

ESTIMATION DE LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES BÉTONS PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

S. M. A. BOUKLI HACENE, F. GHOMARI, A. KHELIDJ, B. DERRAS

Laboratoire EOLE, Département de Génie Civil de la Faculté de Technologie,
Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, BP 230 Chetouane, Tlemcen 13000, Algérie
GeM (UMR CNRS 6183) – IUT de Saint-Nazaire, Université de Nantes,
58, rue Michel-Ange, BP 420, 44606 Saint-Nazaire Cedex, France
Département de Génie Civil, Université Dr. Moulay Tahar, Saïda

1. INTRODUCTION

Au niveau régional et national le béton est le matériau de construction utilisé par excellence au sein de tous les chantiers, aussi bien dans les secteurs du bâtiment que ceux des travaux publics ; il n'a pas de substitut économique et performant. Le compromis trouvé entre résistance mécanique, économie, esthétique et facilité de mise en œuvre, offre à ce matériau la première place dans la construction au niveau mondial. La qualité des constructions en béton est très liée à celle de ses constituants. Cependant, très peu d'études de recherche sont consacrées en Algérie, pour mettre l'accent sur les aspects liés à la composition des bétons en fonction de leurs emplois. La résistance est intimement liée aux caractéristiques intrinsèques et au dosage des différents matériaux qui composent le mélange.

Notre travail s'inscrit dans le cadre d'une thématique de recherche qui a pour objectif principal d'une part, l'étude de la qualité des bétons issus de matériaux locaux, à savoir : le ciment de Béni-Saf ainsi que les granulats de l'entreprise nationale Algérienne des granulats (E.N.G) et d'autre part, la constitution d'une banque de données sur les matériaux, les constituants et les bétons de la région de Tlemcen en vue de combler un manque quasi-total d'informations sur les aspects de la mécanique des bétons de la région.

Nous sommes partis de cet état de fait, en vue d'étudier, l'influence de la nature des constituants sur la qualité mécanique du mélange, en particulier la résistance à la compression. Dans un important programme expérimental où plus de 1600 éprouvettes cylindriques 16x32 cm ont été confectionnées, destiné à apprécier l'effet de plusieurs paramètres du composite qu'est le béton (quantité d'eau, quantité de ciment, rapport gravier/sable, teneur en air occlus) sur sa résistance à la compression, trente six mélanges ont été réalisés dans notre laboratoire avec les mêmes constituants.

Tous les essais pratiqués dans le programme expérimental préconisé ont été réalisés selon les normes nationales et internationales reconnues dans le domaine (NA, AFNOR et ASTM). Aussi, nous avons mesuré les caractéristiques du béton à l'état frais (ouvrabilité, air occlus, masse volumique) et à l'état durci (résistance à la compression) à l'aide d'essais destructifs.

Dans cet article, nous contribuons aussi à l'élaboration d'une relation entre l'affaissement, l'air occlus, l'eau et le dosage en ciment d'une part et la résistance à la compression à 28 jours d'autre part. Ce modèle utilise l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus conformément au programme expérimental. Ces données sont utilisées comme des paramètres d'entrée et de sortie du modèle neuronal.

2. PROVENANCE ET CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Nous avons utilisé dans cette étude un ciment à faible classe de résistance, il s'agit du CPJ CEM II/A 32,5 qui répond à la norme Algérienne NA 44, de la Société des Ciments de Béni-Saf appartenant à la wilaya de Ain-Temouchent. Pour la confection des différents bétons, nous avons utilisé l'eau potable distribuée par le réseau du service public de la Daira de Chetouane appartenant à la ville de Tlemcen. Les granulats utilisés proviennent de deux grandes carrières de la région de Tlemcen, en l'occurrence la carrière Djebel Abiod de Sidi Abdelli et la carrière Dhar El Mendjel d'El Malah qui appartiennent à l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG), ce choix est dicté par le fait que ce sont ces deux carrières qui approvisionnent principalement la région de part leur importance en production. Ces granulats calcaires concassés sont commercialisés en tant que classes granulaires : sable 0/3 et gravillons de classes 3/8, 8/16, 16/25.

Les analyses concernant la composition chimique, la composition de Bogue minéralogique et les caractéristiques physico-mécaniques du ciment ainsi que les propriétés de ces granulats ont été réalisées au sein de notre laboratoire. Les carrières Djebel Abiod et Dhar El Mendjel produisent des sables propres qui répondent aux exigences de la norme NA 455. Dans le cadre de notre étude, nous les avons utilisés tel quel. Nous n'avons pratiqué aucun traitement (lavage) pour la réalisation des formulations de bétons préconisés et ce malgré leurs modules de finesses respectifs grossiers ainsi que les légères discontinuités que présentent les courbes granulométriques. En revanche, les graviers des deux carrières présentent une propreté satisfaisante ($< 3\%$), une forme favorable ($C_f < 30\%$) ainsi qu'une bonne résistance aux chocs et à l'usure, avec un coefficient $LA < 40\%$ et $MDE < 35\%$ [BOU 07], [BOU 09].

