



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا المتعددة التقنيات

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

مخبر البناء و البيئة

LABORATOIRE CONSTRUCTION ET ENVIRONNEMENT

THESE

Présentée par

LEFKIR ABDELOUAHAB

Magister en Hydraulique

En vue de l'obtention du titre de

Doctorat en Hydraulique

THEME

**MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE
PAR LES MODELES NEUROFLOUS**

Travail soutenu le 06/07/2009 devant le jury composé de :

Pr. KERBACHI Rabah	Professeur	ENSP	Président
Pr. DECHEMI Noureddine	Professeur	ENSTP	Directeur de thèse
Pr. TOUAÏBIA Bénina	Professeur	ENSH	Examinatrice
Pr. REMINI Boualem	Professeur	U. Blida	Examineur
Dr. BESSENESSE Mohamed	MCA	U. Blida	Examineur
Mr. TAIBI Rachid	PDG	ANRH	Invité

Année universitaire 2008/2009

Ce travail est dédié à:

Mes parents pour tous leurs sacrifices.

Ma petite famille

Mes frères et sœurs

Ainsi qu'à mes neveux et nièces.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon directeur de thèse Professeur DECHEMI Nourdine, pour tous les sacrifices, les directives et conseils permanents qu'il m'a donné jusqu'à l'aboutissement de travail.

Je tiens aussi à remercier aussi Monsieur Pr R. KERBACHI d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance , ainsi que Pr. B.TOYBIA, Pr B. RMINI et Dr M. Benssenesse, d'avoir donné de leurs temps, malgré leurs obligations, afin d'examiner et enrichir ce travail par leurs précieuses remarques et suggestions. Je remercie aussi, Monsieur R. TAIBI, PDG de l'ANRH, d'avoir accepté notre invitation et d'avoir enrichi le débat par ses remarques fructueuses de part son expérience dans le domaine de la gestion des ressources hydriques.

Mes gratitudes et reconnaissances vont, aussi, à tous le personnel de l'ANRH, particulièrement le service Hydrologie pour leurs disponibilités à fournir toute information utile au développement du sujet.

Mes gratitudes vont aussi à tous mes enseignants et enseignantes, pendant tous mon cursus d'études, pour leurs disponibilités et leurs sacrifices et pour tout le savoir qu'ils m'ont fidèlement transmis.

En fin, mes sincères remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont apporté leur aide et leur appui pour mener à bien ce travail.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: L'EROSION: DESCRIPTION, IMPACTS ET REMEDES	6
I.1 PRINCIPAUX TYPES D'EROSION	6
I.2 EROSION HYDRIQUE	7
I.2.1 L'EROSION LAMINAIRE (OU EROSION EN NAPPE)	8
I.2.2 L'EROSION EN RIGOLES (OU EN GRIFFES)	8
I.2.3 L'EROSION EN RAVINES	8
I.2.4 LES MOUVEMENTS DE MASSE	9
I.2.5 LE SAPEMENT DES BERGES	9
I.3 LES FACTEURS D'EROSION	10
I.3.1 L'ORGANISATION MINERALE	10
I.3.2 LA FRACTURATION	10
I.3.3 LES MOUVEMENTS DE LA LITHOSPHERE	10
I.3.4 RELIEF DES TERRES EMERGEES	11
I.3.5 EFFET DE L'ATMOSPHERE	11
I.3.6 EFFET DE L'HYDROSPHERE	12
I.3.7 EFFET DE LA BIOSPHERE	12
I.4 TRANSPORT SOLIDE	12
I.4.1 LA CHAINE DES TRANSFERTS DE MATIERE	12
I.4.2 TRANSPORT ET EVACUATION DES PRODUITS ERODES	14
I.5 MODELISATION DE L'EROSION HYDRIQUE	15
I.5.1 MODELES PERMETTANT L'ESTIMATION DE LA CHARGE SEDIMENTAIRE.	15
I.5.2 APPROCHES VISANT L'ESTIMATION DES TAUX D'ABRASION	23
I.6 LES IMPACTS DE L'EROSION SUR L'ENVIRONNEMENT	24
I.6.1 PERTE DE SOL ARABLE	24
I.6.2 ENVASEMENT DES BARRAGES	26
CHAPITRE II: LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS	28
II.1 INTRODUCTION	28
II.2 HISTORIQUE	29
II.3 NEURONE BIOLOGIQUE ET NEURONE ARTIFICIEL	30

II.3.1	LE MODELE NEUROPHYSIOLOGIQUE	30
II.3.2	NEURONE ARTIFICIEL	31
II.4	LES MODELES MATHEMATIQUES	33
II.4.1	LE MODELE DE NEURONE FORMEL	33
II.4.2	FONCTIONS DE TRANSFERT	34
II.4.3	STRUCTURE D'INTERCONNEXION	34
II.5	PROCESSUS D'APPRENTISSAGE DES RESEAUX DE NEURONES	36
II.5.1	L'APPRENTISSAGE NON SUPERVISE	37
II.5.2	L'APPRENTISSAGE SUPERVISE	37
II.5.3	L'APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT	39
II.6	RESEAUX DE NEURONES MULTICOUCHE (PERCEPTRON MULTICOUCHE)	40
II.6.1	ALGORITHMES D'APPRENTISSAGE	40
II.6.2	LA BACKPROPAGATION	41
II.6.3	CONCLUSIONS	41
 CHAPITRE III: BASES MATHEMATIQUES DE LA LOGIQUE FLOUE		 43
III.1	INTRODUCTION	43
III.2	HISTORIQUE	44
III.3	NOTIONS DE BASE	45
III.3.1	L'IMPRECIS	45
III.3.2	L'INCERTAIN	45
III.3.3	UNIVERS DE DISCOURS ET CLASSES D'APPARTENANCE:	45
III.3.4	DEFINITION D'UNE VARIABLE LINGUISTIQUE	46
III.3.5	FONCTIONS D'APPARTENANCE	47
III.3.6	SOUS-ENSEMBLES FLOUS	48
III.3.7	OPERATIONS SUR LES ENSEMBLES FLOUS	50
III.4	LES SYSTEMES D'INFERENCE FLOUE (SIF)	51
III.4.1	REGLES FLOUES	52
III.4.2	LA FUZZIFICATION	53
III.4.3	LA DEFUZZIFICATION	54
III.5	APPRENTISSAGE DES MODELES FLOUS	55
III.5.1	IDENTIFICATION DE LA STRUCTURE DU MODELE	55
III.5.2	IDENTIFICATION DES PARAMETRES	56
III.6	OPTIMISATION NEUROFLOUE : LE MODELE ANFIS	57
 CHAPITRE IV: DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE		 61
IV.1	CONTEXTE REGIONAL	61
IV.1.1	CLIMAT	61
IV.1.2	HYDROLOGIE	62

IV.1.3	BASSINS HYDROGRAPHIQUES	63
IV.1.4	GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE	64
IV.1.5	PEDOLOGIE	65
IV.2	PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'ISSER	66
IV.2.1	CLIMAT	66
IV.2.2	HYDROLOGIE	69
IV.2.3	RESEAU HYDROGRAPHIQUE	69
IV.2.4	GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE	70
IV.2.5	COUVERT VEGETAL	71
IV.3	ETAT D'ENVASEMENT DU BARRAGE DE BENI AMRANE	71
IV.4	BASE DE DONNEES	72
IV.4.1	RESEAU DE MESURES HYDROMETRIQUES	72
IV.4.2	PARAMETRES STATISTIQUES DES DONNEES	72

CHAPITRE V: MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE PAR LA LOGIQUE

FLOUE 76

V.1	SCHEMAS CONCEPTUEL DU MODELE NEUROFLOU	76
V.2	CRITERES DE VALIDATION	77
V.2.1	CRITERE DE NASH	77
V.2.2	ERREUR SUR LE BILAN	78
V.2.3	LE COEFFICIENT DE CORRELATION :	78
V.2.4	LE COEFFICIENT DE DETERMINATION :	79
V.2.5	LA MOYENNE BIAISEE :	79
V.3	ORDINOGRAMME DES PROCEDURES ALGORITHMIQUES	79
V.4	SIMULATION NEUROFLOU EN UTILISANT LES VARIABLES BRUTES	82
V.4.1	ECHELLE JOURNALIERE AU PAS DE TEMPS HORAIRE	82
V.4.2	PERIODE D'OBSERVATION MENSUELLE AU PAS DE TEMPS JOURNALIER	87
V.4.3	PERIODE D'OBSERVATION ANNUELLE AU PAS DE TEMPS JOURNALIER	93
V.4.4	CONCLUSIONS	97
V.5	SIMULATION NEUROFLOU EN UTILISANT DES VARIABLES ADIMENSIONNELS	98
V.5.1	APPRENTISSAGE DANS LA MEME STATION	99
V.5.2	APPRENTISSAGE DE DEUX STATIONS DU MEME BASSIN VERSANT	108
V.5.3	APPRENTISSAGE ENTRE DEUX BASSINS VERSANTS PROCHES	117
V.5.4	APPRENTISSAGE ENTRE DEUX BASSINS VERSANTS ELOIGNES	126
V.6	CONCLUSION DU CHAPITRE	135
	CONCLUSION GENERALE	137
	BIBLIOGRAPHIE	142

Résumé.

Dans la présente étude, deux approches pour la simulation du dépôt solide ont été appliquées sur les échelles de temps horaires et journalières. La première approche est un modèle empirique de régression déduit du rapport entre l'écoulement observé et les valeurs de la concentration des matières en suspension. La deuxième étant basée sur la logique floue.

Cette dernière utilise des termes flous tels que « faible », « moyen » et « élevé », pour décomposer le processus débit-MES en plusieurs sous-ensembles flous et d'en déduire les quantités de matières solides en fonction du débit observé de la rivière. Les performances de cette méthode ont été évaluées en période de calage, mais aussi en période de validation, pour mieux juger de la capacité prédictive du modèle à ces deux échelles. En comparant la logique floue avec un modèle empirique régressif utilisant une relation de puissance, nous avons démontré la robustesse du modèle flou en tant qu'outil de quantification du transport solide.

Mots clés: érosion, transport solide, modèle empirique, Modèle Neuroflou

Summary

In the present study, two approaches to suspended sediment simulation were applied on hourly time scales for suspended sediment concentrations, and on daily time scales for water discharge and solid discharge analysis. The first approach is an empirical regression model based on a rating curve and uses a relationship between the observed runoff and the sediment concentration values. The model uses only two parameters, with the second being based on fuzzy logic. The simulation results confirm the performances and robustness of the fuzzy logic model for the two time scales. In fact, the Nash criterion, which is the principal validation criterion for the model, displayed high performances in calibration and validation periods.

The fuzzy logic model produced better estimates of the daily sediment yield than the empirical model during calibration and validation periods, and it represents a high prediction power. Thus, we have validated the fuzzy logic model as a tool for simulation of runoff of suspended sediments, and it can be explored to predict sediment loading and silting in Algerian reservoirs.

Key-words: erosion, suspended sediment, empirical model, neuronal-fuzzy model.

ملخص

تعتبر ظاهرة انجراف التربة من الظواهر الطبيعية الأكثر تعقيدا , إذ أنها نتاج عوامل مناخية و جيولوجية و كذا بشرية عدة . الجزائر باعتبار مناخها الشبه الجاف , مهددة بهذه الظاهرة التي تؤثر سلبا على الأراضي الزراعية من جهة , كما تؤدي إلى تفاقم ظاهرة تطين السدود من جهة أخرى.

يهدف هذا البحث إلى انجاز طريقة جديدة من اجل استقراء كمية تدفق المواد العالقة انطلاقا من معرفة كمية تدفق المياه وذلك باستعمال تقنية تعتمد في تحليلها على الذكاء الاصطناعي . النتائج المبهرة التي تحصلنا عليها , سواء الخاصة بالاستقراء على مستوى نفس الحوض و حتى على مستوى الأحواض المجاورة . تمكننا من تأكيد التمييز الذي تظهره هذه الطريقة مقارنة بالطريقة الكلاسيكية في نمذجة ظاهرة انجراف التربة.

LISTE DES FIGURES

Figure II .1:	Schématisation d'un neurone avec son arborisation	31
Figure II .2:	Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel	32
Figure II .3:	Structure d'un réseau multicouche	32
Figure II .4:	Schéma illustratif d'un neurone formel	33
Figure II .5:	Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel,	34
Figure II .6:	Schémas d'un réseau multicouche.	35
Figure II .7:	Réseau à connexions locales	35
Figure II .8:	Réseau à connexions récurrentes	35
Figure II .9:	Réseau à connexions complète	35
Figure II .10:	Schéma bloc de l'apprentissage supervisé	38
FIGURE III .1:	ETIQUETTE POUR LA VARIABLE LINGUISTIQUE TAILLE	47
Figure III .2:	L'allure de quelques fonctions d'appartenance usuelles	48
Figure III .3:	Fonction d'appartenance d'un ensemble classique et d'un ensemble flou	49
Figure III .4:	Exemple d'un support et d'un noyau	49
Figure III .5:	Structure d'un SIF	52
Figure III .6:	Fuzzification singleton	53
Figure III .7:	Défuzzification par la méthode du centre de gravité.	54
Figure III .8:	Réseau adaptatif du modèle ANFIS	59
Figure IV .1:	Grands bassins versants du nord Algérien	63
Figure IV .2:	Situation géographique du Bassin versant de l'Isser.	66
Figure IV .3:	Evaporation moyenne mensuelle à la station de Dar el Beïda (ONM 1975-94).....	66
Figure IV .4:	Evapotranspiration moyenne mensuelle à la station	67
Figure IV .5:	la température mensuelle à la station de Dar el Beïda (ONM 1975-94).....	67
Figure IV .6:	Caractéristiques de l'humidité à la station de Dar el Beïda (ONM 1975-94).....	68
Figure IV .7:	L'insolation moyenne mensuelle à la station de Dar el Beïda.....	68
Figure IV .8:	La moyenne mensuelle de la vitesse du vent à la station de Dar el Beïda (ONM 1975-94)	69
Figure IV .9:	Réseau hydrographique de l'Isser	70
Figure IV .10:	Lithologie du bassin versant de l'Isser.....	70
Figure IV .11:	Couvert végétal de l'Isser	71
Figure IV .12:	Variation des caractéristiques statistiques du débit liquide dans le temps.	73
Figure IV .13:	Variation des caractéristiques statistiques du débit solide dans le temps.	73
Figure IV .14:	Variation des caractéristiques statistiques du débit solide dans le temps.	74
Figure IV .15:	Caractéristiques statistiques du débit moyen journalier Station de la Traille.	74
Figure V .1:	Schéma du modèle Neuroflou.	76

Figure V .2:	Fonction de répartition des débits Liquides	77
Figure V .3:	Schéma du réseau neuroflou établi pour trois règles.	77
Figure V .4:	Ordinogramme des procédures de simulation débit liquide- débit solide par les modèles Neuroflous.	81
Figure V .5:	MES simulées- MES observées pour l'épisode1 (a) modèle flou (b) modèle empirique	83
Figure V .6:	Variation des MES au pas de temps horaire pour l'épisode1	83
Figure V .7:	MES simulées- MES observées pour l'épisode2 (a) modèle empirique (b) modèle flou	84
Figure V .8:	Variation des MES au pas de temps horaire pour l'épisode2	84
Figure V .9:	MES simulées- MES observées pour l'épisode3 (a) modèle flou (b) modèle empirique	85
Figure V .10:	Variation des MES au pas de temps horaire pour l'épisode3 (05/03/88).	85
Figure V .11:	MES simulées- MES observées pour l'épisode4 (a) modèle empirique (b) modèle flou	86
Figure V .12:	Variation MES au pas de temps horaire pour l'épisode4.	86
Figure V .13:	Qs_simulé Qs_observé pour l'épisode5: (a) modèle empirique (b) modèle flou	89
Figure V .14:	Variation de Qs au pas de temps journalier pour l'épisode5 (Janvier 1987).	89
Figure V .15:	Qs_simulé Qs_observé pour l'épisode6 (a) modèle empirique (b) modèle flou	90
Figure V .16:	Variation du débit solide au pas de temps journalier pour l'épisode6.	90
Figure V .17:	Qs_simulé Qs_observé pour l'épisode7 (a) modèle empirique (b) modèle flou	91
Figure V .18:	Variation du débit solide au pas de temps journalier pour l'épisode7.	91
Figure V .19:	Qs_simulé Qs_observé pour l'épisode8 (a) modèle empirique (b) modèle flou	92
Figure V .20:	Variation du débit solide au pas de temps journalier pour l'épisode8.	92
Figure V .21:	Corrélation Qs Sim- Qs Obs pour l'année 1974 (a) flou_Annuel (b) flou_Mensuel	95
Figure V .22:	Simulation de la Variation annuel (1974) du débit solide par modèle flou à apprentissage (a) annuel (b) mensuel.	95
Figure V .23:	Corrélation Qs Sim- Qs_Obs pour l'année 1975 (a) flou_Annuel (b) flou_Mensuel	96
Figure V .24:	Simulation de la Variation annuel (1975) du débit solide par modèle flou à apprentissage (a) annuel (b) mensuel.	96
Figure V .25:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_03_86) (a) Flou_Brute(b) Flou_Dim	101
Figure V .26:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_03_86).	101
Figure V .27:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_10_86) (a) flou_brute (b) Flou_Dim	102
Figure V .28:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_10_86)	102
Figure V .29:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_12_86) (a) flou_brute(b) Flou_Dim	103
Figure V .30:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_12_86).	103
Figure V .31:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_86) (a) Flou_Brute(b) Flou_Dim	105
Figure V .32:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_86).	105
Figure V .33:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_87) (a) Flou_Brute(b) Flou_Dim	106
Figure V .34:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_87).	106
Figure V .35:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_03_86) (a) Flou_Brute(b) Flou_Dim	109
Figure V .36:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_03_86).	109
Figure V .37:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_10_86) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim	110
Figure V .38:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_10_86)	110
Figure V .39:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_12_86) (a) Flou_Brute(b) Flou_Dim	111
Figure V .40:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_12_86).	111
Figure V .41:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_86) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim	114

Figure V .42:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_86).	114
Figure V .43:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_87) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim	115
Figure V .44:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_87).	115
Figure V .45:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_03_86) (a) Flou_Brute(b) Flou_Dim	118
Figure V .46:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_03_86).	118
Figure V .47:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_10_86) (a) Flou_Brute(b))Flou_Dim	119
Figure V .48:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_10_86)	119
Figure V .49:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_12_86) (a) Flou_Brute(b) Flou_Dim	120
Figure V .50:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_12_86).	120
Figure V .51:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_86) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim 123	
Figure V .52:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_86).	123
Figure V .53:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_87) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim 124	
Figure V .54:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_87).	124
Figure V .55:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_05_03_86) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim	127
Figure V .56:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_05_03_86).	127
Figure V .57:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_05_10_86) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim	128
Figure V .58:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_05_10_86)	128
Figure V .59:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_05_12_86) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim	129
Figure V .60:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_05_12_86).	129
Figure V .61:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_05_86) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim 132	
Figure V .62:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_05_86).	132
Figure V .63:	Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_05_86) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim 133	
Figure V .64:	Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_05_87).	133

LISTE DES TABLEAUX

Tableau V .1:	Critères de validation pour l'épisode1 (18/01/1972).	Erreur ! Signet non défini.
Tableau V .2:	Critères de validation pour l'épisode2 (06/03/86)	84
Tableau V .3:	Critères de validation pour l'épisode3 (05/03/1988)	85
Tableau V .4:	Critères de validation pour l'épisode4 (empirique, flou)	86
Tableau V .5:	Critères de validation pour l'épisode5 (Janvier/1987)	89
Tableau V .6:	Critères de validation pour l'épisode6 (Fev. 1987).	90
Tableau V .7:	Critères de validation des deux modèles pour l'épisode7 (Mars/1987).	91
Tableau V .8:	Critères de validation des deux modèles pour l'épisode8 (mai/1989)	92
Tableau V .9:	Critères de validation des deux modèles année 1974 (empirique, flou)	95
Tableau V .10:	Critères de validation des deux modèles année 1975(empirique, flou)	96
Tableau V .11:	Critères de validation (Episode 02_09_03_86).	101
Tableau V .12:	Critères de validation (Episode 02_09_10_86)	102
Tableau V .13:	Critères de validation (Episode 02_09_12_86)	103
Tableau V .14:	Critères de validation (Episode 02_09_86)	105
Tableau V .15:	Critères de validation (Episode 02_09_87)	106
Tableau V .16:	Critères de validation (Episode 02_03_86).	109
Tableau V .17:	Critères de validation (Episode 02_10_86)	110
Tableau V .18:	Critères de validation (Episode 02_12_86)	111
Tableau V .19:	Critères de validation (Episode 02_86)	114
Tableau V .20:	Critères de validation (Episode 02_87)	115
Tableau V .21:	Critères de validation (Episode 02_09_03_86).	118
Tableau V .22:	Critères de validation (Episode 02_09_10_86)	119
Tableau V .23:	Critères de validation (Episode 02_09_12_86)	120
Tableau V .24:	Critères de validation (Episode 02_09_86)	123
Tableau V .25:	Critères de validation (Episode02_09_87)	124
Tableau V .26:	Critères de validation (Episode 02_05_03_86).	127
Tableau V .27:	Critères de validation (Episode 02_05_10_86)	128
Tableau V .28:	Critères de validation (Episode 02_05_12_86)	129
Tableau V .29:	Critères de validation (Episode 02_05_86)	132
Tableau V .30:	Critères de validation (Episode 02_05_87)	133

Introduction générale

« Et il n'est rien dont Nous n'ayons les réserves et Nous ne le faisons descendre que dans une mesure déterminée, et Nous envoyons les vents féconds; et Nous faisons alors descendre du ciel une eau dont Nous vous abreuvons et que vous n'êtes pas en mesure de conserver »

Coran (Sourate El Hidjr Ayates 21-22)

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie, selon un rapport du Conseil National Economique et Social (CNES), se situe parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant et par an (250 l/j/ha). Estimée à environ 500 m³ à l'heure actuelle, elle ne sera que de 430 m³ en 2020 et serait encore plus réduite ramenée aux ressources en eau mobilisables.

La problématique de l'eau est indissociable du développement durable dans la mesure où l'eau doit permettre de répondre aux besoins, aussi bien qualitatives que quantitatives, des générations actuelles sans hypothéquer, par des effets peu ou non réversibles, la capacité des générations futures à satisfaire les leurs. L'eau n'est pas uniquement une matière première renouvelée mais finie et irrégulière, elle n'est pas non plus un don de ciel inépuisable et éternellement pure. Le début du 21^{ème} siècle s'annonce donc sous le signe d'une aggravation des pénuries d'eau, particulièrement dans les régions occidentales du pays en dépit du recours à d'autres formes de mobilisation de l'eau envisagée.

Les barrages ont été longtemps le principal vecteur disponible en matière de domestication des eaux superficielles. Néanmoins, en Algérie, les barrages ne sont pas les principaux pourvoyeurs d'eau, ils sont largement dépassés par les forages. La capacité de mobilisation est répartie, globalement, entre les barrages à 21,4 %, les forages à 72,6% et les sources à 6,0. Les conditions naturelles et économiques du pays ne permettent pas d'avoir des barrages de plus grandes capacités comme c'est le cas par exemple du Maroc qui avec 80 barrages mobilise une capacité totale de 10 milliards de m³.

L'Algérie, caractérisée par un climat semi-aride, est menacée par l'érosion des terres agricoles qui provoque l'augmentation du transport solide et l'envasement croissant des barrages. La dégradation du milieu a des conséquences très néfastes sur la productivité des terres et sur la qualité des eaux.

En effet, Selon l'ANRH, sur les 35 bassins versants de barrages en exploitation étudiés, plusieurs sont arables sur près de 40% de leur superficie, il s'agit notamment de Bouroumi (71%), Ighil Emda (60%), Fergoug (53%), Béni Amrane (49%), Sarno et Bakhadda (48%), Eraguène (41%), Ain Dalia (40%), Bouhnifia (39%) et K'sob (38%). Cette situation se traduit par un envasement des barrages qui perdent ainsi une grande partie de leur capacité de régularisation.

