

République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique  
Université Hassiba Ben Bouali de Chlef



Faculté de Génie Civil et d'Architecture)  
(Département de Génie Civil)

## Thèse

En vue de l'obtention du  
Diplôme de **Doctorat LMD**  
Spécialité: **Génie civil**  
Option: **Géomatériaux**

Présenté par:

Mr: **BELALIA DOUMA Omar**  
Master en Génie Civil

## Thème

***Application de la technologie de l'information  
pour la prévision des propriétés des bétons***

*Soutenue le 29/09/2016 devant les membres de jury :*

KENAI Said	Professeur à l'Université de Blida	Président
ABED Mohamed	Professeur à l'Université de Blida	Examineur
EZZIANE Karim	Professeur à l'Université de Chlef	Examineur
TAGNIT-HAMOU Arezki	Professeur à l'Université de Sherbrooke	Examineur
GHRICI Mohamed	Professeur à l'Université de Chlef	Rapporteur
BOUKHATEM Bakhta	Maitre de Conférences (A) à l'Université de Chlef	Co-Rapporteur

# *Dédicaces*

*Je dédie cette Thèse à MES CHERS PARENTS*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.*

*Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.*

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au laboratoire de Géomatériaux de l'université Hassiba Ben-Bouali à Chlef et au laboratoire de Matériaux Cimentaires Alternatifs de l'Université de Sherbrooke au Canada.

Je remercie mon directeur de thèse, Monsieur Ghrici Mohamed, professeur à l'Université de Chlef, pour avoir été à l'origine et surtout encadrant principal de mes travaux de recherche. Je lui adresse mes remerciements les plus sincères pour m'avoir guidé, conseillé, encouragé et supporté durant toute la durée de la préparation de ma thèse, pour m'avoir appris à faire de la recherche et à travailler en groupe.

Je remercie aussi ma co-encadrante Dr. Boukhatem Bakhta, Maître de Conférences à l'Université de Chlef. Sa connaissance approfondie et son expérience scientifique ont été plus que déterminantes dans les orientations de mes travaux de recherche. J'ai bénéficié de son attention et de son écoute à chaque fois que le besoin s'est fait sentir.

Je tiens à remercier le professeur Arezki Taghni-Hamou qui m'a accueilli dans son laboratoire à l'université de Sherbrooke au Canada durant la période de mon stage de courte durée et qui a témoigné de l'intérêt pour mes travaux de modélisation. Sa connaissance du matériau béton et de la chimie du ciment, ainsi que ses nombreuses et fructueuses discussions à l'égard de mon projet ont été précieuses. Aussi pour sa proposition et sa prise en charge pour la réalisation d'un programme expérimental pour valoriser mes travaux de recherche et valider les modèles élaborés.

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude envers tous les membres de mon jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail : Dr. Said Kenai, Professeur à l'Université Saad DAHLAB de Blida, que je remercie d'avoir accepté de présider mon jury de thèse ; Dr. EZZIANE Karim, Professeur à l'Université de Chlef et Dr. ABED Mohamed, Professeur à l'Université de Blida d'avoir examiné ce travail.

Un grand merci à tous mes amis de l'université de Chlef et particulièrement Rédha Esselami et Redouane Rebouh. De plus, je remercie beaucoup le Docteur Ahmed Omran et toute l'équipe du laboratoire Béton et du laboratoire des Matériaux Cimentaires Alternatifs, avec qui j'ai eu la chance et le grand plaisir de travailler.

Je suis reconnaissant à l'ensemble des enseignants, du département de Génie Civil de l'université de Chlef et à tous les doctorants du laboratoire de Géomateriaux de l'université de chlef.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mes chers parents, mes frères et mes sœurs sans oublier Redhouane, que je considère comme membre de ma famille pour leur soutien continu et leur patience. Finalement je remercie tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de cette thèse.



# RESUMÉ

Ce travail consiste à appliquer la technique de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) pour prédire les différentes propriétés du Béton Auto-Plaçant (BAP) contenant des cendres volantes. Cette technique est utilisée en se basant sur les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature de plusieurs chercheurs. L'élaboration des modèles a été effectuée en prenant en considération les paramètres les plus influents sur les propriétés du béton auto-plaçant. Les facteurs les plus importants sont les ingrédients du béton (quantité du liant, rapport eau/liant, quantité des agrégats, dosage d'adjuvant,..etc), les caractéristiques des matériaux (type d'ajout) et l'âge du béton. A cet effet, une base de données a été recueillie auprès de la littérature pour la formation et l'essai du modèle RNA. Les données utilisées dans les modèles RNA sont disposées dans un format qui couvre les constituants du BAP les plus importants. La capacité des modèles RNA, proposés pour prédire les propriétés de nouvelles données obtenues par des résultats supplémentaires provenant d'autres chercheurs est validée, par rapport à d'autres codes connus. Ainsi, un programme expérimental a été effectuée afin de valider les modèles développés. Une étude paramétrique a également été réalisée en utilisant la modélisation du RNA pour étudier l'effet des cendres volantes sur le BAP.

## **Mots clés**

Béton autoplaçant, cendres volantes, réseaux de neurones artificiels, propriétés à l'état frais du BAP, résistance à la compression.

# **ABSTRACT**

The aim of this work is to apply Artificial Neural Networks method to predict the various properties of SCC containing fly ash. This technique is used based on experimental results available in the literature of several researchers. This work is the development of artificial neural network models that consider the most influential parameters on the properties of self-compacting concrete. The most important factors are the ingredients of concrete (amount of binder, water / binder ratio, amount of the aggregate, additive dosing, ect ...), material characteristics (type of addition) and the age of the concrete. For this purpose, a database gathered from the literature for the training and testing of the ANN model. The data used in the model ANN are arranged in a format that covers the components of SCC. The ability of ANN proposed models to predict the new data properties obtained by additional findings from other researchers that are external to the training database, is validated, and compared with other known codes. Also, an experimental program was conducted to validate the developed models. A parametric analysis was performed using ANN modeling to study the effect of fly ash on the SCC.

## **Keywords**

Self-Compacting concrete, fly ash, artificial neural networks, fresh properties of SCC, compressive strength.

## المخلص

الهدف من هذا العمل هو تطبيق تقنية الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ بالخصائص المختلفة للخرسانة ذاتية الحركة والتي تحتوي على الرماد المتطاير. وتستخدم هذه التقنية على أساس النتائج التجريبية المتاحة في اعمال العديد من الباحثين. هذا العمل هو تطوير تقنية شبكة الاعصاب الاصطناعية والتي تأخذ بعين الاعتبار اهم المكونات والخصائص المؤثرة على الخرسانة ذاتية الحركة ككمية الاسمنت والماء، كمية الرماد المتطاير، كمية الرمل و الحصى بالإضافة الى خصائص المكونات كنوع الرماد المتطاير و عمر الخرسانة. لهذا الغرض، تم تجميع قاعدة بيانات معتبرة لتدريب واختبار نموذج برنامج شبكة الاعصاب الاصطناعية. تم تكوين قاعدة البيانات انطلاقاً من اهم المكونات الرئيسية للخرسانة. تم تأكيد قدرة النماذج المطورة على تنبؤ مختلف خصائص الخرسانة بشكل جيد عن طريق مقارنة النتائج التجريبية لبعض الباحثين بالنتائج المتحصل عليها من نماذج شبكة الاعصاب الاصطناعية. و قد تم تنفيذ برنامج تجريبي بهدف التأكد من نتائج النماذج المطورة.

## كلمات دلالية

خرسانة ذاتية الحركة, قوة الضغط, الخصائص الجديدة للخرسانة, شبكة الاعصاب الاصطناعية, الرماد المتطاير

# Table des matières

Resume	
Abstract	
Remerciements	
Table des matieres	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abreviations	

## Chapitre 01

### Introduction Générale

1.1 Généralités .....	1
1.2 But de travail .....	2
1.3 Plan des chapitres .....	2

## Chapitre 02

### Les réseaux de neurones artificiels et leurs applications sur le béton

2.1 Introduction .....	5
2.2 Les méthodes traditionnelles en Génie Civil .....	6
2.3 Les Réseau de Neurones Artificiels.....	6
2.4 Application des RNAs dans la technologie du béton .....	7
2.4.1 Propriétés du béton à l'état frais .....	8
2.4.2 À l'état durci .....	9
2.4.3 Durabilité du béton .....	10
2.5 Comparaison des RNA avec d'autres méthodes traditionnelles.....	12
2.6 Les modèles RNA valides dans le domaine du béton.....	13
2.6.1 En France .....	13
2.6.2 La Finland .....	18
2.6.3 L'Italie .....	20
2.6.4 La Chine .....	23
2.6.5 Corée du Sud .....	24
2.6.6 Amérique du nord.....	25
2.7 Conclusion .....	29

## Chapitre 03

### Modélisation du BAP par les réseaux de neurones

3.1 Introduction .....	31
3.2 Les bétons autoplaçants .....	31
3.2.1 Avantages d'utilisation des BAP .....	31
3.2.2 Définition du BAP .....	32
3.2.3 Concept du béton autoplaçant.....	33
3.2.4 Caractérisation des BAP à l'état frais.....	35
3.2.4.1 Essai d'étalement.....	35
3.2.4.2 Essai à la boîte en L.....	35
3.2.4.3 Essai de stabilité au tamis .....	36
3.2.5 Classe de béton en fonction des propriétés à l'état frais .....	37
3.2.6 Application des BAP .....	38
3.3 Ajouts cimentaires .....	39
3.3.1 Ajouts de type I.....	39
3.3.2 Ajouts de type II .....	40
3.3.2.1 Cendres volantes.....	40
3.3.2.2 Laitier de haut-fourneau.....	40
3.3.2.3 Fumée de silice .....	41
3.3.2.4 Metakaolin .....	42
3.3.2.5 Pouzzolane naturelle.....	42
3.4 Effet des cendres volantes sur le BAP .....	43
3.4.1 Effet des cendres volantes sur les propriétés à l'état frais .....	43
3.4.1.1 Effet sur l'ouvrabilité et l'écoulement du BAP .....	43
3.4.1.2 Effet sur le temps de prise du BAP.....	47
3.4.2 Effet des cendres volantes sur les propriétés à l'état durci .....	47
3.4.2.1 Effet sur la résistance à la compression .....	47
3.4.2.2 Effet sur le module d'élasticité.....	52
3.4.2.3 Effet sur le retrait de séchage.....	53
3.4.2.4 Effet sur la perméabilité de chlorure.....	53
3.5 Modélisation des BAP par les réseaux de neurones artificiels .....	54
3.5.1 Modélisation des propriétés à l'état frais.....	54
3.5.2 Modélisation des propriétés à l'état durci.....	58
3.6 Conclusion.....	63

## **Chapitre 04**

### **Conception de la base de données pour les modèles élaborés**

4.1 Introduction .....	65
4.2 Procédure de formation de la base de données .....	65
4.2.1 Analyse des données.....	65
4.2.2 Séparation des données.....	65
4.2.3 Collecte des données.....	65
4.3 Base de données pour le modèle 01 (RN1).....	66
4.4 Base de données pour le modèle 02 (RN2).....	68
4.5 Base de données pour le modèle 03 (NF3).....	70
4.6 Organisation de la base de données .....	72
4.7 Normalisation des Données .....	72
4.8 Conclusion.....	73

## **Chapitre 05**

### **Élaboration des modèles de RNA pour la prévision des propriétés du BAP**

5.1 Introduction .....	75
5.2 Choix du type d'apprentissage.....	75
5.3 Choix d'architecture du Modèle RN.....	77
5.4 Conception du Modèle RN1 .....	78
5.4.1 Apprentissage, test et choix de l'architecture du modèle RN1 .....	78
5.4.2 Validation du modèle RN1 .....	81
5.4.3 Etude paramétrique basé sur les résultats du modèle RN1 .....	82
5.4.3.1 Effet de la teneur en cendres volantes .....	82
5.4.3.2 Effet du rapport E/L.....	84
5.4.3.3 Effet du superplastifiant.....	85
5.5 Conception du modèle RN2.....	87
5.5.1 Apprentissage, test et choix de l'architecture du modèle RN2 .....	87
5.5.2 Validation du modèle RN2 .....	89
5.5.3 Importance relative des proportions du BAP.....	90
5.5.4 Etude paramétrique du Modèle 02.....	91
5.5.4.1 Effet des cendres volantes .....	92
5.5.4.2 Effet du type de cendres volantes .....	93
5.5.4.3 Effet de l'âge du BAP.....	94
5.5.5 Proposition d'une fonction basée sur le modèle RN2.....	95

5.6 Conception du modèle 03 .....	97
5.6.1 Modèle Neurones flous NF .....	98
5.6.2 Apprentissage du modèle NF3.....	102
5.6.3 Etude paramétrique du modèle NF3 .....	103
5.7 Conclusion.....	106

## **Chapitre 06**

### Validation expérimentale des modèles développés

6.1 Introduction .....	108
6.2 Programme expérimental.....	108
6.2.1 Caractéristiques des matériaux .....	108
6.2.2 Procédures de malaxage du BAP.....	110
6.2.2.1 Essais à l'état frais du BAP .....	110
6.2.2.2 Essais à l'état durci du BAP .....	113
6.2.3 Composition des BAP fabriqués.....	114
6.3 Présentation des résultats .....	115
6.4 Validation des modèles RN développés .....	117
6.4.1 Modèle RN1 de prédiction des propriétés à l'état frais .....	117
6.4.2 Modèle RN2 de prédiction de la résistance en fonction de l'âge .....	119
6.4.3 Validation du modèle NF3 de prédiction de la perméabilité aux chlorures.....	121
6.5 Conclusion.....	123

## **Chapitre 07**

### Conclusions Générales et Recommandations

7.1 Conclusions générales .....	125
7.2 Recommandations .....	128
Références bibliographiques.....	130
Annexes .....	139

## Liste des Figures

Figure 2. 1 Neurone Formel (Yanoba et al. 2009) .....	7
Figure 2. 2 Interface du programme SENSO .....	14
Figure 2. 3 L'interface du modèle développé (Viriyametanont, 2008).....	15
Figure 2. 4 Procèdes de fabrication du béton (Ehrlich et al. 1994).....	17
Figure 2. 5 Processus du modèle CaPrM (Akram et al. 2014).....	19
Figure 2. 6 Les couches du serveur IPACS (M. Lazzari et al. 2003).....	20
Figure 2. 7 L'architecture fonctionnelle (M. Lazzari et al. 2003) .....	21
Figure 2. 8 Le panneau de configuration de la base de données (M. Lazzari et al. 2003) .....	22
Figure 2. 9 L'interface graphique pour les réseaux de neurones (M. Lazzari et al. 2003) .....	23
Figure 2. 10 Processus de détection de fissures basé .....	23
Figure 2. 11 L'architecture du modèle RNA développé (Luo et al. 2014) .....	24
Figure 2. 12 L'architecture modulaire du modèle RNA ( Lee, 2003).....	25
Figure 2. 13 l'interface des modèles I-BACK (Ceylan et al. 2014).....	26
Figure 2. 14 Organigramme de module de chaussée flexible (Ceylan et al. 2014).....	26
Figure 2. 15 Système de calcul de la modélisation de carbonatation des structures en béton .	27
Figure 2. 16 Processus du programme DuCOM .....	28
Figure 2. 17 Fondamentale de processus de développement .....	28
Figure 3. 1 Ecoulement d'un BAP .....	32
Figure 3. 2 Dalle fortement ferraillées .....	32
Figure 3. 3 aspect de surface .....	32
Figure 3. 4 Mécanismes d'atteindre les caractéristiques d'un BAP .....	33
Figure 3. 5 Comparaison entre la composition type d'un béton ordinaire vibré (BO) .....	34
Figure 3. 6 Essai d'étalement.....	35
Figure 3. 7 Essai à la boîte en L. ....	35
Figure 3. 8 Essai de stabilité au tamis. ....	36
Figure 3. 9 Essai V-Funnel.....	36
Figure 3. 10 Essai J-Ring. ....	36
Figure 3. 11 Essai d'écoulement en tube U.....	37
Figure 3. 12 Essai d'écoulement en caisson.....	37
Figure 3. 13 Classe de béton en fonction des propriétés à l'état frais [ENFRAC, 2005]. ....	38
Figure 3. 14 Courbes isoparamétriques d'étalement par rapport E/L et CV (Sonebi, 2004). ..	46
Figure 3. 15 Influence du pourcentage de CV sur la résistance à la compression et à la traction à 28 jours. ....	49
Figure 3. 16 Influence du pourcentage de cendres volantes sur la résistance à la compression et le module d'élasticité à 28 jours. ....	50
Figure 3. 17 Résistance à la compression des mélanges de BAP aux différents âges. ....	51
Figure 3. 18 Résistance à la compression des mélanges de BAP aux différents âges. ....	52
Figure 3. 19 L'architecture du model RNA pour prédire les propriétés a l'état frais du BAP (Keerthi et al. 2011) .....	55



Figure 3. 20 Architecture proposée du modèle pour la prédiction .....	56
Figure 3. 21 Performance du modèle RNA pour la prévision du début de temps de prise : (a) apprentissage (b) test .....	57
Figure 3. 22 Performance du modèle RNA pour la prévision de la fin de temps de prise : (a) apprentissage (b) test .....	57
Figure 3. 23 Valeur de résistance à 28 jours (MPa) pour RNA- I expérimentales v/s prédites. .....	59
Figure 3. 24 Valeur de résistance à 7, 28, 90 et 365 jours (MPa) pour RNA- I.....	59
Figure 3. 25 Structure de réseau de neurones pour BAP (10-10-5-1).....	60
Figure 3. 26 Comparaison entre les résistances à la compression expérimentales .....	60
Figure 3. 27 L'architecture du model RNA (Uysal et Tanyildizi, 2011) .....	61
Figure 3. 28 Relation linéaire entre les résistances à la compression mesurées et prévues .....	62
Figure 3. 29 Architecture du modèle RNA .....	62
Figure 5. 1 Mécanisme d'apprentissage à rétro propagation.....	76
Figure 5. 2 Architecture du Modèle RN1 .....	79
Figure 5. 3 Relation linéaire entre les propriétés expérimentales et prévues pour BAP .....	80
Figure 5. 4 Effet des cendres volantes sur les propriétés du BAP .....	83
Figure 5. 5 Effet du rapport E/L sur les propriétés du BAP (a) Etalement (mm), (b) Rapport L- box, (c) temps V-entonnoire (sec),.....	85
Figure 5. 6 Effet du superplastifiant sur les propriétés du BAP .....	86
Figure 5. 7 Architecture du modèle RN2 .....	88
Figure 5. 8 Relation linéaire entre les propriétés expérimentales et prévues pour BAP .....	89
Figure 5. 9 Facteurs d'importance relative pour les différents paramètres d'entrés .....	91
Figure 5. 10 Effet des cendres volantes sur la résistance du BAP .....	92
Figure 5. 11 Effet du type des cendres volantes sur la résistance du BAP .....	93
Figure 5. 12 Effet de l'âge du béton sur la résistance du BAP.....	95
Figure 5. 13 Relation linéaire entre les propriétés expérimentales et prévues pour BAP .....	97
Figure 5. 14 Architecture de l'ANFIS.....	99
Figure 5. 15 Exemple ANFIS à 2 entées avec 9 règles .....	101
Figure 5. 16 Architecture du modèle NF3.....	102
Figure 5. 17 Erreur d'apprentissage vs fonction d'appartenance. ....	103
Figure 5. 18 Effet de la perméabilité du béton en fonction du rapport E/L et la quantité du ciment. ....	104
Figure 5. 19 Effet de la perméabilité du béton en fonction du pourcentage du cendres volantes et l'âge du béton. ....	105
Figure 5. 20 Effet de la perméabilité du béton en fonction du rapport E/L et la résistance à la compression du béton à 28 jours. ....	106
Figure 6. 1 Courbes granulométriques des granulats utilisés.....	109
Figure 6. 2 Courbes granulométriques du sable utilisé .....	109
Figure 6. 3 Malaxeur utilisé .....	110
Figure 6. 4 Essai d'étalement au cône (slump flow test).....	111
Figure 6. 5 Essai des anneaux japonais (J-ring test) .....	111

Figure 6. 6 Essai de la boîte en L (L-box test) .....	112
Figure 6. 7 Essai de l'entonnoir en "V" (V-funnel test).....	113
Figure 6. 8 Presse utilisée pour l'essai de compression .....	113
Figure 6. 9 Étalement du BAP en fonction du pourcentage du cendres volantes .....	116
Figure 6. 10 Évolution de la résistance à la compression des BAPs en fonction de l'âge.....	117
Figure 6. 11 Corrélation entre les résultats prédits par le modèle RN1 et les résultats expérimentaux (a) résistance à la compression (MPa), (b) l'étalement (mm), .....	118
Figure 6. 12 Corrélation entre les résultats prédits par le modèle RN2 .....	120
Figure 6. 13 L'erreur prédite en fonction de l'âge (jours) .....	121
Figure 6. 14 L'appareil de l'essai de résistivité .....	122
Figure 6. 15 Corrélation entre l'essai RCPT et de l'essai de résistivité.....	122

## Liste des Tableaux

Tableau 3. 1 Spécificités les plus courantes d'un BAP à l'état frais (EN 206-9, 2010) .....	37
Tableau 3. 2 Composition des mélanges du BAP (Sonebi, 2004) .....	45
Tableau 3. 3 Propriétés à l'état frais du BAP (Bouzzoubaa et al., 2001).....	47
Tableau 3. 4 les proportions des mélanges des BAPs étudiés (Sukumar et al. 2007).....	51
Tableau 3. 5 Paramètres d'entrées pour les deux modèles RNA (Siddique 2011). .....	58
Tableau 4. 1 Organisation de la base de données du Modèle RN1 .....	67
Tableau 4. 2 Valeurs limites pour paramètres d'entrée et sortie du Modèle RN1 .....	67
Tableau 4. 3 Distribution des paramètres d'entrées du Modèle RN1 .....	68
Tableau 4. 4 Organisation de la base de données du Modèle RN2.....	69
Tableau 4. 5 Valeurs limites pour paramètres d'entrée et sortie du RN2 .....	70
Tableau 4. 6 Distribution des paramètres d'entrées du Modèle RN2 .....	70
Tableau 4. 7 Organisation de la base de données du Modèle NF .....	71
Tableau 4. 8 Valeurs limites pour paramètres d'entrée et sortie du Modèle NF .....	71
Tableau 4. 9 Distribution des paramètres d'entrées du modèle NF .....	71
Tableau 5. 1 Différents fonctions d'apprentissage .....	76
Tableau 5. 2 Paramètres du Modèle 01 .....	79
Tableau 5. 3 Comparaison des résultats prédites par le Modèle RN1 et les résultats d'autre chercheurs .....	82
Tableau 5. 4 Les paramètres du Modèle RN2.....	88
Tableau 5. 5 Comparaison les résultats du Modèle RNA 02 avec l'ACI 209-71 et .....	90
Tableau 5. 6 Valeur des coefficients dans la fonction proposé.....	96
Tableau 5. 7 les paramètres statistiques de la fonction propose .....	96
Tableau 5. 8 Erreur du modèle NF selon la fonction d'appartenance.....	103
Tableau 6. 1 Caractéristiques physiques du sable naturel et des granulats utilisés.....	109
Tableau 6. 2 Différents constituants des bétons autoplaçants construits .....	114
Tableau 6. 3 Résultats des essais à l'état frais sur BAP .....	115
Tableau 6. 4 Résultats de résistance à la compression.....	116
Tableau 6. 5 Erreurs entre les résultats expérimentaux et prédits.....	118
Tableau 6. 6 Erreurs entre les résultats expérimentaux et prédits.....	119
Tableau 6. 7 Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits .....	123

# Liste des abréviations

AG : algorithmes génétiques ;  
BAP : bétons autoplaçants ;  
BETVAL : programme à base des systèmes experts ;  
BO : Béton ordinaire ;  
CaPrM : modèle de prédiction de carbonatation ;  
CV : Cendres volantes ;  
CVUP : cendres volantes ultra-pulvérisé ;  
E/L : rapport eau sur liant ;  
G : Gravier ;  
IA : intelligence artificielle ;  
L : Liant ;  
LF : logique floue ;  
LMDC : Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions ;  
MAPE : erreur absolue en pourcentage ;  
MSE : l'erreur quadratique moyenne ;  
NF3 : modèle pour la prévision de la perméabilité aux ions chlorés ;  
P : pourcentage du cendres volantes ;  
R : Coefficient de corrélation ;  
R2 : la fraction absolue de la variance ;  
RN1 : modèle pour la prévision des propriétés à l'état frais du BAP ;  
RN2 : modèle pour l'étude de l'évolution de la résistance à la compression en fonction d'âge ;  
RNA : Réseaux de neurones artificiels ;  
RPG : réseau multicouche à Rétro-propagation ;  
S : sable ;  
SE : systèmes experts ;  
SENSO : Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton ;  
SP : superplastifiant ;  
trainbfg ; BFGS Quasi-Newton ;  
trianlm ; Levenberg Marquardt ;  
VTT : Le centre de recherche technique de Finlande ;  
X : le vecteur d'entrée des données réelles ;

$X_{max}$  : Valeur maximale des éléments du vecteur de entrée  $X$  respectivement ;

$X_{min}$  : valeur minimum des éléments du vecteur de entrée  $X$  respectivement

$X_n$  : le vecteur de données normalisées ;

$y_{max}$  : les valeurs de normalisations égales à 1 ;

$y_{min}$  : les valeurs de normalisations égales à 1 ;

# *Chapitre 1:*

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

## 1.1 Généralités

Le béton est un matériau minéral obtenu en mélangeant du ciment, de l'eau, des granulats, des adjuvants et des ajouts cimentaires. Il a un comportement évolutif : il est d'abord fluide ce qui lui permet de prendre toutes les formes possibles, puis il endure progressivement et devient très résistant. Les bétons autoplaçants (BAP) ont été découverts en 1988 au Japon, ce sont des bétons très fluides lors du coulage. Ils se mettent en place simplement sous leur propre poids et ne nécessitent aucune vibration. Ils éliminent donc les nuisances sonores aux chantiers. Grâce à leur grande fluidité lors de l'écoulement, la mise en œuvre des BAPs se fait plus rapidement que des bétons ordinaires. Les BAP sont formulés différemment du béton ordinaire (BO). Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les cendres volantes, représentent l'ajout cimentaire le plus utilisé en béton, c'est un sous-produit de la combustion du charbon pulvérisé aux usines génératrices de puissance électriques. Les cendres volantes sont alors rassemblées des gaz d'échappement par les dépoussiéreurs électrostatiques ou les filtres à manches.

L'Intelligence Artificielle (IA) est l'une des branches les plus puissantes de l'informatique. Elle est basée entre autres sur les théories qui ont été fondamentalement développées pour les systèmes classiques dans la physique et la biologie. Le développement rapide des technologies de l'information tel que les modèles de simulation, les bases de données et les différentes techniques de l'intelligence artificielle conduit à leur utilisation dans le domaine de génie civil et surtout dans les études de la technologie du béton. Le béton est un matériau complexe, essentiellement par sa nature multi-échelle et par le caractère multi-physique des processus qui y règnent. Plusieurs modèles basés sur les techniques de l'intelligence artificielles tels que les Réseaux de Neurones artificielles (RNAs), les Systèmes Experts (SEs), la Logique Floue (LF) et les systèmes de calcul évolutionnaires ont été développés pour étudier les propriétés du différent type de béton.

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit.

La procédure pour développer des modèles de réseau de neurones considère généralement l'utilisation du réseau multicouche à Rétro-propagation (RPG). Les caractéristiques d'un tel réseau qui ont été, en juste proportion, décrites dans la littérature, rendent la prévision des propriétés des bétons très attrayants et appropriés de sorte qu'il soit possible de :

- établir des relations entre les entrées et les sorties basées sur des données historiques, sans déclaration d'un modèle explicite, même si ces relations sont non linéaires, c'est particulièrement utile quand des ajouts minéraux sont combinés avec les constituants de base du béton;
- tolérer des erreurs dans les données d'apprentissage (entraînement) en raison de leur propriété de généralisation car les données de formulation d'un béton ont des erreurs de variabilité élevée;
- être mis à jour et basé sur les mélanges d'essai successifs, car le recyclage d'un réseau de neurones est très facile.

## 1.2 But de travail

Le but de cette étude est d'appliquer la technique de Réseaux de Neurones Artificiels pour prédire les différentes propriétés du BAP contenant des cendres volantes. Cette technique est utilisée en se basant sur les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature de plusieurs chercheurs. Ce travail consiste à développer des modèles de réseaux de neurones artificiels en prenant en considération les paramètres les plus influents sur les propriétés du béton auto-plaçant. Les facteurs les plus importants sont les ingrédients du béton (quantité du liant, rapport eau/liant, quantité des agrégats, dosage d'adjuvant...ect), les caractéristiques des matériaux (type d'ajout) et l'âge du béton.

A cet effet, une application de simulation des réseaux de neurones a été développée par le logiciel MATLAB version 2014, et employée pour créer des modèles de réseaux de neurones artificiels. Les modèles tiennent en compte l'effet de tous les paramètres utilisés dans la construction du réseau.

## 1.3 Plan des chapitres

Il est proposé, ici, de décrire les différentes étapes qui ont permis la réalisation de ce travail. le premier chapitre est consacré pour une introduction générale exposant la problématique et définissant les objectifs de l'étude et le plan de travail, le deuxième chapitre présentera une étude bibliographique sur les différents modèles basés sur les techniques traditionnelles et les



modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels dans la technologie du béton. Une évaluation comparative entre ces réseaux et les modèles de régression multiple a été présentée dans ce chapitre. Des modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels développés dans plusieurs pays ont été aussi présentés et discutés.

Le troisième chapitre porte sur les différentes applications des RNAs sur les BAP. Après avoir présenté et défini les bétons autoplaçants ainsi que leur caractérisation à l'état frais, l'effet des cendres volantes sur les différentes propriétés du BAP dans la littérature a été résumé. L'examen d'un grand nombre d'application des réseaux de neurones pour la prévision des propriétés des bétons dans la littérature a été présenté.

Les procédures de collecte des données expérimentales pour l'apprentissage des modèles des réseaux de neurones à développer, l'organisation et la normalisation de ces données ont été présentées dans le quatrième chapitre.

Le cinquième chapitre est consacré à l'élaboration des modèles de prévision des propriétés du BAP contenant des cendres volantes. La méthodologie de conception et l'application du modèle de rétro-propagation des réseaux de neurones pour la prévision des propriétés à l'état frais et à l'état durci du BAP contenant des cendres volantes sont décrites dans ce chapitre.

Une étape incontournable de tout travail de modélisation a été présentée dans le sixième chapitre, qui consiste à la confrontation des données de sortie de ces modèles avec des résultats expérimentaux. Un programme expérimental a été réalisé afin de valider les modèles RNA élaborés dans le chapitre cinq.

Finalement, les principales conclusions dégagées de cette étude, des perspectives et des recommandations pour des futurs travaux sont données à la fin de cette thèse.

## *Chapitre 2:*

---

### LES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS ET LEUR APPLICATIONS SUR LE BÉTON

---

## 2.1 Introduction

Le béton est un matériau complexe et hétérogène, il est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Il est présent dans tous les secteurs de la construction, ses qualités et ses performances répondent aux différents besoins en matière de bâtiments et de génie civil en respectant les exigences de sécurité, d'esthétique et de durabilité.

Le béton est un matériau minéral obtenu en mélangeant du ciment, de l'eau, des granulats, des adjuvants et des ajouts cimentaires. Il a un comportement évolutif : il est d'abord fluide ce qui lui permet de prendre toutes les formes possibles, puis il endure progressivement en devenant très résistant.

C'est un matériau qui paraît rustique et simple mais qui est en réalité très complexe et possède de multiples qualités. Il est associé à d'autres matériaux ; de l'acier sous forme d'armatures passives ou précontraintes, ou des fibres.

La modélisation du béton avec des techniques statistiques et des modèles mathématiques a été effectuée par plusieurs chercheurs. Le développement rapide des technologies et des techniques d'intelligence artificiel (IA) conduit à l'utilisation de ces techniques dans la technologie du béton tels que :

- L'optimisation de la formulation des bétons ;
- La prévision des propriétés du béton (à l'état frais et durci) ;
- La prévision de la durabilité et de la durée de vie des structures.

Parmi les techniques d'IA les plus utilisées, les réseaux de neurone artificiels sont un modèle de calcul inspiré par la structure et le fonctionnement du cerveau. Ils sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle.

Dans ce travail, un résumé bibliographique a été effectué sur les différents modèles basé sur les techniques rationnelles et les modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels dans la technologie du béton. Ensuite, une comparaison entre les deux méthodes (traditionnelles et RNAs) a été effectuée, ainsi que la présentation des avantages et des inconvénients de chaque méthode.

Les différentes applications de la technique des réseaux de neurones artificiels en technologie du béton réalisées dans plusieurs pays ont été présentées.

## 2.2 Les méthodes traditionnelles en Génie Civil

Plusieurs méthodes traditionnelles ont été utilisées dans de nombreuses applications en différents domaines de génie civil.

Des modèles mathématiques ont traditionnellement été développés à partir soit des principes physiques ou par régression statistique. Les modèles physiques sont constitués de systèmes d'équations différentielles ordinaires ou partielles. Ces modèles tentent de représenter la relation physique sous-jacente entre les variables impliquées. L'avantage des modèles physiques est qu'ils sont basés sur une compréhension complète et approfondie du système. Cependant, les limites de ces modèles comprennent la difficulté de mise en place et la résolution d'équations différentielles complexes analytiques, ainsi que la détermination de coefficients de l'équation et les conditions initiales et aux limites.

L'approche analytique pour la modélisation du béton est constituée principalement de deux aspects : la formulation mathématique des équations constitutives et la détermination des paramètres des matériaux. Le premier aspect implique l'utilisation des principes des mathématiques et de la mécanique des milieux continus, et cette dernière repose habituellement lourdement sur l'identification et la détermination des paramètres rationnels grâce à l'analyse des expériences réalisées sur les matériaux.

## 2.3 Les Réseaux de Neurones Artificiels

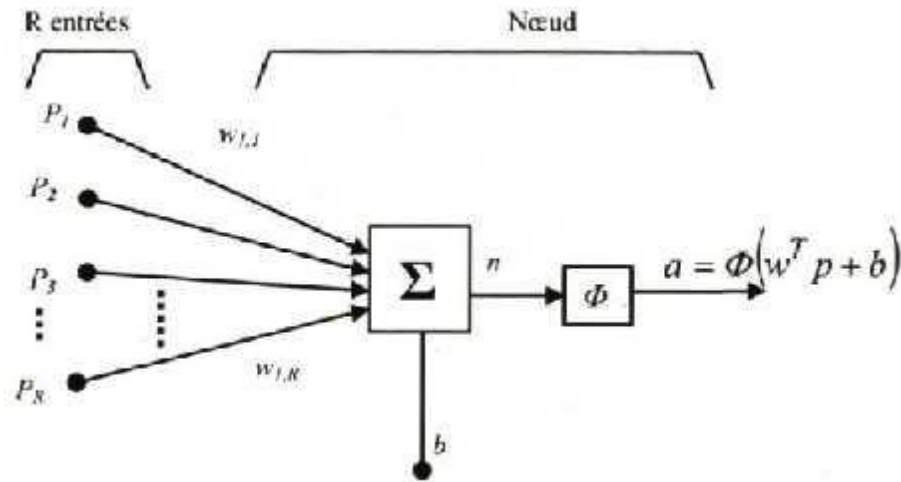
Les lacunes des méthodes de régression et les équations différentielles partielles ont conduit les chercheurs à explorer des modèles alternatifs. Celui qui est devenu populaire au cours de la dernière décennie est la technique de réseau de neurones artificiels (RNA).

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau.

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) sont des systèmes qui simulent les neurones biologiques du cerveau humain présentant la capacité d'apprentissage, de raisonnement et la résolution des problèmes de calcul (Lippmann et al., 1987)

Un neurone (ou synapse) est constitué essentiellement d'un intégrateur ( $\Sigma$ ) qui effectue la somme pondérée de ses entrées ( $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ ). Le résultat  $n$  de cette somme est ensuite

transformé par une fonction de transfert  $\phi$  qui produit la sortie du neurone  $a$ . Les coefficients de pondération (ou coefficients synaptiques) ( $W = (W_{1,1}, W_{1,2}, \dots, W_{1,n})$ ) sont appelés poids du neurone alors que  $b$  est le biais. Les poids et le biais constituent les paramètres du neurone (Fig. 2.1). Un neurone est donc une fonction algébrique paramétrée. On peut avoir un ou plusieurs neurones pour constituer une couche et les couches peuvent s'associer pour constituer un réseau. Le neurone formel est la simulation du neurone biologique (Yanoba et al., 2009).



**Figure 2.1** — Neurone Formel (Yanoba et al. 2009)

Les poids de connexion déterminent la nature et la force de l'influence entre les neurones interconnectés. Les signaux provenant de chaque entrée sont ensuite traités par une somme pondérée des entrées. Le signal de sortie traité est ensuite transmis à un autre neurone par une fonction de transfert. La fonction de transfert module la somme pondérée des entrées de sorte que la sortie s'approche de l'unité lorsque l'entrée devient plus grande et se rapproche de zéro lorsque l'entrée devient plus petite.

## 2.4 Application des RNAs dans la technologie du béton

Les RNA sont de plus en plus utilisés du fait de leur simplicité et de leur capacité de résolution des problèmes complexes. L'avantage des RNAs par rapport aux autres méthodes réside dans leur capacité à réaliser des modèles de précision équivalente avec moins de données expérimentales ou dans leur capacité à constituer des modèles plus précis à partir du même nombre de données.

Plusieurs chercheurs ont appliqué la technique de réseaux de neurones artificiels pour la prévision de différentes propriétés du béton à l'état frais, à l'état durci et aussi pour l'étude de la

durabilité. La propriété la plus importante des réseaux de neurone artificiel dans les problèmes de génie civil est leur capacité d'apprentissage directement à partir des exemples fournis.

#### **2.4.1 Propriétés du béton à l'état frais**

L'ouvrabilité dans la technologie du béton est l'une des principales propriétés qui doivent être satisfaites, l'étude de l'ouvrabilité d'un béton par les RNAs a été faite pour des bétons ordinaires, des bétons avec ajouts, des bétons à hautes performances et des bétons auto-plaçants.

Un modèle de réseaux de neurones artificiels est fait (Jain et al. 2008) pour la modélisation et l'analyse de l'affaissement du béton. Bai et al. (2003) ont développé un modèle de réseaux de neurones artificiels capables de faire effectivement la prévision de l'ouvrabilité d'un béton contenant le metakaolin et les cendres volantes. Les paramètres de l'ouvrabilité que Le modèle peut prédire sont l'affaissement, le facteur de compaction et le temps d'essai vébé.

Le comportement d'affaissement d'un béton contenant le laitier de haut fourneau et les cendres volantes a été étudié par Yeh et al. (2006) pour explorer la relation non linéaire entre les différentes composantes du béton et l'affaissement de ce dernier. Moini et al. (2012) ont étudié l'effet de la température sur la valeur d'étalement du béton conventionnel en utilisant la technique des RNAs.

Des modèles de RNAs pour l'estimation de l'affaissement d'un béton à haut performances ont été développés (Yeh 2007 ; Chineet al. 2010). Yeh (2007) a utilisé les réseaux de neurones pour former un modèle de prévision de l'ouvrabilité d'un béton à hautes performances, le but de ce travail est de quantifier l'effet du taux des différents ingrédients sur l'ouvrabilité du béton, deux méthodes sont utilisées : la modélisation avec régression du deuxième ordre et les réseaux de neurones.

Les bétons auto-plaçants sont des bétons spéciaux très fluides, dont la spécification est de se mettre en place sous l'effet de leur poids propre sans apport de vibration externe ou interne. Plusieurs modèles de réseaux de neurones ont été réalisés pour étudier les différentes propriétés du BAP à l'état frais tels que l'ouvrabilité et le temps de prise.

Gowda et al. (2007) ont étudié les différentes propriétés du béton auto-plaçant renforcé avec des fibres d'acier. Un modèle de réseaux de neurones artificiels de retro-propagation avec un apprentissage supervisé a été utilisé pour prédire l'étalement,  $T_{500}$  d'étalement, L-box (essai de boîte en L), U-box (essai de boîte en u), V-funnel (essai d'entonnoir). Un autre modèle de

réseaux de neurone a été développé pour prédire l'ouvrabilité du béton (l'affaissement, l'étalement et le temps V-funnel) (Li et al. 2010).

Récemment, Chandwani et al. (2015) ont appliqué les RNAs pour prédire l'affaissement du béton prêt à l'emploi. Ils ont utilisé les poids de connexions du réseau de neurones pour calculer l'importance relative de chaque constituant sur l'affaissement du béton. D'une autre part, les paramètres rhéologiques les plus courants du béton fluide, utilisés pour désigner la maniabilité, sont le seuil de cisaillement et la viscosité plastique tels que défini par l'équation Bingham.

### **2.4.2 À l'état durci**

Les propriétés mécaniques du béton tels que la résistance à la compression, la résistance au cisaillement et le module d'élasticité ont été étudié par l'utilisation des réseaux de neurone artificielles.

La résistance à la compression d'un béton est une propriété mécanique majeure et importante. La prévision de cette propriété par la technique des réseaux de neurone artificielle a été faite par plusieurs chercheurs. Des modèles de réseaux neuronaux artificiels pour prédire la résistance en compression des bétons contenant du métakaolin et des fumées de silice ont été développées par Sarıdemir (2009).

Une étude se concentre sur l'effet de taux de remplacement des cendres volantes et des fumées de silice sur la résistance du béton durci à long terme par réseaux de neurones a été effectuée par Pala et al. (2007). La relation entre les propriétés du mortier de ciment, obtenus par des techniques de traitement d'images numériques et des résistances à la compression, a été mise en place à l'aide de l'analyse par RNAs (Onal et al. 2010). Demir (2007) a utilisé des réseaux de neurones artificiels pour prédire le module d'élasticité du béton à résistances normale et élevée.

Les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés pour prédire la résistance à la compression d'un béton à hautes performances (Prasad et al. 2008, Kasperkiewicz et al. 2009). Rajasekaran et al. (2002) ont développé des modèles de prévision de la résistance à la compression d'un BHP à l'aide d'apprentissage séquentiel du réseau de neurone. Rajasekaran et al. (2007) ont employés la méthode des ondelettes des réseaux de neurones pour évaluer la résistance à la compression du BHP.

### 2.4.3 Durabilité du béton

Plusieurs recherches ont été réalisées pour étudier la durabilité du béton par RNAs. La corrosion d'acier dans le béton a reçu une attention croissante depuis plus de trois décennies en raison de grands dommages observés sur les structures en milieu marin et des autoroutes exposées à des sels de déglacage. Les chlorures sont considérés comme la cause majeure de corrosion prématurée des armatures en acier. La possibilité d'utiliser les réseaux de neurones artificiels pour créer un modèle intelligent de prévision de la corrosion des armatures des ponts en milieu marin, a été démontrée par Ukrainczyk et al. (2007). La prévision des dommages des structures en béton armé causés par la corrosion d'acier en fonction de l'âge du pont et des conditions environnementales, est difficile à réaliser de façon analytique. Il a été démontré qu'un modèle développé par RNA, avec seulement les paramètres les plus influents comme paramètres d'entrés, peut prédire avec précision et instantanément le degré des dommages. La corrosion d'acier noyé dans le béton est analysée par Parthiban et al. (2005) qui ont constaté que l'erreur est de 5% seulement.

L'utilisation de la méthode du réseau de neurones artificiels pour l'analyse des relations entre un certain nombre de paramètres d'entrée et des dommages engendrés par la corrosion des armatures a été faite par Ukrainczyk et al. (2008). Les données sur les effets des conditions environnementales de la structure et des propriétés du béton sur l'ampleur des dégâts causés par la corrosion d'acier ont été recueillies sur 11 ponts en béton dans un climat continental modéré. Les principales causes de détérioration sont les ions chlorures, les sels de déglacage et la carbonatation accélérée à la concentration de dioxyde de carbone qui est plus élevée sur les routes et dans les villes. Les dommages ont été classés en six catégories selon le type de travaux de réparation nécessaires.

La carbonatation des structures en béton armée dans des sites souterrains est l'une des principales causes de la corrosion de l'acier des structures en béton armé. Une technique numérique pour le comportement de la carbonatation utilisant les réseaux de neurone artificiels pour la modélisation de la carbonatation a été développé par Kwon et Song (2010).

Un modèle de réseaux de neurones artificiels à base d'une formulation explicite a été proposé par Guneyisi et al. (2009) pour estimer la perméabilité du béton aux chlorures en fonction de l'effet de type ciment, de l'état de durcissement et de l'âge du béton.



Le coefficient de diffusion des chlorures est une indication de la capacité de n'importe quel type de béton pour résister à la pénétration des chlorures et il est utilisé pour prédire la durée de vie des structures en béton armé. Une nouvelle méthodologie pour trouver les propriétés fondamentales de béton, y compris les coefficients de diffusion a été développée par Lizarazo-Marriaga et al. (2009).

L'utilisation de réseaux de neurones artificiels pour la modélisation de la durabilité des structures en béton armé en milieu marin et continental a été faite par Ukrainczyk et al (2005). Une comparaison de deux modèles concernant les différents environnements est donnée. Les modèles sont capables de reconnaître et d'évaluer l'effet de différents paramètres sur les dommages et peuvent être utilisés pour la prédiction de la durée de vie des structures, la planification de l'entretien et de la maintenance des ouvrages.

La durabilité du béton avec ajout a été étudiée par plusieurs chercheurs. Ashrafi et al. (2007) ont fait la détermination du coefficient de diffusion des chlorures d'un béton contenant les fumées de silices pour prédire la durée de vie des structures en béton. Un autre réseau de neurones artificiels a été conçu par Jepsen et al. (2002), afin d'étudier l'influence de différents paramètres sur la résistance au gel du béton avec ajouts. Ils ont constaté que les cendres volantes tendent à saper la résistance au gel alors que la fumée de silice améliore cette résistance. Les résultats obtenus ont montré que les paramètres les plus importants sont le rapport Eau/Liant et le contenu total d'air. Topçu et al. (2009) ont effectué une modélisation de la corrosion du béton armé contenant les cendres volantes à l'aide des RNAs.

Parichatprecha et al. (2009) ont étudiés l'influence de la teneur en eau, du ciment, du rapport eau sur liant, et le remplacement de cendres volantes et des fumées de silice sur la durabilité du béton à hautes performances (BHP) à l'aide de réseaux de neurones artificiels (RNA). Tarighat et al. (2009) ont essayé de modéliser deux propriétés importantes d'un BHP liées à sa durabilité, le modèle proposé dans cette étude estime le coefficient de diffusion des chlorures dans le béton et sa résistivité électrique. Un réseau de neurones artificiels pour prédire la durabilité d'un BHP contenant du métakaolin et des cendres volantes et d'un BHP contenant de la fumée de silice avec des cendres volantes, a été développé à l'âge de 3, 7, 28, 56 et 90 jours (Muthupriya et al. 2011). La perméabilité aux gaz et la pénétration rapide des ions chlorures des BHP incorporant des ajouts cimentaires (les cendres volantes et la fumée de silice) préparés avec différents rapports E/C ont été étudiés par Khan et al. (2011). Song et Kwon (2009) ont évalués la pénétration des chlorures dans le BHP contenant les laitiers de haut fourneau, les cendres

volantes et les fumées de silice en utilisant la technique du RNAs. Boğa et al (2013) ont étudié la pénétration des chlorures dans les bétons qui contient le laitier de haut fourneau.

## **2.5 Comparaison des RNA avec d'autres méthodes traditionnelles**

Au cours des dernières années, une attention considérable a été accordée au développement des techniques sophistiquées pour explorer les ensembles de données. Dans le domaine de la technologie de béton, plusieurs chercheurs ont étudié et analysé la même base de données avec la technique du RNA et d'autres méthodes traditionnelles et statistiques. Ces derniers se basent généralement sur des méthodes de régression telle que la régression linéaire ou non linéaire.

Généralement, les méthodes traditionnelles sont basées sur des règles ou des équations prédéfinies qui définissent clairement le problème. Elles se basent sur la définition explicite des tâches, étape par étape, à effectuer pour atteindre les résultats requis. Cela peut être un moyen idéal pour résoudre les problèmes de modélisation lorsque les règles liées à un problème sont parfaitement connues. Le béton est un matériau complexe, il y a beaucoup de cas pratiques pour lesquels les règles sont soit non connues ou ils sont extrêmement difficiles à découvrir. Ces problèmes ne peuvent pas être modélisés par les méthodes de calcul traditionnelles (Rafiq et al. 2001).

Les réseaux de neurones artificiels sont des techniques d'intelligence artificiel qui sont extrêmement utiles dans les situations pour lesquelles les règles sont soit non connues ou ils sont très difficiles à découvrir. Parmi les avantages des RNAs par rapport aux autres méthodes traditionnelles, on peut citer :

- les RNAs peuvent apprendre et généraliser à partir d'exemples pour produire des solutions évidentes à des problèmes ;
- ils peuvent parfaitement faire face à des situations où les données d'entrée au réseau sont floues, discontinue ou sont incomplète ;
- ils sont capables d'adapter des solutions au fil du temps et de compenser l'évolution des circonstances ;
- les bases de données présentées pour le RNA peuvent être des données théoriques, des données expérimentales ou des données empiriques sur la base de bonnes et fiables expériences passées, ou une combinaison de celles-ci. Les données d'apprentissage peuvent être évaluées, vérifiées ou modifiées par l'expérience humaine pour injecter l'intelligence humaine et de l'intuition ;

- la structure d'un RNA est généralement souple et robuste. Contrairement à la régression, où une équation spécifique doit être prédéterminée en se basant sur les données dans le système et doit relier les variables d'entrée de à celles de la sortie. La structure générale d'un RNA peut être appliqué à pratiquement n'importe quel système ;
- la capacité de détecter implicitement les relations non linéaires complexes entre les variables dépendantes et indépendantes ;
- la disponibilité de multiples algorithmes d'apprentissage.

Malgré les avantages des RNAs par rapport aux autres méthodes traditionnelles, il y a quelques inconvénients, on peut citer :

- il n'y a aucune méthode standard pour trouver le nombre idéal de neurones dans la ou les couches cachés dans un RNA ou pour déterminer la meilleure fonction d'activation pour l'apprentissage;
- quelques chercheurs considèrent que les réseaux de neurones ne sont pas l'outil de choix dans les problèmes où les règles explicatives peuvent être critiques. Ils sont l'outil de choix en agissant sur les résultats est plus important que les comprendre ;
- pour certains modélisateurs, la "boîte noire" des réseaux de neurones artificiels a laissé place au scepticisme. Bien que les RNAs puissent prédire la variable de sortie d'un système basé sur un ensemble de variables d'entrée, les rouages du réseau ne sont pas faciles à comprendre.

## 2.6 Les modèles RNA valides dans le domaine du béton

Plusieurs modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels ont été développé à travers le monde. Plusieurs chercheurs utilisent la technique du RNA comme méthode d'analyse et de valorisation des résultats des investigations à partir des bases de données disponibles. Des modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels développés dans plusieurs pays seront présentés et discutés dans cette partie.

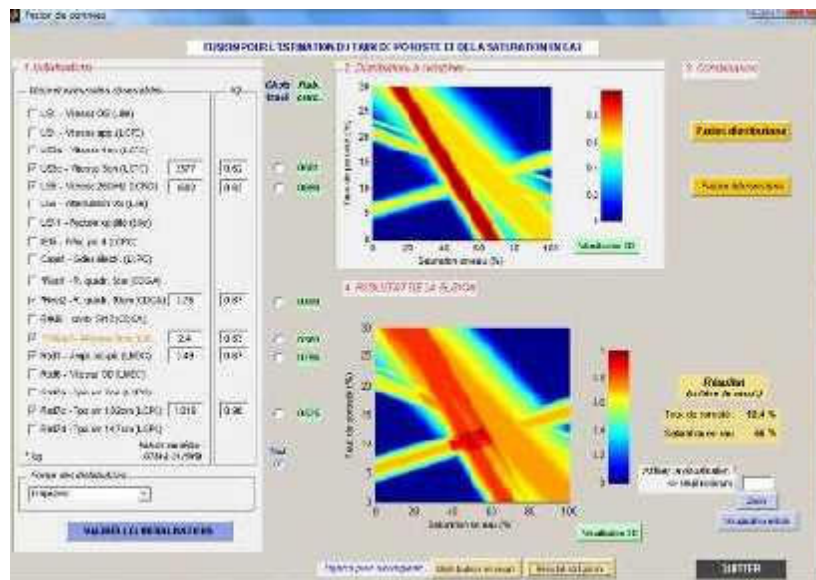
### 2.6.1 En France

#### 2.6.1.1 *Projet SONSO (Janvier 2006 - Septembre 2009)*

SENSO (**Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton**) est un projet de recherche ANR-RGCU piloté par le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) basé à l'INSA et à l'Université Paul Sabatier de Toulouse. SENSO

rassemble 7 partenaires institutionnels (universités, EPST) et 5 partenaires industriels : CDGA- Université de Bordeaux I, GEA-Ecole Centrale de Lille, LCND-Université de la Méditerranée à Aix-en-Provence, LCPC de Nantes, ONERA Toulouse, LEAT-Université de Nice Sophia-Antipolis, EDF, GETEC, Exam-BTP, SOVEP, Port autonome de Nantes-Saint-Nazaire.

L'objectif général du projet consiste à définir des protocoles de mesure non destructive d'indicateurs de durabilité des bétons in situ basés sur le couplage de techniques d'évaluation non destructive. Les indicateurs ciblés dans ce projet (Fig. 2.2) sont : porosité, teneur en eau, teneur en chlorures, profondeur de béton carbonaté, indicateur de macro-fissuration, résistance mécanique, module d'élasticité. Parmi les techniques d'évaluation non destructive utilisées dans ce projet : radar, résistivité et capacité électriques, thermographie infrarouge, ultrasons.



**Figure 2.2** – Interface du programme SENSO.

Les démarches suivies dans ce projet sont comme suit :

- 1) la définition d'un référentiel géométrique ;
- 2) le choix et la formalisation de la méthode de fusion (Identification des paramètres significatifs de la mesure (vitesse, atténuation, fréquence, phase, ddp, image,...) ;
- 3) le développement d'une base de données.

Dans la troisième démarche, des méthodes innovantes en matière d'analyse de données expérimentales ont été utilisées pour valoriser les résultats des investigations (outils statistiques, réseaux de neurones, algorithmes génétiques, systèmes expert).

### 2.6.1.2 Modèle de reconnaissance physique et géométrique d'éléments en béton armé (Viriyametantont, 2008)

Un modèle basé sur les RNAs a été construit par Viriyametantont (2008) pour la reconnaissance physique et géométrique d'éléments en béton armé en utilisant la technologie radar. Ce travail fait une partie du projet « Evaluation Non Destructive Des Propriétés Physiques du Béton » dans le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de l'INSA de Toulouse.

La technologie radar est de plus en plus mise en œuvre sur les structures en béton armé pour la reconnaissance géométrique (détection d'armatures, positionnement en plan et en profondeur). Une base de données statistiques de laboratoire a été constituée et a permis l'apprentissage d'un RNA apte à reconnaître des signatures radar et à en extraire les informations suivantes : teneur en eau du béton ; porosité du béton ; profondeur d'armature ; diamètre d'armature. L'outil ainsi développé est finalement mis à l'épreuve sur des structures réelles (Fig. 2.3).

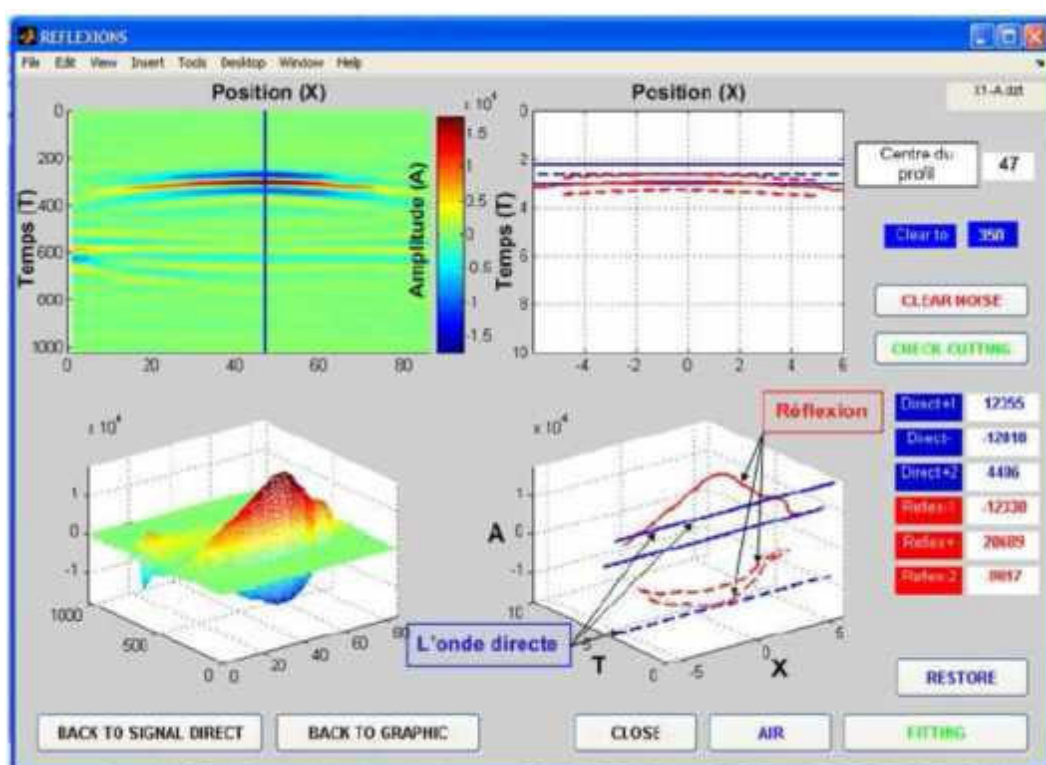


Figure 2.3 — L'interface du modèle développé par Viriyametantont (2008)

A cet effet, une banque de données expérimentales de plus de 500 signatures radar d'éléments en béton armé présentant différentes configurations physico-géométriques a été construite au laboratoire. L'analyse qualitative des relations observées expérimentalement entre

caractéristiques physico-géométriques des dalles armées et les signatures radar, a servi de base pour le choix des variables d'entrées pertinentes des réseaux de neurones. Cette analyse montre également que certains facteurs (teneur en eau, profondeur d'armature) sont beaucoup plus influents que d'autres (porosité, diamètre d'armature) sur la signature radar.

La base de données ainsi constituée a permis de développer 6 modèles neuronaux de type Perceptron Multi-Couches (PMC) dédiés à la reconnaissance physique et géométrique d'un élément en béton armé sur la base d'une mesure radar B-scan réalisée au droit d'une armature :

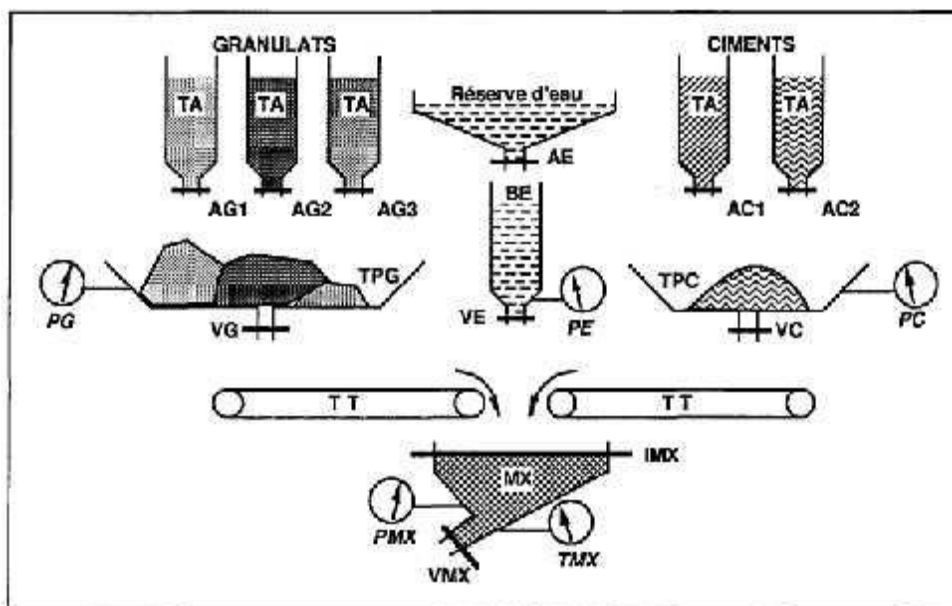
- PMC1 et PMC2 : évaluation quantitative de la teneur en eau du béton ;
- PMC3 et PMC4 : évaluation quantitative du degré de saturation en eau du béton ;
- PMC5 : évaluation quantitative de profondeur de l'armature ;
- PMC6 : évaluation quantitative du diamètre de l'armature.