3. PLAN EXPÉRIMENTAL

Connaissant l'importance que revêt le dosage en ciment et le rapport E/C sur les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci, nous avons choisi de faire varier ces deux paramètres selon l'organigramme présenté en figure 1, ce qui nous a conduit à la réalisation de 36 formulations de béton.

Nous avons utilisé aussi deux modes de maturation ; les éprouvettes cylindriques 16x32 cm ont été conservés après confection et démoulage soit à l'air libre soit en immersion totale dans l'eau (NA 426).

La reproductibilité de l'essai de compression est très difficile à obtenir, étant donné que les risques d'erreurs concernant cet essai sont multiples : il suffit souvent que l'une des spécifications ne soit pas suivie au cours de l'essai, pour obtenir un résultat aberrant. On se concentre ici sur des essais réalisés avec rigueur et pour lesquels une étude statistique peut être conduite. C'est pourquoi nous avons étudié expérimentalement pour chaque paramètre vingt éprouvettes au lieu des trois conventionnelles. Chaque mesure de résistance est donc la valeur moyenne obtenue sur environ une vingtaine d'éprouvettes et ceci après avoir rejeté les quelques valeurs aberrantes en utilisant le test tabulé pour la loi normale.

Les bétons réalisés ont été confectionnés conformément aux normes en vigueur [AFN 02], [NOR 92]. Les matériaux préalablement séchés dans l'étuve à $110 \pm 5^\circ\text{C}$, sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre suivant : graviers (16/25, 8/16, 3/8), ciment, sable et eau. Après un malaxage à sec de l'ordre de 1 minute, on ajoute l'eau de gâchage et on poursuit le malaxage pendant 2 minutes. La mise en place dans les moules cylindriques 16x32 cm a eu lieu soit, par vibration ou par piquage, en fonction des résultats de l'essai d'affaissement et conformément aux normes NF P 18-421, 422, 423.

Dans le cadre de cette étude nous avons considéré le rapport E/C constant et non pas l'ouvrabilité du béton.