Un levé bathymétrique réalisé par l'Agence nationale des Barrages en 1986, fait apparaître que l'envasement avait atteint un volume de 300 millions de m³ pour les 16 ouvrages pris en considération. A défaut d'un levé bathymétrique plus récent, on peut estimer sur la base des taux d'envasement, que pour l'ensemble des barrages aujourd'hui en exploitation, l'envasement serait de l'ordre de 800 millions de m³ pour une capacité totale de 4,9 milliards de m³.

Malgré les efforts de lutttes antiérosives telles que le reboisement et la reforestation de 800 000 ha (ceinture verte) et l'aménagement de banquettes (d'absorption ou de diversion) sur 350 000 ha cultivés, la dégradation de la végétation et des sols continue. En effet, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus élevées d'Afrique du Nord. Selon DEMMAK (1982), ces taux varient entre 100 et 2 000 tonnes/km²/an, avec une concentration en MES comprise entre 16 et 40 g/L.

Les causes de cette érosion sont diverses : (i) agricoles, les façons culturales et les systèmes d'irrigation ayant contribué à développer une sévère dégradation de la couverture végétale et du réseau hydraulique (ARABI, 1991, ROOSE, 1994); (ii) écologiques, le surpâturage et les feux de forêts ayant provoqué le défrichement des fortes pentes; et enfin (iii) hydroclimatiques, les pluies en Algérie étant souvent intenses (l'indice d'érosivité R varie entre 200 et 350 unités dans certaines régions). On estime que 40 000 ha de terres cultivables sont perdus chaque année.

La dégradation du couvert végétal et des sols entraîne l'augmentation de la sensibilité de ces derniers à l'érosion, la dégradation des berges et du lit des rivières, l'augmentation des débits de pointe et des inondations et, par conséquent, l'augmentation du transport solide. Ce dernier provoque l'envasement des barrages algériens, à raison de 3 % chaque année, et a sensiblement réduit leur capacité de stockage (ANRH, 2000).

Face à cette situation, des procédés d'urgence ont été utilisés, d'abord préventifs tels que l'aménagement de plusieurs ravines et micro bassins versants, l'installation d'un réseau de dispositifs de mesure du ruissellement et de l'érosion (ROOSE, 2004), puis curatifs tels que la surélévation des digues (barrages de Hamiz), la construction de barrages de décantation (barrage de Boughezoul à l'amont du barrage de Ghrib), ou encore la technique du soutirage qui a enregistré de bons résultats au barrage d'Ighil Emda (Remini 2005). L'ampleur de cette érosion hydrique ainsi que les processus mis en jeu sont encore très mal connus.

Pour quantifier les transports solides, des modèles mathématiques ont été développés selon trois approches :

Les modèles empiriques qui mettent en relation le flux de sédiments à l'exutoire et les différentes variables explicatives climatiques et biophysiques (débit ou intensité de pluie, érodabilité du sol). Nous pouvons citer deux exemples de modèles empiriques : l'équation universelle de perte en sol de WISCHMEIER et SMITH (1960), ou encore les modèles régressifs (débit-MES) (WALLING et WEBB, 1981).

Les modèles conceptuels qui prennent en considération les différents mécanismes tels que le détachement de sédiments par un assemblage de réservoirs (ex. : Modèle de VAN SICKLE et BESCHTA, 1983);

Enfin les modèles physiques qui explorent des lois physiques telles que l'équation de Saint-Venant pour la phase liquide, et des équations de transport pour la phase solide.

Les méthodes empiriques (formules empiriques) permettent une estimation globale des pertes de terre, (GAFREJ, 1993). Les modèles conceptuels, qui prennent en considération la dynamique de l'érosion, ont l'avantage d'estimer des flux à différents pas de temps, mais nécessitent une période de calage relativement longue, et les pics de concentrations des MES sont généralement sous-estimés (PICOUET et al. 2001). Pour les modèles physiques distribués, leur principal avantage est qu'ils permettent d'étudier la variabilité spatiale de l'érosion, et d'explorer différents endroits du bassin. Cependant, ils nécessitent l'introduction d'un nombre élevé de paramètres.

Dans notre étude, nous avons exploité une nouvelle méthode d'extrapolation des concentrations des matières en suspension, basée sur l'association de la théorie de la logique floue avec celle des réseaux de neurones (neuroflou). Cette dernière permet, à partir des valeurs des MES obtenues en fonction des débits pendant la période d'apprentissage, d'extrapoler de manière satisfaisante les concentrations des MES, en particulier dans le cas des débits de crue.

Pour aboutir aux objectifs visés, nous avons adopté la démarche suivante :

Le premier chapitre, est consacré à la description du phénomène d'érosion, son impact sur l'environnement, particulièrement sur l'envasement des retenues, ainsi qu'aux différentes techniques de lutes antiérosives. On trouve aussi, une présentation des différents modèles développés.

Le deuxième chapitre a été développé dans le but d'explorer les possibilités de la théorie de réseaux de neurones dans des domaines divers, particulièrement dans la modélisation. Après un bref passage sur les travaux de recherches

antérieurs, une description du fondement mathématique des réseaux de neurones artificiels a été présentée dans ce chapitre.

Le troisième chapitre est consacré pour le développement de la théorie de la logique floue. Une description du fondement mathématique de la logique floue a été présentée.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, Il s'agit du bassin versant de l'Isser situé au nord de l'Algérie. Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats de la modélisation du transport solide par deux modèles (modèle empirique, modèle neuroflou).

Une conclusion générale est présentée à la fin de ce travail, après l'application du modèle neuroflou présentée dans le cinquième chapitre.

CHAPITRE I

L'EROSION: DESCRIPTIONS, MODELISATION ET REMEDES

CHAPITRE I: L'ÉROSION: DESCRIPTION, IMPACTS ET REMÈDES

I.1 PRINCIPAUX TYPES D'ÉROSION

Il existe différents types d'érosion dont les principaux sont :

L'érosion glaciaire: Les mouvements des glaciers provoquent une action morphogénique. Ils entraînent et évacuent des débris, ils sculptent, incisent, façonnent les substrats sur lesquels ils se déplacent et créent des modelés spécifiques par abrasion, arrachement de débris et accumulation de dépôts. Simultanément, un glacier en mouvement transporte, érode, dépose les produits entraînés. Les glaciers sont capables d'entraîner dans leur mouvement tous les objets qui tombent à leur surface. Les débris proviennent des pentes rocheuses supra glaciaires. Ce sont des débris d'origine périglaciaire, qui se détachent des parois déneigées en été ou de celles trop raides pour que la neige s'y accumule. Aux débris périglaciaires s'ajoutent les débris produits par les glaciers, débris en provenance du lit glaciaire, qui prouvent l'action érosive des glaciers simultanément à leur action d'entraînement de ces débris.

L'érosion éolienne: La capacité érosive du vent se limite aux particules fines : argile, limon, sable, cendre, poussières. Les sables grossiers (0,5 mm à 1 mm) sont déplacés par roulement. Les sables moyens (0,1 mm à 0,5 mm) effectuent des bonds successifs jusqu'à 2 m de hauteur (saltation). Les particules inférieures à 0,08 mm sont emportées en suspension. Le vent agit là où la végétation est discontinue et les climats secs. La rareté de la matière organique et la dessiccation privent les formations détritiques de liant et de cohésion. Dans les épaisses couches de sable, le vent modèle et remanie sur place des ensembles de dunes. Les formes variées des dunes et de leur assemblage dépendent de la direction des vents dominants.

Érosion marine: L'érosion marine s'exerce principalement sur les littoraux par l'action des vagues qui sont de puissants agents de destruction. Le déferlement roule le sable en un mouvement de va-et-vient incessant, qui use les estrans rocheux. Les tempêtes projettent les sédiments vers le haut de plage sur les côtes basses. Sur les côtes rocheuses les vagues exercent de véritables coups de bélier accompagnés des rafales de mitraille des pierres. Le sapement de la base des falaises vives et les fissures par appel au vide à la partie supérieure soumise aussi aux agents météoriques provoquent des écroulements de morceaux entiers et le recul de ces falaises, laissant devant elles une plate-forme d'abrasion marine.

Érosion anthropique : À l'état naturel, le sol est le plus souvent protégé par le couvert végétal. Les végétaux et leurs racines retiennent le sol, le protégeant à la fois du ruissellement et du vent. L'agriculture, l'extension des zones urbaines, le développement industriel et la construction de routes portent atteinte aux modelés, aux formations superficielles et aux sols. Dans les milieux fragiles, le surpâturage peut à terme transformer des terres de parcours en désert, tout comme l'extension des cultures peut avoir des conséquences désastreuses.

Érosion hydrique L'érosion par les eaux courantes s'exerce sur les versants et dans le lit des cours d'eau. Les filets de ruissellement entraînent et poussent de minuscules particules ; ils sont déviés par les moindres obstacles, se divisent en bras et rejoignent d'autres films d'eau. À l'issue de plusieurs précipitations importantes, les filets balayent successivement toutes les portions du versant, enlevant à la longue une fine tranche de matériaux meubles. Cette érosion qui s'exerce sur l'ensemble d'une surface est appelée érosion aréolaire. L'érosion aréolaire et le ravinement des versants sont prépondérants dans les régions semi-arides et celles où le couvert végétal a été fortement dégradé.

I.2 EROSION HYDRIQUE

L'érosion des sols peut se diviser en deux types, l'érosion géologiques et l'érosion accélérée. L'érosion géologique est un processus naturel d'équilibrage du relief qui aplanit inexorablement les collines et les montagnes et remplit les vallées et les lacs. Le taux d'érosion géologique dépend principalement du climat et de la lithologie et est généralement élevé dans les pays semi-arides comme l'Algérie car les précipitations y sont assez élevées pour endommager la surface des sols, mais pas assez pour supporter un couvert végétal jouant le rôle protecteur.

À l'opposé, l'érosion accélérée survient lorsque les populations perturbent les sols ou le couvert végétal par l'entremise de l'élevage, des activités forestières, d'agricultures et des travaux de construction.

L'érosion se produit en deux phases, soit (1) le détachement des particules de la surface du sol et (2) leur déplacement des versant aux oueds. Pour certains auteurs, le dépôt subséquent des particules est parfois inclus dans le phénomène de l'érosion tandis que pour d'autres il s'agit d'un phénomène indépendant qu'ils nomment sédimentation. Malgré cette divergence, les spécialistes classifient les principaux types d'érosions de sols selon le déplacement des particules érodées sur les surfaces. L'érosion hydrique se manifeste sous cinq formes : l'érosion laminaire, l'érosion en rigole, l'érosion en ravines, les sapements des berges et les mouvements de masse.

I.2.1 L'érosion laminaire (ou érosion en nappe)

Dès que le sol cesse d'absorber la totalité de la pluie, l'eau en excès ne peut s'infiltrer et ruisselle donc sur la surface du sol en déplaçant les particules arrachées de la surface par la battance de la pluie. Lors de leur écoulement sur les surfaces, ces particules conjointement avec la vitesse de l'eau de ruissellement exercent un effet mécanique capable d'entraîner le détachement d'autres particules.

L'érosion laminaire est difficile à détecter sur le terrain car les sols perdent une mince couche de façon plus ou moins uniforme. Par ailleurs, l'érosion laminaire est un processus idéalisé qui est rarement présent dans les champs car en raison du microrelief du terrain, l'eau de ruissellement tend à se concentrer et à creuser les surfaces sous forme de rigoles.

I.2.2 L'érosion en rigoles (ou en griffes)

Kalman (1976) a observé que le phénomène d'érosion en rigoles est actif au début du ruissellement, et diminue au cours de l'événement jusqu'à devenir minime, et que la présence d'une rigole préexistante au début d'une averse ne provoquera pas une érosion supérieure. Les rigoles ne sont pas ainsi un facteur provoquant l'érosion mais plutôt un symptôme. Puisqu'elles sont initialement petites et peu profondes, ces rigoles sont facilement effacées par les pratiques agricoles. Toutefois, si ce processus s'intensifie lors d'événements pluviaux successifs, les rigoles deviennent de plus en plus profondes et créent des ravines.

I.2.3 L'érosion en ravines

L'érosion en ravines se produit lorsque les rigoles touchent non seulement à l'horizon de surface mais érodent également les horizons sous-jacents à un point tel que les pratiques agricoles ne peuvent effacer les traces. Lorsque les ravines creusent les horizons de sol, elles peuvent parfois atteindre un sous-sol plus résistant à l'érosion provoquant l'allongement des ravines vers le haut de la pente. Bougerra (1985) a démontré que ravinement est un facteur prédominant dans le processus global de l'érosion. Chebbani et Belaidi (1997) ont démontré que le bassin versant de Oued Isser, les ravines se développent en trois étapes. Les ravines débutent par une alternance entre l'arrachement et le dépôt des sédiments suivi par le creusement, le comblement et l'affouillement du fond des ravines et finalement par une érosion régressive remontante. Kouri et al. (1997) ont montré que dans la région de Oued mina, les facteurs influençant l'érosion en ravines sont le type de marne, la pente, l'exposition des versants, l'utilisation des sols et la morphologie des parois des ravines.

A l'instar de l'érosion en nappe et rigoles, l'érosion en ravines déplace les sols sous forme de particules ou d'agrégats de façon lente. Il existe cependant des processus pouvant déplacer des blocs de sols de façon spontanée : les mouvements de masse et les coulées de boue.

I.2.4 Les mouvements de masse

L'eau joue toujours un rôle prépondérant dans ce processus, mais le mouvement du sol se produit non par le mouvement de l'eau, mais plutôt suite à un stress gravitationnel. En effet, lorsque les sols constitués de limons et d'argiles sont gorgés d'eau, les colloïdes responsables de la cohésion du prennent une consistance liquide. Si ces sols « liquéfiés » sont situés sur de fortes pentes avec un sous-sol imperméable, ils peuvent glisser dans un mouvement d'ensemble ou encore sous forme de coulée de boue si les matériaux sont complètement fluidifiés. Une étude, effectuée par Rullan-Perchirin (1989), sur 32 mouvement de terrain dans le bassin versant du Rhumel constantinois a conclu que la majorité des mouvement se développent soit sur des terres non cultivées à fortes pentes ($\geq 25\%$) ou bien sur des terres répandues avec un couvert végétal peu protecteur. Elle a noté aussi que près d'un quart des mouvements de masse résultent de matériaux argileux gorgés d'eau. Benaissa (1998) a confirmé l'influence des formations géologiques sur les mouvements de masse.

Les mouvements de masse et les trois premiers types d'érosion contribuent en partie à la charge sédimentaire des cours d'eau, le reste provient de l'érosion des berges

I.2.5 Le sapement des berges

La force cinétique reliée à l'écoulement de l'eau peut exercer un stress sur les berges et y éroder les matériaux les plus fragiles. Le sapement des berges provoque l'éboulement de masses importantes de sols dans les cours d'eau dans lesquels ces masses se fragmentent et s'incorporent à la charge du cours d'eau. Ramdane (1985) a affirmé la présence de ce phénomène dans le Bassin versant de l'Oued Isser. Rullan-Perchirin (1989) a noté que le sapement des berges contribuait aux mouvements de masses surtout dans la zone aval des bassins versants.

L'importance de l'érosion ne dépend pas que d'un seul facteur mais résulte plutôt d'une interaction entre plusieurs facteurs. L'érosion intensive observée dans le Nord de l'Algérie est le fruit de l'action de plusieurs facteurs qui sont d'une part climatologiques et lithologiques (Mazour, 1992). A l'aide de la superposition de cartes des formes d'érosion et des facteurs théoriques d'érosion, Brahmia (1993) a observé

que l'apparition des formes d'érosion est reliée à un couvert végétal faible, à une lithologie friable et à une exposition des versants favorisant le drainage des sols.

I.3 LES FACTEURS D'ÉROSION

I.3.1 L'organisation minérale

La cohésion peut être assimilée à l'importance des forces qu'il faut vaincre pour séparer les uns des autres les éléments constitutifs de la roche. Cette notion est importante en ce qui concerne l'aptitude des roches à l'érosion. En distingue de types de roches :

Des Roches de forte cohésion : Ce sont des endogènes issues de la solidification d'un magma (roche plutonique ou volcanique) ou de la cristallisation de matériel dans des conditions particulières de température et de pression (roches métamorphiques) en font partie.

Des Roches de faibles cohésions : Sont les roches non consolidées ou meubles, constituées de grains plus ou moins grossiers libres (graviers, sable, silts ou argiles). Elles sont facilement érodables à cause de l'isolement de leurs éléments constitutifs. Leur déstabilisation érosive est directement liée à l'importance de l'eau interstitielle libre, saturant ou non le vide inter granulaire.

Erable

I.3.2 La fracturation

Les roches présentant une forte cohésion ont un comportement rigide vis-à-vis des contraintes lithosphériques. Elles réagissent en se fracturant à des échelles variables, allant du Km au nanomètre. Ces fractures constituent des discontinuités dans la roche, augmentant ainsi sa vulnérabilité vis-à-vis des processus de l'altération. En fonction des différentes échelles, on distingue : les failles, les joints ou diaclases, les clivages schisteux, les clivages des minéraux.

I.3.3 Les mouvements de la lithosphère

Les grandes structures géologiques présentes en surface de la lithosphère sont dues à l'activité tectonique. Cette activité se manifeste par les séismes et les volcans, influençant les processus d'érosion. Les zones en limite de plaque lithosphérique sont le siège de mouvements horizontaux et verticaux de grande ampleur, entraînant la genèse d'un relief chaotique, faisant voisiner des blocs surélevés et des bassins affaissés. La très forte rugosité de ce relief permet des taux d'érosion très importants. La production de matières érodées, mesurée à l'embouchure des fleuves drainant ces

régions est de l'ordre de 10 000 tonnes par Km² et par an, soit 100 fois plus que la moyenne mondiale (Ritchot, 1985).

I.3.4 Relief des terres émergées

Il existe plusieurs types de reliefs des terres émergées, distincts par leur morphologie propre et par les processus d'érosion liés à chacun :

Les montagnes jeunes : Elles présentent une importante couverture sédimentaire hachée de noyaux de roches endogènes (granites, séries métamorphiques, ...). Les altitudes moyennes y sont importantes, les versants y sont très pentus et l'érosion très active.

Les montagnes anciennes partiellement arasées : Elles sont le plus souvent libérées des couvertures sédimentaires et présentent à l'affleurement des roches endogènes. Les versants sont faiblement pentus et l'érosion est moyennement active.

Les boucliers très anciens totalement arasés : Elles présentent aussi des roches d'origine endogène. Les versants présentent de très faibles pentes et l'érosion y est faible.

I.3.5 Effet de l'atmosphère

La terre possède une atmosphère qui capte l'énergie solaire, assure sa distribution par la circulation des fluides, régularise la température, filtre les rayons nocifs issus du soleil, et permet l'humidification des continents et leur érosion donc par les pluies. La répartition inégale de l'énergie solaire est la première cause essentielle de ce que l'on peut appeler le système climatique qui s'appuie essentiellement sur la circulation atmosphérique. La répartition des climats et des précipitations est la conséquence de cette circulation globale, et présente une distribution zonale : Les basses températures moyennes et les faibles pluviosités des hautes latitudes, Les températures moyennes et plus grande pluviosité, Les ceintures désertiques et les faibles précipitations et Les fortes précipitations et les fortes températures, etc.

Des conditions locales peuvent engendrer un système climatique régional qui échappe partiellement à l'influence directe de la circulation atmosphérique :

Un climat méditerranéen caractérisé par une irrégularité saisonnière des précipitations, une clémence et une faible amplitude des températures.

Un climat à affinités tropicales mais à hiver relativement froid.

Un climat à saisons très contrastées et forte amplitude des températures.

Cette répartition des climats conditionne les processus d'érosion et de transfert de matériaux à la surface des continents.

I.3.6 Effet de l'hydrosphère

L'eau possède des propriétés physico-chimiques exceptionnelles qui lui permettent de jouer un rôle important dans la modification et le transfert d'éléments et de matériaux de la lithosphère. La petite taille de sa molécule, sa faible viscosité et sa fluidité lui permettent une grande mobilité et la faculté de pénétrer les plus petits interstices disponibles dans le sol, les roches fissurées. Grâce à sa bipolarisation électrique l'eau est un solvant pour la plupart des corps chimiques. Cette propriété lui permet de lessiver les continents et de conduire les éléments ainsi dissous en direction des mers et des océans. La densité de l'eau se situe à une position moyenne entre les matières minérales et les matières organiques. Cette valeur est importante pour la mise en suspension des particules, leur transport et leur dépôt.

I.3.7 Effet de la biosphère

La biosphère prélève, redistribue et échange matière et énergie avec le domaine minéral qui l'environne et c'est à ce titre qu'elle joue un rôle important sur le fonctionnement de la surface des terres émergées. La biosphère est représentée par quatre éléments importants : Les végétaux ; Les bactéries ; Les animaux ; L'espèce humaine.

Les végétaux ont un rôle important par leur influence sur le processus d'érosion. Autre fraction peu ou non visible, réduite en poids et dont la fonction est essentiellement de décomposer les matières mortes. Les bactéries, jouent également un rôle important dans ces processus d'érosion. Les êtres vivants interviennent aussi dans la transformation des roches. Une foule d'animaux (taupe, renard, insectes, etc.), micro-organismes (algues, bactéries etc.), accroissent la porosité des formations meubles, facilitant la percolation de l'eau. Cependant l'espèce humaine, joue également un rôle de plus en plus actif sur le fonctionnement de la surface.

I.4 TRANSPORT SOLIDE

I.4.1 La chaîne des transferts de matière

Assistée par les agents d'érosion (l'eau, la glace, les vagues et le vent), les débris se déplacent sous l'action de la pesanteur. Ce transport aboutit à des accumulations créatrices de modèles construits (vase, cordon littoral, dune) ou fournit la matière première des sédiments lorsque ceux-ci se déposent au fond d'un lac, d'une retenue ou d'un océan. Son action s'exerce immédiatement sur tous les matériaux meubles

(sable, argile, limon, sol, dépôt caillouteux) dès l'instant qu'ils sont exposés à l'air libre, sans protection du couvert végétal.

La surface terrestre est donc une zone de migration de matière entre la partie émergée des continents et les grands domaines de sédimentation. Cette migration suit une chaîne de transfert dont il est possible d'établir les étapes et le bilan quantitatif de matière. Ce fonctionnement recouvre différentes échelles d'espace et de temps. Les flux de matières empruntent des vecteurs et des parcours variés comprenant des phases de stockage temporaire.

Les principaux vecteurs de transfert sont les différents fluides atmosphériques : l'eau (liquide, solide) et secondairement le vent régis par les lois de la physique des fluides.

L'eau précipitée sur les reliefs continentaux, en s'écoulant selon les lois de la gravité sur les pentes topographiques, libère progressivement son énergie potentielle sous forme d'énergie mécanique qui permet à l'eau courante de façonner le lit des rivières et de transporter les particules. Ce flux d'énergie est permanent depuis les zones humides jusqu'aux océans.

1.4.1.1 Les étapes de transfert

Lors du transfert deux étapes principales peuvent être distinguées :

Altération météorique : c'est l'ensemble des processus d'altération chimique et de désagrégation physique des roches par les agents bioclimatiques. Ces processus ont lieu sur place et consistent en une transformation des roches, avec séparation des phases solides et dissoutes, permettant leur déplacement ultérieur.

Ablation : c'est l'ensemble des processus d'évacuation des produits de l'altération météorique d'une zone de production à une autre de dépôt. Cette évacuation peut se faire selon deux modes :

Sans l'intervention, sinon discrète, d'un vecteur organisé : c'est le cas des versants où les roches altérées sont déstabilisées par l'insertion de fluides (eau, air) dans les espaces inter granulaires, peuvent se déplacer localement sur de courtes distances sous l'effet de la gravité.

