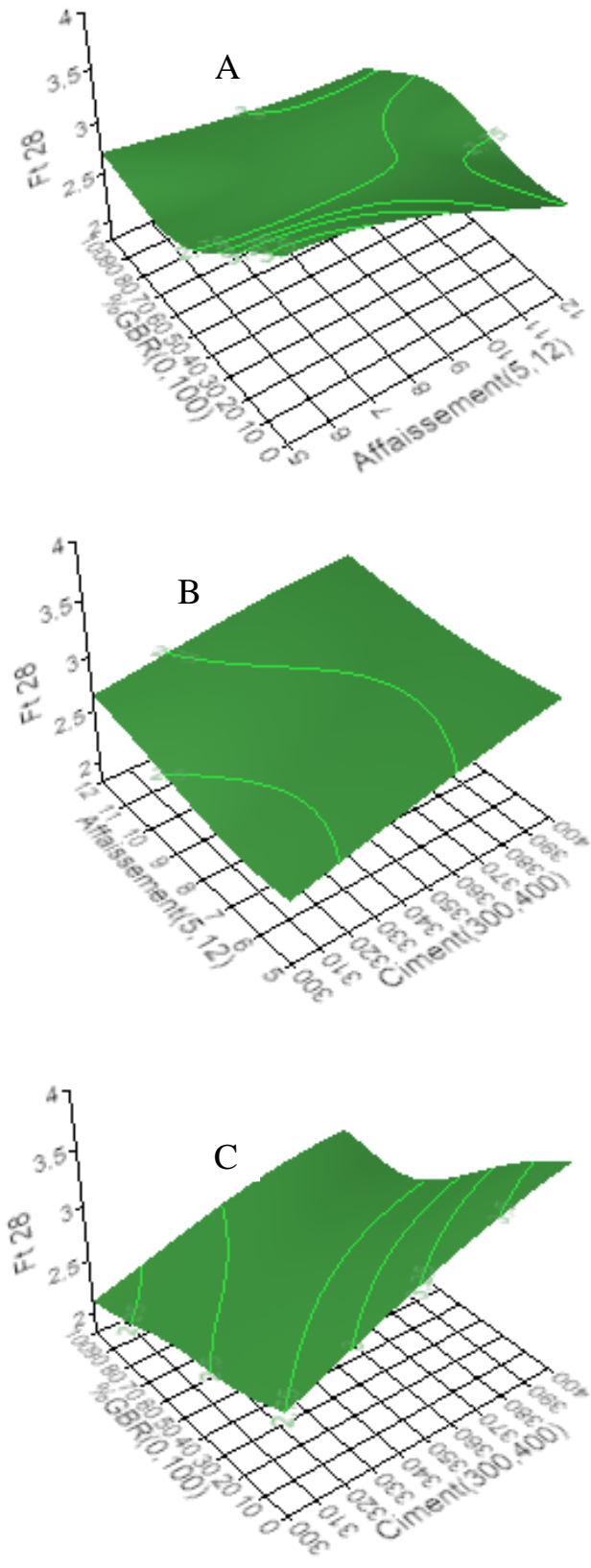


Figure III. 19. Diagramme de surface de réponse pour la résistance à la traction à 28 jours, selon la méthode RNA.

III.5.3 Validation et comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA

Les valeurs de l'analyse statistique, en termes des divers paramètres statistiques à savoir : R^2 , $R^2_{ajusté}$, REP, EQM et RESM sont présentés dans le [tableau III. 18](#).

Tableau III. 18. Comparaison des performances de la méthodologie de surface de réponse et des réseaux de neurones artificiels.

Performance equation	Ft (28jours)	
	MSR	RNA
$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_i)^2}$	0,9271	0,9880
$R^2_{Ajusté} = 1 - \left[(1 - R^2) \cdot \frac{N - 1}{N - k - 1} \right]$	0,8333	0,9761
$ERP = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_{i.pred} - Y_{i.exp}}{Y_{i.exp}} \right)$	0,0832	0,0492
$EQM = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i.pred} - Y_{i.exp})^2}{N}$	0,0292	0,0019
$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i.exp} - Y_{i.pred})^2}{N}}$	0,1710	0,0443

REQM: racine de erreur quadratique moyenne ; EQM: erreur quadratique moyenne; ERP: écart relatif en pourcentage.

Les résultats illustrés sur le [tableau III. 18](#) montrent que le modèle RNA est plus performant que le modèle MSR, Avec des valeurs des R^2 et $R^2_{ajusté}$ égale à (0,9880 ; 0,9761) pour la méthode MSR et (0,9271 ; 0,8333). Le [tableau III. 18](#) montre également que les valeurs de ERP ; EQM et REQM pour la méthode RNA sont nettement inférieurs par rapport à la méthode MSR. Avec des valeurs (0,0832; 0,0292 et 0,1710) pour la méthode MSR et (0,0492; 0,0019 et 0,0443) respectivement, indiquant ainsi que le modèle RNA a une capacité de modélisation plus élevée que les modèles MSR pour la prédiction de la résistance à la traction Ft28.