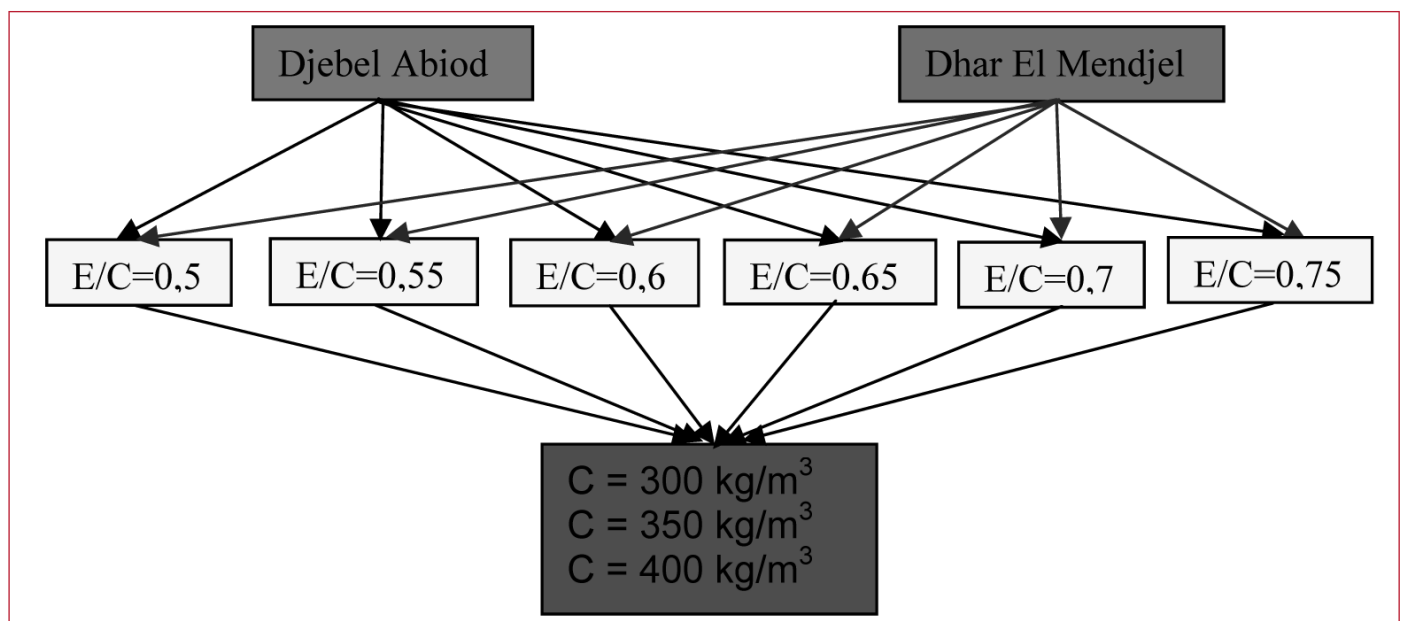


Figure 1. Organigramme du programme expérimental

	Sable + Gravillons (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)
Béton DA (carrière Djebel Abiod)	1731,1	350	210
Béton DM (carrière Dhar El Mendjel)	1772,6	350	210

Tableau 1. Composition des bétons

La campagne d'essais comprend deux parties : la première concerne l'optimisation du squelette granulaire des bétons. Les bétons sont formulés dans un premier temps par la méthode Dreux-Gorisse [DRE 95], puis optimisés en utilisant la méthode Baron-Lesage [BAR 76], [BAR 96], qui consiste à déterminer le rapport gravillon/sable (G/S) optimum. Le rapport G/S optimum est celui qui donne, à pâte constante, l'affaissement le plus élevé. Dans la deuxième partie de la campagne d'essais, les bétons sont formulés sur la base des squelettes granulaires optimisés précédemment, en faisant varier le rapport E/C ainsi que le dosage en ciment. Parmi les propriétés étudiées nous ne présentons que les résultats concernant les résistances à la compression à 28 jours, mesurés au laboratoire sur éprouvettes cylindriques normalisés.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Optimisation des proportions du squelette granulaire

Nous avons déterminé le rapport G/S optimum pour deux bétons dont les compositions sont précisées dans le tableau 1.

Suivant la méthode Baron-Lesage, nous avons fabriqué plusieurs gâchées pour chaque béton et le rapport G/S a été modulé de 1,4 à 2,2. La figure 2 montre que le rapport optimum expérimental (pour lequel l'affaissement est maximal) est de 1,7 pour le béton DA et il est de 1,6 pour le béton DM.

4.2 Variabilité des résistances

Pour mettre en exergue, l'étude statistique élaborée à partir des résultats de résistances à 28 jours, nous avons constaté que tous les résultats obéissent à la loi normale et nous présentons sur les figures 3 et 4, à titre d'exemple, l'histogramme de répartition des résistances, ainsi que la distribution de ces résistances suivant la loi normale et ceci pour E/C = 0,55, C = 350 kg/m³, granulats de Djebel Abiod et une cure à l'eau.

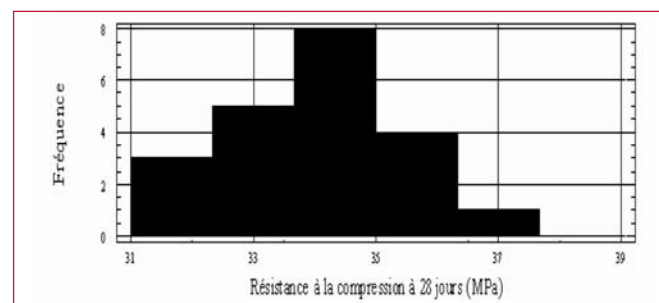


Figure 3. Histogramme de répartition des résistances à 28j (Djebel Abiod).