Avec l'intervention d'un vecteur bien circonscrit (ruisseau, fleuve, glacier ou vent), portant la matière en un flux organisé.

L'ablation comprend un stade de mise en mouvement de la matière et stade de transport, le premier nécessitant une énergie un peu plus élevée que le second. Au

cours du transport, les matériaux peuvent être transitoirement stabilisés et constituer des formations superficielles.

I.4.1.2 Les modes de transfert

Il existe quatre types de mode de transfert :

Transfert sans vecteur organisé : La dissolution partielle et la fragmentation des roches et une baisse de forces de cohésion entre les particules. En effet, les espaces étant remplis par de l'air, de l'eau ou autres corps biologiques, le comportement des masses rocheuses se retrouve modifié. Des forces de compression ou de tension inter granulaires favorisent le tassement ou l'expansion des roches, ce qui provoque un déséquilibre sur les versants et se déplacer sous l'effet de la gravité jusqu'à atteindre un nouvel équilibre.

Transfert par les glaciers : Les matériaux peuvent aussi être véhiculés par les glaciers

Transfert par le vent : Les vents sont capables de déplacer des particules solides ou des gouttelettes d'eau renfermant des substances dissoutes.

Transfert par les cours d'eau : La matière est portée par l'eau courante sous trois formes selon le diamètre des particules :

Charge de fond : Ce sont surtout les particules de diamètre > 0.5 mm (sables grossiers, galets...), dont la progression vers l'aval se fait par traction et ou roulement au fond du chenal.

Matières en suspension : Ce sont les particules fines (diamètre 0.5 mm- 0.5 μ m : sables fins, silts, argiles...). Leur progression est rapide dans la masse d'eau. Elles peuvent atteindre directement le domaine marin, parvenir en phase de crue dans les plaines alluviales et se déposer en décrue ou être piégées par décantation dans les lacs. Elles sont issues comme la charge de fond, de l'érosion mécanique du bassin versant. Elles peuvent atteindre plus de 90% de la charge totale en montée de crue.

Charge dissoute : Formée essentiellement par les ions issus de l'altération des roches du bassin versant, et par des micros agrégats (diamètre < 0.5 μ m).

I.4.2 Transport et évacuation des produits érodés

Les cours d'eau résultent de la concentration des eaux collectées par les bassins versants. Les eaux courantes prélèvent des particules à la surface du sol et les transportent vers les océans ou les bassins continentaux fermés des zones arides. Les

particules qui sédimentent dans le cours d'eau forment les alluvions, essentiellement détritiques et très répandues sur les continents.

Une rivière transporte des matériaux granulaires qui proviennent soit du bassin versant soit du fond ou des berges du lit mineur.

Les matériaux du bassin versant peuvent provenir de l'ensemble de sa surface principalement sous l'effet de la pluie, de la fonte des neiges et des cycles gel dégel. Ce mode d'érosion est dit aréolaire (par opposition à linéaire) et se produit soit en nappes soit en rigoles. Une partie seulement du produit de cette érosion aréolaire parvient au réseau hydrographique. Dans les bassins versants montagnards, des formes d'érosion plus localisées peuvent produire brutalement de grandes masses de matériaux. Ce sont les glissements de terrain, les avalanches, les laves torrentielles.

L'érosion due au fond du lit ou aux berges est dite linéaire. Elle persiste même lorsque la pluie cesse. Si les matériaux des deux origines se retrouvent dans la rivière, leur comportement est différent. L'érosion du bassin versant produit en particulier des fines qui se propagent ensuite en auto suspension (Wash load) et sont responsables de sa turbidité alors que les matériaux prélevés sur les parois sont alternativement déposés et repris par le courant. Ces fines peuvent se déposer dans le lit majeur mais rarement dans le lit mineur, sauf si elles sont cohésives, elles sont piégées par des particules du lit lors des dépôts consécutifs aux décrues ou bien si elles s'agglomèrent par floculation. Il résulte de tout cela que ces fines en auto suspension n'ont pas de rôle morphologique, sauf lorsqu'elles décantent dans les bassins de retenue ou dans les fosses d'extraction.

I.5 MODELISATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE

Différents modèles peuvent être utilisés pour prédire les apports solides dans les cours d'eau. L'érosion peut être examinée tant du point de vue du transport des sédiments que du point de vue de l'ablation des particules de sol. En effet, la première approche tente de prédire la charge sédimentaire à l'exutoire des cours d'eau tandis que la seconde approche estime les taux de production de sédiments à la source, c'est-à-dire les taux d'ablation sur les versants.

I.5.1 Modèles permettant l'estimation de la charge sédimentaire.

La technique la plus simple pour étudier l'ampleur des processus d'érosion consiste à mesurer les concentrations de sédiments dans les cours d'eau. L'échantillonnage alors nécessaire collecte non seulement les particules provenant de l'érosion des sols mais également celles produites par l'érosion des berges. Ainsi, le terme « transport solide » englobe l'ensemble des particules transportées par un cours

d'eau. Les études sur le transport solide peuvent être examinées en travaillant uniquement sur un seul bassin versant pour obtenir des relations spécifiques à celui-ci ou en travaillant dans plusieurs oueds pour ainsi obtenir une équation reliant le transport solide à diverses caractéristiques d'un bassin versant.

1.5.1.1 Études sur un seul bassin versant

Après l'étude de 34 crues dans le bassin de l'oued Allalah, Demmak (1982) a constaté un faible lien entre les concentrations de sédiments en suspension et les débits à l'échelle de l'événement. Demmak (1982) a estimé qu'environ 80% des apports annuels de sédiments étaient associés à des crues supérieures à 30 m³/L. Bourouba (1997), Bourouba (1998) et Terfous et al. (2001) ont démontré l'influence de la saison sur les charges en suspension. Bourouba (1997) a observé deux périodes d'érosion distinctes. La période minimale d'érosion survient de l'hiver au printemps. À l'opposé, de l'été à l'automne, l'érosion est maximale en raison des pluies torrentielles qui s'abattent sur des matériaux fins désagrégés et facilement mobilisables. Pour un autre bassin versant, Bourouba (1998) a cependant observé que l'hiver et le printemps sont également des périodes de forte érosion.

Terfous et al. (2001) ont observé pour le bassin versant de l'Oued Mouilah que les saisons où l'érosion est la plus intense sont l'automne et le printemps car les sols sont très arables en raison des cycles gel-dégel qui déstabilisent leur structure.

Touaïbia et al. (2001) ont examiné à l'échelle mensuelle les relations reliant les débits solides (Q_s) aux débits liquides (Q) pour deux bassins versants. Parmi les différents modèles explorés, le modèle de puissance ($Q_s = aQ_b$) était le plus performant avec des valeurs des coefficients a et b fluctuant selon le mois et le bassin versant.

Lors de l'étude du bassin versant de la Haute-Tafna, Megnounif et al. (2003) ont montré l'effet de la saison sur la charge sédimentaire, les plus fortes concentrations de sédiments n'étant pas nécessairement mesurées pendant les périodes de crues. En effet, le flux saisonnier de la charge en suspension a été plus important en automne qu'au printemps et ce malgré des crues printanières plus importantes. Les auteurs ont attribué ceci à la plus grande violence des orages qui génèrent alors une charge élevée de sédiments avec un faible apport en eau par rapport à la force érosive limitée de l'eau de fonte de la neige au printemps. L'impact des orages sur le transport solide a également été souligné par Benkhaled et Remini (2003). Ils ont examiné attentivement les fluctuations des paramètres a et b de la relation $Q_s = aQ_b$ à diverses échelles temporelles pour le bassin versant de l'oued Wahrane. Leur étude a démontré qu'entre les saisons le paramètre a est relié à la pluviométrie moyenne et qu'à

l'intérieur d'une saison, ce même paramètre est relié à l'état du sol avec les valeurs les plus faibles lorsque les sols sont saturés. Pour sa part, le coefficient b est relié aux caractéristiques de l'écoulement tel que le débit maximal quelque soit l'échelle temporelle.

I.5.1.2 Études sur plusieurs bassins versants

L'utilisation de plusieurs bassins versants permet d'inclure dans les modèles des facteurs autres qu'hydrologiques. Ainsi, l'étude de plusieurs bassins versants permet d'obtenir des modèles permettant d'estimer l'érosion ou la charge sédimentaire pour des bassins versants ne possédant pas de stations de mesures.

Fournier (1960) a développé un modèle pour prédire les apports solides à l'exutoire d'un cours d'eau quelque soit son emplacement géographique en utilisant les données de 104 bassins versants provenant de différentes régions du globe. La formule est la suivante:

$$E = \frac{1}{36} \left(\frac{P_m^2}{P_{an}} \right)^{2,65} \left(\frac{h^2}{S} \right)^{0,46} \quad (I.2)$$

Avec :

E : Apport solide spécifique moyen annuel (t/km²/an)

P_m : Pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux (mm)

P_{an} : Pluie moyenne annuelle (mm)

h : Dénivelé moyen (m)

S : Superficie du bassin (km²)

En Algérie toutefois, la formule de Fournier (1960) a été testée sur une trentaine de bassins versants et les résultats ont été médiocres (P.N.U.D. et O.P.E. 1987). Ceci démontre bien l'importance de développer des équations propres aux conditions du pays. En travaillant spécifiquement avec des bassins versants du Maghreb dont 32 algériens, Tixeront (1960) a proposé pour l'Algérie un modèle basé sur deux équations reliant les apports solides (A en t/km²/an) à l'écoulement annuel total (R en mm) selon la position géographique:

Pour l'est de l'Algérie $A=92 R^{0,21}$

Pour le centre : $A=2000$

L'influence de la position géographique du bassin versant (physiographie, relief,...) a également été démontrée par Bourouba (1996) qui a étudié 18 bassins versants de l'Algérie orientale. Il a souligné que les taux de transports solides pour les bassins versants situés dans les hautes plaines et la région d'Aurès sont influencés par les averses estivales et automnales tandis que les bassins versants des régions côtières et de l'Isser sont davantage influencés par la saturation des sols pendant le printemps et l'hiver.

Inspirée par l'équation de Tixeront, la firme française SOGREAH (1969) a développé un modèle basé sur cinq équations reliant les apports (A en $t/km^2/an$) en fonction du ruissellement annuel de crue (R en mm). Le choix d'une équation est fondé non par la l'emplacement géographique du bassin comme le modèle de Tixeront, mais par sa perméabilité. Les équations de SOGREAH (1969) sont exprimées dans le tableau suivant:

Perméabilité	Equation
élevée	$A=8.5 R^{0.15}$
Moyenne à élevée	$A=75 R^{0.15}$
Faible à moyenne	$A=350 R^{0.15}$
Faible	$A=1400 R^{0.15}$
Imperméable	$A=3200 R^{0.15}$

Tableau I .1: Équation de SOGREAH selon la perméabilité du socle

Heusch et Milliès-Lacroix (1971) ont montré le rôle de la lithologie sur les équations décrivant le transport solide en établissant quatre droites liant la lame écoulée et la concentration de sédiment pour une vingtaine de bassins versants maghrébins. Ils ont observé que les bassins sur grès, calcaire et limon possédaient des faibles concentrations de sédiments relativement aux bassins sur roches tendres (marne et schiste). L'aspect de la lithologie a également été examiné par Demmak (1982 et 1984) qui a analysé des données provenant de 30 bassins versants algériens sur une période de plus de dix ans.

Suite à des analyses statistiques, il a proposé un modèle statistique pour prédire le transport solide spécifique moyen annuel (TSS) pour des bassins versants variant de 100 à 3000 km^2 . L'équation est la suivante :

$$TSS = 26,62IL + 5,07IP + 9,77 CT + 593,56 \quad (I.2)$$

Avec :

TSS : transport solide spécifique moyen annuel

IL: pourcentage de la superficie d'un bassin couverte de formations marneuses et argileuses du Crétacé supérieure et du Tertiaire

IP : indice d'énergie du ruissellement qui est le produit du pourcentage et de la fréquence des précipitations annuels en considérant uniquement les événements supérieurs à 20 mm

CT: coefficient de torrentialité qui est une mesure de l'intensité du chevelu hydrographique. Le coefficient de torrentialité est le produit de la densité de drainage (D_d) par la fréquence des talwegs d'ordre 1 (F_1) (Husson 1975)

$$CT = D_d \times F_1 = \frac{\sum L}{A} \times \frac{N_1}{A} \quad (I.3)$$

Avec:

$\sum L$: longueur totale de tous les talwegs

N_1 : nombre de talwegs d'ordre 1

A : surface du bassin versant

L_1 : longueur des talwegs d'ordre 1

Demmak (1982) mentionne que le domaine d'application reste cependant limité aux bassins possédant un indice *IL* supérieur à 10% et une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 300 mm. Saidi (1991) a lié l'érosion spécifique mesurée à 18 barrages algériens en étudiant uniquement des données hydrologiques et climatiques. En effet, il a dégagé une équation liant l'érosion spécifique au module spécifique (M_o) et au coefficient de ruissellement. Le module spécifique est le débit moyen annuel divisé par la superficie du bassin versant.

$$Es = 29,8 M_o^{1,20} C_e^{-0,732} \quad (I.4)$$

Dans le cadre d'une étude de la petite et moyenne hydraulique agricole en Algérie du Nord, Gavrilovic (1992) a appliqué une équation qu'il a développée en Yougoslavie pour prédire la production moyenne annuelle de sédiments (W_{an}). Cette équation intègre la température moyenne annuelle (t°) et la pluviométrie moyenne annuelle (H_{an}), la superficie du bassin (F) et un coefficient d'érodabilité (Z) qui sera expliqué en détails plus tard.

$$W_{an} = TH_{an} \pi \sqrt{Z^3} F \quad (1.5)$$

Avec :

$$T = \sqrt{t^{\circ}/10} + 0,1 \quad (1.6)$$

Où :

t° et Z sont déterminés à l'aide de l'équation suivante :

$$Z = Y X a (\varphi + \sqrt{J_{sr}}) \quad (1.7)$$

Où :

Y : valeur réciproque du coefficient de résistance du sol à l'érosion

X : coefficient de protection naturelle des sols (végétation)

a : coefficient de protection anthropique des sols (pratiques antiérosives)

φ : Équivalent numérique des processus d'érosion visibles et distincts

J_{sr} : pente moyenne du bassin

Toutefois, cette équation nécessite à priori une excellente connaissance du bassin versant car le choix de la valeur du coefficient d'érodabilité (Z) tient compte de l'état actuel d'érosion du bassin versant (φ).

Jugeant trop faible les relations reliant les débits solides aux paramètres mesurables des bassins versants algériens (pluie annuelle, superficie du bassin versant, longueur et pente brute du talweg principal), Morel et Cayla (1993) ont proposé de greffer un indice de « paysage » (IP) à ce type d'équation. Cet indice de « paysage » prend la valeur de la somme de paramètres qui ne peuvent être mesurés globalement. On le calcule de la façon suivante:

$$IP = A + 2B + C + D + 2E \quad (1.8)$$

Avec :

A : pourcentage du bassin recouvert de substrat résistant (calcaire, grès, roches métamorphiques)

B : type de modelé (plaine, contraste marquée ou faible, vallées encaissées)

C : pression anthropique (de très faible à très forte)

D : marque d'érosion (de nulles à actives) telles que les griffes, ravines, bad-lands et glissements

E : aspect des talwegs ou des lits mineurs Pour chaque bassin versant.

Les auteurs ont attribué à chacun des paramètres une valeur entre -2 et 2 selon leur contribution à l'érosion. L'indice de « paysage » est par la suite introduit indirectement dans la formule estimant les débits solides par l'entremise d'un coefficient multiplicateur (MP). La valeur de ce coefficient est fonction de la valeur de IP tel que démontré dans le Tableau I.2.

La formule estimant les débits solides dans un cours d'eau est :

$$C = \frac{MP \times 8 \times i \times 0,7}{T_B \times (P/1000)} \quad (1.9)$$

Avec :

T_B : temps de base

P : pluie annuelle moyenne sur le bassin

i : pente brute du talweg principal (%)

Valeur IP	MP
<-10	0.25
-3<IP<-10	0.50
-2<IP<2	1
3<IP<4	2
5<IP<10	3
>10	4

Tableau I .2: Coefficient multiplicateur (MP) selon l'indice IP

Vogt et Gomer (1992) ont modélisé la concentration moyenne des sédiments en suspension à l'échelle de la crue pour l'oued Mina en cartographiant l'humidité des sols par la télédétection (Landsat TM). Gomer et Vogt (2000) ont par la suite raffiné leur approche en greffant aux données de télédétection un modèle basé sur les lois de la physique. Dans un premier temps, leur modèle divise le territoire en cellules. Pour chacune d'elle, on estime la quantité de particules arrachées à la surface du sol par le battement des gouttes de pluie.

Par la suite, le programme modélise le déplacement de ces particules d'une cellule à l'autre jusqu'au cours d'eau. Le transport de ces particules est associé à celui de l'eau de ruissellement dont les volumes et le trajet sont également modélisés. Le modèle tient également compte du fait que le dépôt de ces particules puisse survenir lors du transport de la cellule d'origine jusqu'à l'exutoire. En comparant les résultats obtenus par leur modèle avec une cinquantaine de mesures prises lors d'un seul

événement pluviométrique, les auteurs ont démontré l'efficacité du modèle. Toutefois, le modèle nécessite une foule de données qui ne sont pas toujours disponibles.

Touaïbia et Achite (2003) ont également étudié statistiquement le lien entre les taux d'érosion spécifique (E_s en t/ha) et près d'une dizaine de facteurs favorisant ou limitant l'érosion pour 16 sous bassins versants du bassin versant de l'Oued Mina. Ils ont trouvé que l'érosion spécifique pouvait être estimée par une simple équation utilisant la superficie du bassin versant (S) et le couvert végétal (%)

$$E_s = 19,36S^{-0,134} \times C_{veg}^{-0,308} \quad (1.10)$$

Toutefois, Abdelali et al. (2003) ont démontré la faible performance de ce type de modèles.

En effet, ils ont comparé la performance du modèle de SOGREAH (1969) avec les mesures réelles d'apports spécifiques pour trois bassins versants situés dans le Nord Ouest de l'Algérie (La Haute Tafna, Isser, Mouilah). Ils ont démontré que ce dernier modèle sous estimait jusqu'à 34 fois les mesures réelles. Les auteurs attribuent cette faible performance à l'exclusion de caractéristiques intimement liées à l'érosion des sols telles que le couvert végétal et la pluviométrie.

Les modèles présentés dans la présente section sont utiles pour estimer les concentrations (ou charges) de sédiments dans les oueds et certains d'entre eux permettent une classification des bassins versants selon les taux d'envasement aux barrages. Ceci est utile lors d'une étape de tri des bassins versants afin de cibler les plus problématiques à l'échelle du pays. Or, Ramdane (1989) a souligné que les bassins versants utilisés pour élaborer ces modèles ne sont pas toujours représentatifs, engendrant ainsi des difficultés d'extrapolation lorsqu'ils sont utilisés à un ensemble national. De plus, Smati (1996) a invoqué un autre problème avec ces modèles car selon lui les formules de transport décrites plus haut, même améliorées en fonction des paysages, ne sont pas adéquates pour des bassins de plus de 100 km².

Par ailleurs, dans le cadre d'un programme de conservation des sols, les interventions doivent être implantées non pas de façon homogène à l'ensemble d'un bassin versant, mais en ciblant prioritairement les zones à fort taux d'ablation. Touaïbia et Achitte (2003) ont cartographié ces zones à l'aide d'outils géostatistiques en utilisant non pas des valeurs provenant de mesures de terrain, mais plutôt d'exutoires.

I.5.2 Approches visant l'estimation des taux d'abrasion

L'équation universelle des pertes de sol (USLE) permet d'estimer le risque d'érosion hydraulique. Il s'agit d'un modèle empirique réunissant cinq facteurs ayant une incidence sur l'importance de l'érosion. L'équation se présente comme suit :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (I.11)$$

Avec :

R : facteur d'érosivité de la pluie

K : facteur d'érodabilité du sol

LS : facteur topographique intégrant le dénivelé et la longueur du versant

C : facteur de protection du sol par le couvert végétal

P : facteur de protection du sol par les pratiques agricoles.

Ainsi ce modèle se présente comme une multiplication de coefficients dont le produit est un estimé du taux de perte de sol. Dans le cadre d'une thèse de doctorat, Arabi (1991) a examiné la relation entre les différents paramètres de l'équation universelle et l'érosion des sols mesurée pour 15 parcelles combinant trois types de sol (vertisol, fersiallitique et brun calcaire) et quatre systèmes de production (agropastoral, vigne, arboriculture et sylvo pastoral). En ce qui a trait au facteur *R*, Arabi (1991) a distingué deux types de pluie : les pluies automnales d'intensité élevée mais de faible fréquence et les pluies hivernales et printanières moins intenses que celles de l'automne, mais plus fréquentes. Pour le facteur *K*, Arabi (1991) a remarqué que les vertisols sont les sols les plus résistants. Concernant le facteur *C*, il a démontré que l'érosion est faible en milieu cultivé et naturel comparativement aux sols nus (Arabi, 1991; Gomer et Touaibia, 1991). Arabi (1991) n'a pas observé de liens significatifs entre l'érosion et les facteurs *R* et *LS* représentant l'agressivité des pluies et la pente. Par contre, Brahamia (1993) a également travaillé en parcelles et a démontré que l'érosion est sensible à l'augmentation de la pente et à la longueur du versant.

Finalement, Arabi (1991) et Brahamia (1993) ont appliqué l'équation universelle sur une partie de leurs parcelles. Arabi (1991) a mentionné que les estimations calculées par le modèle furent comparables aux mesures réelles alors que Brahamia (1993) a jugé que les valeurs estimées sont nettement inférieures à celles mesurées. Il est important de rappeler que ces études ont été effectuées sur des parcelles et que le transfert direct à l'échelle des bassins versants est problématique. Touaibia et al. (1999) ont calculé à l'aide de USLE des valeurs de perte des sols à l'échelle parcellaire de 0,12 à 1,09 t/ha/an comparativement à des valeurs de 12,38 à 48,72 t/ha/an à l'échelle du micro bassin (21,7 à 76,2 ha). Les auteurs attribuent cette différence au fait

que l'érosion en nappe observée sur les parcelles et calculée par l'équation universelle est négligeable à une plus grande échelle où toutes les formes d'érosion sont présentes démontrant ainsi l'importance d'étudier l'érosion à grande échelle.

L'érosion à l'échelle du bassin versant a également été cartographiée par photo-interprétation lors d'une composante d'un projet impliquant l'Algérie, la Tunisie et le Maroc (P.N.U.D., 1987). Bien que cette méthode soit la plus efficace, elle nécessite un nombre considérable de photographies lorsque les bassins versants sont vastes, engendrant ainsi des coûts élevés pour la réalisation des cartes. Afin de cartographier l'érosion rapidement et à faible coût pour la région de Médéa, Guettouche (1991) a exploré l'utilisation de la télédétection par le traitement d'images SPOT. Sa méthode lie l'intensité de l'érosion des sols (nulle, moyenne, forte) à l'intensité du couvert végétal. Toutefois, les images satellitaires ne permettent que de cartographier l'érosion qualitativement et ne donnent pas les taux d'abrasion. Grâce au développement et à l'essor des SIG au cours de la dernière décennie, il est maintenant possible de modéliser quantitativement l'érosion des sols dans les champs à l'échelle des bassins versants.

I.6 LES IMPACTS DE L'ÉROSION SUR L'ENVIRONNEMENT

La surface de la Terre est constamment sculptée par l'érosion, qui façonne sans cesse de nouveaux modèles. Les formes des continents changent sans arrêt, les vagues et les marées rongent les littoraux pendant que des vases s'accumulent dans les estuaires des rivières. Les ruisseaux, cours d'eau et rivières creusent plus profondément leurs lits. Globalement, l'usure des montagnes et des plateaux contribue à l'atténuation du relief. L'érosion transfère 250 milliards de tonnes par an de matériaux des continents vers les océans, dont 75 p. 100 sous forme solide par les cours d'eau. Les éruptions volcaniques et les mouvements de la croûte terrestre qui soulèvent des montagnes, des plateaux et de nouvelles îles tendent à inverser cette tendance.