La [figure III. 20](#) montre la distribution des résidus de la résistance à la traction pour les méthodes MSR et RNA. La [figure III. 20](#) montre que les fluctuations des résidus sont relativement faibles. Cependant, la distribution des résidus de modèle RNA est relativement plus faible et régulières par rapport à MSR

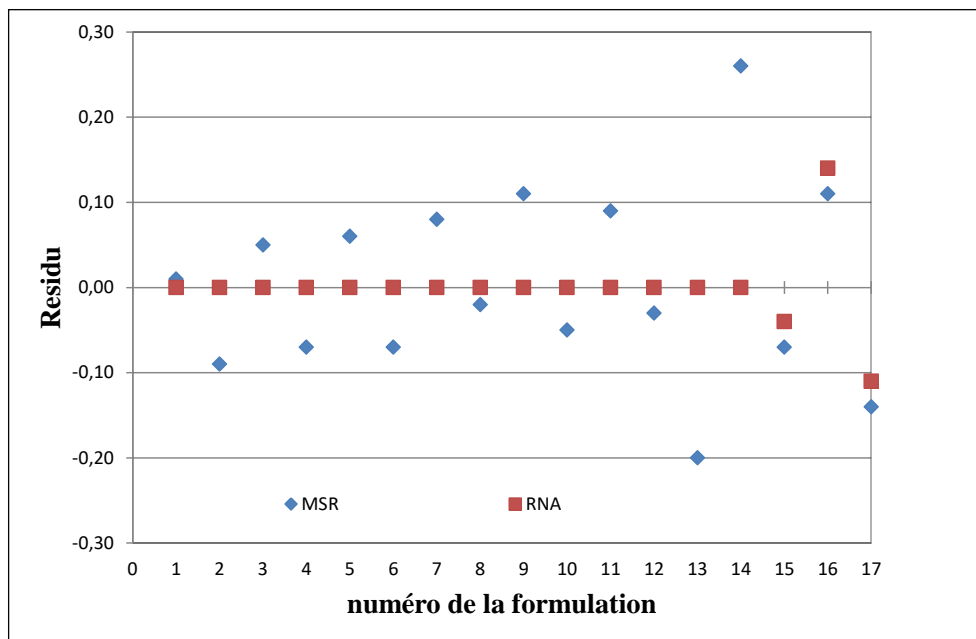


Figure III. 20. Comparaison entre la distribution des erreurs résiduelles obtenue par les modèles MSR et RNA.

III.6 VITESSE D'IMPULSION ULTRASONIQUE

III.6.1 Modélisation de la résistance à la vitesse d'impulsion ultrasonique par surface de réponse (MSR)

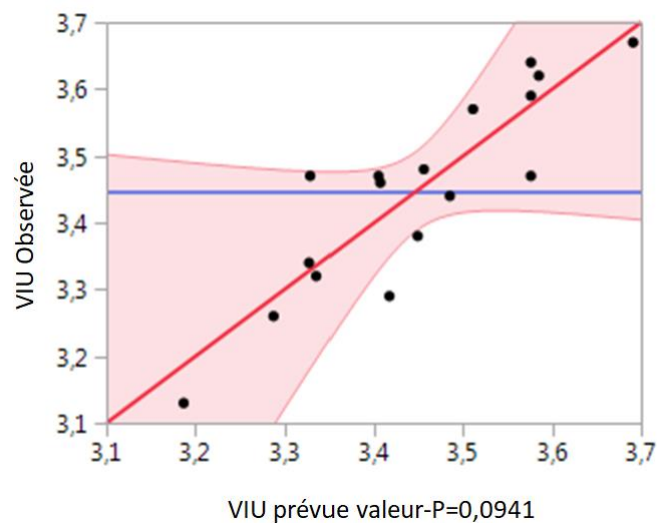
L'équation (III.34) représente le model de régression pour la vitesse d'impulsion ultrasonique (VIU). Le model a été monté sur la base de l'estimation des paramètres.

$$Y_{VIU} = 2,71 + 0,29X_1 - 0,34X_2 - 0,16X_3 - 0,04X_1 X_2 + 0,08X_1 X_3 + 0,15X_2 X_3 - 0,07X_1^2 + 0,16X_2^2 + 0,03X_3^2 \quad (\text{Eq.III.34})$$

Le [tableau III. 19](#) montre les valeurs expérimentales et prédites de (VIU) par la méthode MSR pour chaque formulation. On remarque que les valeurs des mesures sont relativement proches les unes des autres. Et cela peut affecter la précision de la prédiction vu que la marge d'erreur sur les propriétés du béton est relativement plus grande par rapport aux autres domaines tels que la chimie ou la biologie.