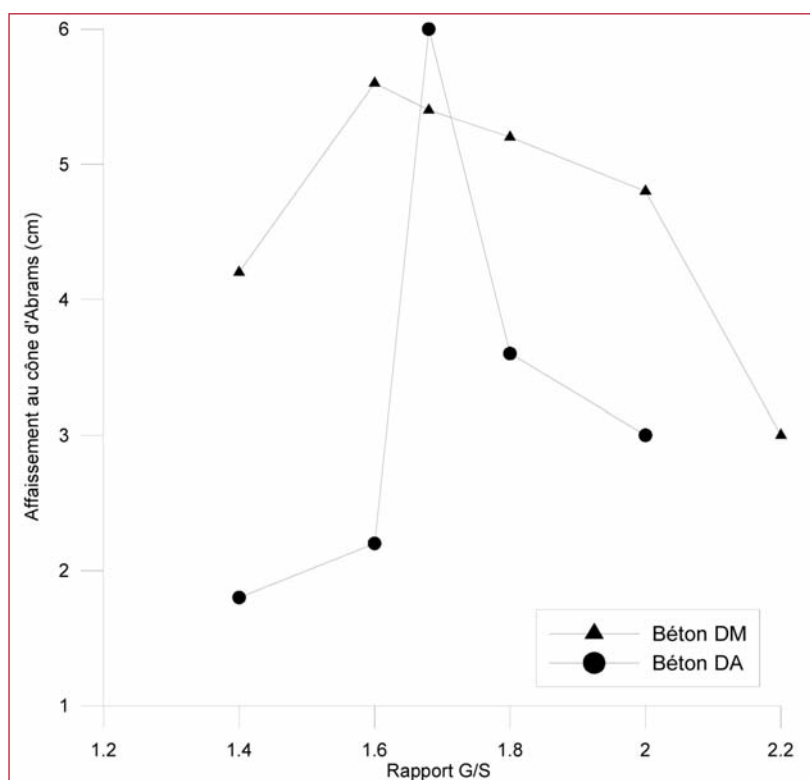


Figure 2. Optimisation du rapport G/S en fonction de l'affaissement.

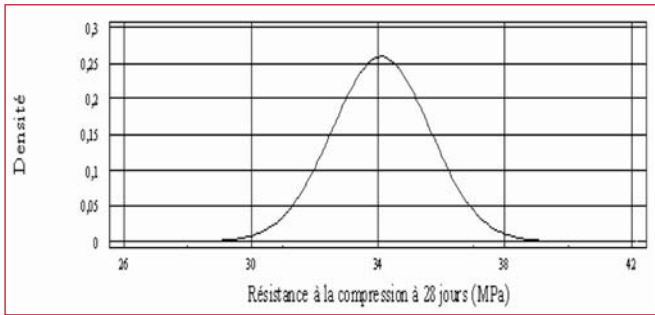


Figure 4. Distribution des résistances à 28j selon la loi Normale (Djebel Abiod).

La figure 3, montre la présence d'une dispersion des résistances obtenues qui est pratiquement inévitable mais qui reste dans le domaine de l'acceptable ($\sigma < 5\%$). Ceci est dû principalement au fait qu'une gâchée entière ne permettait la réalisation que de quatre éprouvettes en même temps. De plus, la confection des 40 éprouvettes ne se faisait pas tout à fait dans les mêmes conditions expérimentales. La multiplication des gâchées pour avoir la totalité des éprouvettes étudiées ne permettait pas à notre avis une répétabilité des corps d'épreuves.

4.3 Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression des bétons

En pratique, le rapport E/C est le facteur le plus important qui conditionne la résistance à la compression d'un béton [POP 95]. Comme on le voit sur les figures 5 et 6, le dosage en ciment pour la classe choisie n'offre pas de différences notables en matière de résistance à la compression.

sion. Dans ces conditions un dosage de 350 kg/m^3 reste suffisant et par conséquent économique. Ce qui justifie l'utilisation d'un modèle en puissance pour les trois dosages testés. Ces figures montrent aussi la relation pratique existante entre la résistance et le rapport E/C, il s'agit de courbes caractéristiques de bétons à base d'un ciment de type CPJ CEM II/A 32,5. Les valeurs expérimentales s'ajustent convenablement selon une loi de puissance, conformément à la règle générale formulée par René Férét en 1896 ainsi que celle établie par Duff Abrams en 1919. Sous sa forme la plus complète, la relation de férét s'écrit comme suit :

$$f_c = k_f f_{mc} \left[\frac{v_c}{v_c + v_e + v_a} \right]^2 \quad [1]$$

ou f_c est la résistance du béton à l'échéance considérée, f_{mc} la résistance normale du ciment à la même échéance, v_c, v_e, v_a les volumes respectifs de ciment, d'eau et d'air occlus rapportés au volume du béton ; k_f est un coefficient. Dans notre cas $f_{mc} = 48,7 \text{ MPa}$ et $k_f = 5$.

Dans le cadre de notre travail, les volumes d'air ont été mesurés avec un aéromètre à béton (norme NF P 18-353) et l'équation que nous avons utilisé pour le tracer de la courbe de férét est la suivante :

$$f_c = \frac{243,5}{\left(1 + 2,98 \left(\frac{E + V_a}{C} \right) \right)^2} \quad [2]$$

Les figures 5 et 6 montrent que les valeurs des résistances à la compression calculées par la relation de férét sont