L'érosion du sol est une forme de dégradation au même titre que la compaction, la réduction des taux en matière organique, la détérioration de la structure du sol, le drainage souterrain insuffisant, la salinisation et l'acidification du sol. Toutes ces formes de dégradation, sérieuses en elles-mêmes, accélèrent l'érosion du sol.

I.6.1 Perte de sol arable

L'érosion peut être un processus lent et insoupçonné, ou encore prendre des proportions alarmantes, entraînant une perte énorme de sol arable. Le lessivage de la terre arable peut résulter en une réduction du potentiel de production, en une

réduction de la qualité de l'eau de surface et en l'encrassement des réseaux de drainage.

1.6.1.1 Techniques de lutte antiérosives

Pour préserver la capacité utile des retenues, prolongeant ainsi sa durée de vie, et pour une meilleure conservation des sols sur le bassin versant dominant la retenue, une identification des mesures à mettre en œuvre pour lutter contre l'envasement est nécessaire. Plusieurs techniques ont été adoptées afin de lutter contre l'érosion des sols et réduire ainsi l'envasement des structures hydriques. Ces techniques varient selon les différents types d'érosion.

Pour l'érosion en nappe, il existe deux approches : on peut diminuer l'abrasion des versants en protégeant la surface des sols soit contre l'érosive de la pluie ou encore contre le ruissellement. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour protéger les sols de la battance de la pluie, tel que l'application d'un stabilisateur chimique (polyacrylamide), l'utilisation des couvertures biodégradables (géotextiles), mais la façon la plus efficace est par l'établissement d'un couvert végétal sur les versants.

Le développement de ravines peut être prévenu en augmentant l'infiltration des sols par amélioration de la structure des sols, ou bien en accroissant la résistance de la couche de surface à l'érosion par compaction de la couche de surface (Poesen et Govers, 1998). En Algérie, les interventions de correction des ravines s'effectuent par l'installation des gabions aux débouchés des ravines secondaires en combinaison avec des seuils en grillage léger dans les ravines secondaires (Roose, 2000).

Trois approches pour corriger des pentes sensibles aux glissements de terrain. La première méthode consiste à modifier la géométrie de la pente soit en remplissant ou en excavant son profil. La deuxième méthode vise à implanter des structures qui appliquent des forces opposées à celles des glissements telles que les butées de pierre et les murs de soutènement. La troisième méthode consiste à augmenter la résistance interne des sols par drainage (Bromhead, 1997 ; Roose, 1994)

Pour le sapement des berges, il existe diverses techniques pour les protéger. Une première méthode consiste à enrocher les zones de berges subissant les remous. Une autre façon d'empêcher l'eau de frapper les berges est de recouvrir de murs de soutènement construits en matériaux durs comme des gabions, des plaques de béton ou des palplanches métalliques.

I.6.2 Envasement des barrages

Les retenues créées par des barrages sur les cours d'eau naturels sont toutes confrontées au problème de l'alluvionnement. Si la rétention de grandes quantités d'eau lors des crues a un effet protecteur sur les régions sises à l'aval, les matériaux solides déposés dans les retenues peuvent en revanche porter préjudice aux ouvrages annexes, et réduire de manière significative la capacité d'accumulation d'eau. La quantité de sédiments déposés dans les 100 barrages algériens était évaluée à $560 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1995 soit un taux de comblement de 12.5% (Remini 1999).

L'envasement présente aussi un grand risque pour la stabilité de l'ouvrage par l'effet qui peut être provoqué par la poussée de la vase (de densité 1.6) dont la valeur progresse au carré de la hauteur (Remini 1999). Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement de quelques organes annexes aux barrages tels que : le vidange de fond, les canaux d'irrigation.

I.6.2.1 Techniques de lutte contre l'envasement des barrages

Parmi les méthodes connues pour réduire les effets néfastes de l'alluvionnement:

Vidange de fond : la purge par la vidange de fond est certainement la plus fréquemment appliquée. Les opérations de purge même judicieusement planifiées et exécutées ne restent toutefois pas sans incidence écologique sur le cours d'eau aval.

Le dragage : malgré son coût très élevé, le dragage est une des techniques curatives de lutte contre l'envasement des barrages surtout ceux dont la stabilité est en danger.

Bassins de décantations : consiste à construire des retenues en amont du barrage afin de réduire l'apport solide.

Surélévation des barrages : elle consiste à augmenter la hauteur de la digue afin de compenser la perte de volume occupé par la vase.

La technique de chasse : consiste à évacuer une quantité des sédiments sur les pertuis de vidange à l'arrivée des crues.

Soutirage des courants de densité : La forte concentration en sédiments dans les cours d'eau surtout en période de crues et la forme géométrique de la cuvette donnent naissance aux courants de densité à l'entrée d'une retenue et peuvent se propager jusqu'au pied du barrage. L'ouverture des vannes de fond au moment opportun peut évacuer une forte quantité en sédiment (Remini 2005).

CHAPITRE II

LES RESEAUX DE NEURONES

ARTIFICIELS

Il y a sur terre des preuves pour ceux qui croient avec certitude, ainsi qu'en vous même. N'observez vous donc pas?

Coran (Sourate El Dhariate Ayates 20-21)

CHAPITRE II: LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

II.1 INTRODUCTION

Le développement extraordinaire de l'informatique, tant sur le plan matériel que logiciel, a conduit au développement des techniques de traitement de l'information. La construction de logiciels s'appuie sur plusieurs approches. Trois parmi les plus utilisées sont l'approche algorithmique, l'approche basée sur la connaissance et l'approche par réseaux de neurones artificiels.

Une approche algorithmique nécessite l'écriture du processus à suivre pour résoudre le problème. Hélas, les processus de certains problèmes complexes ne peuvent pas tenir compte de tous les cas possibles du fait que les ordinateurs fonctionnent avec une logique binaire. Ainsi les systèmes informatiques tentent de pallier à ce manque en triplant les logiciels, chacun étant développés indépendamment par une équipe différente, dans des langages différents.

La seconde approche possible est celle de l'intelligence artificielle (IA), avec pour applications les plus connues : les systèmes experts. Ici, la résolution du problème est confiée à un ensemble de règles données par l'expert humain du domaine. Il n'en demeure pas moins que toutes les règles doivent avoir été exprimées préalablement au traitement, et que le programme demeure binaire dans son exécution. Les cas qui n'ont pas été prévus par l'expert ne seront pas correctement traités. L'introduction de la logique floue ne change pas la nature des limitations d'emploi du programme : l'exécution reste totalement déterministe. En fait, l'approche basée sur la connaissance se limite à des domaines d'application où la modélisation de la connaissance sous forme de règles, est possible.

Une troisième approche pour le traitement automatique de l'information s'inspire du traitement de l'information effectué par le cerveau. L'hypothèse principale, à la base de l'essor des réseaux de neurones artificiels, est que le comportement intelligent est sous-tendu par un ensemble de mécanismes mentaux. Ces mécanismes étant basés sur des processus neurophysiologiques, nous supposons donc que la structure du système nerveux central est à la base du développement d'un comportement intelligent.

Les réseaux de neurones artificiels ne désignent que les modèles manipulés. Connexionnisme et neuronimétique sont tous deux des domaines de recherche à part

entière, qui manipule chacun des modèles de réseaux de neurones artificiels, mais avec des objectifs différents.

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.

II.2 HISTORIQUE

Bien que la notion de la mémoire associative fût lancée par le psychologue américain W. James(1890), le concept de réseaux de neurones a été introduit par J. McCulloch et W. Pitts en 1943 qui ont montré que des réseaux formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes. En 1949, le physiologiste américain D. Hebb, explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes, il montre aussi l'importance du couplage synaptique dans le processus d'apprentissage en se fondant sur le comportement psychophysiologique (1949), ce qui donne naissance de la première règle d'apprentissage. La construction du premier neuro-ordinateur basé sur le modèle de Perceptron, appliqué au domaine de la reconnaissance de formes, a été réalisée par F. Rosenblatt (1957).

Inspiré de l'idée de Hebb, B. Widrow (1960) développe le modèle Adaline (Adaptative Linear Element). Dans sa structure, le modèle ressemble au Perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente. Celle-ci est à l'origine de l'algorithme de rétropropagation de gradient très utilisé aujourd'hui avec les Perceptrons multicouches. Les réseaux de type Adaline restent utilisés de nos jours pour certaines applications particulières.

Suite aux travaux de certains chercheurs tel que M. Minsky et S. Papert, 1969, qui mettent en exergue les limitations théoriques du perceptron, la théorie des réseaux de neurones a connue un « séisme » dans le fond. Limitations alors connues, notamment concernant l'impossibilité de traiter par ce modèle des problèmes non linéaires. Ils étendent implicitement ces limitations à tous modèles de réseaux de neurones artificiels.

Malgré cela, les recherches ne sont, bien sûr, pas interrompues. Elles se poursuivent, mais déguisées, sous le couvert de divers domaines comme : le traitement adaptatif du signal, la reconnaissance de formes, la modélisation en neurobiologie, etc. De grands noms travaillent durant cette période tels que : S. Grossberg, T. Kohonen. Ces recherches parviennent en 1980, grâce aux chercheurs

Wilkie Stonhan et Aleksander, à résoudre les problèmes d'apprentissages difficiles, tel que la non linéarité de certains phénomènes, en utilisant des réseaux de neurones multicouches.

En 1982, le célèbre physicien, J. J. Hopfield, à qui l'on doit le renouveau d'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels, présente une théorie du fonctionnement et des possibilités des réseaux de neurones. Alors que les auteurs s'acharnent à proposer une structure et une loi d'apprentissage, puis à étudier les propriétés émergentes ; J. J. Hopfield, par son esprit anticonformiste, fixe préalablement le comportement à atteindre pour son modèle et construit à partir de là, la structure et la loi d'apprentissage correspondant au résultat escompté. Ce modèle est aujourd'hui encore très utilisé pour des problèmes d'optimisation.

En 1985, la rétropropagation de gradient apparaît grâce à trois groupes de chercheurs indépendants. C'est un algorithme d'apprentissage adapté aux réseaux de neurones multicouches (aussi appelés Perceptrons multicouches). Dès cette découverte, nous avons la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables. De nos jours, les réseaux multicouches et la rétropropagation de gradient reste le modèle le plus étudié et le plus productif au niveau des applications.

Dans les années quatre-vingt-dix, d'autres modèles et algorithmes ont été développée avec l'attention d'étendre les possibilités des réseaux statiques non bouclés par introduction progressive d'une mémoire interne et de la récurrence au sein du réseau

II.3 NEURONE BIOLOGIQUE ET NEURONE ARTIFICIEL

Le développement des connaissances de la structure interne du cerveau, et la compréhension d'une partie de son fonctionnement a contribué de façon remarquée à l'émergence des réseaux de neurones artificiels.

II.3.1 Le modèle neurophysiologique

Le cerveau se compose d'environ mille milliards de neurones, avec 1000 à 10000 synapses (connexions) par neurone. Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former les dendrites. Celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique. C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma, corps du neurone. L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone (unique) pour être transmise aux autres neurones.

La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En fait, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angströms entre l'axone du neurone afférent et les dendrites du neurone efférent.

La jonction entre L'étape suivante nous conduit à l'étude de petits réseaux de neurones, tels ceux impliqués dans les arcs réflexes. Ceci nous amène à exposer les propriétés d'habituation, de sensibilisation et surtout à concevoir l'idée d'une modification physique des connexions entre neurones pour supporter ces phénomènes. L'étude du mécanisme de la vision chez l'animal (et l'homme) permet d'appréhender les notions de messages somato-sensoriels, de réduction d'information, d'étages de traitement et de complexification de l'information.

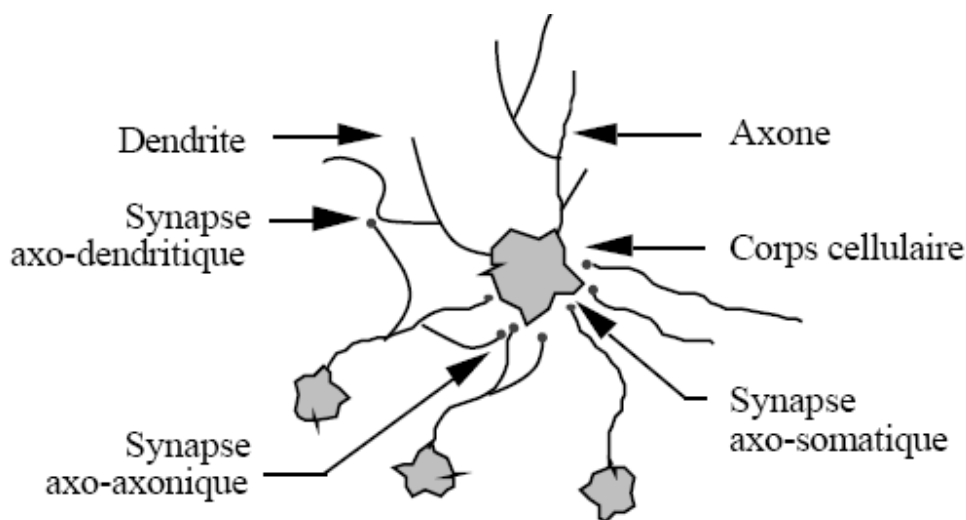


Figure II .1: Schématisation d'un neurone avec son arborisation

La longueur de l'axone peut varier de quelques microns à 1,50 mètre pour un motoneurone. De même les dendrites mesurent de quelques microns à 1,50 mètre pour un neurone sensoriel de la moelle épinière. Le nombre de synapses par neurone varie aussi considérablement de plusieurs centaines à une dizaine de milliers.

Chaque structure est dotée d'une fonction particulière et ces structures adaptent leur comportement par des mécanismes d'apprentissage. L'apprentissage implique des modifications physiques des connexions entre neurones. L'association entre plusieurs structures neuronales, dotées chacune d'une fonction précise, permet l'émergence d'une fonction d'ordre supérieure pour l'ensemble.

II.3.2 Neurone artificiel

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 (Touzet, 1992).

II.3.2.1 Les réseaux de neurones monocouche

Tels que le Perceptron et l'Adaline, ces réseaux sont exploités essentiellement dans la classification des données.

Chaque neurone artificiel reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones aval.

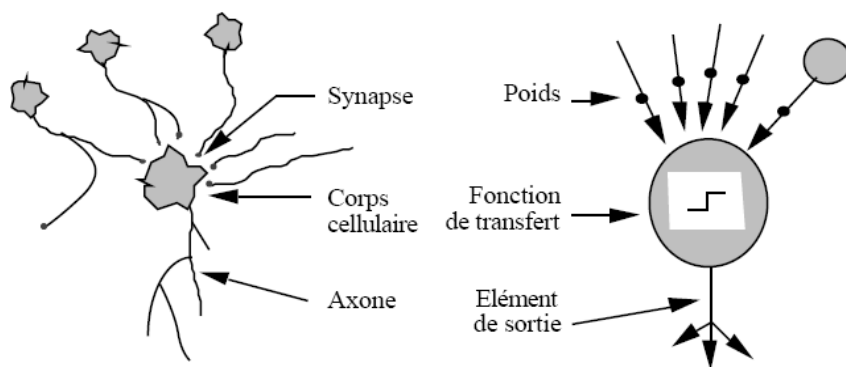


Figure II .2: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel

II.3.2.2 Les réseaux de neurones multicouche

Développés par Minsky et Papert (1969) (Rumelhart *et al.* 1986) sont plus puissants que les réseaux monocouche. Les réseaux multicouches peuvent constituer une solution aux problèmes non-linéaires, et cela par l'introduction de fonctions non-linéaires et de couches cachées Figure ()

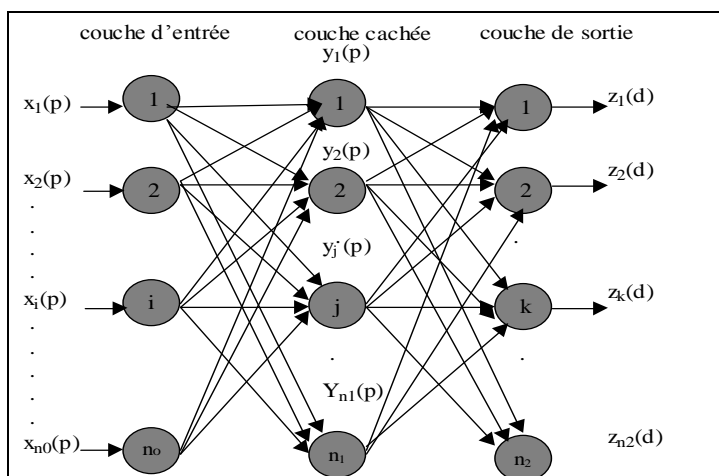


Figure II .3: Structure d'un réseau multicouche

II.4 LES MODELES MATHEMATIQUES

Les réseaux de neurones biologiques réalisent facilement un certain nombre d'applications telles que la reconnaissance de formes, le traitement du signal, l'apprentissage par l'exemple, la mémorisation, la généralisation. Ces applications sont pourtant, malgré tous les efforts déployés en algorithmique et en intelligence artificielle, à la limite des possibilités actuelles. C'est à partir de l'hypothèse que le comportement intelligent émerge de la structure et du comportement des éléments de base du cerveau que les réseaux de neurones artificiels se sont développés. Les réseaux de neurones artificiels sont des modèles, à ce titre ils peuvent être décrits par leurs composants, leurs variables descriptives et les interactions des composants.

II.4.1 Le Modèle de Neurone formel

Un réseau de neurones formels est un graphe (orienté ou pas) dont les sommets (neurones) ont une capacité (restreinte) à transformer un signal d'entrée en un signal de sortie, (Corsini, 2005). Les connexions sont pondérées et servent à transférer les signaux d'un (ou plusieurs) sommet(s) vers un (ou plusieurs) autre(s). Par ailleurs ces connexions peuvent être équipées de fonction de retard permettant ainsi une plus grande souplesse dans le modèle.

Un neurone formel utilise des *entrées* qui sont des grandeurs réelles. Si on représente les valeurs observées par le neurone sous forme d'un vecteur, le neurone réalise alors un découpage de son espace d'entrée (l'espace vectoriel auquel appartient le vecteur d'observation) en deux zones : la zone *d'activité* dont les vecteurs donnent une sortie égale à 1 et la zone *d'inactivité* dont les vecteurs donnent une sortie égale à 0. Les coefficients synaptiques et le seuil définissent l'équation d'un hyperplan qui est la frontière de la séparation entre les deux zones.

Le fonctionnement est simple, si aucune synapse inhibitrice n'est active, le neurone ajoute ses entrées synaptiques et vérifie que la somme atteint ou excède son seuil (Voir figure (II. 4))

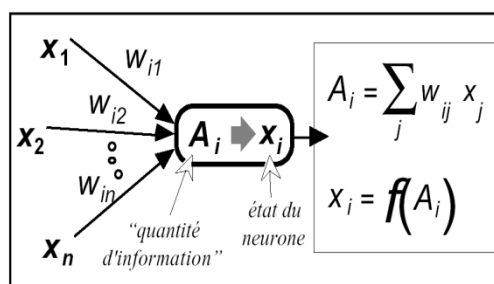


Figure II .4: Schéma illustratif d'un neurone formel

On distingue deux phases décrivant le comportement d'un neurone artificiel. La première est habituellement le calcul de la somme pondérée des entrées (a) selon l'expression suivante :

$$a = \sum(w_i \cdot X_i) \quad (\text{II.1})$$

A partir de cette valeur, une fonction de transfert calcule la valeur de l'état du neurone. C'est cette valeur qui sera transmise aux neurones avals.

$$X_i = f(a_i). \quad (\text{II.2})$$

II.4.2 Fonctions de transfert

Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de transfert. Les plus courantes sont présentées sur la figure 3.

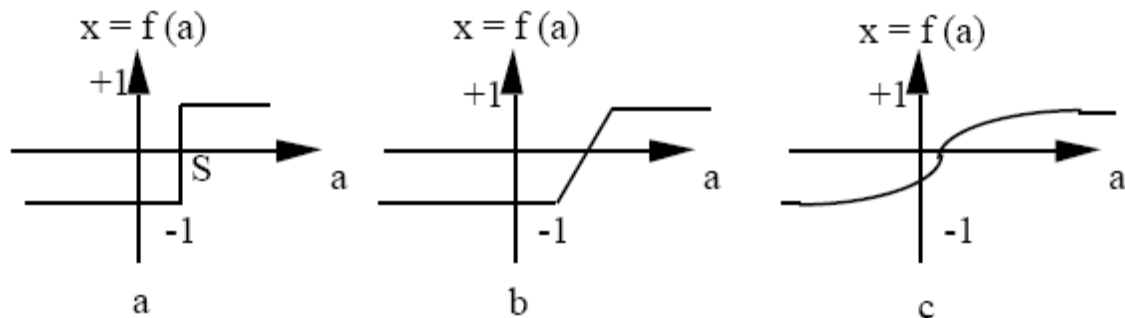


Figure II .5: Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel,

(a) : fonction à seuil (S , la valeur du seuil), (b) : linéaire par morceaux, (c) : sigmoïde.

Nous constatons que les équations décrivant le comportement des neurones artificiels n'introduisent pas la notion de temps. En effet, et c'est le cas pour la plupart des modèles actuels de réseaux de neurones, nous avons affaire à des modèles à temps discret, synchrone, dont le comportement des composants ne varie pas dans le temps.

II.4.3 Structure d'Interconnexion

Un réseau de neurones est un ensemble de neurones en réseau, de sorte que les signaux sortant des neurones deviennent des signaux entrant dans d'autres neurones. L'architecture générale des réseaux de neurones consiste en la représentation des neurones en couches successives, la première représentant la couche d'intrants, la dernière étant la couche d'extrants, les couches intermédiaires étant les couches cachées du réseau. Ces couches sont dites cachées car de l'extérieur du réseau, on ne peut analyser clairement leur fonctionnement. On ne connaît vraiment que les

signaux intrants et extrants du réseau. Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elle peut être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité.

Réseau multicouche :

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales. Voir figure (II.6)

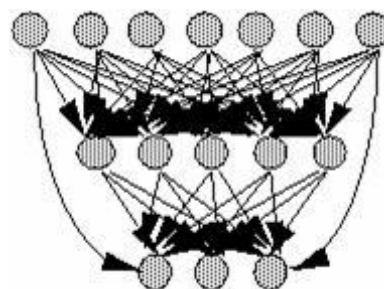


Figure II .6: Schémas d'un réseau multicouche.

Réseau à connexions locales :

Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche avale voir figure (II.7)

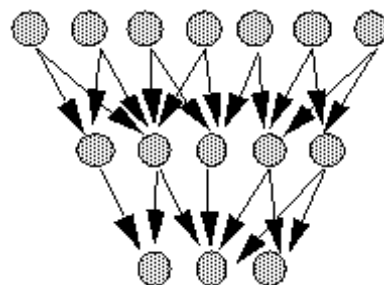


Figure II .7: Réseau à connexions locales

Réseau à connexions récurrentes_:

Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales. Voir figure ()

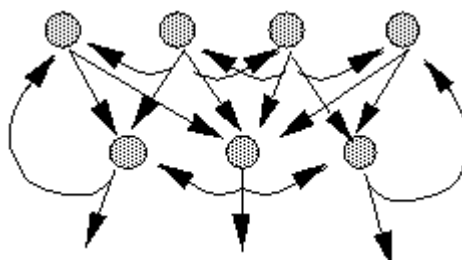


Figure II .8: Réseau à connexions récurrentes

Réseau à connexion complète :

C'est la structure d'interconnexion la plus générale. Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même), [Touzet, 1992]. Voir figure ()

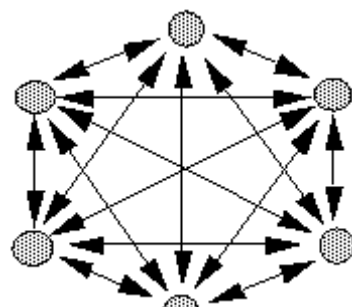


Figure II .9: Réseau à connexions complète

II.5 PROCESSUS D'APPRENTISSAGE DES RESEAUX DE NEURONES

Parmi les propriétés désirables pour un réseau de neurones, la plus fondamentale est sûrement la capacité d'apprendre de son environnement, d'améliorer sa performance à travers un processus d'apprentissage.