Tableau III. 19. Les résultats de VIU expérimentales et prédit par la méthode MSR.

Formulation	VIU [km/s] (28 jours)		
	Expérimentale	Prédite	Erreur absolue
Form 1	3,26	3,29	0,03
Form 2	3,38	3,45	0,07
Form 3	3,13	3,19	0,06
Form 4	3,34	3,33	0,01
Form 5	3,32	3,34	0,02
Form 6	3,46	3,40	0,06
Form 7	3,47	3,41	0,06
Form 8	3,48	3,46	0,02
Form 9	3,47	3,33	0,14
Form 10	3,29	3,42	0,13
Form 11	3,57	3,58	0,01
Form 12	3,44	3,48	0,05
Form 13	3,62	3,58	0,04
Form 14	3,67	3,69	0,02
Form 15	3,47	3,57	0,10
Form 16	3,64	3,57	0,07
Form 17	3,59	3,57	0,02

**Figure III. 21.** Comparaison entre les valeurs de VIU réelles et prédites avec la méthode MSR

L'adéquation et la finesse du modèles a été testé par analyse de la variance (ANOVA). Les résultats ont indiqué que l'équation ne représente pas suffisamment la relation réelle entre les variables indépendantes et les réponses (Tableau III. 20). Les résultats ANOVA pour VIU (Tableau III. 20) montre une valeur $p > 0,09$ ce qui signifie que le modèle n'est pas significatif. La valeur de R^2 a été calculée à 0,7827, ce qui implique que plus 21% des données expérimentales ne sont pas compatibles.

L'analyse ANOVA (Tableau III. 20) montre que tous les coefficients ne sont pas significatifs. Seulement le paramètre quadratique X_1^2 est significatif avec une valeur $p=0,0151$

Tableau III. 20. Analyse de la variance (ANOVA) et statistiques des modèles de régression complète pour les résultats expérimentaux.

	DL	VIU (28 jours)		
		Sc	Valeur-F	Prob>F
Model	9	0,2720	2,8020	0,0941
X1	1	0,0194	1,7946	0,2222
X ₂	1	0,0017	0,1567	0,7040
X ₃	1	0,0281	2,6039	0,1506
X ₁ X ₂	1	0,0145	1,3395	0,2851
X ₁ X ₃	1	0,0041	0,3754	0,5594
X ₂ X ₃	1	0,0002	0,0185	0,8955
X ₁ ²	1	0,1105	10,2447	0,0151
X ₂ ²	1	0,0163	1,5149	0,2581
X ₃ ²	1	0,0103	0,9517	0,3618
Résidus	7	0,0755		
Défaut d'ajustement	5	0,0602	1,5785	0,4314
Erreur pure	2	0,0153		
R ²		0,7827		
R ² _{ajusté}		0,5034		
REQM		0,3476		
Total Corrigé	16	0,3476		

Sc: Somme des carrés ; REQM: racine de erreur quadratique moyenne ; DL : degré de liberté

III.6.2 Modélisation de la vitesse d'impulsion ultrasonique par les réseaux de neurone artificiels (RNA)

Le tableau III. 21 présente les résultats expérimentales et prédites par la méthode RNA de de VIU. Les valeurs prédites sont calculés à partir des équations (III-35) à (III-39)

Tableau III. 21. Vitesse d'impulsion ultrasonique prédit par la méthode RNA.

Formulation	VIU [km/s] (28 jours)		
	Expérimentale	Prédite	Erreur absolue
Form 1	3,26	3,26	0,00
Form 2	3,38	3,38	0,00
Form 3	3,13	3,13	0,00
Form 4	3,34	3,34	0,00
Form 5	3,32	3,32	0,00
Form 6	3,46	3,46	0,00
Form 7	3,47	3,47	0,00
Form 8	3,48	3,48	0,00
Form 9	3,47	3,47	0,00
Form 10	3,29	3,29	0,00
Form 11	3,57	3,57	0,00
Form 12	3,44	3,44	0,00