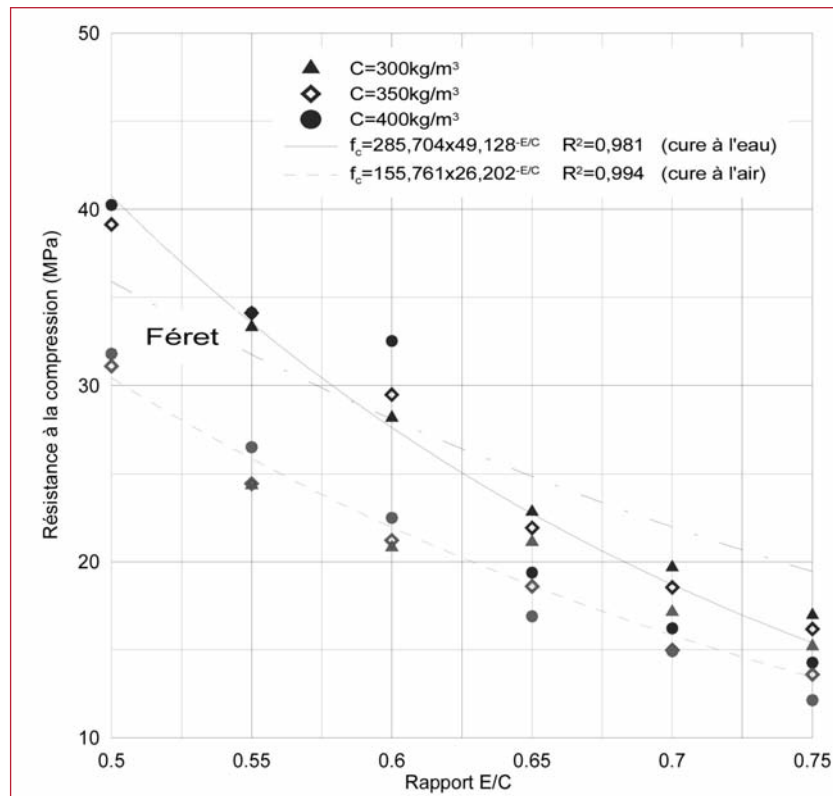


Figure 5. Relation entre la résistance à la compression à 28j et le rapport eau/ciment (Djebel Abiod).

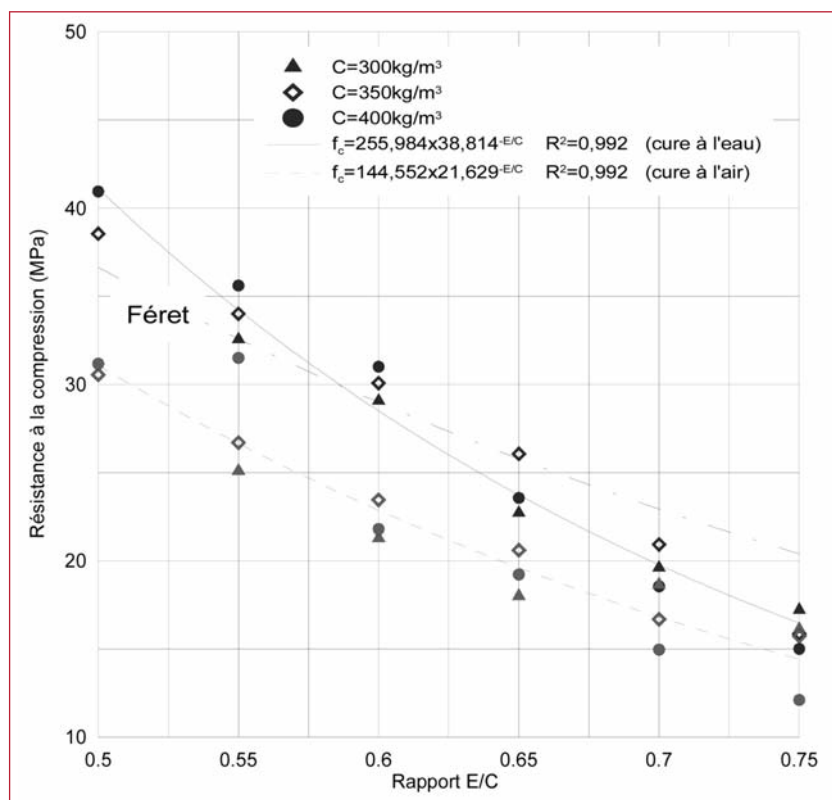


Figure 6. Relation entre la résistance à la compression à 28j et le rapport eau/ciment (Dhar El Mendjel).

légèrement différentes de celles effectivement mesurées, ceci peut être dû à l'incertitude de l'aéromètre à béton qui est de l'ordre de 0,5 %. A cela s'ajoute une autre incertitude, difficile à estimer : en effet, ce que l'on mesure est le volume d'air du béton en place dans l'aéromètre et non celui du béton en place dans les éprouvettes sur lesquelles nous mesurons la résistance. Or le volume d'air, sensible aux conditions de malaxage et de mise en place, peut différer d'un cas à l'autre.