Ainsi, un septième modèle neuronal a été développé pour la simulation d'un signal direct complet sur la base d'informations extraites d'un signal direct tronqué. Ce simulateur est destiné à être utilisé in-situ lors de la mesure d'un signal direct complet (nécessaire pour le traitement préalable des mesures radar). Il a été conclu que les modèles neuronaux développés peuvent parfaitement s'intégrer dans une approche multi-capteurs (radar, résistivité, potentiel d'électrode...) de l'auscultation des constructions en béton armé.

### **2.6.1.3 Projet EDDAKS (LCPC) (Ehrlich et al. 1994)**

Un modèle générique pour l'acquisition de données a été développé pour le contrôle de la qualité des matériaux. EDDAKS est un générateur d'acquisition de donnée plus particulièrement destiné au contrôle de la qualité du produit élaboré dans les procédés industriels de fabrication.

Le modèle traite le contrôle de qualité de matériaux délivré par les centrales de fabrication de béton. Le produit est identifié sous la forme d'une gâchée de bétons hydrauliques ou bitumineux (Fig. 2.4) .



**Figure 2.4** — Procédés de fabrication du béton (Ehrlich et al. 1994)

Pour les bétons hydrauliques, le produit est généralement caractérisé par les variables d'état suivantes :

- les poids ou volumes des différents constituants : granulats, ciment, eau, additifs (entraîneurs d'aires, retardateur de prises, etc.) ;
- les paramètres de fabrication : puissance dissipée au cours du malaxage, temps de malaxage.

Pour les bétons bitumineux ou les enrobés, les variables d'état peuvent être :

- les poids ou volumes des différents constituants : granulats, fine d'apport, fine de récupération et bitume.
- les paramètres de fabrication : température de bitume, temps de malaxage à sec (avant introduction du bitume dans le malaxeur) et temps de malaxage humide (après introduction du bitume).

Le rôle de ce modèle est de délivrer, pour chaque gâchée, sa composition au moment où celle-ci sort du malaxeur pour être déversée dans un camion ou acheminée vers une trémie de stockage.

### 2.6.2 La Finlande

Le centre de recherche technique de Finlande (VTT) a développé le programme **BETVAL** à base des systèmes experts (RNA, base de données,...ect) (Akram et al. 2014). La fonction principale du système est d'aider le personnel du site de construction pour sélectionner le type de béton frais commandé à l'usine du béton prêt à emploi.

Les recommandations formulées par le système sont basées sur trois domaines de connaissances :

- la classe de la résistance à la compression et les techniques appropriées de bétonnage (durcissement et traitement thermique);
- la valeur de consistance de béton basée sur le type de la structure et de l'équipement de production ;
- suggestions pour sélectionner la taille maximale des granulats.

Taffese et al. (2015) ont développé un modèle basé sur les réseaux de neurones artificiels et l'approche d'arbre de décision (méthode d'apprentissage par la machine) pour la prévision de la profondeur de la carbonatation du béton. Le modèle **CaPrM** est un modèle de prédiction de carbonatation du béton basé sur un apprentissage par machine optimisée et intégrée (Akram et al. 2014). Comme tous les modèles basés sur l'apprentissage par machine, les grandes phases de développement de **CaPrM** se composent de la base de données, l'apprentissage, la validation et de test. Le flux de travail de modèle **CaPrM** est illustrée ci-dessous (Fig. 2.5).



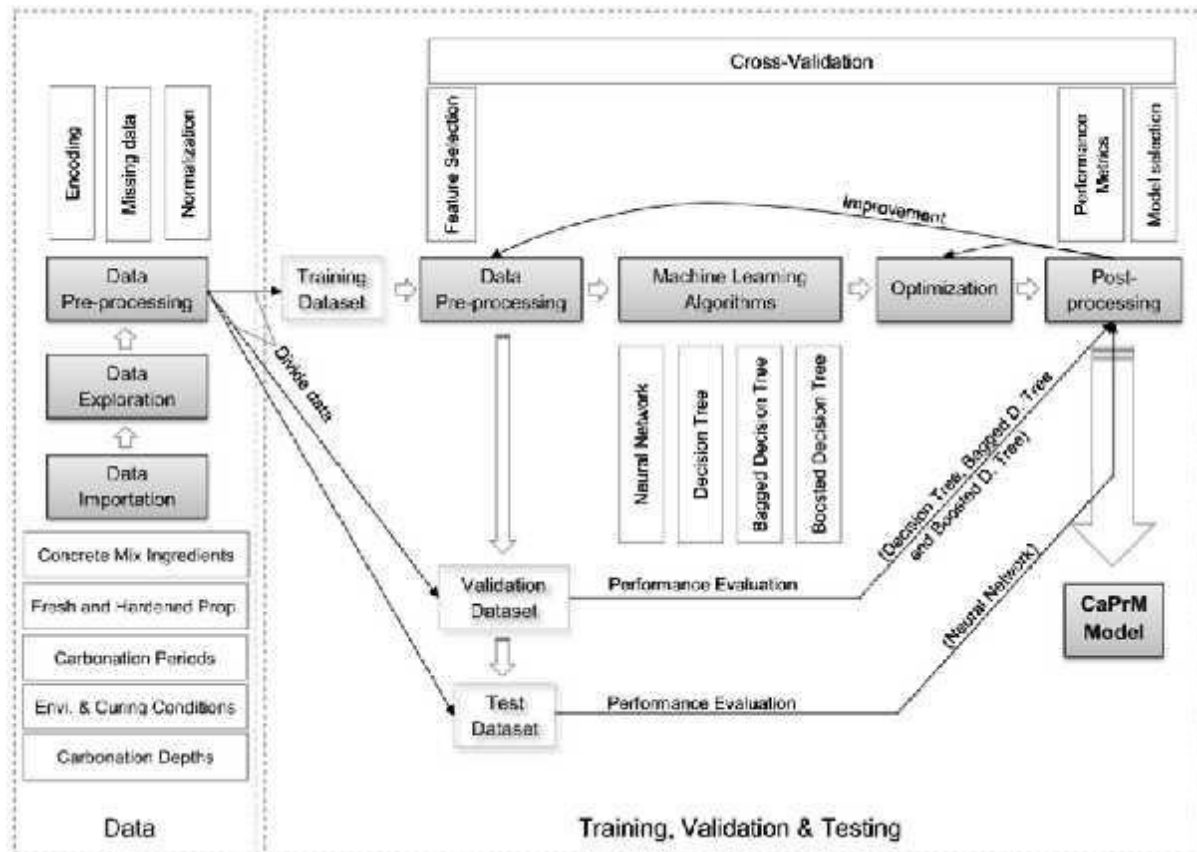


Figure 2.5 — Processus du modèle CaPrM (Akram et al. 2014)

Les boîtes rectangulaires de couleur grise représentent les principaux processus / tâches de la procédure de modélisation.

Les données utilisées pour le développement du modèle **CaPrM** ont été préparé pour la finalisation du projet **DuraInt**. Ce projet a été réalisé en coopération avec l'Université d'Aalto et le Centre de recherche technique VTT de Finlande. Dans ce projet, des éprouvettes de 23 différents mélanges les plus principalement utilisés en Finlande ont été préparés.

Dans le modèle **CaPrM**, 25 variables d'entrée qui contrôlent le processus de carbonatation sont considérés. Il comprend les ingrédients du mélange de béton, les conditions de durcissement, l'environnement de l'exposition, l'âge du béton à l'essai, et les propriétés frais et durcis des spécimens. Le paramètre de sortie du modèle est la profondeur de la carbonatation pour chaque type de béton mesurée à différents âges.

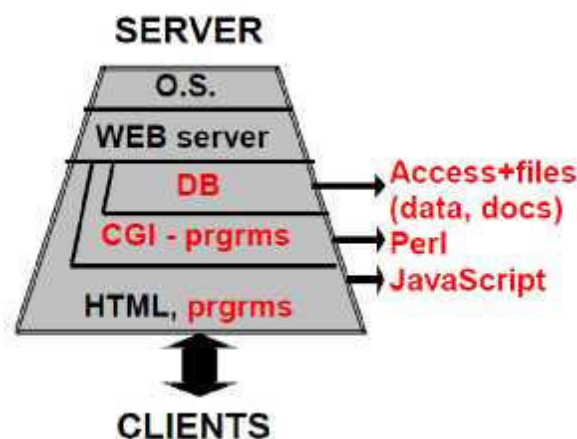
### 2.6.3 L'Italie

Lazzari et al. (2003) ont présenté les réalisations des tâches du projet **IPACS**, une recherche accordée par les Communautés européennes pour évaluer, intégrer et étendre les connaissances existantes sur la prédiction de la fissuration du béton au jeune âge dans la pratique de l'ingénierie. La sous-tâche a été consacrée à la conception et le développement d'outils et des logiciels utiles pour les entrepreneurs et les concepteurs de la gestion de la prédiction de la fissuration du béton au jeune âge.

Ces outils se composent d'un logiciel simulant les principales propriétés du béton au jeune âge, et des bases de données pour stocker les mêmes propriétés. Les tests de laboratoire et de terrain standardisés, les recommandations et les spécifications ont été recueillies et organisées en un système expert (appelé **IPACS**) en mesure de :

- soutenir l'évaluation du risque de fissuration dans les structures en béton;
- indiquer les actions possibles pour l'optimisation des qualités techniques et économiques.

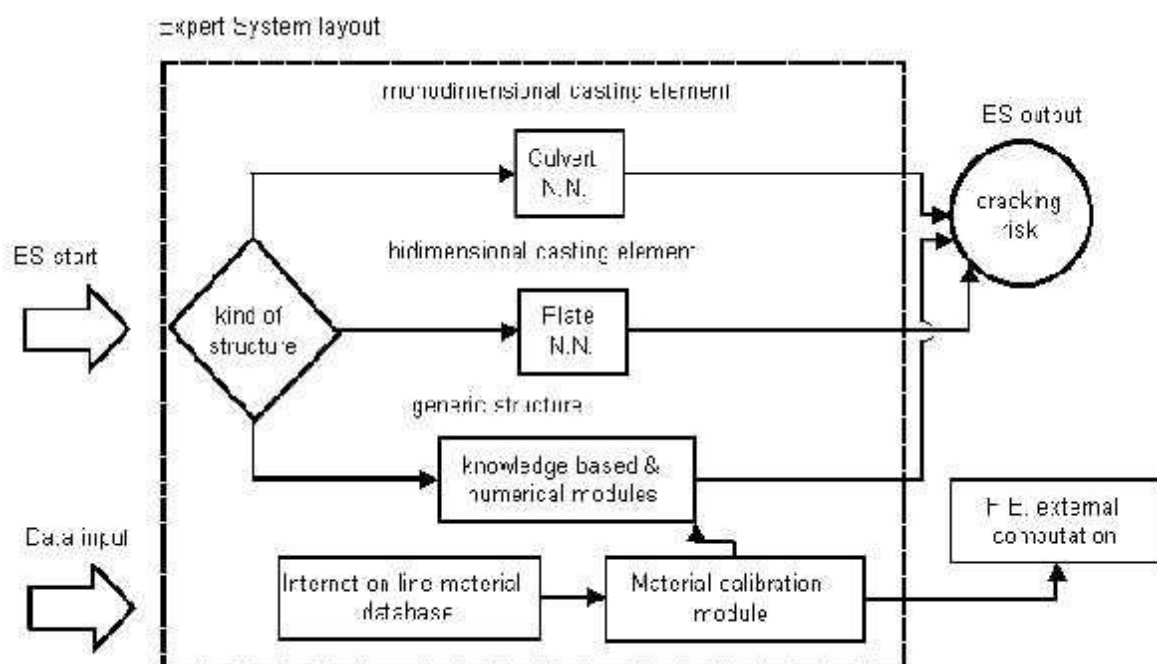
**IPACS** a été développé pour l'exploitation de la technologie de l'Internet, de sorte que les utilisateurs peuvent facilement partager des connaissances et des données via des outils Internet. Cette solution est basée sur le développement d'un site web qui incarne une base de données d'informations sur les outils concrets et intelligents pour traiter ces données, ainsi que des contributions fournies par les utilisateurs (Fig. 2.6).



**Figure 2.6** — Les couches du serveur IPACS (M. Lazzari et al. 2003)

En conséquence, le système peut être considéré comme une architecture client-serveur sur Internet, où un serveur héberge le site et les partenaires peuvent accéder via un navigateur web commun (le client). Chaque partenaire peut obtenir les données du système, les données du

processus et de stocker des données dans la base de données. Le site résultant comprend les composants qui en affichées dans la figure (Fig. 2.7).



**Figure 2.7** — L'architecture fonctionnelle (Lazzari et al. 2003)

Plusieurs modules de traitement au sein d'**IPACS** ont été mis en œuvre par l'intermédiaire de réseaux de neurones. Les réseaux de neurones ont été choisis pour **IPACS** afin de fournir un outil capable de :

- fournir en toute sécurité l'évaluation des risques de fissuration, ce qui requiert de l'expérience et de l'utilisation des outils mathématiques de pointe pour gérer le comportement des matériaux ;
- d'intégrer également des données provenant de réponse structurelle réelle ;
- à partir d'exemples, les réseaux de neurones ont été censés être capables à la fois d'apprendre, d'évoluer et de générer des fissures de béton ; et aussi de traiter avec des données différentes de celles utilisées pour les former, et donc de généraliser ce qu'ils ont appris.

Aussi dans le même projet, une base de données a été créée pour collecter des données sur le béton sous un format uniforme. La base de données comprend un archive principal, contenant des enregistrements qui décrivent des mélanges de béton, onze archives contenant des données relatives à des constituants du béton (eau, ciment, granulats, ...), et les deux archives de données de test et les données traitées.

L'archive du mélange de béton contient la description des différents mélanges de béton, ainsi que des liens vers les autres archives, qui décrivent les résultats des tests (données de test et des données traitées) ou ceux des analyses de ciment, la silice, les cendres volantes, et ainsi de suite. Les archives peuvent contenir des données de différents types (Fig. 2.8):

- chiffres (par exemple la teneur en ciment)
- chaînes (par exemple la personne responsable)
- dates (par exemple la date de coulage)
- fichiers texte (descriptions de méthodes d'essai)
- fichiers de données (par exemple des historiques de températures).

CONCRETE MIX	Cement	<input type="button" value="BROWSE"/> <input type="button" value="SEARCH"/> <input type="button" value="LOAD"/> <input type="button" value="MODIFY"/> <input type="button" value="DELETE"/>
Silica	Fly ash	
GGBS	Water	
Fine aggregate	Coarse aggregate	
Air	Superplasticiser	
Plasticiser	Other admixture	
Test data	Processed data	

**Figure 2.8** — Le panneau de configuration de la base de données (Lazzari et al. 2003)

Des outils graphiques et des explications écrites sont disponibles pour les utilisateurs dans tout le système. Tandis que les utilisateurs avancés peuvent utiliser directement le chemin le plus approprié à travers **IPACS**, les utilisateurs moins expérimentés trouveront différents niveaux d'ex-implications pour sélectionner les outils dont ils ont besoin, pour apprendre les procédures avec le droit de données, de charger la base de données avec les fichiers correctement formatés et ainsi de suite. Les ex-implications peuvent aller de courtes notes en ligne, au graphisme, à des hypertextes.

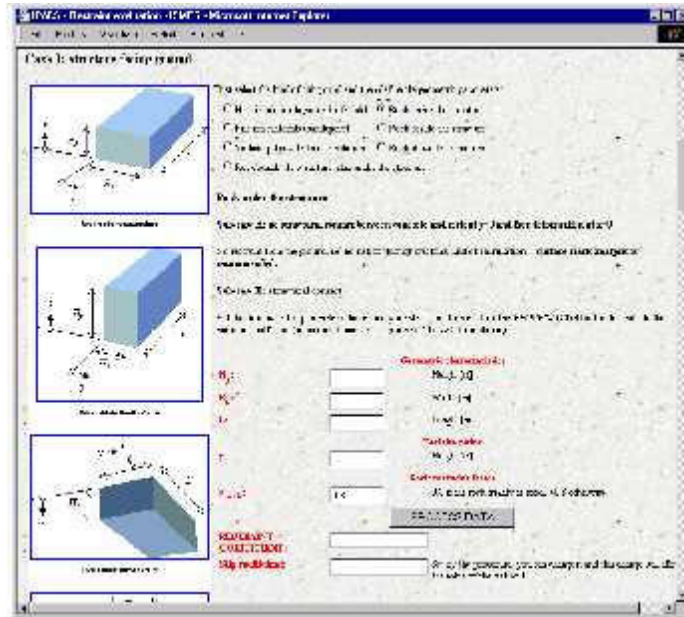


Figure 2.9 — L'interface graphique pour les réseaux de neurones (Lazzari et al. 2003)

2.6.4 La Chine

Li et al. (2014) ont développé, à l'Université de Tongji en Chine, un modèle RNA pour la reconnaissance automatisée des fissures dans les chaussées. Pour améliorer la précision de la reconnaissance de réseaux neurones, un cadre complet de traitement de l'image est proposé (Fig. 2.10), y compris le prétraitement de l'image et l'extraction d'information de fissures. La méthode proposée est évaluée sur les données de 400 images de chaussées obtenues par l'analyseur automatique Route (ARAN) dans le Nord de la Chine.

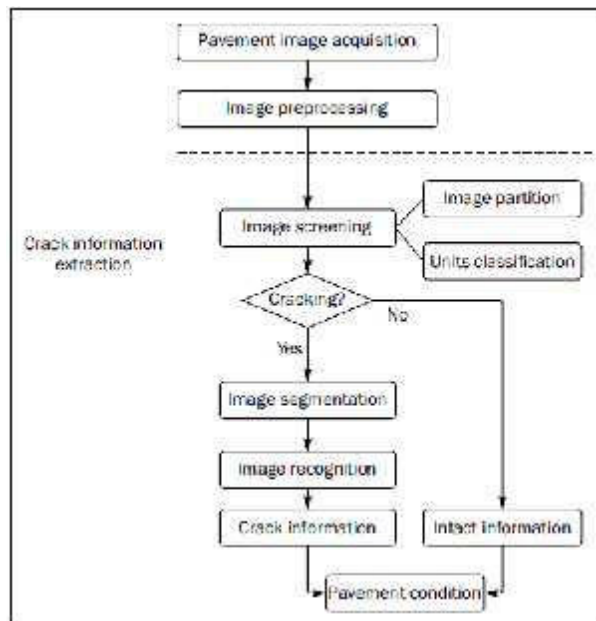
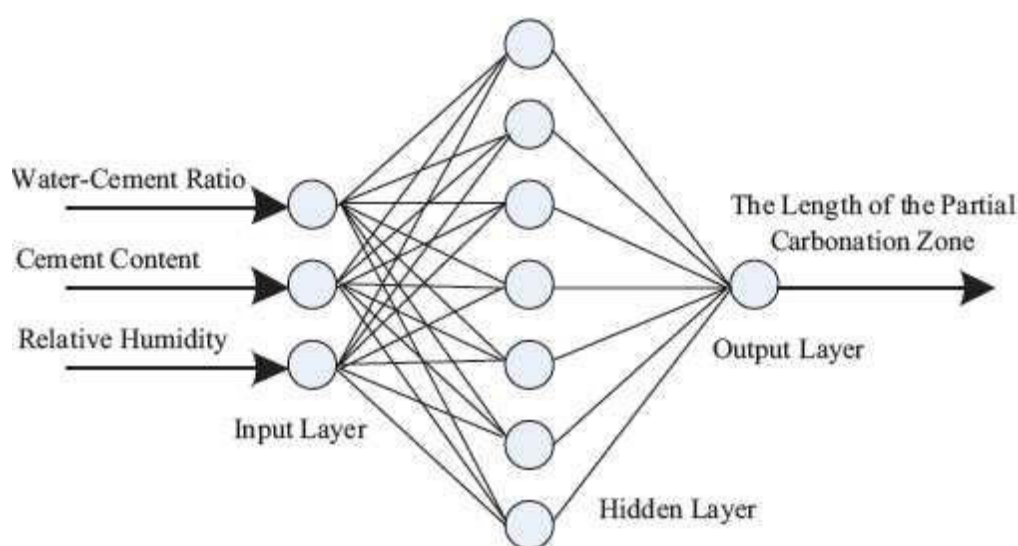


Figure 2.10 — Processus de détection de fissures basé sur le traitement d'image (Li et al. 2014)

Lu et al. (2009) de l'Université de Jiangsu (Zhenjiang, China) ont fait la prévision de la profondeur de carbonatation dans les bétons précontraints en utilisant les réseaux de neurones artificiels. Afin de produire la base de données pour le modèle RNA, des essais expérimentaux de carbonatation accélérée ont été réalisés, et l'influence du niveau de tension sur le processus de carbonatation de béton a été prise en compte en particulier.

Luo et al. (2014) ont utilisé la méthode PSO (Particle Swarm Optimization) pour optimiser le modèle des réseaux de neurones développé pour la prévision de la carbonatation du béton à l'université de Xi'an en Chine. Ils ont pris en considération le rapport Eau/Ciment, la quantité du ciment et l'humidité relative (Fig. 2.11).



**Figure 2.11** — L'architecture du modèle RNA développé (Luo et al. 2014)

Pour détecter l'origine des fissures du béton de manière efficace, Xiaowei (2012) a développé un modèle de réseau de neurone avec un apprentissage non supervisé pour le diagnostic de la fissuration du béton du pont de Chongyang en Chine.

### 2.6.5 Corée du Sud

Lee (2003) a développé un système de prédiction intelligente de la résistance à la compression du béton **I-PreConS** (Intelligent PREDiction system of CONcrete Strength) au centre de recherche et développement, Hyundai Compagnie en Corée du Sud. Dans ce travail un réseau de neurones artificiels modulaires a été proposé avec multiples architectures (05 modèles) comme le montre la figure 2.12.

Le premier modèle prédit la résistance initiale du béton dans les 24 heures après le coulage, les quatre modèles prédisent la résistance du béton du 2ème au 28ème jour après la coulée. Deux techniques principales sont appliquées pour prévoir plus précisément le développement de la résistance du béton. La première consiste à utiliser la technique de condensation de paramètre dans la détermination de neurones d'entrée. L'autre consiste à appliquer la technique de pondération de neurones d'entrée pour plus de précision de la prédiction.

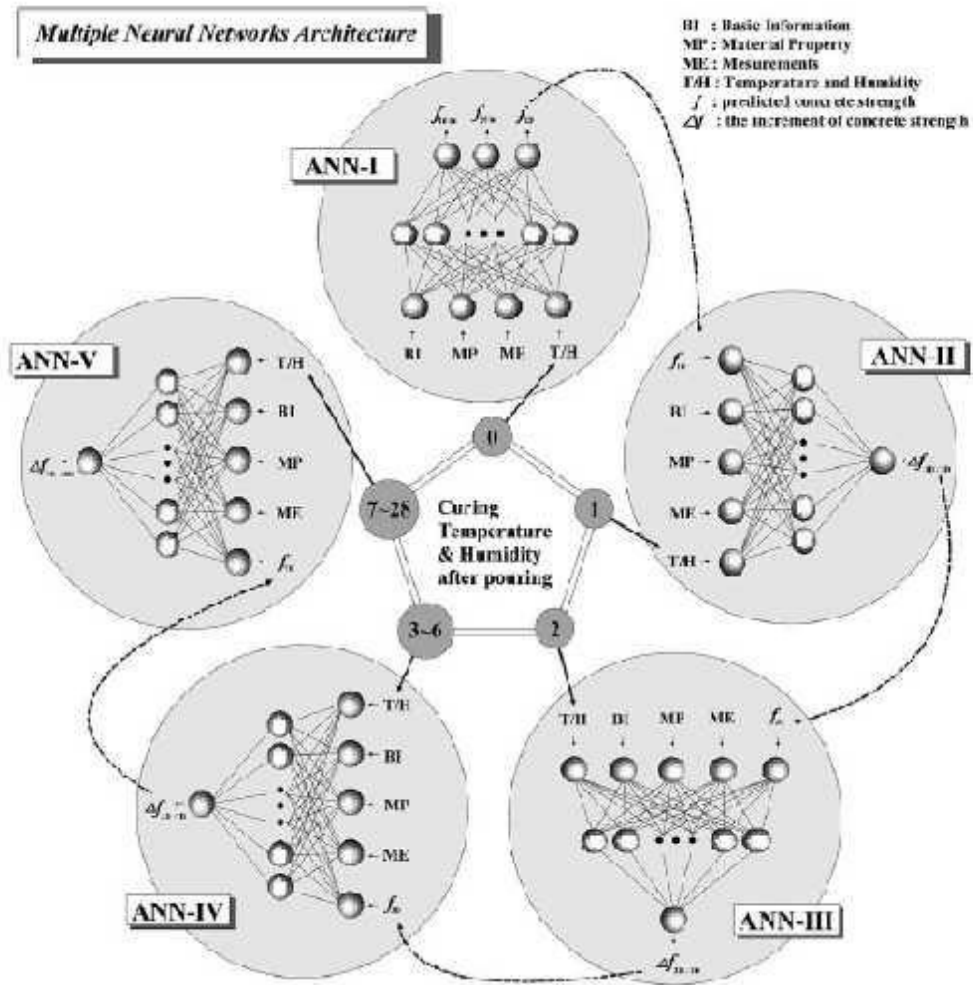


Figure 2.12 — L'architecture modulaire du modèle RNA (Lee, 2003)

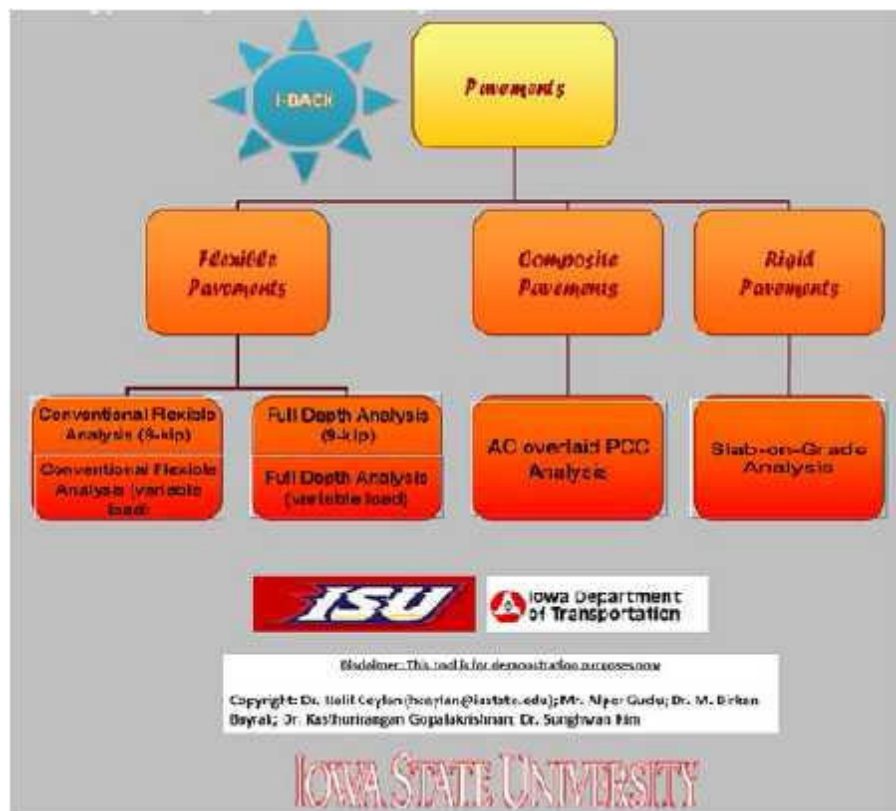
### 2.6.6 Amérique du nord

Une approche de détection des fissures des chaussées basée sur les réseaux de neurones et de la vision par ordinateur, la reconnaissance des formes et des techniques de traitement d'image a été proposée par Cheng et al. (2007) à l'Académie National de Science et d'Engineering.



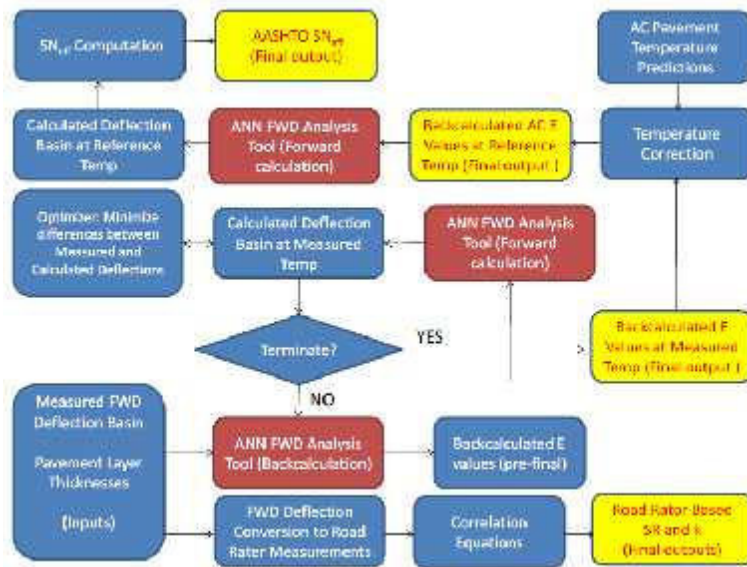
Plusieurs chercheurs utilisent les réseaux de neurones artificiels dans la Federal Highway Administration Research and Technology pour étudier les propriétés des chaussées et le choix des compositions des mélanges bitumineux.

Des chercheurs à l'université/ de l'Iowa State (ISU) ont développé une série de modèles de réseaux de neurones artificiels de modules de couche pour les chaussées souples, rigides, et composites (Ceylan et al. 2014). Ils ont développé un système de logiciel de calcul entièrement automatisé, dénommé **I-BACK** (Figs. 2.13 et 1.14), avec une précision et une facilité d'utilisation des données.



**Figure 2.13** — l'interface des modèles I-BACK (Ceylan et al. 2014)





**Figure 2.14** — Organigramme de module de chaussée flexible (Ceylan et al. 2014) Kwon et al. (2010) à l'Université de Californie, ont utilisé la technique de réseaux de neurones artificiels pour étudier le comportement de carbonatation des structures en béton (Fig. 2.15). Basé sur le cadre du programme des éléments finis DUCOM développé par l'Université de Tokyo, un système de calcul de la profondeur de la carbonatation avec le réseau de neurones et de la porosité est mis en place comme le montre la figure 2.16.

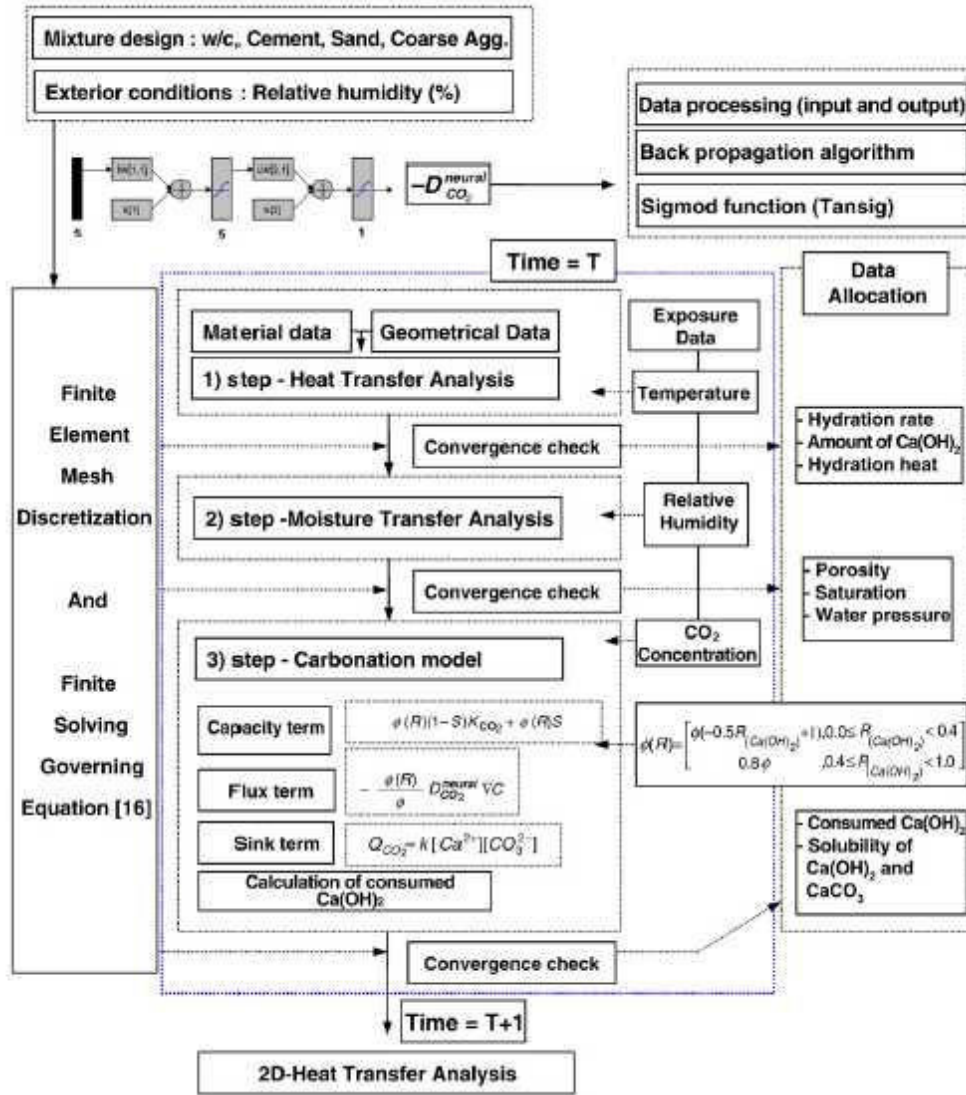
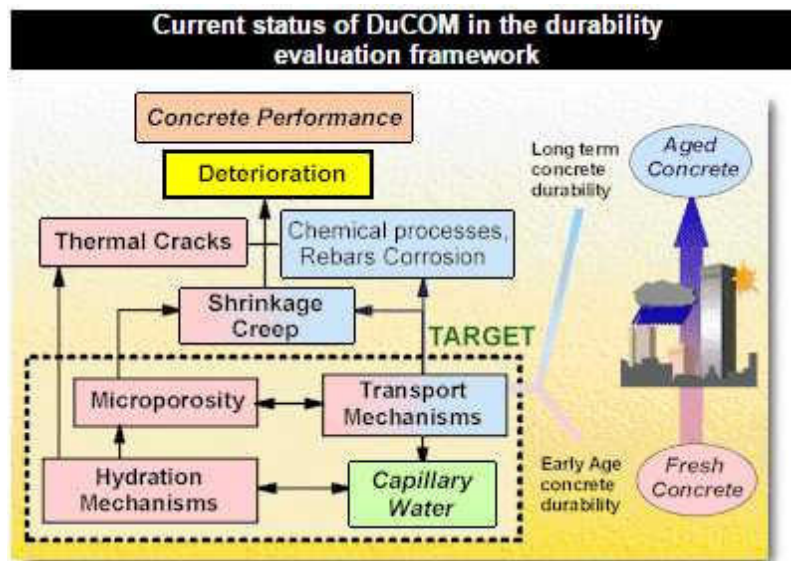


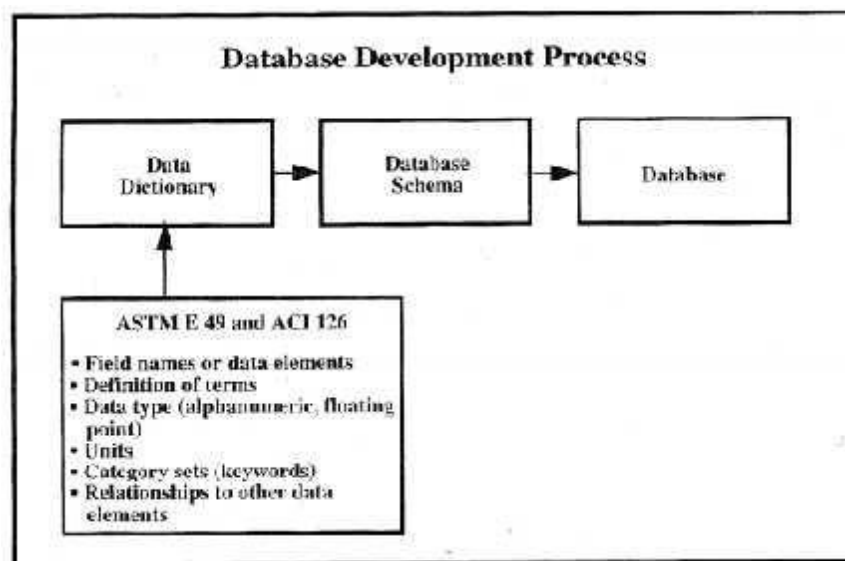
Figure 2.15 — Système de calcul de la modélisation de carbonatation des structures en béton



**Figure 2.16** — Processus du programme DuCOM

Le National Institute of Standards and Technology (NIST) à en Amérique a également entrepris le développement de plusieurs techniques d'intelligence artificielle intéressante et des outils et des bases de données pour faire face à plusieurs problèmes liés à la production des bétons à haute performance (Maekawa et al. 1999).

Ils ont aussi élaboré et mis en œuvre des matériaux basés sur les techniques computationnelles et expérimentales, afin de permettre la prédiction et l'optimisation de la performance initiale du coût et de la durée de vie et de minimiser l'impact environnemental dû à la production du béton (Fig. 2.17).

**Figure 2.17** — Fondamentale de processus de développement d'une base de données (Maekawa et al. 1999).

## 2.7 Conclusion

L'application des réseaux de neurones artificiels a été effectuée avec succès dans la technologie du béton à travers plusieurs modèles. Pour des problèmes complexes et non linéaire, la technique de réseau de neurones artificiels est la plus appropriée car elle est basée sur des données théoriques et des données expérimentales. Ainsi, le béton est un matériau complexe, il existe plusieurs cas pratiques pour lesquels les règles sont soit non connus ou ils sont extrêmement difficiles à découvrir. Ces problèmes ne peuvent pas être modélisés en utilisant des méthodes de calcul traditionnelles. Aussi, contrairement à la régression, où une équation spécifique devant être prédéterminée en se basant sur les données dans le système et de relier l'entrée de variables avec la sortie, la structure générale d'un RNA peut être appliqué à pratiquement n'importe quel système.

# *Chapitre 3:*

---

## MODÉLISATION DU BAP PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES

---

### 3.1 Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Dans ce chapitre sont présentées les concepts et la caractérisation des bétons autoplaçants et les ajouts cimentaires et leurs effets sur les BAP. Enfin, une synthèse des travaux effectués par différents chercheurs pour la modélisation des propriétés des BAP à base de cendres volantes est présentée.

### 3.2 Les bétons autoplaçants

#### 3.2.1 Avantages d'utilisation des BAP

Les bétons ordinaires sont un mélange de quatre éléments. Le ciment qui sert de liant hydraulique, de l'eau, de sables et granulats. Nous avons donc un mélange composé de particules poly-dispersés et de formes différentes. Ils constituent le squelette granulaire et garantissent la résistance mécanique du béton. Ce type de béton, qui est très bien maîtrisé, nécessite d'être vibré pour une mise en place optimale dans les coffrages à géométrie complexe. Les bétons ordinaires sont assez visqueux. Ils ont donc l'inconvénient d'être difficilement pompables.

Afin de remédier à ces problèmes, de nouveaux bétons font leur apparition. Les bétons autoplaçants (BAP) ont ainsi été découverts en 1988 au Japon par (Okamura et Ouchi 1999). Ce sont des bétons très fluides lors de l'écoulement (figure 3.1). Ils se mettent en place simplement sous leur propre poids et ne nécessitent aucune vibration. Ils éliminent donc les nuisances sonores lors d'un chantier. Grâce à leur grande fluidité lors de l'écoulement, la mise en œuvre des BAPs se fait plus rapidement que des bétons ordinaires. Le coulage peut s'effectuer dans des zones fortement ferraiillées (figure 3.2). De plus, leur qualité de parement (aspect de surface) est très bonne comparée à celle d'un béton ordinaire (figure 3.3). Les performances du produit fini, les conditions de travail des ouvriers et les coûts de production de l'entreprise sont donc améliorés (Walraven 2003).



**Figure 3.1** – Ecoulement d'un BAP



**Figure 3.2** – Dalle fortement ferraillées



**Figure 3.3** – aspect de surface

### 3.2.2 Définition du BAP

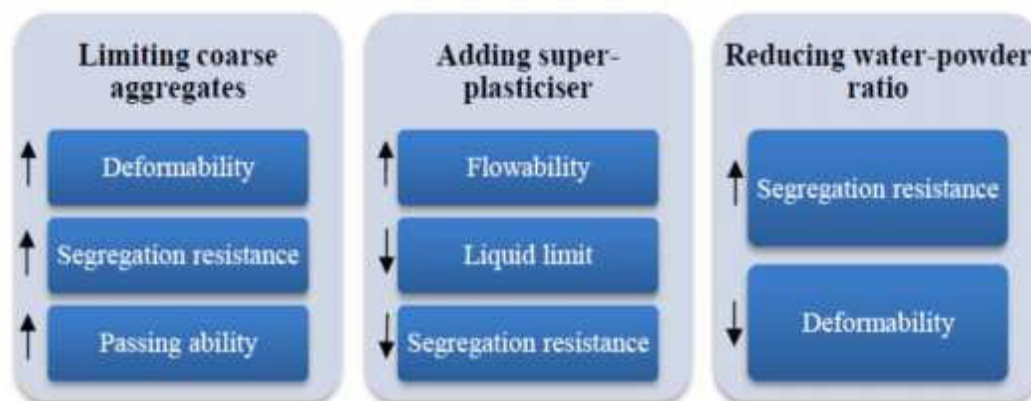
La norme européenne (EN 206-9, 2010) définit « *Un BAP doit être assez fluide pour pouvoir être mis en place avec un débit suffisant et remplir les coffrages sans apport de vibration sous l'effet de son propre poids tout en restant homogène* ».

D'autres chercheurs (Ozawa et al., 1989 ; Khayat, 1999) ont défini le BAP presque dans les mêmes conditions qu'un béton très fluide qui doit remplir les conditions suivantes :

- Capacité de remplissage : le BAP doit circuler sous son poids propre et remplir toutes les parties de coffrage sans aide extérieure ni vibration. Capacité de passage
- Capacité de passage : le BAP doit passer dans des zones fortement ferraillées.
- Le maintien de la stabilité : le BAP doit maintenir son homogénéité sans aucune migration ou la séparation de ses gros composants (agrégats ou / et fibres).

La mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une grande fluidité du matériau, mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiants et de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité.

La figure 3.4 illustre les trois principales règles d'obtention des caractéristiques d'un BAP et l'influence de chaque règle sur le mécanisme permettant l'obtention de ces caractéristiques.



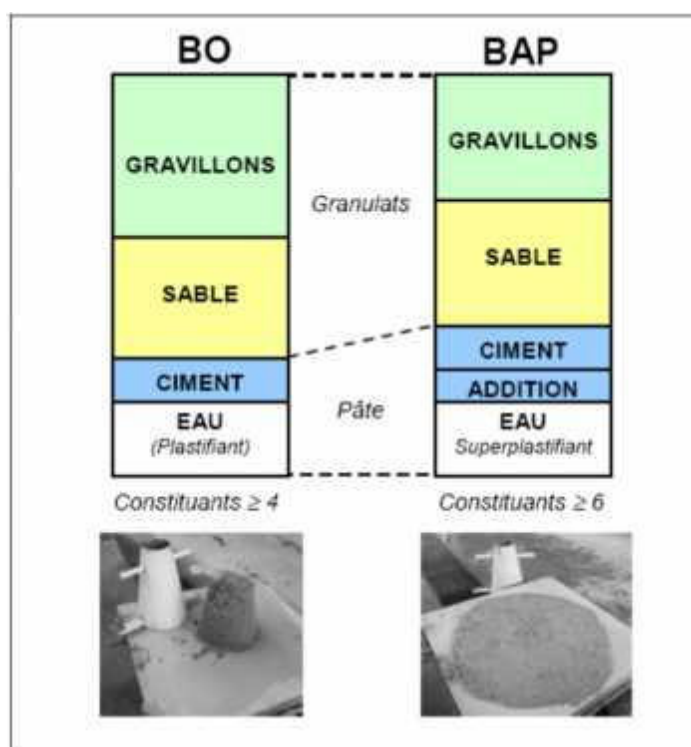
**Figure 3.4** - Mécanismes d'atteindre les caractéristiques d'un BAP.

### 3.2.3 Concept du béton autoplaçant

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes (absence de ségrégation dynamique ou statique).

Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (Figure 3.5). En général, les BAPs possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.





**Figure 3.5** – Comparaison entre la composition type d'un béton ordinaire vibré (BO) et celle d'un béton autoplaçant (BAP).

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement.

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée.

La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats, courantes en centrale à béton. Cela étant, en pratique leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus au superplastifiant et aux additions minérales.

Evidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais. Il existe part le monde divers essais pour caractériser l'ouvrabilité des BAP.



### 3.2.4 Caractérisation des BAP à l'état frais

Le BAP étant un béton apte à s'écouler et à se compacter sous son propre poids, c.-à-d. sans énergie de compactage supplémentaire, il peut remplir des coffrages aux formes complexes et/ou avec armatures denses tout en restant homogène. Ses propriétés à l'état frais se distinguent donc de celles d'un béton traditionnel et ne peuvent être mesurées à l'aide des méthodes classiques (mesure de l'affaissement : *slump*). Des méthodes appropriées ont fait l'objet de nouvelles normes parues en 2010, à savoir les normes d'essais EN 12350-8 à -12.

#### 3.2.4.1 Essai d'étalement

L'essai classique au cône d'Abrams est utilisé pour mesurer un étalement (figure 3.6), dont le diamètre est proportionnel au seuil de cisaillement du béton. Il donne donc une indication sur sa capacité à « s'auto-compacter » en milieu non confiné.



Figure 3.6 – Essai d'étalement.

#### 3.2.4.2 Essai à la boîte en L

Lors de cet essai, on remplit d'abord la partie verticale d'une boîte en forme de L (figure 3.7). Après une minute, la trappe est levée permettant l'écoulement à travers trois armatures de diamètre 14 mm et distantes de 39 mm. Le taux de remplissage final  $H_2/H_1$  renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné.



Figure 3.7 – Essai à la boîte en L.

### 3.2.4.3 Essai de stabilité au tamis

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau (figure 3.8). Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm. Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation.



**Figure 3.8** – Essai de stabilité au tamis.

Une fois que le BAP est caractérisé par ces trois essais fondamentaux d'autres essais expérimentaux du BAP à l'état frais peuvent être utilisés (figures 3.9 à 3.12), parmi ces essais on distingue :

- l'essai V-Funnel,
- l'essai J-Ring,
- l'essai d'écoulement en tube U,
- l'essai d'écoulement en caisson.



**Figure 3.9** – Essai V-Funnel.



**Figure 3.10** – Essai J-Ring.

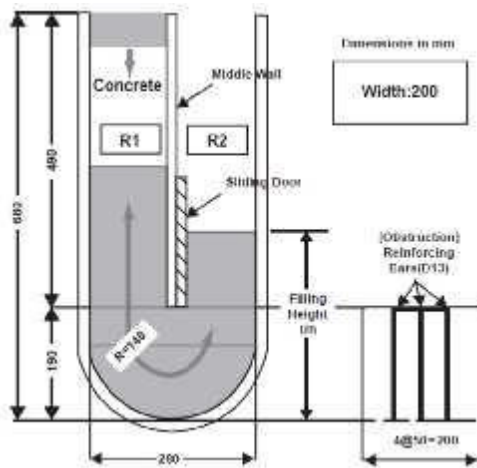


Figure 3.11 – Essai d’écoulement en tube U.

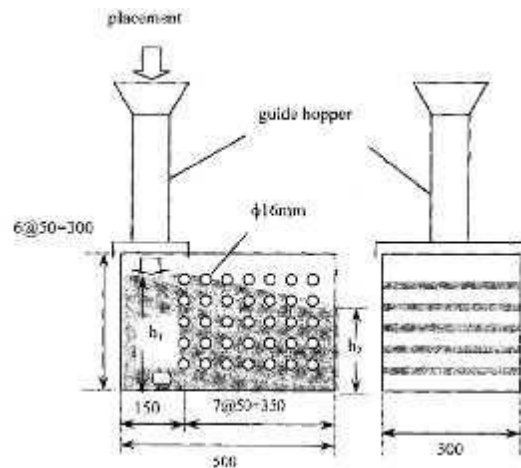


Figure 3.12 – Essai d’écoulement en caisson.

### 3.2.5 Classe de béton en fonction des propriétés à l’état frais

Chacun des essais utilisés pour caractériser l’écoulement du béton est associé à des valeurs limites définissant des classes de béton autoplaçant. Ces classes sont reliées à des contextes de mise en œuvre. Le tableau 3.1 regroupe l’ensemble des valeurs préconisées pour un BAP en se référant aux principaux essais réalisés sur le béton à l’état frais.

Tableau 3.1 - Spécificités les plus courantes d’un BAP à l’état frais (EN 206-9, 2010)

Testing method	Characteristics	Class	Measurement unit	Typical application area
Slump flow	Flowability	SF1	550 to 650 mm	Slabs
		SF2	660 to 750 mm	Walls and columns
		SF3	760 to 850 mm	Densely reinforced and/or complex designed structures
T500 V-funnel	Viscosity	VS1	≤ 2 s	Densely reinforced structures and high-quality surface needed
		VF1	≤ 8 s	
T500 V-funnel	Viscosity	VS2	> 2 s	Reduced formwork pressure needed
L-box	Passing ability	PA1	≥ 0.80 with 2 rebars	House building
		PA2	≥ 0.80 with 3 rebars	Civil engineering
Sieve segregation resistance	Segregation	SR1	≤ 20%	Flow distance <5 metres
		SR2	≤ 15%	Flow distance >5 metres High-quality surface needed

Les spécifications proposées par l’ENFRAC (2005) visent à permettre de répondre aux exigences des BAPs sur site pour diverses applications, c’est-à-dire qu’elles représentent un outil pour une meilleure communication entre l’entrepreneur et le fournisseur de béton. La

Figure 3.13 illustre les spécifications en ce qui concerne les propriétés requises pour différentes applications.

V-funnel flow time	EFNARC class			
9-25 secs	VF2	ramps		tall and slender elements
5-9 secs	VF1		walls	
3-5 secs	VF1	floors		
slump flow		470-570 mm	540-660 mm	630-800 mm
EFNARC class		-	SF1	SF2/SF3

**Figure 3.13** – Classe de béton en fonction des propriétés à l'état frais (ENFRAC, 2005).

### 3.2.6 Application des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicat, c'est-à-dire, présentant :

- des densités de ferrailage importantes ;
- des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc. ;
- des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc. ;
- des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- des exigences architecturales et de qualité des parements particulières ;
- des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.

Les usines de préfabrication ont développé de nouveaux processus de fabrication pour bénéficier des avantages de ce matériau. De nombreux produits préfabriqués sont actuellement couramment réalisés en BAP aussi bien en bâtiment qu'en travaux public.

### 3.3 Ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelquefois également au béton. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé plus économique.

A l'origine, les ajouts ont été lancés pour des raisons économiques. Ils existent soit sous forme de produits naturels, qui ne devaient être que peu traités, soit résultant de processus industriels, sous forme de déchets ou de sous-produits. Il y a eu, en outre, l'augmentation des coûts énergétiques, auxquels, plus tard, sont venues s'ajouter des raisons écologiques. Indépendamment de ces avantages écologiques et économiques, des ajouts appropriés influent positivement sur certaines des propriétés du béton, à l'état frais, mais surtout à l'état durci. De plus, sans ajout, certains bétons avec des propriétés particulières (bétons à faible chaleur d'hydratation, bétons à retrait compensé, etc.) ne pourraient pas être fabriqués.

Il existe deux types d'addition selon la norme ENV 206 :

- **Les additions de type I** : Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturelles ou synthétiques spécialement sélectionnées qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau...). Parmi ces additifs on distingue le calcaire, la poussière et les fillers ;
- **Les additions de type II** : Ce sont des matériaux finement divisés à caractère inorganique, pouzzolanique ou hydraulique latent. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou, en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés. Parmi ces additifs on distingue la fumée de silice, le laitier, les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles.

#### 3.3.1 Ajouts de type I

La roche calcaire se compose de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), c'est la matière organique de base pour les roches calcaires qui se forment dans les lacs ou les mers. La réaction chimique qui se produit à causes de la chaleur et de la pression au fond de la couche des sédiments sert à transformer les sédiments en pierres solides, qui sont appelées calcaires. Pendant plus des milliers et des millions d'années, les couche sont accumulées l'une sur l'autre et augmentent le poids total des roches calcaires formées.

Les ciments Portland à base de calcaire sont les plus employés couramment en Europe. Deux classes existent en EN 197-1 indiqués comme CEM II/A-L et CEM II/B-L dans lesquels le

maximum du contenu du calcaire est 20 et 35% respectivement. A part ces deux classes spéciales, le calcaire est employé largement dans d'autres types européens communs de ciment en tant que constituants additionnels de 0 à 5% au minimum.

### **3.3.2 Ajouts de type II**

#### **3.3.2.1 Cendres volantes**

Les cendres volantes, représentent l'ajout cimentaire le plus utilisé en béton, c'est un sous-produit de la combustion du charbon pulvérisé aux usines génératrices de puissance électriques. Les cendres volantes sont alors rassemblées des gaz d'échappement par les dépoussiéreurs électrostatiques ou les filtres à manches. Les cendres volantes sont une poudre finement divisée ressemblant au ciment Portland. Pour les cendres volantes non compactées, la masse volumique (la masse par volume unitaire comprenant l'air entre les particules) peut varier de 540 à 860 de  $\text{kg/m}^3$ , tandis qu'avec le stockage ou la vibration, la gamme de variation peut être 1120 à 1500  $\text{kg/m}^3$ . Les constituants des cendres volantes sont principalement la silice, l'alumine, le fer et le calcium contenant en verre de silicate. La densité relative des cendres volantes s'étend généralement entre 1,9 et 2,8 et la couleur est généralement grise. Les cendres volantes de la classe F et de la classe C selon l'ASTM C 618 et AASHTO M 295 sont utilisées généralement en tant que matériau pouzzolanique pour le béton d'usage courant. Les cendres volantes F contiennent généralement un pourcentage bas de calcium (moins de 10% de CaO). Les cendres volantes de classe C contiennent souvent (10% à 30% de CaO).

#### **3.3.2.2 Laitier de haut-fourneau**

Le laitier de haut-fourneau est un sous-produit de l'industrie sidérurgique, issu de la fabrication de la fonte. La quantité de laitier produite correspond directement à la richesse du minerai de fer utilisé. Pour un haut fourneau fonctionnant avec des minerais riches en fer, on atteint généralement une proportion 180 à 350 kg de laitier pour 1 tonne de fonte produite.

Lors de la fabrication du laitier, le mode de refroidissement, lent ou rapide, va influencer sur la nature du laitier obtenu et sur son utilisation. La composition chimique du laitier varie en fonction de la nature des produits de base, des combustibles et du procédé de fabrication de la fonte. Elle peut aussi varier dans le temps avec l'altération des sources de minerais (Moranville-Regourd, 1998).

Le laitier granulé nécessite l'utilisation d'un agent d'activation pour pouvoir s'hydrater. Depuis 1862, date où l'allemand Emil Langen découvre la propriété hydraulique latente du laitier

granulé, à savoir la réaction du laitier en présence d'eau et d'un activant basique, l'activation des laitiers est un domaine de recherche pour lequel de nombreux travaux ont été réalisés.

Le ciment Portland au laitier est le moyen le plus courant pour utiliser le laitier granulé de haut-fourneau (Daimon, 1980). Le développement de ce liant sur le marché est dû aux nombreux avantages qu'il procure : une faible chaleur d'hydratation, une durabilité importante, une résistance aux sulfates et autres agents chimiques agressifs et une couleur claire. Mais il présente un inconvénient majeur : une résistance au jeune âge plus faible que celle d'un ciment Portland Ordinaire.

### **3.3.2.3 Fumée de silice**

La fumée de silice, également appelée par micro-silica ou de la fumée condensée de silice, est un sous-produit qui est employé en tant que pouzzolane. Ce sous-produit est un résultat de la réduction de quartz de grande pureté avec du charbon dans un four d'arc électrique de la fabrication de l'alliage de silicium ou de Ferro-silicium. La vapeur de silice se lève comme une vapeur oxydée en 2000°C (3630°F) dans les fours. Quand elle se refroidit elle se condense et est rassemblée par un tissu énorme et mise en sac. La fumée condensée de silice est alors traitée pour enlever des impuretés et pour commander la dimension particulière.

La fumée condensée de silice est essentiellement silice (habituellement plus de 85%) sous la forme (amorphe) non cristalline. Puisque c'est un matériau aéroporté comme les cendres volantes, il a une forme sphérique. Elle est extrêmement fine avec des particules moins de 1 µm de diamètre et avec un diamètre moyen d'environ 0,1 µm, environ 100 fois plus petites que le ciment. La fumée condensée de silice a une finesse d'environ 20.000 m<sup>2</sup>/kg (méthode d'adsorption d'azote). La densité relative de la fumée de silice est généralement de l'ordre de 2,20 à 2,5.

La fumée de silice est vendue sous la forme de poudre mais généralement disponible dans un liquide. Elle est capable d'intervenir selon deux mécanismes :

- L'effet granulaire : Les particules de la fumée de silice étant sphériques, lisses et très petites, viennent combler les interstices entre les grains de ciment. C'est grâce à un produit défloculant que cet effet granulaire peut être obtenu et conduira à une réduction importante de la teneur en eau. C'est la forme de ces particules qui va aider à la mise en place des bétons.



- L'effet pouzzolanique: La fumée de silice, amorphe et riche en silice, peut se combiner à la chaux lors de l'hydratation du ciment, afin de donner des hydrates supplémentaires. Ce mélange permettra d'obtenir des bétons à haute et très haute performance.

### **3.3.2.4 Metakaolin**

Le metakaolin (MK) est l'un des matériaux cimentaires développés récemment pour le béton performant. Il est produit en calcinant l'argile épuré de kaolinite dans une température variant de (650 à 800 °C) pour chasser l'eau chimiquement liée dans les interstices du kaolin et détruire la structure cristalline, qui convertit effectivement le matériau en phase de MK, un aluminosilicate amorphe. La dimension particulaire du MK est généralement moins de 2µm, qui est sensiblement plus petit que des particules de ciment. Il est typiquement incorporé dans le béton pour remplacer 5 à 20 % de ciment. L'oxyde d'aluminium et le dioxyde de silicone sont les deux composants principaux du MK (Steven et al, 2003).

### **3.3.2.5 Pouzzolane naturelle**

Le terme pouzzolane provient de Pouzzoles, nom d'une ville italienne de la région de Naples. Il y désigne un matériau volcanique cendreuse de composition trachytique, de couleur claire et friable, utilisé pour la fabrication de mortier et de ciment. Cette application en tant que ciment naturel remonte aux constructions romaines de l'Antiquité.

Les pouzzolanes sont des roches pyroclastiques formées de fragments de magma (pyroclastites) projetés dans l'atmosphère lors d'éruption volcaniques et refroidis au cours de leur parcours aérien. La vitesse de refroidissement relativement importante, qui applique un effet de trempe au magma, explique que le verre volcanique (matière amorphe, non cristallisée) soit un des composants majeurs des matériaux pouzzolaniques, ainsi que d'autres minéraux magmatiques (feldspaths, pyroxène, olivine, oxydes de fer...) et les xénolites (Rocher, 1995).