L'apprentissage est un processus dynamique et itératif permettant de modifier les paramètres d'un réseau en réaction avec les stimuli qu'il reçoit de son environnement. Le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les changements de paramètre surviennent.

L'apprentissage se traduit par une modification de l'efficacité synaptique, c'est-à-dire par un changement dans la valeur des poids qui relient les neurones d'une couche à l'autre. Soit le poids w_{ij} reliant le neurone i à son entrée j . Au temps t , un changement $\Delta w_{ij}(t)$ de poids peut s'exprimer simplement de la façon suivante :

$$\Delta w_{ij}(t) = w_{ij}(t + 1) - w_{ij}(t) \quad (\text{II.3})$$

Par conséquent :

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}(t) \quad (\text{II.4})$$

Avec $w_{ij}(t+1)$ et $w_{ij}(t)$ représentant respectivement les nouvelle et ancienne valeurs du poids w_{ij} .

Un ensemble de règles bien définies permettant de réaliser un tel processus d'adaptation des poids constitue ce qu'on appelle l'algorithme d'apprentissage du réseau.

L'objectif de l'apprentissage (Hinton, 1989), est de fournir une méthode au réseau afin qu'il puisse ajuster ces paramètres lorsqu'on lui présente des exemplaires à traiter. Certains réseaux font la différence entre une phase d'entraînement et une phase d'exploitation (cas du Perceptron), ou pas (cas du réseau ART).

L'apprentissage est la modification des poids du réseau dans l'optique d'accorder la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience. Il est souvent impossible de décider à priori des valeurs des poids des connexions d'un réseau pour une application donnée. A l'issue de l'apprentissage, les poids sont fixés : c'est alors la phase d'utilisation. Certains modèles de réseaux sont improprement dénommés à apprentissage permanent. Dans ce cas il est vrai que l'apprentissage ne s'arrête jamais, cependant on peut toujours distinguer une phase d'apprentissage (en fait de remise à jour du comportement) et une phase d'utilisation. Cette technique permet de

conserver au réseau un comportement adapté malgré les fluctuations dans les données d'entrées.

Il y a plusieurs types d'apprentissages, nous citons : l'apprentissage par correction d'erreur, Par la règle de Hebb, par renforcement, apprentissage compétitif, apprentissage supervisé et enfin apprentissage non supervisé.

Dans le cas de l'apprentissage non supervisé le réseau décide lui-même quelles sont les bonnes sorties. Cette décision est guidée par un but interne au réseau qui exprime une configuration idéale à atteindre par rapport aux exemples introduits.

L'apprentissage supervisé est le type d'apprentissage le plus utilisé. Pour ce type d'apprentissage la règle la plus utilisée est celle de Widrow-Hoff. D'autres règles d'apprentissage sont par exemple la règle de Hebb, la règle du perceptron, la règle de Grossberg etc. (Rumelhart et al. 1986).

II.5.1 L'apprentissage non Supervisé

Elle est caractérisée par l'absence complète de professeur, c'est-à-dire qu'on ne dispose ni d'un signal d'erreur, comme dans le cas supervisé, ni d'un indice de satisfaction, comme dans le cas par renforcement. Nous ne disposons donc que d'un environnement qui fournit des stimulus, et d'un réseau qui doit apprendre sans intervention externe. En assimilant les stimuli de l'environnement une description de son état interne, la tâche du réseau est alors de modéliser cet état le mieux possible. Pour y arriver, il importe d'abord de définir une mesure de la qualité pour ce modèle, et de s'en servir par la suite pour optimiser les paramètres libres du réseau, c'est-à-dire ses poids synaptiques. La fin de l'apprentissage, le réseau a développé une habilité formé des représentations internes des stimuli de l'environnement permettant d'encoder les caractéristiques de ceux-ci et, par conséquent, de créer automatiquement des classes de stimuli similaires.

L'apprentissage non supervisé s'appuie généralement sur un processus compétitif permettant d'engendrer un modèle où les poids synaptiques des neurones représentent des prototypes de stimuli (**Dreyfus**, 2005).

II.5.2 L'apprentissage Supervisé

L'apprentissage dit supervisé est caractérisé par la présence d'un «professeur» qui possède une connaissance approfondie de l'environnement dans lequel évolue le réseau de neurones. En pratique, les connaissances de ce professeur prennent la forme d'un ensemble de Q couples de vecteurs d'entrée et de sortie que nous noterons $\{(p_1, d_1), (p_2, d_2), \dots, (p_n, d_n)\}$, où (p_i) désigne un stimulus (entrée) et (d_i) la cible pour ce

stimulus, c'est-à-dire les sorties désirées du réseau. Chaque couple (p_n, d_n) correspond donc à un cas d'espace de ce que le réseau devrait produire (la cible) pour un stimulus donnée. Pour cette raison, l'apprentissage supervisé est aussi qualifié d'apprentissage par des exemples (Marc, 2004).

L'environnement produit un stimulus p qui est acheminé à la fois au professeur et au réseau. Grâce à ses connaissances intrinsèques, le professeur produit une sortie désirée $d(t)$ pour ce stimulus. On suppose que cette réponse est optimale. Elle est ensuite comparée (par soustraction) avec la sortie du réseau pour produire un signal d'erreur $e(t)$ qui est réinjecté dans le réseau pour modifier son comportement via une procédure itérative qui, éventuellement, lui permet de simuler la réponse du professeur. Autrement dit, la connaissance de l'environnement par le professeur est graduellement transférée vers le réseau jusqu'à l'atteinte d'un certain critère d'arrêt. Par la suite, on peut éliminer le professeur et laisser le réseau fonctionner de façon autonome. L'apprentissage supervisé n'est rien d'autre qu'un synonyme de l'apprentissage par correction des erreurs. Il possède donc les mêmes

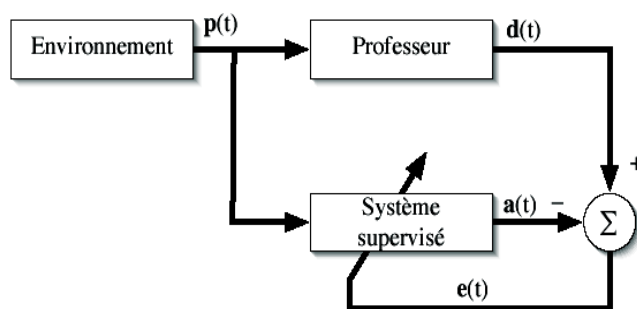


Figure II .10: Schéma bloc de l'apprentissage supervisé

Limitations, à savoir que sans professeur pour fournir les valeurs cibles, il ne peut d'aucune façon apprendre de nouvelles stratégies pour de nouvelles situations qui ne sont pas couvertes par les Exemples d'apprentissage.

II.5.2.1 Apprentissage des réseaux de neurones basés sur la décision

Le Perceptron et l'Adaline (Perceptron simple)

Ce type de réseau effectue la séparation entre deux zones de l'espace. La position de l'hyperplan séparant ces deux régions, constitue les contours de décision. L'Adaline (ADAPtative LInear NEurone) est une extension du Perceptron (simple), l'idée est de remplacer la fonction seuil sur les neurones de sortie par la fonction identité ($f(x)=x$). L'avantage de cette approche est de ne plus être restreinte à une réponse binaire, et d'offrir tout l'éventail de valeurs possibles.

Widrow (1960) a proposé une solution qui évite l'estimation de l'espérance. Pour cela l'algorithme agit à la présentation de chaque exemple en entrée. Ainsi, l'algorithme estime la trajectoire à prendre vers le point minimum à chaque présentation d'un vecteur d'entrée, c'est la méthode de descente de gradient.

Méthode de Descente de Gradient :

Cette méthode consiste à déterminer les adaptations qu'il faut apporter aux vecteurs des poids synaptiques à chaque présentation d'une entrée, afin de faire décroître l'erreur de sortie jusqu'à obtention de la solution optimale.

L'algorithme proposé par Widrow, permet d'estimer la trajectoire à prendre vers le point minimum à chaque présentation d'entrée. Ainsi à chaque vecteur présenté, on enregistre une surface d'erreur, dont on estime le gradient en fonction des poids synaptiques, et on modifie ces poids pour faire décroître l'erreur : c'est la méthode du Delta. De cette manière, le gradient ne pointera que le minimum instantané à chaque étape.

L'erreur quadratique instantanée à chaque étape :

$$E^k = \frac{1}{2} (e^k)^2 = \frac{1}{2} (d^k - y^k)^2 \quad (\text{II.5})$$

Avec E^k est la fonction quadratique, e^k est la fonction objectif, d et y sont respectivement les valeurs observées et simulées par le réseau de neurones.

Afin de progresser dans le sens opposé du gradient, on a :

$$W_{ij}^{k+1} = W_{ij}^k + \eta_k (d_i^k - y_i^k) x_j^k \quad (\text{II.6})$$

Où W_{ij} sont les poids ou coefficients, η_k est un paramètre appelé taux d'apprentissage, dont le rôle est de réguler la vitesse de convergence et contrôler la stabilité de ce processus.

Cependant, les réseaux de neurones basés sur la décision représentent un approximateur linéaire, et sont donc limités aux fonctions linéaires.

II.5.3 L'apprentissage Par Renforcement

L'apprentissage par renforcement permet de contourner certaines des limitations de l'apprentissage supervisé. Il consiste en une espèce d'apprentissage supervisé, mais avec un indice de satisfaction scalaire au lieu d'un signal d'erreur vectoriel (Marc, 2004).

Dans le contexte des réseaux de Neurones Artificiels, nous pouvons reformuler l'énoncé de la façon suivante :

Lorsqu'une action (décision) prise par le réseau engendre un indice de satisfaction positif, alors la tendance du réseau à prendre cette action doit être renforcée. Autrement, la tendance prendre cette action doit être diminuée.

En pratique, l'usage de l'apprentissage par renforcement est complexe à mettre en œuvre. Il importe cependant de bien comprendre la différence entre ce type d'apprentissage et l'apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé dispose d'un signal d'erreur qui non seulement permet de calculer un indice de satisfaction (p.ex. l'erreur quadratique moyenne), mais permet aussi d'estimer le gradient local qui indique une direction pour l'adaptation des poids synaptiques. C'est cette information fournie par le professeur qui fait toute la différence. Dans l'apprentissage par renforcement, l'absence de signal d'erreur rend le calcul de ce gradient impossible. Pour estimer le gradient, le réseau est obligé de tenter des actions et d'observer le résultat, pour éventuellement inférer une direction de changement pour les poids synaptiques. Pour ce faire, il s'agit alors d'implanter un processus d'essais et d'erreurs tout en retardant la récompense offerte par l'indice de satisfaction.

L'apprentissage par renforcement, c'est apprendre à agir par essai et erreur.

Dans ce paradigme, un agent peut percevoir son état et effectuer des actions. Après chaque action, une récompense numérique est donnée. Le but de l'agent est de maximiser la récompense totale qu'il reçoit au cours du temps.

II.6 RESEAUX DE NEURONES MULTICOUCHE (PERCEPTRON MULTICOUCHE)

Vers le début des années quatre vingt, avec l'essor qu'a connu les réseaux de neurones artificiels notamment par la vulgarisation de l'algorithme de rétrogradation de l'erreur (Backpropagation) (Rumelhart *et al.* 1986), ce modèle constitué de plusieurs couches (appelé Perceptron multicouches) a permis l'émergence de toute une catégorie de classe de réseaux de neurones, dont la propriété reste l'approximation non linéaire.

II.6.1 Algorithmes d'apprentissage

Pour les réseaux de neurones, les algorithmes les plus utilisés, sont les modèles d'optimisation non linéaires par rapport aux paramètres, les vecteurs des entrées et de la sortie sont centrés :

$$Y = f(X, \theta) + \omega \quad (\text{II.7})$$

Où f est une fonction de régression (d'activation).

Ces modèles utilisent des méthodes itératives pour obtenir une estimation des paramètres. Leur principe est de se placer en un point, de trouver une direction de descente du coût dans l'espace des paramètres θ , et de se déplacer d'un pas suivant cette direction, on poursuit cette démarche jusqu'à satisfaction de ce critère d'arrêt (Dreyfus *et al.* 2004)

II.6.2 La backpropagation

En 1986 un groupe de chercheurs de l'université de Stamford (Etats Unis) Rumelhart, Hinton et Williams, l'ont développé et l'ont complètement adapté aux réseaux multicouches. Cet algorithme a été publié dans leur ouvrage sur les processus distribués parallèles (Parallel Distributed Processing) (Rumelhart *et al.* 1986). Ils ont appelé la méthode Backpropagation en référence à l'erreur qui se rétropropage, à travers les couches du réseau. Il s'agit d'une méthode d'apprentissage supervisé, fondée sur la modification des poids du réseau dans le sens contraire à celui du gradient de l'erreur par rapport à ces poids.

II.6.3 Conclusions

L'apprentissage supervisé, tel que celui mis en œuvre par l'algorithme de la rétro-propagation du gradient d'erreur, nécessite la définition d'une base d'exemples d'apprentissage représentative. Chaque exemple est un couple (entrée, sortie désirée) et le principe de l'algorithme est de réduire l'erreur quadratique réalisée par le réseau. Cette erreur est la différence entre la valeur de sortie désirée et la valeur de sortie obtenue.

La rétro-propagation du gradient opérant sur un réseau multicouche a contribué de façon majoritaire à la popularité et à la diffusion des applications connexionnistes. Cependant, la difficulté inhérente à la construction d'une base d'apprentissage "représentative" limite son utilisation. Des recherches ont donc été conduites avec l'objectif de construire de manière automatique la base d'apprentissage.

L'apprentissage par renforcement est une alternative possible à la définition par l'opérateur de la base d'apprentissage. La différence essentielle avec l'apprentissage supervisé réside dans la forme des exemples d'apprentissage. Il s'agit de triplets (entrée, sortie, utilité), où la dernière composante encode l'utilité de produire cette "sortie" pour cette "entrée". Les exemples d'apprentissage sont ici générés automatiquement au cours d'une phase dite d'"exploration".

CHAPITRE III

BASES MATHÉMATIQUES DE LA LOGIQUE FLOUE

*A few strong instincts and a few plain rules suffice
us.*

-Ralph Waldo Emerson-

CHAPITRE III: BASES MATHÉMATIQUES DE LA LOGIQUE FLOUE

III.1 INTRODUCTION

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, a pour objet d'étudier la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. On peut donc la situer à côté des heuristiques de résolutions de problèmes, des systèmes experts, de l'apprentissage, de l'intelligence artificielle distribuée et même du traitement de la langue naturelle, domaines qui composent les techniques d'intelligence artificielle au sein des sciences cognitives.

Dans les problèmes de prise de décision, d'aide au diagnostic et plus généralement dans tous les systèmes à base de connaissances, on souhaite, à partir d'observations, parvenir à une conclusion qui peut être la détermination d'un objet ou une action à prendre. Or lors du fonctionnement de ces systèmes, interviennent des connaissances mal définies, mal décrites et imparfaitement connues, puis au niveau des règles d'inférence, intervient un traitement imparfait et incomplet du déroulement de la déduction, enfin survient le problème du traitement des contradictions et de la fusion (agrégation) de données voisines.

Tous les problèmes concrets sont, en fait, confrontés aux notions d'incertitude et d'imprécision. Ces deux notions sont habituellement mêlées et c'est essentiellement l'observation statistique qui induisait, jusqu'à présent dans la pratique, la mesure probabiliste des incertitudes.

Mais la théorie des probabilités reste assez rigide et il existe d'autres types d'incertitudes liées à la difficulté des observations, aux imprécisions linguistiques, à la fiabilité tant des observateurs humains que des capteurs et instruments de mesure, à l'utilisation de connaissances empiriques et à l'imprécision du raisonnement humain.

Le raisonnement humain intervient lorsqu'il n'est pas possible ou plus significatif de quantifier numériquement un phénomène ou un état sans dénaturer sa signification par rapport à son contexte. La beauté d'une image, le confort d'une automobile ne sont pas mesurables par des moyens classiques. Ces phénomènes sont encore accentués, lorsqu'à l'issue d'une analyse ou d'une résolution de problème, il faut transmettre l'information à un homme ou à une machine pour une décision finale. L'Homme apprécie, sous forme de qualificatifs nuancés, un état par rapport à son environnement et un phénomène dynamique par des tendances.

La logique floue permet donc une représentation du processus étudié par un langage naturel sous la forme des règles en introduisant des nuances ' faible' 'élevé' 'très élevé', et modélise en partie l'approche humaine, ce qui permet d'introduire une interprétabilité au système modélisé.

La théorie des ensembles flous est l'outil indispensable de formalisation mathématique de l'analyse humaine face à un système complexe, et des résultats de cette analyse. Elle intéresse des domaines très variés tant scientifiques que techniques en facilitant souvent l'intégration de l'interprétation humaine d'un problème.

III.2 HISTORIQUE

Les prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières approches, par des chercheurs américains, du concept d'incertitude.

Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de sous ensemble floue soit proposé par L. A. Zadeh, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation de phénomène sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. En 1973 L. A. Zadeh propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage.

En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connaît la complexité, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société F. L. Smidt-Fuller.

En 1985, Grâce au chercheur japonais M. Sugeno, la logique floue était introduite au Japon contribuant aux premiers produits industriels (Japon) utilisant le principe de la logique floue appliqué à des problèmes de réglage et de commande. Les sociétés japonaises comprirent l'avantage à la fois technique et commercial de la logique floue: facilité d'implantation, solution de problèmes multivariables complexes, robustesse vis à vis des incertitudes et possibilité d'intégration du savoir de l'expert.

La commande floue a été largement utilisée au Japon à la fin des années 80 et au début des années 90, sur le métro Sendai (Juillet 1987), dans la conception du lave-linge Aïsaïgo Day Fuzzy de Matsushita (Février 1990), à titre d'exemple.

Tirant profil d'une évolution de la technologie permettant d'aborder des problèmes en temps réel, à dynamique rapide (plus rapide que dans les premières applications de type conduite de processus lents: chaudière, fours,.....), l'industrie japonaise a développée des produits grand public à base de logique floue (appareils

électroménagers, audio-visuels, systèmes automobiles (suspension, climatisation,...etc.) Ainsi que les systèmes de transport).

De nos jours, les applications des systèmes flous se sont multipliées. Entre autres, nous pouvons citer les contrôleurs flous, systèmes de conditionnement d'ambiance, systèmes de décision, diagnostic, systèmes de contrôle/commande ainsi que les systèmes de classification et de reconnaissance des formes flous.

Malgré les différences dues aux particularités de chaque application, ces systèmes ont pratiquement la même structure interne, et se basent sur un mécanisme d'inférence, ils sont baptisés systèmes d'inférence flous (SIF).

III.3 NOTIONS DE BASE

III.3.1 L'Imprécis

L'imprécis concerne donc le contenu de l'information. L'imprécis, par opposition au précis, qualifie un élément d'information qui n'est pas impliqué par des propositions du type "vrai" ou "faux". D'autres qualificatifs décrivent cette notion d'imprécis : "vague", "flou", "général", "ambigu".

L'imprécision, c'est ce qui est relatif au contenu d'une proposition «mesurer environ 1,75m», «avoir entre 20 et 25 ans», on ne donne pas de valeur précise mais un intervalle, une «fourchette». Ainsi, ce qui était couramment appelé incertitude probabiliste ou intervalle de confiance, (cas par exemple d'un poids donné à 10g près) est une «imprécision».

Le caractère vague ou flou réside dans l'absence de contours bien limités de l'ensemble des valeurs affectées aux objets qu'elles cernent

III.3.2 L'incertain

Face à la vérité de l'information au sens de la conformité à une Certitude ou incertitude d'un événement, d'une proposition ou implication L'incertitude est un coefficient apporté au fait qu'une proposition soit vraie ou fausse. Dans «il est possible qu'il soit grand», le prédicat «grand» est considéré comme vrai ou faux sans aucune nuance, mais c'est la proposition qui est douteuse. Nous voyons ici, pour une proposition qui reste booléenne (soit vrai soit faux) la notion de possibilité et nécessité.

III.3.3 Univers de discours et classes d'appartenance:

La notion d'univers de discours se conçoit aisément: prenons le concept de «température» qui peu être décrite par un certain nombre de mots: «chaud», «froid»,

«tiède», ou «très chaud», «assez chaud», «tiède», «assez froid», «très froid». Pour chacun de ces prédicats, on pourra donner une fonction d'appartenance. L'univers de discours sera considéré comme le domaine de fonctionnement du processus.

En général, on peut donner un nombre de règles de commande important, mais l'intérêt de la commande floue est que seul un petit nombre de règles est nécessaire. Le nombre de prédicats dépend essentiellement de la manière dont l'expert peut décrire le processus et de la précision souhaitée. Par exemple, en commande floue classique, 5 prédicats (grand, très grand, moyen, petit, très petit) est un bon compromis; parfois trois peuvent suffire (dans le cas extrêmes, on peut aller jusqu'à 7). Les trois prédicats «petit», «moyen», «grand» ou «négatif», «positif», et «proche de zéro» servent à la régulation; les autres prédicats servent à la poursuite. La commande floue permet d'assurer une transition harmonieuse entre les deux modes de fonctionnement.

L'univers de discours d'une variable couvrira l'ensemble des valeurs prises par cette variable. En pratique, l'intersection entre deux prédicats consécutifs est non nulle, de façon à pouvoir exercer une pondération sur la commande. Il en résulte un chevauchement des variables qui doit être suffisant pour permettre une description continue des variables mais pas trop important pour limiter l'imprécision. Il est notamment préférable d'éviter que les fonctions d'appartenance de deux prédicats voisins soient simultanément égales à 1.

III.3.4 Définition d'une variable linguistique

La notion de variable linguistique a été introduite par Zadeh (1971), elle correspond à une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases exprimées dans une langue naturelle ou un langage artificiel (Zadeh, 1971). Elle est définie par le quadruplet suivant (Driankov et *al.* 1993) :

$$\{x(\text{nom}), L(x), (U), \mu(x)\} \quad (\text{III.1})$$

Où :

$x(\text{nom})$ est le nom de la variable linguistique, comme taille, température, pluie, âge, etc.

$L(x) = \{L_1, \dots, L_n\}$ est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre la variable $x(\text{nom})$. Par exemple $L(x) \{ \text{grand, petit, moyen} \}$. $L(x)$ est aussi appelé ensemble des étiquettes associé à la variable $x(\text{nom})$ ou ensemble des termes.

U est dénommé univers du discours, il représente le domaine associé à la variable x (nom). Pour la variable linguistique taille, U peut être défini dans l'intervalle $[1,60m - 1,90m]$.

μ : est une fonction sémantique qui associe à tout symbole de U une signification floue.

Une variable linguistique peut être plus informative et plus généralisable qu'une variable numérique (Nakoula, 1997).

III.3.5 Fonctions d'appartenance

Il s'agit d'établir une relation entre le degré de vérité de la variable floue et la grandeur d'entrée correspondante. La fonction d'appartenance associée à un terme linguistique est appelée signification floue. L'ensemble des parties floues associées aux termes flous représente une partition floue (Bouchon-Meunier *et al.*, 2003). Les fonctions d'appartenance peuvent prendre différentes formes : singleton, triangulaire ou gaussienne, etc.