Les résultats obtenus permettent d'observer que la résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue. Depuis bientôt cent seize ans que la règle de Féret a été proposée, nous nous contentons de montrer ici, qu'elle permet une très bonne prévision de la résistance à la compression des bétons préparés avec différents rapports E/C (Fig. 5 et 6). Elle sous-estime toutefois les résistances pour $f_c > 29$ MPa et les surestime pour $f_c \leq 29$ MPa. Cela permet d'être en sécurité pour la moyenne partie des bétons ou $f_c \geq 25$ MPa (valeur exigée par l'Organisme National Algérien de Contrôle Technique de la Construction (CTC)).

4.4. Architecture du réseau de neurones artificiel (RNA)

Dans ce travail, nous avons préconisé un réseau de neurone artificiel (RNA) de type Perceptron multicouches avec la règle de rétro-propagation du gradient pour l'apprentissage dont l'objectif est d'estimer la résistance à la compression du béton. Les entrées du RNA sont l'affaissement, l'air occlus, le dosage en eau et le dosage en ciment.

Par ailleurs, la seule sortie du réseau est la résistance à la compression à 28 jours.

Pour l'élaboration du présent RNA, nous avons utilisé 70 % de la banque de données dans la phase apprentissage, 15 % pour la validation croisée et 15 % des données sont gardées pour la phase test.

Pour ce faire, nous avons choisis une architecture unique pour RNA en utilisant une seule couche cachée [HEC 91], [WAN 99], [NIH 00] -pour éviter le surapprentissage du réseau- dont le nombre de neurones est égale à cinq, soit la somme des neurones d'entrée et de sortie. En outre, la mise à jour des poids synaptiques se fait par paquets ; c'est-à-dire après chaque itération. Par ailleurs, la fonction tangente hyperbolique est choisie comme fonction d'activation de la couche cachée avec une fonction linéaire pour la couche de sortie.

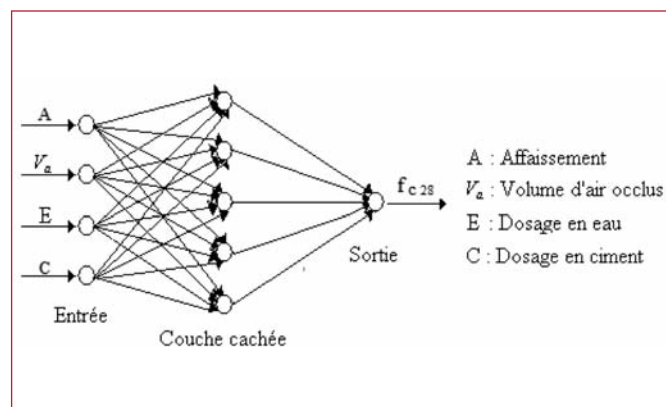


Figure 7. Réseau de neurones présenté par les paramètres d'entrées, la couche cachée et le paramètre de sortie.

4.4.1 Comparaison entre valeurs estimées par le RNA et mesurées de la résistance à la compression des bétons

Une comparaison a été faite entre les résistances à la compression obtenues par le modèle neuronal et celles effectivement mesurées. Les résultats de l'apprentissage et la validation croisée sont présentés sur les figures 8a et 8b. Ces

figures révèlent une très forte corrélation avec des coefficients de détermination $R^2 = 0,957$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,941$ pour la validation. Ces coefficients de détermination nous renseignent sur la bonne qualité globale de l'apprentissage et de la validation. Les erreurs quadratiques, pour leurs parts, sont très petites et sont de l'ordre de 0,01.

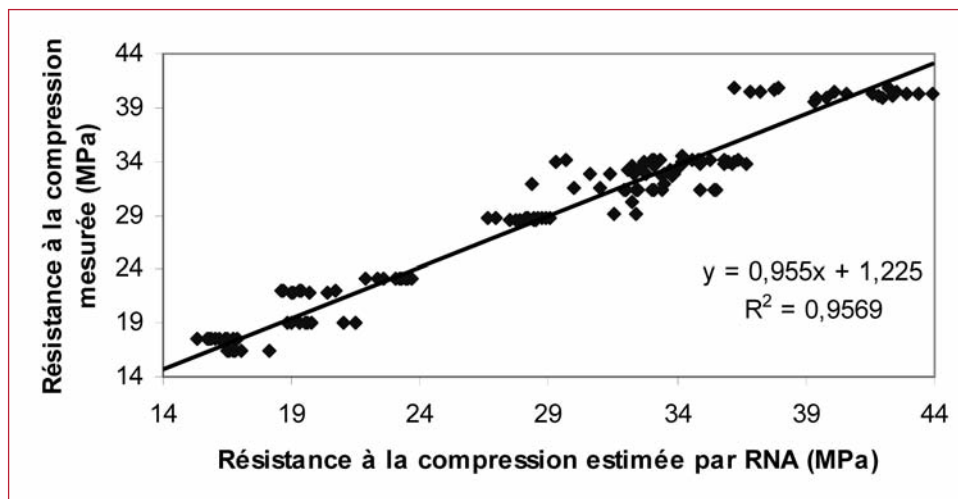


Figure 8a. Résistances à la compression estimées et mesurées (phase apprentissage)