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice (SiO<sub>2</sub>), d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et d'oxyde ferrique (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La proportion de SiO<sub>2</sub> réactive, définie et déterminée selon l'ENV 197-1 (2000), constituant d'au moins 25 % en masse, et la somme des trois oxydes (SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) doit être supérieure à 70% selon la norme ASTM C 618.

Massazza (1993) classe les pouzzolanes en trois constituants :

- les constituants actifs : phase vitreuse plus ou moins altérée, opale, terre de diatomées,
- les constituants inertes : phase cristallisée autre que les zéolites,
- les constituants nocifs : substances organiques et argiles gonflantes.



### **3.4 Effet des cendres volantes sur le BAP**

Les ajouts cimentaires tels que la fumée de silice, les cendres volantes, le laitier de haut-fourneau, la pouzzolane naturelle et le metakaolin sont souvent utilisés dans le béton pour réduire les coûts, améliorer la maniabilité, réduire la chaleur d'hydratation et d'améliorer la durabilité. En outre, les poudres de haute finesse vont diminuer la taille et le volume de vides, ce qui se traduit par des réductions de ressuage et de ségrégation (Mehta et al., 1993). En raison de la réduction du développement de la résistance initiale du mélange avec des cendres volantes ou de laitier, la résistance de ces mélanges peut avoir besoin d'être évalués à un âge au-delà de 28 jours. Dans certains cas, les ajouts sont utilisés pour réduire la résistance à certains âges, car la quantité de matériaux de poudre nécessaire pour ouvrabilité (Aitcin, 1998).

#### **3.4.1 Effet des cendres volantes sur les propriétés à l'état frais**

##### **3.4.1.1 Effet sur l'ouvrabilité et l'écoulement du BAP**

L'ouvrabilité est une propriété importante du béton plastique ; elle dépend principalement de la cohésion. La cohésivité est largement contrôlée par le volume de la pâte dans le béton. Les CV peuvent être ajoutées au béton par trois voies, d'une part en tant que remplacement partiel de ciment en masse, d'autre part, en remplacement partiel des granulats, et, troisièmement, en remplacement partiel de ciment et d'agrégats à la fois. Les fines particules de CV, améliorent généralement la maniabilité et la fluidité en réduisant la taille et le volume des vides, ce qui nécessite moins d'eau pour produire un béton de consistance donnée (Robert et al. 1983).

Berry et al. (1982) ont rapporté que le béton fait en remplaçant 30% de ciment avec la classe F de cendres volantes requies 7% moins d'eau que le béton de contrôle à une ouvrabilité donnée. Dans un autre cas impliquant des recherches sur les matériaux du béton pour la construction des barrages, il a été constaté que, avec l'ajout de CV, les bétons résultant, avec un rapport E/L plus faible, a montré une meilleure cohésion, une bonne maniabilité et une réduction de la ségrégation.

De nombreux chercheurs ont observé que l'utilisation de grossière CV, ou des CV avec une forte perte au feu (généralement 10% ou plus) a provoqué une augmentation des besoins en eau au lieu de le réduire. Cela se produirait seulement quand une quantité considérable de carbone, qui est généralement de grande taille, est présente dans les CV. Encore une fois, un peu élevé de calcium dans les cendres volantes peuvent contenir de manière significative une grande quantité de  $C_3A$ , qui tend à augmenter les besoins en eau due à la perte de consistance,

causée par la formation rapide d'aluminates de calcium hydrates ou hydrates de sulfo-aluminate.

Lorsque les CV sont ajoutés au béton par remplacement partiel des agrégats, l'ouvrabilité sera légèrement réduite, en raison de l'augmentation de la demande en eau et l'augmentation de la traînée visqueuse due à la présence de particules supplémentaires (Mehta, 1983).

Une étude sur le BAP (Bouzoubaa et al. 2001) incorporant des volumes élevés de cendres volantes de classe F a confirmé que le dosage de SP augmente avec la diminution du pourcentage de CV pour atteindre une déformabilité désirée. Xie et al. (2002) ont développé un BAP incorporant de 30 à 40% de cendres volantes ultra-pulvérisés (CVUP). La composition chimique est similaire à celle de la classe F des cendres volantes, mais leur finesse est très élevée allant de 550 à 1100 m<sup>2</sup> / kg. L'effet de CVUP sur l'état frais du BAP était d'améliorer la viscosité, et son effet est similaire à ceux des agents modifiant la viscosité.

Les cendres volantes ont été utilisées avec succès dans le BAP, y compris les applications avec des volume élevé de cendres volantes (Patel et al., 2004 ; Christensen et Ong, 2005). Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation des cendres volantes améliore généralement l'ouvrabilité.

Sonebi (2004) a constaté que l'utilisation de cendres volantes réduit à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité plastique du BAP. Il a développé un béton autoplaçant avec une résistance moyenne du béton en utilisant les cendres volantes pulvérisées avec un dosage minimum de superplastifiant. Un plan factoriel a été réalisé pour modéliser mathématiquement l'influence des principaux paramètres sur la capacité de remplissage, la capacité de passage, la résistance à la ségrégation et résistance à la compression, qui sont importants pour le succès du développement de ce type de béton. Les paramètres pris en compte dans l'étude étaient le contenu de ciment et de cendres volantes, le rapport eau/liant et le dosage du superplastifiant. Les réponses des modèles statistiques dérivées sont l'étalement, la perte de fluidité, le temps V-entonnoir, le L-box, la résistance à la ségrégation et résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours. Vingt et un des mélanges ont été préparés (Tableau 3.2) pour dériver des modèles statistiques, et cinq ont été utilisés pour la vérification et la précision des modèles développés.

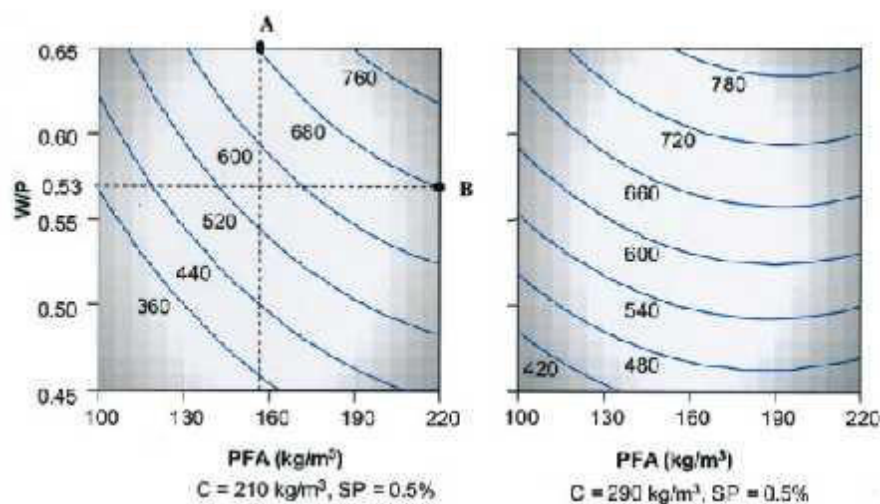
Les modèles ont été validés par des mélanges avec un rapport E/L de 0,38 à 0,72, un dosage de ciment de 60 à 216 kg/m<sup>3</sup>, 183 à 317 kg/m<sup>3</sup> de cendres volantes et de 0% à 1% de superplastifiant, en masse de poudre. L'effet du rapport E/L, de ciment, de la teneur en cendres

volantes et le dosage de superplastifiant ont été caractérisées et analysées à l'aide des équations de régression polynomiale, qui permettent d'identifier les principaux facteurs et de leurs interactions sur les propriétés mesurées. Les résultats montrent que le béton autoplacant peut être réalisé avec une résistance à la compression à 28 jours de 30 à 35 MPa en utilisant jusqu'à 210 kg / m<sup>3</sup> de cendres volantes.

**Tableau 3.2** – Composition des mélanges du BAP (Sonebi, 2004)

Mix	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	PFA (kg/m <sup>3</sup> )	W/B	SP (%)	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )
1	290	100	0.45	0.8	913	837
2	250	261	0.55	0.5	478	837
3	210	100	0.65	0.8	910	837
4	250	160	0.55	0.5	742	837
5	210	220	0.45	0.8	786	837
6	290	220	0.65	0.8	369	837
7	290	100	0.65	0.2	709	837
8	290	220	0.45	0.2	625	837
9	250	160	0.55	0.5	742	837
10	250	160	0.55	0.5	742	837
11	250	160	0.55	0.5	742	837
12	250	160	0.55	0.0	739	837
13	210	100	0.45	0.2	1066	837
14	317	160	0.55	0.5	594	837
15	250	29	0.55	0.5	1006	837
16	210	220	0.65	0.2	562	837
17	250	160	0.55	0.5	742	837
18	250	160	0.38	0.5	919	837
19	250	160	0.55	1.0	746	837
20	250	160	0.72	0.5	566	837
21	183	160	0.55	0.5	891	837

La figure 3.14 présente l'effet de l'augmentation du rapport E/L sur étalement du BAP par rapport à la quantité de cendres volantes utilisées. L'augmentation de la quantité des cendres volantes utilisées pour une valeur donnée de ciment conduit à une augmentation de la valeur d'étalement du BAP.



**Figure 3.14** – Courbes isoparamétriques d'étalement par rapport E/L et CV de mélanges à base de 210 et 290 kg/m<sup>3</sup> de ciment et de 0,5% de SP (Sonebi, 2004).

L'incorporation des CV, du Laitier ou du calcaire réduit l'exigence de la quantité du SP nécessaire pour obtenir une ouvrabilité similaire par rapport à un BAP sans ajouts cimentaires (Yahia et al. 1999). L'utilisation des cendres volantes améliore les propriétés rhéologiques et réduit les risques de fissuration du béton car il abaisse la chaleur d'hydratation du ciment. Des études ont montré que les cendres volantes de remplacement jusqu'à 30% améliorent significativement des propriétés rhéologiques des bétons fluides.

Kim et al. (1996) ont étudié les propriétés du béton de super écoulement contenant des cendres volantes. Ils ont indiqué qu'un taux de remplacement de ciment de 30% des cendres volantes a donné lieu à une excellente aptitude au façonnage et de la fluidité. D'autres chercheurs ont évalué l'influence des ajouts cimentaires sur l'ouvrabilité et ont conclu que le remplacement du ciment par 30% de cendres volantes peut améliorer de façon significative les propriétés rhéologiques. En outre, l'incorporation de cendres volantes réduit également la nécessité d'agent chimique modifiant la viscosité.

Bouzoubaa et Lachemi (2001) ont conçu un BAP incorporant des volumes élevés de CV pour réduire le coût. Un BAP économique ayant une résistance à la compression de 35 MPa a été produit avec un rapport eau-liant de 0,35 à 0,60 et un dosage de CV de 40 à 60 %. Les BAP avec un volume élevé des cendres volantes ont une valeur d'étalement dans la plage de 500 ± 700 mm, un temps d'écoulement allant de 3 à 7 s, un indice de ségrégation allant de 1,9 à 14% (Tableau 3.3).

**Tableau 3.3** – Propriétés à l'état frais du BAP (Bouzzoubaa et al., 2001)

Mixture no.	W/(C+FA)	% of fly ash	Unit weight, kg/m <sup>3</sup>	Slump, mm	Slump flow, mm	Funnel test flow time, s
1	0.5	–	2350	110	–	–
2	0.45	40	2291	240	625	3
3	0.4	40	2250	240	625	4
4	0.35	40	2220	240	650	7
5	0.45	50	2290	230	520	3
6	0.4	50	2250	240	570	5
7	0.35	50	2250	240	540	6
8	0.45	60	2320	230	450	3
9	0.4	60	2280	240	600	3
10	0.35	60	2280	240	650	4

### 3.4.1.2 Effet sur le temps de prise du BAP

Le temps de prise du BAP contenant des CV est plus lent que le béton de ciment Portland correspondant. Pour une haute teneur en carbone de CV, les besoins en eau pour une consistance donnée est plus élevé et donc aussi un retard de temps de prise (Mehta, 1983 ; Dodson et al. 1981) ainsi. Lane et al. (1982) ont indiqué que la CV ralentit généralement la prise du béton et le retard peut être influencée par la proportion, la finesse, la composition chimique des CV.

Dans une étude réalisée par Bouzzoubaa et al. (2001), ils ont constaté que le temps de début de prise du BAP avec 60% de cendres volantes de classe F était 7.26 h : m tandis que le temps de fin de prise était 10.04 h : m. Les temps de début et de fin de prise du béton de contrôle (sans CV) étaient 04 :48 h : m et 6 :28 h : m respectivement. Les temps de prise de BAP incorporant 40 à 60% de classe F de cendres volantes se sont révélés être de 3 à 4 heures de plus que le béton de contrôle. Il est souhaitable d'étudier l'influence des CV sur le temps de prise du béton avant d'utiliser des cendres volantes.

### 3.4.2 Effet des cendres volantes sur les propriétés à l'état durci

#### 3.4.2.1 Effet sur la résistance à la compression

En raison de considérations économiques et de durabilité, les CV sont généralement utilisés comme un remplacement partiel du ciment Portland dans le béton. La résistance à la compression est une propriété importante du béton. La plupart des autres propriétés directement ou indirectement, dépendent de la résistance à la compression. Le taux de développement de la résistance et la résistance ultime sont contrôlés par différents paramètres interdépendants, y

compris la cinétique de réaction d'hydratation du composé de ciment Portland et de la phase minéralogique de mélange et de ses caractéristiques. En effet, le développement de la résistance est fonction du procédé de remplissage de pores, qui a lieu à la formation de produits d'hydratation.

Les CV de haute teneur en calcium peuvent commencer leur activité cimentaire et pouzzolanique dès 3 jours après le début de l'hydratation. Les CV de faible taux de calcium diminuent la résistance au jeune âge (7 jours) et l'augmentent à long terme (56 jours). Il semble que la disponibilité des hydroxydes, sulfates et ions de calcium dans la solution environnante déclenche l'hydratation de CV avec un taux élevé en calcium relativement rapide, et le processus est autonome en raison de la fourniture de ces ions de l'hydratation de la CV elle-même.

Lorsque les CV sont utilisés comme un remplacement partiel des granulats fins, elle augmente la résistance du béton aux courts et long terme. Le gain de résistance au jeune âge est dû en partie à une légère accélération d'hydratation de ciment Portland. Le gain de résistance à long terme, ce qui peut être important, est principalement dû à la réaction pouzzolanique, provoquant un raffinement de pores, et en remplaçant le composant (hydroxyde de calcium) plus faible avec des C-S-H (Mehta 1997).

Si l'élimination des gros pores et de la réduction de l'hydroxyde de calcium sont des éléments nécessaires pour la production de bétons ayant une résistance à la compression élevée, les CV et d'autres adjuvants minéraux sont les plus adaptés, quelle que soit leur utilisation en tant que remplacement de ciment, remplacement des agrégats ou les deux.

Les cendres volantes de classe F réduisent le développement de la résistance initiale mais assurent une bonne durabilité du BAP. Les cendres volantes de classe C retardent également le temps de durcissement plus de classe F cendres volantes. La réduction du développement de la résistance précoce pour les mélanges avec des cendres volantes peut être compensée par l'utilisation d'un accélérateur de prise (Shadle et al., 2002).

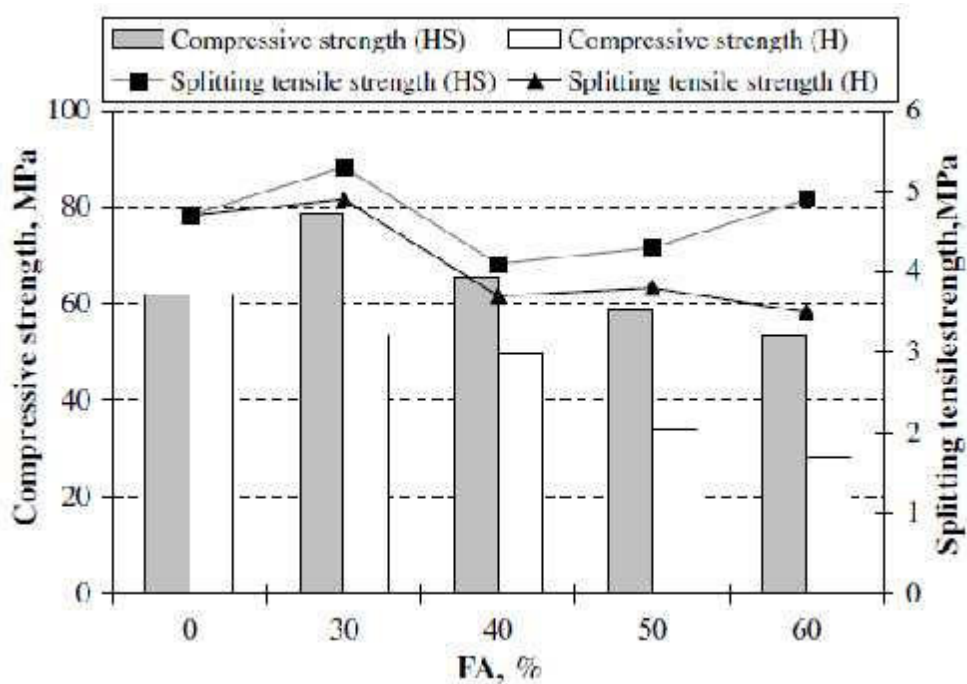
YAZICI (2007) a réalisé l'étude du remplacement du ciment par des cendres volantes de classe C en différents pourcentages de 30% à 60%. Les propriétés mécaniques ainsi que des propriétés de durabilité de divers mélanges de BAP tels que, le gel - dégel et la résistance à la pénétration des chlorures ont été étudiés. Des essais similaires ont été effectués avec l'incorporation de 10% de fumée de silice aux mêmes mélanges. Les résultats des tests indiquent que le BAP pourrait



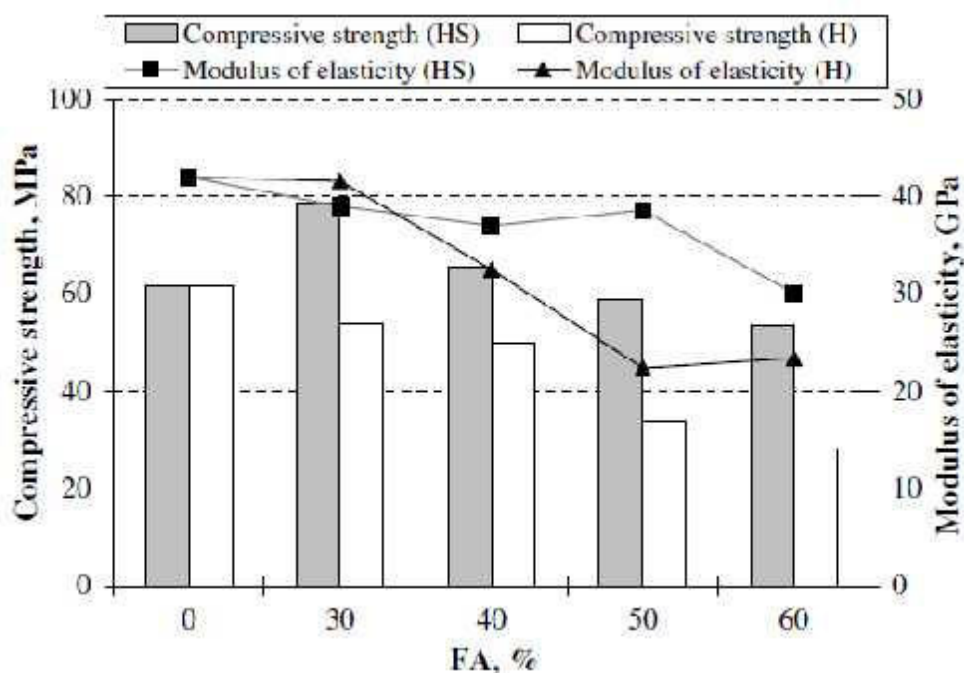
être obtenue avec un volume élevé de cendres volantes. Dix pour cent de fumée de silice au système affecté positivement à la fois les propriétés frais et durcis de haute performance avec un volume élevé du cendres volantes. Bien qu'il y ait un peu de ciment, ces mélanges présentent de bonnes propriétés mécaniques, de gel-dégel et la résistance à la pénétration des chlorures (Figures 3.15).

Les mélanges ont de grands avantages environnementaux et économiques. Il est évident que la chaleur d'hydratation et le retrait de ces mélanges sont inférieurs à ceux réalisés avec des mélanges de BAP avec un volume du ciment Portland élevé.

Les BAP contenant seulement les cendres volantes ont eu une réduction de la résistance à la compression à la fois précoce et ultime alors que 10% du remplacement de fumée de silice a affecté positivement la résistance à la compression pour les différents pourcentages des cendres volantes à n'importe quel âge. Ainsi, Les résultats des tests indiquent qu'avec 10% de fumée de silice et 60% de cendres volantes une résistance à la compression de 68,2 MPa peut être obtenue à 90 jours bien que la quantité du ciment soit seulement de 180 kg/m<sup>3</sup>.



**Figure 3.15** – Influence du pourcentage de cendres volantes sur la résistance à la compression et à la traction à 28 jours.



**Figure 3.16** – Influence du pourcentage de cendres volantes sur la résistance à la compression et le module d'élasticité à 28 jours.

Avec un pourcentage de 10% de fumée de silice, le module d'élasticité ne soit pas affecté jusqu'à 50% de cendres volantes. L'augmentation supplémentaire de la teneur en cendres volantes a réduit le module d'élasticité. Tandis que, le pourcentage des cendres volantes qui conduit à la réduction du module d'élasticité est de 30% pour le liant qui contient seulement les cendres volantes (figure 3.16).

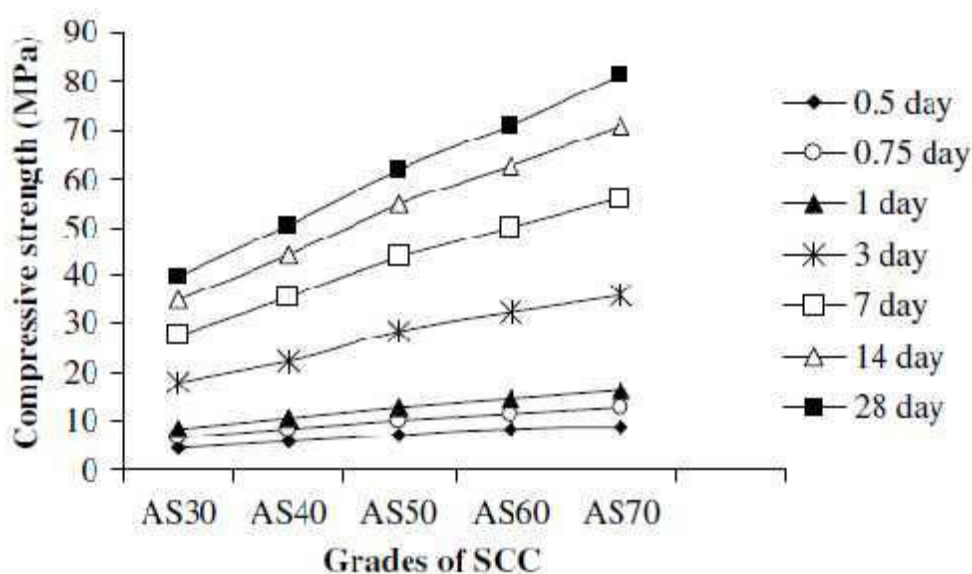
Sukumar et al. (2007) ont remplacé un volume élevé de cendres volantes dans le liant, sur la base d'une méthode rationnelle de mélange de conception pour développer un BAP. Les Taux de gain de résistance à différentes périodes de durcissement telles que 12 h, 18 h, 1 jour, 3 jours, 7 jours, 21 jours et 28 jours sont étudiés pour différentes qualités de mélanges de BAP et des relations appropriées ont été établies pour le gain de résistance aux jeunes âges par rapport au béton classique des mêmes qualités. Les proportions de mélange (série A et série B), pour des classes de BAPs de 30 à 70 MPa, sont présentées dans le tableau 3.4.



**Tableau 3.4** – les proportions des mélanges des BAPs étudiés

Mix ID	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	Quarry dust (kg/m <sup>3</sup> )	FA (kg/m <sup>3</sup> )	CA (kg/m <sup>3</sup> )	w/p ratio	SP % of binder
AS30	250	275	–	842	772	0.34	0.4
BS30	133	275	117	842	772	0.34	0.4
AS40	333	215	–	835	766	0.33	0.4
BS40	246	215	87	835	766	0.33	0.4
AS50	417	153	–	828	759	0.32	0.5
BS50	357	153	60	828	759	0.32	0.5
AS60	500	101	–	820	753	0.32	0.6
BS60	463	101	37	820	753	0.31	0.6
AS70	583	50	–	813	745	0.31	0.7
BS70	566	50	17	813	746	0.31	0.7

Il a été constaté que le taux de gain en résistance pour les différents mélanges du BAP est légèrement supérieur à la résistance attendue du béton conventionnel de même qualité. Aussi, la résistance à 12 heures de toutes les BAP est supérieure à 10% de la résistance à 28 jours et la résistance à 1 jour est d'environ 18 à 20% de la résistance à 28 jours (figures 3.17 et 3.18).

**Figure 3.17** – Résistance à la compression des mélanges de BAP aux différents âges.

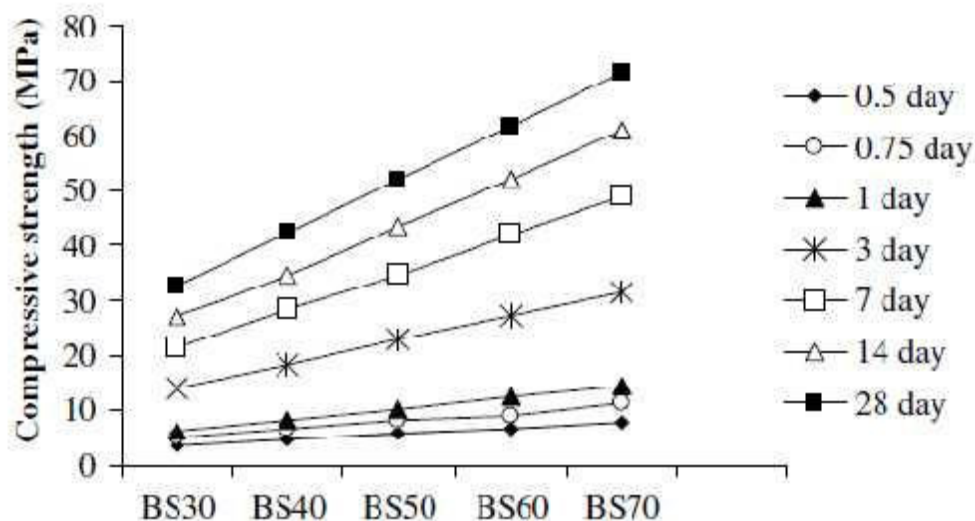


Figure 3.18 – Résistance à la compression des mélanges de BAP aux différents âges.

#### 3.4.2.2 Effet sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité est grandement influencé par la résistance du béton, la rigidité des agrégats, la matrice de pâte de ciment, la zone de transition, ainsi que les paramètres d'essai. Le module d'élasticité de la matrice de pâte de ciment est déterminé par la porosité. Les facteurs contrôlant la porosité sont  $E/L$ , la teneur en air et le degré de l'hydratation du ciment (Mehta 1997).

Il est bien établi que les CV ont une grande influence sur le contrôle de la porosité du béton par le raffinement des pores et la consommation de l'hydroxyde de calcium à partir de la matrice de pâte de ciment (Mehta 1997). En général, les vides des micro fissures et des cristaux d'hydroxyde de calcium orientés sont relativement plus fréquents dans la zone de transition que dans la pâte de ciment ; par conséquent, elles jouent un rôle très important dans la détermination du module d'élasticité du béton.

Il a été rapporté que la résistance et le module d'élasticité du béton ordinaire semble être proportionnelle à celle du BAP au courts terme (avant 3 mois), mais ils ne montrent pas le même comportement à long terme (de 3 mois à une année). Le module d'élasticité augmente à une vitesse supérieure que la résistance à la compression. Le module d'élasticité du béton contenant des CV est plus élevé après l'âge de 90 jours, par rapport au béton ordinaire avec du ciment Portland.

### **3.4.2.3 Effet sur le retrait de séchage**

De nombreuses études ont été menées pour étudier l'influence des CV sur le retrait du béton. On constate que le remplacement du ciment par les CV n'a que très peu ou pas d'influence sur le retrait (Berry et al. 1987). En ce qui concerne le retrait au séchage, Mehta (1983) a noté des résultats de Lane et al. (1982) que le retrait de séchage de prismes en béton avec du ciment Portland et celui du béton avec des CV étaient généralement les mêmes au bout de 400 jours.

Robert et al. (1983) ont étudié le retrait de séchage du béton avec des pourcentages différents de CV en remplacement du ciment. Les résultats indiquent que le retrait pour les CV et le béton de contrôle sont essentiellement égaux à un moment donné. A la fin d'une année, la déformation de retrait de séchage de 0, 20, 30, 50% des échantillons de cendres volantes était d'environ 600 micromètres.

Bouzoubaa et Lachemi (2001) ont fait la même conclusion de leur étude sur le retrait de séchage du BAP incorporant des volumes élevés de CV. Le retrait de séchage pour des BAPs incorporant des CV sont faibles et ne dépassent pas les 600 micromètres à 224 jours. Aucune différence n'est constatée entre le retrait au séchage du BAP de contrôle et celui qui contient des CV.

### **3.4.2.4 Effet sur la perméabilité de chlorure**

La perméabilité du béton est le paramètre fondamental pour déterminer le taux de transfert de masse lié à l'action chimique destructrice tel que les chlorures, les sulfates, le dioxyde de carbone et l'expansion due alcalin. Elle affecte grandement la durabilité du béton (Aitcin, 1983) par :

- la présence de grands vides dans la pâte de ciment hydraté ;
- les micro-fissures dans la zone de transition de la pâte ciment-agrégat.

Les cendres volantes peuvent améliorer la perméabilité du béton en raison de leur capacité à diminuer l'interconnexion des pores dans le béton et la réduction des micro-fissures dans la zone de transition (Mehta, 1997).

Dans le béton, il est maintenant connu que la phase de transition "pâte-granulats" de ciment hydraté joue un rôle très important dans la détermination des propriétés mécaniques et les caractéristiques de durabilité à long terme du béton.

Dans le béton de ciment Portland normal, la zone de transition est généralement moins dense et contient une grande quantité de cristaux d'hydroxyde de calcium que le béton contenant les

CV. Elle est plus favorable pour les micro-fissures dues à des contraintes de traction induites par les changements de température et d'humidité. La présence de forte teneur en calcium des CV réduit le degré d'orientation des cristaux d'hydroxyde de calcium dans la zone de transition. D'autre part, l'addition de CV de faible calcium augmente à la fois l'épaisseur de la phase de transition et le degré d'orientation de l'hydroxyde de calcium, au même âge d'hydratation. Par conséquent, les CV d'un taux élevé de calcium montrent une meilleure résistance à la perméabilité par rapport aux CV de faible teneur en calcium (Mehta, 1983).

Papadakis (2000) a étudié la perméabilité aux chlorures des mortiers ayant des pourcentages différents de cendres volantes. La perméabilité aux chlorures rapide diminue avec l'utilisation des CV soit par le remplacement du ciment ou des agrégats. La charge électrique passée à travers les échantillons de contrôle était plus élevée que 4000 coulombs. Tous les spécimens incorporant les CV, si elle remplace le ciment ou des agrégats, présentaient une charge électrique plus faible. La charge qui travers le spécimen a été trouvée inversement proportionnelle à la teneur en CV du volume de mortier (Papadakis, 2000).

On peut conclure que l'utilisation des CV peut réduire la demande en eau dans le béton à l'état frais, réduire la taille et le nombre de grands vides dans la pâte de ciment hydraté, diminuer la quantité et le degré d'orientation de l'hydroxyde de calcium cristallin, ainsi que des micro fissures dans la phase de transition, et d'améliorer l'imperméabilité du béton.

### **3.5 Modélisation des BAP par les réseaux de neurones artificiels**

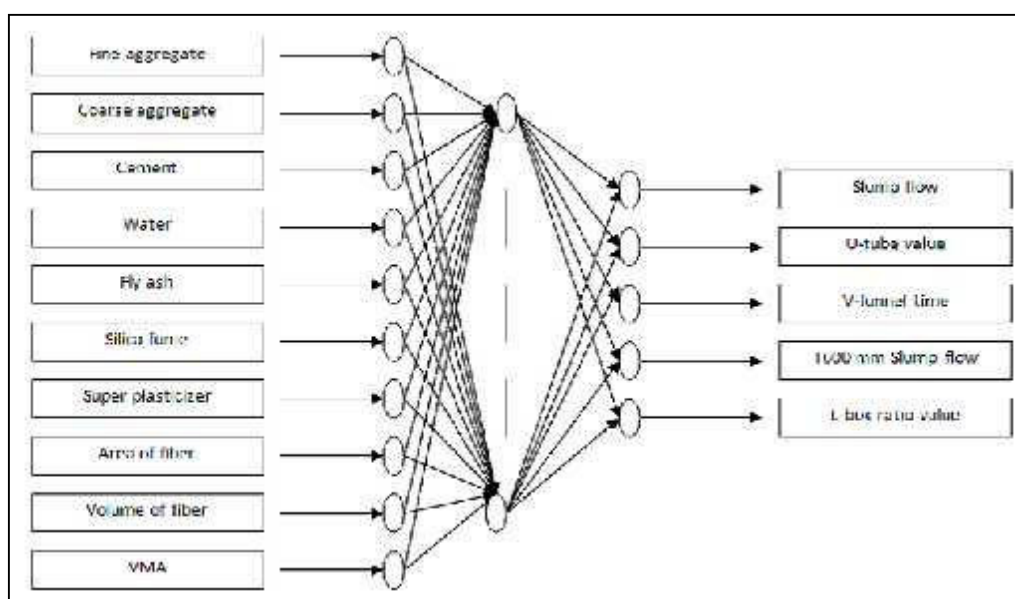
Plusieurs chercheurs appliquent la technique de réseaux de neurones artificielle pour la prévision de différentes propriétés du béton à l'état frais, à l'état durci et aussi pour l'étude de la durabilité des BAPs. La propriété la plus importante des réseaux de neurone artificiel dans les problèmes de génie civil sont leur capacité d'apprentissage directement à partir d'exemples.

#### **3.5.1 Modélisation des propriétés à l'état frais**

Généralement, l'ouvrabilité des bétons se décompose en trois caractéristiques principales : la mobilité en milieu non confiné (essai d'étalement) ; la mobilité en milieu confiné (essai boîte en L) ; la stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

Keerthi et al. (2011) ont étudié les différentes propriétés du béton autoplaçant renforcé avec des fibres d'acier. Un modèle de réseaux de neurones artificiels de retro-propagation avec un apprentissage supervise a été utilisé pour prédire l'étalement, T600 d'étalement, L-box (essai de boîte en L), U-box (essai de boîte en u), V-funnel (essai d'entonnoir) (Fig. 3.19). Un autre

modèle de réseaux de neurone a été formé pour prédire l'ouvrabilité du BAP (l'affaissement, l'étalement et le V-funnel) par Li et al. (2011).

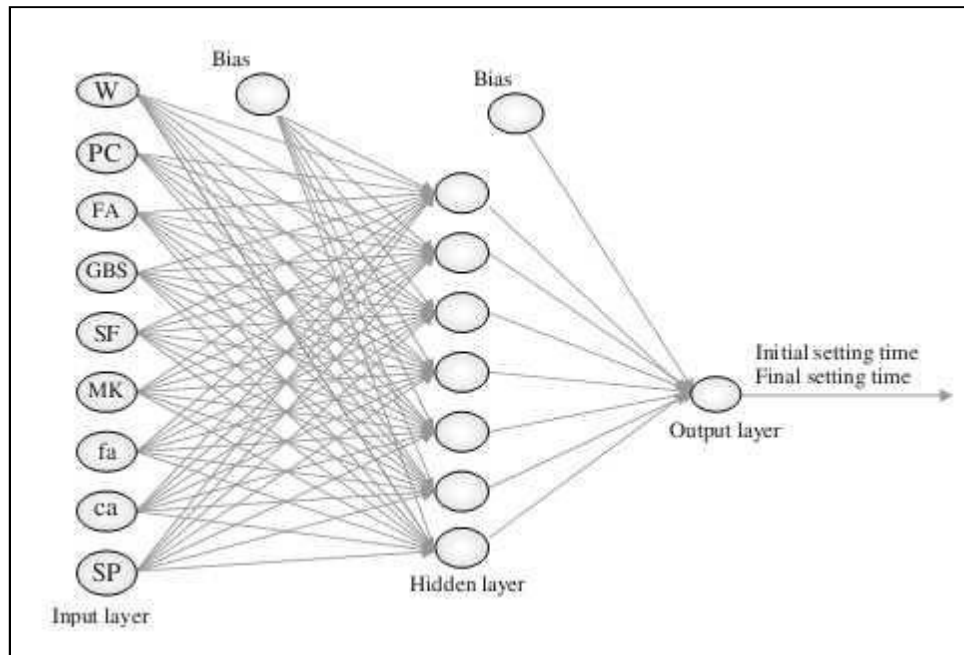


**Figure 3.19** – L'architecture du model RNA pour prédire les propriétés a l'état frais du BAP (Keerthi et al. 2011)

La capacité de passage du BAP a été étudiée par Shao et al. (2009) en utilisant la technique des réseaux de neurone artificielle. Ils montrent que l'essai d'étalement modifié (J-ring) est le meilleur qui puisse être utilisé pour tester la capacité de passage du BAP. Par contre la capacité de remplissage et la ségrégation du BAP ont été étudiées par Nehdi et al. (2001).

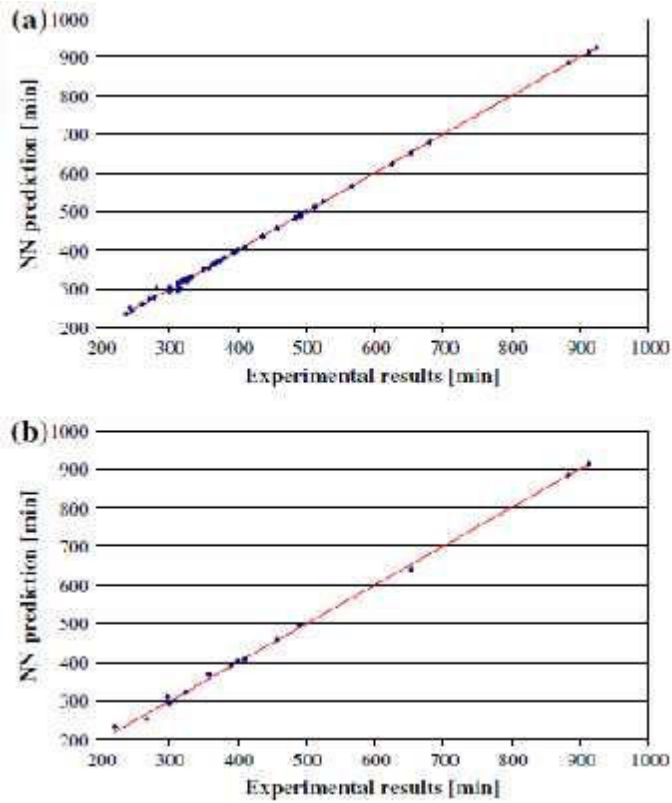
D'autres travaux ont été faites pour étudier les propriétés d'écoulement de BAP en se basant sur la technique des réseaux de neurone artificielle. ZHOU et al. (2005) Montrent que la méthode réseau de neurones artificiel a une bonne précision de la prédiction des propriétés d'écoulement du BAP parce qu'elle considère les divers facteurs d'influence tels que le rapport E/L, le poids du ciment, les cendres volantes, les granulats et le mélange.

Les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés aussi pour prévoir le temps de prise du BAP. Güneyisi et al. (2009) ont développé un modèle de réseaux de neurone afin d'évaluer les effets de l'utilisation du ciment binaire, ternaire et quaternaire en utilisant le ciment Portland, la fumé de silice, le laitier, les cendres volantes et le metakaolin sur le temps de prise initial et finale du BAP (Figure 3.20).

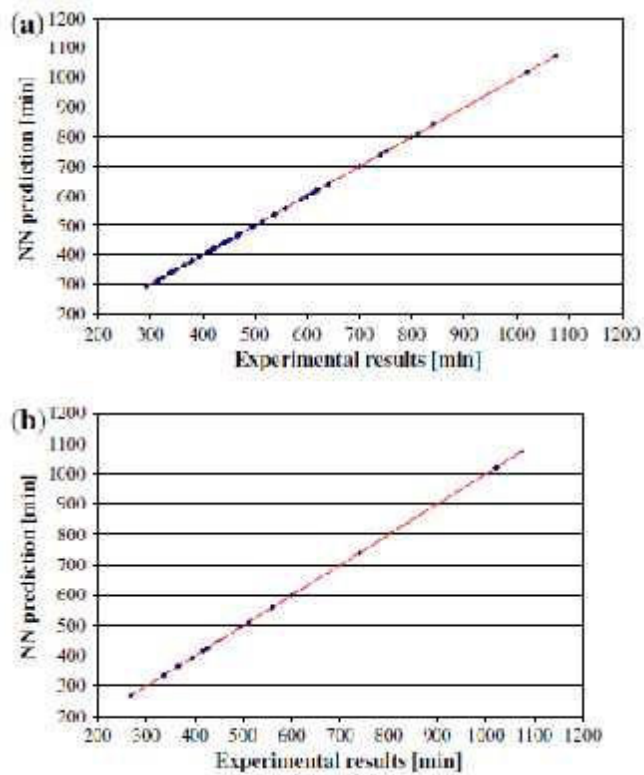


**Figure 3.20** – Architecture proposée du modèle pour la prédiction des temps du début et de fin de prise (Güneyisi et al., 2009).

Il a été constaté que les modèles développés en utilisant les RNAs semblaient avoir une capacité de prédiction élevée pour le temps de prise de béton. Un coefficient de corrélation est élevé et des valeurs d'erreur quadratique moyenne faible ont été obtenues pour les temps du début et de fin de prise (Figures 3.21 et 3.22).



**Figure 3.21** – Performance du modèle RNA pour la prévision du début de temps de prise :  
(a) apprentissage (b) test



**Figure 3.22** – Performance du modèle RNA pour la prévision de la fin de temps de prise :  
(a) apprentissage (b) test

### 3.5.2 Modélisation des propriétés à l'état durci

Plusieurs chercheurs ont utilisé les réseaux de neurones artificiels pour prédire la résistance à la compression du BAP. Siddique et al. (2011) ont fait une étude comparative entre les modèles de prévision de la résistance à la compression à 28 jours d'un béton auto-plaçant en utilisant les RNAs. Les modèles développés pour prédire la résistance à 28 jours à partir des données collectées de la littérature (RNA-I) et les données développées expérimentalement pour des BAPs contenant les cendres volantes en remplacement partiel du sable (RNA-II).

Les données utilisées dans les modèles sont disposés dans le format de six et huit paramètres d'entrée qui sont mentionnées dans le tableau 3.5.

**Tableau 3.5** – Paramètres d'entrées pour les deux modèles RNA (Siddique et al. 2011).

Parameters	Data base range (ANN-I)	Data base range (ANN-II)
Cement (kg/m <sup>3</sup> )	160–430	350–460
Sand (kg/m <sup>3</sup> )	470–1080	635–915
Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	620–900	590
Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	0–240	90–200
Water–powder ratio	0.33–0.87	0.41–0.62
Superplasticizer dosage	0–1.0 (%)	7.4–11.15 (kg/m <sup>3</sup> )
Bottom ash (kg/m <sup>3</sup> )	–	0–275
Water (kg/m <sup>3</sup> )	–	225–345

La performance du modèle RNA-I dans la prédiction de la résistance à la compression est représentée sur la Figure 3.23. Les résultats montrent que la plupart des points sont allongés à  $\pm 10\%$  de la ligne parfaite, ce qui suggère que le réseau de neurones, peut effectivement être utilisé pour prédire la résistance à la compression à 28 jours.

La figure 3.23 présente la comparaison entre les valeurs réelles et prévues de la résistance à la compression pour 7 jours, 28 jours, 90 jours et 365 jours (RNA-II). Les résultats suggèrent une meilleure performance pour cet ensemble aussi, pour la prédiction de la résistance à tous les âges donnés. La plupart des points sont entre  $\pm 10\%$  de la ligne de concordance parfaite. On constate que le modèle RNA-II est plus performant que le modèle RNA-I, malgré que les données du RNA-II soient inférieures à ceux du RNA-I. En outre, le nombre de paramètres d'entrée est plus élevé dans RNA-II et il pourrait être utilisé pour prédire la résistance à la compression à différents âges tandis RNA-I est limitée à la force de 28 jours.



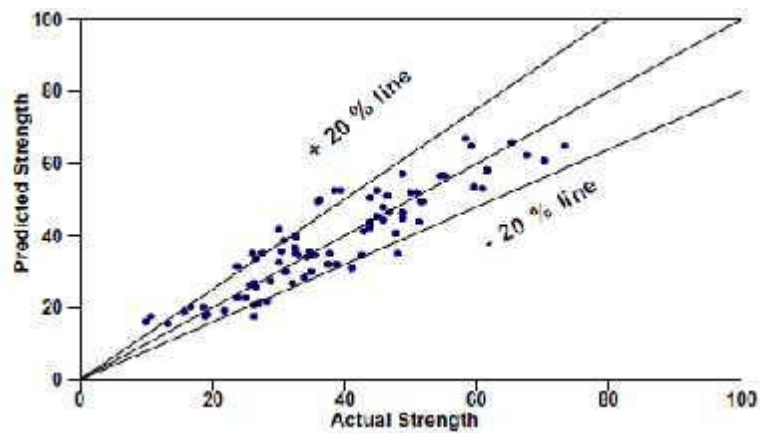


Figure 3.23 – Valeur de résistance à 28 jours (MPa) pour RNA- I

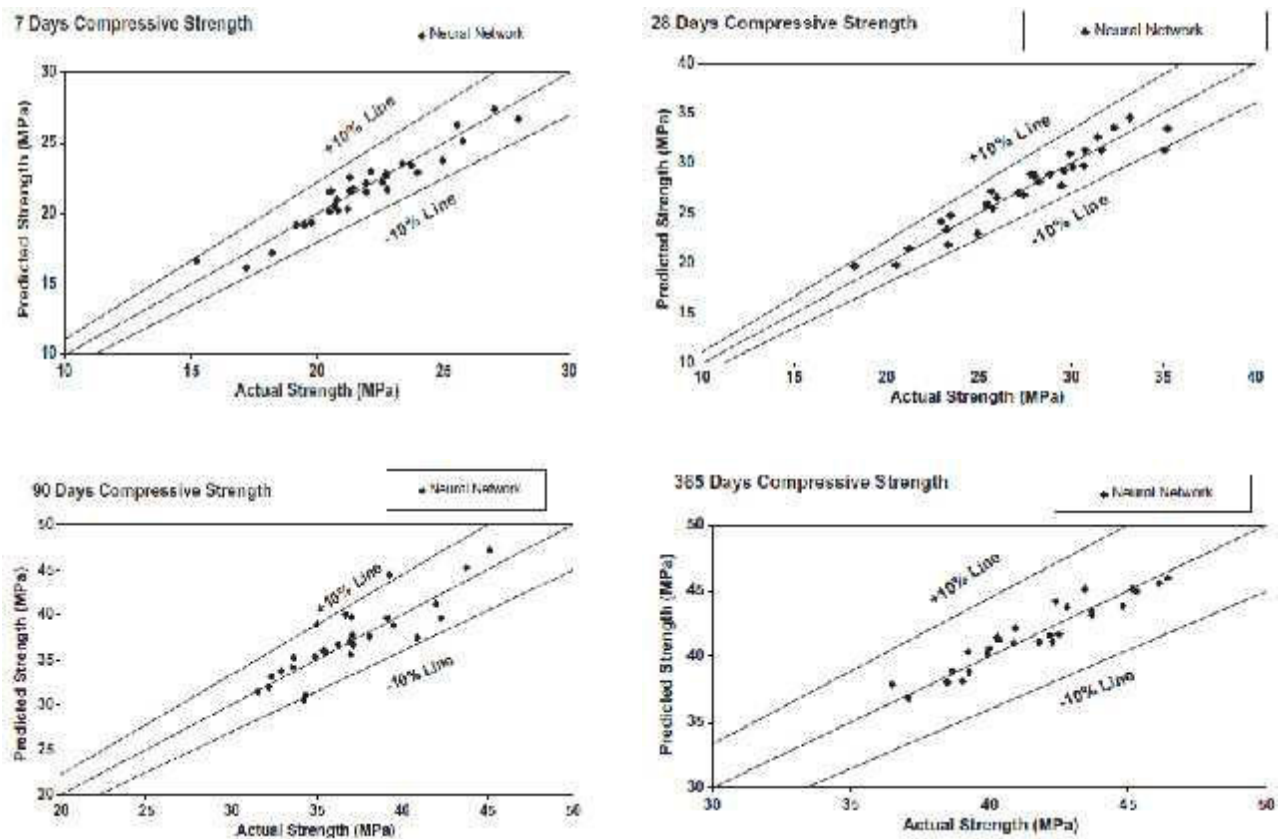
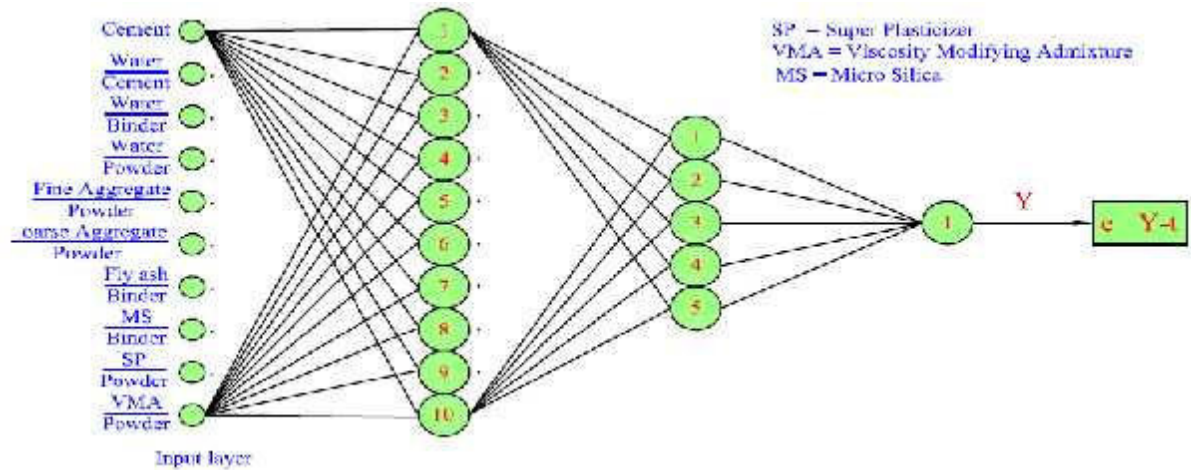


Figure 3.24 – Valeur de résistance à 7, 28, 90 et 365 jours (MPa) pour RNA- II

Afin de prédire la résistance à la compression du béton autoplaçant incluant les cendres volantes, un modèle de réseaux de neurone artificiel a été formé par Wang et al., (2010) pour évaluer l'effet des cendres volantes sur la résistance à la compression.

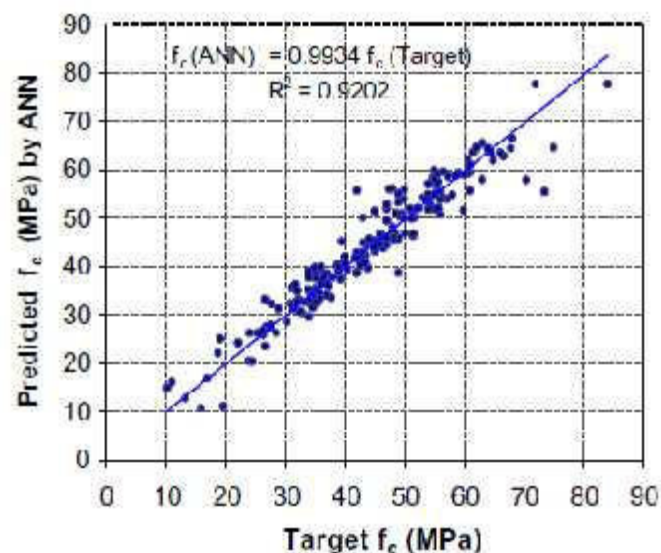
Un modèle de réseaux de neurone a été présenté par Prasad et al. 2008 pour la prévision de l'étalement et la résistance à la compression du BAP et du BHP avec un volume élevé des cendres volantes. L'apprentissage des modèles RNA est effectué par les données disponibles

dans la littérature sur les cendres volantes de volume normal parce que les données sur le BAP avec un volume élevé de cendres volantes ne sont pas disponibles en quantité suffisante. L'architecture du modèle est représentée sur la figure 3.25.



**Figure 3.25** – Structure de réseau de neurones pour BAP (10-10-5-1)

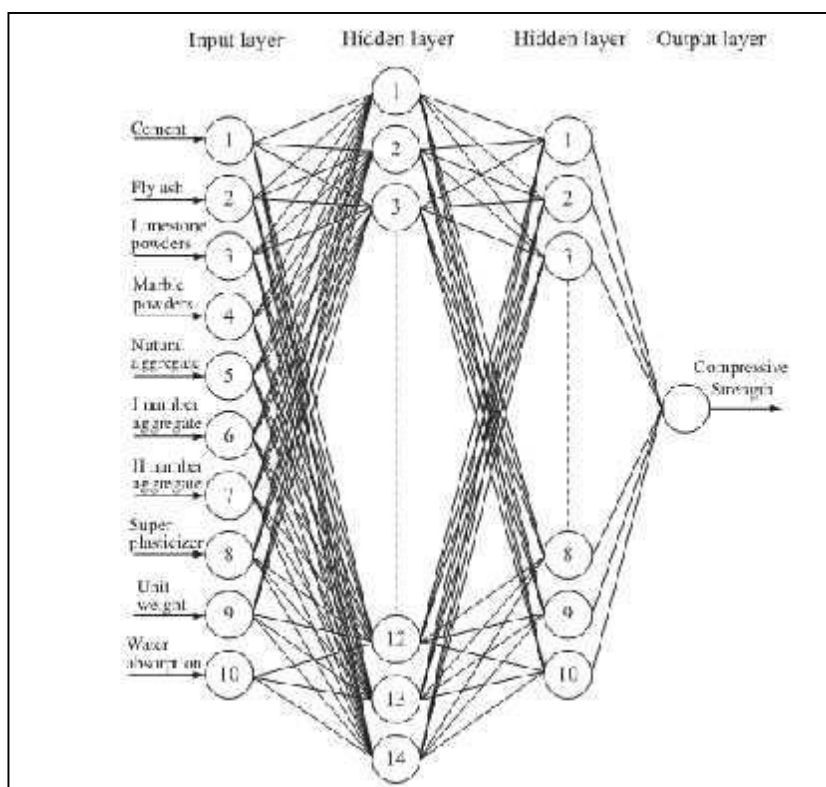
La comparaison de la prédiction de RNA cible et la résistance à la compression du BAP est représentée sur la Figure 3.26. Une bonne corrélation a été constaté avec un coefficient de  $R^2=0.92$ .



**Figure 3.26** – Comparaison entre les résistances à la compression expérimentales et prédites (Prasad et al. 2008).

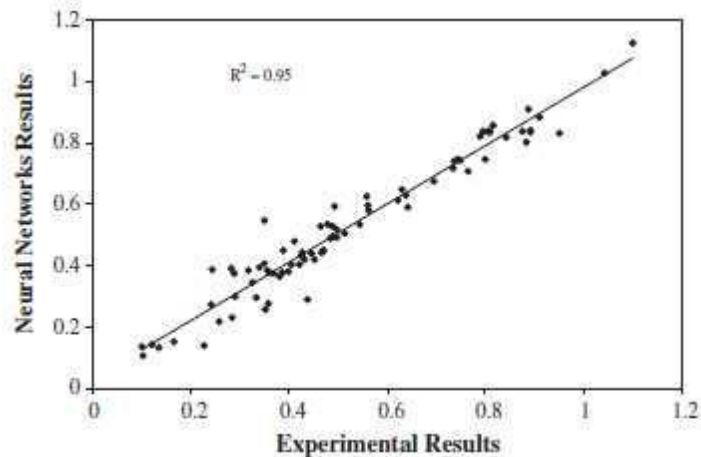
Uysal et al. (2011) ont fait une étude pour prédire la résistance à la compression du BAP avec ajouts (Figure 3.28) en utilisant les réseaux de neurones artificiels. Cette étude est basée sur la

détermination de la variation de la résistance à la compression, l'absorption d'eau et le poids dans les murs en béton. Un béton traditionnel (béton vibré) et six différents bétons autoplaçants (BAP) des mélanges avec des additifs minéraux ont été préparés. Les cendres volantes et le calcaire en poudre ont été utilisés avec deux différents taux de remplacement de ciment (15% et 30%) et la poudre de marbre a été utilisée avec un taux de remplacement de ciment de 15%.



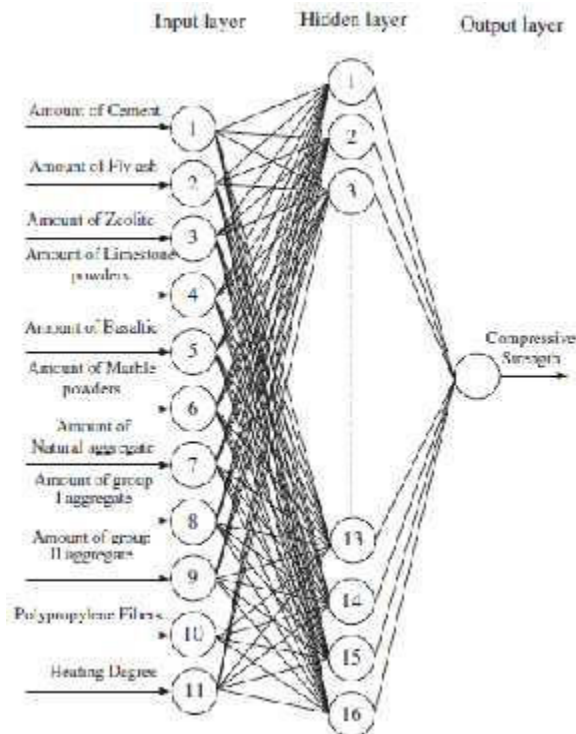
**Figure 3.27** – Architecture du modèle RNA (Uysal et al, 2011)

Une base de données comprenant 168 échantillons de données obtenues à partir des études expérimentales ont été utilisés pour les réseaux de neurones artificiels. A cet effet, 84 données ont été utilisées pour l'apprentissage du réseau, et les 84 données restantes ont été utilisées pour test. La figure 3.28 présente les résistances à la compression mesurées par rapport aux résistances prédites par le modèle RNA. La figure montre, aussi, que le modèle RNA prédit la résistance à la compression du béton avec un coefficient de corrélation  $R^2$  de 0,95.



**Figure 3.28** – Relation linéaire entre les résistances à la compression mesurées et prévues

Dans une autre étude, Uysal et al. (2012) ont étudié l'estimation de la résistance à la compression du BAP contenant des fibres de polypropylène et des additifs minéraux et exposé à des températures élevées en utilisant les réseaux de neurones artificiels. Le ciment Portland a été remplacé par des additifs minéraux tels que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la zéolite, du calcaire en poudre, la poudre du basalte et la poudre de marbre avec divers dosages avec et sans fibres de polypropylène (Fig. 3.29).



**Figure 3.29** – Architecture du modèle RNA (Uysal et Tanyildizi, 2012).

Les échantillons ont été exposés à l'âge de 56 jours à des températures élevées de 200, 400, 600 et 800 °C. Ensuite, des tests ont été effectués pour déterminer la perte de résistance à la compression. Les résultats ont montré que la perte de résistance sévère a été observée pour tous les bétons après une exposition à 600 °C, en particulier les bétons contenant des fibres de polypropylène.