Form 13	3,62	3,62	0,00
Form 14	3,67	3,67	0,00
Form 15	3,47	3,57	0,10
Form 16	3,64	3,57	0,07
Form 17	3,59	3,57	0,02

$$\text{VIU} = (((-1,048) + (1,515 * H1) - (0,956 * H2) + (1,988 * H3) - (1,541 * H4)) * 18,123) + 226,941 \quad (\text{Eq.III.35})$$

$$H1 = 1/(1 + \text{EXP}(-((1,637) - 0,806 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) + 0,849 * \left(\frac{\%GBR - 50}{39,528}\right) + 0,935 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.36})$$

$$H2 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-0,165) + 0,133 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) + 0,706 * \left(\frac{\%GBR - 50}{39,528}\right) - 1,631 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.37})$$

$$H3 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-0,372) - 0,025 * ((C - 350)/39,528) + 1,567 * ((\%GBR - 50)/39,528) - 0,229 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.38})$$

$$H4 = 1/(1 + \text{EXP}(-((-1,010) - 0,893 * \left(\frac{C - 350}{39,528}\right) - 1,020 * ((\%GBR - 50)/39,528) + 0,176 * ((\text{Aff} - 8,5)/2,767)))) \quad (\text{Eq.III.39})$$

La figure III. 22 illustre la comparaison entre les valeurs expérimentales et prédite par la méthode RNA. La figure III. 22 montre une très bonne corrélation entre les valeurs prédite et les valeurs expérimentale, ce qui signifie que la méthode RNA à une très grande capacité d'approximation.

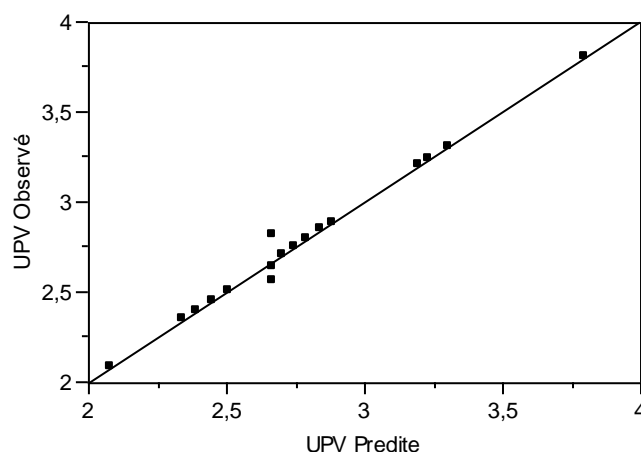


Figure III. 22. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites avec RNA de UPV.

III.6.3 Validation et comparaison entre les deux méthodes MSR et RNA

Les résultats de l'analyse statistique et de la comparaison entre la méthode MSR et RNA sont énumérés dans le [tableau III. 22](#).

Tableau III. 22. Comparaison des performances de la méthodologie de surface de réponse et des réseaux de neurones artificiels.

Performance equation	VIU (28 jours)	
	MSR	RNA
$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_i)^2}$	0,7827	0.9543
$R^2_{Aju} = 1 - \left[(1 - R^2) * \frac{N - 1}{N - k - 1} \right]$	0,5034	0,9086
$ERP = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_{i.pred} - Y_{i.exp}}{Y_{i.exp}} \right)$	0,1797	0,0236
$EQM = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i.pred} - Y_{i.exp})^2}{N}$	0,1208	0,0013
$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i.exp} - Y_{i.pred})^2}{N}}$	0,3476	0,0357

REQM: racine de erreur quadratique moyenne ; EQM: erreur quadratique moyenne; ERP: écart relatif en pourcentage.

Les résultats montrent que le modèle RNA est plus performant que le modèle MSR, indiquant que le modèle RNA a une capacité d'approximation très élevée par rapport au modèle MSR pour la prédiction de VIU.

La [figure III. 23](#) montre la comparaison entre la distribution des résidus pour les valeurs prédites et réels des deux méthodes MSR et RNA. Les résultats tracés sur la figure montrent

que les fluctuations des résidus de la méthode RNA sont relativement faibles et régulières par rapport à MSR. Ce qui nous permet de dire que la méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA) est beaucoup plus puissante lorsque cette dernière est assistée par un plan d'expérience sous prétexte de la limite des expériences pour l'apprentissage.