Les fonctions d'appartenance doivent être correctement construites, car elles sont à la base du système. Une courbe possède en abscisse les valeurs de la variable d'entrée (x) qui peut être une distance, une vitesse ou une mesure de débit, et en ordonnée le degré d'appartenance à l'état $\mu_A(x)$ compris entre 0 et 1. Dans ce cas, la transition d'appartenance à non appartenance est graduelle (Kauffman, 1973).

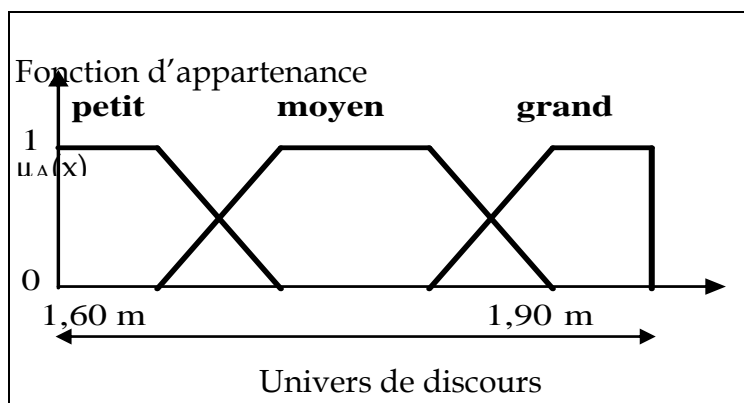


Figure III .1: Etiquette pour la variable linguistique taille

De la même manière, une variable y appartiendra à un ensemble B avec une fonction d'appartenance notée $\mu_B(y)$, par exemple «le vent est fort». On peut associer x et y dans une même phrase, par exemple l'ensemble C : «l'air est chaud et le vent est fort». La variable z définie par: «air chaud et vent fort» correspond à l'intersection de «air est chaud» et de «vent est fort». L'ensemble C correspond à l'intersection des ensembles A et B . La valeur de $\mu_C(z)$ se déduit des valeurs de $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$.

L'allure de la fonction d'appartenance (voir Figure) est à choisir selon l'application traitée. Les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont en forme de trapèze ou de pointe, et permettent de respecter cette contrainte tout en gardant une forme analytique très simple. Dans certaines applications, où l'on doit dériver la fonction d'appartenance, on choisira plutôt des fonctions en S ou des fonctions de type gaussien, continûment dérivables sur leur support.

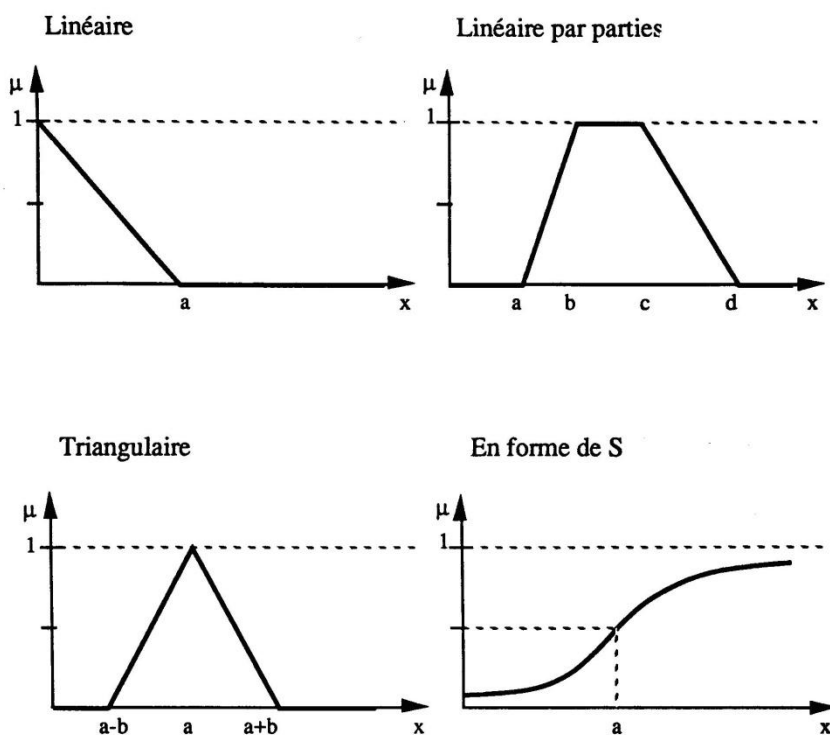


Figure III .2: L'allure de quelques fonctions d'appartenance usuelles

III.3.6 Sous-ensembles flous

Un sous ensemble flou $F(U)$ est défini sur un univers de discours U , et caractérisé par une fonction d'appartenance μ_F à valeurs dans un intervalle $[0,1]$, soit donc $\mu_F \rightarrow [0,1]$ (Zadeh, 1971).

Le sous ensemble flou F est défini par :

$$F = \{(x, \mu_F(x)) / x \in U\} \tag{III.2}$$

Si Z est discret, tout élément de $F(Z)$ sera noté :

$$F = \sum (x, \mu_F(x)) / x \in U \tag{III.3}$$

Dans le cas où z est continu :

$$F = \int \sum (x, \mu_F(x)) / x \in U \tag{III.4}$$

La figure-2 présente un exemple de fonction d'appartenance d'un ensemble flou défini sur un univers de discours U , ainsi que la fonction d'appartenance d'un ensemble classique.

Dans le cas d'un sous-ensemble flou F , on distingue trois cas pour la fonction d'appartenance :

- $\mu(x) = 0$, si x n'appartient pas au sous-ensemble flou $F(U)$;
- $\mu(x) = 1$, si x appartient au sous-ensemble flou $F(U)$;
- $\mu(x) \neq 0$, et $\mu(x) \neq 1$, si x appartient partiellement au sous-ensemble flou $F(U)$.

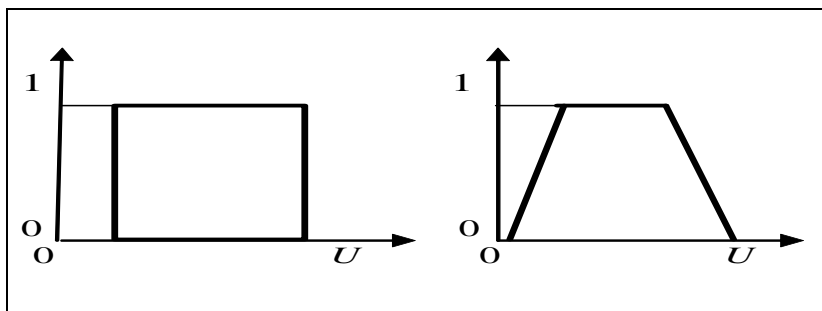


Figure III .3: Fonction d'appartenance d'un ensemble classique et d'un ensemble flou

Le support est l'ensemble des éléments qui appartiennent à l'univers E tels que la fonction d'appartenance soit non nulle sur cet intervalle.

$$Support(F) = x \in U / \mu(x) \neq 0 \tag{III.5}$$

Le noyau est l'ensemble des éléments qui appartiennent à l'univers U tels que la fonction d'appartenance soit égale à 1 sur cet intervalle.

$$Noyau(F) = x \in U / \mu(x) = 1 \tag{III.6}$$

Une α -coupe correspond à l'intervalle :

$$N\alpha(F) = \{x \in R / \mu_F(x) \geq \alpha\} \tag{III.7}$$

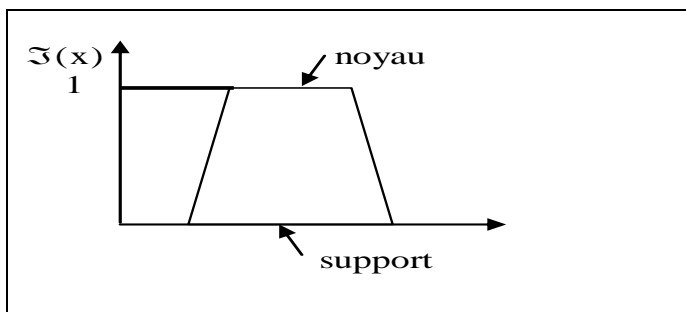


Figure III .4: Exemple d'un support et d'un noyau

III.3.7 Opérations sur les ensembles flous

Pour pouvoir manipuler les sous-ensembles flous, il a fallu généraliser les opérations ensemblistes classiques. Considérons que A et B sont deux sous-ensembles flous définis dans l'univers de discours U .

Egalité des ensembles floue: Deux sous-ensembles flous sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur en tout point de U .

A et B sont égaux si :

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (\text{III.8})$$

Complément: Le complément de A ou (\bar{A}) de A par rapport à U est défini par la fonction d'appartenance suivante :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in U \quad (\text{III.9})$$

Inclusion: A est inclus dans B si et si seulement

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (\text{III.10})$$

Chaque élément x qui appartient à A , appartient à B au moins de la même façon qu'il appartient à A .

Union: L'union de A et B est l'ensemble d'appartenance ayant la fonction d'appartenance suivante :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad \forall x \in U \quad (\text{III.11})$$

Un élément $x \in U$ appartient donc à $A \cup B$ s'il appartient à A ou à B

En définissant l'union comme le 'max', on détecte le plus petit ensemble flou qui contient A et B .

L'intersection: L'intersection de A et B est l'ensemble d'appartenance ayant la fonction d'appartenance suivante :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad \forall x \in U \quad (\text{III.12})$$

Un élément x appartient donc à $A \cap B$ s'il appartient à A et B .

En définissant l'intersection comme le 'min', on détecte le plus grand ensemble flou qui est contenu dans A et B. De cette façon, un ensemble flou qui contient A et B contient $A \cup B$, qui à son tour contient $A \cap B$.

Partition floue: La partition floue d'un univers de discours U consiste à définir n sous-ensembles flous F_i de façon à recouvrir U. C'est à dire que pour tout élément x de U, il faut assurer une appartenance minimale ε à l'union de F_i .

$$\bigcup F_i \subseteq U_s = \{x \in U; \mu_{U_s}(x) = \varepsilon\} \quad (\text{III.13})$$

La condition (3.1) se traduit au niveau des fonctions d'appartenance par la condition

$$\mu_{F_1}(x) \vee \dots \vee \mu_{F_n}(x) \geq \varepsilon$$

Ou \vee est un opérateur d'union (appelé également "ou"). Comme la fonction max minore toutes les fonctions utilisées comme opérateurs d'union, pour assurer une partition floue de niveau ε , il faut et il suffit que tout élément x de U possède un degré d'appartenance à l'union des F_i avec pour opérateur d'union la fonction max, supérieure ou égal à ε .

L'ensemble de sous-ensembles flous à définir dans une partition d'un univers de discours est fixé par l'expert. Plus ce nombre est important, plus on définit de classes sur cet univers, ce qui permet d'augmenter la sensibilité de la commande floue.

III.4 LES SYSTEMES D'INFERENCE FLOUE (SIF)

Les systèmes d'inférence floue (SIF) permettent de modéliser la plupart des applications continues d'un espace à n dimensions dans \mathcal{H} (voir Figure 5). A la différence des modèles mathématiques ou des modèles de type "boite noire", la représentation est faite en langage naturel, sous la forme de règles *Si ... Alors*. Ceci permet une interopérabilité immédiate, qui peut être exploitée de deux façons : *à priori*, en donnant une valeur, même approximative, aux différents paramètres du SIF, *à posteriori*, en permettant l'examen de la connaissance extraite lors d'une optimisation (on parle aussi d'apprentissage).

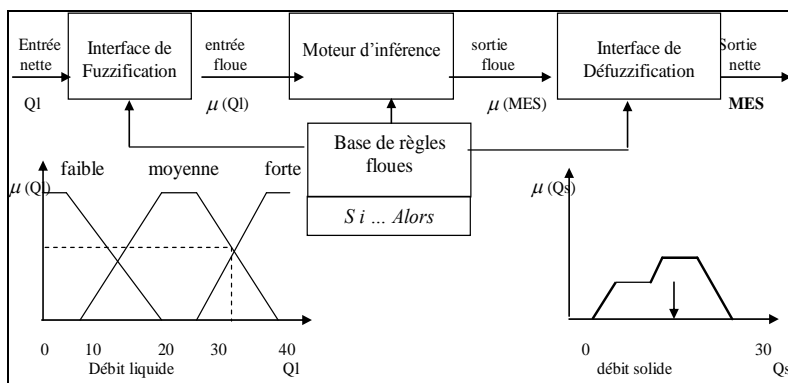


Figure III .5: Structure d'un SIF

III.4.1 Règles floues

III.4.1.1 Proposition floue

Une proposition floue s'exprime à partir d'une variable linguistique (x,U, μ_U) sous la forme "E est A", pour un terme de μ_U , ou en appliquant un modificateur linguistique sur un élément de l'ensemble des ternes. Les propositions floues sont la base des systèmes de règles floues. Exemple : « Le débit est relativement élevée" . . .

III.4.1.2 Bases de règles

La création et l'utilisation d'une base de règles nécessitent l'existence, pour chaque univers de discours considéré, des sous ensemble flous particuliers. La définition de ces sous-ensembles flous fait l'objet de la partition floue.

Une fois la partition des univers de discours réalisée, il est possible de définir la base de règle. Celle-ci caractérise les relations entre les classes d'événements possibles en entrée et les commandes correspondantes. Par conséquent, si l'on considère n univers de discours U_i pour les prémisses des règles floues et si pour chaque univers U_i on définit une partition en m_i sous ensembles flous, le nombre maximum de règles r_{max} est de

$$r_{max} = \prod_{i=1}^n m_i \tag{III.14}$$

Le nombre de règles définis par l'expert peut-être inférieur à r_{max} . C'est le cas, en particulier, s'il existe des configurations des sous ensembles flous impossibles à obtenir pour le système. De plus le nombre de sous ensemble flous définissant la partition de l'univers de discours de la commande n'est pas forcément égale au nombre de règles. En effet, il est possible de considérer des configurations différents aboutissant à la même conclusion.

Enfin, une augmentation de la sensibilité de la commande floue obtenue par une partition plus fine des univers de discours des prémisses aboutit à un accroissement important du nombre de règles à définir par l'expert.

III.4.2 La fuzzification

La fuzzification est l'étape de passage du domaine numérique au domaine symbolique. Cette étape est nécessaire dès lors que l'on veut manipuler à l'aide de la théorie des ensembles flous des grandeurs physiques mesurables. L'espace de variation d'une variable ou univers de discours est partagé en qualificatifs linguistiques, traduisant les différents états possibles de la variable. Pour chaque qualificatif ou terme de fuzzification, on définit une fonction d'appartenance sur l'univers de discours. La forme et les paramètres des différentes fonctions d'appartenance sont à adapter au cas particulier à traiter.

On peut distinguer deux types de fuzzification, la fuzzification numérique et la fuzzification symbolique.

III.4.2.1 Fuzzification numérique :

Elle transforme toute valeur numérique x de l'entrée en une partie floue numérique, c'est à dire un élément de $F(x)$. Cette partie floue caractérise l'imprécision qu'on peut avoir sur la mesure x . Pour effectuer cette fuzzification deux méthodes sont possibles :

- Fuzzification singleton, est utilisée lorsque la valeur fournie par le capteur est supposée connue (Figure V-6). La fonction d'appartenance est définie par :

$$F(x) = \begin{cases} 1 & \text{Si } x = x_0 \\ 0 & \text{Si } x \neq x_0 \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

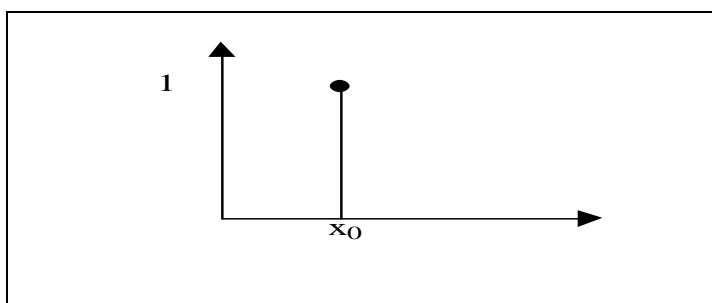


Figure III .6: Fuzzification singleton

- Fuzzification non singleton, on considère dans ce cas, que le capteur peut effectuer une erreur de mesure.

III.4.3 La défuzzification

La défuzzification représente la conclusion d'un calcul par le modèle flou. Elle permet de transformer la partie floue issue de l'inférence en une valeur physique ou numérique. On peut distinguer deux types de défuzzification: numérique et symbolique. Dans le cadre de notre travail nous insistons sur la défuzzification numérique qui ne nécessite aucune connaissance sur les symboles associés à la sortie.

Défuzzification numérique : Diverses méthodes de défuzzification numériques ont été développées (Driankov et al. 1993), telles que la méthode du maximum, de la moyenne pondérée ou celle du centre de gravité.

III.4.3.1 La technique du centre de gravité

Cette technique est la plus utilisée malgré le nombre de calcul important, elle fera l'objet de notre travail de recherche.

La valeur de sortie est égale au centre de gravité de l'enveloppe fournie par l'union de zones du vecteur de sortie (Figure V-6). Dans ce cas, tous les termes calculés ont une influence et la valeur numérique de sortie peut prendre une infinité de valeur.

Soit $F \in F(Y)$, la partie floue numérique issue de l'inférence, la valeur numérique y^* produite par l'application de la méthode du centre de gravité est donnée par :

$$y^* = \delta_1(F) = \frac{\int_{y \in Y} \mu_F(y) \cdot y \cdot dy}{\int_{y \in Y} \mu_F(y) \cdot dy} \quad \text{si } Y \text{ est continu} \quad (\text{V.16})$$

$$y^* = \delta_1(F) = \frac{\sum_{y \in Y} \mu_F(y) \cdot y}{\sum_{y \in Y} \mu_F(y)} \quad \text{si } Y \text{ est discret} \quad (\text{V.17})$$

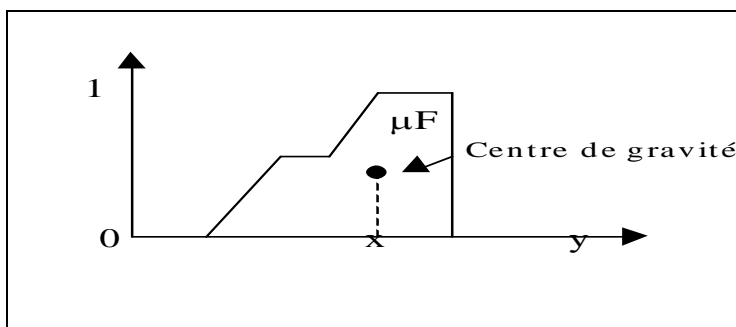


Figure III .7: Défuzzification par la méthode du centre de gravité.

III.5 APPRENTISSAGE DES MODELES FLOUS

Dans le cadre de l'approximation de fonction entre l'entrée et la sortie du système, l'apprentissage (supervisé) consiste à définir la base de règles flous, c'est-à-dire leurs nombres, leurs prémisses et leurs conclusion, qui minimisent l'écart entre les sorties désirées et celles inférées par le système formé par de l'ensemble flou.

Le problème de modélisation floue, ou de construction de modèles flous peut être vu comme un processus d'identification de système flou. D'un point de vue conceptuel, l'identification d'un système d'inférence flou peut être effectuée selon deux phases : l'identification de la structure du modèle, et l'estimation des paramètres du modèle à partir d'un ensemble de données.

III.5.1 Identification de la structure du modèle

Les systèmes d'inférence flous se basent sur l'induction des règles floues, qui à partir de ces règles permettent une formalisation des relations qui existent entre les entrées et les sorties du système modélisé. Dans ce cas, il est primordial de respecter la sémantique des règles, qui permet d'interpréter les sous-ensembles flous, en terme linguistique.

Si l'interprétabilité est plus ou moins importante (dans le cas de l'approximation), la cohérence reste une propriété essentielle de la base des règles, quelque soit l'utilisation du modèle. Elle signifie que les conclusions des règles simultanément activées, ne soient pas contradictoires.

L'identification de la structure du modèle est liée au partitionnement de l'univers de discours.

Une des techniques utilisées pour générer des règles floues est le partitionnement de l'espace multidimensionnel, ce partitionnement définit un certain nombre d'ensembles flous pour chacune des règles. L'apprentissage consiste à optimiser le partitionnement et les conséquences des règles en fonction des données.

Dans cette approche dite subjective, le modélisateur définit un nombre de termes linguistiques sur les espaces d'entrée et de sortie. Ces termes constituent le langage qu'il utilise pour décrire le système, et forment également les partitions des différents espaces. Les fonctions d'appartenance sont alors connues.

La deuxième approche est celle utilisant une coalescence floue (fuzzy clustering), dans ce cas l'identification de la structure sera faite à partir des données, la coalescence floue permet de partitionner l'espace des données en plusieurs classes. Chacune de ces classes ou régions flous est caractérisée par un vecteur appelé centre

de classe. L'utilisation d'un algorithme de coalescence floue à l'avantage essentiel de permettre la génération automatique de fonctions d'appartenance.

III.5.2 Identification des paramètres

Dans notre travail, nous nous intéresserons qu'aux modèles de Sugeno (Takagi-Sugeno-Kang). A ce titre nous pouvons noter que plusieurs méthodes ont été élaborées pour l'identification des paramètres de ces modèles.

Les modèles de Sugeno permettent d'établir une relation analytique qui relie les entrées à la sortie du système modélisé. L'estimation des paramètres du modèle se fait par l'introduction par des méthodes d'optimisation qui reviennent à minimiser un certain critère (Nakoula, 1997).

Les paramètres à identifier sont de deux types : les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie. Les paramètres d'entrée dont ceux des fonctions d'appartenance dans les partitions des espaces d'entrée. On suppose que chacune de ces fonctions d'appartenance peut être décrite par p paramètres où p dépend de la forme de la fonction choisie.

Dans le cas de fonctions Gaussiennes, p est égal à deux paramètres (moyenne et écart-type), dans le cas d'une fonction triangulaire, on a 3 paramètres (valeur modale et les deux extrémités du support).

Les paramètres de sortie sont ceux apparaissant dans les conclusions des règles.

Si l'on considère un modèle de Sugeno (d'ordre 1) à m règles, avec la définition de I_1, I_2, \dots, I_r , termes linguistiques respectivement pour chaque variable x_1, x_2, \dots, x_r , le modèle est alors entièrement paramétré par le vecteur :

$$P = [a_{11}, \dots, a_{1I_1}, a_{21}, \dots, a_{2I_2}, \dots, a_{r1}, a_{rI_r}, b_1, b_2, \dots, b_m]^T \quad (\text{III-17})$$

Avec a_{ij} vecteur des paramètres relatifs au $j^{\text{ème}}$ symbole défini pour la $i^{\text{ème}}$ variable, $i=1..r, j=1, \dots, I_i$, soit :

$$a_{ij} = [a_{ij}^1, a_{ij}^2, \dots, a_{ij}^P]^T \quad (\text{III-18})$$

Et b_i vecteur des $(r+1)$ coefficients relatifs à la $i^{\text{ème}}$ règle, $i=1 \dots m$, soit :

$$b_i = [b_{i0}, b_{i1}, \dots, b_{ir}]^T \quad (\text{III-19})$$

Pour une entrée donnée, (x_1^k, \dots, x_r^k) la sortie du modèle est

$$\hat{y}_k = \sum_{i=1}^m v_i \cdot y_i^k \quad (\text{III-20})$$

La différence entre cette sortie et celle du système pour la même entrée (x_1^k, \dots, x_r^k) $e_k = \hat{y}_k - y_k$, l'erreur quadratique instantanée en ce point k par :

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot e_k^2 = \frac{1}{2} (\hat{y}_k - y_k)^2 \quad (\text{III-21})$$

III.6 OPTIMISATION NEUROFLOUE : LE MODELE ANFIS

Les réseaux de neurones artificiels présentent l'avantage d'être des approximateurs universels qui procèdent par apprentissage pour minimiser l'erreur entre un système d'entrée/sortie. Les techniques d'apprentissage neuronal utilisant différentes architectures neurofloues permettent d'allier le symbolique au numérique et d'en réduire les inconvénients mutuels.