### **3.6 Conclusion**

L'étude de différentes propriétés du béton autoplacant à l'état frais et à l'état durcie a été faite par plusieurs chercheurs en utilisant la technique des réseaux de neurones artificiels. Après avoir vu de nombreuses applications du RNA pour les BAPs, il a été constaté que la plupart des modèles sont limités soit par le nombre de la base de données, soit par le nombre de sorties pour chaque modèle. Ainsi, il n'existe pas dans la littérature des modèles basé sur la technique de réseaux de neurones artificiels qui prend en considération l'évolution de la résistance à la compression du BAP en fonction de l'âge. Néanmoins, l'élaboration des modèles RNA qui étudie les propriétés à l'état frais et à l'état durci est nécessaire pour la prévision des différentes propriétés du BAP contenant des cendres volantes comme ajout cimentaire.

# *Chapitre* 4:

---

## CONCEPTION DE LA BASE DE DONNÉES POUR LES MODÈLES ÉLABORÉS

---

## 4.1 Introduction

La conception d'une base de données pour le développement des modèles de réseaux de neurones artificiels est une étape essentielle. La collecte d'une base de données suffisante et homogène pour la construction des modèles RNA est l'objectif de ce chapitre. La collecte et l'analyse des données ainsi la séparation des bases de données se sont les procédures principales du développement de la base de données.

La base de données a été construite à partir des résultats expérimentaux réalisés sur des bétons autoplacants contenant des cendres volantes et obtenus de diverses sources disponibles dans la littérature. La performance des modèles est liée directement au nombre et à la fiabilité des données utilisées.

Dans ce chapitre les aspects détaillés de la collecte et du filtrage de données concernant les bétons autoplacants contenant des cendres volantes vont être expliqués.

## 4.2 Procédure de formation de la base de données

### 4.2.1 Analyse des données

Il est souvent préférable d'effectuer une analyse des données de manière à déterminer les caractéristiques discriminantes pour détecter ou différencier ces données. La détermination des caractéristiques a des conséquences à la fois sur la taille du réseau et donc le temps de simulation, sur les performances du système tels que le pouvoir de séparation, le taux de détection et le temps d'apprentissage.

### 4.2.2 Séparation des données

Il est nécessaire de disposer deux bases de données afin de développer une application à base de réseaux de neurones : une base pour effectuer l'apprentissage et une autre pour tester le réseau obtenu et déterminer ses performances. Afin de contrôler la phase d'apprentissage, il est souvent préférable de posséder une troisième base de données appelée « base de validation » qui est l'objectif du programme expérimental élaboré.

### 4.2.3 Collecte des données

L'objectif principal est de recueillir un nombre suffisant de données pour construire une base de données comprenant un ensemble d'informations sur les mélanges du BAP contenant les cendres volantes à la fois pour développer les modèles et pour les tester. Ces données ont été obtenues à partir de différentes sources et utilisées pour l'apprentissage des modèles de RNA développés. Les données collectées sont disposées dans différents formats de paramètres

d'entrée qui couvrent les principaux composants du BAP tels que la quantité du liant, le pourcentage de cendres volantes, le rapport eau-liant, les agrégats fins, les agrégats grossiers le superplastifiant, ainsi que les paramètres qui affectent les différentes propriétés du béton (types de cendres volantes, résistance du BAP à 28 jours, l'âge du béton). La base de données aussi contient les paramètres de sortie de différentes propriétés à l'état frais et durci du béton. Dans le but d'appliquer la technique des réseaux de neurones artificiels sur le BAP, trois modèles ont été développés dans ce travail :

- **Modèle 01 (RN1)** : prévision des principales propriétés du BAP à l'état frais ainsi la résistance à la compression à 28 jours.
- **Modèle 02 (RN2)** : évolution de la résistance à la compression du BAP en fonction de l'âge.
- **Modèle 03 (NF3)** : Prévision de la perméabilité aux ions chlores du BAP.

### 4.3 Base de données pour le modèle 01 (RN1)

Une base de données de 114 points formée à partir de la littérature (Tableau 4.1) dans le but de construire un modèle pour la prévision des propriétés rhéologiques et mécanique du béton auto-plaçant contenant des cendres volantes. Ces données ont été obtenues à partir de différentes sources et utilisés pour la l'apprentissage du modèle de RNA.

Les données utilisées dans le modèle de réseaux de neurones proposées sont disposées dans un format de six paramètres d'entrée qui couvrent la quantité du liant, le pourcentage des cendres volantes, le rapport eau-liant, les agrégats fins, les gros agrégats et la quantité du superplastifiant. Quatre paramètres de sorties sont prédits par le modèle RNA : l'étalement, le rapport L-box, le temps V-entonnoir et la résistance à la compression à 28 jours du BAP

Les valeurs limites pour les paramètres d'entrée et de sortie utilisées dans le modèle sont représentées dans le tableau 4.2. Les paramètres d'entrée sont répartis en différentes gammes sous une forme homogène pour assurer un apprentissage adéquat afin de former le modèle. La distribution des paramètres d'entrées est présentée dans le tableau 4.3. L'annexe A présente la base de données utilisé pour l'apprentissage et le test du modèle.



**Tableau 4.1** — Organisation de la base de données du Modèle RN1

Référence	Année	Nombre de données
Bingöl et Tohumcuı	2013	4
Dhiyaneshwaran et al.	2013	6
Gettu et al.	2002	2
Güneyisi et al	2010	8
Krishnapal et al.	2013	8
Mahalingam et Agamani	2011	9
Muthupriya et al.	2012	3
Nepomuceno et al.	2014	19
Patel et al.	2003	16
Sahmaran et al.	2009	9
Siddique	2011	20
Siddique et al.	2011	5
Soneibi	2004	1
Uysal et Tanyildizi	2011	4
<b>Total</b>		<b>114</b>

**Tableau 4.2** — Valeurs limites pour paramètres d'entrée et sortie du Modèle RN1

Composants	Minimum	Maximum	Moyenne
<u>Paramètres d'entrée</u>			
Liant (kg/m <sup>3</sup> )	370	733	523.4
Eau / Liant	0.26	0.45	0.37
Cendres volantes (%)	0	60	28.7
Agrégats fins (kg/m <sup>3</sup> )	656	1038	852.8
Gros agrégats (kg/m <sup>3</sup> )	590	935	742.63
Superplastifiant (kg/m <sup>3</sup> )	0.74	21.84	8
<u>Paramètres de sortie</u>			
Etalement (mm)	480	880	660.5
L-box (H2/H1)	0.6	1	0.86
V-funnel (s)	1.95	19.2	7.75
Résistance à la compression a 28 jours (MPa)	10.2	86.8	48.22

**Tableau 4.3** — Distribution des paramètres d'entrées du Modèle RN1

Liant		Eau/Liant		Cendres volantes		Agrégats fins		Gros agrégats		Superplastifiant	
Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq	Intervalle	freq	Intervalle (%)	freq	Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq	Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq	Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq
350-450	24	0.25-0.30	19	0-15	23	656-750	19	590-700	48	0-5	33
451-550	69	0.31-0.35	30	16-30	45	751-850	29	701-800	19	6-10	51
551-650	18	0.36-0.40	17	31-45	29	851-950	55	801-900	42	11-15	19
651-750	3	0.41-0.45	48	46-60	17	951-1038	11	901-935	5	16-22	11

#### 4.4 Base de données pour le modèle 02 (RN2)

Le deuxième modèle est consacré à l'étude de l'évolution de la résistance à la compression du béton autoplaçant en fonction de l'âge. Une base de données de 1507 points de 45 auteurs à travers le monde a été élaborée (Tableau. 4.4).

Au début, plus de 1600 points ont été collectés, ce nombre diminue après le filtrage et l'analyse des données. On a pris en considération plusieurs paramètres tel que ;

- Les paramètres de composition ;
- Le mode de cure ;
- La température (23°) ;
- La source de matériaux (l'origine de la formation des agrégats);
- Le type de ciment (GU ou type 1), ...etc

Le nombre des paramètres d'entrées et de sorties utilisés dans le modèle est présenté dans le tableau 4.4. Le tableau 4.5 indique également les valeurs minimales et maximales de ces paramètres utilisés dans la construction du modèle.

La distribution des paramètres d'entrées est présentée dans le tableau 4.6. L'annexe B présente la base de données utilisé pour l'apprentissage et le test du modèle RN2.

**Tableau 4.4** — Organisation de la base de données du Modèle RN2

Référence	Année	Nombre de données
Bouzoubaa et Lachemi	2001	27
Nehdi et al.	2004	12
Xie et al.	2002	4
Pang et al.	2005	12
Jialin et al.	2007	10
Xie et al.	2007	7
Kou et Poon	2009	65
Zhao et al.	2012	12
Naik et al.	2005	32
Girish et al.	2007	18
Mahalingam et Agamani	2011	45
Siddique	2011	20
Muthupriya et al.	2012	8
Siddique et al.	2011	60
Dhiyaneshwaran et al.	2013	12
Krishnapal et al.	2013	16
Alquadi et al.	2012	30
Nepomuceno et al.	2014	38
Gettu et al.	2002	12
Jau et Yang	2010	4
Yazıcı	2008	25
Sahmaran et al.	2009	55
Uysal et Tanyildizi	2011	16
Sahmaran et al.	2011	48
Turk et al.	2013	20
Guneyisi et al.	2010	16
Bingöl et Tohumcuĭ	2013	12
Gesoglu et al.	2014	34
Zhu et Bartos	2003	6
Sonebi	2004	60
Khatib	2008	32
Liu	2010	20
Schindler et al.	2007	27
Kuder et al.	2012	22
Naik et al.	2012	12
Enad et al.	2013	18
Patel et al.	2005	63
Horta	2005	15
Hameed	2005	32
Therán et Miguel	2008	40
Floyd	2012	124
Rizos et Paul-Ziehl	2006	10
Ouchi et al.	2003	4
Koehler	2007	247
Garrison	2011	105
<b>Total</b>		<b>1507</b>

**Tableau 4.5** — Valeurs limites pour paramètres d'entrée et sortie du Modèle RN2

Composants	Minimum	Maximum	Moyenne
<u>Paramètres d'entrées</u>			
Liant (kg/m <sup>3</sup> )	375.00	600.00	481.00
Eau / Liant	0.28	0.45	0.37
Cendres volantes (%)	0.00	70.00	34.00
Agrégats fins (kg/m <sup>3</sup> )	686.00	1038.00	875.00
Gros agrégats (kg/m <sup>3</sup> )	597.00	935	787.63
superplastifiant (kg/m <sup>3</sup> )	0.00	22	11.00
Age du béton (days)	1.00	365.00	50.29
Type de cendres volantes	F	C	-
Résistance à la compression à 28 jours sans ajout (MPa)	30.00	80.90	59.05
<u>Paramètre de sortie</u>			
Résistance à la compression (MPa)	10.50	91.10	45.50

**Tableau 4.6** — Distribution des paramètres d'entrées du Modèle RN2

Liant		Age du béton		Eau/Liant		Cendres volantes		Gros Agregats		Agrégats fins		Superplastifiant	
Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq	Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq	Intervalle	freq	Intervalle (%)	freq	Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq	Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq	Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq
300-450	341	1-7	563	0.25-0.30	198	0-15	475	500-650	260	500-650	192	0-2	469
451-500	551	8-28	526	0.31-0.35	425	16-30	494	650-800	534	650-800	428	2.1-4	486
501-550	357	29-90	243	0.36-0.40	500	31-45	331	801-950	552	801-950	670	4.1-6	219
551-600	258	91-365	175	0.41-0.45	384	46-70	206	950-1100	161	950-1100	170	6.1-22	333

## 4.5 Base de données pour le modèle 03 (NF3)

Un modèle RN pour la prévision de la perméabilité aux ions chlorés a été construit en utilisant deux techniques d'intelligence artificielles, les réseaux de neurones artificiels (RNAs) et la combinaison de cette dernière avec la logique floue (LF). Une base de données de 127 points a été formée pour faire l'apprentissage de ce modèle (tableau 4.7). Les entrées du modèle de perméabilité aux ions chlorés sont le rapport eau/liant, la quantité du liant, la résistance à la compression et l'âge du béton. La sortie du modèle c'est la charge passée mesurée par l'essai du Rapide Chloride Permeability Test (RCPT).

**Tableau 4.7** — Organisation de la base de données du Modèle NF3

Référence	Année	Nombre de données
patel et al.	2003	21
sahmaran et al.	2011	44
siddique et al.	2011	10
Wongkeo et al.	2014	12
Mahalingham et al.	2014	27
koo et al.	2009	13
<b>Total</b>		<b>127</b>

Les valeurs limites pour les paramètres d'entrée et de sortie utilisées dans le modèle NF3 sont représentées dans le tableau 4.8. La distribution des paramètres d'entrées est présentée dans le tableau 4.9. L'annexe C présente la base de données utilisé pour l'apprentissage et le test du modèle 03.

**Tableau 4.8** — Valeurs limites pour paramètres d'entrée et sortie du Modèle NF3

Composants	Minimum	Maximum	Moyenne
<u>Paramètres d'entrées</u>			
Liant (kg/m <sup>3</sup> )	350.00	610.00	498.00
Age du béton	0.25	0.45	0.37
Cendres volantes (%)	0.00	70.00	42.00
Eau / Liant	0.12	11.40	5.50
Résistance à la compression à l'âge du béton (MPa)	31.00	84.90	53.08
<u>Paramètre de sortie</u>			
Charge passée (coulombs)	230.00	4600.00	1252.00

**Tableau 4.9** — Distribution des paramètres d'entrées du modèle NF3

Liant		Age du béton		Eau/Liant		Cendres volantes		Résistance à la compression (MPa)	
Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq	Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq	Intervalle	freq	Intervalle (%)	freq	Intervalle (kg/m <sup>3</sup> )	freq
350-400	05	1-28	66	0.25-0.30	21	0-15	07	30-40	16
401-450	30	29-90	24	0.31-0.35	54	16-30	25	41-50	39
451-500	50	91-180	18	0.36-0.40	24	31-45	29	51-60	37
501-610	40	181-365	17	0.41-0.45	26	46-70	64	61-80	33

## 4.6 Organisation de la base de données

Lors de l'évaluation des données, certaines formulations de bétons ont été ignorées à cause de l'insuffisance d'information concernant les compositions utilisées.

A titre d'exemple, dans le modèle RN1, les formulations qui ne contiennent pas l'ensemble des 04 propriétés prédits (l'étalement, le rapport L-box, le temps V-entonnoir et la résistance à la compression à 28 jours du BAP) ont été supprimées. Ainsi, on a pris en considération plusieurs paramètres dans le Modèle RN2 pour l'évolution de la résistance à la compression du BAP tel que :

- Les paramètres de composition (Liant, E/L, CV, Agrégats fins, Gros agrégats et Superplastifiant) ;
- Age du béton ;
- Type de cendres volantes.
- Le mode de cure ;
- La température (23°) ;
- La source de matériaux ;
- Le type de ciment, ...ect

L'ensemble des données utilisées pour le développement du modèle RN2 de RNAs représente un total de plus de 1600 points. Ce nombre diminue après le filtrage et l'analyse des données, une base de données de 1507 points de 45 auteurs a été collectée. Ces résultats ont été employés pour vérifier la fiabilité des modèles de prévision des propriétés du BAP contenant des cendres volantes.

## 4.7 Normalisation des Données

Les composants qui forment le vecteur d'entrée du réseau de neurones ont différentes limites quantitatives, ainsi une normalisation des données est nécessaire. Il existe plusieurs translations linéaires qui peuvent être employées pour normaliser les composants du vecteur d'entrée afin qu'ils prennent des valeurs entre -1 et 1. Celle parmi les plus utilisées et que nous avons employée dans ce travail apparaît dans l'équation 4.1 suivante :

$$X_n = \frac{(y_{max} - y_{min}) \cdot (X - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} + y_{min} \quad (4.1)$$

Où :

$X_n$  est le vecteur de données normalisées ;

$X$  est le vecteur d'entrée des données réelles ;

$X_{min}$  et  $X_{max}$  sont le minimum et le maximum des éléments du vecteur d'entrée  $X$  respectivement.

$y_{max}$  et  $y_{min}$  sont les valeurs de normalisations égales à 1 et -1 respectivement.

Après l'apprentissage du réseau les composants du vecteur de sortie  $Y$  doivent être traduits de valeurs comprises entre -1 et 1 en valeurs réelles (dé-normalisation) par l'équation 4.2 suivante :

$$y = \frac{(Y_n - y_{min}) * (X_{tmax} - X_{tmin})}{(y_{tmax} - y_{tmin})} + X_{tmin} \quad (4.2)$$

Où le  $Y_n$  est le vecteur de sortie de données normalisés et  $Y$  le vecteur de sortie des données réelles.  $X_{tmin}$  et  $X_{tmax}$  sont le minimum et le maximum des éléments du vecteur de sortie  $Y$  respectivement.

## 4.8 Conclusion

Ce chapitre a fourni une description détaillée de la méthodologie employée pour rassembler et normaliser les données expérimentales. Les données ont été collectées à partir de différents travaux de recherche réalisées par différents chercheurs qui ont utilisées une variété de matériaux. Les bases des données utilisées pour la construction des modèles développées sont collectées à partir de différentes sources, plusieurs paramètres ont été pris en considération.

En raison de non normalisation des données. Elles ont dû être examinées et filtrées par la technique de normalisation de Min-Max car ce dernier est en accord avec les bornes de la fonction de transfert tangente hyperbolique utilisée. En outre, la base de données a été fractionnée en deux sous-ensembles : un pour la formation (apprentissage) et un autre pour le test et la validation de chaque modèle.

# *Chapitre* 5:

---

ELABORATION DES MODÈLES DE RNA POUR  
LA PRÉVISION DES PROPRIÉTÉS DU BAP

---



## 5.1 Introduction

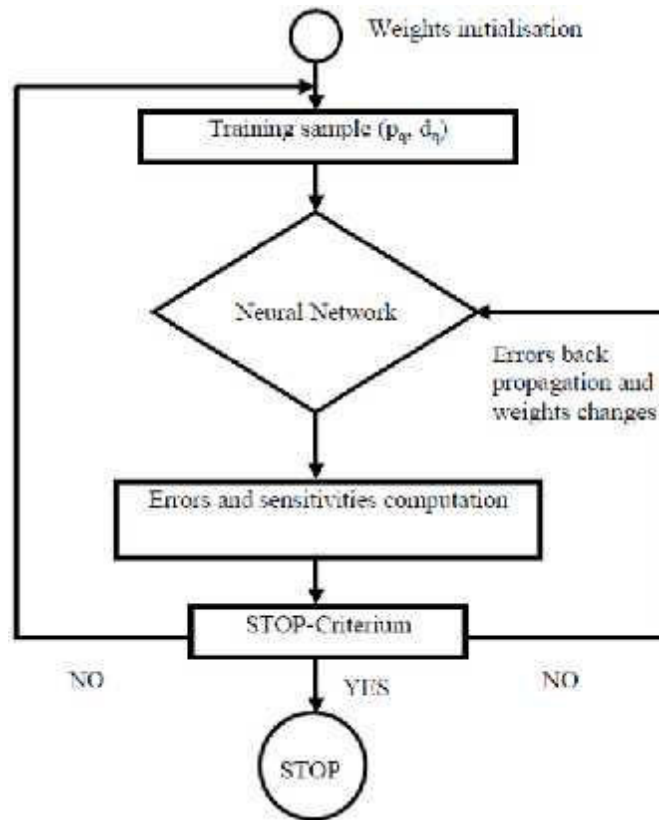
L'objectif général de ce chapitre est de développer trois modèles de RNA capables de prédire respectivement les principales propriétés à l'état frais (étalement, V-entonnoir, L-box) et durci (résistance à la compression) ainsi que de durabilité (perméabilité aux ions chlorés) d'un BAP contenant des cendres volantes. Une base de données a été collectée afin de développer ces modèles RNA basée sur les résultats expérimentaux de projets de recherche et de la littérature. Les deux premiers modèles sont des réseaux des neurones multicouches désignés sous le nom des réseaux de neurones à Rétro-propagation, avec un apprentissage supervisé. Le troisième modèle est un modèle basé sur la technique de neurones-flous (ANFIS : Adaptive Neuro Fuzzy Inference System). Tous les modèles développés ont été examinés pour déterminer leur capacité de généralisation. L'apprentissage et le test de ces modèles ont été accomplis à l'aide des Toolbox " Neural Network" et " Fuzzy Logic" du logiciel MATLAB version 2014, qui fonctionne sur la plate-forme Windows. La description, la méthodologie de conception, la validation et l'application de ces modèles RNA pour la prévision des propriétés du BAP seront présentées en détail dans ce chapitre.

## 5.2 Choix du type d'apprentissage

Il existe plusieurs types et algorithmes d'apprentissage, dans cette étude l'apprentissage supervisé à rétro-propagation où les poids de connexion sont adaptés vis-à-vis de la règle de Rétro-propagation (Figure 5.1) a été choisi. L'emploi de l'apprentissage supervisé exige la connaissance d'une sortie désirée pour tout l'ensemble de données d'entrée.

Le choix de l'algorithme d'apprentissage d'un réseau de neurones multicouche compte tenu de leur taux de convergence pour un problème donné est très difficile (Alani, 2008). Il dépend de plusieurs facteurs, y compris :

- la complexité du problème ;
- le nombre de vecteurs (ou points) de données dans l'ensemble d'apprentissage ;
- le nombre de poids et des biais dans le réseau ;
- l'erreur objective ;
- Le type de problème à traiter, (reconnaissance de formes (Discriminant Analysis) ou l'approximation de fonctions (Régression)).



**Figure 5.1** – Mécanisme d'apprentissage à rétro propagation

Les différents algorithmes d'apprentissage proposés par le logiciel Matlab sont indiqués dans le tableau 5.1.

**Tableau 5.1** – Différents fonctions d'apprentissage

Nom d'algorithme	Instruction Matlab	Acronyme
Levenberg Marquardt	<b>trainlm</b>	LM
BFGS Quasi-Newton	<b>trainbfg</b>	BFG
Reilient Backpropagation	<b>trainrp</b>	RP
Scaled Conjugate Gradient	<b>trainscg</b>	SCG
Conjugate Gradient With PowellBeal Restarts	<b>traingb</b>	CGB
Fletcher-Powell Conjugate Gradient	<b>traincgf</b>	CGF
Polak-Ribière Conjugate	<b>traincgp</b>	CGP
One Step Secant	<b>trainoss</b>	OSS
Variable Learning Rate Backpropagation	<b>traingdx</b>	GDX

En général, pour les problèmes d'approximation de fonction et les réseaux qui contiennent jusqu'à quelques centaines de poids, l'algorithme Levenberg-Marquardt (trainlm) aura la convergence la plus rapide. Ce favori est surtout évident avec un apprentissage supervisé (Alani, 2008), ce qui convient à notre type de problème. Cet algorithme « trainlm » est choisi pour l'apprentissage des deux premiers modèles RNAs de prédiction des propriétés du BAP.

### 5.3 Choix d'architecture du Modèle RN

Le logiciel Matlab dispose d'une application NETWORK DADA MANAGER, une interface utilisateur graphique très facile à utiliser pour créer, manœuvrer, et visualiser les réseaux de neurones sur une plate-forme de Windows, toutefois, on a préféré de programmer tous les modèles RNA en utilisant les fonctions des toolbox "Neural Network" pour la faciliter d'interaction et de la modification des paramètres des réseaux, d'une manière facile, pratique et rapide, qui sont inaccessibles en utilisant l'interface graphique.

Le programme développé est capable d'afficher les résultats d'apprentissage tels que les poids synaptiques, les biais, le nombre de neurones et plusieurs architectures simultanément. Les architectures choisies pour nos modèles sont composée de trois couches, une couche d'entrée, une cachée et une couche de sortie. Chaque couche est constituée d'un certain nombre de neurones. Les neurones de la couche d'entrée reçoivent des informations de l'environnement extérieur et les transmettent aux neurones des couches cachées sans effectuer tout calcul. Les neurones de la couche cachée traitent ensuite les informations d'entrée et extraient des caractéristiques utiles pour reconstruire le mappage de l'espace d'entrée. Les couches voisines sont entièrement reliées entre eux par des poids. Finalement, les neurones de couche de sortie produisent des prédictions de réseau avec le monde extérieur. Généralement, les réseaux de neurones sont sensibles au nombre de neurones dans leurs couches cachées. Le nombre faible de neurones peut conduire à des valeurs sous-estimées, par contre, le nombre élevé de neurones peut contribuer à un sur-apprentissage. Il n'y a pas de règle générale pour sélectionner le nombre de neurones dans une couche cachée. Le choix de la taille de la couche cachée est principalement un problème dans une certaine mesure et dépend du nombre et de la qualité de la base de données. Le nombre de neurones dans les couches d'entrée et de sortie sont basées sur la géométrie du problème. Par conséquent, il est déterminé par la méthode d'itérations et erreurs dans cette étude. Il convient de noter qu'il est possible d'obtenir des résultats satisfaisants avec des différentes architectures de réseau. Cela a impliqué le développement et le test de plus de 1000 architectures avec différents nombres de neurones dans la couche cachée en utilisant l'algorithme de retro-propagation pour l'apprentissage. La fonction de transfert sigmoïdale

a été utilisée comme une fonction d'activation de tous les neurones. Au début du processus de l'apprentissage, tous les poids de connexions ont été aléatoirement initialisés entre -1 et 1. Le nombre maximum des cycles ou itérations a été fixé à 1000 pour les modèles de RNA proposés.

## **5.4 Conception du Modèle RN1**

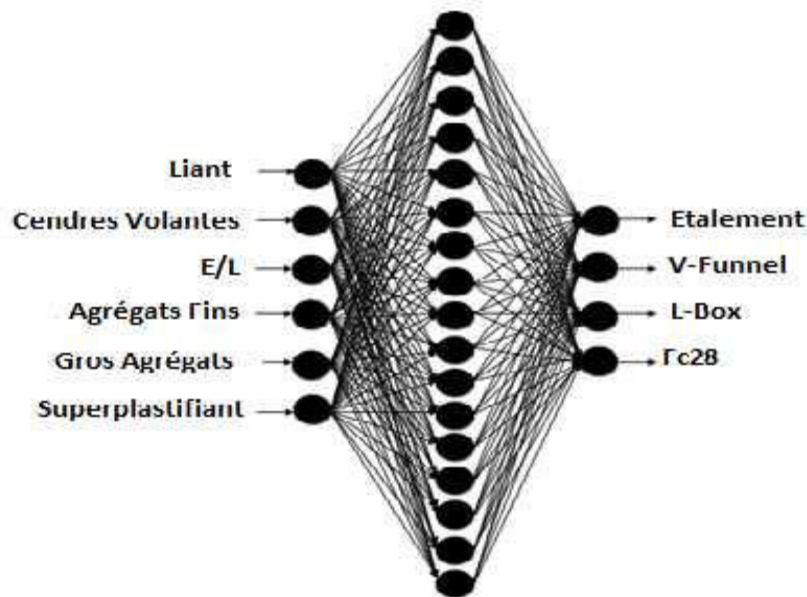
L'objectif principal de ce modèle est de créer une application basée sur les RNA pour prédire avec la même architecture les propriétés les plus importantes à l'état frais à savoir l'étalement, l'écoulement à l'entonnoir en V et L-BOX combinés avec la propriété mécanique la plus importante (la résistance à la compression à 28 jours) basé sur les différents mélanges du BAP contenant des cendres volantes. L'étalement, l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V et l'essai de L-BOX ont été utilisés pour évaluer respectivement les propriétés rhéologiques : la fluidité, la viscosité, la capacité de remplissage et la capacité de passage.

### **5.4.1 Apprentissage, test et choix de l'architecture du modèle RN1**

Un programme basé sur MATLAB a été développé pour entraîner et tester le modèle RNA. Pour une bonne capacité de généralisation de ce modèle, les données ont été divisées en deux parties :

- 80 % de données pour l'apprentissage du modèle ;
- 20 % de données pour le test du modèle.

L'architecture du modèle RNA choisi ayant 6 neurones dans la couche d'entrée qui représentent les paramètres de formulation du BAP (quantité du liant, le pourcentage de cendres volantes, rapport eau/liant, agrégats fins, gros agrégats et superplastifiant), 17 neurones dans la couche cachée et 4 neurones dans la couche de sortie (étalement, V-entonnoir, rapport L-box, résistance à la compression à 28 jours) comme illustré dans la figure 5.2.



**Figure 5.2 – Architecture du Modèle RN1**

Le tableau 5.2 récapitule les différentes performances d'apprentissage et d'architecture du modèle RN1.

**Tableau 5.2 – Paramètres du Modèle 01**

Paramètres	RN1
Nombre de neurones dans la couche d'entrée	6
Nombre de couche cachée	1
Nombre de neurones dans la couche cachée	17
Nombre de neurone dans la couche de sortie	4
Momentum rate	0.9
Taux d'apprentissage	0.5
Cycle d'apprentissage	11

Les erreurs de réseau qui surviennent pendant le processus d'apprentissage peuvent être exprimées en termes d'erreur quadratique moyenne (MSE) et sont calculées en utilisant l'équation. (5.1).

$$MSE = \left(\frac{1}{p}\right) * \sum_j (t_j - o_j)^2 \quad (5.1)$$

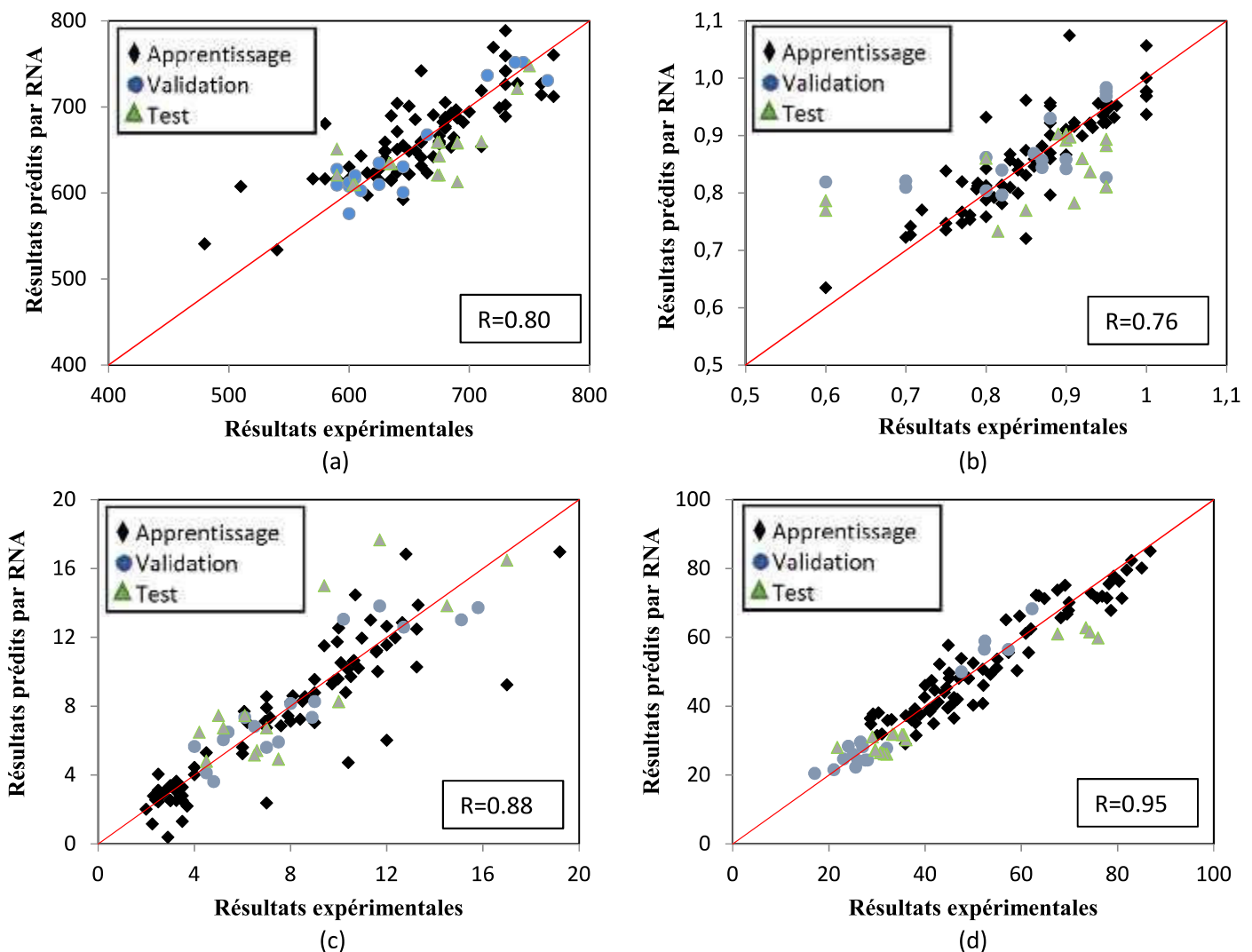
En outre, la fraction absolue de la variance ( $R^2$ ) et l'erreur absolue en pourcentage (MAPE) sont calculées en utilisant les équations. (5.2) et (5.3), respectivement.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_j (t_j - o_j)^2}{\sum_j (o_j)^2}\right) \quad (5.2)$$

$$MAPE = \frac{1}{P} \sum_j \left( \left| \frac{o_j - t_j}{o_j} \right| * 100 \right) \quad (5.3)$$

Où  $t_j$  est la valeur cible du j-ième modèle,  $O_j$  est la valeur de sortie du j-ième modèle, et P est le nombre de motifs.

Les résultats d'apprentissage et de test du modèle RN1 sont montrés respectivement sur la figure 5.3 par comparaison des valeurs expérimentales et celles prédites par ce modèle. Ces figures montrent significativement une forte corrélation prouvant la grande précision de ce modèle pour estimer ou prédire efficacement les propriétés désirés (Etalement (mm), Rapport L-Box, Temps de V- entonnoir (s) et Résistance à la compression à 28 jours (MPa))



**Figure 5.3** – Relation linéaire entre les propriétés expérimentales et prévues pour BAP  
 (a) Etalement (mm), (b), Rapport L-Box (c) Temps de V- entonnoir (s),  
 (d) Résistance à la compression à 28 jours (MPa)

### 5.4.2 Validation du modèle RN1

La validité d'un modèle RNA entraîné avec succès est déterminée par sa capacité à généraliser ses prédictions au-delà des données d'apprentissage et de bien performer quand il est présenté avec de nouvelles données inconnues, dans l'intervalle des paramètres d'entrée utilisés dans l'apprentissage. Par conséquent, la capacité de prédiction du modèle RN1 proposé ainsi développé doit être testée et validée par comparaison avec de nouvelles données obtenues par des résultats supplémentaires provenant d'autres chercheurs. La disponibilité de nouvelles données, permet de mieux tester la fiabilité de prédiction du modèle. Par conséquent, le modèle a été validé avec un total de 16 autres ensembles de données (formulation/propriétés) du BAP proposés par Zhu et al. (2003), Naik et al. (2012), Turk et al. (2013) et Liu et al. (2010). La comparaison entre les valeurs prédites par le modèle RN1 développés et ceux obtenues expérimentalement par les chercheurs est indiquée dans le tableau 5.3. Dans ce tableau, la comparaison est faite selon le calcul de l'erreur relative exprimée par l'équation 5.4 :

$$E(\%) = ABS\left(\frac{O_{\text{exp}} - O_{ANN}}{O_{\text{exp}}}\right) * 100 \quad (5.4)$$

Où,  $O_{\text{exp}}$  est la sortie de l'expérience et  $O_{\text{RNA}}$  est la sortie obtenue par le modèle RN1. Cette validation en termes d'erreur relative totale, indique que l'utilisation du modèle RN1 proposé est plus appropriée pour prédire avec précision la valeur d'étalement, le temps V-entonnoir, le rapport L-box et la résistance à la compression à 28 jours du BAP contenant des cendres volantes à des pourcentages de remplacement allant de 0 à de 60%.

**Tableau 5.3** – Comparaison des résultats prédites par le Modèle RN1 et les résultats d'autres chercheurs

N	Auteur	Année	FA (%)	D (mm)			L-Box (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )			V funnel(s)			Fc 28 (MPa)		
				Exp	RNA	E (%)	Exp	RNA	E (%)	Exp	RNA	E (%)	Exp	RNA	E (%)
1			0	600	594	1.0							66.8	61.78	7.5
2	Zhu	2003	20	600	610	1.7							71.3	66.36	6.9
3			30	630	612	2.8							49.9	53.4	7.0
4			0	679	734	8.0							60	75.82	26.4
5	Naik	2012	35	686	690	0.5							62	62.9	1.5
6			45	686	638	6.9							60	66.48	10.8
7			55	699	631	9.8							48	60.74	26.5
8			0	709	651	8.1	0.89	0.84	5.7				57.5	77.13	34.1
9			25	709	621	12.4	0.91	0.74	18.8				53.5	55.26	3.3
10	Turk	2013	30	702	640	8.8	0.94	0.77	17.9				55	56.72	3.1
11			35	705	657	6.7	0.95	0.8	15.6				58	57.19	1.4
12			40	701	676	3.5	0.96	0.84	12.7				59	57.81	2.0
13			0	720	652	9.4				8.1	5.7	29.4	73.3	63.06	14.0
14	Liu	2010	20	700	670	4.3				8.1	4.5	44.7	69.7	51.79	25.7
15			40	705	709	0.6				6.1	4.7	22.4	58.5	42.42	27.5
16			60	715	745	4.2				6.3	3.1	50.2	37.2	36.18	2.8

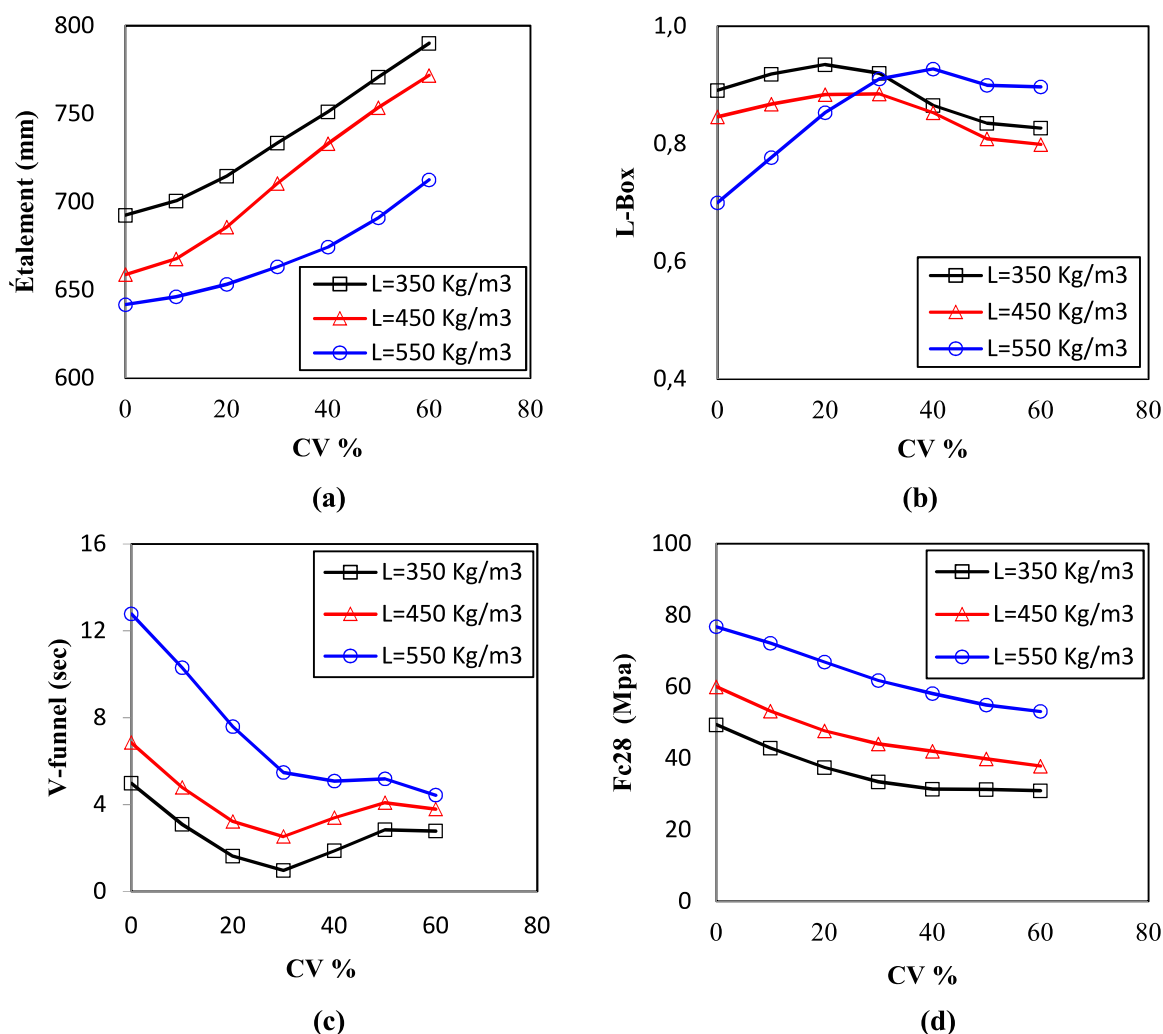
### 5.4.3 Etude paramétrique basé sur les résultats du modèle RN1

Dans le but de simuler l'impact des paramètres d'entrées et les interactions entre les paramètres à l'aide du modèle du RNA pour prédire les propriétés à l'état frais et à l'état durci du BAP, une étude paramétrique a été réalisée. Dans cette analyse, un paramètre a été varié, tandis que les autres paramètres sont maintenus constants.

#### 5.4.3.1 Effet de la teneur en cendres volantes

Les résultats de la simulation de la variation de diverses propriétés du BAP à l'état frais à savoir l'étalement, le temps V-entonnoir, le rapport L-box et la résistance à la compression à 28 jours avec le taux de remplacement des cendres volantes de 0 à 60 % pour différentes quantités de liant (350-E/L=0.45, 450-E/L=0.40, et 550 kg / m<sup>3</sup>, E/L=0.35) ont été présentées dans la figure 5.4.





**Figure 5.4** – Effet des cendres volantes sur les propriétés du BAP  
 (a) Étalement (mm), (b) Rapport L-box, (c) temps V-funnel (sec),  
 (d) résistance à la compression à 28jours (MPa)

Dans ce cas, un grand effet du taux de remplacement des cendres volantes sur les paramètres de sorties a été trouvé. Les résultats des tests de cette analyse ont indiqué que tous les mélanges du BAP répondent aux exigences d'ouvrabilité, le rapport L-box et le temps d'écoulement de l'entonnoir et la résistance à la compression du BAP. Cela améliore les performances du béton à l'état frais et à la l'état durci.

Le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes et diminue avec l'augmentation de la quantité du liant pour chaque taux de cendres volantes (figure 5.4-a). Le remplacement du ciment par les cendres volantes jusqu'à 30% réduit d'environ 10% la demande en eau pour un diamètre d'étalement donné. Cela produit une pâte avec une meilleure plasticité et plus de cohésion. Toutes les valeurs de l'étalement obtenues et prédites

par le modèle RN1 pour toutes les quantités du liant dans la présente analyse sont de l'ordre de 640 mm à 790 mm qui représentent une ouvrabilité adéquate du mélange de BAP (500-800 mm) (EFNARC, 2005).

La capacité de passage des mélanges de BAP a été augmentée avec l'augmentation du pourcentage des cendres volantes. Toutes les valeurs du rapport L-box convergent vers des valeurs allant de 0,7 à 0,9 pour 30% de remplacement de cendres volantes (Figure 5.4-b). On a également observé que, lorsque les pourcentages de cendres volantes continuent à augmenter jusqu'à à 60%, le rapport L-Box se trouvait dans la plage de 0,8 à 1 conformément aux valeurs généralement recommandées (EFNARC, 2005).

Le temps de passage à l'entonnoir en V diminue lorsque le pourcentage des cendres volantes augmente (Figure 5.4-c). Dans cette étude, les valeurs de temps d'écoulement V-entonnoir prédites étaient entre 4 et 13 secondes ce qui confirme le temps V-entonnoir adéquate pour un BAP (EFNARC, 2005).

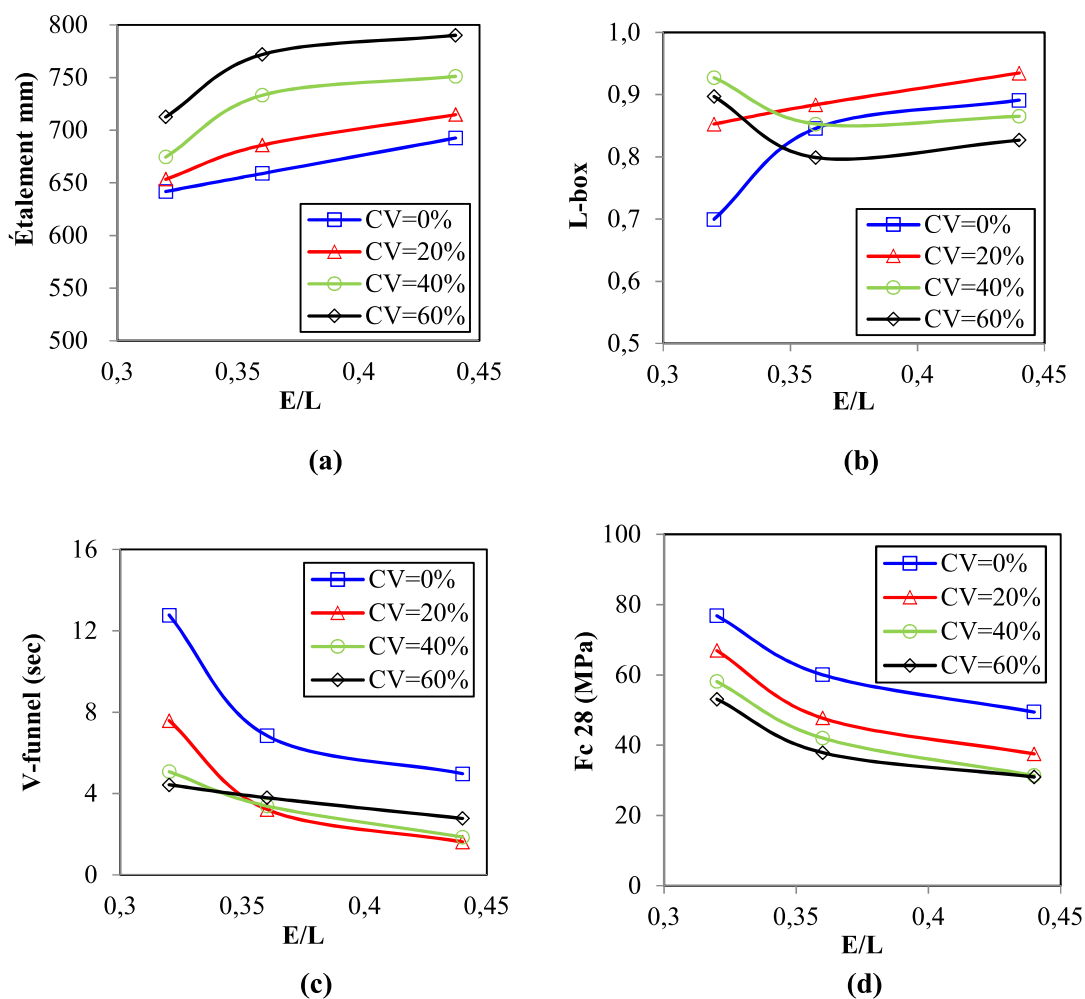
La résistance à la compression à 28 jours diminue avec l'augmentation du pourcentage des cendres volantes et elle augmente avec l'augmentation de la quantité du liant (Figure 5.4-d). Ce qui a été influencé par la valeur constante du rapport E/L du BAP. La diminution de la résistance à la compression est directement dépendante de la quantité de pourcentage des cendres volantes qui remplacent un taux de ciment, ce qui est en concordance avec des résultats publiés antérieurement (Naik et al. 2012).

#### **5.4.3.2 Effet du rapport E/L**

La variation d'étalement, le temps V-entonnoir, le rapport L-box et la résistance à la compression à 28 jours avec le rapport E/L pour différentes quantités de cendres volantes est représenté sur la figure 5.5.

Les valeurs de diamètre d'étalement augmentent avec l'augmentation du rapport E/L et le pourcentage des cendres volantes (Figure 5.5-a). Il a été constaté que les cendres volantes ont un grand potentiel d'être utilisé dans le BAP. Ceci a été particulièrement le cas pour la production d'un BAP avec un volume de pâte élevé, ce qui conduit souvent à un rapport E/L élevé (Shetty, 2000).

Toutes les valeurs du rapport L-box convergent vers une fourchette de 0,75 à 0,95, lorsque le rapport E/L est supérieur à 0,37 (Figure 5.5-b).



**Figure 5.5** – Effet du rapport E/L sur les propriétés du BAP  
 (a) Etalement (mm), (b) Rapport L-box, (c) temps V-funnel (sec),  
 (d) résistance à la compression à 28 jours (MPa)

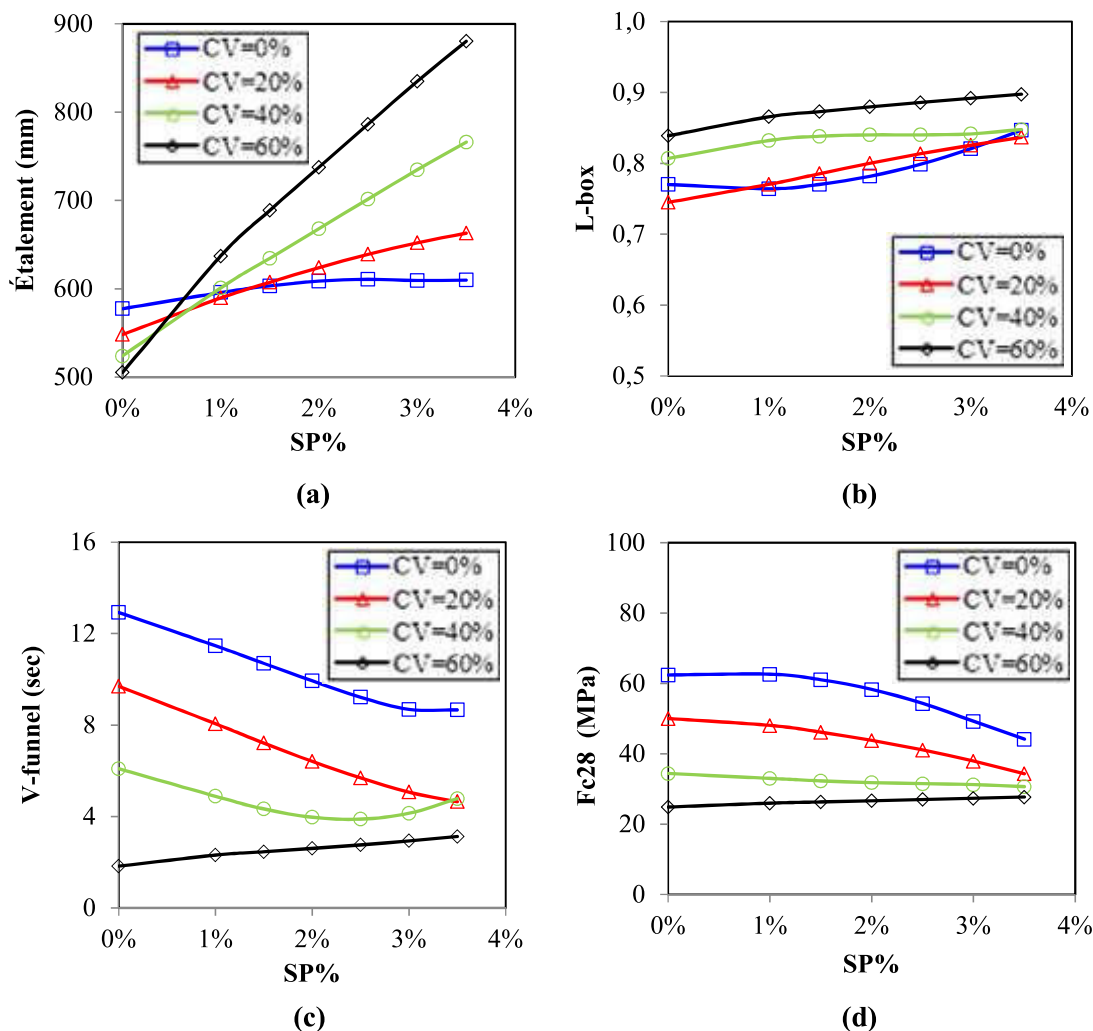
Le temps d'écoulement V-entonnoir diminue lorsque le pourcentage de cendres volantes augmente de 20 à 60% (Figure 5.5- c). Presque toutes les valeurs de temps d'écoulement, qui sont moins de 6 secondes, sont recommandées pour un BAP.

L'influence combinée de l'augmentation du pourcentage des cendres volantes de 20 à 60% et le rapport E/L de 0,30 à 0,45 diminue la résistance à la compression à 28 jours du BAP (figure 5.5-d) ce qui est en concordance avec des résultats déjà publiés par Siddique (2011).

#### 5.4.3.3 Effet du superplastifiant

Le Superplastifiant joue un rôle fondamental pour améliorer les propriétés rhéologiques du BAP. C'est un composant essentiel qui doit être utilisé pour produire ce type de béton. La figure

5.6 montre la variation du diamètre d'étalement, le temps V-entonnoir, le rapport L-box et la résistance à la compression à 28 jours avec des différents dosages de superplastifiant (de 1 à 4%) pour plusieurs quantités de cendres volantes.



**Figure 5.6** – Effet du superplastifiant sur les propriétés du BAP  
 (a) Etalement (mm), (b) Rapport L-box, (c) temps V-entonnoire (sec),  
 (d) résistance à la compression à 28jours (MPa)

Le diamètre d'écoulement et le rapport L-box augmentent avec l'augmentation du dosage des superplastifiants allant jusqu'à 1% (Figs. 5.6-a et 5.6-b). Le diamètre d'étalement semble être liée directement au dosage du superplastifiant. Le temps d'écoulement V-entonnoir se diminue avec l'augmentation à la fois du superplastifiant et du pourcentage des cendres volantes (Fig. 5.6-c). Ces résultats sont cohérents avec les résultats d'autres chercheurs qui ont montré que le dosage de superplastifiant améliore l'ouvrabilité du béton par leur défloculation.

La résistance à la compression à 28 jours est diminuée avec l'augmentation du dosage de superplastifiant et le pourcentage des cendres volantes (Figure 5.6-d). Le superplastifiant peut augmenter la résistance à la compression en diminuant la quantité d'eau de mélange pour une ouvrabilité donnée ou réduire simultanément les quantités de ciment et d'eau pour atteindre une ouvrabilité et une résistance données (Aïtcin, 1994). A un rapport E/L donnée, l'utilisation des cendres volantes diminue le dosage du superplastifiant nécessaire pour obtenir une résistance similaire comparé par un BAP avec un ciment portland (Naik et al. 2012).

## 5.5 Conception du modèle RN2

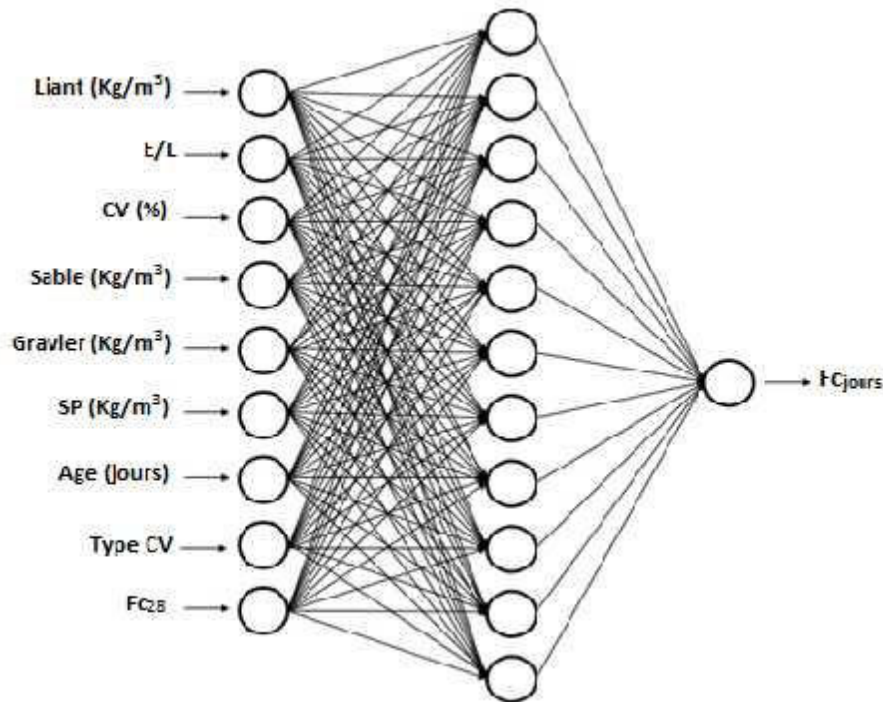
L'objectif du modèle RN2 est d'étudier l'évolution de la résistance à la compression du BAP contenant des cendres volantes en utilisant les paramètres de la composition du BAP, le type de cendres volantes utilisé ainsi que l'âge du béton. Pour cela, une base de données (composition-résistance à compression) sur le BAP contenant des cendres volantes a été utilisée afin d'évaluer l'apprentissage de ce modèle. Un nombre de données important de 1507 points a été collecté à partir de la littérature (**Annexe 2**).

### 5.5.1 Apprentissage, test et choix de l'architecture du modèle RN2

Similairement au modèle RN1, un programme basé sur MATLAB a été développé pour entraîner et tester le modèle RN2. Pour une bonne capacité de généralisation, les données ont été divisées en deux parties :

- 85 % de données pour l'apprentissage du modèle ;
- 15 % de données pour le test du modèle.

Les paramètres d'entrée de ce modèle sont les principaux ingrédients du BAP (quantité du liant, le pourcentage de cendres volantes, rapport eau/liant, agrégats fins, gros agrégats et superplastifiant), l'âge du béton, type de cendres volantes (Type F ou Type C) et la résistance à la compression du BAP témoin à 28 jours sans cendres volantes. Le seul paramètre de sortie dans ce modèle c'est la résistance à la compression à un âge donnée du béton. Le modèle RN2 a été choisi comme ayant 9 neurones dans la couche d'entrée, 11 neurones dans la couche cachée et 1 neurone dans la couche de sortie comme illustré dans la figure 5.7.



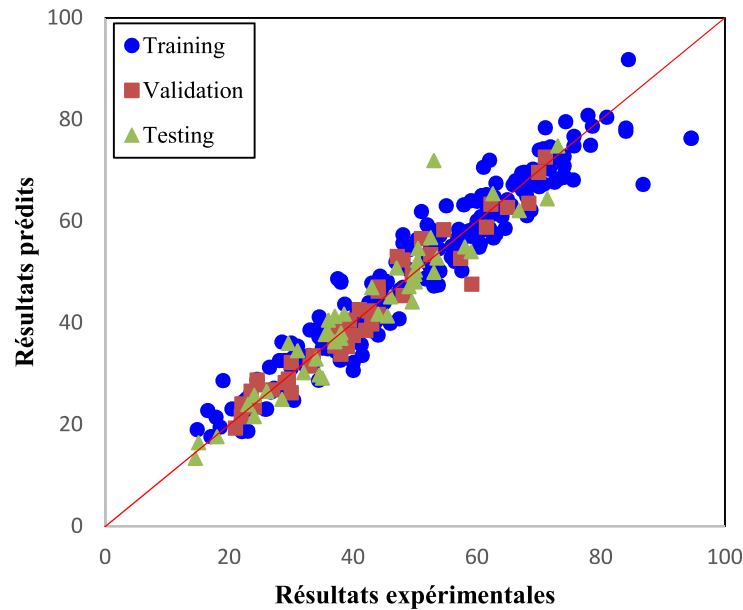
**Figure 5.7** – Architecture du modèle RN2

Les paramètres d'apprentissage et d'architecture du modèle RN2 sont présentés dans le tableau 5.4.