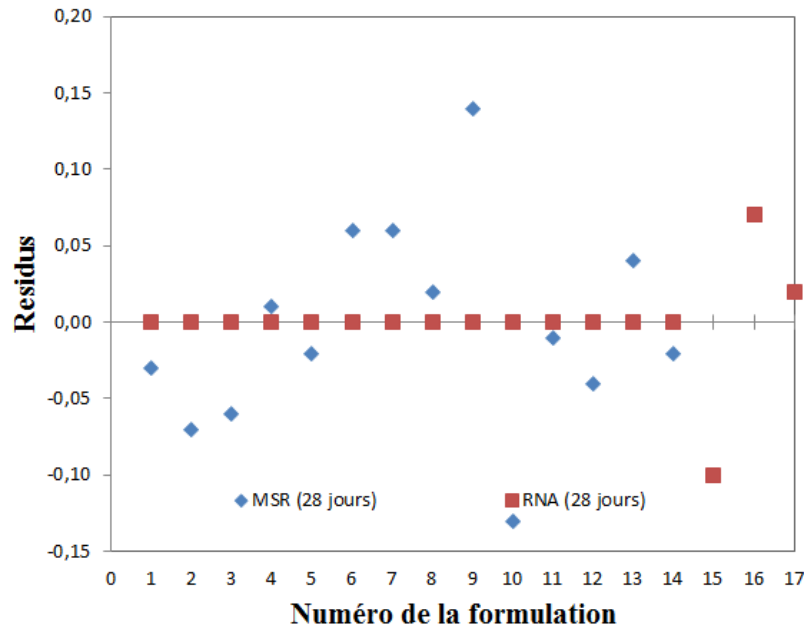


Figure III. 23. Comparaison entre la distribution des erreurs résiduelles obtenue par les modèles MSR et RNA.

III.7 CONCLUSION

La campagne expérimentale mener durant cette étude, nous a permis d'une part d'étudier l'influence des paramètres d'entrer à savoir : le dosage en ciment, le pourcentage des GBRs et l'affaissement sur les propriétés du béton frais et durci. et d'autre part, modéliser les réponse par la méthode des surfaces et les réseaux de neurones artificiels de réponse pour prédire les propriétés étudier du béton.

Les résultats obtenus nous ont permis de conclure ce qui suit:

- Le remplacement du gravier naturel par du gravier recyclé affecte les propriétés du béton à l'états frais et durci.
- L'utilisation des modèles ANN et RSM, basés sur des résultats expérimentaux a montré qu'elles sont des modèles utiles et efficaces pour prédire les propriétés du béton.
- L'utilisation des méthodes ANN et RSM nous permet d'acquérir plus d'informations avec un minimum d'essais.

- Les résultats de comparaison entre les deux méthodes montrent que la méthode ANN est beaucoup plus performante que la méthode RSM avec un bon coefficient de corrélation (R^2) proche de 1

A decorative graphic element consisting of several teal-colored rectangular blocks of varying sizes and orientations, arranged in a stepped, L-shaped pattern. The blocks are positioned to the left and above the text.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le recyclage des matériaux de construction dans la fabrication de nouveaux matériaux de construction constitue une nouvelle avancée dans l'industrie de la construction.

Les principales caractéristiques des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels sont principalement la pâte de ciment adhérent et la porosité importante. Ces caractéristiques influent considérablement sur les performances du béton, rendant la prédiction des propriétés du béton plus compliquée.

Le but de ce travail de thèse était d'étudier l'influence du gravier du béton recyclé sur les propriétés du béton et cela par la prédiction de ces propriétés par la méthode des surfaces de réponse et des réseaux de neurones artificiels.

Pour mener à terme ce travail de thèse, nous avons procédé comme suit :

Dans un premier temps, une étude bibliographique est faite sur les propriétés des granulats recyclés à savoir : la zone de transition interfaciale (ZTI), la densité et la porosité ainsi que l'absorption d'eau et aussi l'influence de ces granulats recyclés à leurs tours sur les propriétés du béton à l'état frais et durci. Puis, nous avons exposé les deux méthodes de prédiction utilisées dans cette thèse qui sont la méthode des surfaces de réponses et la méthode des réseaux de neurones artificiels.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les caractéristiques des matériaux utilisés dans un premier temps, par la suite nous avons mis en place un programme expérimental à l'aide de la méthodologie des plans d'expérience en choisissant le plan central composite. Au final, nous avons présenté les différents essais utilisés dans notre travail de thèse

Enfin, le troisième chapitre nous l'avons consacré à l'analyse et discussion des résultats de l'étude

Les principaux résultats déduits de ces travaux sont les suivants :

- Les résultats de l'affaissement montrent que la quantité d'eau totale pour atteindre ce dernier est considérablement affectée par les facteurs d'entrées. Cependant, l'influence des GBRs sur la quantité d'eau totale s'avère très important par-rapport aux autres facteurs avec une valeur $p < 0,0001$.