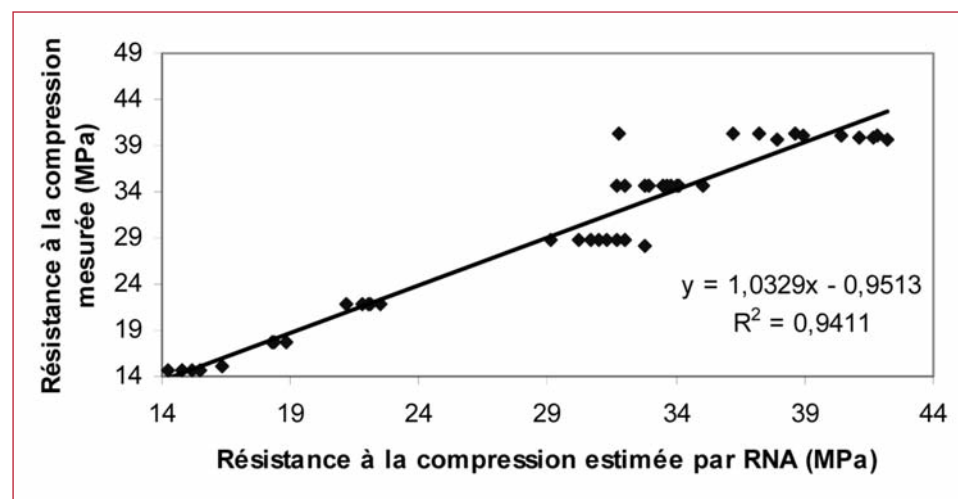


Figure 8b. Résistances à la compression estimées et mesurées (phase de validation croisée)

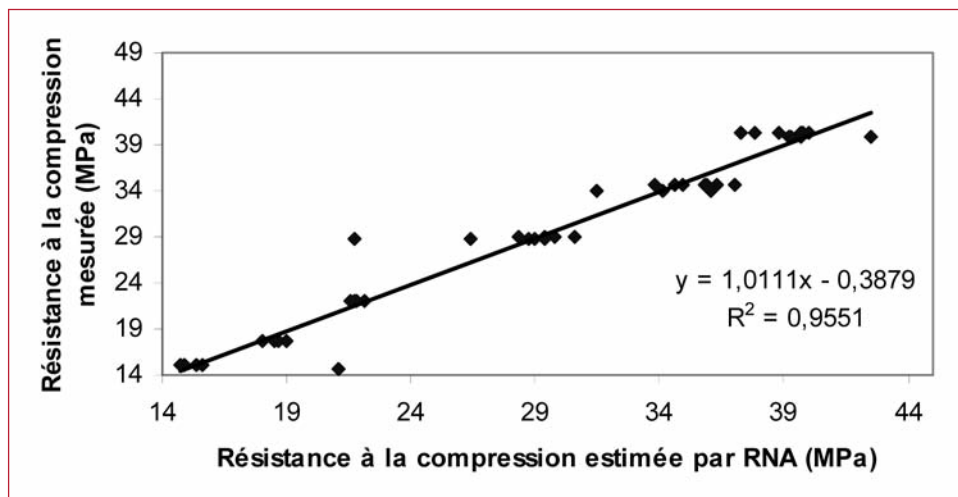


Figure 9. Résistances à la compression estimées et mesurées (phase test)

Par la suite, un test a été effectué en faisant toujours la comparaison entre les résistances à la compression mesurées et celles estimées par le modèle neuronal, en utilisant des résistances à la compression qui n'appartiennent pas à la base de données de l'apprentissage et de la validation. Le test a été fait avec 15 % de la base de données totale. Cette comparaison (figure 9) révèle une très forte corrélation avec $R^2 = 0.955$. En outre, l'erreur quadratique est de l'ordre de 0,01.