**Tableau 5.4** – Les paramètres du Modèle RN2

Paramètres	RN2
Nombre de neurones dans la couche d'entrée	9
Nombre de couche cachée	1
Nombre de neurones dans la couche cachée	11
Nombre de neurone dans la couche de sortie	1
Momentum rate	0.9
Taux d'apprentissage	0.5
Cycle d'apprentissage	11

La figure 5.8 montre une comparaison entre les valeurs de la résistance à compression du BAP obtenues expérimentalement et celles prédites par le modèle RN2. Selon cette figure une haute corrélation a été obtenue prouvant ainsi l'exactitude du modèle RN2 dans l'évaluation de la valeur cible autant pour la phase d'apprentissage que pour la phase de validation et de test. Les valeurs de paramètres statistiques RMSE,  $R^2$  et MAPE égalent respectivement à 5,49 ; 0,98 et 10,27 montrent également la bonne performance du modèle RN2.



**Figure 5.8** - Relation linéaire entre les propriétés expérimentales et prévues pour BAP  
Apprentissage, test, validation

### 5.5.2 Validation du modèle RN2

Le modèle RN2 a été validé avec un total de 57 nouvelles données expérimentales et a été utilisé pour prévoir la résistance à la compression du BAP associé à chaque ensemble de valeurs pour les neuf paramètres d'entrées. Les résultats de modèle sont ensuite comparés avec ceux calculés par d'autres modèles qui ont été proposés par différents comités tels que l'ACI (ACI 209-2008) et CEB-FIP (le Code Model 2010). Les résultats de prédiction de la résistance à la compression en fonction de l'âge par ces modèles sont calculés basé sur la résistance à 28 jours du même mélange. Ces modèles sont présentés dans l'équation (5.5) et (5.6) respectivement.

$$(f'_c)_t = \left( \frac{t}{\alpha + \beta t} \right) (f'_c)_{28} \quad (5.5)$$

Avec “ $\alpha$ ” en jours et “ $\beta$ ” sont constants, “ $t$ ” est l'âge du béton en jours,  $(f'_c)_{28}$  et  $(f'_c)_t$  sont la résistance à la compression du béton à 28 jours et «  $t$  » jours respectivement. Les valeurs de “ $\alpha$ ” et “ $\beta$ ” sont en fonction du type de ciment utilisé ainsi que le mode de cure du béton. Pour cette comparaison, le ciment type I a été utilisé dont les valeurs de “ $\alpha$ ” et “ $\beta$ ” sont égales à 4.0 et 0.85 respectivement.

$$(f'_c)_t = \exp \left\{ s \cdot \left[ 1 - \left( \frac{28}{t/t_1} \right)^{0.5} \right] \right\} \cdot (f'_c)_{28} \quad (5.6)$$

Où "s" est un coefficient, qui dépend de la classe de résistance du ciment, "t" est l'âge du béton en jours et "t<sub>1</sub>" est égale à 1 jour,  $(f'_c)_{28}$  et  $(f'_c)_t$  sont les valeurs de la résistance à compression à 28 et t jours respectivement. Pour un ciment avec une classe de résistance de 32.5R et 42.5, la valeur du "s" est 0.25.

Le tableau 5.6 montre la comparaison entre les valeurs expérimentales et celles prédites par les codes ACI 209-2008 et CEB-FIP 2010 et le modèle RN2. Dans ce tableau, l'erreur relative est calculée pour chaque prédiction et est exprimée par l'équation (5.5).

**Tableau 5.5** - Comparaison les résultats du Modèle RNA 02 avec l'ACI 209-71 et CEB-FIP 1990

<i>Type de CV</i>	<i>Auteur</i>	<i>Année</i>	<i>Erreur Relative (%)</i>		
			<i>ACI</i>	<i>CEB</i>	<i>RN2</i>
<i>Class F</i>	<i>Turk</i>	<i>2013</i>	15.78	23.92	11.95
	<i>Krishnapal</i>	<i>2013</i>	6.07	11.41	7.65
<i>Class C</i>	<i>Naik</i>	<i>2012</i>	11.92	14.12	8.29
	<i>Uysal</i>	<i>2011</i>	6.73	3.52	5.39
<i>Moyenne (%)</i>			<b>10.12</b>	<b>13.24</b>	<b>8.32</b>

Les résultats de validation du modèle RN2 indiquent que le modèle proposé peut être utilisé pour mieux prédire la résistance à la compression du BAP contenant des cendres volantes de façon plus rapide en le comparant avec les autres codes (ACI et CEB). Ceci est dû au comportement relativement complexe du BAP par rapport au béton conventionnel utilisant le même rapport E/L et aussi, à la prise en compte des paramètres de mélange les plus importantes notamment les paramètres de la formulation à la déférence des modèles standards qui se basent seulement sur la résistance à la compression à 28 jours pour prédire celles à long terme.

### 5.5.3 Importance relative des proportions du BAP

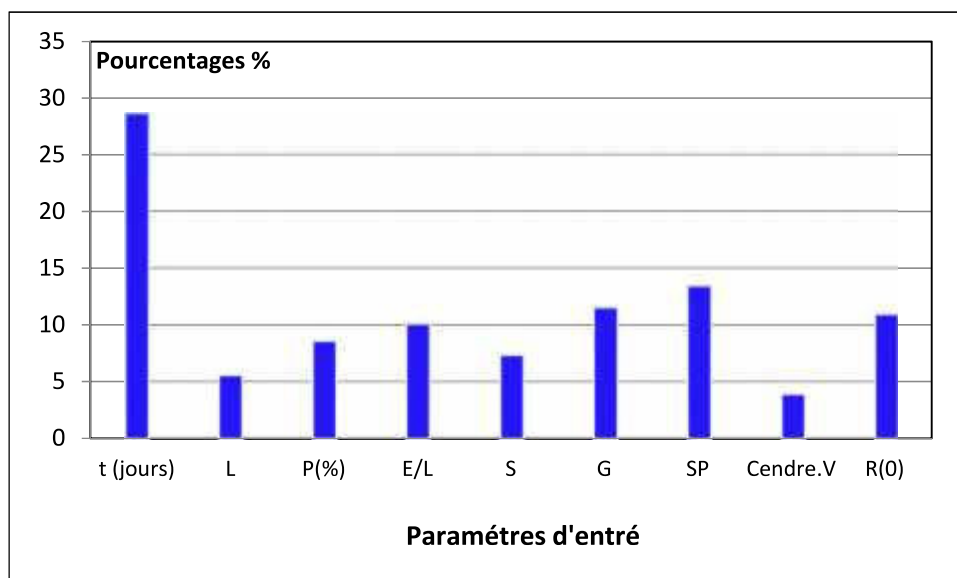
Les neurones dans les couches d'entrée et de sortie dans un modèle RN sont liés par des poids de connexions. Pour interpréter l'influence des variables d'entrée qui représentent dans notre cas les proportions du BAP et comprendre le rôle joué par chaque neurone dans la couche



cachée, la méthode du Garson (Garson et al. 1991) est utilisée. Cette méthode implique essentiellement la division des poids de rapport neurones de sortie de chaque neurone caché dans des composants associés à chaque neurone d'entrée (Siddique et al. 2011).

$$Q_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^N \left( \frac{w_{ij}}{\sum_{r=1}^L w_{rj}} v_{jk} \right)}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{w_{ij}}{\sum_{r=1}^L w_{rj}} v_{jk} \right)} \times 100 \quad (5.7)$$

L'importance relative de chaque paramètre d'entrée sur la résistance à la compression du BAP a été présentée dans la figure 5.9. Le facteur important maximal qui a été observé c'est l'âge du béton. Il a été observé que le pourcentage d'importance relatif pour tous les paramètres d'entrés se situe à l'intérieur d'une gamme limitée de valeurs de 3 % à 25 %, cela signifie que la résistance à la compression du BAP est influencé par tous les paramètres d'entrés.



**Figure 5.9** – Facteurs d'importance relatives pour les différents paramètres d'entrés

#### 5.5.4 Etude paramétrique du Modèle RN2

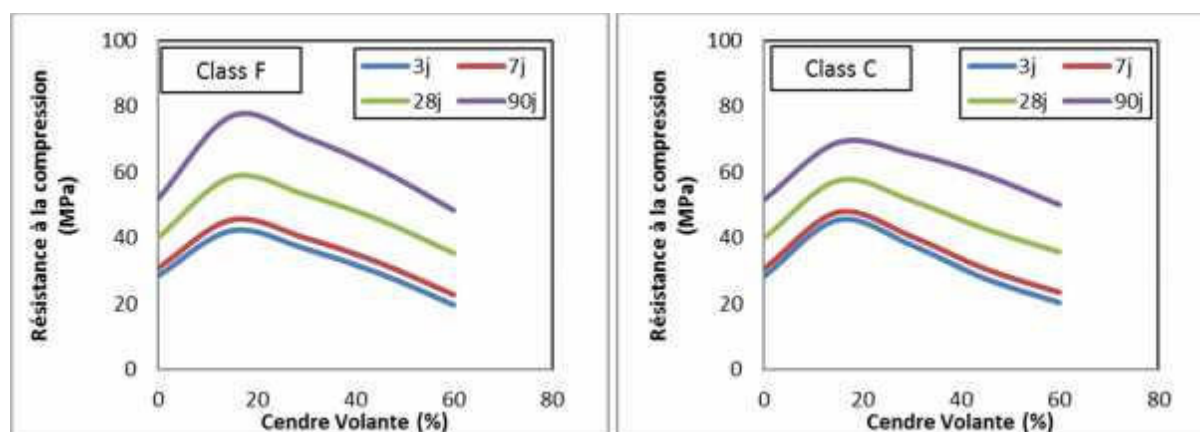
Basée sur la performance satisfaisante du modèle RN2 développé qui a démontré sa capacité de prévoir la résistance du BAP en fonction de l'âge, il serait important d'examiner l'effet de certains paramètres de conception de mélange sur cette dernière. A cet effet, une étude

paramétrique a été effectuée.

#### 5.5.4.1 Effet des cendres volantes

Dans le but de montrer l'effet des cendres volantes sur le BAP, cinq mélanges sont créés basés sur le modèle RN2 en changeant le pourcentage de remplacement du ciment par les cendres volantes et maintenant tous autres ingrédients de mélange inchangés pour les deux classes de cendres volantes.

La figure 5.10 montre l'effet de pourcentage des cendres volantes sur la résistance à la compression du BAP. Cette figure montre clairement l'effet des cendres volantes sur l'augmentation de la résistance à la compression pour des taux de substitution allant jusqu'à 20 %. Au-delà de 20%, la résistance à la compression tend à diminuer à tous les âges. La même constatation a été tirée pour les deux classes de cendre volantes.



**Figure 5.10** – Comparaison des résultats prédites par le Modèle RN2 et les résultats d'autres chercheurs Effet des cendres volantes sur la résistance du BAP  
(a) Cendres volantes Class F, (b) Cendres volantes Class C

La finesse et la réactivité pouzzolanique des cendres volantes dans le béton améliorent significativement la qualité de la pâte de ciment et la microstructure de la zone de transition entre la matrice du liant et les agrégats. En conséquence du processus continu de raffinement de pores, en raison de l'inclusion de produits d'hydratation des cendres volantes dans le béton, un gain dans le développement de la résistance en fonction de l'âge est achevé (Siddique, 2008). De plus, la plupart de cendres volantes sont des matériaux pouzzolaniques, ce qui signifie que c'est des matériaux siliceux ou siliceux-et-alumineux qui réagissent avec l'hydroxyde de calcium (chaux) pour former les CSH. Cette réaction des cendres volantes avec la chaux dans

le béton améliore la résistance du BAP.

Le volume croissant des cendres volantes plus de 20 % diminue la quantité du ciment dans le béton, ceci diminue automatiquement la résistance à la compression du BAP, ce qui est en concordance avec des résultats précédemment publiés (Naik et al. 2011).

#### 5.5.4.2 Effet du type de cendres volantes

Cinq nouveaux mélanges ont été créés, en changeant seulement le pourcentage des cendres volantes pour les deux type (Classe F, Classe C) afin d'examiner la capacité du Modèle RN2 à montrer l'effet du type des cendres volantes sur le BAP (Fig. 5.11).

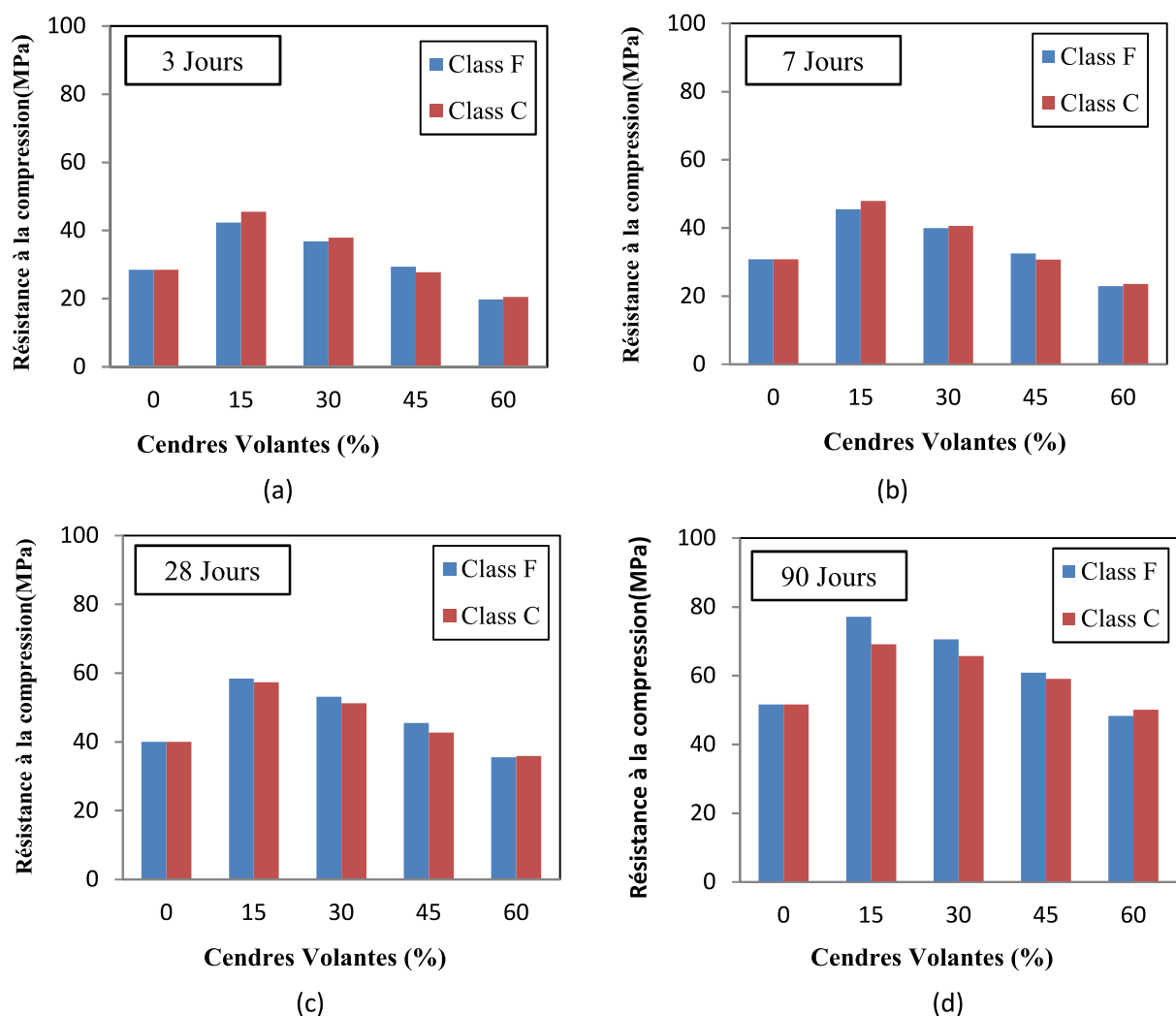


Figure 5.11 - Effet du type des cendres volantes sur la résistance du BAP

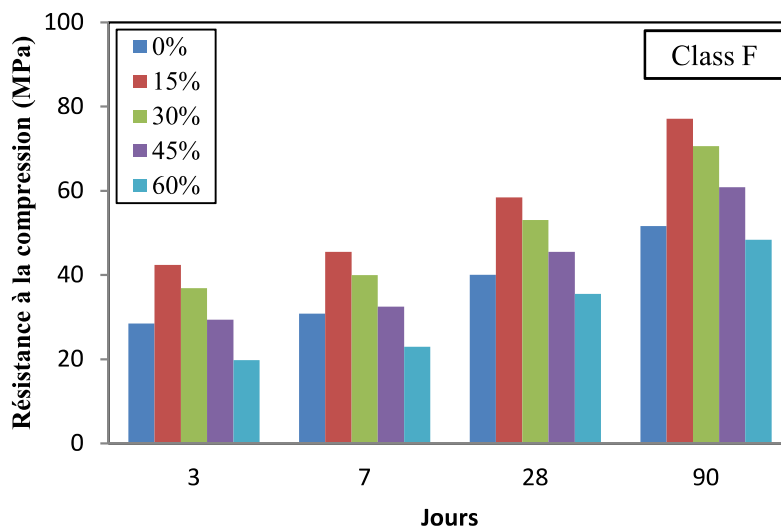
Selon la figure 5.11, la résistance à la compressive du BAP contenant des cendres volantes de la Classe F développe de faibles résistances à 3 et 7 jours d'âge comparée aux cendres volantes de Classe C (Figures 5.11-a et 5.11-b). Après 28 jours, le BAP contenant des cendres volantes de Classe F développe des résistances plus élevées que les BAP aux cendres volantes de Classe C (Figures 5.11-c et 5.11-d).

Plusieurs chercheurs ont montré que la contribution des cendres volantes de type C sur la résistance au jeune âge du BAP est plus importante que celles du type F (Toutanji H et al. 2004, Malhotra VM, 1994). Ceci peut être expliqué par les réactions pouzzolaniques dans la Classe C qui vont probablement arriver dans la même période que les réactions d'hydratation du ciment Portland, donnant des résistances égales ou parfois plus grandes au jeune âge. A long terme, la résistance du BAP est améliorée (augmentée) par l'activité pouzzolanique.

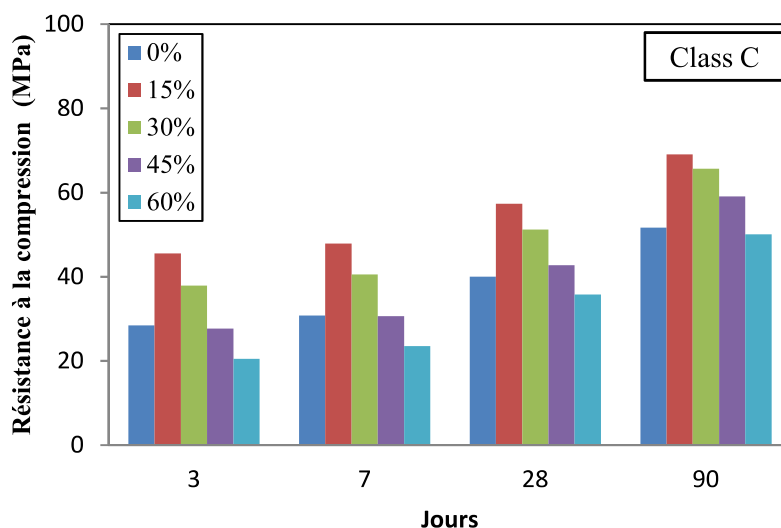
#### **5.5.4.3 Effet de l'âge du BAP**

La figure 5.12 montre la résistance à la compression du BAP contenant différents pourcentages des cendres volantes (de 0 à 60 %) en fonction de l'âge (de 3 à 90 jours). Généralement, il semble que pour les deux classes des cendres volantes, la résistance augmente en fonction de l'âge et diminue avec l'augmentation du pourcentage des cendres volantes (sauf BAP sans ajout).

Il a été observé aussi que la résistance du BAP avec un pourcentage de cendres volantes de 15 % à 30 % a été plus élevée par rapport au BAP témoin. La diminution dans la résistance à la compressive dépend directement de la quantité de remplacement du ciment par les cendres volantes. Ceci est fortement influencé par le rapport E/L constant.



(a)



(b)

**Figure 5.12** - Effet de l'âge du béton sur la résistance du BAP

### 5.5.5 Proposition d'une fonction basée sur le modèle RN2

Une base de données de plus de 1500 points a été créée basée sur des résultats de simulation du modèle RN2 dans le but de proposer une fonction plus simple et pratique de prédiction de la résistance à la compression du BAP en fonction de l'âge.

Les paramètres les plus influents dans ce modèle sont l'âge du béton, les agrégats fins et gros agrégats, le pourcentage de cendres volantes et la résistance à la compressive à 28 jours pour le ciment Portland. La fonction développée est basée sur une évaluation non-linéaire montrée par l'équation (5.8). Cette fonction est appropriée pour prévoir la résistance à la compressive du

BAP jusqu'à 365 jours avec un pourcentage de cendres volantes entre 0 % et 70 %.

$$(f'_c)_t^p = \left( \frac{a \cdot t}{b \cdot t + c} \right) \cdot (f'_c)_{28}^0 \cdot \exp\left( \frac{d \cdot P + e \cdot (E/L)}{1000} \right) \quad (5.8)$$

Où "a, b, c, d et e" sont des coefficients, "P" est le pourcentage ds cendres volantes, "E/L" est le rapport Eau/Liant, "t" est l'âge de béton en jours,  $(f'_c)_{28}$  et  $(f'_c)_t$  sont la résistance à la compression à 28 et « t » jours respectivement. Le tableau 5 montre les valeurs de ces coefficients qui sont obtenues par régression non linéaire.

**Tableau 5.6** - Valeur des coefficients dans la fonction proposée

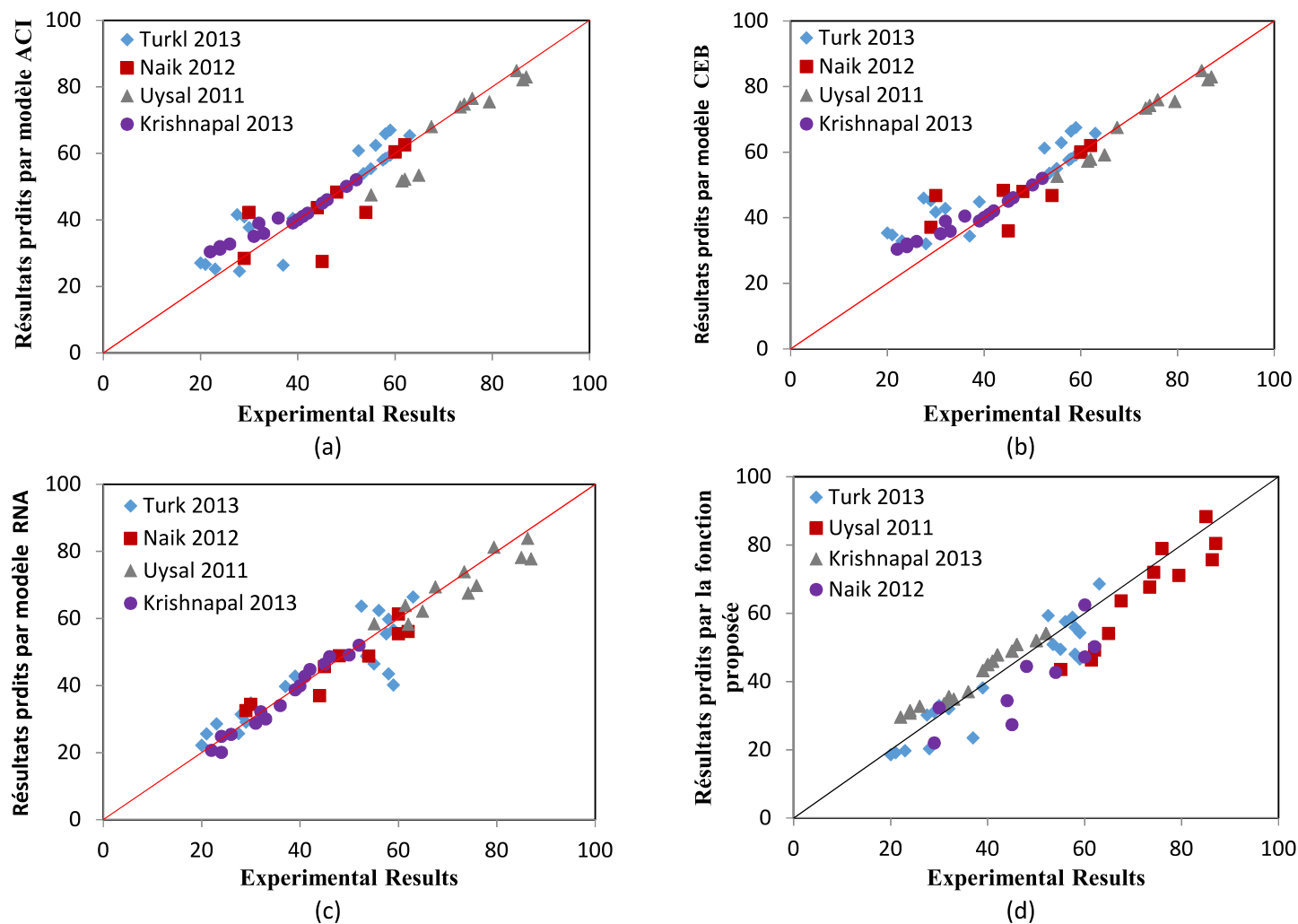
<i>Coefficients</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
<i>Valeurs</i>	100	80	494	-5.83	-1.13

La performance de la fonction a été évaluée sur des résultats de simulation du modèle RN2 en termes de paramètres statistiques mentionnées dans le tableau 5.8.

**Tableau 5.7** – les paramètres statistiques de la fonction propose

<b>Paramètres statistiques</b>	<b>Fonction</b>
RMSE	8.19
R <sup>2</sup>	0.97
MAPE	16.96

De plus, la fonction proposée est validée par comparaison des résultats expérimentaux avec ceux calculés avec les codes ACI 209, CEB-FIP 1990, et le modèle RN2 comme indiqué



**Figure 5.13** - Relation linéaire entre les propriétés expérimentales et prévues pour BAP ACI 209-71, CEB-FIP 1990, Modèle RNA et la fonction proposée

Dans la figure 5.13, de bons résultats ont été trouvés et tous les paramètres statistiques démontrent que la fonction proposée basée sur des résultats du RN2 est appropriée pour estimer la résistance à la compression du BAP contenant des cendres volantes avec une meilleure précision.

## 5.6 Conception du modèle NF3

L'utilisation des BAP montre actuellement une tendance croissante dans la technologie du béton. Plusieurs chercheurs s'intéressent à la compréhension de son comportement et l'évaluation de leurs propriétés notamment les propriétés rhéologiques basées sur des études expérimentales qui ont engendrés une grande quantité de résultats. Ces résultats constituent une

base de données pour la modélisation. Par conséquent, quelques tentatives ont été lancées pour développer des modèles pour la prédiction des propriétés des BAP basés sur différentes approches. Cependant, aucune étude n'a été menée sur la modélisation de la perméabilité aux chlorures des BAP contenant des cendres volantes. Dans cette étude, un modèle pour la modélisation et l'estimation de la perméabilité aux chlorures du BAP a été établi en se basant sur les résultats obtenus par l'essai RCPT sur BAP. Ce modèle a été développé par la technique de neurones-flous (ANFIS : Adaptive neuro fuzzy inference system) et constitue le troisième et le dernier modèle développé dans l'étude.

### 5.6.1 Modèle Neurones flous NF

Les systèmes Neuro-Flous permettent de combiner les avantages de deux techniques complémentaires : les réseaux de neurones et la logique floue. Les systèmes Neuro-Flous fournissent une bonne représentation des connaissances par l'intégration de réseaux de neurones qui améliorent leurs performances grâce à leur capacité d'apprentissage d'une part et d'autre part par, l'injection des règles floues qui clarifient la signification des paramètres du réseau et facilite leur initialisation, ce qui représente un gain de temps de calcul considérable pour leur identification.

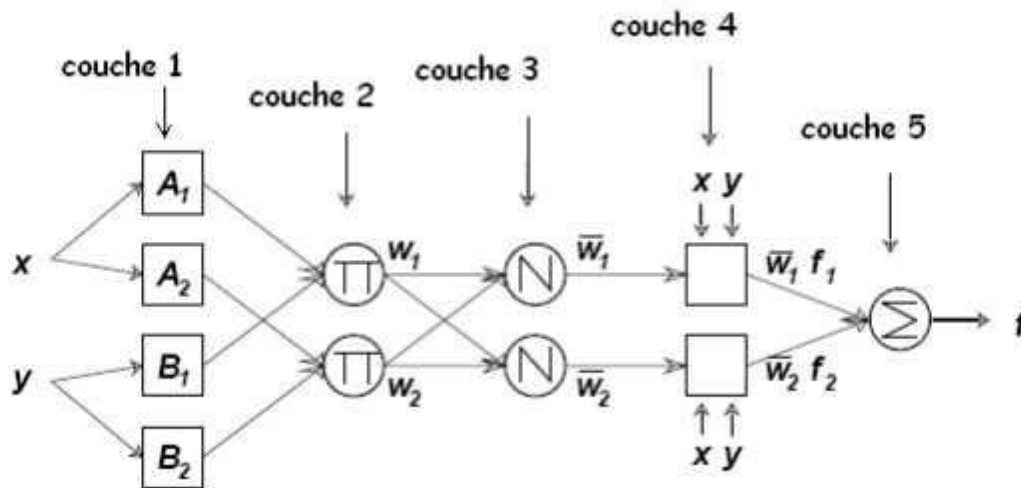
Un système d'inférence adaptatif neuro-flou ANFIS (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System) est un modèle qui consiste à utiliser un réseau neurone de type MLP à 5 couches pour lequel chaque couche correspond à la réalisation d'une étape d'un système d'inférence floue de type Takagi Sugeno. Pour la simplicité, nous supposons que le système d'inférence flou à deux entrées  $x$  et  $y$ , et à comme une sortie  $f$ . Supposant que la base de règle contient deux règles floues de type Takagi-Sugeno (Djokhrab et al. 2015).

$$\text{Règle1 : SI } x \text{ est } A_1 \text{ et } y \text{ est } B_1 \text{ ALORS } f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (5.10)$$

$$\text{Règle2 : SI } x \text{ est } A_2 \text{ et } y \text{ est } B_2 \text{ ALORS } f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (5.11)$$

L'ANFIS à une architecture posée par cinq couches comme représenté sur la figure 5.14.





**Figure 5.14** - Architecture de l'ANFIS (Djokhrab et al. 2015)

Une architecture classique peut être décrite de la manière suivante :

1- La première couche d'une architecture de type ANFIS comporte autant de neurones qu'il y'a de sous-ensembles flous dans le système d'inférence représenté. Chaque neurone calcule le degré de vérité d'un sous ensemble flou particulier par sa fonction de transfert. La seule restriction sur le choix de cette fonction concerne sa dérivabilité. En retrouve dans la littérature, l'utilisation, de fonctions gaussiennes et les paramètres modifiables sont le centre et la pente de la gaussienne (variance). La fonction d'activation des neurones  $i$  de la première couche :

$$f_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (5.12)$$

Tel que  $x$  est l'entrée au neurone  $i$ , et  $A_i$  est un sous ensemble flou correspondant au variable  $x$ . En d'autres termes,  $f_i^1$  est la fonction d'appartenance du  $A_i$  et il indique le degré auquel donné  $x$  satisfait le quantifier  $A_i$ . Nous choisissons  $\mu_{A_i}(x)$  pour être en forme de (Gaussien, triangle, trapézoïdal) avec le maximum égal à 1 et le minimum égal à 0, tel que les fonctions généralisées de ces formes sont :

$$\text{Triangle : } \mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (5.13)$$

$$\text{Trapézoïdale : } \mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (5.14)$$

$$\text{Gaussienne : } \mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{\sigma^2}\right) \quad (5.15)$$

Où  $\{a, b, c, \sigma\}$  est l'ensemble des paramètres. Pendant que les valeurs de ces paramètres changent, les fonctions en forme précédente changent en conséquence, de ce fait présenter de diverses formes de fonction d'appartenance sur la variable linguistique  $A_i$ . Les paramètres dans cette couche désigné sous le nom des paramètres de fonction d'appartenance.

2- La deuxième couche cachée sert à calculer le degré d'activation des prémisses. Les neurones de cette couche représentent chacun la prémisse d'une règle. Ils reçoivent en entrée le degré de vérité des différents sous-ensembles flous composant cette prémisse et ont en charge le calcul de son propre degré de vérité. Les fonctions d'activation utilisées pour ces neurones dépendant des opérateurs présents dans les règles (ET ou OU). La fonction d'activation des neurones  $i$  de la première couche :

$$W_k = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_j}(y) \quad (5.16)$$

Où  $k$  : représente le nombre de règle,  $i$  : représente le nombre de partition de  $x$ , et  $j$  : le nombre de partition de  $y$ .

3- La troisième couche cachée normalisé de degré d'activation des règles. Chaque neurone dans cette couche est un neurone de cercle noté  $N$ . le  $i^{\text{ème}}$  neurone calcule le rapport entre  $i^{\text{ème}}$  poids de règles et la somme de toutes les poids des règles. Cette opération est appelée la normalisation des poids. L'ensemble des sorties de cette couche seront appelées les poids normalisés.

$$\overline{W}_k = \frac{W_k}{\sum W_i} \quad (5.17)$$

4- La quatrième couche cachée sert à déterminer les paramètres la partie conséquence des règles (p, q, r). La fonction de chaque neurone dans cette couche est la suivante :

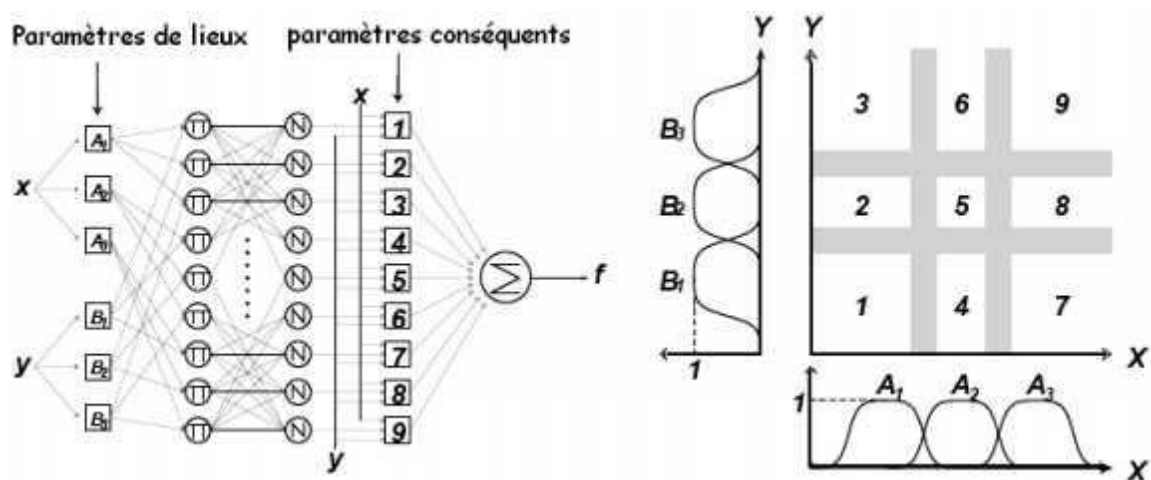
$$f_k^4 = \overline{W}_k \times f_k = \overline{W}_k \times (p_k x + q_k y + r_k) \quad (5.18)$$

Où  $W_k$  est la sortie de la troisième couche, et  $\{p_i, q_i, r_i\}$  est l'ensemble des paramètres. Ces  $q, r_{ii}$  paramètres désignent sous le nom les paramètres conséquents.

5- La couche de sortie contient un seul neurone dans cette couche, est un neurone de cercle noté S qui calcule la sortie globale comme addition de tous les signaux entrants, c'est-à-dire :

$$f^5 = \sum_k \overline{W}_k \times f_k^4 \quad (5.19)$$

La figure 5.15 représente un système ANFIS, à 2 entrées chaque entrée repartie en trois sous ensemble flou et 9 règles.



**Figure 5.15** - Exemple ANFIS à 2 entrées avec 9 règles (Djokhrab et al. 2015)

### 5.6.2 Apprentissage du modèle NF3

L'identification de la structure et la prédiction des paramètres sont les plus importants dans la tâche d'identification d'un système sur la modélisation par ANFIS. L'identification de la structure pris en considération la sélection de variables d'entrée pertinentes, le choix d'un type spécifique de système d'inférence floue, la détermination du nombre de règles floues, leurs antécédents et conséquents, et déterminer le type et le nombre de fonctions d'appartenance.

Dans cette étude, l'ensemble des données expérimentales de la littérature (composition du BAP/perméabilité aux chlorures) qui est représentée dans l'Annexe 4 pour la conception du modèle NF3 a été utilisé. La figure 5.16 présente l'architecture du modèle NF3 développé.

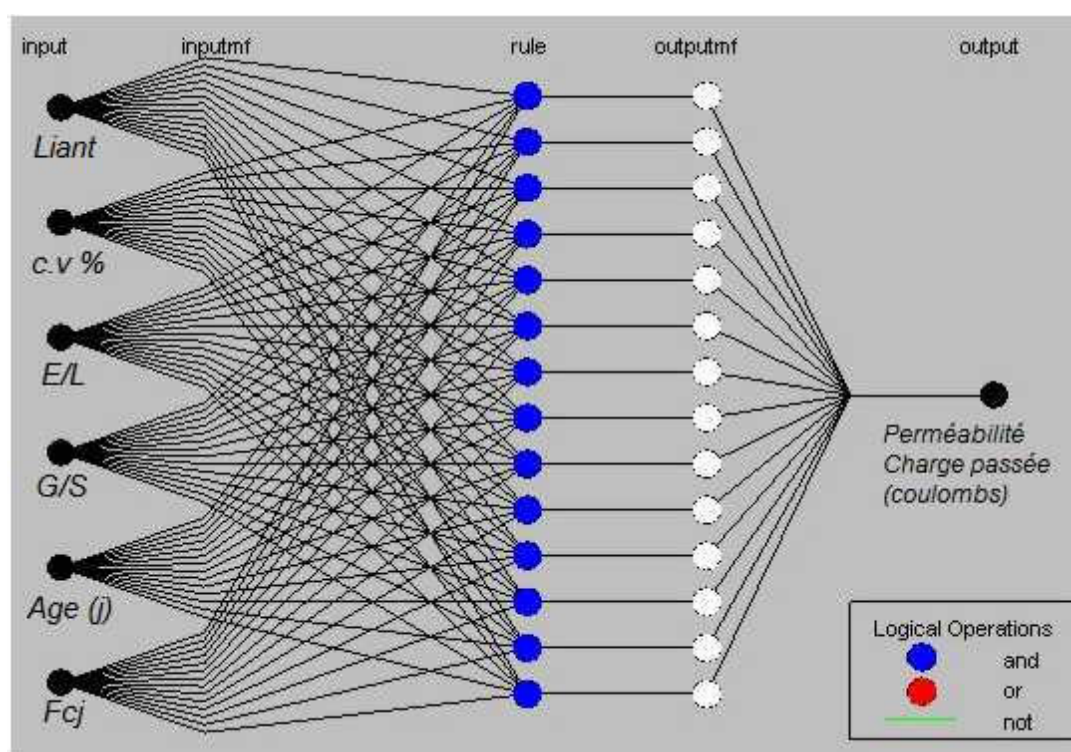
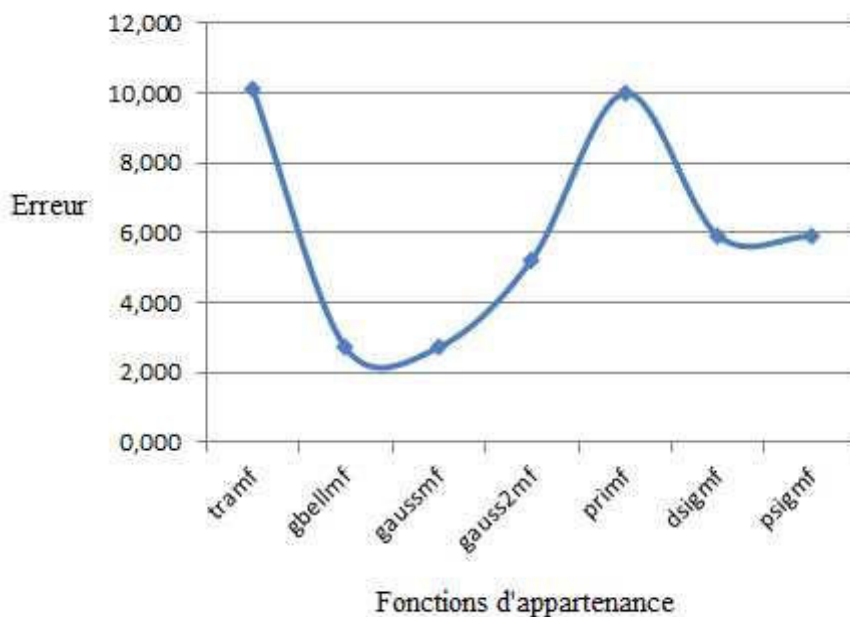


Figure 5.16 – Architecture du modèle NF3

Plusieurs fonctions d'appartenance ont été utilisées afin de trouver le modèle idéal pour la prévision de la perméabilité aux chlorures du BAP. La figure 5.17 présente les différentes erreurs trouvées lors de l'apprentissage du modèle ANFIS. On constate que la fonction d'appartenance « gbellmf » donne l'erreur minimale d'apprentissage. Les valeurs d'erreur sont présentées dans le tableau 5.9. Une erreur de 2.7 % pour l'apprentissage et 2.9% pour le test ont été trouvées.



**Figure 5.17** – Erreur d'apprentissage vs fonction d'appartenance

**Tableau. 5.8** Erreur d'apprentissage et de test du modèle NF selon la fonction d'appartenance

Fonction d'appartenance	Erreur d'apprentissage	Erreur du test
trimf	2,819	2,956
tramf	10,127	9,971
<b>gbellmf</b>	<b>2,709</b>	<b>2,938</b>
gaussmf	2,724	2,883
gauss2mf	5,239	5,709
primf	10,000	9,975
dsigmf	5,911	6,471
psigmf	5,911	6,471

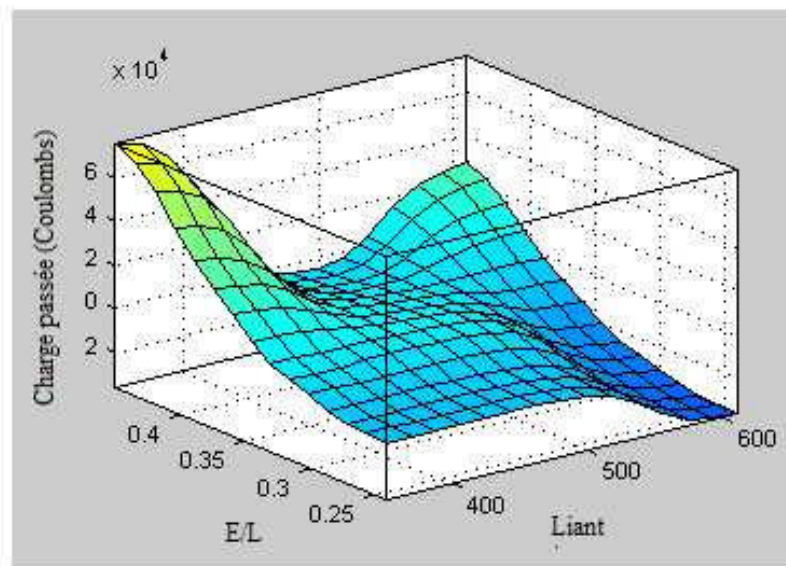
### 5.6.3 Etude paramétrique du modèle NF3

Ce modèle prend en considération des principaux paramètres de composition du béton seulement. Les caractéristiques (et le degré de protection) de la peau du béton sont fonction de très nombreux paramètres tel que :

- Paramètres de composition du béton (E/C, ajouts minéraux, ...)
- Techniques de mûrissement et de mise en place ;
- Fissuration due au retrait ;
- Fissuration due aux charges de service.

Les figures 5.18, 5.19 et 5.20 présentent la variation de la charge en coulombs en fonction du rapport E/L, la quantité du ciment, le dosage des cendres volantes et l'âge du béton ainsi que la résistance à la compression du béton. La perméabilité du béton et celle de la pâte de ciment hydraté est liée aux caractéristiques du réseau de pores capillaire.

Le rapport E/C, en raison de son influence sur la structure du réseau de pores capillaires, exerce une grande influence sur la perméabilité du béton (figure 5.18).



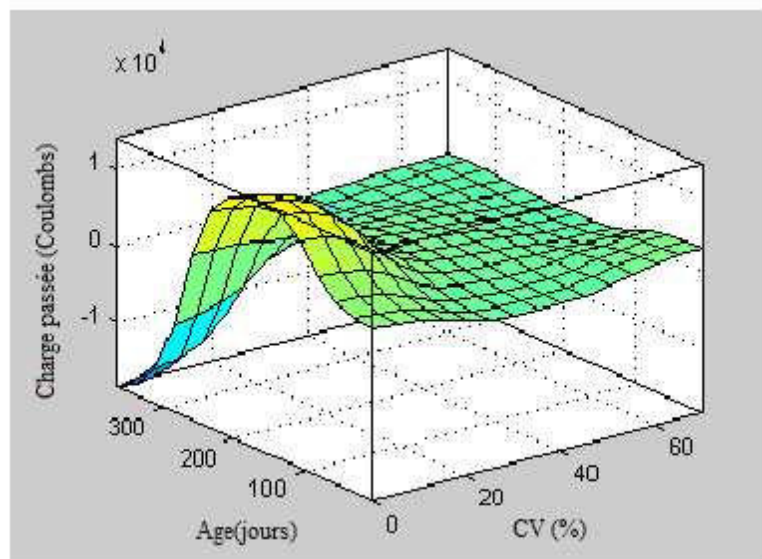
**Figure 5.18** – Effet de la perméabilité du béton en fonction du rapport E/L et la quantité du ciment.

Les cendres volantes utilisées en remplacement du ciment peuvent influencer la perméabilité du béton. C'est la structure de pores de la matrice cimentaire qui détermine sa porosité et sa perméabilité et donc sa sensibilité aux processus de transport et de diffusion. La perméabilité du béton est une fonction du rapport eau/ciment. Le remplacement du ciment par des cendres volantes fait croître ce rapport eau/ciment. Pour cette raison la structure poreuse initiale d'un ciment aux cendres volantes est initialement plus ouverte que celle d'un béton classique de référence, ce qui se traduit par de moindres performances mécaniques aux jeunes âges (figure



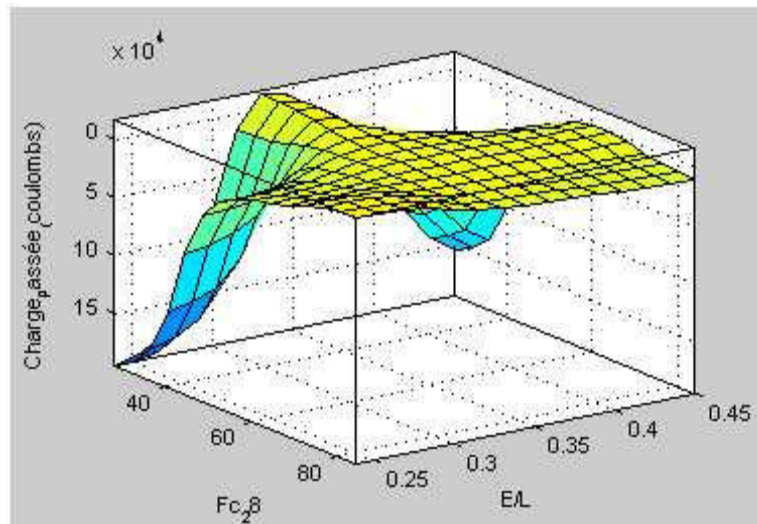
5.19). Lorsque les cendres volantes, entre 7 et 28 jours, initient leurs activités pouzzolaniques, la porosité de la matrice commence à décroître. Compte tenu du délai de réaction des cendres, c'est avec le temps que le béton aux cendres deviendra plus imperméable qu'un béton classique.

L'effet des cendres volantes est plus faible par rapport à l'effet du rapport E/C. Elles ont néanmoins un effet très significatif pour des taux de remplacement supérieurs à 20% (figure 5.19).



**Figure 5.19** – Effet de la perméabilité du béton en fonction du pourcentage du cendres volantes et l'âge du béton.

Une augmentation de la résistance à la compression provoque généralement une diminution de la charge totale passée (figure 5.20). Pour un niveau de résistance inférieur à 50 MPa, on constate que la charge totale est très variable, notamment en fonction du rapport E/L et de la teneur en cendres volantes.



**Figure 5.20** – Effet de la perméabilité du béton en fonction du rapport E/L et la résistance à la compression du béton à 28 jours.

## 5.7 Conclusion

La conception des modèles pour la prévision des propriétés du BAP contenant des cendres volantes a été présentée dans ce chapitre. Deux modèles RN et un modèle NF ont été développés. Le modèle RN1 est consacré pour l'estimation des différentes propriétés du BAP à l'état frais ainsi que la résistance à la compression à 28 jours. Le modèle RN2 étudié l'évolution de la résistance à la compression du BAP en fonction de l'âge. La perméabilité aux chlorures du BAP est évaluée par le modèle NF3.

Les deux modèles RN1 et RN2 ont été validés avec des résultats d'autres chercheurs et de bons résultats ont été obtenus.

Une fonction a été proposée pour prédire la résistance à la compression du BAP contenant des cendres volantes en fonction de l'âge on se basant sur les résultats de simulation du modèle RN2. Cette fonction est appropriée pour prévoir la résistance à la compressive du BAP jusqu'à 365 jours avec un pourcentage cendres volantes entre 0 % et 70 %. De plus, la fonction proposée a été validée par comparaison des résultats expérimentaux et ceux calculés avec d'autres modèles tels qu'ACI 209, CEB-FIP 1990 et de bons résultats ont été trouvés.



# *Chapitre 6:*

---

## VALIDATION EXPÉRIMENTALE DES MODÈLES DÉVELOPPÉS

---

## 6.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer la capacité des modèles développés à prédire les propriétés des bétons autoplaçants contenant des cendres volantes. On présente ici, une étape incontournable de tout travail de modélisation qui consiste en la confrontation des données de sortie de ces modèles avec des résultats expérimentaux :

- dans un premier temps un programme expérimental est réalisé dans le but d'obtenir des résultats expérimentaux sur les propriétés des BAP à l'état frais et à l'état durci à partir des essais réalisés sur plusieurs formulations de BAPs avec de divers rapports eau-liant ;
- dans un second temps, pour valider ce travail de modélisation, les différents résultats d'essais effectués au cours du programme expérimental sont comparées aux résultats numériques des modèles développés.

## 6.2 Programme expérimental

Un programme expérimental a été réalisé à l'Université de Sherbrooke pour mesurer les propriétés à l'état frais et à l'état durci du béton auto-plaçant aux cendres volantes.

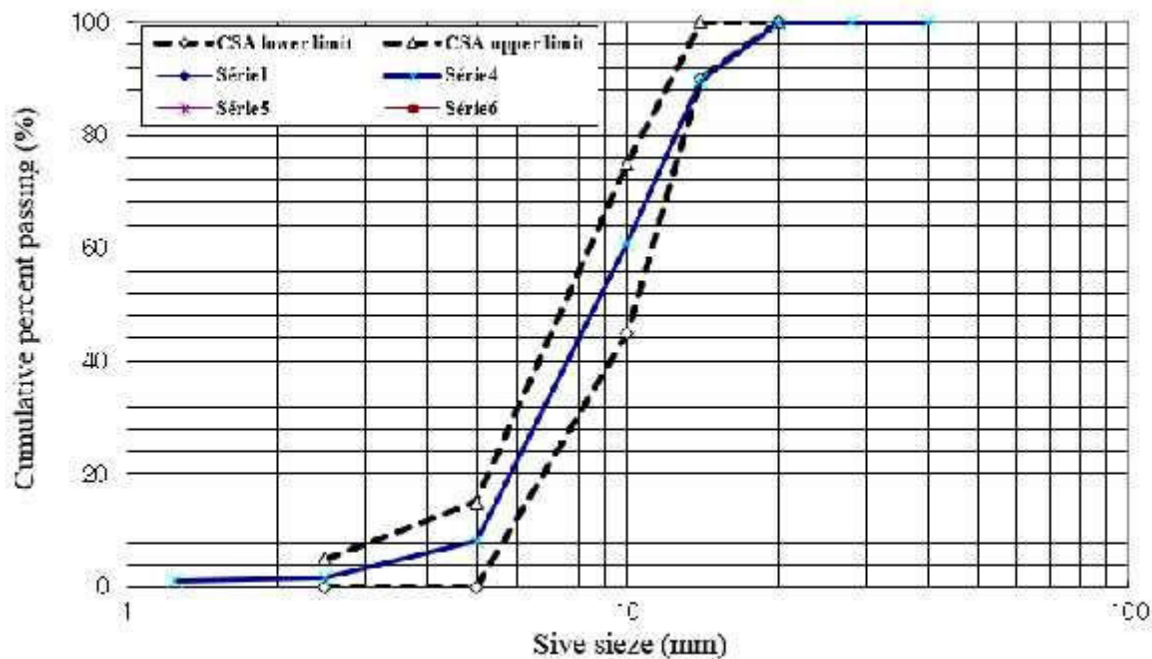
### 6.2.1 Caractéristiques des matériaux

Les différents matériaux utilisés dans ce programme expérimental sont cités comme suit :

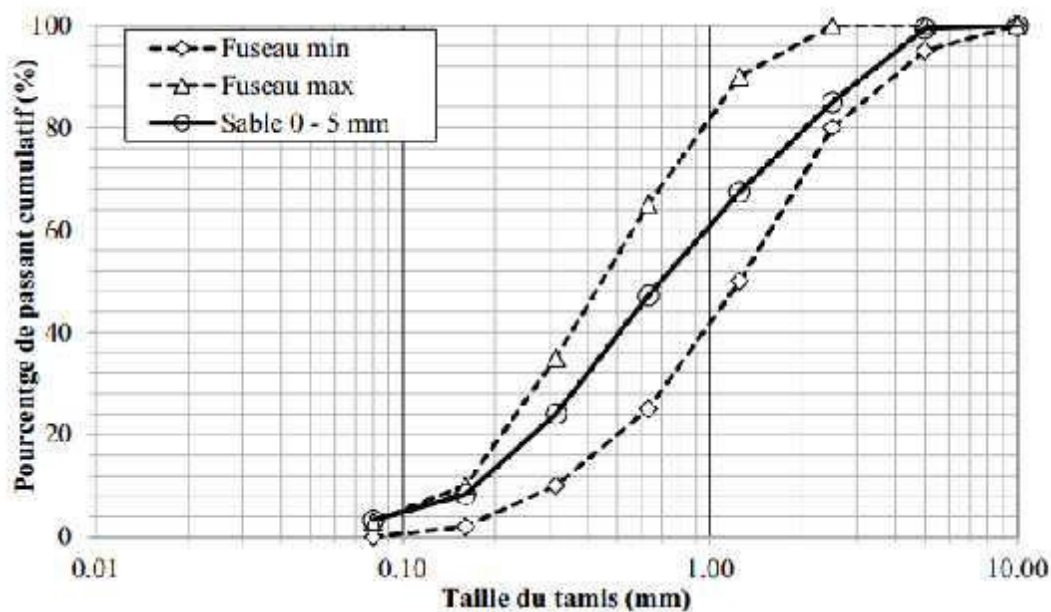
- Un ciment type 1 GU Holcim selon les performances et la spécification d'utilisation des ciments à usage générale (ASTM C 1157 et ASTM C 150) ;
- Des cendres volantes type F (silico-alumineuses) qui contiennent une quantité de la somme de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  supérieur à 70 % selon la norme ASTM C 618-94, et elles présentent des propriétés pouzzolaniques ;
- L'eau du robinet potable, exempte d'impuretés, maintenue à une température constante.
- Des gros granulats de 5-14 mm et du sable de 0-5 mm dont les propriétés physiques sont résumées dans le Tableau 6.1 et les courbes granulométriques sont présentées sur les figures 6.1 et 6.2 respectivement ;
- Un superplastifiant (PLASTOL 5000) a été utilisé, c'est un superplastifiant prêt à l'emploi à base de polycarboxylate à haut degré de réduction d'eau pour le béton. Ce superplastifiant est un adjuvant de type F, il est entièrement conforme aux exigences des normes ASTM C 494 - adjuvants de type F, AASHTO M 194 - adjuvants de type F et ASTM C 1017, adjuvants de type I.

**Tableau 6.1** – Caractéristiques physiques du sable naturel et des granulats utilisés

Caractéristiques	Sable naturel (0-5 mm)	Gros granulats (5-14 mm)
Densité SSS	2,67	2,73
Densité brute	2,64	2,72
Absorption	0,93	0,52



**Figure 6.1** – Courbes granulométriques des granulats utilisés



**Figure 6.2** – Courbes granulométriques du sable utilisé

## 6.2.2 Procédures de malaxage du BAP

Tous les mélanges du béton autoplaçant ont été confectionnés dans un malaxeur à axe de rotation vertical (figure 6.3). La capacité du malaxeur est de 110 litre. Des gâchées de 60 litres ont été confectionnées. Les mélanges ont été malaxés selon les séquences suivantes :

- Introduction du sable dans le malaxeur pendant une durée de 30 secondes ;
- Correction de la quantité du sable utilisé (selon l'humidité du sable) ;
- Introduction des granulats de 5-14 mm et malaxage pendant 2 minutes ;
- Arrêt du malaxage pendant 1 minute ;
- Introduction de la moitié de la quantité d'eau dans le malaxeur et malaxage pendant 1 minute ;
- Introduction du ciment et du cendres volante et malaxage pendant 2.5 minutes ;
- Introduction du reste d'eau qui contient le super-plastifiant et malaxage pendant 2.5 minutes.

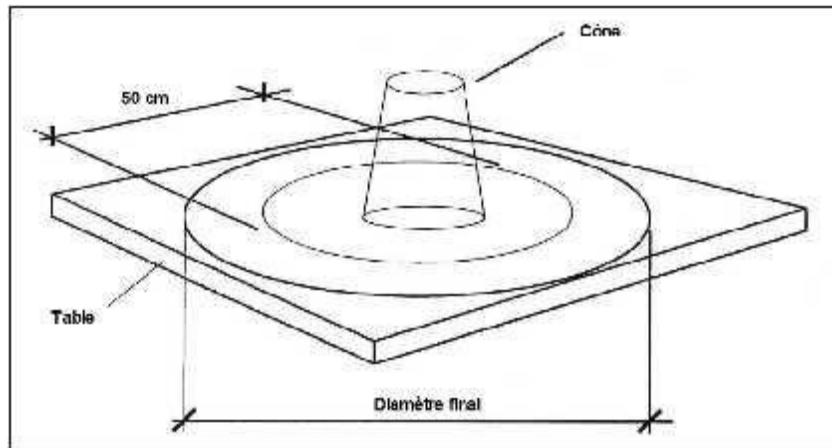


Figure 6.3 – Malaxeur utilisé

### 6.2.2.1 Essais à l'état frais du BAP

Pratiquement, il est possible de caractériser les propriétés rhéologiques d'un béton autoplaçant au moyen du cône servant à la mesure d'étalement (slump flow) ainsi qu'au moyen de la boîte en L ou de l'entonnoir en V (essai V-Funnel). On s'est intéressé principalement aux essais à l'état frais :

- **L'essai d'étalement (Slump Flow test)** : cet essai est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la consistance d'un béton. Généralement, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre (figure 6.4).



**Figure 6.4** – Essai d'étalement au cône (slump flow test)

- **Essai des anneaux japonais (J-ring test)** : pour mesurer la mobilité en milieu confiné, on utilise à nouveau le cône d'Abrams mais renversé, il permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables. Le cône est placé sur une plaque plane, entourée par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm (figure 6.5). Une fois le cône rempli, on soulève, ce qui laisse écouler le béton à travers les barres HA, puis on mesure en fin d'essai le diamètre de la galette obtenue. Un second paramètre peut être tiré du même essai : le temps mis par le béton pour dépasser le diamètre de 500 mm T50 en secondes.