C'est dans cette optique que plusieurs chercheurs (Glennec *et al.* 1992, Bersini, 1993, Jang, 1993) ont exploité les réseaux de neurones artificiels et combiné les deux approches floue et neuronale d'où le modèle neuroflou. Cette propriété permet alors d'exploiter des mécanismes d'optimisation numérique pour la synthèse de contrôleurs flous. Ainsi, Sugeno voit la solution dans les algorithmes des moindres carrés, alors que Bersini utilise une méthode de descente de gradient pour minimiser un critère quadratique.

Considérons un modèle TSK, composé des deux règles suivantes :

Si x_1 est A_1 et x_2 est B_1 alors $y_1 = f_1(x_1, x_2) = a_1x_1 + b_1x_2 + c_1$

Si x_1 est A_2 et x_2 est B_2 alors $y_2 = f_2(x_1, x_2) = a_2x_1 + b_2x_2 + c_2$

Le modèle neuroflou est représenté par le réseau adaptatif proposé par Jang (1993). Il s'agit d'un réseau adaptatif multicouche dont les connexions ne sont pas pondérées, ou ont toutes un poids de 1. Les nœuds sont de deux types différents selon leur fonctionnalité : les nœuds carrés (adaptatifs) contiennent des paramètres, et les nœuds circulaires (fixes) n'ont pas de paramètres. Toutefois, chaque nœud (carré ou circulaire) applique une fonction sur ces signaux d'entrées. La sortie O_k^i du nœud i de la couche k (appelé nœud (i,k)) dépend des signaux provenant de la couche $k-1$ et des paramètres du nœud (i,k) , c'est à dire :

$$O_i^k = f(O_1^{k-1}, \dots, O_{n_{k-1}}^{k-1}, a, b, c, \dots) \quad (\text{III-22})$$

Où n_{k-1} est le nombre de nœuds dans la couche $k-1$, et a, b, c, \dots sont les paramètres du nœud (i, k) . Pour un nœud circulaire ces paramètres n'existent pas.

Ainsi les nœuds de chaque couche réalisent une fonction :

Couche 1 : Chaque nœud est donc un nœud carré avec une fonction :

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (\text{III-23})$$

Où x est l'entrée du nœud i , et A_i le terme linguistique associé à chaque fonction. En d'autres termes, O_i^1 est le degré d'appartenance de x à A_i . Les paramètres d'un nœud de cette couche sont ceux de la fonction d'appartenance correspondante.

Couche 2 : Chaque nœud i de cette couche est un nœud circulaire appelé Π qui engendre en sortie le produit de ses entrées. Ce produit représente le degré d'activation d'une règle :

$$w_i = \mu_{A_i}(x_1) \cdot \mu_{B_i}(x_2), i = 1, \dots, 2 \quad (\text{III-24})$$

Couche 3 : Chaque nœud de cette couche est un nœud appelé N . La sortie du nœud i est le degré d'activation normalisé de la règle i :

$$v_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (\text{III-25})$$

Couche 4 : Chaque nœud de cette couche est un nœud carré avec une fonction réalisant le calcul :

$$O_i^4 = v_i \cdot f_i = v_i(a_i x_1 + b_i x_2 + c_i), i = 1, \dots, 2 \quad (\text{III-26})$$

Où v_i est la sortie de la couche 3, et $\{a_i, b_i, c_i\}$ est l'ensemble des paramètres de sortie de la règle i .

Couche 5 : Le seul nœud de cette couche est un nœud circulaire qui effectue la somme des signaux provenant de la couche 4, c'est à dire :

$$O_i^5 = y = \sum_l v_l \cdot f_l \quad (\text{III-27})$$

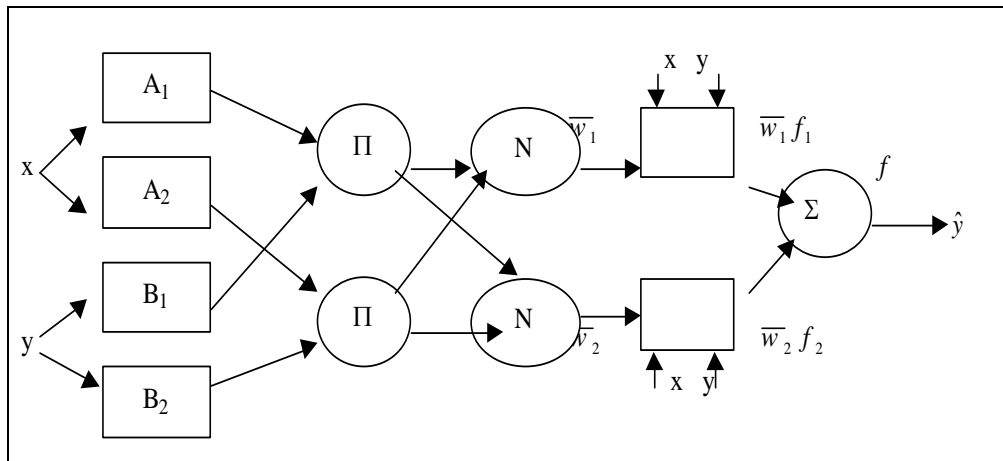


Figure III .8: Réseau adaptatif du modèle ANFIS

La généralisation du réseau à un système à r entrées ne pose aucun problème particulier. Le nombre de nœuds de la couche 1 est toujours égal au nombre total de termes linguistiques définis.

CHAPITRE IV

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Example is the school of mankind.
-Edmund Burke-

CHAPITRE IV: DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

IV.1 CONTEXTE REGIONAL

IV.1.1 Climat

Le climat méditerranéen est caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers plus frais et humides. Le climat continental entraîne des écarts de température plus importants entre l'été très chaud et sec, et l'hiver très froid, ne bénéficiant pas de l'effet adoucissant de la mer. L'Algérie du nord se distingue par trois domaines biogéographiques :

Domaine méditerranéen : caractérisé par un climat humide à l'Est englobant une large bande littorale dans le tell Constantinois ; sa limite méridionale passe au nord de Guelma et de Souk Ahras. Sur le versant méridional du tell constantinois, la chaîne des Bibans, l'atlas mitidjien de la partie orientale du Dahra jusqu'à Ténès le climat devient Sub-humide. Le climat devient Semi-aride est constaté en allant du tell Oranais jusqu'aux chaînes atlasiques constantinoises et passant par le versant méridional du Tell Central.

Domaine aride : comporte les hautes plaines et de l'Oranie, la cuvette du Hodna et l'atlas Saharien. Sa limite méridionale englobe une partie plus au moins large du piémont sud de l'atlas.

Domaines désertique : sont peu évolués et dépourvus d'humus.

IV.1.1.1 Pluviosité

La précipitation moyenne à l'Ouest du pays est de 500mm par année, Tandis que les hauts plateaux ne reçoivent que 150 mm. Elle est de l'ordre 750 mm sur zones côtières du centre, mais elle atteint rarement les 500 mm dans la région des Hauts Plateaux. Sur les côtes de l'Est du pays, les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 1 000 mm, mais de 500 mm dans la région du Tell. Certaines régions montagneuses de l'Est reçoivent jusqu'à 1600 mm de précipitation par années. Les hauts plateaux reçoivent de faibles précipitations avec une moyenne annuelle de 350 mm.

IV.1.1.2 Température

La température sur la côte méditerranéenne est comprise entre 2 °C et 30 °C, avec une moyenne annuelle de 17.5 °C. Dans les montagnes du Tell, elle varie de -5

°C, à plus de 30 °C, avec une moyenne annuelle de 16.5 °C. Les hauts plateaux présentent des températures variant de -8 °C à plus de 50 °C.

IV.1.1.3 Humidité

L'air est humide durant les mois de juin à octobre. Ce sont les vents marins qui transportent une brume gorgée d'eau qui rendent l'air aussi humide. L'humidité relative diminue de plus en plus en allant de la mer vers l'intérieur. Elle est de l'ordre de 60% à 70% sur la côte, et peut aller jusqu'à 15% en saison sèche vers l'intérieure.

IV.1.1.4 Insolation

L'insolation moyenne journalière varie de 5Heures/jour en décembre à 12 Heures/jour durant le mois de juillet. La durée moyenne annuelle de l'ensoleillement est de 8Heures/jour (ENHYD 1992).

IV.1.1.5 Vents

Les vents soufflent dans la direction du nord-Ouest entre Octobre et mai. Après le mois de mars, ils oscillent du Nord à l'Ouest. Durant l'été, le vent est plus dépendant des caractéristiques locales de chaque zone. Ainsi, sur la côte l'air étant tempéré, le vent se fait plutôt calme. Le Siroco, qui provient du Sud et Sud-est, caractérise les terres intérieures.

IV.1.2 Hydrologie

Le potentiel utilisable des ressources en eau renouvelables pour l'Algérie du Nord est de 8,1 km³, dont 6,5 km³ seraient régularisables par des barrages et 1,6 km³ seraient exploitables à partir des eaux souterraines (FAO). L'accès à l'eau pour l'Algérie du Nord est estimé à 400 m³/pers./an, alors que le seuil de rareté de l'eau est de 1 000 m³/pers./an. De plus, près de 90 % des ressources sont utilisées à des fins agricoles et l'efficacité des systèmes d'adduction d'eau atteint à peine les 50 %. La pollution des ressources en eau commence quant à elle à atteindre des proportions inquiétantes notamment dans la région tellienne où se trouve la plus grande partie de ces ressources, et la disponibilité en eau déjà faible risque de l'être davantage du fait de cette pollution.

L'Algérie du Nord couvre 226 019 km², soit un peu moins de 10 % du pays. Pourtant, près de 85 % des ressources en eau renouvelables sont concentrées dans l'Algérie du Nord (PNE, 1998). Les ressources non renouvelables concernent les nappes du Sahara septentrional qui seraient exploitées comme un gisement ce qui se traduit par un abatement continu du niveau de ces nappes. Schématiquement, les

ressources en eaux superficielles décroissent du Nord au Sud, au fur et à mesure que croissent les ressources en eau souterraines. L'ensemble du pays profite d'environ 14 km³/an d'eau renouvelable (FAO, Aquastat, 1995), dont 11,8 km³ en Algérie du Nord. À eux seuls, les trois oueds les plus importants de l'Algérie, soit les oueds Chlef, Kebir et Rhumel, transportent annuellement 2,25 km³ d'eau vers la mer (Boudjadja et al. 2002).

IV.1.3 Bassins hydrographiques

L'Algérie du Nord est divisée selon quatre régions hydrographiques : 1) Oranie, 2) Cheliff - Zahrez, 3) Algérois et 4) Constantinois (Plan National de l'Eau (PNE), 1998). Chacune de ces régions est également subdivisée en plusieurs bassins versants.

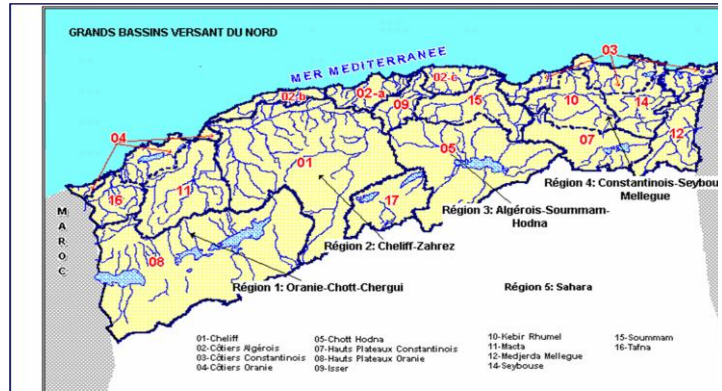


Figure IV .1: Grands bassins versants du nord Algérien

Constantinois, bien arrosé et où les précipitations sont les moins aléatoires, constitue la région la plus riche en eau; elle reçoit près de 39% des écoulements annuels en eau de surface du pays. En revanche, la région Oranie, bien que plus étendue en terme de superficie (35% environ de la superficie totale de l'espace tellien), ne reçoit à peine que 8% des écoulements de surface totaux (TECSULT 2004). Dans le Sud, la disponibilité en eau est importante grâce aux nappes du continental intercalaire et du complexe terminal, mais celles ci ne couvrent qu'une partie de l'étendue du Sahara.

Les cours d'eau au Nord des montagnes Telliennes se jettent majoritairement à la mer, alors que des lacs, ou chott, recueillent l'eau des Hauts Plateaux, au Sud de l'Atlas Tellien. En effet, près de 10 700 km³ d'eau se jettent dans la mer méditerranéenne, représentant plus de 90 % des ressources hydriques de l'Algérie du Nord. Le reste se perd dans les lacs et les chotts, ou traverse les frontières marocaine ou tunisienne.

Le réseau hydrographique de l'Algérie du Nord est marqué par plusieurs barrages en exploitation, en construction. En 1995, 98 barrages étaient en exploitation dont 40 ayant une capacité égale ou supérieure à 10 millions de mètres cubes (Boudjadja, 2001). La capacité totale de ces barrages cumule à 4,3 km³. Toutefois, vu

les faibles précipitations, les fortes évaporations et l'envasement, seulement 2,1 km³ d'eau sont régularisés. De nombreux ouvrages sont également en construction, en cours de lancement, ou en étude d'APD.

IV.1.4 Géologie et géomorphologie

La géologie et la géomorphologie sont des caractéristiques déterminantes dans l'analyse des processus d'érosion. Cette section décrit le cadre tectonique, la stratigraphie générale et la géomorphologie de l'Algérie du Nord.

IV.1.4.1 Cadre tectonique

L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud atlasique. Le premier, au Nord de l'Algérie, porte l'empreinte de la tectonique alpine et s'étend de la mer Jusqu'à l'Atlas saharien. Il appartient à la grande zone de formation «alpine» qui ceinture la Méditerranée depuis l'Europe du Sud jusqu'à l'Afrique du Nord. La seconde, la plate-forme saharienne, se situe au sud de l'Atlas saharien et présente une tectonique moins prononcée. Elle forme un ensemble immense et monotone. Elle appartient au Craton Nord Africain qui comprend un socle précambrien sur lequel repose en discordance une puissante couverture sédimentaire.

Le Nord de l'Algérie est composé des ensembles structuro sédimentaires qui sont, du Nord au Sud.

- l'Atlas Tellien avec des bassins de type intramontagneux (ex. bassin du Chélif et du Hodna) dont la série sédimentaire s'étend du Jurassique au Miocène;
- les Hauts Plateaux (ou Hautes Plaines);
- l'Atlas Saharien qui marque la limite avec la plateforme saharienne au Sud.

IV.1.4.2 Géomorphologie

L'histoire géologique a façonné le relief de l'Algérie du Nord. Les processus d'érosion et d'accumulation modifient continuellement la morphologie les versants et des vallées.

Les morphologies typiques d'érosion sont liées au ravinement. On distingue parmi ces morphologies les rigoles, les ravins et les badlands. Les rigoles sont les premières formes d'érosion liées au ravinement. Elles sont profondes de quelques décimètres. Les ravins ont plusieurs mètres de profondeur et sont le siège d'une

érosion par creusement. Lorsque les ravins couvrent un versant entier et que les crêtes se recoupent, on parle alors de badlands.

L'érosion se présente également sous forme de mouvements de masse comme les glissements. On distingue les glissements superficiels, les glissements profonds et les coulées boueuses. Les glissements superficiels affectent la couverture meuble jusqu'au substrat alors que les glissements profonds affectent également le substrat rocheux. Les coulées boueuses quant à elles se produisent lorsque les limites de liquidité sont dépassées dans un terrain meuble.

Sur les versants de montagne, les effets du ruissellement s'opèrent surtout sur des roches assez résistantes et imperméables alors que ceux liés aux glissements de terrain et aux coulées de boue se développent sur des terrains plus perméables et plus plastiques.

Au fond des vallées et dans les cuvettes fermées, les processus d'accumulation sont majoritaires. Dans les vallées, des dépôts alluviaux sont formés par l'accumulation des sédiments déposés par les oueds. Ces dépôts sont quelquefois repris et érodés par les cours d'eau qui découpent ces accumulations en terrasses alluviales.

IV.1.5 Pédologie

Rogon (1995) a décrit les principaux sols retrouvés au Maghreb selon deux grands groupes :

- Les sols fersiallitiques se forment dans les régions les plus humides du Maghreb et sont caractérisés par une abondante fraction fine, une bonne fertilité, une coloration rouge (rubéfaction) et une décarbonatation du profil. Les sols vertisols se retrouvent le long des versants et se caractérisent par une accumulation de smectite engendrant des réserves en eau très limitées et l'écrasement des racines.

- Les sols enrichis en sels se retrouvent en conditions plus arides que les précédents et se subdivisent en catégories de sol selon si le sel est du sulfate de calcaire (gypse) ou du sodium (solontchaks et solonetz).

IV.2 PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'ISSER

La zone d'étude concerne le bassin versant de l'Isser situé au nord de l'Algérie.

Ce bassin versant est situé à environ 70 Km au Sud Est d'Alger et draine une superficie de 4 170 km², et se situe entre les latitudes 35°90' et 36°85' Nord et les longitudes 2°88' et 3°95' (Figure III.3).

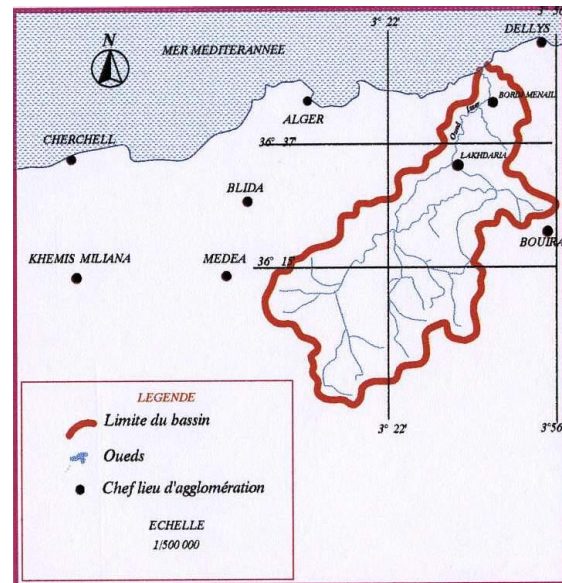


Figure IV .2: Situation géographique du Bassin versant de l'Isser.

IV.2.1 Climat

Pluviosité : Le régime pluviométrique (entre 700 et 800 mm annuels) se caractérise par des pluies abondantes qui diminuent presque régulièrement au printemps et atteignent en été quelques millimètres par mois. Les vents exercent une grande influence sur la zone selon leurs origines.

IV.2.1.1 Evaporation

Les valeurs mensuelles de l'évaporation, enregistrées à l'évaporimètre de Dar el Beïda pendant la période allant de 1975 à 1994, sont données à la Figure (IV.3).

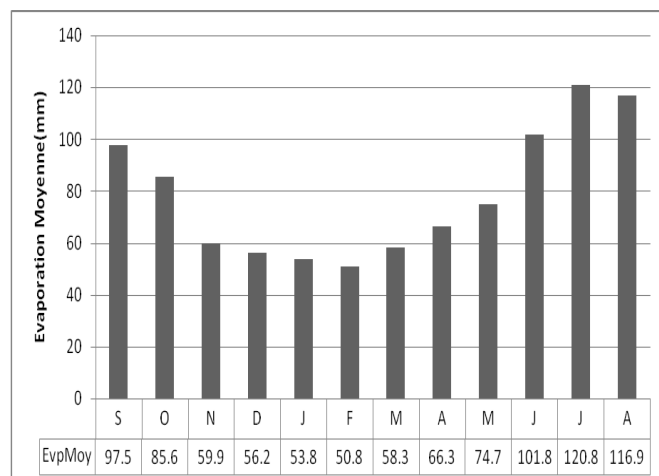


Figure IV .3: Evaporation moyenne mensuelle à la station de Dar el Beïda (ONM 1975-94)

IV.2.1.2 Évapotranspiration

La formule de Penman-Monteith, qui a été recommandée pour le calcul de l'ETP de référence par la FAO en mai 1990, l'évapotranspiration de référence a été estimée, à Dar el Beïda, à 1.512 mm/an (ENHYD). Les valeurs les plus élevées se produisent de juin à août; la pluie mensuelle moyenne excède l'évapotranspiration de novembre à février et cause des problèmes d'excès d'humidité au sol dans certains secteurs. La Figure (IV.4) illustre la variation de l'ETP moyenne mensuelle.

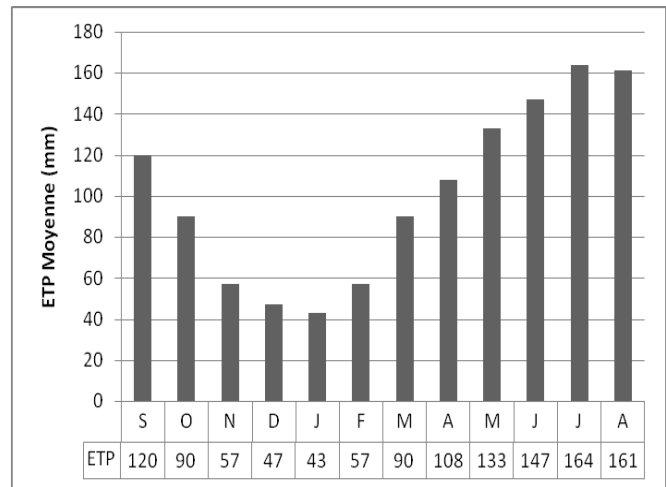


Figure IV .4: Evapotranspiration moyenne mensuelle à la station De Dar el Beïda (ONM 1975-94)

IV.2.1.3 Température

Les mois les plus froids sont janvier et février, où la température moyenne minimale varie entre 5°C et 6°C. Les mois les plus chauds sont juin, juillet et août, où la température moyenne maximale varie entre 27°C et 31°C. A Dar el Beïda la température moyenne annuelle est de 17°C, les valeurs moyennes mensuelles sous abri sont reportées dans le Figure IV.5.

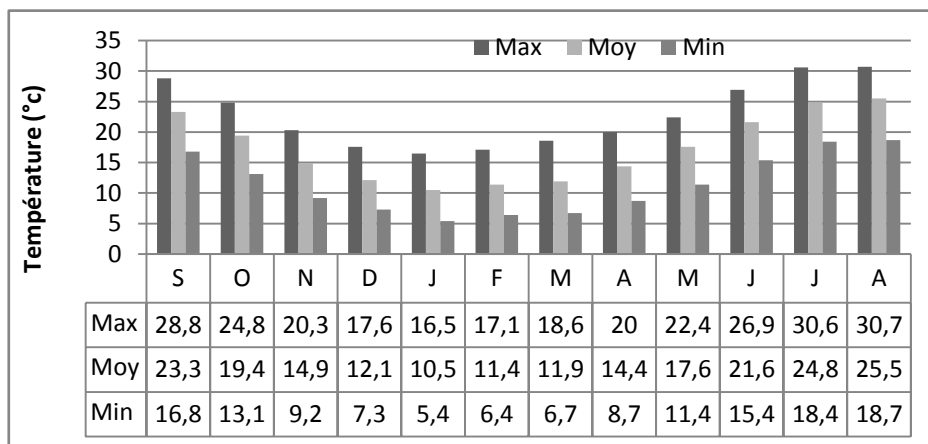


Figure IV .5: la température mensuelle à la station de Dar el Beïda (ONM 1975-94)

IV.2.1.4 Humidité

L'humidité est modérée pendant toute l'année, avec des valeurs d'environ 70% le matin et le soir en été et de 80% en hiver; les valeurs à midi sont d'environ 57% en avril et octobre, 60% en été et 64% en hiver.