5. CONCLUSIONS

A l'issue de la campagne d'essais, qui a constitué un travail expérimental considérable (environ 1600 éprouvettes 16x32 cm ont été confectionnées), on peut dresser la liste de conclusions suivantes :

- Dans le cadre de l'optimisation des proportions du squelette granulaire, le rapport optimum expérimental G/S trouvé (pour lequel l'affaissement est maximal) est de 1,7 pour le béton DA et il est de 1,6 pour le béton DM.
- Les éprouvettes conservées à l'eau ont présenté des résistances plus élevées que celles conservées à l'air suite à une hydratation plus complète du ciment. Le rapport entre la résistance à 28 jours (cure à l'air) et la résistance conventionnelle à 28 jours (cure à l'eau) est en moyenne égale à 0,7.
- Selon les normes en vigueur sur l'application des cures au béton et en considérant la classe faible du ciment utilisé ce sont les rapports E/C de 0,5, 0,55 et 0,6 qui offrent aux bétons les valeurs de résistances supérieures à 25 MPa (valeur exigée par l'Organisme National Algérien de Contrôle Technique de la Construction (CTC)) pour une cure à l'eau. Si le béton sèche à l'air libre, seuls les rapports E/C de 0,5 et 0,55 respectent cette exigence. Il est donc très important d'utiliser une cure soit par protection du béton contre le séchage par exemple par une bâche, soit par vaporisation de l'eau au jeune âge quand on utilise des rapports E/C très faibles.
- Les bétons mis au point couvrent une gamme de résistance extrêmement large depuis 12,1 MPa jusqu'à des bétons de 40,9 MPa destinés pour les structures en béton armé de bâtiment ou de travaux publics et ce pour une classe de résistance de 32,5.
- Pour un rapport E/C donné, les résistances à la compression ne semblent pas être affectées par le dosage en ciment (300 kg/m³, 350 kg/m³ et 400 kg/m³), ceci est valable pour tous les rapports E/C examinés. Dans ces conditions, un dosage de 350 kg/m³ reste suffisant et par conséquent économique.
- Les valeurs expérimentales des résistances s'ajustent convenablement selon une loi en puissance, conformément à la règle générale formulée par René Férét en 1896 ainsi que celle établie par Duff Abrams en 1919. La règle de Férét permet une très bonne prévision de la résistance à la compression de bétons préparés avec différents rapports E/C. Elle sous-estime toutefois les résistances pour

$f_c > 29$ MPa et les surestime pour $f_c \leq 29$ MPa. Cela permet d'être en sécurité pour la moyenne partie des bétons ou $f_c \geq 25$ MPa (valeur exigée par le CTC).

- La validation du présent modèle est réalisée avec des données non utilisées auparavant. Cette validation est effectuée en confrontant les valeurs des résistances estimées par le réseau de neurones artificiels et celles effectivement mesurées. Les résultats obtenus montrent, la convergence des résistances à la compression à 28 jours estimées vers celles mesurées. L'erreur relative entre les résistances à la compression à 28 jours estimées par le réseau de neurone artificiel (RNA) et celles mesurées n'excède guère une moyenne de 5,7 %.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [AFN 02] AFNOR. , Béton et constituants du béton. Tome 1 : Spécifications du béton et de ces constituants, 5e édition, 2002, Paris, 431 p.
- [BAR 96] BARON J., OLLIVIER J.P., Les bétons bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, Paris, 1996, p.523.
- [BAR 76] BARON J., LESAGE R. , La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier, Rapport de recherche des LCPC N° 64, Paris, Décembre 1976.
- [BOU 07] BOUKLI HACENE M.A., GHOMARI F. "Study of the compression resistance of local concretes", Twelfth International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering, ICSGE, Cairo, Egypt, 10-12 December, 2007, pp.1005-1014.
- [BOU 09] BOUKLI HACENE M.A., GHOMARI F., KHELIDJ A., "Compressive Strengths of Concrete Formulated with Algerian Local Materials", Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 3, No. 2, 2009, April, pp.103-117.
- [DRE 95] DREUX G., FESTA J., Nouveau guide du béton et ses constituants, éditions Eyrolles, 1995, Paris, p.317.
- [HEC 91] HECHT – NIELSEN R., Theory of the Back - Propagation Neural Network, in: H. Wechsler (Ed.), Neural Networks for Perception, Vol. 2, Academic Press, San Diego, CA, 1991, pp. 65 — 93.
- [NIH 00] NI HONG-GUANG, WANG JI-ZONG, "Prediction of compressive strength of concrete by neural networks", Cement and Concrete Research, 30 (2000), pp. 1245-1250, June.
- [NOR 92] NORMES ALGERIENNES ; édition et diffusion Abou Hamou Moussa, Alger, 1992.
- [POP 95] POPOVICS S., POPOVICS J., "Computerisation of the Strength versus W/C Relationship", Concrete International, vol. 17, N°4, 1995, pp. 37-40, April.
- [WAN 99] WANG J. - Z., NI H. - G., "Prediction of compressive strength of cement based upon BP neural networks", J Chin Ceram Soc 27 (4) (1999) pp. 408 — 414.