- L'incorporation des GBRs dans la fabrication du béton réduit la masse volumique du béton frais vu que la masse volumique des GBRs est inférieure à celle des GN.
- Le remplacement du gravier naturel par du gravier recyclé nuit sur la résistance à la compression du béton. En effet, on constate que la résistance à la compression à 7, 28 et 56 jours diminue de 22,62 à 18,56, 34,91 à 28,70 et 37,77 à 32,26 respectivement avec l'augmentation du GBR de 0 à 100% pour une teneur en ciment égale à 350kg /m³ et un affaissement de 5cm.
- Les résultats de la résistance à la traction par fendage montrent que l'influence des GBR sur la résistance à la traction est plus importante que l'influence de l'affaissement, ce qui peut être confirmé par les valeurs p qui sont de l'ordre de 0,0004 pour X₂ et 0,0200 X₃
- Les résultats de la vitesse d'impulsion ultrasonique montrent que les valeurs des mesures sont relativement proches les unes des autres, et cela affecte la modélisation de la vitesse d'impulsion ultrasonique par la méthode MSR. Cependant, la méthode RNA prédit efficacement cette dernière vue sa capacité élevée d'approximation.
- L'utilisation des modèles ANN et RSM, basés sur des résultats expérimentaux a montré qu'elles sont des modèles utiles et efficaces pour prédire les propriétés du béton.
- L'utilisation des méthodes ANN et RSM nous permet d'acquérir plus d'informations avec un minimum d'essais.
- Les résultats de comparaison entre les deux méthodes montrent que la méthode ANN est beaucoup plus performante que la méthode RSM avec un bon coefficient de corrélation (R²) proche de 1.

La présente étude ouvre sur d'autres perspectives à savoir :

- Analyse et modélisation du comportement du béton vis-à-vis la résistance au feu
- Analyse et modélisation du comportement du béton vis-à-vis les phénomènes de durabilités.
- Ajout d'un adjuvant superplastifiant comme quatrième facteur et étude de son influence sur les propriétés du béton
- Optimisation multi-objective des propriétés du béton pour déterminer la formulation optimal.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abd Elhakam, A., Mohamed, A.E., Awad, E., 2012. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Constr. Build. Mater.* 35, 421–427. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.013>
- Abdessalem, C., 2007. Optimisation des procédés de mise en forme par les reseaux de neurones artificiels 143.
- AND Agence Nationale des déchets, 2012. Rapport national sur l'état et l'avenir de l'Environnement.
- Assesment, L.R., 2011. Contribution des données accélérométriques de KiK- Net à la prédiction du mouvement sismique par l'approche neuronale avec la prise en compte des effets de site Résumé.
- Belebchouche, C., 2014. Etude expérimentale du comportement des matériaux cimentaires exposés à des environnements chimiquement agressifs et modélisation de la lixiviation. UNIVERSITE A.MIRA-BEJAIA.
- Bernier, G., 2004. Formulation des bétons. *Tech. l'ingénieur*.
- Bouarroudj, M.E., 2019. Utilisation de matériaux naturels modèles pour la formulation de mortier contenant des sables et des fines de granulats recyclés Mohamed Elkarim Bouarroudj To cite this version : HAL Id : tel-02497234 Génie Civil par Mohamed ElKarim Bouarroudj Titre de la 169.
- Boudjeniba, N., 2006. Optimisation de la synthèse enzymatique d'esters de sucres par la méthodologie des plans d'expériences.
- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S.K., Barai, S. V., 2011. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Mater. Struct. Constr.* 44, 205–220. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9620-x>
- Chamekh, A., 2010. Optimisation des procédés de mise en forme par les réseaux de neurones artificiels Abdessalem Chamekh To cite this version : HAL Id : tel-00445341.
- Corinaldesi, V., 2011. Structural concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate: From investigation to design. *Adv. Civ. Eng.* 2011, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2011/283984>
- Dahmoune, F., Remini, H., Dairi, S., Aoun, O., Moussi, K., Bouaoudia-Madi, N., Adjeroud, N., Kadri, N., Lefsih, K., Boughani, L., Mouni, L., Nayak, B., Madani, K., 2015. Ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from *P. lentiscus* L. leaves: Comparative study of artificial neural network (ANN) versus degree of experiment for prediction ability of phenolic compounds recovery. *Ind. Crops Prod.* 77, 251–261.
- de Brito, J., Robles, R., 2010. Recycled aggregate concrete (RAC) methodology for estimating its long-term properties. *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 17, 449–462.
- de Juan, M.S., Gutiérrez, P.A., 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* 23, 872–877.

- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimbre, R., 2010. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cem. Concr. Compos.* 32, 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.004>
- Demir, F., 2008. Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete by artificial neural networks. *Constr. Build. Mater.* 22, 1428–1435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.004>
- Dilbas, H., Şimşek, M., Çakir, Ö., 2014. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. *Constr. Build. Mater.* 61, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.057>
- Droesbeke, J.-J., Fine, J., Gilbert Saporta, 1997. *Plans d'expériences: applications à l'entreprise.*
- Duan, Z.H., Kou, S.C., Poon, C.S., 2013. Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks. *Constr. Build. Mater.* 40, 1200–1206.
- Eric, D., Patrick, N., 1991. *Neural Networks.* Macmillan.
- Etxeberria, M., Marí, a. R., Vázquez, E., 2007a. Recycled aggregate concrete as structural material. *Mater. Struct.* 40, 529–541. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5>
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M., 2007b. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* 37, 735–742.
- Ferreira, L., de Brito, J., Barra, M., 2011. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Mag. Concr. Res.* 63, 617–627.
- Fisher, R.A., 1925. *Statistical Methods for Research Workers,* *Agronomy Journal.* <https://doi.org/10.2134/agronj1945.00021962003700030011x>
- Fonseca, N., De Brito, J., Evangelista, L., 2011. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cem. Concr. Compos.* 33, 637–643. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.002>
- Gómez-Soberón, J.M., 2002. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.* 32, 1301–1311. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00795-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00795-0)
- Gonzalez-Fonteboa, B., Martinez-Abella, F., 2008. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. *Materials and mechanical properties.* *Build. Environ.* 43, 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.008>
- González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., Carro-López, D., 2016. Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. *Mater. Constr.* 66. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.06415>
- Goupy, J., 2016. *Modélisation par les plans d'expériences : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur.* Tech. l'ingénieur Méthodes Mes. TIB419DUO.
- Goupy, J., Creighton, L., 2016. *Introduction aux plans d'expériences,* 3rd ed.

- Hammoud, D., 2017. Thèse Apprentissage Automatique dans un Agent. Université Mentouri Constantine.
- Hammoudi, A., Moussaceb, K., Belebchouche, C., Dahmoune, F., 2019. Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119>
- Iso, N.F.E.N., 2007. Norme Européenne., 2007. Norme Européenne.
- Katz, A., 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cem. Concr. Res.* 33, 703–711. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01033-5)
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S.K., Nayak, S., Dutta, S.C., 2017. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Constr. Build. Mater.* 131, 721–740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>
- Kou, S.-C., Poon, C.-S., 2015. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 77, 501–508. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.035>
- Kou, S.C., Poon, C.S., 2013. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cem. Concr. Compos.* 37, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011>
- Kou, S.C., Poon, C.S., 2008. Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. *Mag. Concr. Res.* 60, 57–64. <https://doi.org/10.1680/mac.2007.00052>
- Kwan, W.H., Ramli, M., Kam, K.J., Sulieman, M.Z., 2012. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Constr. Build. Mater.* 26, 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059>
- Laurene, F., 1992. FONDAMENTALS OF NEURAL NETWORKS: ARCHITECTURES, ALGORITHMS AND APPLICATIONS, Internatio. ed.
- Li, J., Xiao, H., Zhou, Y., 2009. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 1287–1291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.019>
- Łukasz, S., Magdalena, M., Piech, M., Gardynik, A., 2019. Hybrid ultrasonic-neural prediction of the compressive strength of environmentally friendly concrete screeds with high volume of waste quartz mineral dust. *J. Clean. Prod.* 212, 727–740.
- Macro, C., 2013. Optimization Methods : From Theory to Design. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31187-1>
- Marcos, S., Personnaz, L., Dreyfus, G., 1987. réseaux de neurones Réseaux de neurones pour le filtrage non linéaire adaptatif Neural Networks for Non-Linear Adaptive Filtering 8.
- Marvin, M., Seymour, P., 1969. Perceptrons An introduction to computational geometry by. The MIT Press.
- McClelland, J.L., Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., 1986. The Appeal of Parallel Distributed

- Processing. Readings Cogn. Sci. A Perspect. from Psychol. Artif. Intell. 52–72. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-1446-7.50010-8>
- Mcculloch, W.S., Pitts, W., 1990. A logical calculus nervous activity 52, 99–115.
- Mefteh, H., Kebaili, O., Oucief, H., Berredjem, L., Arabi, N., 2013. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. J. Clean. Prod. 54, 282–288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.009>
- Metropolitan, I., 2000. Recycled concrete-a new aggregate.
- Miren, E.L., 2004. Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. https://doi.org/10.1007/0-306-47975-3_6
- Nixon, P.J., 1978. Recycled concrete as an aggregate for concrete a review. Matériaux Constr. 11, 371–378. <https://doi.org/10.1007/BF02473878>
- Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., Kou, S.C., 2004. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. Cem. Concr. Res. 34, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8)
- Rahal, K., 2007. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. Build. Environ. 42, 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.033>
- Rao, A., 2005. Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete. Indian Institute of Technology Kanpur.
- Rao, A., Jha, K.N., Misra, S., 2007. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. Resour. Conserv. Recycl. 50, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.010>
- Rarljan, P., Stat, I., Science, A., 2007. Factorial and Fractional Factorial Designs With Randomization Restrictions - a Projective Geometric Approach.
- Richardson, A., 2013. Reuse of Materials and Byproducts in Construction, Green Energy and Technology.
- Rosenblatt, F., 1958. THE PERCEPTRON: A PROBABILISTIC MODEL FOR INFORMATION STORAGE AND ORGANIZATION. Psychol. Rev. 65, 386–408.
- Scheffé, H., 1963. The Simplex-Centroid Design for Experiments with Mixtures. J. R. Stat. Soc. Ser. B 25, 235–251. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1963.tb00506.x>
- Silva, R. V, Brito, J. De, Dhir, R.K., 2015. The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review. Eur. J. Environ. Civ. Eng. 19, 825–849.
- Suvash Chandra, P., 2011. Mechanical behaviour and durability performance of concrete containing recycled concrete aggregate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1471.6882>
- Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M., 2005. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. Cem. Concr. Res. 35, 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>
- Walter, T., 2009. Plans d'expérience: construction et analyses statistiques.