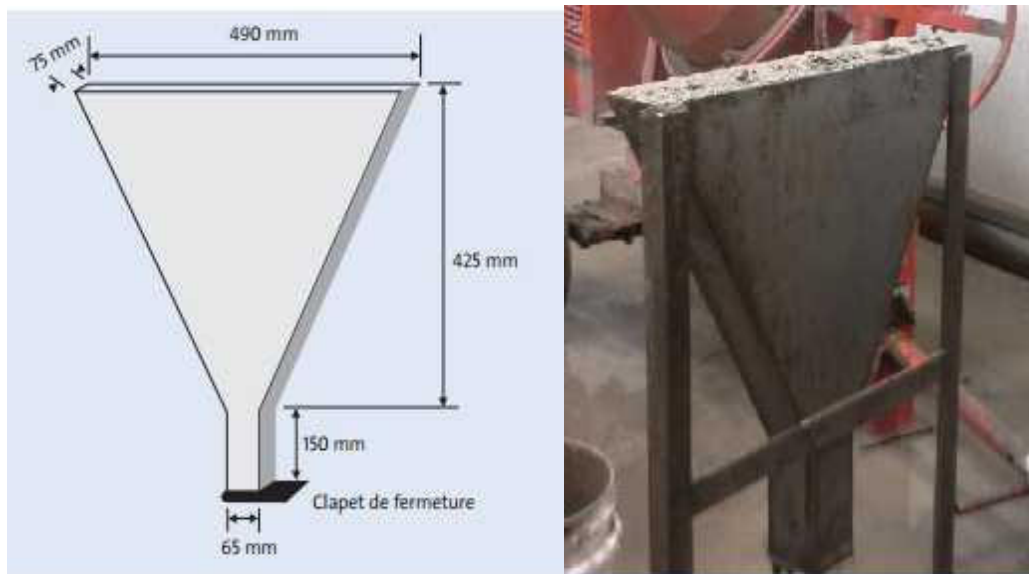
**Figure 6.5** – Essai des anneaux japonais (J-ring test)

- **Essai de la boîte en L (L-box test) :** cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné (la ségrégation dynamique). La partie verticale du L- Box est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres  $\varnothing$  14) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres). On a utilisé dans ce cas 03 barres de  $\varnothing$  14 (figure 6.6).



**Figure 6.6** – Essai de la boîte en L (L-box test)

- **Essai d'entonnoir en "V" (V-funnel) :** Un entonnoir de dimensions définies est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert (figure 6.7). On mesure le temps que met le béton à sortir de l'entonnoir jusqu'à ce que cet entonnoir soit entièrement vide. Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 8 et 14 secondes, caractérise la viscosité du béton. Si le béton s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible.



**Figure 6.7** – Essai de l’entonnoir en “V” (V-funnel test)

### 6.2.2.2 Essais à l’état durci du BAP

Pour les essais à l’état durci du béton autoplaçant, on a mesuré, à l’aide d’une presse de 3000 kN (figure 6.8), la résistance à la compression à 3, 7, 28, 56 et 91 jours des cylindres de 100X200 mm<sup>2</sup> ont été utilisés.



**Figure 6.8** – Presse utilisée pour l’essai de compression

Les éprouvettes cylindriques de dimension 100x200 mm<sup>2</sup> ont été confectionnés. Elles ont été démoulées après 24 heures et conservées dans une salle humide de 100% d’humidité relative et une température de 20±3°C jusqu’à le jour d’essais. A cet effet, 150 cylindres de 100x200 mm<sup>2</sup> de dix formulations ont été confectionnés.

### 6.2.3 Composition des BAP fabriqués

On s'est intéressé principalement à la formulation du BAP dans lesquels on substitue partiellement le ciment par des quantités de cendres volantes. Différents pourcentages de cendres volantes ont été utilisés (de 0% à 60%). Les bétons confectionnés avec différents rapports « Eau/Liant ». Les différentes formulations des BAPs utilisées dans ce programme expérimental sont présentées dans le tableau 6.2.

**Tableau 6.2 – Différents constituants des bétons autoplaçants construits**

1	E/L	Liant	Ciment	Cendres volantes	Eau	Sable	Graviers	Superplastifiant	
		(Kg/m3)		(%)	(Kg/m3)				
<b>Mix 01</b>	0,26	607	455	151,75	25	159,93	785,70	873,00	10,20
<b>Mix 02</b>	0,32	550	495	55,00	10	177,62	885,92	784,00	4,64
<b>Mix 03</b>	0,32	550	413	137,50	25	177,62	847,46	736,92	3,79
<b>Mix 04</b>	0,32	430	258	172,00	40	138,18	933,00	933,00	2,67
<b>Mix 05</b>	0,34	430	215	215,00	50	146,78	870,30	967,00	2,70
<b>Mix 06</b>	0,34	500	200	300,00	60	171,19	850,00	850,00	2,80
<b>Mix 07</b>	0,40	550	468	82,50	15	221,62	734,22	815,80	2,01
<b>Mix 08</b>	0,43	500	350	150,00	30	216,19	757,26	841,40	2,01
<b>Mix 09</b>	0,44	550	550	0,00	0	238,12	718,47	798,30	1,39
<b>Mix 10</b>	0,45	450	360	90,00	20	198,76	803,79	893,10	1,17

Des caractéristiques intrinsèques pour la formulation des différents BAP ont été prises en considération. Afin d'éviter tous type de blocage ou de limitation d'écoulement, un volume de pate élevé a été choisis pour tous les mélanges. Un superplastifiant de type polycarboxylate à haut degré de réduction d'eau a été choisi. Il interagisse avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau.

Les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée. Il est indispensable de limiter le volume des granulats utilisés. Les granulats influent considérablement sur la qualité du BAP. Ainsi, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à un bon étalement et une résistance souhaitée. De faibles rapports G/S ont été utilisés de l'ordre de 0,86, 0,88, 1 et



1,11. Un diamètre maximal des granulats est pris pour 14 mm pour éviter tout risque de blocage pour un confinement donné.

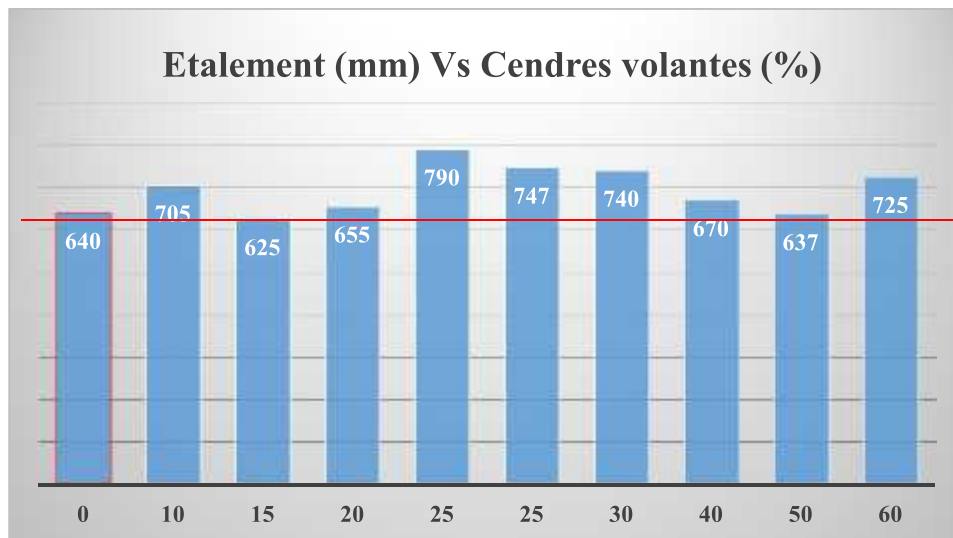
### 6.3 Présentation des résultats

Les résultats des essais à l'état frais des BAP formulés sont présentés dans le tableau 6.3.

**Tableau 6.3 – Résultats des essais à l'état frais sur BAP**

Désignation	E/L	T50 (sec)	Étalement (mm)	J-Ring (sec)	J-Ring (mm)	V-funnel (sec)	L-box
Mix 01	0,26	5,80	790	6,00	770	15,00	0,60
Mix 02	0,32	1,97	705	3,20	660	9,16	0,71
Mix 03	0,32	2,32	747	2,80	670	10,19	0,86
Mix 04	0,32	1,35	670	3,12	625	10,47	0,71
Mix 05	0,34	2,80	637	4,20	585	14,50	0,62
Mix 06	0,34	1,47	725	1,90	655	5,48	0,77
Mix 07	0,40	1,25	625	3,03	580	9,22	0,59
Mix 08	0,43	4,28	740	4,82	717	3,05	0,97
Mix 09	0,44	1,60	640	1,95	545	2,62	0,82
Mix 10	0,45	1,35	655	1,59	577	3,41	0,58

D'après les résultats à l'état frais, la fluidité des BAP contenant les cendres volantes est généralement meilleure par rapport aux BAP témoins (sans ajouts). Les valeurs d'étalement sont comprises entre 637 et 790 mm (Figure 6.9). Les cendres volantes peuvent améliorer la fluidité des systèmes cimentaire grâce à leur forme sphérique qui permet de réduire les frottements entre les grains de ciment (effet de billes).



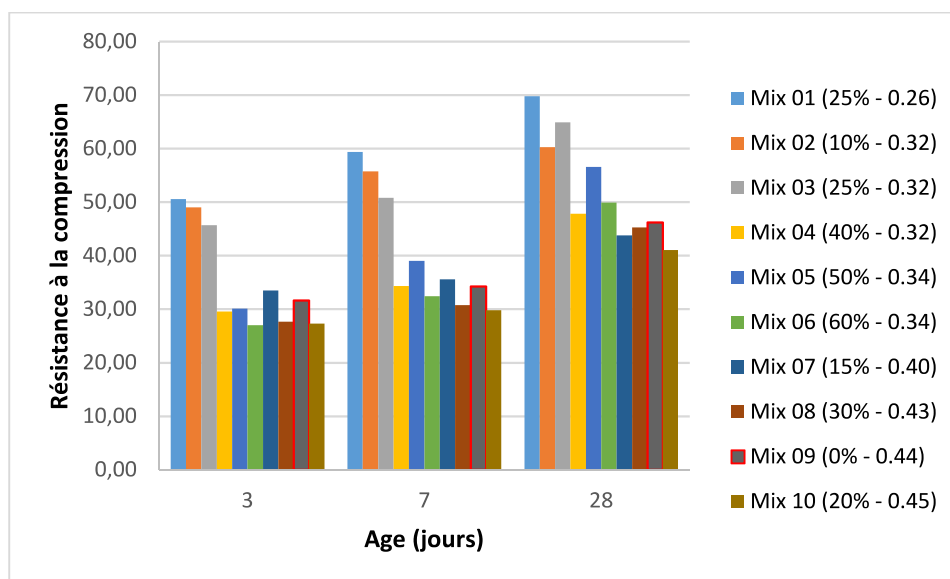
**Figure 6.9** – Etalement du BAP en fonction du pourcentage du cendres volantes

Les résultats des essais de compression à 3, 7 et 28 jours des BAP réalisées sont présentés dans le tableau 6.4. Chaque mesure de la résistance à la compression représente la valeur moyenne de trois valeurs.

L'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge est présentée à la figure 6.10. On constate en général que la résistance à la compression diminue lorsque le rapport E/L augmente.

**Tableau 6.4** – Résultats de résistance à la compression

Désignation	E/L	Résistance à la compression (MPa)		
		3 jours	7 jours	28 jours
Mix 01	0,26	50,53	59,38	69,76
Mix 02	0,32	48,99	55,76	60,28
Mix 03	0,32	45,66	50,77	64,91
Mix 04	0,32	29,56	34,32	49,90
Mix 05	0,34	30,10	39,02	56,56
Mix 06	0,34	27,00	32,43	47,83
Mix 07	0,40	33,49	26,01	43,79
Mix 08	0,43	27,67	30,75	45,28
Mix 09	0,44	31,65	34,23	46,23
Mix 10	0,45	27,28	29,82	41,03



**Figure 6.10** – Évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de l'âge

D'après la figure 10, on peut constater que les mélanges de Mix 01 à Mix 05 comme BAP à haute performance dépassent les 50 MPa à 28 jours.

## 6.4 Validation des modèles RN développés

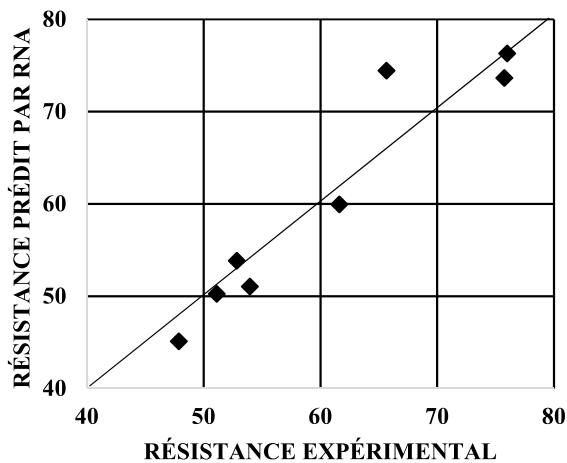
La validité d'un modèle RNA entraîné avec succès est déterminée par sa capacité à généraliser ses prédictions au-delà de sa base de données d'apprentissage et de reste valable pour de nouvelles données inconnues (expérimentaux ou de la littérature) au sein de l'intervalle des paramètres d'entrée utilisés dans l'apprentissage. A cet effet, une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par les trois modèles RN (RN1, RN2 et NF3) développés a été faite afin d'évaluer leur performance de prédiction. La validation consiste à minimiser les écarts entre les résultats expérimentaux et les résultats des modèles.

### 6.4.1 Modèle RN1 de prédiction des propriétés à l'état frais

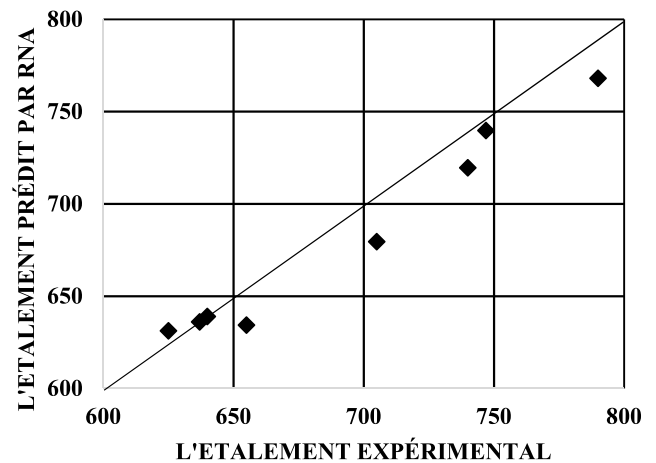
La comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par le modèle RN1 de prédiction des quatre propriétés (étalement au cône, rapport L-box, V-funnel, et résistance à la compression) est présenté sur la figure 6.11. On constate d'après cette figure une bonne corrélation entre les résultats prédit par le modèle RN1 et les résultats expérimentaux. La comparaison est aussi faite en termes d'erreurs absolues qui ont été estimées à 1.83 %, 3.22 %, 16.59 % et 4.27 % respectivement pour les propriétés d'étalement, les rapports L-box, le temps de V-funnel et les résistances à la compression (tableau 6.5). On constate que les résultats sont satisfaisants pour les BAP ordinaires et à haute performance (résistance supérieure à 50 MPa).

**Tableau 6.5 – Erreurs entre les résultats expérimentaux et prédits**

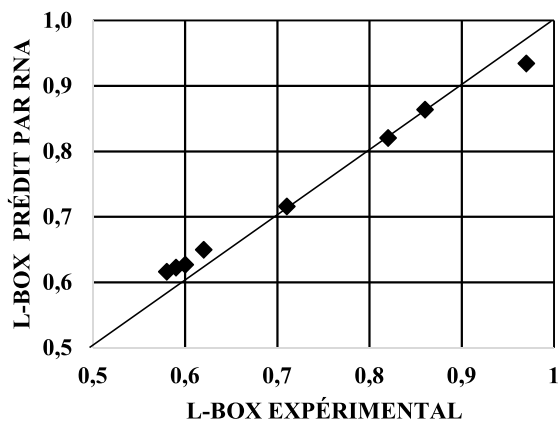
D (mm)			L <sub>box</sub>			V <sub>funnel</sub> (sec)			Fc28 (MPa)		
Exp	RN1	E (%)	Exp	RN1	E (%)	Exp	RN1	E (%)	Exp	RN1	E (%)
790	768	2,79	0,60	0,63	4,41	15,00	15,27	1,79	75,99	76,29	0,40
705	679	3,63	0,71	0,72	0,82	9,16	8,83	3,58	65,66	74,42	13,33
747	740	0,98	0,86	0,86	0,41	10,19	9,46	7,12	75,76	73,61	2,83
637	636	0,16	0,62	0,65	4,76	14,50	14,31	1,34	61,61	59,91	2,76
625	631	0,97	0,59	0,62	5,43	9,22	8,34	9,57	51,11	50,23	1,72
740	720	2,77	0,97	0,93	3,68	3,05	3,77	23,45	52,85	53,83	1,86
640	639	0,17	0,82	0,82	0,05	2,62	4,50	71,67	53,96	51,02	5,44
655	634	3,17	0,58	0,62	6,21	3,41	3,90	14,23	47,89	45,09	5,85
<b>E-moy (%)</b>		<b>1,83</b>	<b>E-moy (%)</b>		<b>3,22</b>	<b>E-moy (%)</b>		<b>16,59</b>	<b>E-moy (%)</b>		<b>4,27</b>



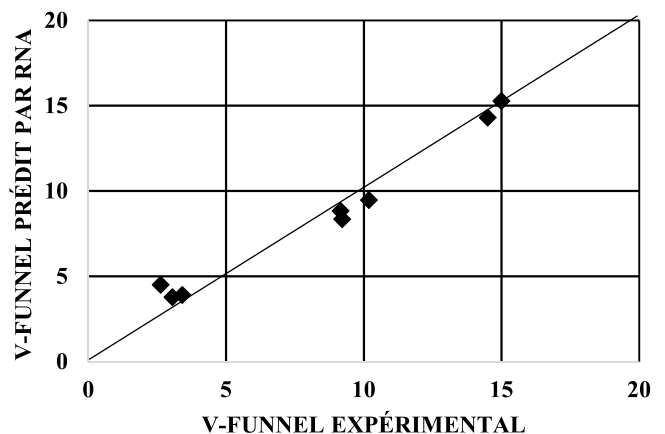
(a)



(b)



(c)



(d)

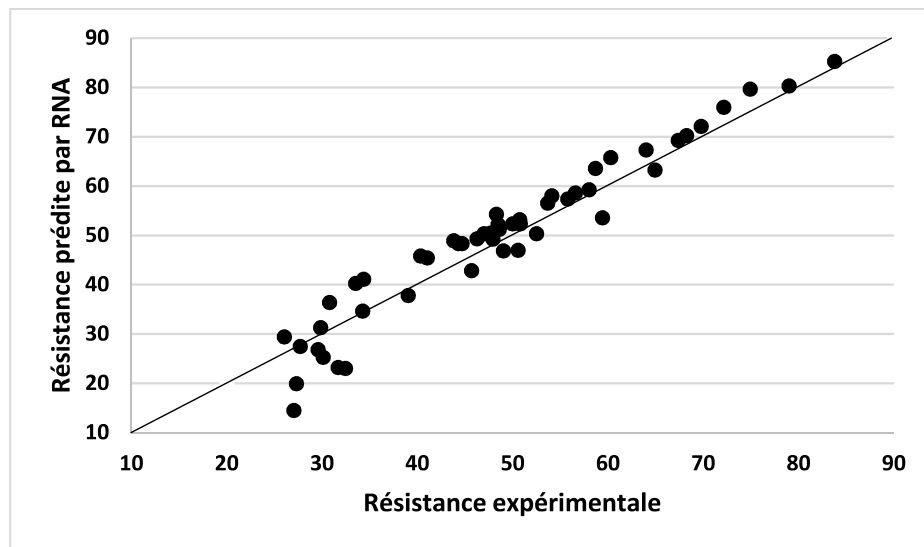
**Figure 6.11 – Corrélation entre les résultats prédits par le modèle RN1 et les résultats expérimentaux : (a) résistance à la compression à 28j (MPa), (b) l'étalement (mm), (c) rapport L-box et (d) V-funnel (sec)**

### 6.4.2 Modèle RN2 de prédiction de la résistance en fonction de l'âge

Le deuxième modèle RN est consacré pour l'étude de l'évolution de la résistance à la compression du BAP en fonction de l'âge allant jusqu'à 91 jours. Ce modèle est validé par les essais expérimentaux effectués dans le laboratoire et de bonne corrélation a été obtenue avec un coefficient de corrélation de 0,94 (tableau 6.6). Une erreur relative absolue de 09 % a été constatée pour les résultats de la résistance à la compression à 3, 7, 28 et 56 jours. On constate aussi, que l'erreur à 3 et 7 jours est de l'ordre de 15%, et à 56 et 91 jours est de 5% seulement.

**Tableau 6.6 – Erreurs entre les résultats expérimentaux et prédits**

Mix N°	Résistance à la compression														
	03 jours			07 jours			28 jours			56 jours			91 jours		
	Exp	RNA	E(%)	Exp	RNA	E(%)	Exp	RNA	E(%)	Exp	RNA	E(%)	Exp	RNA	E(%)
<b>Mix 01</b>	50,53	47,00	6,99	59,38	53,60	9,73	69,76	72,15	3,43	78,99	80,32	1,68	83,74	85,29	1,85
<b>Mix 02</b>	48,99	46,85	4,37	55,76	57,42	2,98	60,28	65,77	9,11	67,35	69,25	2,82	74,90	79,68	6,38
<b>Mix 03</b>	45,66	42,88	6,09	50,77	52,38	3,17	64,91	63,29	2,50	68,21	70,25	2,99	72,11	75,98	5,37
<b>Mix 04</b>	29,56	26,84	9,20	34,32	41,12	19,81	47,89	49,29	2,92	52,49	50,36	4,06	58,67	63,58	8,37
<b>Mix 05</b>	30,10	25,34	15,81	39,02	37,86	2,97	56,56	58,64	3,68	54,07	58,07	7,40	63,96	67,36	5,32
<b>Mix 06</b>	27,00	14,54	46,15	32,43	23,06	28,89	44,67	48,36	8,26	48,56	51,25	5,54	57,98	59,25	2,19
<b>Mix 07</b>	26,01	29,45	13,22	33,49	40,30	20,33	43,79	48,94	11,76	46,96	50,36	7,24	48,43	52,22	7,83
<b>Mix 08</b>	27,67	27,53	0,51	30,75	36,42	18,44	40,33	45,81	13,59	44,28	48,39	9,28	47,66	50,49	5,94
<b>Mix 09</b>	31,65	23,24	26,57	34,23	34,69	1,34	46,23	49,36	6,77	49,97	52,36	4,78	53,66	56,58	5,44
<b>Mix 10</b>	27,28	19,97	26,80	29,82	31,30	4,96	41,03	45,45	10,77	48,26	54,29	12,49	50,72	53,19	4,87
	<b>E-moy (%)</b>		<b>15,57</b>	<b>E-moy (%)</b>		<b>11,26</b>	<b>E-moy (%)</b>		<b>7,278</b>	<b>E-moy (%)</b>		<b>5,829</b>	<b>E-moy (%)</b>		<b>5,355</b>
<b>Erreur Moyenne Total = 09,06 %</b>															

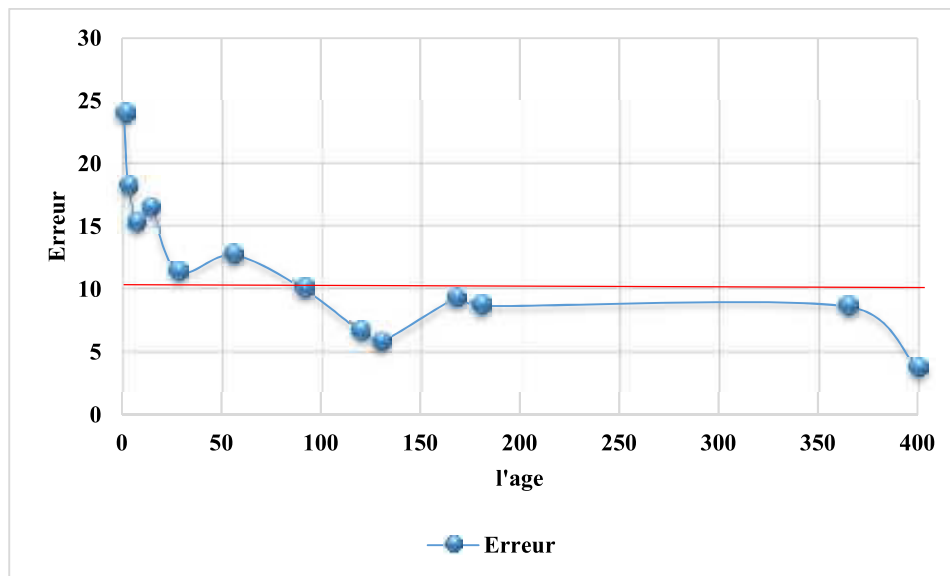


**Figure 6.12** – Corrélation entre les résultats prédits par le modèle RN2 et les résultats expérimentaux

D'une part, la formation progressive des C-S-H augmente les contacts entre les grains et diminue ainsi la porosité capillaire. Les propriétés mécaniques augmentent alors au fur et à mesure de la formation de ces C-S-H. Les ajouts cimentaires comme les cendres volantes, peuvent améliorer les résistances des bétons à moyen et à long terme. D'autre part, la résistance à la compression du béton atteinte 75-80% à 28 jours, 85 - 90% à 56 et 90 jours. La résistance du béton dépend surtout du rapport eau/liant, du degré d'hydratation, des conditions de cure, de la qualité du liant, du type de granulats et du type des cendres volantes utilisées et leurs propriétés. Afin de montrer la précision du modèle de prédiction de la résistance à la compression en fonction de l'âge, la figure 6.13 présente la variation de l'erreur de prédiction par rapport à l'âge du béton. Selon cette figure, on constate que pour le modèle de prédiction de la résistance au jeune âge, un pourcentage d'erreur important autour de 20% est obtenu. Par contre, après 28 jours, l'erreur diminue en générale moins de 10 % jusqu'à 4%. D'autre part, l'incorporation des cendres volantes dans les bétons diminue la résistance au jeune âge. L'évolution de la résistance au jeune âge dépend de plusieurs facteurs, la réaction pouzzolanique devient évidente dans le béton à partir de 3 à 14 jours après le contact du mélange avec l'eau ; c'est-à-dire lorsque la plupart des  $C_3S$  contenu dans le ciment Portland ordinaire sont réagis. L'activité pouzzolanique dans les cendres volantes est caractérisée par deux facteurs principaux :

- la quantité totale de la chaux nécessaire pour que la pouzzolane la fixe;
- le temps et la vitesse de fixation de la chaux.

Les propriétés des cendres volantes telles que la surface spécifique et les propriétés du mélange tel que le rapport E/L et la température influent sur le temps de fixation de la chaux.



**Figure 6.13** – L'erreur prédite en fonction de l'âge (jours)

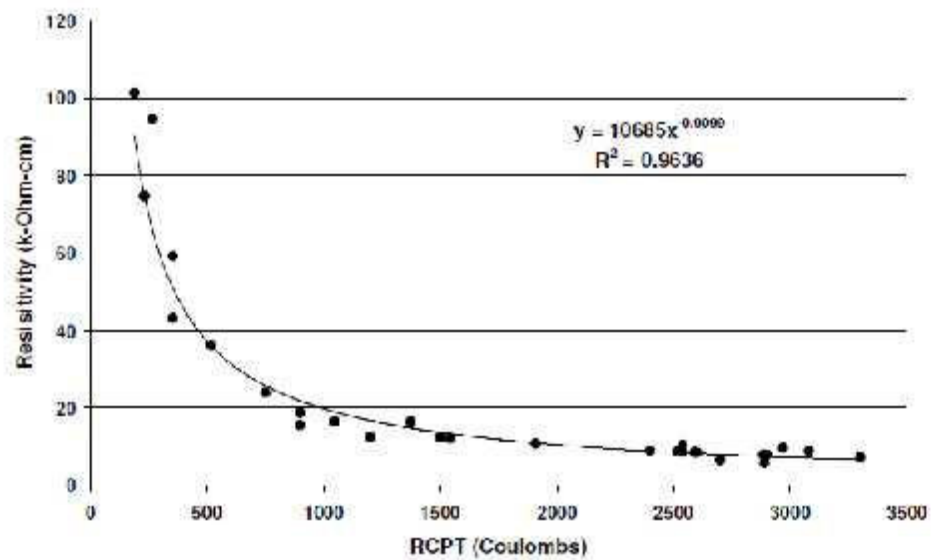
#### 6.4.3 Validation du modèle NF3 de prédiction de la perméabilité aux chlorures

Dans cette partie, un modèle NF3 pour la prévision de la perméabilité aux ions chlore est construit en combinant deux techniques d'intelligence artificielles, les RNs la logique floue (LF). Les entrées de ce modèle de perméabilité aux ions chlorures sont le rapport eau/liant, la quantité du liant, la résistance à la compression et l'âge du béton. La sortie du modèle c'est la charge passée mesurée par l'essai Rapide Chloride Permeability Test (RCPT). Cet essai consiste à mesurer l'intensité d'un courant électrique, engendré par une différence de potentiel de 60 Volt et maintenue constante pendant 6 heures, à travers une éprouvette cylindrique de béton préalablement saturée dans une solution d'eau.

La validation de ce modèle est faite à base des résultats obtenus de l'essai de conductivité ou de résistivité (figure 6.14). Une bonne corrélation entre les valeurs de l'essai RCPT et de l'essai de résistivité a été trouvée comme le montre la figure 6.15. Ceci a déjà été confirmé par plusieurs chercheurs.



**Figure 6.14** – L'appareil de l'essai de résistivité



**Figure 6.15** – Corrélation entre l'essai RCPT et de l'essai de résistivité

A partir de cette relation entre les deux essais, les résultats expérimentaux de la conductivité électrique du béton sont convertis vers des charges en coulombs et par la suite sont comparés avec les résultats du modèle NF3 développé. Le tableau 6.7 présente les résultats de cette comparaison.



**Tableau 6.7** – Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits

Liant (Kg/m <sup>3</sup> )	Age	Cendres %	E/L	Fc (MPa)	Charge (Coulombs)		Erreur %
					Expérimentale	NF	
430	3	40	0,32	27,67	6771,58	6817,28	0,67
500	3	60	0,34	30,10	7031,63	6716,49	4,48
550	7	10	0,32	29,82	3990,48	3978,78	0,29
550	7	25	0,32	34,23	2976,89	2963,18	0,46
607	28	25	0,26	69,76	2875,86	2847,81	0,98
550	28	10	0,32	60,28	2635,98	2673,17	1,41
550	28	25	0,32	64,91	1149,12	1210,05	5,30
430	28	50	0,34	56,56	1224,16	903,47	26,20
550	28	15	0,40	43,79	1814,36	1852,75	2,12
500	28	30	0,43	45,28	537,77	606,45	12,77
607	56	25	0,26	81,99	528,00	534,37	1,21
450	56	20	0,45	46,85	1100,33	1087,90	1,13
550	56	0	0,44	48,26	4052,29	4036,01	0,40
						<b>Erreur moyenne (%)</b>	<b>4,42</b>

On constat que de bons résultats ont été trouvés avec un pourcentage d'erreur moyenne de 4.42%, les résultats obtenues montre la capacité des neurones-floues d'apprentissage à partir de l'expérience avec une bonne précision.

## 6.5 Conclusion

Un programme expérimental a été réalisé dans le but d'obtenir des résultats expérimentaux sur les propriétés des BAP à l'état frais et à l'état durci à partir des essais réalisés sur plusieurs formulations de BAP avec de divers rapports E/L et différents pourcentages de cendres volantes. Les différents résultats des essais effectués au cours de ce programme expérimental sont comparés aux résultats numériques des modèles RN développés.

Les tests de validation ont donné de bons résultats, ce qui montre la pertinence de ses modèles pour prévoir efficacement, les propriétés à l'état frais, la résistance à la compression et la perméabilité aux chlorures avec les précisions moyennes de 6%, 9% et 4% respectivement. Ceci montre clairement la capacité des modèles développés à prédire les propriétés des BAP contenant des cendres volantes.

---

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

---

## 7.1 Conclusions générales

Dans ce travail, trois modèles ont été développés afin de prédire les propriétés du BAP à l'état frais et à l'état durci ainsi que la perméabilité du béton aux ions chlorés. Les modèles développés sont cités comme suit :

- RN1 pour la prévision des propriétés du BAP à l'état frais (l'étalement, le temps d'essai d'entonnoir, le rapport L-Box) et la résistance à la compression à 28 jours ;
- RN2 pour l'étude de l'évolution de la résistance du BAP en fonction de l'âge ;
- NF3 pour la prévision de la perméabilité du BAP aux ions chlorés.

En premier lieu, une méthodologie a été suivie pour la sélection et l'organisation des données de recherches existantes sur les bétons autoplaçants contenant des cendres volantes. Après la présentation des procédures de collecte de données expérimentales pour l'apprentissage des modèles des réseaux de neurones à développer, l'organisation et la normalisation de ces données, un programme numérique a été développé sous le MATLAB pour la numérisation de ces données.

En second lieu, l'application de l'approche réseaux de neurones pour prévoir les propriétés du BAP a permis de développer des modèles avec une précision tout à fait satisfaisante. Les résultats de l'application de ses modèles ont montré que cette démarche est importante en comparant avec les résultats précédents.

Dans la troisième partie, un programme expérimental a été effectuée afin de valider les modèles développés. Les bétons autoplaçant ont été confectionnés avec différents rapports E/L. Pour couvrir la gamme des matériaux utilisés, dix formulations du béton ont été considérés, le taux de remplacement du ciment par les cendres volantes varier entre 0% et 60% avec différentes quantités de liants, de granulats (sable et gravier) et de superplastifiant.

Aux termes de cette étude, les conclusions suivantes ont été faites :

- Des modèles de réseaux de neurones avec un algorithme d'apprentissage de retro-propagation ont été utilisés pour la modélisation. A cet effet, une base de données recueillie à partir de la littérature a été utilisée.
- La performance des modèles de réseaux de neurones développés est déterminée sous la forme d'erreur quadratique moyenne (MSE), la valeur du coefficient de détermination ( $R^2$ ) et la moyenne absolue de l'erreur en pourcentage (MAPE). Toutes ces valeurs de paramètres statistiques démontrent que les modèles proposés conviennent et prédire les

propriétés à l'état frais et à l'état durci du béton autoplaçant contenant des cendres volantes avec précision. Ces résultats sont très proches des valeurs expérimentales.

- Une étude paramétrique a été effectuée afin de simuler l'effet des paramètres d'entrées et les interactions entre les paramètres à l'aide des modèles RN1 et RN2 pour prédire les propriétés à l'état frais et à l'état durci du BAP. La performance satisfaisante des modèles développés qui ont démontré la capacité de prévoir les propriétés du BAP a été étudiée et les résultats ont été en concordance avec des résultats publiés antérieurement.
- La capacité du modèle RN2 est validée par la comparaison des résultats de ce modèle avec des nouvelles données obtenues par des résultats supplémentaires provenant d'autres chercheurs et excluent à partir des données d'apprentissage. La comparaison entre les valeurs prédites par le modèle RN2 développés et d'autres modèles connus comme ACI 209 et CEB-FIP Model Code 90, montre une bonne précision. Il a été constaté que l'augmentation du dosage des cendres volantes améliore la résistance du BAP jusqu'à une valeur optimale. En outre, le type de classe de cendres volantes affecte les propriétés du BAP en particulier pour l'évolution au jeune âge de la résistance à la compression.
- Un modèle mathématique a été proposée pour prédire la résistance à la compression du BAP en fonction de l'âge du BAP contenant des cendres volantes en se basant sur les résultats du modèle RN2 élaboré. Le modèle proposé est approprié pour estimer la résistance à la compression du BAP avec précision.
- L'influence de chaque variable d'entrée sur la résistance à la compression du BAP est démontrée en utilisant "la méthode de Garson". Les facteurs importants maximales de diverses entrées ont été observés pour différents âges de durcissement, le pourcentage de cendres volantes et le type de cette dernière et les agrégats. Le pourcentage d'importance relative de tous les paramètres d'entrée est compris dans l'intervalle de 3% à 25%, cela signifie que la résistance à la compression du BAP est influencée par tous les paramètres d'entrée.
- La perméabilité de BAP aux ions chlorures a été étudiée en utilisant la technique des neurones-flous. Après l'utilisation de plusieurs fonctions d'appartenance afin de trouver le modèle approprié, une erreur d'apprentissage de 2.7 % a été trouvée. L'effet des paramètres de composition sur la perméabilité du BAP a été examiné.

## 7.2 Recommandations

Focalisée sur l'application de la technique de réseaux de neurones artificiels sur le BAP, cette étude a permis de répondre à la problématique posée, et a conduit à l'élaboration des modèles pour la prévision des propriétés du BAP contenant des cendres volantes à l'état frais et à l'état durci et de bons résultats ont été obtenus.

En ce qui concerne un approfondissement des modèles développés, nous recommandons d'améliorer ce dernier par les points suivants :

- 1) L'élargissement de la base de données par une mise à jour périodique ;
- 2) L'utilisation d'autres techniques d'intelligence artificielle tel que : les algorithmes génétiques et la logique floue et les systèmes experts. Ainsi, l'optimisation des modèles élaborés par la combinaison avec d'autres techniques ;
- 3) L'élaboration d'autres modèles pour la prévision des propriétés du BAP contenant d'autres types d'ajouts cimentaires tel que : laitier, fumée de silice, la pouzzolane naturelle et la poudre de verre ;
- 4) L'application des techniques d'intelligence artificielle sur d'autres types de béton (béton à hautes performances, les bétons fibrés, les bétons de granulats légers et les bétons cellulaires).

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

## Références Bibliographiques

- ACI Committee 209, (2008) *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete* (ACI 209.2R-08).
- Aïtcin, PC, (1994) *The use of superplasticizers in high performance concrete*”, in *High Performance Concrete: From Material to Structure*, Y. Malier, ed., E & FN Spon, London, UK, pp.14-33.
- Aitcin PC, (1998) *High Performance Concrete*, New York: E&FN Spon, 591p.
- Akram M, Rahman IA, Memon I, (2014), *A Review on Expert System and its Applications in Civil Engineering*. International Journal of Civil Engineering and Built Environment, Vol. 1, N° 1, pp.24-29.
- Alqadi ANS, Mustapha KN Bin, Naganathan S, Al-Kadi QNS, (2012) *Uses of central composite design and surface response to evaluate the influence of constituent materials on fresh and hardened properties of self-compacting concrete*. KSCE Journal of civil engineering. Vol. 16(3):pp. 407-416.
- Ashrafi HR, Ramezaniapour AA, (2007) *Service Life Prediction of Silica Fume Concretes*. International Journal of Civil Engineering, Vol. 5, pp.182–197.
- Bai J, Wild S, Ware J., Sabir B, (2003) *Using neural networks to predict workability of concrete incorporating metakaolin and fly ash*. Advances in Engineering Software Vol. 34, N° 11–12, pp.663–669.
- Berry E, Malhotra V, (1982) *Fly ash for use in concrete-A critical review*, ACI Journal Proceedings., Vol. 77, N° 2, pp.59-73.
- Berry E, Malhotra V M, (1987) *Supplementary Cementing Materials for Concrete*. Canadian Government Publishing Center, Ottawa, Canada, pp. 428.
- Bingöl AF, Tohumcuİ, (2013) *Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume*. Materials & Design; Vol. 51, pp.12-18.
- Bouzoubaa N, Lachemi M, (2001) *Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F Fly ash, Preliminary results*. Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp.413-420.
- Boğa AR, Öztürk M, Topçu IB, (2013) *Using ANN and ANFIS to predict the mechanical and chloride permeability properties of concrete containing GGBFS and CNI*. Composites Part B, Vol. 45, N° 1, pp.688-696.
- Ceylan H, Gopalakrishnan K, Kim S, (2014) *I-BACK: Iowa's intelligent pavement back calculation software*. Geo-Congress 2014, Technical Papers: pp.2952-2959.

- Chandwani V, Agrawal V, Nagar R, (2014) *Applications of Artificial Neural Networks in Modeling Compressive Strength of Concrete - A State of the Art Review*, International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 4, N° 4, pp.2.949-2956.
- Cheng H, Wang J, Hu Y, Glazier C, Shi X, Chen X. (2007) *Novel Approach to Pavement Cracking Detection Based on Neural Network*. Journal of the Transportation Research Board, pp.119-127.
- Christensen, BJ, and Ong FS, (2005) *The Performance of High-Volume Fly Ash Self-Consolidating Concrete*, Proceedings of SCC-2005, Chicago, IL: ACBM.
- Chine WH, Chen L, Hsu HH, Wang TS, Chiu CH, (2010) *Modeling Slump of Concrete Using the Artificial Neural Networks*. International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI), Vol. 3, pp.236–239.
- Model Code 2010, (2012) *The fib Model Code for Concrete Structures 2010*, Comité Euro-International du Béton. fib Bulletin N° 65, 350 p.
- Daimon, M, (1980) *Mechanisms and kinetics of slag cement hydration*. Proceeding., 7th International. Congress on Chemistry of Cement, Paris, Editions Septima, Part III-2, IV, pp. 2-9.
- Dhiyaneshwaran S, Ramanathan P, Baskar I, Venkatasubramani R, (2013) *Study on durability characteristics of self-compacting concrete with fly ash*. Jordan Journal of Civil Engineering; Vol. 7, N° 3, pp.342-352.
- Demir F. (2007) *Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete by artificial neural networks*. Constr Build Mater, Vol. 22, pp.1428–1435.
- Djokhrab A-E, (2015) *Planification et Optimisation de Trajectoire d'un Robot Manipulateur à 6 D.D.L. par des Techniques Neuro-Floues*. Masters thesis, Université Mohamed Khider - Biskra.
- Dodson V, (1981) *The effect of fly ash on the setting time of concrete*. Chemical or physical Proceedings, Symposium on fly ash incorporation in hydrated cement system, Editor: S. Diamond, Materials Research Society, Boston, pp.233-243.
- Ehrlich J. (1994) *Un modèle générique pour l'acquisition de données Méthodes connexionnistes de traitement de l'information*, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, LCPC, Paris, 275p.
- EFNARC (2005) *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. EFNARC Association House, Hampshire, UK.
- Enad M, Ibrahim A, El-Chabib H, Patibandla VC, (2013) *Self-Consolidating Concrete Incorporating High Volume of Fly Ash, Slag, and Recycled Asphalt Pavement*. Int J Concr Struct Mater. Vol. 7, N° 2, :pp. 155-163.
- Floyd RW, (2012) *investigating the bond of prestressing strands in lightweight self-consolidating concrete*. PhD thesis, University of Arkansas-Fayetteville, United states. 509p.
- Li FX, Yu QJ, Wei JX, Li JX, (2011) *"Predicting the Workability of Self-Compacting Concrete Using Artificial Neural Network"*, Advanced Materials Research, Vols. 168-170, pp. 1730-1734.



- Garrison JS, (2011) *Developping fresh concrete specifications for self consolidating concrete mixtures*. Master thesis. University of Arkansas-Fayetteville, United states. 222p.
- Gettu R, Izquierdo J, Gomes PCC, Josa A, (2002) *Development of high-strength self-compacting concrete with fly ash: a four-step experimental methodology*. 27 th Conference on our world in concrete & structures: 29 - 30 August, Singapore.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Özturan, T., Öz, H. Ö., & Asaad, D. S, (2014) *Permeation characteristics of self compacting concrete made with partially substitution of natural aggregates with rounded lightweight aggregates*. Construction and Building Materials, Vol. 59, pp.1-9.
- Girish S, Vengala J, Ranganath R V, (2007) Volume fractions in self-compacting concrete - a review, 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent-Belgium. 3-5 September: pp.73-81.
- Güneyisi E, Gesoğlu M, Özturan T, Özbay E, (2009a) *Estimation of chloride permeability of concretes by empirical modeling: Considering effects of cement type, curing condition and age*. Constr Build Mater , Vol. 23, pp.469–481.
- Güneyisi E, Gesoglu E, Özbay ME, (2009b) *Evaluating and forecasting the initial and final setting times of self-compacting concretes containing mineral admixtures by ANN*, Materials and Structures Vol. 42, pp.469-484.
- Güneyisi E, Gesoğlu M, Özbay E. (2010) *Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures*, Construction and Building Materials, Vol. 24, N° 10, pp. 1878-1887.
- Hameed MA, (2005) *A stdy of mix design and dutability of self compacting concrete*. Master thesis. University of King Fahd of petroleum and minirals, Arabi Saudi. 112p.
- Horta A, (2005) *Evaluation of self-consolidating concrete for bridge structure applications*. Master thesis. Georgia Institute of Technology, Georgia. 252p.
- Kasperkiewicz J, Racz J, Dubrawski A, (2009) *HPC Strength Prediction Using Artificial Neural Network*. J Comput Civ Eng; Vol. 9, pp.279–284.
- Keerthi GBS, Prasad EGL, Chethan VR, (2011) *Forecasting of SFRSCC's Fresh Property by ANN*, International Journal of Earth Sciences and Engineering, Vol. 04, N° 06, pp.276-281.
- Khan MI. (2012) *Predicting properties of High Performance Concrete containing composite cementitious materials using Artificial Neural Networks*. Autom Constr; Vol. 22, pp.516–524.
- Khatib JM, (2008) *Performance of self-compacting concrete containing fly ash*. Construction and Building Materials, Vol. 22, N° 9, pp.1963-1971.
- Khayat K, Hu C, Monty H, (1999) *Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potential applications*. In 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp.143-152.
- Gowda KBS, Prasad GLE, (2011) *“Forecasting of SFRSCC”s Fresh Property by ANN”* International Journal of Earth Sciences and Engineering.

- Koehler EP, (2007) *Self-Consolidating Concrete for Precast Structural Applications: Mixture Proportions, Workability, and Early-Age Hardened Properties*. PhD thesis, University of Texas at Austin, United states. 372p.
- Kim JK, Han SH, Park YD, Noh JH, Park CL, Kwon YH, Lee SG, (1996) *Experimental Research on the Material Properties of Super Flowing Concrete*, in Production Methods and Workability of Concrete, (ed.: P.J.M. Bartos, D.L. Marrs, and D.J. Cleland), E & FN Spon, pp.271-284.
- Kou SC, Poon CS, (2009) *Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites. Vol. 31, N° 9, pp. 622-627.
- Krishnapal P, Yadav RK, Rajeev C, (2013) *Strength characteristics of self compacting concrete containing fly ash*. Research Journal of Engineering Sciences, Vol. 2, N° 6, pp1-5.
- Kuder K, Lehman D, Berman J, Hannesson G, Shogren R, (2012) *Mechanical properties of self-consolidating concrete blended with high volumes of fly ash and slag*. Construction and Building Materials, Vol. 34, pp. 285-295.
- Kwon SJ, Song HW, (2010) *Analysis of carbonation behavior in concrete using neural network algorithm and carbonation modeling*. Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp.119–127.
- Jain A, Jha SK, Misra S, (2008) *Modeling and Analysis of Concrete Slump Using Artificial Neural Networks*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, pp.628–33.
- Jau WC, Yang CT (2010) *Development of a modified concrete rheometer to measure the rheological behavior of conventional and self-consolidating concretes*. Cement and concrete composites. Vol. 32, N° 6, pp.450-460.
- Jepsen MT, (2002) *Predicting concrete durability by using artificial neural network*, proceedings "Durability of Exposed Concrete containing Secondary Cementitious Materials, Hirtshals, November 2002, 12 p.
- Jialin J, Zhao Q, Yan G, Li H (2007) *BP Network based mix proportion design of self-compacting concrete*. In Innovative Computing, Information and Control. ICICIC'07. Second International Conference on IEEE, pp. 575-575.
- Lane RO, and Best JF, (1982) *Properties and use of fly ash in Portland cement concrete*. Concrete International, Vol. 4, N° 7, pp.81-92.
- Lazzari M, Pellegrini R, Dalmagioni P, Emborg M. (2003) *Integrating neural networks, databases and numerical software for managing early age concrete crack prediction*, Second International Conference on Structural and Construction Engineering (ISEC 03), 2003, Rome, Italy. 7 p.
- Lee SC, (2003) *Prediction of concrete strength using artificial neural networks*. Engineering Structures; Vol. 25, pp.849–857.
- Li L, Sun L, Ning G, Tan S, (2014) *Automatic Pavement Crack Recognition Based on BP, Neural Network*, Vol. 26, pp.11–22.
- Lippmann R, (1987) *An introduction to computing with neural nets*. IEEE ASSP Mag Vol. 4, pp.4–22.

- Liu M, (2010) *Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash*, Construction and Building Materials, Vol. 24, N° 7, pp.1245-1252.
- Lizarazo-Marriaga J, Claisse P, (2009) *Determination of the concrete chloride diffusion coefficient based on an electrochemical test and an optimization model*. Mater Chem Phys Vol. 117, pp.536–543.
- Lu C, Liu R. (2009) *Predicting Carbonation Depth of Prestressed Concrete under Different Stress States Using Artificial Neural Network*. Adv Artif Neural Syst, pp.1–8.
- Luo D, Niu D, Dong Z, (2014) *Application of neural network for concrete carbonation depth prediction*, Fourth Int Conf Durab Concr Struct ICDCS, pp.66–71.
- Mahalingam BM, Agamani KN, (2011) *Effect of Processed Fly Ash on Fresh and Hardened Properties of Self Compacting Concrete*. Vol. 04, N° 05, pp.930-940.
- Maekawa K, Chaube R., Kishi T, (1999) *Modelling of concrete performance : hydration, microstructure formation, and mass transport*, E & FN Spon London, 308 p.
- Malhotra VM. (1995) *High performance structural concrete incorporating large percentages of fly ash European Ready Mixed*. Concrete Congress, Istanbul, Turkey, pp.21-23.
- Massazza F, (1993) *Pozzolanic Cements*. Cement and Concrete Composites, Vol. 15, pp. 185-214.
- Mehta PK, Monteiro, PJM, (1993) *Concrete: Structure, Properties and Materials*, Englewood Cliffs, NJ; Prentice Hall, 548 pp.
- Mehta PK, (1983) *Pozzolanic and Cementitious byproducts as Mineral Admixtures for Concrete- A Critical Review*. ACI International Conference. Edited by V. M. Malhotra, SP 79-1, pp.1-46.
- Moini MR, Lakizadeh A, Mohaqeqi M, (2012) *Effect of mixture temperature on slump flow prediction of conventional concretes using artificial neural networks*. Australian Journal of Civil Engineering, Vol. 10, pp.87–98.
- Moranville-Regourd M, (1998) *Cements made from blastfurnace slag*, in LEA's Chemistry of cement and concrete, fourth edition, Ed. P.C. Hewlett, pp.637-678.
- Muthupriya P, Subramanian K, Vishnuram BG, (2012) *Prediction of Compressive Strength and Durability of High Performance Concrete By Artificial Neural Networks*. Int J Optim Civ Eng, Vol. 1, pp.189–209.
- Naik TR, Kraus RN, Chun YM, Canpolat F, Ramme BW, (2003) *Use of limestone quarry by-products for developing economical self-compacting concrete*. A CBU Report, UWM Center for By-Production Utilization, University of Wisconsin–Milwaukee, USA.
- Naik TR, Kumar R, Ramme BW, Canpolat F, (2012) *Development of high-strength, economical self-consolidating concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 30, pp.463-469.
- Nehdi M, El-Chabib H, El-Naggar MH, (2001) *Predicting Performance of Self Compacting Concrete Mixtures Using Artificial Neural Networks*, Materials Journal, Vol. 98, N° 5, pp 394-401.

- Nepomuceno M, Oliveira L, Lopes SMR, (2012) *Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders*. Construction and Building Materials; Vol. 26, N° 1, pp.317-326.
- Okamura H, Ouchi M, (1999). *Self-compacting concrete. Development, Development, present use and future*. Proc. 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting 118 Concrete (Stockholm, Sweden), Eds. A. Skarendahl and O. Petersson, RILEM Publications, pp.3-14.
- Onal O, Ozturk AU, (2010) *Artificial neural network application on microstructure–compressive strength relationship of cement mortar*. Advances in Engineering Software, Vol. 41, N° 2, pp.165-169.
- Ouchi M, Aki S, Osterberg T, Hallberg S-E, Lwin M, (2003) *Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and the United States*. Federal Highway Administration. 20 p.
- Ozawa K, (1989) *High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures*. Second East Asia-Pacific Conference on. Structural Engineering and Constructions, Vol. 1, pp.445-450..
- Pala M, Özbay E, Öztaş A, Yuce MI, (2005) *Appraisal of long-term effects of fly ash and silica fume on compressive strength of concrete by neural networks*. Constr Build Mater , Vol. 21, pp.384–394.
- Pang C, Qin H, Gao R, Xu J, Chen F, (2005) *Research on design and performance of self-compacting concrete*. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium, Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC'2005-China), pp.191-197.
- Parichatprecha R, Nimityongskul P, (2009) *Analysis of durability of high performance concrete using artificial neural networks*. Construction and Building Materials, Vol. 23, pp910–917.
- Papadakis, VG, (2000) *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*. Cement and concrete research, Vol. 30, N° 2, pp.291-299.
- Patel R, Hossain KMA, Shehata M, Bouzoubaa N, Lachemi M, (2004) *Development of Statistical Models for Mixture Design of High-Volume Fly Ash Self-Consolidating Concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 101, N° 4, pp.294-302.
- Parthiban T, Ravi R, Parthiban GT, Srinivasan S, Ramakrishnan KR, Raghavan M, (2005) *Neural network analysis for corrosion of steel in concrete*. Corrosion Sciences, Vol. 47, pp.1625–1642.
- Prasad BKR, Eskandari H, Venkatarama BVR, (2009) *Prediction of compressive strength of SCC and HPC with high volume fly ash using ANN*, Construction and Building Materials, Vol. 23, pp.117–128
- Rafiq M, Bugmann G, Easterbrook D, (2001) *Neural network design for engineering applications*. Computer and Structures, Vol. 79, pp.1541–1552.
- Rajasekaran S, Amalraj R, (2002) *Predictions of design parameters in civil engineering problems using SLNN with a single hidden RBF neuron*. Computer and Structures, Vol. 80, pp.2495–2505.

- Rajasekaran S, Lavanya S, (2007) *Hybridization of genetic algorithm with immune system for optimization problems in structural engineering*. Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 34, pp.415–429.
- Rajasekaran S, Suresh D, Vijayalakshmi Pai GA, (2002) *Application of Sequential Learning Neural Networks to Civil Engineering Modeling Problems*. Engineering with Computers, Vol. 18, N° 2, pp.138–147.
- Rizos D, Paul-Ziehl JC, (2006) *Investigation of Self-Consolidating Concrete for Prestressed Bridge Girders using South Carolina Materials*. ACPA 4th Annu South Carolina “Count Concrete Conference – Columbia, South Carolina.
- Robert YL, Cook JE, (1983) *Study of a class C fly ash concrete*. ACI Special Publication 79, pp.307-320.
- Saridemir M. (2009) *Prediction of compressive strength of concretes containing metakaolin and silica fume by artificial neural networks*. Advances in Engineering Software, Vol. 40, N° 5, pp.350–355.
- Shadle R, Somerville S, (2002) *The Benefits of Utilizing Fly Ash in Producing Self-Compacting Concrete*, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, IL: ACBM, pp.235-241.
- Şahmaran M, Yaman İÖ, Tokyay M, (2009) *Transport and mechanical properties of self-consolidating concrete with high volume fly ash*. Cement and concrete composites, Vol. 31, N° 2, pp.99-106.
- Şahmaran M, Lachemi M, Erdem TK, Yücel HE, (2011) *Use of spent foundry sand and fly ash for the development of green self-consolidating concrete*. Materials and structures, Vol. 44, N° 7, pp. 1193-1204.
- Schindler A., Barnes RW, Roberts JB, Rodriguez S, (2007). *Properties of self-consolidating concrete for prestressed members*. ACI Materials Journal, Vol. 104, N° 1, pp.53-61.
- Shao Q, Ning Y, Shi J, (2009) *SCC passing capacity of orthogonal experimental based on neural network*, University of South China, Hengyang 421001, China.
- Shetty MS, (2000) *Concrete Technology, Theory and practice*, Sixth edition, S. Chand & Company Ltd. (An ISO 9001:2000 Company), Ram Nagar, New Delhi.
- Siddique R, (2008) *Waste materials and by-products in concrete*. Vol. 413. Berlin; Springer. 406 p.
- Siddique R, (2011) *Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash*, Materials & Design, Vol. 32, N° 3, pp.1501-1507.
- Siddique R, Aggarwal P, Aggarwal Y, (2011) *Prediction of compressive strength of self-compacting concrete containing bottom ash using artificial neural networks*, Advances in Engineering Software, Vol. 42, N° 10, pp.780–786.
- Sonebi M, (2004) *Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modeling using statistical factorial plans*, Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp.1199-1208.
- Song HW, Kwon SJ. (2009) *Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure*. Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp.814–824.

- Sukumar B, Nagamani K, Raghavan RS, (2007) *Evaluation of strength at early ages of self compacting concrete with high volume fly ash*. Construction and Building Materials, pp 1-8.
- Steven H., Kerkhoff B. William C., (2003) *Design and Control of Concrete Mixtures*, 14th Edition, Portland Cement Association, USA.
- Taffese WZ, Sistonen E, Puttonen J, (2015) *CaPrM: Carbonation prediction model for reinforced concrete using machine learning methods*. Construction and Building Materials, Vol. 100, pp.70–82.
- Tarighat A, Erfanimesh AH, (2009) *Artificial neural network modeling of chloride diffusion coefficient and electrical resistivity for ordinary and high performance semi-lightweight concretes*, 34<sup>th</sup> Conference on our World in Concrete & Structures : 16 - 18 August 2009, Singapore, 8 p.
- Therán G, Miguel M, (2008) *Experimental evaluation of the modulus of elasticity of self-consolidating*. Master thesis, university of Puerto Rico, United States.
- Toutanji H, Delatte N, Aggoun S, Duval R, Danson A, (2004) *Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete*. Cement and Concrete Research , Vol. 34, pp.311–319.
- Topçu İB, Boğa AR, Hocaoglu FO, (2009) *Modeling corrosion currents of reinforced concrete using ANN*. Automation in Construction, Vol. 18, N° 2, pp.145–152.
- Turk K, Karatas M, Gonen T, (2013) *Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive Strength, Sorptivity and Carbonation of SCC*, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, N° 1, pp.202-209.
- Ukrainczyk N, Banjad Pecur I, Bolf N, (2007) *Evaluating rebar corrosion damage in RC structures exposed to marine environment using neural network*. Civ Eng Environ Syst Vol. 24, pp.15–32.
- Ukrainczyk V, Ukrainczyk N, (2008) *A neural network method for analysing concrete durability*. Magazine of Concrete Research, Vol. 60, pp.475–486.
- Uysal M, Tanyildizi H, (2011) *Predicting the core compressive strength of self-compacting concrete (SCC) mixtures with mineral additives using ANN*, Construction and Building Materials, Vol. 25, pp.4105–4111
- Uysal M, Tanyildizi H, (2012) *Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using ANN*, Construction and Building Materials, Vol. 27, pp.404–414.
- Viriyametanont K, (2008) *Reconnaissance physique et géométrique d'éléments en béton armé par radar et réseaux de neurones artificiels*, Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse. 230p.
- Yahia A, Tanimura M, Shimabukuro A, Shimoyama Y, Tochigi T, (1999) *Effect of mineral admixtures on rheological properties of equivalent self-compacting concrete mortar*, inst 21 (2) 559–564.