Werbos, P.J., 1975. BEYOND REGRESSION: NEW TOOLS FOR PREDICTION AND ANALYSIS IN THE BEHAVIORAL SCIENCES. Harvard University.

Widrow, Hoff, 1960. Adaptive Switching Circuits, Distribution.

Zega, C.J., Di Maio, A.A., 2009. Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. *Constr. Build. Mater.* 23, 2047–2052. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.017>

ANNEXE

Article publié dans le cadre de la thèse

Intitulé de la Publication: Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates

Intitule de la revue: CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS

ISSN: 0950-0618

Url de la revue/article: DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119

Indexation de la revue: Scopus

Facteur d'impact: 4,419

SJR: 1,491

Résumé

Le travail présenté dans ce manuscrit concerne la modélisation et la prédiction des propriétés du béton à base de béton recyclé par la méthode des surfaces de réponse et la méthode des réseaux de neurone artificiel. Pour ce faire, une campagne expérimentale a été faite suivant le plan composite central avec trois variables (teneur en ciment de 300 à 400 kg/m³, pourcentage du gravier recyclés de 0 à 100% et l'affaissement de 5 à 12 ± 1 cm). Les résultats en termes statistiques; écart relatif en pourcentage (ERP), erreur quadratique moyenne (EQM), racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R²) et coefficient de détermination ajusté (R²_{ajusté}), révèlent que les deux approches RNA et MSR sont des outils puissants pour la prédiction des propriétés de béton. De plus, les modèles RNA et MSR sont très bien corrélés aux données expérimentales. Cependant, le modèle de réseau neuronal artificiel montre une meilleure précision.

Mots clés: Granulats recyclé, Prédiction, Modélisation, Méthodologie surface de réponse (MSR), Réseau de neurone artificiel (RNA).

Abstract

The work presented in this manuscript concerns the modeling and prediction of the properties of concrete based on recycled concrete by the response surface methodology and the artificial neuron network method. To do this, an experimental campaign was made following the central composite plan with three variables (cement content from 300 to 400 kg/m³, percentage of gravel recycled from 0 to 100% and slump from 5 to 12 ± 1 cm). The results in statistical terms; Percentage Relative Deviation (RDP), Mean Square Error (MSE), Root Mean Square Error (RMSE), Coefficient of Determination (R²), and Adjusted Coefficient of Determination (R²_{adjusted}), reveal that both RNA and MSR approaches are powerful tools for prediction of concrete properties. In addition, the RNA and MSR models correlate very well with the experimental data. However, the artificial neural network model shows better accuracy.

Keywords: Recycled Aggregates, Prediction, Modelization, Response Surface Methodology, Artificial Neural Network.

الملخص

يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بنمذجة وتنبؤ خصائص الخرسانة المصنوعة من الخرسانة المعاد تدويرها بطريقة سطح الاستجابة وطريقة شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية. للقيام بذلك، تم إجراء حملة تجريبية وفقاً للخطة المركزية المركبة بثلاثة متغيرات (محتوى الأسمنت من 300 إلى 400 كجم / م³، والنسبة المئوية للحصى المعاد تدويره من 0 إلى 100٪ والهبوط من 5 إلى 12 ± 1 سم). النتائج من الناحية الإحصائية. النسبة المئوية للانحراف النسبي (RDP)، متوسط الخطأ المربع (MSE)، خطأ مربع متوسط الجذر (RMSE)، معامل التحديد (R²)، ومعامل التحديد المعدل (R²_{adjusted})، تكشف أن كلا من نهج RNA و MSR أدوات قوية للتنبؤ من خصائص الخرسانة. بالإضافة إلى ذلك، ترتبط نماذج RNA و MSR جيداً بالبيانات التجريبية. ومع ذلك، فإن نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية يظهر دقة أفضل.

الكلمات المفتاحية: الحصى المعاد تدويره، تنبؤ، النمذجة، منهجية استجابة السطح، الشبكات العصبية الاصطناعية