- Yanaba K., Bouaziz JD, Matsushita T, Magro CM, St.Clair EW, Tedder TF, (2009) *B-lymphocyte contributions to human autoimmune disease,* Immunological Reviews, Vol. 223, N° 1, pp.284–299.
- Yazıcı H, (2007) *The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete.* Construction and Building Materials. Vol. 22, N° 4, pp.456-462.
- Yeh I-C, (2006) *Exploring Concrete Slump Model Using Artificial Neural Networks.* Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 20, N° 3, pp.217–221.
- Yeh I-C, (2007) *Modeling slump flow of concrete using second-order regressions and artificial neural networks.* Cement and Concrete Composites, Vol. 29, N° 6, pp.474–480.
- Yen T, Tang CW, Chang CS, Chen, KH, (1999) *Flow behaviour of high strength high performance concrete,* Cement and Concrete Composites, Vol. 21, N° 5-6, pp.413-424.
- Wang JL, Liu H, (2010) *Application of Neural Network in Prediction for Self-compaction Concrete,* Advances in Intelligent and Soft Computing, Vol. 78, pp.733-738.
- Walraven J, (2003) *Structural aspects of self-compacting concrete.* In Proceedings of the 3 rd International RILEM Symposium on SCC, pp.15-22.
- Wongkeo W, Thongsanitgarn P, Ngamjarurojana A, Chaipanich A, (2014) *Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume.* Material Design. Vol. 64, pp.261-269.
- Xiaowei H, Weimin C, Peng Z, Shunren H, (2012) *Research on deflection sensor validity based on K-neighbor algorithm.* Chinese Journal of Scientific Instrument, Vol. 5, pp.1090-1095.
- Xie Y, Liu B, Yin, Zhou S, (2002) *Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultra pulverized fly ash,* Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 477-480.
- Xie Y, Liu Y, Long G, (2007) *A mix design method for self compacting concrete.* 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent-Belgium. 3-5 September: pp.189-195.
- Zhao H, Sun W, Wu X, Gao B, (2012) *The effect of coarse aggregate gradation on the properties of self-compacting concrete.* Materials & Design. Vol. 40, pp.109-116.
- Zhou S, Shi JJ, Yang XF, Lei L, (2005) *Application of Neural Network in Prediction for Flowing Property of Self-compacting Concrete,* Journal of Water Resources and Architectural Engineering, Vol. 04.
- Zhu W, Bartos PJ, (2003) *Permeation properties of self-compacting concrete.* Cement and Concrete Research, Vol. 33, N° 6, pp.921-926.

---

## ANNEXES

---



## Annexe 01

Base de données pour le modèle RN1

Prévision des propriétés à l'état frais du BAP

Auteur	L	P	E/L	S	G	SP	D(mm)	L <sub>box</sub>	V <sub>funnel</sub>	Fc28
Bingöl 2013	500	55	0,35	908	652	7,5	700	0,91	7	42,7
	500	40	0,35	923	663	7,5	680	0,88	6,2	55
	500	25	0,35	938	673	7,5	660	0,85	6,95	62
	500	0	0,35	967	694	8	630	0,84	6,08	78,6
Dhiyaneshwaran 2013	530	0	0,45	768	668	0,86	660	0,92	12	30
	530	10	0,45	768	668	0,86	675	0,933	10,6	32,19
	530	50	0,45	768	668	0,86	678	0,946	7,6	35,9
	530	40	0,45	768	668	0,86	685	0,95	7,9	37,18
	530	20	0,45	768	668	0,86	680	0,946	9,8	37,89
	530	30	0,45	768	668	0,86	690	0,953	8,5	41,42
Gesoglu 2014	550	20	0,32	550,4	853,7	3,1	720	0,88	7,92	58
	550	20	0,32	602,8	853,7	3,3	720	0,88	8,42	59
	550	20	0,32	655	853,7	4	720	0,88	8,93	57,5
	550	20	0,32	681,2	702,1	3,9	725	0,94	7	53
	550	20	0,32	707,5	732,3	4,1	720	0,93	7,72	47
	550	20	0,32	707,5	853,7	5,3	710	0,87	8,96	60,5
	550	20	0,32	733,6	762,7	4,5	720	0,89	8,31	57
	550	20	0,32	759,8	793,1	4,7	715	0,87	9,42	56,5
	550	20	0,32	759,8	853,7	6,1	710	0,87	10,4	64
	550	20	0,32	785,9	823,3	5,9	720	0,86	9,85	52
	550	20	0,32	812,1	550,4	4	730	1	7,55	60
	550	20	0,32	812,1	611	4	725	0,99	7,86	65,5
	550	20	0,32	812,1	732,3	5,4	720	0,94	8,55	66
	550	20	0,32	812,1	671,8	4,4	725	0,95	8,22	68
	550	20	0,32	812,1	793,1	5,9	720	0,94	9,66	70
	550	20	0,32	812,1	853,7	7,1	700	0,87	11,4	75
Gettu 2002	733	37	0,26	748	698	8,4	660	0,9	12	68,2
	701	37	0,27	774	723	8,1	580	0,8	10	69,5
	685	37	0,27	788	736	7,9	480	0,2	13	74,5
Güneyisi et al 2010	550	60	0,32	686	881	6,67	730	0,904	7	47,5
	550	40	0,32	700	899	7,43	730	0,963	6	60,9
	550	20	0,32	714	917	7,43	730	0,929	7	69,8
	550	0	0,32	728	935	8,43	670	0,788	17	80,9
	550	60	0,44	788	829	3	720	0,95	4	30,3
	550	40	0,44	801	842	2,96	730	0,8	6	44,7
	550	20	0,44	813	855	3,2	675	0,706	10,4	52,1
	550	0	0,44	826	868	3,5	670	0,706	3,2	61,5
Krishnapal 2013	450	30	0,45	890	810	4,8	695	0,78	8	39
	450	20	0,45	890	810	6,4	690	0,78	8	41
	450	10	0,45	890	810	8,2	689	0,79	8,6	45

Auteur	L	P	E/L	S	G	SP	D(mm)	L <sub>box</sub>	V <sub>funnel</sub>	Fc28
Krishnapal 2013	450	0	0,45	890	810	9,25	687	0,8	9	50
	480	30	0,4	890	810	9,4	680	0,8	8,1	40
	480	20	0,4	890	810	9,68	685	0,82	8,4	42
	480	0	0,4	890	810	13,3	650	0,88	12	52
Mahalingam 2011	550	40	0,35	210	823	6,77	730	0,9	3,4	54,89
	550	50	0,35	211	824	5,41	725	0,88	2,4	44,44
	550	30	0,35	213	835	4,74	610	0,86	3,2	57,33
	500	40	0,39	217	850	6,15	680	0,88	2,3	46,67
	500	30	0,39	220	862	6,15	640	0,75	2,5	53,56
	450	50	0,43	231	907	2,5	675	0,72	2,7	37,11
	450	40	0,43	234	917	2,77	650	0,88	3,7	41,33
	450	30	0,43	237	926	2,77	660	0,88	3,5	44,78
Muthupriya 2012	500	0	0,35	900	600	17,5	550	1,8	15	20
	500	40	0,35	900	600	10,75	675	0,93	7	28,6
	500	50	0,35	900	600	10,5	680	0,95	7,15	28,73
	500	30	0,35	900	600	11	660	0,9	9	29,16
Nepomuceno 2014	633	0	0,27	656	875	20,58	635	0,79	13,24	86,8
	613	24	0,26	685	875	15,33	645	0,8	13,3	78,2
	613	16	0,26	686	875	12,915	615	0,77	12,65	67,5
	670	0	0,27	695	772	21,84	620	0,81	10,38	85
	633	24	0,26	706	820	15,855	630	0,79	12,35	79,2
	649	16	0,26	726	772	13,65	650	0,84	9,98	69,1
	649	24	0,26	726	772	16,275	655	0,84	10,51	80,3
	628	0	0,29	744	772	19,53	615	0,77	11,57	82,9
	588	16	0,28	752	820	12,39	635	0,77	10,97	64,8
	643	0	0,29	761	729	19,95	630	0,86	9,94	81,9
	604	16	0,28	772	772	12,705	625	0,8	9,73	63,1
	618	16	0,28	790	729	13,02	640	0,83	11,62	63,6
	620	25	0,27	792	729	15,54	635	0,83	10,09	75,7
	575	0	0,31	794	772	17,22	645	0,75	13,25	77,8
	589	0	0,31	813	729	17,64	640	0,75	10,63	76,8
	564	16	0,31	841	729	11,55	630	0,77	10,29	56,8
567	25	0,3	846	729	13,86	655	0,82	11,33	69,9	
Patel 2003	450	45	0,39	808	900	1,58	680	1	2,25	50
	430	36	0,425	827	900	2,15	810	0,95	2	48
	430	36	0,425	830	900	0,86	480	0,6	2,5	36
	400	45	0,45	850	900	1,4	760	1	2,5	38
	430	54	0,355	872	900	2,15	710	1	4	52
	430	54	0,335	874	900	0,86	540	0,87	3,25	46
	400	60	0,39	886	900	1,4	630	0,91	3,5	44

Auteur	L	P	E/L	S	G	SP	D(mm)	L <sub>box</sub>	V <sub>funnel</sub>	Fc28
Patel 2003	400	45	0,39	916	900	2,4	770	1	3,5	43
	400	45	0,39	916	900	1,4	580	1	3	45
	400	45	0,39	916	900	1,4	600	1	3	47
	400	45	0,39	916	900	1,4	590	1	3,25	49
	400	45	0,39	916	900	1,4	590	1	3,5	49
	370	54	0,425	928	900	1,85	760	1	2,5	33
	370	54	0,425	930	900	0,74	600	1	2,75	31
	400	30	0,39	946	900	1,4	510	0,96	4,5	45
	370	36	0,425	960	900	1,85	650	0,94	3	46
Sahmaran et al 2009	500	70	0,35	968,4	597	6,75	725	0,85	15,8	34,4
	500	60	0,35	979,1	603	6,75	740	0,85	12,8	38,1
	500	50	0,35	987,8	608	6,75	710	0,9	19,2	40,8
	500	70	0,3	995,2	613	6,75	775	0,95	10,9	32,8
	500	60	0,3	997,4	614	6,75	770	0,95	9,4	39,9
	500	40	0,32	1003,9	618	6,75	745	0,95	11,7	52,3
	500	30	0,34	1006	620	6,75	765	0,95	10,2	52,4
	500	30	0,35	1008,2	621	6,75	715	0,95	15,8	57,3
	500	50	0,3	1010,3	628	6,75	738	0,88	15,1	47,5
	500	0	0,35	1038	639	6,75	665	0,87	12,7	62,2
Seddique 2012	550	35	0,44	910	590	7,15	590	0,86	6,1	17
	550	30	0,43	910	590	7,15	610	0,87	5,4	21
	550	25	0,42	910	590	11	590	0,6	4,2	21,7
	550	35	0,44	910	590	8,8	590	0,8	8	23
	550	20	0,41	910	590	6,6	600	0,7	4,8	24
	550	35	0,44	910	590	9,35	645	0,9	9	25
	550	30	0,43	910	590	7,7	600	0,9	6,5	25,5
	550	25	0,42	910	590	7,7	600	0,6	7	26
	550	15	0,41	910	590	9,9	625	0,82	4	26,5
	550	20	0,41	910	590	7,15	645	0,95	4,5	27
	550	30	0,43	910	590	8,8	605	0,7	8,9	27,5
	550	25	0,42	910	590	8,25	625	0,8	5,2	28
	550	15	0,41	910	590	10,45	590	0,95	6,5	29
	550	35	0,44	910	590	9,9	635	0,92	10	29,5
	550	30	0,43	910	590	9,9	675	0,95	5	31
	550	25	0,42	910	590	9,9	605	0,6	7	32
	550	20	0,41	910	590	9,9	605	0,82	7,5	32
	550	20	0,41	910	590	11	690	0,9	4,5	33,5
550	15	0,41	910	590	10,72	675	0,9	7,5	35,5	
550	15	0,41	910	590	10,17	675	0,8	6,6	36	

Auteur	L	P	E/L	S	G	SP	D(mm)	L <sub>box</sub>	V <sub>funnel</sub>	Fc28
Siddique 2011	550	30	0,43	910	590	9,91	673,3	0,95	6,1	30,66
	550	25	0,42	910	590	9,91	603,3	0,85	5,2	31,47
	550	20	0,41	910	590	11,01	690	0,95	4,5	33,15
	550	15	0,41	910	590	10,73	673,3	0,89	7,5	35,19
Soneibi 2004	511	51	0,55	478	837	2,56	705	0,58	2,88	17
	430	51	0,65	562	837	0,86	737	0,67	2,69	10,2
	410	39	0,72	566	837	2,05	880	0,97	2,53	11
	477	34	0,55	594	837	2,39	697	0,89	4,18	29,1
	390	26	0,65	709	837	0,78	623	0,7	3,89	26,6
	410	39	0,55	742	837	2,05	600	0,41	2,19	25,3
	410	39	0,55	742	837	2,05	605	0,31	1,95	26
	410	39	0,55	742	837	2,05	605	0,32	2,27	26,4
	410	39	0,55	742	837	2,05	625	0,45	2,33	28,5
	410	39	0,55	746	837	4,1	790	0,89	5,43	26,7
	430	51	0,45	786	837	3,44	555	0,2	4,87	26,7
uysal et al 2011	550	15	0,33	865	762	8,8	710	0,91	9,4	74,2
	550	0	0,33	869	778	8,8	690	0,815	14,5	75,9
	550	35	0,33	878	742	8,8	750	0,905	17	67,5
	550	25	0,33	887	752	8,8	740	0,93	11,7	73,4

## Annexe 02

### Base de données pour validation du modèle

#### RN1

Auteur	L	P	E/L	S	G	SP	D(mm)	T <sub>50</sub>	L <sub>box</sub>	V <sub>funnel</sub>	U <sub>box</sub>	Fc28
Zhu 2003	480	30	0,4	875	770	4,8	630					49,9
	510	20	0,35	915	750	4,6	600					71,3
	475	0	0,41	930	750	6,7	600					66,8
naik et al. 2012	431	0	0,34	971	871	8,1	679				5	60
	443	35	0,32	923	845	4,8	686				6	62
	461	45	0,29	942	863	3	686				6	60
	467	55	0,26	939	862	3	699				6	48
turk 2013	500	0	0,36	893	735	7	709	2,3	0,89			57,5
	500	25	0,39	910	735	6,75	709	2,44	0,91			53,5
	500	30	0,38	910	735	6,75	702	2,56	0,94			55
	500	35	0,38	910	735	6,75	705	3	0,95			58
	500	40	0,38	910	735	6,75	701	2,89	0,96			59
Liu 2010	539	0	0,33	743	924	5,93	720			8,1		73,3
	517	20	0,34	743	924	4,65	700			8,1		69,7
	495	40	0,35	743	924	3,71	705			6,1		58,5
	472	60	0,36	743	924	3,21	715			6,3		37,2

**Note :**

**L** : Liant (Kg) ;

**P** : pourcentage du cendres volantes ;

**E/L** : rapport Eau/Liant ;

**S** : Sable (Kg) ;

**G** : Gravier ;

**SP** : Superplastifiant ;

**D** : Étalement ;

**L<sub>box</sub>** : Rapport L<sub>box</sub> (H2/H1) ;

**V<sub>funnel</sub>** : Temps d'entonnoire ;

**Fc28** : Résistance à la compression à 28 jours.

## Annexe 03

Base de données pour le modèle RN2

Évolution de la résistance du BAP en fonction  
de l'âge

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Alquadi 2012	28,00	580,00	22,00	0,34	869,00	700,00	9,00	25,97
	28,00	555,00	23,00	0,34	889,00	716,00	10,80	33,16
	28,00	535,00	21,00	0,34	913,00	735,00	9,00	26,70
	28,00	555,00	23,00	0,34	894,00	720,00	7,20	34,25
	28,00	553,00	25,00	0,36	876,00	705,00	9,90	30,95
	28,00	555,00	23,00	0,30	922,00	742,00	9,00	33,32
	28,00	555,00	23,00	0,38	861,00	693,00	9,00	34,63
	28,00	553,00	25,00	0,36	878,00	707,00	8,10	32,82
	28,00	553,00	25,00	0,32	906,00	729,00	9,90	33,23
	28,00	533,00	23,00	0,36	898,00	723,00	9,90	35,49
	28,00	553,00	25,00	0,32	909,00	731,00	8,10	34,76
	28,00	558,00	22,00	0,36	877,00	706,00	8,10	30,90
	28,00	578,00	24,00	0,36	853,00	686,00	9,90	28,85
	28,00	580,00	22,00	0,34	869,00	700,00	9,00	33,90
	28,00	578,00	24,00	0,32	884,00	712,00	9,90	30,21
	28,00	555,00	23,00	0,34	892,00	718,00	9,00	30,03
	28,00	533,00	23,00	0,32	927,00	746,00	9,90	28,43
	28,00	533,00	23,00	0,36	900,00	725,00	8,10	32,96
	28,00	533,00	23,00	0,32	929,00	748,00	8,10	31,93
	28,00	578,00	24,00	0,32	887,00	714,00	8,10	27,30
	28,00	558,00	22,00	0,32	905,00	728,00	9,90	30,25
	28,00	558,00	22,00	0,36	874,00	704,00	9,90	31,43
	28,00	558,00	22,00	0,32	907,00	730,00	8,10	31,26
	28,00	578,00	24,00	0,36	855,00	688,00	8,10	31,68
	28,00	530,00	25,00	0,34	914,00	736,00	9,00	34,51
	28,00	555,00	23,00	0,34	892,00	718,00	9,00	35,18
	28,00	533,00	23,00	0,36	898,00	723,00	9,90	34,04
	28,00	553,00	25,00	0,32	909,00	731,00	8,10	30,25
28,00	555,00	23,00	0,38	861,00	693,00	9,00	30,54	
28,00	558,00	22,00	0,32	905,00	728,00	9,90	28,34	
Barfield 2008	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.52	28.6
	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	1.83	31.9
	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.39	30.2
	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	1.57	33.2
	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	4.17	32.6
	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	2.74	29.3
	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	4.08	29.7
	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	2.42	29.6



Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Barfield 2008	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	5.73	28.5
	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.32	27,00
	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	4.37	31.7
	7,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.26	29.2
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.52	40.5
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	1.83	40.5
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.39	39.7
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	1.57	42.6
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	4.17	41.9
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	2.74	37.8
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	4.08	39.5
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	2.42	41.1
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	5.73	38.2
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.32	36.4
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	4.37	41.3
	28,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.26	39.6
	90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.52	50.54
	90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	1.83	52.9
	90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.39	49.7
	90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	1.57	53.6
	90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	4.17	55.5
	90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	2.74	48,00
	90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	4.08	48.6
	90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	2.42	51.8
	90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	5.73	50.7
	90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.32	43.1
90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	4.37	51.6	
90,00	468,00	16,00	0.4	795,00	864,00	3.26	51.1	
Bingöl 2013	3,00	500,00	0,00	0,35	967,00	694,00	8,00	51,44
	3,00	500,00	25,00	0,35	938,00	673,00	7,50	48,01
	3,00	500,00	40,00	0,35	923,00	663,00	7,50	40,15
	3,00	500,00	55,00	0,35	908,00	652,00	7,50	33,46
	7,00	500,00	0,00	0,35	967,00	694,00	8,00	63,15
	7,00	500,00	25,00	0,35	938,00	673,00	7,50	50,18
	7,00	500,00	40,00	0,35	923,00	663,00	7,50	40,98
	7,00	500,00	55,00	0,35	908,00	652,00	7,50	34,54
	28,00	500,00	0,00	0,35	967,00	694,00	8,00	65,74
	28,00	500,00	25,00	0,35	938,00	673,00	7,50	51,86
	28,00	500,00	40,00	0,35	923,00	663,00	7,50	46,00
	28,00	500,00	55,00	0,35	908,00	652,00	7,50	35,71

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Bouzoubaa 2001	1,00	412,00	40,00	0.45	845,00	846,00	1.32	8.7
	1,00	397,00	40,00	0.4	844,00	844,00	3.19	10.7
	1,00	387,00	40,00	0.35	846,00	847,00	4.18	16.6
	1,00	414,00	50,00	0.45	845,00	843,00	0.44	6.1
	1,00	400,00	50,00	0.4	842,00	843,00	1.87	7,00
	1,00	394,00	50,00	0.35	856,00	856,00	3.08	7.8
	1,00	423,00	60,00	0.45	853,00	853,00	0,00	5.2
	1,00	408,00	60,00	0.4	851,00	851,00	2.2	4.9
	1,00	402,00	60,00	0.35	866,00	864,00	3.3	7.3
	7,00	412,00	40,00	0.45	845,00	846,00	1.32	21.2
	7,00	397,00	40,00	0.4	844,00	844,00	3.19	25.8
	7,00	387,00	40,00	0.35	846,00	847,00	4.18	31.3
	7,00	414,00	50,00	0.45	845,00	843,00	0.44	17.4
	7,00	400,00	50,00	0.4	842,00	843,00	1.87	19.3
	7,00	394,00	50,00	0.35	856,00	856,00	3.08	22.9
	7,00	423,00	60,00	0.45	853,00	853,00	0,00	15.6
	7,00	408,00	60,00	0.4	851,00	851,00	2.2	14.7
	7,00	402,00	60,00	0.35	866,00	864,00	3.3	20.6
	28,00	412,00	40,00	0.45	845,00	846,00	1.32	34.6
	28,00	397,00	40,00	0.4	844,00	844,00	3.19	37.8
	28,00	387,00	40,00	0.35	846,00	847,00	4.18	48.3
	28,00	414,00	50,00	0.45	845,00	843,00	0.44	33.2
	28,00	400,00	50,00	0.4	842,00	843,00	1.87	34.9
	28,00	394,00	50,00	0.35	856,00	856,00	3.08	38.9
	28,00	423,00	60,00	0.45	853,00	853,00	0,00	30.2
	28,00	408,00	60,00	0.4	851,00	851,00	2.2	26.2
	28,00	402,00	60,00	0.35	866,00	864,00	3.3	35.8
	Bui 2002	1,00	512,00	32,00	0.41	768,00	840,00	1.94
1,00		511,00	32,00	0.39	779,00	852,00	3.13	21.8
1,00		483,00	28,00	0.38	815,00	883,00	3.62	34.1
1,00		461,00	24,00	0.39	831,00	900,00	3.47	36.9
1,00		507,00	51,00	0.38	787,00	853,00	2.42	13.1
1,00		542,00	21,00	0.36	778,00	844,00	2.76	19.7
1,00		572,00	39,00	0.31	783,00	848,00	9.64	28.5
1,00		440,00	20,00	0.39	852,00	923,00	3.26	24.4
1,00		500,00	35,00	0.35	902,00	803,00	4.42	25.7
1,00		525,00	28,00	0.35	788,00	854,00	2.2	26.9
1,00		536,00	35,00	0.33	786,00	851,00	2.4	18.3
1,00		525,00	28,00	0.35	988,00	659,00	2.97	21,00
1,00	572,00	34,00	0.35	931,00	621,00	2.27	23.2	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Bui 2002	1,00	524,00	48,00	0.35	775,00	840,00	2.13	13.2
	7,00	511,00	32,00	0.39	779,00	852,00	3.13	49.3
	7,00	483,00	28,00	0.38	815,00	883,00	3.62	50.4
	7,00	461,00	24,00	0.39	831,00	900,00	3.47	53.5
	7,00	507,00	51,00	0.38	787,00	853,00	2.42	34,00
	7,00	542,00	21,00	0.36	778,00	844,00	2.76	52.1
	7,00	572,00	39,00	0.31	783,00	848,00	9.64	47.1
	7,00	440,00	20,00	0.39	852,00	923,00	3.26	44.9
	7,00	500,00	35,00	0.35	902,00	803,00	4.42	50.2
	7,00	525,00	28,00	0.35	788,00	854,00	2.2	53.2
	7,00	536,00	35,00	0.33	786,00	851,00	2.4	51.1
	7,00	525,00	28,00	0.35	988,00	659,00	2.97	56.6
	7,00	572,00	34,00	0.35	931,00	621,00	2.27	45.7
	7,00	524,00	48,00	0.35	775,00	840,00	2.13	39.5
	28,00	512,00	32,00	0.41	768,00	840,00	1.94	51.7
	28,00	511,00	32,00	0.39	779,00	852,00	3.13	59.9
	28,00	483,00	28,00	0.38	815,00	883,00	3.62	55.3
	28,00	461,00	24,00	0.39	831,00	900,00	3.47	61,00
	28,00	507,00	51,00	0.38	787,00	853,00	2.42	51.5
	28,00	542,00	21,00	0.36	778,00	844,00	2.76	59.4
	28,00	572,00	39,00	0.31	783,00	848,00	9.64	58.6
	28,00	440,00	20,00	0.39	852,00	923,00	3.26	46.5
	28,00	500,00	35,00	0.35	902,00	803,00	4.42	61.6
	28,00	525,00	28,00	0.35	788,00	854,00	2.2	73.5
	28,00	536,00	35,00	0.33	786,00	851,00	2.4	70.4
	28,00	525,00	28,00	0.35	988,00	659,00	2.97	65.5
	28,00	572,00	34,00	0.35	931,00	621,00	2.27	67.8
	28,00	524,00	48,00	0.35	775,00	840,00	2.13	54.5
Dhiyaneshwaran 2013	7,00	530,00	0,00	0,45	768,00	668,00	0,86	16,73
	7,00	530,00	10,00	0,45	768,00	668,00	0,86	19,57
	7,00	530,00	20,00	0,45	768,00	668,00	0,86	22,33
	7,00	530,00	30,00	0,45	768,00	668,00	0,86	24,39
	7,00	530,00	40,00	0,45	768,00	668,00	0,86	23,92
	7,00	530,00	50,00	0,45	768,00	668,00	0,86	22,75
	28,00	530,00	0,00	0,45	768,00	668,00	0,86	25,09
	28,00	530,00	10,00	0,45	768,00	668,00	0,86	26,92
	28,00	530,00	20,00	0,45	768,00	668,00	0,86	31,69

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Dhiyaneshwaran 2013	28,00	530,00	30,00	0,45	768,00	668,00	0,86	34,64
	28,00	530,00	40,00	0,45	768,00	668,00	0,86	31,10
	28,00	530,00	50,00	0,45	768,00	668,00	0,86	30,03
Diawara 2008	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.21	35.76
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.16	36.59
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.75	36.9
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.16	36.32
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.98	36.77
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.89	37.63
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.04	37.92
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.86	37.33
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	3.61	37.44
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.13	38.32
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.21	38.69
	7,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.13	37.97
	7,00	488,00	20,00	0.4	838,00	773,00	1.89	36.9
	7,00	488,00	20,00	0.4	838,00	773,00	2.45	37.08
	7,00	488,00	20,00	0.4	838,00	773,00	3.33	38.1
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.51	44.21
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	0.80	45.13
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.22	45.67
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	0.74	44.79
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.75	44.72
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.12	45.58
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.40	46.13
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.06	45.39
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	2.31	45.55
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.36	46.41
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.65	47.02
	7,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.27	46.19
	28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.21	48.75
	28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.16	49.94
	28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.75	50.42
	28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.16	49.35
	28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.98	49.63
	28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.89	50.72
28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.04	51.04	
28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.86	50.2	
28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	3.61	50.27	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Diawara 2008	28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.13	51.62
	28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.21	51.99
	28,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.13	50.97
	28,00	488,00	20,00	0.4	838,00	773,00	1.89	47.51
	28,00	488,00	20,00	0.4	838,00	773,00	2.45	48.5
	28,00	488,00	20,00	0.4	838,00	773,00	3.33	48.95
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.51	55.5
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	0.80	56.68
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.22	57.42
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	0.74	56.22
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.75	56.32
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.12	57.41
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.40	57.92
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.06	56.99
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	2.31	57.08
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.36	58.3
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.65	59.03
	28,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.27	57.86
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.21	62.29
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.16	63.7
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.75	64.32
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.16	63.32
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.98	63.08
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.89	64.69
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.04	65.28
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	1.86	64.14
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	3.61	65.2
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.13	66.8
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.21	67.49
	90,00	488,00	20,00	0.44	756,00	832,00	2.13	66.12
	90,00	488,00	20,00	0.4	838,00	773,00	1.89	58.86
	90,00	488,00	20,00	0.4	838,00	773,00	2.45	60.76
	90,00	488,00	20,00	0.4	838,00	773,00	3.33	61.07
	90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.51	69.24
90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	0.80	70.85	
90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.22	71.62	
90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	0.74	70.16	
90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.75	70.13	
90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.12	71.64	
90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.40	72.48	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Diawara 2008	90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.06	71.04
	90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	2.31	70.43
	90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.36	71.98
	90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.65	72.87
	90,00	469,00	16,00	0.4	848,00	922,00	1.27	71.31
Floyd 2008	1,00	472,00	0,00	0.38	810,00	441,00	1.41	19.72
	1,00	472,00	0,00	0.38	810,00	441,00	1.06	22.96
	1,00	472,00	0,00	0.38	810,00	441,00	1.41	23.30
	1,00	472,00	0,00	0.38	861,00	415,00	1.41	17.86
	1,00	472,00	0,00	0.38	880,00	406,00	1.06	20.82
	1,00	472,00	0,00	0.38	880,00	406,00	1.41	18.96
	1,00	472,00	0,00	0.38	861,00	415,00	0.88	20.20
	1,00	504,00	0,00	0.36	832,00	400,00	1.51	25.10
	1,00	472,00	0,00	0.38	861,00	415,00	1.41	25.92
	1,00	472,00	0,00	0.40	867,00	384,00	1.59	25.17
	1,00	504,00	0,00	0.36	832,00	400,00	2.65	32.96
	1,00	489,00	0,00	0.40	835,00	385,00	2.39	24.27
	1,00	489,00	0,00	0.39	860,00	381,00	3.12	31.10
	1,00	489,00	0,00	0.40	851,00	377,00	2.20	25.79
	1,00	472,00	0,00	0.37	885,00	391,00	4.60	25.99
	1,00	489,00	0,00	0.40	851,00	377,00	2.94	30.34
	1,00	489,00	0,00	0.40	835,00	385,00	2.94	25.03
	1,00	489,00	0,00	0.40	819,00	393,00	2.75	29.30
	1,00	489,00	0,00	0.40	801,00	401,00	2.75	25.10
	1,00	489,00	0,00	0.40	819,00	393,00	2.57	27.51
	1,00	475,00	0,00	0.40	797,00	469,00	1.42	21.30
	1,00	489,00	0,00	0.40	816,00	443,00	2.20	20.68
	1,00	489,00	0,00	0.40	850,00	425,00	2.20	20.27
	1,00	504,00	0,00	0.35	869,00	435,00	2.84	23.65
	1,00	504,00	0,00	0.35	853,00	444,00	3.03	27.03
	1,00	504,00	0,00	0.35	853,00	444,00	4.16	27.65
	1,00	504,00	0,00	0.35	835,00	453,00	3.03	24.27
	1,00	504,00	0,00	0.38	821,00	444,00	2.65	18.75
	1,00	534,00	0,00	0.35	826,00	431,00	1.60	19.86
	1,00	504,00	0,00	0.35	853,00	444,00	2.27	25.44
	1,00	534,00	0,00	0.35	826,00	431,00	2.40	26.89
	1,00	504,00	0,00	0.35	853,00	444,00	2.27	28.13
1,00	534,00	0,00	0.35	826,00	431,00	2.00	26.61	
1,00	451,00	0,00	0.44	863,00	819,00	2.37	34.27	
1,00	460,00	0,00	0.44	854,00	811,00	2.41	30.89	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Floyd 2008	1,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.07	28.34
	1,00	489,00	0,00	0.40	850,00	808,00	2.20	40.61
	1,00	564,00	0,00	0.32	812,00	385,00	2.54	24.89
	1,00	564,00	0,00	0.32	812,00	385,00	3.17	26.96
	1,00	489,00	0,00	0.32	935,00	385,00	4.77	16.96
	1,00	564,00	0,00	0.35	773,00	385,00	2.54	16.96
	1,00	489,00	0,00	0.32	935,00	385,00	5.14	26.13
	1,00	489,00	0,00	0.35	884,00	392,00	3.30	22.13
	1,00	564,00	0,00	0.35	773,00	385,00	2.96	24.13
	1,00	535,00	0,00	0.36	763,00	385,00	2.81	25.17
	1,00	593,00	0,00	0.30	794,00	385,00	4.45	38.75
	1,00	564,00	0,00	0.35	773,00	385,00	4.65	42.06
	1,00	564,00	15,00	0.33	790,00	374,00	4.67	43.78
	1,00	564,00	15,00	0.37	733,00	374,00	2.52	40.06
	1,00	489,00	0,00	0.40	835,00	385,00	2.94	42.47
	1,00	564,00	15,00	0.37	733,00	374,00	3.24	40.89
	1,00	564,00	15,00	0.37	710,00	385,00	2.88	38.20
	1,00	564,00	15,00	0.35	761,00	374,00	3.24	42.20
	1,00	564,00	15,00	0.35	737,00	385,00	3.60	43.64
	1,00	564,00	15,00	0.35	737,00	385,00	3.24	37.85
	1,00	564,00	15,00	0.35	737,00	385,00	3.95	41.23
	1,00	564,00	15,00	0.35	737,00	434,00	2.88	36.82
	1,00	564,00	15,00	0.35	769,00	417,00	3.24	40.89
	1,00	564,00	15,00	0.35	769,00	417,00	3.60	40.61
	1,00	581,00	15,00	0.34	753,00	417,00	4.81	43.23
	1,00	489,00	0,00	0.35	883,00	839,00	4.04	49.30
	1,00	489,00	0,00	0.40	832,00	826,00	1.84	43.85
	1,00	489,00	0,00	0.42	820,00	812,00	2.20	38.75
	1,00	489,00	0,00	0.40	832,00	826,00	2.94	47.57
	28,00	472,00	0,00	0.38	810,00	441,00	1.41	30.68
	28,00	472,00	0,00	0.38	810,00	441,00	1.06	36.40
	28,00	472,00	0,00	0.38	810,00	441,00	1.41	39.44
	28,00	472,00	0,00	0.38	861,00	415,00	1.41	34.27
	28,00	472,00	0,00	0.38	880,00	406,00	1.06	35.65
	28,00	472,00	0,00	0.38	880,00	406,00	1.41	33.44
	28,00	472,00	0,00	0.38	861,00	415,00	0.88	37.02
	28,00	504,00	0,00	0.36	832,00	400,00	1.51	39.16
	28,00	472,00	0,00	0.38	861,00	415,00	1.41	41.16
	28,00	472,00	0,00	0.40	867,00	384,00	1.59	39.51
	28,00	504,00	0,00	0.36	832,00	400,00	2.65	43.57

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Floyd 2008	28,00	489,00	0,00	0.40	835,00	385,00	2.39	38.20
	28,00	489,00	0,00	0.39	860,00	381,00	3.12	41.37
	28,00	489,00	0,00	0.40	851,00	377,00	2.20	46.95
	28,00	472,00	0,00	0.37	885,00	391,00	4.60	38.47
	28,00	489,00	0,00	0.40	851,00	377,00	2.94	48.26
	28,00	489,00	0,00	0.40	835,00	385,00	2.94	41.51
	28,00	489,00	0,00	0.40	819,00	393,00	2.75	45.71
	28,00	489,00	0,00	0.40	801,00	401,00	2.75	38.47
	28,00	489,00	0,00	0.40	819,00	393,00	2.57	35.30
	28,00	475,00	0,00	0.40	797,00	469,00	1.42	39.58
	28,00	489,00	0,00	0.40	816,00	443,00	2.20	35.44
	28,00	489,00	0,00	0.40	850,00	425,00	2.20	36.40
	28,00	504,00	0,00	0.35	869,00	435,00	2.84	37.58
	28,00	504,00	0,00	0.35	853,00	444,00	3.03	43.23
	28,00	504,00	0,00	0.35	853,00	444,00	4.16	36.34
	28,00	504,00	0,00	0.35	835,00	453,00	3.03	35.03
	28,00	504,00	0,00	0.38	821,00	444,00	2.65	31.58
	28,00	534,00	0,00	0.35	826,00	431,00	1.60	37.92
	28,00	504,00	0,00	0.35	853,00	444,00	2.27	36.40
	28,00	534,00	0,00	0.35	826,00	431,00	2.40	38.27
	28,00	504,00	0,00	0.35	853,00	444,00	2.27	41.85
	28,00	534,00	0,00	0.35	826,00	431,00	2.00	44.47
	28,00	451,00	0,00	0.44	863,00	819,00	2.37	76.88
	28,00	460,00	0,00	0.44	854,00	811,00	2.41	67.36
	28,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.07	67.98
	28,00	489,00	0,00	0.40	850,00	808,00	2.20	84.12
	28,00	564,00	0,00	0.32	812,00	385,00	2.54	44.68
	28,00	564,00	0,00	0.32	812,00	385,00	3.17	41.30
	28,00	489,00	0,00	0.32	935,00	385,00	4.77	32.61
	28,00	564,00	0,00	0.35	773,00	385,00	2.54	42.61
	28,00	489,00	0,00	0.32	935,00	385,00	5.14	44.54
	28,00	489,00	0,00	0.35	884,00	392,00	3.30	39.44
	28,00	564,00	0,00	0.35	773,00	385,00	2.96	42.75
	28,00	535,00	0,00	0.36	763,00	385,00	2.81	42.68
	28,00	593,00	0,00	0.30	794,00	385,00	4.45	45.99
	28,00	564,00	0,00	0.35	773,00	385,00	4.65	50.61
28,00	564,00	15,00	0.33	790,00	374,00	4.67	48.68	
28,00	564,00	15,00	0.37	733,00	374,00	2.52	48.26	
28,00	489,00	0,00	0.40	835,00	385,00	2.94	45.71	
28,00	564,00	15,00	0.37	733,00	374,00	3.24	49.92	



Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Floyd 2008	28,00	564,00	15,00	0.37	710,00	385,00	2.88	46.13
	28,00	564,00	15,00	0.35	761,00	374,00	3.24	49.71
	28,00	564,00	15,00	0.35	737,00	385,00	3.60	52.26
	28,00	564,00	15,00	0.35	737,00	385,00	3.24	48.19
	28,00	564,00	15,00	0.35	737,00	385,00	3.95	51.02
	28,00	564,00	15,00	0.35	737,00	434,00	2.88	46.82
	28,00	564,00	15,00	0.35	769,00	417,00	3.24	50.81
	28,00	564,00	15,00	0.35	769,00	417,00	3.60	52.68
	28,00	581,00	15,00	0.34	753,00	417,00	4.81	53.30
Garrison 2011	1,00	481,00	0,00	0.44	832,00	790,00	1.80	20.3
	1,00	481,00	0,00	0.44	863,00	758,00	1.80	20.8
	1,00	481,00	0,00	0.44	895,00	725,00	1.80	15.1
	1,00	481,00	0,00	0.44	799,00	823,00	1.80	18.3
	1,00	481,00	0,00	0.44	768,00	856,00	1.80	18.8
	1,00	481,00	0,00	0.44	736,00	889,00	2.17	13.9
	1,00	481,00	0,00	0.44	704,00	922,00	2.53	12.8
	1,00	451,00	0,00	0.44	796,00	888,00	2.37	12.9
	1,00	451,00	0,00	0.44	829,00	854,00	2.37	13.1
	1,00	451,00	0,00	0.44	863,00	819,00	2.37	10.4
	1,00	451,00	0,00	0.44	895,00	785,00	2.37	12.4
	1,00	445,00	0,00	0.44	869,00	826,00	1.00	11.8
	1,00	445,00	0,00	0.44	869,00	826,00	3.50	13.5
	1,00	460,00	0,00	0.44	854,00	811,00	2.41	59.4
	1,00	460,00	0,00	0.44	854,00	811,00	2.07	12.7
	1,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.41	19,00
	1,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.76	17.5
	1,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.76	18.6
	1,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	3.10	15.2
	1,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.41	19.4
	1,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.41	18.5
	1,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.76	17.1
	1,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.59	18.2
	1,00	463,00	5,00	0.44	784,00	875,00	2.41	16.5
	1,00	466,00	10,00	0.43	780,00	871,00	2.41	16.8
	1,00	466,00	10,00	0.43	813,00	837,00	2.41	15.3
	1,00	466,00	10,00	0.43	845,00	804,00	2.41	14.9
1,00	469,00	15,00	0.43	776,00	807,00	2.41	14.1	
1,00	469,00	15,00	0.43	809,00	833,00	2.76	16.2	
1,00	469,00	15,00	0.43	841,00	800,00	2.76	13.5	
1,00	472,00	20,00	0.43	772,00	862,00	2.41	14.4	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Garrison 2011	1,00	472,00	20,00	0.43	772,00	862,00	1.03	12.8
	1,00	472,00	20,00	0.43	804,00	829,00	2.07	19.7
	1,00	472,00	20,00	0.43	837,00	796,00	2.07	17.7
	1,00	475,00	25,00	0.43	768,00	857,00	2.07	18.8
	7,00	481,00	0,00	0.44	832,00	790,00	1.80	50.40
	7,00	481,00	0,00	0.44	863,00	758,00	1.80	50.75
	7,00	481,00	0,00	0.44	895,00	725,00	1.80	40.75
	7,00	481,00	0,00	0.44	799,00	823,00	1.80	47.85
	7,00	481,00	0,00	0.44	768,00	856,00	1.80	48.33
	7,00	481,00	0,00	0.44	736,00	889,00	2.17	40.82
	7,00	481,00	0,00	0.44	704,00	922,00	2.53	36.89
	7,00	451,00	0,00	0.44	796,00	888,00	2.37	36.27
	7,00	451,00	0,00	0.44	829,00	854,00	2.37	39.85
	7,00	451,00	0,00	0.44	863,00	819,00	2.37	42.47
	7,00	451,00	0,00	0.44	895,00	785,00	2.37	37.71
	7,00	445,00	0,00	0.44	869,00	826,00	1.00	36.34
	7,00	445,00	0,00	0.44	869,00	826,00	3.50	41.09
	7,00	460,00	0,00	0.44	854,00	811,00	2.41	44.61
	7,00	460,00	0,00	0.44	854,00	811,00	2.07	38.06
	7,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.41	47.16
	7,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.76	43.85
	7,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.76	46.47
	7,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	3.10	39.64
	7,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.41	48.40
	7,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.41	46.33
	7,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.76	44.75
	7,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.59	45.30
	7,00	463,00	5,00	0.44	784,00	875,00	2.41	53.02
	7,00	466,00	10,00	0.43	780,00	871,00	2.41	57.02
	7,00	466,00	10,00	0.43	813,00	837,00	2.41	52.47
	7,00	466,00	10,00	0.43	845,00	804,00	2.41	51.57
	7,00	469,00	15,00	0.43	776,00	807,00	2.41	55.43
	7,00	469,00	15,00	0.43	809,00	833,00	2.76	49.92
	7,00	469,00	15,00	0.43	841,00	800,00	2.76	40.40
	7,00	472,00	20,00	0.43	772,00	862,00	2.41	46.33
	7,00	472,00	20,00	0.43	772,00	862,00	1.03	35.58
	7,00	472,00	20,00	0.43	804,00	829,00	2.07	58.88
	7,00	472,00	20,00	0.43	837,00	796,00	2.07	54.74
	7,00	475,00	25,00	0.43	768,00	857,00	2.07	56.88
	28,00	481,00	0,00	0.44	832,00	790,00	1.80	65.43

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Garrison 2011	28,00	481,00	0,00	0.44	863,00	758,00	1.80	66.74
	28,00	481,00	0,00	0.44	895,00	725,00	1.80	54.33
	28,00	481,00	0,00	0.44	799,00	823,00	1.80	64.67
	28,00	481,00	0,00	0.44	768,00	856,00	1.80	66.26
	28,00	481,00	0,00	0.44	736,00	889,00	2.17	51.64
	28,00	481,00	0,00	0.44	704,00	922,00	2.53	49.16
	28,00	451,00	0,00	0.44	796,00	888,00	2.37	48.33
	28,00	451,00	0,00	0.44	829,00	854,00	2.37	53.99
	28,00	451,00	0,00	0.44	863,00	819,00	2.37	57.43
	28,00	451,00	0,00	0.44	895,00	785,00	2.37	49.57
	28,00	445,00	0,00	0.44	869,00	826,00	1.00	47.16
	28,00	445,00	0,00	0.44	869,00	826,00	3.50	56.33
	28,00	460,00	0,00	0.44	854,00	811,00	2.41	59.43
	28,00	460,00	0,00	0.44	854,00	811,00	2.07	49.71
	28,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.41	62.88
	28,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.76	59.23
	28,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	2.76	62.12
	28,00	460,00	0,00	0.44	821,00	845,00	3.10	53.64
	28,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.41	65.57
	28,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.41	61.02
	28,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.76	57.36
	28,00	460,00	0,00	0.44	787,00	879,00	2.59	60.40
	28,00	463,00	5,00	0.44	784,00	875,00	2.41	68.81
	28,00	466,00	10,00	0.43	780,00	871,00	2.41	74.33
	28,00	466,00	10,00	0.43	813,00	837,00	2.41	69.91
	28,00	466,00	10,00	0.43	845,00	804,00	2.41	67.02
	28,00	469,00	15,00	0.43	776,00	807,00	2.41	70.81
	28,00	469,00	15,00	0.43	809,00	833,00	2.76	68.33
	28,00	469,00	15,00	0.43	841,00	800,00	2.76	60.74
	28,00	472,00	20,00	0.43	772,00	862,00	2.41	60.19
28,00	472,00	20,00	0.43	772,00	862,00	1.03	50.88	
28,00	472,00	20,00	0.43	804,00	829,00	2.07	77.50	
28,00	472,00	20,00	0.43	837,00	796,00	2.07	73.98	
28,00	475,00	25,00	0.43	768,00	857,00	2.07	75.91	
Gettu 2002	7,00	651,00	37,00	0,27	815,00	761,00	7,50	61,61
	7,00	685,00	37,00	0,27	788,00	736,00	7,90	64,36
	7,00	701,00	37,00	0,27	774,00	723,00	8,10	61,91
	7,00	733,00	37,00	0,26	748,00	698,00	8,40	62,02
	28,00	651,00	37,00	0,27	815,00	761,00	7,50	71,81
	28,00	685,00	37,00	0,27	788,00	736,00	7,90	75,99

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Gettu 2002	28,00	701,00	37,00	0,27	774,00	723,00	8,10	70,89
	28,00	733,00	37,00	0,26	748,00	698,00	8,40	69,56
	91,00	651,00	37,00	0,27	815,00	761,00	7,50	98,12
	91,00	685,00	37,00	0,27	788,00	736,00	7,90	102,10
	91,00	701,00	37,00	0,27	774,00	723,00	8,10	102,51
	91,00	733,00	37,00	0,26	748,00	698,00	8,40	100,57
girich 2007	7,00	600,00	33.3	0.33	800,00	745,00	1.8	34.2
	7,00	585,00	40.2	0.33	800,00	745,00	1.76	25.3
	7,00	570,00	47.4	0.34	800,00	745,00	1.71	23,00
	7,00	555,00	55,00	0.35	800,00	745,00	1.66	16.4
	7,00	548,00	58.9	0.36	800,00	745,00	1.64	16,00
	7,00	540,00	63,00	0.36	800,00	745,00	1.62	15,00
	28,00	600,00	33.3	0.33	800,00	745,00	1.8	56.3
	28,00	585,00	40.2	0.33	800,00	745,00	1.76	47.6
	28,00	570,00	47.4	0.34	800,00	745,00	1.71	43.8
	28,00	555,00	55,00	0.35	800,00	745,00	1.66	37,00
	28,00	548,00	58.9	0.36	800,00	745,00	1.64	31,00
	28,00	540,00	63,00	0.36	800,00	745,00	1.62	26.5
	120,00	600,00	33.3	0.33	800,00	745,00	1.8	75.8
	120,00	585,00	40.2	0.33	800,00	745,00	1.76	62.3
	120,00	570,00	47.4	0.34	800,00	745,00	1.71	55.6
	120,00	555,00	55,00	0.35	800,00	745,00	1.66	54.6
120,00	548,00	58.9	0.36	800,00	745,00	1.64	47.5	
120,00	540,00	63,00	0.36	800,00	745,00	1.62	43.6	
Güneyisi 2010	28,00	550,00	0,00	0,32	728,00	935,00	8,43	67,66
	28,00	550,00	20,00	0,32	714,00	917,00	7,43	58,38
	28,00	550,00	40,00	0,32	700,00	899,00	7,43	50,94
	28,00	550,00	60,00	0,32	686,00	881,00	6,67	39,73
	28,00	450,00	0,00	0,44	826,00	868,00	3,50	51,44
	28,00	450,00	20,00	0,44	813,00	855,00	3,20	43,58
	28,00	450,00	40,00	0,44	801,00	842,00	2,96	37,39
	28,00	450,00	60,00	0,44	788,00	829,00	3,00	25,34
	90,00	550,00	0,00	0,32	728,00	935,00	8,43	76,20
	90,00	550,00	20,00	0,32	714,00	917,00	7,43	70,59
	90,00	550,00	40,00	0,32	700,00	899,00	7,43	65,16
	90,00	550,00	60,00	0,32	686,00	881,00	6,67	54,20
	90,00	450,00	0,00	0,44	826,00	868,00	3,50	61,56
	90,00	450,00	20,00	0,44	813,00	855,00	3,20	56,88
	90,00	450,00	40,00	0,44	801,00	842,00	2,96	50,43
	90,00	450,00	60,00	0,44	788,00	829,00	3,00	35,55

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Hameed 2005	3,00	450,00	22,00	0,42	846,00	846,00	7,53	24,29
	3,00	475,00	26,00	0,42	819,00	819,00	6,83	22,83
	3,00	475,00	26,00	0,42	819,00	819,00	4,73	26,11
	3,00	450,00	22,00	0,42	888,00	807,00	6,63	20,71
	3,00	450,00	22,00	0,42	888,00	807,00	7,53	25,70
	3,00	475,00	26,00	0,42	859,00	781,00	6,83	25,23
	3,00	475,00	26,00	0,41	859,00	781,00	4,73	25,10
	7,00	450,00	22,00	0,42	846,00	846,00	6,63	26,54
	7,00	450,00	22,00	0,42	846,00	846,00	7,53	28,15
	7,00	475,00	26,00	0,42	819,00	819,00	6,83	26,70
	7,00	475,00	26,00	0,42	819,00	819,00	4,73	28,60
	7,00	450,00	22,00	0,42	888,00	807,00	6,63	25,55
	7,00	450,00	22,00	0,42	888,00	807,00	7,53	29,21
	7,00	475,00	26,00	0,42	859,00	781,00	6,83	28,05
	7,00	475,00	26,00	0,41	859,00	781,00	4,73	28,49
	14,00	450,00	22,00	0,42	846,00	846,00	6,63	30,90
	14,00	450,00	22,00	0,42	846,00	846,00	7,53	31,50
	14,00	475,00	26,00	0,42	819,00	819,00	6,83	29,50
	14,00	475,00	26,00	0,42	819,00	819,00	4,73	31,99
	14,00	450,00	22,00	0,42	888,00	807,00	6,63	29,03
	14,00	450,00	22,00	0,42	888,00	807,00	7,53	32,04
	14,00	475,00	26,00	0,42	859,00	781,00	6,83	31,79
	14,00	475,00	26,00	0,41	859,00	781,00	4,73	30,90
	28,00	450,00	22,00	0,42	846,00	846,00	6,63	31,61
	28,00	450,00	22,00	0,42	846,00	846,00	7,53	37,81
	28,00	475,00	26,00	0,42	819,00	819,00	6,83	30,44
	28,00	475,00	26,00	0,42	819,00	819,00	4,73	37,51
	28,00	450,00	22,00	0,42	888,00	807,00	6,63	33,03
	28,00	450,00	22,00	0,42	888,00	807,00	7,53	39,54
	28,00	475,00	26,00	0,42	859,00	781,00	6,83	37,41
28,00	475,00	26,00	0,41	859,00	781,00	4,73	36,85	
Horta 2005	28.00	445.00	0,00	0.38	790.00	870.00	0.00	57.30
	28.00	553.70	16.65	0.37	795.25	862.13	0.00	74.20
	28.00	553.70	16.65	0.35	819.95	864.54	0.00	71.65
	28.00	553.70	16.65	0.35	821.16	861.52	0.00	67.60
	28.00	543.40	16.64	0.39	807.30	843.45	0.00	60.70
	28.00	551.90	16.60	0.36	813.93	859.12	0.00	68.95
	28.00	549.50	16.67	0.37	811.52	852.49	0.00	57.85
	28.00	569.90	17.55	0.31	728.98	872.37	0.00	86.75
	28.00	559.10	17.56	0.32	771.16	878.39	0.00	72.73

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Horta 2005	28.00	563.90	16.67	0.30	806.70	830.80	0.00	94.53
	28.00	539.90	16.30	0.33	795.25	839.84	0.00	70.73
	28.00	563.90	16.67	0.30	806.70	830.80	0.00	94.53
	28.00	542.90	16.32	0.34	822.97	846.46	0.00	60.72
	28.00	556.10	16.58	0.32	817.55	866.95	0.00	78.29
	28.00	556.70	16.89	0.33	726.57	869.36	0.00	67.17
Jau 2010	28,00	500,00	0,00	0,32	891,00	773,00	5,50	66,71
	28,00	500,00	20,00	0,38	830,00	773,00	5,50	44,06
	28,00	500,00	40,00	0,38	782,00	773,00	6,00	33,35
	28,00	500,00	60,00	0,39	734,00	773,00	6,50	23,66
jialin 2007	28,00	523,00	33,00	0,37	720,00	904,00	6,90	40,40
	28,00	526,00	34,00	0,37	716,00	903,00	6,90	39,65
	28,00	524,00	34,00	0,37	732,00	889,00	6,90	39,81
	28,00	518,00	33,00	0,37	730,00	900,00	6,90	41,07
	28,00	512,00	33,00	0,38	735,00	894,00	6,90	41,65
	28,00	518,00	34,00	0,37	718,00	904,00	6,90	42,57
	28,00	517,00	34,00	0,38	728,00	896,00	6,90	41,15
	28,00	511,00	33,00	0,38	717,00	914,00	6,90	43,58
	28,00	524,00	34,00	0,37	736,00	885,00	6,90	40,57
	28,00	515,00	34,00	0,38	728,00	898,00	6,90	39,48
khatib 2008	1,00	500,00	0,00	0,36	876,00	876,00	3,50	28,00
	1,00	500,00	20,00	0,36	845,00	876,00	3,50	13,26
	1,00	500,00	40,00	0,36	813,00	876,00	3,50	12,16
	1,00	500,00	60,00	0,36	782,00	876,00	3,50	3,68
	1,00	500,00	80,00	0,36	751,00	876,00	3,50	0,74
	7,00	500,00	0,00	0,36	876,00	876,00	3,50	48,26
	7,00	500,00	20,00	0,36	845,00	876,00	3,50	32,05
	7,00	500,00	40,00	0,36	813,00	876,00	3,50	31,54
	7,00	500,00	60,00	0,36	782,00	876,00	3,50	16,21
	7,00	500,00	80,00	0,36	751,00	876,00	3,50	4,42
	28,00	500,00	0,00	0,36	876,00	876,00	3,50	53,42
	28,00	500,00	20,00	0,36	845,00	876,00	3,50	39,79
	28,00	500,00	40,00	0,36	813,00	876,00	3,50	42,37
	28,00	500,00	60,00	0,36	782,00	876,00	3,50	24,32
	28,00	500,00	80,00	0,36	751,00	876,00	3,50	7,74
	56,00	500,00	0,00	0,36	876,00	876,00	3,50	61,90
	56,00	500,00	20,00	0,36	845,00	876,00	3,50	44,95
	56,00	500,00	40,00	0,36	813,00	876,00	3,50	50,11
56,00	500,00	60,00	0,36	782,00	876,00	3,50	29,11	
56,00	500,00	80,00	0,36	751,00	876,00	3,50	8,84	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Koehler 2007	1,00	475,00	0,00	0.33	862,00	865,00	2.66	11.25
	1,00	415,00	30,00	0.43	773,00	920,00	1.42	15.13
	1,00	475,00	30,00	0.4	736,00	875,00	1.5	17.99
	1,00	415,00	30,00	0.4	788,00	938,00	1.64	18.35
	1,00	535,00	33,00	0.3	819,00	822,00	1.88	19.08
	1,00	609,00	38,00	0.28	613,00	924,00	1.56	19.24
	1,00	632,00	40,00	0.27	603,00	908,00	1.71	20.62
	1,00	386,00	20,00	0.33	930,00	934,00	3.93	21.17
	1,00	578,00	38,00	0.28	713,00	875,00	1.61	22.54
	1,00	415,00	30,00	0.35	813,00	967,00	2.29	22.66
	1,00	415,00	20,00	0.4	794,00	944,00	2.24	22.82
	1,00	475,00	0,00	0.33	859,00	863,00	2.77	23.67
	1,00	494,00	25,00	0.33	840,00	843,00	1.13	23.95
	1,00	504,00	20,00	0.4	626,00	942,00	1.51	24.90
	1,00	475,00	0,00	0.28	893,00	896,00	4.7	24.99
	1,00	461,00	20,00	0.34	864,00	867,00	2.49	25.10
	1,00	415,00	20,00	0.4	694,00	1045,00	1.99	25.17
	1,00	537,00	30,00	0.3	819,00	822,00	1.83	25.73
	1,00	475,00	20,00	0.3	872,00	875,00	3.99	25.81
	1,00	475,00	20,00	0.35	841,00	845,00	1.99	26.03
	1,00	475,00	20,00	0.35	841,00	845,00	1.99	26.30
	1,00	581,00	35,00	0.28	713,00	875,00	1.7	26.66
	1,00	415,00	20,00	0.35	818,00	974,00	2.99	26.77
	1,00	463,00	20,00	0.33	864,00	867,00	2.64	27.44
	1,00	512,00	23,00	0.32	743,00	911,00	2.37	27.56
	1,00	494,00	20,00	0.33	843,00	846,00	1.36	27.94
	1,00	451,00	0,00	0.37	864,00	867,00	3.04	28.05
	1,00	506,00	26,00	0.31	754,00	926,00	2.6	28.12
	1,00	475,00	20,00	0.35	841,00	845,00	2.56	28.22
	1,00	501,00	24,00	0.32	754,00	926,00	2.3	28.28
	1,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	3.43	28.38
	1,00	525,00	27,00	0.3	743,00	911,00	2.59	29.28
	1,00	512,00	29,00	0.3	754,00	926,00	2.47	29.57
1,00	475,00	20,00	0.32	864,00	867,00	2.71	29.59	
1,00	553,00	32,00	0.28	650,00	979,00	2.11	29.61	
1,00	622,00	35,00	0.27	613,00	924,00	1.67	29.73	
1,00	475,00	20,00	0.35	673,00	1013,00	2.14	29.90	
1,00	475,00	20,00	0.35	757,00	929,00	2.28	30.05	
1,00	498,00	20,00	0.32	845,00	848,00	2.54	30.05	
1,00	415,00	0,00	0.35	913,00	910,00	3.89	30.07	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Koehler 2007	1,00	614,00	30,00	0.28	619,00	932,00	2.26	30.41
	1,00	475,00	20,00	0.35	841,00	845,00	2.21	30.51
	1,00	565,00	30,00	0.28	650,00	979,00	2.37	31.07
	1,00	415,00	30,00	0.3	837,00	996,00	2.83	31.20
	1,00	494,00	20,00	0.3	864,00	867,00	3.26	31.25
	1,00	494,00	15,00	0.33	847,00	850,00	2.84	31.37
	1,00	504,00	0,00	0.4	637,00	960,00	2.27	31.52
	1,00	475,00	30,00	0.3	792,00	942,00	3.24	31.94
	1,00	415,00	0,00	0.4	615,00	1147,00	2.65	32.30
	1,00	415,00	0,00	0.4	805,00	957,00	2.96	32.81
	1,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	3.11	32.86
	1,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	2.8	32.92
	1,00	415,00	0,00	0.4	805,00	957,00	3.11	33.36
	1,00	460,00	0,00	0.4	670,00	1009,00	2.76	33.44
	1,00	415,00	0,00	0.4	879,00	883,00	3.27	33.89
	1,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	3.11	34.02
	1,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	3.43	34.11
	1,00	386,00	0,00	0.38	733,00	1104,00	2.46	34.69
	1,00	475,00	0,00	0.3	886,00	841,00	4.98	35.08
	1,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	3.11	36.11
	1,00	578,00	25,00	0.27	650,00	979,00	2.6	36.53
	1,00	386,00	0,00	0.38	917,00	920,00	3.62	36.99
	1,00	475,00	0,00	0.35	862,00	858,00	3.38	37.13
	1,00	562,00	22,00	0.28	650,00	979,00	2.47	37.76
	1,00	386,00	0,00	0.38	825,00	1012,00	2.89	37.93
	1,00	475,00	0,00	0.35	855,00	858,00	3.03	38.20
	1,00	562,00	22,00	0.28	650,00	979,00	2.47	38.52
	1,00	562,00	22,00	0.28	650,00	979,00	2.63	38.53
	1,00	475,00	0,00	0.35	855,00	858,00	3.2	38.82
	1,00	562,00	22,00	0.28	650,00	979,00	2.47	39.00
	1,00	562,00	22,00	0.28	650,00	979,00	2.55	39.29
	1,00	475,00	0,00	0.35	855,00	858,00	3.03	39.69
	1,00	475,00	0,00	0.33	867,00	871,00	4.27	39.77
1,00	486,00	0,00	0.32	864,00	867,00	4.01	40.06	
1,00	475,00	0,00	0.35	684,00	1030,00	3.2	40.21	
1,00	415,00	0,00	0.35	829,00	986,00	3.89	40.74	
1,00	562,00	22,00	0.28	650,00	979,00	2.55	41.13	
1,00	494,00	0,00	0.33	857,00	861,00	4,00	41.44	
1,00	475,00	0,00	0.35	855,00	858,00	3.38	41.49	
1,00	475,00	0,00	0.35	855,00	858,00	3.03	41.53	



Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Koehler 2007	1,00	415,00	0,00	0.35	730,00	1092,00	2.8	41.60
	1,00	475,00	0,00	0.35	689,00	1030,00	2.85	41.84
	1,00	526,00	0,00	0.3	845,00	848,00	4.34	45.20
	1,00	502,00	0,00	0.3	864,00	867,00	4.52	45.53
	1,00	502,00	0,00	0.3	864,00	867,00	4.33	46.45
	28,00	415,00	30,00	0.43	773,00	920,00	1.42	51.99
	28,00	475,00	30,00	0.4	736,00	875,00	1.5	53.40
	28,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	3.43	58.05
	28,00	386,00	20,00	0.33	930,00	934,00	3.93	58.39
	28,00	415,00	30,00	0.4	788,00	938,00	1.64	59.52
	28,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	3.11	62.50
	28,00	415,00	20,00	0.4	794,00	944,00	2.24	62.60
	28,00	415,00	0,00	0.35	913,00	910,00	3.89	62.63
	28,00	415,00	0,00	0.4	615,00	1147,00	2.65	65.20
	28,00	386,00	0,00	0.38	733,00	1104,00	2.46	65.54
	28,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	3.11	65.84
	28,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	3.43	66.31
	28,00	415,00	0,00	0.4	805,00	957,00	2.96	67.20
	28,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	2.8	68.21
	28,00	475,00	20,00	0.35	841,00	845,00	1.99	68.46
	28,00	475,00	20,00	0.35	757,00	929,00	2.28	69.35
	28,00	415,00	30,00	0.35	813,00	967,00	2.29	69.53
	28,00	415,00	0,00	0.4	805,00	957,00	3.11	69.72
	28,00	415,00	0,00	0.4	703,00	1059,00	3.11	70.02
	28,00	415,00	0,00	0.4	879,00	883,00	3.27	70.53
	28,00	475,00	20,00	0.35	673,00	1013,00	2.14	70.55
	28,00	475,00	20,00	0.35	841,00	845,00	1.99	70.81
	28,00	386,00	0,00	0.38	825,00	1012,00	2.89	71.76
	28,00	475,00	20,00	0.35	841,00	845,00	2.56	73.28
	28,00	415,00	20,00	0.35	818,00	974,00	2.99	73.98
	28,00	475,00	20,00	0.35	841,00	845,00	2.21	74.38
	28,00	386,00	0,00	0.38	917,00	920,00	3.62	74.50
	28,00	475,00	0,00	0.35	855,00	858,00	3.2	74.79
28,00	475,00	20,00	0.3	872,00	875,00	3.99	76.26	
28,00	475,00	0,00	0.35	855,00	858,00	3.03	76.46	
28,00	475,00	0,00	0.35	855,00	858,00	3.03	76.53	
28,00	475,00	0,00	0.33	862,00	865,00	2.66	77.21	
28,00	475,00	0,00	0.35	855,00	858,00	3.38	78.11	
28,00	463,00	20,00	0.33	864,00	867,00	2.64	78.37	
28,00	501,00	24,00	0.32	754,00	926,00	2.3	78.44	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
KOEHLER 2007	28,00	475,00	0,00	0.35	855,00	858,00	3.03	78.52
	28,00	475,00	20,00	0.32	864,00	867,00	2.71	78.93
	28,00	415,00	0,00	0.35	829,00	986,00	3.89	79.23
	28,00	506,00	26,00	0.31	754,00	926,00	2.6	79.39
	28,00	475,00	0,00	0.33	859,00	863,00	2.77	80.04
	28,00	512,00	23,00	0.32	743,00	911,00	2.37	80.09
	28,00	581,00	35,00	0.28	713,00	875,00	1.7	80.10
	28,00	537,00	30,00	0.3	819,00	822,00	1.83	80.97
	28,00	475,00	30,00	0.3	792,00	942,00	3.24	81.21
	28,00	475,00	0,00	0.33	867,00	871,00	4.27	81.35
	28,00	475,00	0,00	0.35	862,00	858,00	3.38	83.07
	28,00	415,00	0,00	0.35	730,00	1092,00	2.8	83.13
	28,00	475,00	0,00	0.35	689,00	1030,00	2.85	83.16
	28,00	415,00	30,00	0.3	837,00	996,00	2.83	83.27
	28,00	535,00	33,00	0.3	819,00	822,00	1.88	83.79
	28,00	614,00	30,00	0.28	619,00	932,00	2.26	83.88
	28,00	475,00	0,00	0.35	684,00	1030,00	3.2	84.01
	28,00	565,00	30,00	0.28	650,00	979,00	2.37	84.23
	28,00	525,00	27,00	0.3	743,00	911,00	2.59	85.22
	28,00	562,00	22,00	0.28	650,00	979,00	2.55	85.48
	28,00	562,00	22,00	0.28	650,00	979,00	2.47	85.57
	28,00	622,00	35,00	0.27	613,00	924,00	1.67	85.74
	28,00	502,00	0,00	0.3	864,00	867,00	4.33	85.84
	28,00	609,00	38,00	0.28	613,00	924,00	1.56	86.15
	28,00	562,00	22,00	0.28	650,00	979,00	2.55	86.47
	28,00	578,00	38,00	0.28	713,00	875,00	1.61	87.19
	28,00	512,00	29,00	0.3	754,00	926,00	2.47	87.54
	28,00	632,00	40,00	0.27	603,00	908,00	1.71	88.17
	28,00	578,00	25,00	0.27	650,00	979,00	2.6	88.32
	28,00	553,00	32,00	0.28	650,00	979,00	2.11	88.43
28,00	562,00	22,00	0.28	650,00	979,00	2.63	88.49	
28,00	475,00	0,00	0.3	886,00	841,00	4.98	90.99	
28,00	475,00	0,00	0.28	893,00	896,00	4.7	93.07	
Kohler 2007	1.00	494.20	0,00	0.35	762.95	925.51	9.26	30.34
	1.00	478.18	20,00	0.35	762.95	921.95	9.22	22.27
	1.00	470.53	30,00	0.35	762.95	921.95	9.22	17.86
	1.00	463.17	40,00	0.35	762.95	921.95	9.22	12.76
	1.00	472.49	20,00	0.35	762.95	925.51	9.26	22.41
	1.00	464.89	40,00	0.35	762.95	925.51	9.26	14.82
	1.00	488.38	20,00	0.35	762.95	921.95	9.22	24.48

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Kohler 2007	1.00	485.54	30,00	0.35	762.95	921.95	9.22	18.96
	1.00	482.75	40,00	0.35	762.95	921.95	9.22	14.13
	28.00	494.20	0,00	0.35	762.95	925.51	9.26	61.71
	28.00	478.18	20,00	0.35	762.95	921.95	9.22	59.98
	28.00	470.53	30,00	0.35	762.95	921.95	9.22	56.88
	28.00	463.17	40,00	0.35	762.95	921.95	9.22	55.85
	28.00	472.49	20,00	0.35	762.95	925.51	9.26	58.95
	28.00	464.89	40,00	0.35	762.95	925.51	9.26	53.78
	28.00	488.38	20,00	0.35	762.95	921.95	9.22	64.12
	28.00	485.54	30,00	0.35	762.95	921.95	9.22	63.78
	28.00	482.75	40,00	0.35	762.95	921.95	9.22	64.40
krichna 2010	7,00	600,00	50,00	0,32	717,00	767,00	1,52	21,19
	7,00	600,00	50,00	0,32	717,00	764,00	1,52	20,69
	7,00	600,00	50,00	0,32	717,00	761,00	1,52	19,70
	7,00	600,00	50,00	0,32	717,00	756,00	1,52	19,33
	28,00	600,00	50,00	0,32	717,00	767,00	1,52	35,19
	28,00	600,00	50,00	0,32	717,00	764,00	1,52	33,82
	28,00	600,00	50,00	0,32	717,00	761,00	1,52	32,71
	28,00	600,00	50,00	0,32	717,00	756,00	1,52	32,34
	56,00	600,00	50,00	0,32	717,00	767,00	1,52	40,52
	56,00	600,00	50,00	0,32	717,00	764,00	1,52	39,27
	56,00	600,00	50,00	0,32	717,00	761,00	1,52	38,90
	56,00	600,00	50,00	0,32	717,00	756,00	1,52	37,91
Krishnapal 2013	1,00	480,00	0,00	0,40	890,00	810,00	13,30	30,11
	1,00	480,00	10,00	0,40	890,00	810,00	9,90	27,60
	1,00	480,00	20,00	0,40	890,00	810,00	9,68	21,75
	1,00	480,00	30,00	0,40	890,00	810,00	9,40	20,07
	1,00	450,00	0,00	0,45	890,00	810,00	9,25	26,76
	1,00	450,00	10,00	0,45	890,00	810,00	8,20	25,93
	1,00	450,00	20,00	0,45	890,00	810,00	6,40	20,07
	1,00	450,00	30,00	0,45	890,00	810,00	4,80	18,40
	28,00	480,00	0,00	0,40	890,00	810,00	13,30	43,49
	28,00	480,00	10,00	0,40	890,00	810,00	9,90	38,47
	28,00	480,00	20,00	0,40	890,00	810,00	9,68	35,13
	28,00	480,00	30,00	0,40	890,00	810,00	9,40	33,46
	28,00	450,00	0,00	0,45	890,00	810,00	9,25	41,82
	28,00	450,00	10,00	0,45	890,00	810,00	8,20	37,64
	28,00	450,00	20,00	0,45	890,00	810,00	6,40	34,29
28,00	450,00	30,00	0,45	890,00	810,00	4,80	32,62	
kuder 2012	7,00	415,00	0,00	0.40	939,00	820,00	1.69	51.9

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
kuder 2012	7,00	415,00	60,00	0.40	939,00	820,00	1.69	26.8
	7,00	415,00	80,00	0.40	939,00	820,00	1.69	17,00
	7,00	415,00	90,00	0.40	939,00	820,00	1.69	3.3
	14,00	415,00	0,00	0.40	939,00	820,00	1.69	62.1
	14,00	415,00	60,00	0.40	939,00	820,00	1.69	32.4
	14,00	415,00	80,00	0.40	939,00	820,00	1.69	25.8
	14,00	415,00	90,00	0.40	939,00	820,00	1.69	5,00
	28,00	415,00	0,00	0.40	939,00	820,00	1.69	67.3
	28,00	415,00	60,00	0.40	939,00	820,00	1.69	34.1
	28,00	415,00	80,00	0.40	939,00	820,00	1.69	40,00
	28,00	415,00	90,00	0.40	939,00	820,00	1.69	10.9
	56,00	415,00	0,00	0.40	939,00	820,00	1.69	71.6
	56,00	415,00	60,00	0.40	939,00	820,00	1.69	44.3
	56,00	415,00	80,00	0.40	939,00	820,00	1.69	50.7
	56,00	415,00	90,00	0.40	939,00	820,00	1.69	22.1
	112,00	415,00	0,00	0.40	939,00	820,00	1.69	71.8
	112,00	415,00	90,00	0.40	939,00	820,00	1.69	28.9
	168,00	415,00	0,00	0.40	939,00	820,00	1.69	74.3
	168,00	415,00	60,00	0.40	939,00	820,00	1.69	60.5
	168,00	415,00	80,00	0.40	939,00	820,00	1.69	59,00
168,00	415,00	90,00	0.40	939,00	820,00	1.69	32.8	
liu 2010	7,00	539,00	0,00	0,33	743,00	924,00	5,93	46,72
	7,00	517,00	20,00	0,34	743,00	924,00	4,65	39,13
	7,00	495,00	40,00	0,35	743,00	924,00	3,71	31,91
	7,00	472,00	60,00	0,36	743,00	924,00	3,21	18,05
	7,00	451,00	80,00	0,37	743,00	924,00	2,93	6,19
	28,00	539,00	0,00	0,33	743,00	924,00	5,93	54,01
	28,00	517,00	20,00	0,34	743,00	924,00	4,65	51,36
	28,00	495,00	40,00	0,35	743,00	924,00	3,71	43,11
	28,00	472,00	60,00	0,36	743,00	924,00	3,21	27,41
	28,00	451,00	80,00	0,37	743,00	924,00	2,93	11,79
	90,00	539,00	0,00	0,33	743,00	924,00	5,93	58,21
	90,00	517,00	20,00	0,34	743,00	924,00	4,65	57,47
	90,00	495,00	40,00	0,35	743,00	924,00	3,71	46,42
	90,00	472,00	60,00	0,36	743,00	924,00	3,21	36,33
	90,00	451,00	80,00	0,37	743,00	924,00	2,93	19,23
	180,00	539,00	0,00	0,33	743,00	924,00	5,93	61,97
	180,00	517,00	20,00	0,34	743,00	924,00	4,65	61,31
	180,00	495,00	40,00	0,35	743,00	924,00	3,71	50,11
180,00	472,00	60,00	0,36	743,00	924,00	3,21	41,56	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
liu 2010	180,00	451,00	80,00	0,37	743,00	924,00	2,93	27,41
Mahalingham 2011	3,00	450,00	30,00	0,43	237,00	926,00	2,77	13,57
	3,00	450,00	40,00	0,43	234,00	917,00	2,77	11,89
	3,00	450,00	50,00	0,43	231,00	907,00	2,50	8,55
	3,00	500,00	30,00	0,39	220,00	862,00	6,15	19,33
	3,00	500,00	40,00	0,39	217,00	850,00	6,15	16,36
	3,00	500,00	50,00	0,39	214,00	836,00	4,92	9,67
	3,00	550,00	30,00	0,35	213,00	835,00	4,74	18,22
	3,00	550,00	40,00	0,35	210,00	823,00	6,77	17,29
	3,00	550,00	50,00	0,35	211,00	824,00	5,41	11,53
	7,00	450,00	30,00	0,43	237,00	926,00	2,77	20,63
	7,00	450,00	40,00	0,43	234,00	917,00	2,77	19,51
	7,00	450,00	50,00	0,43	231,00	907,00	2,50	14,13
	7,00	500,00	30,00	0,39	220,00	862,00	6,15	29,74
	7,00	500,00	40,00	0,39	217,00	850,00	6,15	22,67
	7,00	500,00	50,00	0,39	214,00	836,00	4,92	17,29
	7,00	550,00	30,00	0,35	213,00	835,00	4,74	28,25
	7,00	550,00	40,00	0,35	210,00	823,00	6,77	25,46
	7,00	550,00	50,00	0,35	211,00	824,00	5,41	18,22
	28,00	450,00	30,00	0,43	237,00	926,00	2,77	37,45
	28,00	450,00	40,00	0,43	234,00	917,00	2,77	34,57
	28,00	450,00	50,00	0,43	231,00	907,00	2,50	31,04
	28,00	500,00	30,00	0,39	220,00	862,00	6,15	44,80
	28,00	500,00	40,00	0,39	217,00	850,00	6,15	39,03
	28,00	500,00	50,00	0,39	214,00	836,00	4,92	34,94
	28,00	550,00	30,00	0,35	213,00	835,00	4,74	47,95
	28,00	550,00	40,00	0,35	210,00	823,00	6,77	45,91
	28,00	550,00	50,00	0,35	211,00	824,00	5,41	37,17
	56,00	450,00	30,00	0,43	237,00	926,00	2,77	43,81
	56,00	450,00	40,00	0,43	234,00	917,00	2,77	41,54
	56,00	450,00	50,00	0,43	231,00	907,00	2,50	36,38
	56,00	500,00	30,00	0,39	220,00	862,00	6,15	52,02
	56,00	500,00	40,00	0,39	217,00	850,00	6,15	46,57
56,00	500,00	50,00	0,39	214,00	836,00	4,92	42,14	
56,00	550,00	30,00	0,35	213,00	835,00	4,74	54,83	
56,00	550,00	40,00	0,35	210,00	823,00	6,77	51,59	
56,00	550,00	50,00	0,35	211,00	824,00	5,41	42,10	
91,00	450,00	30,00	0,43	237,00	926,00	2,77	47,32	
91,00	450,00	40,00	0,43	234,00	917,00	2,77	43,77	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Mahalingham 2011	91,00	450,00	50,00	0,43	231,00	907,00	2,50	39,69
	91,00	500,00	30,00	0,39	220,00	862,00	6,15	56,04
	91,00	500,00	40,00	0,39	217,00	850,00	6,15	47,94
	91,00	500,00	50,00	0,39	214,00	836,00	4,92	43,02
	91,00	550,00	30,00	0,35	213,00	835,00	4,74	57,44
	91,00	550,00	40,00	0,35	210,00	823,00	6,77	54,00
	91,00	550,00	50,00	0,35	211,00	824,00	5,41	44,15
Muthpia 2012	7,00	500,00	0,00	0,35	900,00	600,00	17,50	16,73
	7,00	500,00	30,00	0,35	900,00	600,00	11,00	24,39
	7,00	500,00	40,00	0,35	900,00	600,00	10,75	23,92
	7,00	500,00	50,00	0,35	900,00	600,00	10,50	24,03
	28,00	500,00	0,00	0,35	900,00	600,00	17,50	16,73
	28,00	500,00	30,00	0,35	900,00	600,00	11,00	24,39
	28,00	500,00	40,00	0,35	900,00	600,00	10,75	23,92
	28,00	500,00	50,00	0,35	900,00	600,00	10,50	24,03
naik 2012	3,00	431,00	0,00	0.34	971,00	871,00	8.1	45,00
	3,00	443,00	35,00	0.32	923,00	845,00	4.8	29,00
	3,00	461,00	45,00	0.29	942,00	863,00	3,00	1.4
	3,00	467,00	55,00	0.26	939,00	862,00	3,00	1,00
	7,00	431,00	0,00	0.34	971,00	871,00	8.1	54,00
	7,00	443,00	35,00	0.32	923,00	845,00	4.8	44,00
	7,00	461,00	45,00	0.29	942,00	863,00	3,00	30,00
	7,00	467,00	55,00	0.26	939,00	862,00	3,00	9,00
	28,00	431,00	0,00	0.34	971,00	871,00	8.1	60,00
	28,00	443,00	35,00	0.32	923,00	845,00	4.8	62,00
	28,00	461,00	45,00	0.29	942,00	863,00	3,00	60,00
	28,00	467,00	55,00	0.26	939,00	862,00	3,00	48,00
Nehdi 2004	1,00	425,00	0,00	0.38	930,00	900,00	1.9	18.5
	1,00	430,00	50,00	0.38	925,00	905,00	1.5	2.7
	1,00	430,00	50,00	0.38	925,00	905,00	3.3	1.6
	7,00	425,00	0,00	0.38	930,00	900,00	1.9	30.4
	7,00	430,00	50,00	0.38	925,00	905,00	1.5	15.8
	7,00	430,00	50,00	0.38	925,00	905,00	3.3	12.2
	28,00	425,00	0,00	0.38	930,00	900,00	1.9	35.5
	28,00	430,00	50,00	0.38	925,00	905,00	1.5	20.4
	28,00	430,00	50,00	0.38	925,00	905,00	3.3	18.2
	91,00	425,00	0,00	0.38	930,00	900,00	1.9	40.7
	91,00	430,00	50,00	0.38	925,00	905,00	1.5	28.1
	91,00	430,00	50,00	0.38	925,00	905,00	3.3	26.5

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Nepomuceno 2014	7,00	649,00	16,00	0,26	726,00	772,00	13,65	45,25
	7,00	613,00	16,00	0,26	686,00	875,00	12,92	46,75
	7,00	604,00	16,00	0,28	772,00	772,00	12,71	41,49
	7,00	588,00	16,00	0,28	752,00	820,00	12,39	42,15
	7,00	551,00	16,00	0,31	822,00	772,00	11,34	36,89
	7,00	564,00	16,00	0,31	841,00	729,00	11,55	35,97
	7,00	618,00	16,00	0,28	790,00	729,00	13,02	42,15
	7,00	670,00	0,00	0,27	695,00	772,00	21,84	62,31
	7,00	633,00	0,00	0,27	656,00	875,00	20,58	63,73
	7,00	628,00	0,00	0,29	744,00	772,00	19,53	59,22
	7,00	575,00	0,00	0,31	794,00	772,00	17,22	56,62
	7,00	589,00	0,00	0,31	813,00	729,00	17,64	54,62
	7,00	643,00	0,00	0,29	761,00	729,00	19,95	60,47
	7,00	649,00	24,00	0,26	726,00	772,00	16,28	54,70
	7,00	633,00	24,00	0,26	706,00	820,00	15,86	52,53
	7,00	613,00	24,00	0,26	685,00	875,00	15,33	53,45
	7,00	607,00	25,00	0,27	774,00	772,00	15,12	52,02
	7,00	567,00	25,00	0,30	846,00	729,00	13,86	47,93
	7,00	620,00	25,00	0,27	792,00	729,00	15,54	52,28
	28,00	649,00	16,00	0,26	726,00	772,00	13,65	57,80
	28,00	613,00	16,00	0,26	686,00	875,00	12,92	56,46
	28,00	604,00	16,00	0,28	772,00	772,00	12,71	52,78
	28,00	588,00	16,00	0,28	752,00	820,00	12,39	54,20
	28,00	551,00	16,00	0,31	822,00	772,00	11,34	49,85
	28,00	564,00	16,00	0,31	841,00	729,00	11,55	47,51
	28,00	618,00	16,00	0,28	790,00	729,00	13,02	53,20
	28,00	670,00	0,00	0,27	695,00	772,00	21,84	71,09
	28,00	633,00	0,00	0,27	656,00	875,00	20,58	72,60
	28,00	628,00	0,00	0,29	744,00	772,00	19,53	69,34
	28,00	575,00	0,00	0,31	794,00	772,00	17,22	65,07
	28,00	589,00	0,00	0,31	813,00	729,00	17,64	64,24
	28,00	643,00	0,00	0,29	761,00	729,00	19,95	68,50
	28,00	649,00	24,00	0,26	726,00	772,00	16,28	67,16
	28,00	633,00	24,00	0,26	706,00	820,00	15,86	66,24
28,00	613,00	24,00	0,26	685,00	875,00	15,33	65,41	
28,00	607,00	25,00	0,27	774,00	772,00	15,12	62,31	
28,00	567,00	25,00	0,30	846,00	729,00	13,86	58,46	
28,00	620,00	25,00	0,27	792,00	729,00	15,54	63,32	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Ouchi 2003	7,00	575,00	20,00	0,30	840,00	744,00	5,75	52,19
	28,00	575,00	20,00	0,30	840,00	744,00	5,75	59,38
	7,00	470,00	0,00	0,32	868,00	868,00	6,11	34,38
	28,00	470,00	0,00	0,32	868,00	868,00	6,11	61,89
Pang 2005	7,00	468,00	8,55	0,35	710,00	1023,00	6,40	38,24
	7,00	468,00	11,75	0,35	706,00	1017,00	6,40	35,96
	7,00	468,00	14,96	0,35	701,00	1011,00	6,40	34,48
	7,00	530,00	0,00	0,32	755,00	984,00	6,50	34,78
	7,00	540,00	14,81	0,31	725,00	984,00	6,50	41,48
	7,00	540,00	25,00	0,31	705,00	984,00	6,50	32,05
	28,00	468,00	8,55	0,35	710,00	1023,00	6,40	44,43
	28,00	468,00	11,75	0,35	706,00	1017,00	6,40	42,81
	28,00	468,00	14,96	0,35	701,00	1011,00	6,40	44,36
	28,00	530,00	0,00	0,32	755,00	984,00	6,50	40,82
	28,00	540,00	14,81	0,31	725,00	984,00	6,50	49,37
	28,00	540,00	25,00	0,31	705,00	984,00	6,50	44,21
Patel 2003	1,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	12,00
	1,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	13,00
	1,00	400,00	60,00	0.39	886,00	900,00	1.40	7,00
	1,00	350,00	45,00	0.39	1024,00	900,00	1.23	11,00
	1,00	400,00	45,00	0.45	850,00	900,00	1.40	8,00
	1,00	430,00	54,00	0.335	874,00	900,00	0.86	9,00
	1,00	450,00	45,00	0.39	808,00	900,00	1.58	12,00
	1,00	370,00	36,00	0.355	1034,00	900,00	0.74	17,00
	1,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	13,00
	1,00	370,00	36,00	0.425	960,00	900,00	1.85	16,00
	1,00	430,00	36,00	0.425	827,00	900,00	2.15	15,00
	1,00	400,00	30,00	0.39	946,00	900,00	1.40	16,00
	1,00	370,00	54,00	0.425	930,00	900,00	0.74	6,00
	1,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	2.40	12,00
	1,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	12,00
	1,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	0.40	11,00
	1,00	430,00	54,00	0.355	872,00	900,00	2.15	13,00
	1,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	13,00
	1,00	400,00	45,00	0.33	982,00	900,00	1.40	14,00
	1,00	370,00	54,00	0.425	928,00	900,00	1.85	5,00
1,00	430,00	36,00	0.425	830,00	900,00	0.86	13,00	
7,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	27,00	
7,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	28,00	



Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Patel 2003	7,00	400,00	60,00	0.39	886,00	900,00	1.40	28,00
	7,00	350,00	45,00	0.39	1024,00	900,00	1.23	25,00
	7,00	400,00	45,00	0.45	850,00	900,00	1.40	19,00
	7,00	430,00	54,00	0.335	874,00	900,00	0.86	25,00
	7,00	450,00	45,00	0.39	808,00	900,00	1.58	29,00
	7,00	370,00	36,00	0.355	1034,00	900,00	0.74	34,00
	7,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	28,00
	7,00	370,00	36,00	0.425	960,00	900,00	1.85	30,00
	7,00	430,00	36,00	0.425	827,00	900,00	2.15	27,00
	7,00	400,00	30,00	0.39	946,00	900,00	1.40	29,00
	7,00	370,00	54,00	0.425	930,00	900,00	0.74	17,00
	7,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	2.40	29,00
	7,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	28,00
	7,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	0.40	27,00
	7,00	430,00	54,00	0.355	872,00	900,00	2.15	28,00
	7,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	28,00
	7,00	400,00	45,00	0.33	982,00	900,00	1.40	30,00
	7,00	370,00	54,00	0.425	928,00	900,00	1.85	20,00
	7,00	430,00	36,00	0.425	830,00	900,00	0.86	28,00
	28,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	49,00
	28,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	49,00
	28,00	400,00	60,00	0.39	886,00	900,00	1.40	44,00
	28,00	350,00	45,00	0.39	1024,00	900,00	1.23	44,00
	28,00	400,00	45,00	0.45	850,00	900,00	1.40	38,00
	28,00	430,00	54,00	0.335	874,00	900,00	0.86	46,00
	28,00	450,00	45,00	0.39	808,00	900,00	1.58	50,00
	28,00	370,00	36,00	0.355	1034,00	900,00	0.74	49,00
	28,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	49,00
	28,00	370,00	36,00	0.425	960,00	900,00	1.85	46,00
	28,00	430,00	36,00	0.425	827,00	900,00	2.15	48,00
	28,00	400,00	30,00	0.39	946,00	900,00	1.40	45,00
	28,00	370,00	54,00	0.425	930,00	900,00	0.74	31,00
	28,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	2.40	43,00
	28,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	47,00
	28,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	0.40	44,00
	28,00	430,00	54,00	0.355	872,00	900,00	2.15	52,00
28,00	400,00	45,00	0.39	916,00	900,00	1.40	45,00	
28,00	400,00	45,00	0.33	982,00	900,00	1.40	51,00	
28,00	370,00	54,00	0.425	928,00	900,00	1.85	33,00	
28,00	430,00	36,00	0.425	830,00	900,00	0.86	36,00	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Rizos 2006	1,00	481,00	0,00	0,36	790,00	790,00	3,40	43,61
	1,00	481,00	20,00	0,34	790,00	790,00	3,40	35,16
	3,00	481,00	0,00	0,36	790,00	790,00	3,40	51,34
	3,00	481,00	20,00	0,34	790,00	790,00	3,40	35,16
	7,00	481,00	0,00	0,36	790,00	790,00	3,40	59,78
	7,00	481,00	20,00	0,34	790,00	790,00	3,40	44,66
	28,00	481,00	0,00	0,36	790,00	790,00	3,40	66,81
	28,00	481,00	20,00	0,34	790,00	790,00	3,40	46,42
	54,00	481,00	0,00	0,36	790,00	790,00	3,40	63,99
	54,00	481,00	20,00	0,34	790,00	790,00	3,40	47,82
Sahmaran 2009	7,00	500,00	0,00	0.35	1038,00	639,00	6.75	55.9
	7,00	500,00	30,00	0.35	1008.2	621,00	6.75	40.6
	7,00	500,00	40,00	0.35	995.3	613,00	6.75	37.4
	7,00	500,00	50,00	0.35	987.8	608,00	6.75	24.5
	7,00	500,00	60,00	0.35	979.1	603,00	6.75	21.9
	7,00	500,00	70,00	0.35	968.4	597,00	6.75	14.9
	7,00	500,00	30,00	0.34	1006,00	620,00	6.75	38.6
	7,00	500,00	40,00	0.32	1003.9	618,00	6.75	34.5
	7,00	500,00	50,00	0.30	1010.3	628,00	6.75	32.0
	7,00	500,00	60,00	0.30	997.4	614,00	6.75	22.8
	7,00	500,00	70,00	0.30	995.2	613,00	6.75	18.3
	28,00	500,00	0,00	0.35	1038,00	639,00	6.75	62.2
	28,00	500,00	30,00	0.35	1008.2	621,00	6.75	57.3
	28,00	500,00	40,00	0.35	995.3	613,00	6.75	59.1
	28,00	500,00	50,00	0.35	987.8	608,00	6.75	40.8
	28,00	500,00	60,00	0.35	979.1	603,00	6.75	38.1
	28,00	500,00	70,00	0.35	968.4	597,00	6.75	34.4
	28,00	500,00	30,00	0.34	1006,00	620,00	6.75	52.4
	28,00	500,00	40,00	0.32	1003.9	618,00	6.75	52.3
	28,00	500,00	50,00	0.30	1010.3	628,00	6.75	47.5
	28,00	500,00	60,00	0.30	997.4	614,00	6.75	39.9
	28,00	500,00	70,00	0.30	995.2	613,00	6.75	32.8
	90,00	500,00	0,00	0.35	1038,00	639,00	6.75	69.9
	90,00	500,00	30,00	0.35	1008.2	621,00	6.75	64.9
	90,00	500,00	40,00	0.35	995.3	613,00	6.75	61.5
	90,00	500,00	50,00	0.35	987.8	608,00	6.75	47.1
90,00	500,00	60,00	0.35	979.1	603,00	6.75	48.8	
90,00	500,00	70,00	0.35	968.4	597,00	6.75	39.4	
90,00	500,00	30,00	0.34	1006,00	620,00	6.75	64.9	
90,00	500,00	40,00	0.32	1003.9	618,00	6.75	63.2	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Sahmaran 2009	90,00	500,00	50,00	0.30	1010.3	628,00	6.75	59.9
	90,00	500,00	60,00	0.30	997.4	614,00	6.75	52.1
	90,00	500,00	70,00	0.30	995.2	613,00	6.75	45.0
	180,00	500,00	0,00	0.35	1038,00	639,00	6.75	71,00
	180,00	500,00	30,00	0.35	1008.2	621,00	6.75	66.2
	180,00	500,00	40,00	0.35	995.3	613,00	6.75	68.3
	180,00	500,00	50,00	0.35	987.8	608,00	6.75	51,00
	180,00	500,00	60,00	0.35	979.1	603,00	6.75	51.7
	180,00	500,00	70,00	0.35	968.4	597,00	6.75	43,00
	180,00	500,00	30,00	0.34	1006,00	620,00	6.75	69.2
	180,00	500,00	40,00	0.32	1003.9	618,00	6.75	67.2
	180,00	500,00	50,00	0.30	1010.3	628,00	6.75	68.7
	180,00	500,00	60,00	0.30	997.4	614,00	6.75	62.6
	180,00	500,00	70,00	0.30	995.2	613,00	6.75	53.7
	365,00	500,00	0,00	0.35	1038,00	639,00	6.75	74.1
	365,00	500,00	30,00	0.35	1008.2	621,00	6.75	70.7
	365,00	500,00	40,00	0.35	995.3	613,00	6.75	67.3
	365,00	500,00	50,00	0.35	987.8	608,00	6.75	54.6
	365,00	500,00	60,00	0.35	979.1	603,00	6.75	56.4
	365,00	500,00	70,00	0.35	968.4	597,00	6.75	51.8
365,00	500,00	30,00	0.34	1006,00	620,00	6.75	75.6	
365,00	500,00	40,00	0.32	1003.9	618,00	6.75	75.6	
365,00	500,00	50,00	0.30	1010.3	628,00	6.75	70,00	
365,00	500,00	60,00	0.30	997.4	614,00	6.75	65.8	
365,00	500,00	70,00	0.30	995.2	613,00	6.75	61.6	
siddique 2011	7,00	550,00	15,00	0,41	910,00	590,00	10,73	24,72
	7,00	550,00	20,00	0,41	910,00	590,00	11,01	23,41
	7,00	550,00	25,00	0,42	910,00	590,00	9,91	21,34
	7,00	550,00	30,00	0,43	910,00	590,00	9,91	20,06
	7,00	550,00	35,00	0,44	910,00	590,00	9,91	19,05
	28,00	550,00	15,00	0,41	910,00	590,00	10,73	29,43
	28,00	550,00	20,00	0,41	910,00	590,00	11,01	27,73
	28,00	550,00	25,00	0,42	910,00	590,00	9,91	26,32
	28,00	550,00	30,00	0,43	910,00	590,00	9,91	25,64
	28,00	550,00	35,00	0,44	910,00	590,00	9,91	24,77
	90,00	550,00	15,00	0,41	910,00	590,00	10,73	49,34
	90,00	550,00	20,00	0,41	910,00	590,00	11,01	44,21
	90,00	550,00	25,00	0,42	910,00	590,00	9,91	36,61
	90,00	550,00	30,00	0,43	910,00	590,00	9,91	35,10
90,00	550,00	35,00	0,44	910,00	590,00	9,91	34,19	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
siddique 2011	365,00	550,00	15,00	0,41	910,00	590,00	10,73	51,22
	365,00	550,00	20,00	0,41	910,00	590,00	11,01	45,67
	365,00	550,00	25,00	0,42	910,00	590,00	9,91	38,87
	365,00	550,00	30,00	0,43	910,00	590,00	9,91	37,50
	365,00	550,00	35,00	0,44	910,00	590,00	9,91	36,58
sonebi 2004	7,00	390,00	26,00	0.45	913,00	837,00	3.12	32.3
	7,00	511,00	51,00	0.55	478,00	837,00	2.56	9.6
	7,00	310,00	32,00	0.65	910,00	837,00	2.48	11.1
	7,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	13.9
	7,00	430,00	51,00	0.45	786,00	837,00	3.44	15.5
	7,00	510,00	43,00	0.65	369,00	837,00	4.08	12.9
	7,00	390,00	26,00	0.65	709,00	837,00	0.78	12.8
	7,00	510,00	43,00	0.45	625,00	837,00	1.02	11.5
	7,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	17.5
	7,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	16.9
	7,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	15.3
	7,00	410,00	39,00	0.55	739,00	837,00	0.00	15.5
	7,00	310,00	32,00	0.45	1066,00	837,00	0.62	38.4
	7,00	477,00	34,00	0.55	594,00	837,00	2.39	17.0
	7,00	279,00	10,00	0.55	1006,00	837,00	1.40	39.5
	7,00	430,00	51,00	0.65	562,00	837,00	0.86	6.2
	7,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	14.7
	7,00	410,00	39,00	0.38	919,00	837,00	2.05	23.9
	7,00	410,00	39,00	0.55	746,00	837,00	4.10	15.8
	7,00	410,00	39,00	0.72	566,00	837,00	2.05	6.2
	7,00	343,00	47,00	0.55	891,00	837,00	1.72	12.0
	28,00	390,00	26,00	0.45	913,00	837,00	3.12	42.7
	28,00	511,00	51,00	0.55	478,00	837,00	2.56	17.0
	28,00	310,00	32,00	0.65	910,00	837,00	2.48	19.1
	28,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	24.1
	28,00	430,00	51,00	0.45	786,00	837,00	3.44	26.7
	28,00	390,00	26,00	0.65	709,00	837,00	0.78	26.6
	28,00	510,00	43,00	0.45	625,00	837,00	1.02	32.9
	28,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	26.0
	28,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	28.5
28,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	26.4	
28,00	410,00	39,00	0.55	739,00	837,00	0.00	27.3	
28,00	310,00	32,00	0.45	1066,00	837,00	0.62	54.3	
28,00	477,00	34,00	0.55	594,00	837,00	2.39	29.1	
28,00	279,00	10,00	0.55	1006,00	837,00	1.40	51.7	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
sonebi 2004	28,00	430,00	51,00	0.65	562,00	837,00	0.86	10.2
	28,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	25.3
	28,00	410,00	39,00	0.38	919,00	837,00	2.05	36.3
	28,00	410,00	39,00	0.55	746,00	837,00	4.10	26.7
	28,00	410,00	39,00	0.72	566,00	837,00	2.05	11.0
	28,00	343,00	47,00	0.55	891,00	837,00	1.72	22.1
	90,00	390,00	26,00	0.45	913,00	837,00	3.12	55.9
	90,00	511,00	51,00	0.55	478,00	837,00	2.56	29.5
	90,00	310,00	32,00	0.65	910,00	837,00	2.48	28.0
	90,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	41.5
	90,00	430,00	51,00	0.45	786,00	837,00	3.44	45.6
	90,00	510,00	43,00	0.65	369,00	837,00	4.08	21.8
	90,00	390,00	26,00	0.65	709,00	837,00	0.78	35.7
	90,00	510,00	43,00	0.45	625,00	837,00	1.02	44.9
	90,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	40.9
	90,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	42.8
	90,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	39.2
	90,00	410,00	39,00	0.55	739,00	837,00	0.00	42.0
	90,00	310,00	32,00	0.45	1066,00	837,00	0.62	74.2
	90,00	477,00	34,00	0.55	594,00	837,00	2.39	29.1
	90,00	279,00	10,00	0.55	1006,00	837,00	1.40	67.5
	90,00	430,00	51,00	0.65	562,00	837,00	0.86	19.7
	90,00	410,00	39,00	0.55	742,00	837,00	2.05	39.2
	90,00	410,00	39,00	0.38	919,00	837,00	2.05	48.3
90,00	410,00	39,00	0.55	746,00	837,00	4.10	40.3	
90,00	410,00	39,00	0.72	566,00	837,00	2.05	17.2	
90,00	343,00	47,00	0.55	891,00	837,00	1.72	34.2	
Sukumar 2008	1,00	525,00	52,00	0,34	842,00	772,00	2,10	6,81
	1,00	548,00	39,00	0,33	835,00	766,00	2,19	8,63
	1,00	570,00	27,00	0,32	828,00	759,00	2,28	10,67
	1,00	601,00	17,00	0,32	820,00	753,00	2,40	12,22
	1,00	633,00	8,00	0,31	813,00	745,00	2,53	13,56
	3,00	525,00	52,00	0,34	842,00	772,00	2,10	15,16
	3,00	548,00	39,00	0,33	835,00	766,00	2,19	19,44
	3,00	570,00	27,00	0,32	828,00	759,00	2,28	23,65
	3,00	601,00	17,00	0,32	820,00	753,00	2,40	26,92
	3,00	633,00	8,00	0,31	813,00	745,00	2,53	29,84
	7,00	525,00	52,00	0,34	842,00	772,00	2,10	23,08
	7,00	548,00	39,00	0,33	835,00	766,00	2,19	29,49
	7,00	570,00	27,00	0,32	828,00	759,00	2,28	36,42

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Sukumar 2008	7,00	601,00	17,00	0,32	820,00	753,00	2,40	41,66
	7,00	633,00	8,00	0,31	813,00	745,00	2,53	46,77
	14,00	525,00	52,00	0,34	842,00	772,00	2,10	29,20
	14,00	548,00	39,00	0,33	835,00	766,00	2,19	36,95
	14,00	570,00	27,00	0,32	828,00	759,00	2,28	45,60
	14,00	601,00	17,00	0,32	820,00	753,00	2,40	52,23
	14,00	633,00	8,00	0,31	813,00	745,00	2,53	59,12
	28,00	525,00	52,00	0,34	842,00	772,00	2,10	33,14
	28,00	548,00	39,00	0,33	835,00	766,00	2,19	42,02
	28,00	570,00	27,00	0,32	828,00	759,00	2,28	51,71
	28,00	601,00	17,00	0,32	820,00	753,00	2,40	59,33
	28,00	633,00	8,00	0,31	813,00	745,00	2,53	67,96
theran 2008	28,00	543,00	0,00	0.40	1093,00	494,00	0,00	74.67
	28,00	543,00	0,00	0.40	1015,00	576,00	0,00	70.77
	28,00	543,00	0,00	0.40	937,00	659,00	0,00	65.84
	28,00	508,00	0,00	0.45	1093,00	494,00	0,00	59.09
	28,00	508,00	0,00	45,00	937,00	659,00	0,00	57.38
	28,00	508,00	0,00	0.45	858,00	741,00	0,00	54.05
	28,00	477,00	0,00	0.50	1093,00	494,00	0,00	53.94
	28,00	477,00	0,00	0.50	1015,00	576,00	0,00	52.92
	28,00	477,00	0,00	0.50	858,00	741,00	0,00	49.54
	28,00	449,00	0,00	0.55	1015,00	576,00	0,00	41.60
	28,00	449,00	0,00	0.55	937,00	659,00	0,00	37.78
	28,00	449,00	0,00	0.55	858,00	741,00	0,00	36.56
	28,00	425,00	0,00	0.60	937,00	659,00	0,00	35.23
	28,00	432,00	0,00	0.40	1236,00	559,00	0,00	65.56
	28,00	432,00	0,00	0.40	1147,00	652,00	0,00	64.98
	28,00	432,00	0,00	0.40	1060,00	745,00	0,00	63.94
	28,00	404,00	0,00	0.45	1236,00	559,00	0,00	51.35
	28,00	404,00	0,00	0.45	1060,00	745,00	0,00	49.89
	28,00	404,00	0,00	0.45	971,00	838,00	0,00	47.97
	28,00	379,00	0,00	0.50	1236,00	559,00	0,00	44.36
	28,00	379,00	0,00	0.50	1147,00	652,00	0,00	43.24
	28,00	379,00	0,00	0.50	971,00	838,00	0,00	41.75
	28,00	357,00	0,00	0.55	1147,00	652,00	0,00	38.98
	28,00	357,00	0,00	0.55	1060,00	745,00	0,00	38.34
28,00	357,00	0,00	0.55	971,00	838,00	0,00	36.56	
28,00	338,00	0,00	0.60	1236,00	559,00	0,00	36.45	
28,00	338,00	0,00	0.60	1060,00	745,00	0,00	34.58	
28,00	338,00	0,00	0.60	971,00	838,00	0,00	32.06	

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
theran 2008	28,00	362,00	0,00	0.40	1325,00	599,00	0,00	59.70
	28,00	362,00	0,00	0.40	1231,00	699,00	0,00	58.61
	28,00	362,00	0,00	0.40	1136,00	799,00	0,00	57.31
	28,00	339,00	0,00	0.45	1325,00	599,00	0,00	51.31
	28,00	339,00	0,00	0.45	1136,00	799,00	0,00	49.70
	28,00	339,00	0,00	0.45	1041,00	899,00	0,00	47.21
	28,00	318,00	0,00	0.50	1325,00	599,00	0,00	44.02
	28,00	318,00	0,00	0.50	1231,00	699,00	0,00	38.80
	28,00	300,00	0,00	0.55	1231,00	699,00	0,00	37.03
	28,00	300,00	0,00	0.55	1136,00	799,00	0,00	34.76
	28,00	283,00	0,00	0.60	1325,00	599,00	0,00	28.85
	28,00	283,00	0,00	0.60	1136,00	799,00	0,00	27.66
Turk 2013	130,00	500,00	0,00	0,36	893,00	735,00	7,00	52,69
	130,00	500,00	25,00	0,39	910,00	735,00	6,75	43,91
	130,00	500,00	30,00	0,38	910,00	735,00	6,75	46,84
	130,00	500,00	35,00	0,38	910,00	735,00	6,75	48,51
	130,00	500,00	40,00	0,38	910,00	735,00	6,75	49,35
	3,00	500,00	0,00	0,36	893,00	735,00	7,00	30,95
	3,00	500,00	25,00	0,39	910,00	735,00	6,75	23,42
	3,00	500,00	30,00	0,38	910,00	735,00	6,75	19,24
	3,00	500,00	35,00	0,38	910,00	735,00	6,75	17,56
	3,00	500,00	40,00	0,38	910,00	735,00	6,75	16,73
	7,00	500,00	0,00	0,36	893,00	735,00	7,00	32,62
	7,00	500,00	25,00	0,39	910,00	735,00	6,75	25,09
	7,00	500,00	30,00	0,38	910,00	735,00	6,75	26,76
	7,00	500,00	35,00	0,38	910,00	735,00	6,75	24,26
	7,00	500,00	40,00	0,38	910,00	735,00	6,75	23,00
	28,00	500,00	0,00	0,36	893,00	735,00	7,00	48,09
	28,00	500,00	25,00	0,39	910,00	735,00	6,75	44,75
	28,00	500,00	30,00	0,38	910,00	735,00	6,75	46,00
	28,00	500,00	35,00	0,38	910,00	735,00	6,75	48,51
	28,00	500,00	40,00	0,38	910,00	735,00	6,75	49,35
Uysal 2011	7,00	550,00	0,00	0,33	869,00	778,00	8,80	47,82
	7,00	550,00	15,00	0,33	865,00	762,00	8,80	45,68
	7,00	550,00	25,00	0,33	887,00	752,00	8,80	45,24
	7,00	550,00	35,00	0,33	878,00	742,00	8,80	40,60
	28,00	550,00	0,00	0,33	869,00	778,00	8,80	55,93
	28,00	550,00	15,00	0,33	865,00	762,00	8,80	54,67
	28,00	550,00	25,00	0,33	887,00	752,00	8,80	54,08
	28,00	550,00	35,00	0,33	878,00	742,00	8,80	49,74

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Uysal 2011	90,00	550,00	0,00	0,33	869,00	778,00	8,80	62,63
	90,00	550,00	15,00	0,33	865,00	762,00	8,80	64,11
	90,00	550,00	25,00	0,33	887,00	752,00	8,80	63,59
	90,00	550,00	35,00	0,33	878,00	742,00	8,80	58,51
	400,00	550,00	0,00	0,33	869,00	778,00	8,80	74,05
	400,00	550,00	15,00	0,33	865,00	762,00	8,80	75,16
	400,00	550,00	25,00	0,33	887,00	752,00	8,80	77,88
	400,00	550,00	35,00	0,33	878,00	742,00	8,80	67,94
Xie 2002	28,00	693,00	30,00	0,29	620,00	945,00	9,01	58,65
	28,00	560,00	30,00	0,32	630,00	1002,00	7,28	53,35
	28,00	476,00	30,00	0,38	693,00	1053,00	6,19	28,00
	28,00	409,00	30,00	0,44	756,00	1100,00	5,32	19,97
Xie 2007	28,00	450,00	30,00	0,42	853,00	827,00	2,50	31,78
	28,00	501,00	30,00	0,34	853,00	827,00	5,00	41,99
	28,00	550,00	25,00	0,30	853,00	827,00	7,10	51,10
	28,00	493,00	30,00	0,34	845,00	852,00	5,00	41,23
	28,00	510,00	30,00	0,34	870,00	792,00	5,10	42,82
	28,00	523,00	30,00	0,34	890,00	750,00	5,20	39,98
Yazici 2008	3,00	600,00	0,00	0.28	880,00	780,00	7.98	47,00
	3,00	600,00	30,00	0.28	847,00	746,00	13.02	36,00
	3,00	600,00	40,00	0.28	837,00	735,00	19.98	24,00
	3,00	600,00	50,00	0.28	825,00	723,00	20.40	14.5
	3,00	600,00	60,00	0.28	815,00	712,00	22.02	7.5
	7,00	600,00	0,00	0.28	880,00	780,00	7.98	59,00
	7,00	600,00	30,00	0.28	847,00	746,00	13.02	45.5
	7,00	600,00	40,00	0.28	837,00	735,00	19.98	34.5
	7,00	600,00	50,00	0.28	825,00	723,00	20.40	26.5
	7,00	600,00	60,00	0.28	815,00	712,00	22.02	18.5
	28,00	600,00	0,00	0.28	880,00	780,00	7.98	62.5
	28,00	600,00	30,00	0.28	847,00	746,00	13.02	53.5
	28,00	600,00	40,00	0.28	837,00	735,00	19.98	49.5
	28,00	600,00	50,00	0.28	825,00	723,00	20.40	34,00
	28,00	600,00	60,00	0.28	815,00	712,00	22.02	28.5
	56,00	600,00	0,00	0.28	880,00	780,00	7.98	53,00
	56,00	600,00	30,00	0.28	847,00	746,00	13.02	52.5
	56,00	600,00	40,00	0.28	837,00	735,00	19.98	50,00
	56,00	600,00	50,00	0.28	825,00	723,00	20.40	36,00
	56,00	600,00	60,00	0.28	815,00	712,00	22.02	31,00
90,00	600,00	0,00	0.28	880,00	780,00	7.98	73,00	
90,00	600,00	30,00	0.28	847,00	746,00	13.02	58,00	



Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj
Yazici 2008	90,00	600,00	40,00	0.28	837,00	735,00	19.98	53,00
	90,00	600,00	50,00	0.28	825,00	723,00	20.40	44,00
	90,00	600,00	60,00	0.28	815,00	712,00	22.02	38,00
Zhu 2003	7,00	480,00	30,00	0,40	875,00	770,00	4,80	27,60
	7,00	510,00	20,00	0,35	915,00	750,00	4,60	42,15
	7,00	475,00	0,00	0,41	930,00	750,00	6,70	42,20
	28,00	480,00	30,00	0,40	875,00	770,00	4,80	41,74
	28,00	510,00	20,00	0,35	915,00	750,00	4,60	59,64
	28,00	475,00	0,00	0,41	930,00	750,00	6,70	55,87

**Note :**

**L** : Liant (Kg) ;

**P** : pourcentage du cendres volantes ;

**E/L** : rapport Eau/Liant ;

**S** : Sable (Kg) ;

**G** : Gravier ;

**SP** : Superplastifiant ;

**Fcj** : Résistance à la compression à j jours.

## Annexe 04

Base de données pour le modèle NF3

Prévision de la perméabilité aux ions chlores  
du BAP

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj	Charge passée (coulombs)
Patel 2003	28	400	45	0,39	916	900	1,4	49	805
	28	400	45	0,39	916	900	1,4	49	840
	28	400	60	0,39	886	900	1,4	44	1150
	28	350	45	0,39	1024	900	1,23	44	1100
	28	400	45	0,45	850	900	1,4	38	1155
	28	430	54	0,335	874	900	0,86	46	825
	28	450	45	0,39	808	900	1,58	50	945
	28	370	36	0,355	1034	900	0,74	49	894
	28	400	45	0,39	916	900	1,4	49	860
	28	370	36	0,425	960	900	1,85	46	1165
	28	430	36	0,425	827	900	2,15	48	1045
	28	400	30	0,39	946	900	1,4	45	1260
	28	370	54	0,425	930	900	0,74	31	1127
	28	400	45	0,39	916	900	2,4	43	905
	28	400	45	0,39	916	900	1,4	47	908
	28	400	45	0,39	916	900	0,4	44	960
	28	430	54	0,355	872	900	2,15	52	870
	28	400	45	0,39	916	900	1,4	45	990
	28	400	45	0,33	982	900	1,4	51	780
	28	370	54	0,425	928	900	1,85	33	1380
28	430	36	0,425	830	900	0,86	36	1100	
Sahmaran 2011	28	500	0	0,35	1038	639	6,75	62,2	3625
	28	500	30	0,35	1008,2	621	6,75	57,3	1000
	28	500	40	0,35	995,3	613	6,75	59,1	800
	28	500	50	0,35	987,8	608	6,75	40,8	1240
	28	500	60	0,35	979,1	603	6,75	38,1	750
	28	500	70	0,35	968,4	597	6,75	34,4	1237
	28	500	30	0,34	1006	620	6,75	52,4	2150
	28	500	40	0,32	1003,9	618	6,75	52,3	1400
	28	500	50	0,3	1010,3	628	6,75	47,5	1550
	28	500	60	0,3	997,4	614	6,75	39,9	1250
	28	500	70	0,3	995,2	613	6,75	32,8	1300
	90	500	0	0,35	1038	639	6,75	69,9	2650
	90	500	30	0,35	1008,2	621	6,75	64,9	550
	90	500	40	0,35	995,3	613	6,75	61,5	650
	90	500	50	0,35	987,8	608	6,75	47,1	455
	90	500	60	0,35	979,1	603	6,75	48,8	350
	90	500	70	0,35	968,4	597	6,75	39,4	500
	90	500	30	0,34	1006	620	6,75	64,9	700
	90	500	40	0,32	1003,9	618	6,75	63,2	730
	90	500	50	0,3	1010,3	628	6,75	59,9	680

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj	Charge passée (coulombs)
Sahmaran 2011	90	500	60	0,3	997,4	614	6,75	52,1	620
	90	500	60	0,3	997,4	614	6,75	52,1	620
	90	500	70	0,3	995,2	613	6,75	45	530
	180	500	0	0,35	1038	639	6,75	71	2000
	180	500	30	0,35	1008,2	621	6,75	66,2	530
	180	500	40	0,35	995,3	613	6,75	68,3	400
	180	500	50	0,35	987,8	608	6,75	51	450
	180	500	60	0,35	979,1	603	6,75	51,7	420
	180	500	70	0,35	968,4	597	6,75	43	415
	180	500	30	0,34	1006	620	6,75	69,2	430
	180	500	40	0,32	1003,9	618	6,75	67,2	440
	180	500	50	0,3	1010,3	628	6,75	68,7	435
	180	500	60	0,3	997,4	614	6,75	62,6	430
	180	500	70	0,3	995,2	613	6,75	53,7	450
	365	500	0	0,35	1038	639	6,75	74,1	1990
	365	500	30	0,35	1008,2	621	6,75	70,7	570
	365	500	40	0,35	995,3	613	6,75	67,3	400
	365	500	50	0,35	987,8	608	6,75	54,6	320
	365	500	60	0,35	979,1	603	6,75	56,4	318
	365	500	70	0,35	968,4	597	6,75	51,8	325
	365	500	30	0,34	1006	620	6,75	75,6	330
	365	500	40	0,32	1003,9	618	6,75	75,6	333
	365	500	50	0,3	1010,3	628	6,75	70	300
365	500	60	0,3	997,4	614	6,75	65,8	300	
365	500	70	0,3	995,2	613	6,75	61,6	230	
Siddique 2011	90	550	15	0,41	910	590	10,73	58,99	662
	90	550	20	0,41	910	590	11,01	52,86	649
	90	550	25	0,42	910	590	9,91	43,77	594
	90	550	30	0,43	910	590	9,91	41,96	634
	90	550	35	0,44	910	590	9,91	40,88	610
	365	550	15	0,41	910	590	10,73	61,24	381
	365	550	20	0,41	910	590	11,01	54,6	373
	365	550	25	0,42	910	590	9,91	46,47	303
	365	550	30	0,43	910	590	9,91	44,84	350
	365	550	35	0,44	910	590	9,91	43,73	310
Wongkeo 2014	28	600	0	0,3	1084	595	1,19	84	3400
	28	600	50	0,3	958	595	0,25	66,4	2000
	28	600	60	0,3	933	595	0,17	58	1800
	28	600	70	0,3	908	595	0,12	45,6	1750
	28	514	0	0,35	1131	621	1,5	83	4000
	28	514	50	0,35	1023	621	0,26	59,2	3100

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj	Charge passée (coulombs)
Wongkeo 2014	28	515	60	0,35	1001	621	0,19	52,6	2450
	28	514	70	0,35	980	621	0,13	39,8	2380
	28	450	0	0,4	1166	640	1,8	72,4	4600
	28	450	50	0,4	1072	640	0,26	41,9	3650
	28	450	60	0,4	1053	640	0,21	35,7	3230
	28	450	70	0,4	1034	640	0,13	31,7	2760
Mahalingham 2014	28	450	30	0,43	237	926	2,77	44,78	2380
	28	450	40	0,43	234	917	2,77	41,33	2129
	28	450	50	0,43	231	907	2,5	37,11	2134
	28	500	30	0,39	220	862	6,15	53,56	2187
	28	500	40	0,39	217	850	6,15	46,67	2437
	28	500	50	0,39	214	836	4,92	41,78	2378
	28	550	30	0,35	213	835	4,74	57,33	2727
	28	550	40	0,35	210	823	6,77	54,89	2655
	28	550	50	0,35	211	824	5,41	44,44	2111
	56	450	30	0,43	237	926	2,77	52,38	1345
	56	450	40	0,43	234	917	2,77	49,66	1391
	56	450	50	0,43	231	907	2,5	43,5	1465
	56	500	30	0,39	220	862	6,15	62,2	1432
	56	500	40	0,39	217	850	6,15	55,68	1835
	56	500	50	0,39	214	836	4,92	50,38	1654
	56	550	30	0,35	213	835	4,74	65,56	1239
	56	550	40	0,35	210	823	6,77	61,68	1561
	56	550	50	0,35	211	824	5,41	50,33	1438
	91	450	30	0,43	237	926	2,77	56,58	935
	91	450	40	0,43	234	917	2,77	52,33	840
	91	450	50	0,43	231	907	2,5	47,45	960
	91	500	30	0,39	220	862	6,15	67	848
	91	500	40	0,39	217	850	6,15	57,32	1040
	91	500	50	0,39	214	836	4,92	51,44	1054
91	550	30	0,35	213	835	4,74	68,67	820	
91	550	40	0,35	210	823	6,77	64,56	940	
91	550	50	0,35	211	824	5,41	52,78	885	
koo 2009	28	540	37	0,33	695	895	10,2	44,3	2255
	28	540	37	0,33	674	895	10,2	44,5	2250
	28	540	37	0,33	653	895	10,2	43,4	2000
	28	540	37	0,33	632	895	10,2	41,3	1570
	28	540	37	0,33	610	895	10,2	38,7	1550
	28	610	44	0,3	662	850	10,2	53,7	1680
	28	610	44	0,3	642	850	10,2	64,3	1500
	28	610	44	0,3	622	850	10,2	62,3	1300
	28	610	44	0,3	602	850	10,2	56,3	1150

Auteur	Age (j)	L	P	E/L	S	G	SP	Fcj	Charge passée (coulombs)
koo 2009	28	610	44	0,3	581	850	10,2	53,2	900
	28	610	44	0,27	616	850	10,8	59,1	800
	28	610	44	0,24	662	850	11,4	64,2	750

**Note :**

**L** : Liant (Kg) ;

**P** : pourcentage du cendres volantes ;

**E/L** : rapport Eau/Liant ;

**S** : Sable (Kg) ;

**G** : Gravier ;

**SP** : Superplastifiant ;