L'humidité moyenne de l'air varie entre 72% en été et 80% en hiver. L'évaporation annuelle moyenne est de l'ordre de 1400 mm. La répartition moyenne mensuelle de l'humidité relative est représentée dans la figure IV.6

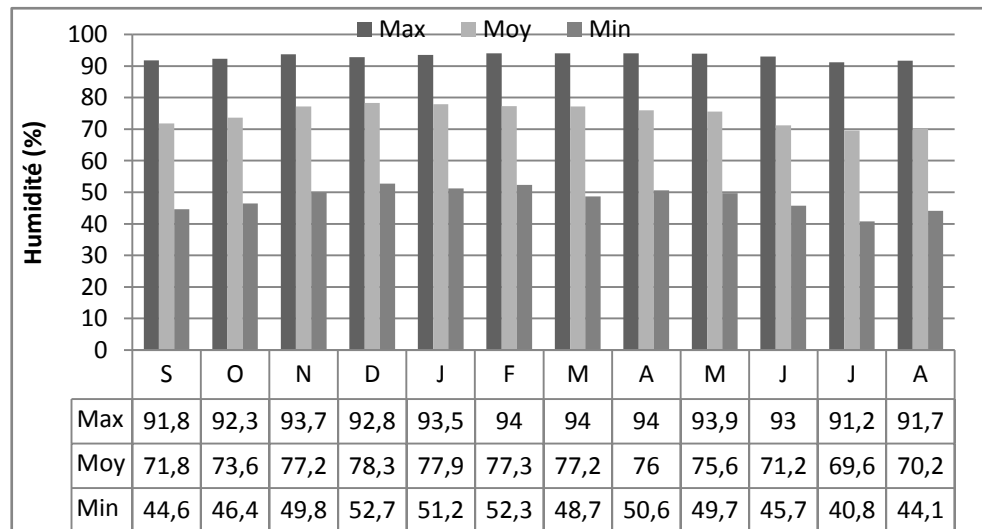


Figure IV .6: Caractéristiques de l'humidité à la station de Dar el Beïda (ONM 1975-94)

IV.2.1.5 Insolation

Ces paramètres climatiques illustrés dans la figure (IV.7) sont observés à la station de Dar el Beïda pour la période 1975-94 (source ONM).

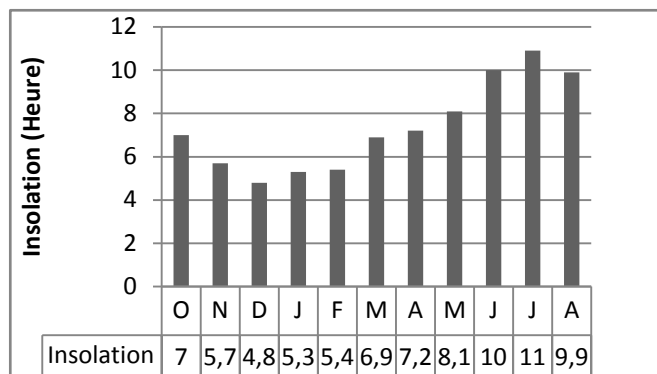


Figure IV .7: L'insolation moyenne mensuelle à la station de Dar el Beïda

IV.2.1.6 Vents

Les vents provenant de la mer sont frais et humides, tandis que les vents provenant de l'intérieur sont, comme les siroccos, chauds et secs.

Les vents transportant les masses d'air humide sont de direction de nord-sud à nord-ouest sud, alors que les vents secs sont de direction sud nord pendant l'été (ENYD (1992)). Les vitesses mensuelles du vent enregistrées à la station de Dar el

Beïda sont données au tableau (Source: Office Nationale de la Météorologie (ONM), Période 1975-94).

La rose des vents de Dar el Beïda, les fréquences et les classes de vitesse sont données à la Figure IV.8.

Le Sirocco souffle sur l'ensemble du bassin avec une fréquence de 18 jours/an en moyenne, ce qui peut créer des effets nuisibles sur les cultures.

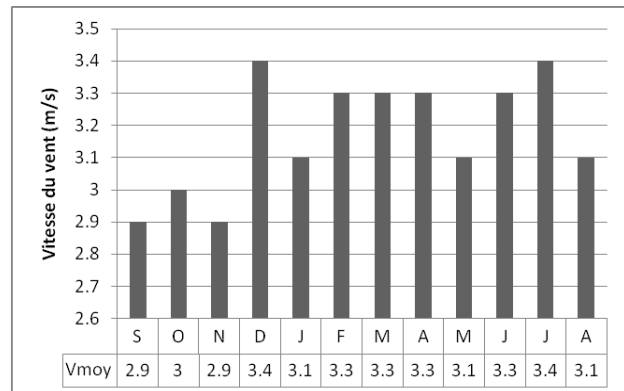


Figure IV .8: La moyenne mensuelle de la vitesse du vent à la station de Dar el Beïda (ONM 1975-94)

IV.2.2 Hydrologie

Il est à noter que la retenue de Beni Amrane représente un barrage de transfert vers le barrage de Keddara qui alimente la ville d'Alger en eau potable. De ce fait, la qualité de l'eau dans le barrage de Beni Amrane doit être adéquate pour effectuer des transferts vers le barrage de Keddara. Selon l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH, 1990), la concentration des matières en suspension doit être inférieure à 2 g/L, pour effectuer des lâchés d'eau du barrage de Beni Amrane vers celui de Keddara. Les caractéristiques hydrologiques de la région considérée sont présentées dans le tableau (IV.1).

Superficie (km ²)	3 615
Coefficient Kc	1,26
Altitude moyenne (m)	750
Pluie moyenne (mm)	790
Débit moyen (m ³ /s)	5,8
Débit spécifique (L/s/km ²)	1,61
Indice d'érosivité	150-300

Tableau IV .1: Caractéristiques hydrologiques du bassin versant.

IV.2.3 Réseau hydrographique

Le bassin est drainé par deux principaux cours d'eau: Oued Mellah et Oued Isser, et dispose d'un réseau hydrographique assez dense et couvrant une très grande partie du bassin (Figure III.9). Cette caractéristique favorise le phénomène du transport solide

Les roches éruptives Elles sont d'âge pré tertiaire et tertiaire. Les premières sont fréquentes, apparemment sous formes de filons de pegmatite ou de granite (région de Béni Amrane et Bordj Menaiel), tandis que celles d'âge tertiaire sont, d'une part, représentées par les époinçements de roches granodioritiques dans le massif de Thenia, et de l'autre par des formations volcaniques.

Les formations sédimentaires Elles vont du Crétacé au Quaternaire passant par Oligocène. Les lithofaciès sont, selon leur âge, inégalement répartis dans l'espace. De bas en haut, on distingue: Le Crétacé inférieur - Flyschs Albo-Aptiens, Le Crétacé supérieur-Cénonien, Oligocène inférieur et moyen, le quaternaire.

IV.2.5 Couvert végétal

En ce qui concerne le couvert végétal, le bassin est caractérisé par une faible densité végétale, il représente environ 20% de la superficie totale, ce qui accélère le phénomène de l'érosion (Figure IV.11).

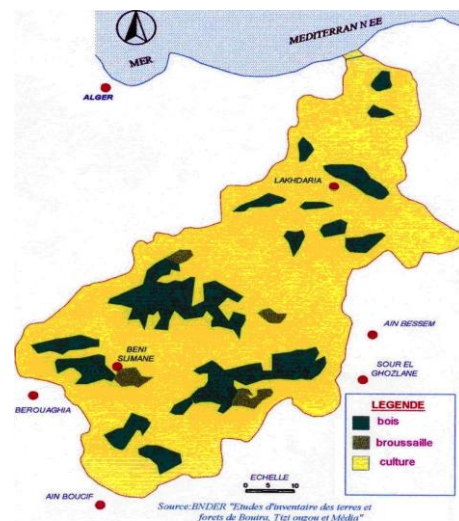


Figure IV .11: Couvert végétal de l'Isser

IV.3 ETAT D'ENVASEMENT DU BARRAGE DE BENI AMRANE

Le barrage de BENI AMRANE a été construit et mis en service en 1988. Le niveau des plus hautes eaux exceptionnelles (PHE) est à 76.1 m et la cote de la retenue normale (RN) est fixée à 67.00 m. Le barrage a été surélevé en juillet 2003, la cote de retenue normale initiale était de 63.00 m.

Lors d'une campagne de levés bathymétriques des barrages en exploitation, Initiée par l'ANB en 2004, le volume d'eau, pour la retenue normale (RN=67 m), était de 11.85 Hm³, tandis que la surface de la retenue était estimée à 202.5 ha. Pour la cote des plus hautes eaux exceptionnelle (PME : 76.1 m), le volume d'eau était estimé à 35.17 Hm³ tandis que la surface était de 303.3 ha. Le tableau suivant met à l'évidence la diminution de la capacité de stockage du barrage dans le temps. La perte de capacité annuelle des 8 dernières années est de 0.18 Hm³/an avec un taux d'envasement de 63.65% (voir tableau).

Année du levé	1988	1996	2004
Capacité (Hm ³)	15.6	7.08	5.67
Perte de capacité (Hm ³)	0	8.52	1.41
Nombre d'année	0	8	8
Perte de Capacité annuelle (Hm ³)	0	1.06	0.18

Tableau IV .2: Tableau comparatif du volume à l'ancienne cote (RN=63.0 m) (ANB 2004)

La perte de surface annuelle entre 1996 et 2004 est de 1.72 ha/année (voir Tableau). La cote minimale enregistrée en 2004 est de 45.1 m.

Année du levé	1988	1996	2004
Société	COBA	CTH	HYD/CTS
Surface (ha)	160.00	148.00	134.20
Perte de surface (ha)	-	12	13.8
Nombre d'année	-	8	8
Perte de surface annuelle (ha)	-	1.5	1.72

Tableau IV .3: Tableau comparatif des surfaces à l'ancienne cote (RN=63.5 m) (ANB 2004).

IV.4 BASE DE DONNEES

IV.4.1 Réseau de mesures hydrométriques

Le bassin versant de l'oued Isser présente une superficie totale de 4170 km². Le réseau de mesures hydrométriques de l'oued Isser et ses affluents, implanté et géré par l'ANRH, est équipé d'un réseau de 7 stations de jaugeage: El Omaria (091205), Dechmia (090309), Beni Slimane (090305), Mezahim (030191), Aoamar Gare (090416), Pont de la Traille (090408) et Lakhdaria (090501).

D'une manière générale, la densité du réseau est très lâche par rapport au vaste étendu de la zone. Les séries de données de ces stations sont, en général, incomplètes, pleines de lacunes ou de mauvaise qualité, excepté les données des deux dernières stations, Pont de la Traille et Lakhdaria.

IV.4.2 Paramètres statistiques des données

Afin de modéliser la relation débit liquide / débit solide au bassin versant de l'Isser, une série de données composée de plusieurs paramètres a été utilisée. Cette série est essentiellement composée de débits instantanés s'étendant sur une période allant de 1971/1972 à 1990/1991. Cette série, qui nous a été gracieusement fournie

par l'ANRH, concerne la station de Lakhdaria (code : 090501) et la station de La Traille (090408).

IV.4.2.1 Station de Lakhdaria

La station de Lakhdaria contrôle l'oued Isser qui parcourt la partie Nord-Ouest de la wilaya de Bouira et qui draine un bassin versant de 3620 km². Son emplacement se trouve en correspondance des Gorges de Beni Amrane sur la RN5, à environ 10 km au nord-ouest de la ville de Lakhdaria. La station, fondée en 1954, a fonctionné jusqu'à avril 1958. En décembre 1965 elle a été remise en exploitation, avec relèvements limnimétriques. La qualité et l'exactitude des mesures semblent raisonnables.

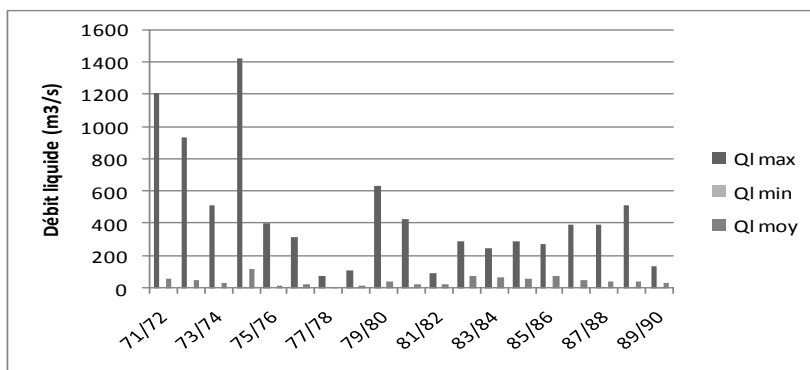


Figure IV .12: Variation des caractéristiques statistiques du débit liquide dans le temps.

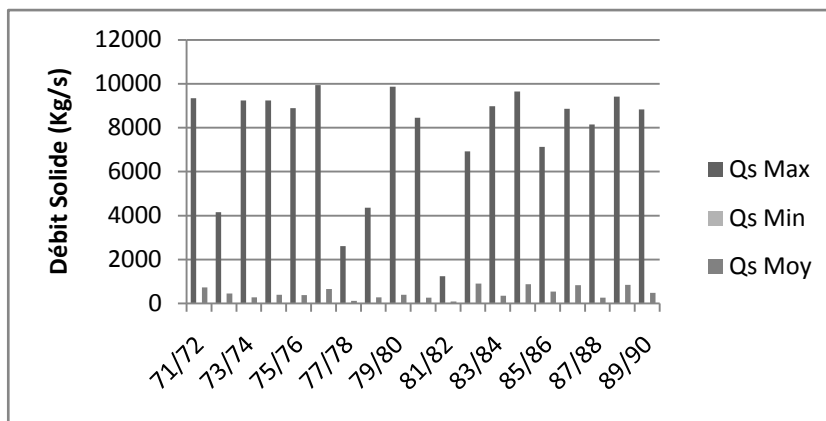


Figure IV .13: Variation des caractéristiques statistiques du débit solide dans le temps.

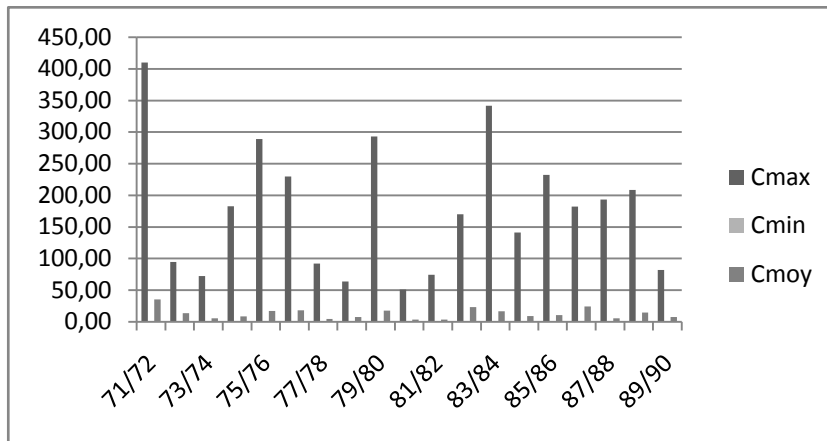


Figure IV .14: Variation des caractéristiques statistiques du débit solide dans le temps.

IV.4.2.2 Station de la Traille

La station de La Traille (bassin versant de 2570 km²) est installée sur l’ancien pont de la RN8, en aval du point de confluence des oueds Malah et Zeroua, à environ 38 km en amont du barrage de Koudiat Acerdoune. La station a été établie en 1946 et a fonctionné jusqu’à août 1956. Elle a été remise en service, avec enregistreur automatique, en 1968 et par la suite elle a fonctionné sans interruption. Le lit où elle se trouve est formé de sable et de gravier, sujet à des problèmes d’instabilité. Les données sont considérées néanmoins acceptables soit pour les relevés des débits mensuels que pour les débits de pointe.

Une présentation des différents paramètres statistiques pour l’échelle mensuelle à été effectuée (Voir tableau (IV.4)).

La Figure (IV.15) illustre parfaitement l’irrégularité flagrante des apports liquide de l’oued Isser.

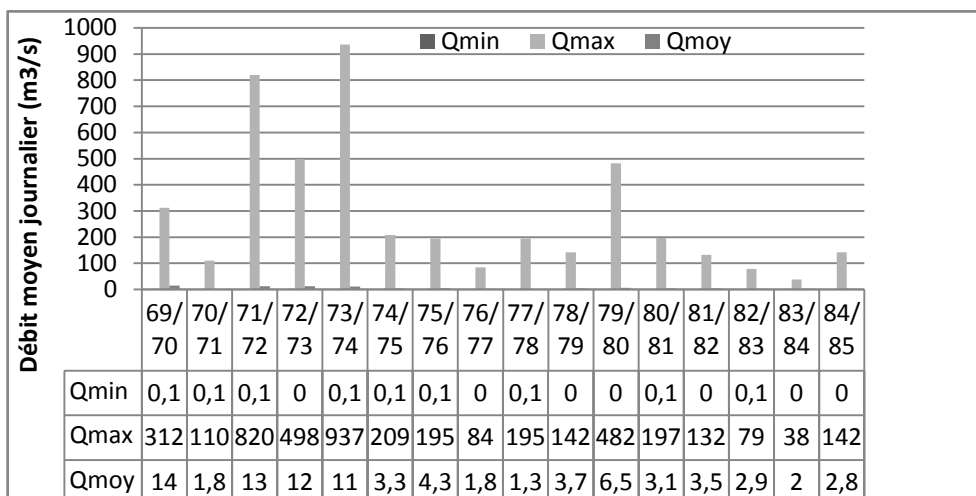


Figure IV .15: Caractéristiques statistiques du débit moyen journalier Station de la Traille.

CHAPITRE V

MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE PAR LA LOGIQUE FLOUE

*So far as the laws of mathematics refer to reality,
they are not certain. And so far as they are certain,
they do not refer to reality.*
-Albert Einstein

CHAPITRE V: MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE PAR LA LOGIQUE FLOUE

Les modèles débit liquide/débit solide sont utilisés pour décrire le comportement hydrologique d'un bassin versant. De nombreux modèles existent pour simuler les processus physiques déterminant la quantité de matières en suspension résultant d'un débit liquide.

Deux approches ont été effectuées. La première approche est basée sur les modèles régressifs, tandis que la deuxième est basée sur un des concepts de l'intelligence artificielle, il s'agit de la logique floue.

Les modèles classiques de régression ont pour but d'exprimer la variation du débit solide en fonction du débit liquide. Il existe plusieurs approches de régressions (Régression linéaire, polynomiale, logarithmique, exponentielle et régression en puissance). Ces modèles montrent l'orientation commune de la série de couples débit liquide - débit solide. La tendance obtenue peut être exprimée mathématiquement sous forme d'équation (formule empirique). Une approche déterministe, tel que les modèles de régressions, d'un phénomène aussi complexe que d'érosion du sol, s'avère incapable de reproduire fidèlement la réalité.

Les approches métaheuristiques (modèle neuroflou) permettent une représentation relativement meilleure, par rapport aux approches déterministes (modèles de régression), de la réalité physique d'un phénomène aussi complexe que l'érosion du sol (variabilité spatio-temporelle de paramètres aléatoires).

V.1 SCHEMAS CONCEPTUEL DU MODELE NEUROFLOU

Le schéma conceptuel du modèle neuroflou, pour la simulation du débit solide, tel qu'il est représenté dans la figure (V.1), est caractérisé par une boucle ouverte composée d'un débit liquide qui représente l'entrée d'un système d'inférence basé sur l'apprentissage neuroflou du type sugeno permettant de produire une sortie qui représenté le débit solide.

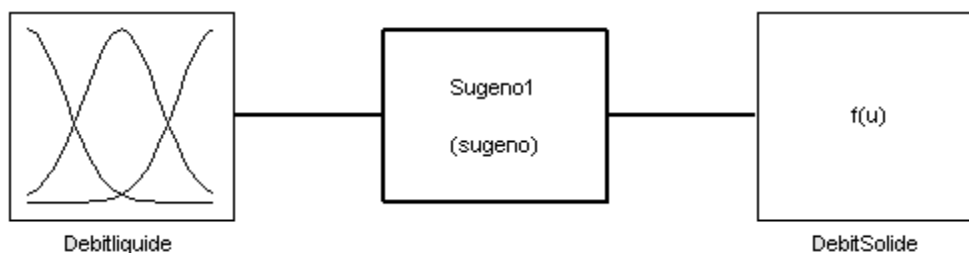


Figure V .1: Schéma du modèle Neuroflou.

La fonction de répartition du débit liquide est représentée dans la figure (V.2). Elle est composée de trois variables linguistiques (Faible, moyen et Fort) avec une variation de type « Gauss ». Le schéma représenté dans la figure (V.3) illustre le réseau de neurone établi à partir de trois règles floues.

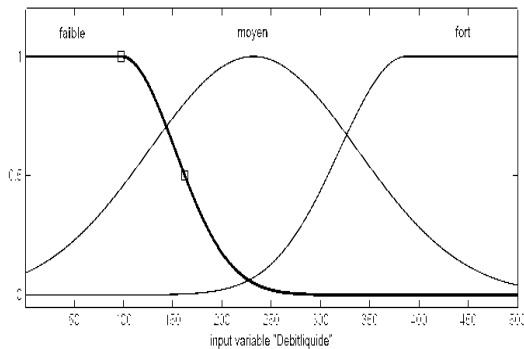


Figure V .2: Fonction de répartition des débits Liquides

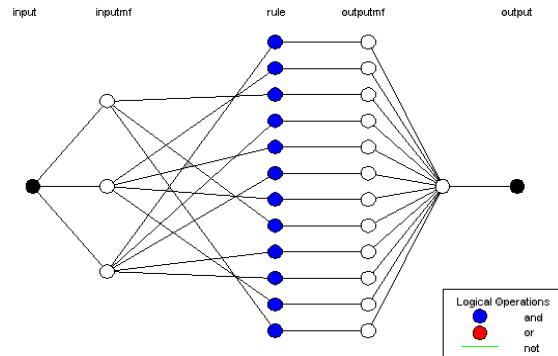


Figure V .3: Schéma du réseau neuroflou établi pour trois règles.

Exemple de règles floue

Si (débit liquide est fort) alors (débit solide est fort) 0.9

Si (débit liquide est faible) alors (débit solide est faible) 0.9

Si (débit liquide est fort) alors (débit solide est fort) 1

V.2 CRITERES DE VALIDATION

L'évaluation d'un modèle consiste à comparer les valeurs simulées aux valeurs observées. En plus d'une analyse subjective des chroniques simulées comparées aux chroniques observées, des critères statistiques objectifs sont utilisés pour caractériser globalement la qualité de la simulation. Les deux approches sont complémentaires.

Dans ce travail, nous avons utilisé les critères classiques en hydrologie: biais, corrélation, et critère de Nash.

V.2.1 Critère de Nash

Il exprime, en pourcentage, le rapport entre l'erreur relative aux valeurs simulées et observées avec la fluctuation des valeurs observées par rapport à la moyenne.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\text{mod}} - Y_{i\text{obs}})^2}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\text{obs}} - \bar{Y}_{\text{obs}})^2} \quad (\text{V.1})$$

Où :

$Y_{i\text{mod}}$: Est la variable des flux simulés.

Y_{obs} : Est la variable des flux observés.

\bar{Y}_{obs} : Est la moyenne des flux observés.

n_{obs} : Le nombre d'observations.

Ce critère quantifie la fraction de la variance observée qui est prise en compte par le modèle. Il prend des valeurs allant de $-\infty$ à 1 ; plus l'efficacité est proche de 1, meilleure est l'accord entre la modélisation et l'observation. Si la valeur du critère de Nash converge vers cent, le modèle est optimisé.

V.2.2 Erreur sur le bilan

Ce critère, exprimée en pourcentage, est utilisée pour calculer l'écart entre les valeurs simulées et celles observées ; il s'exprime par :

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\text{obs}} - Y_{i\text{mod}})}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\text{obs}})} \quad (\text{V.2})$$

Il donne une idée globale sur la dispersion entre les valeurs observées et simulées, plus le critère de l'erreur sur le bilan sera faible plus l'écart entre les valeurs sera limité.

De même que pour le critère de Nash Sutcliff, le critère de l'erreur sur le bilan a tendance à donner plus de poids aux valeurs fortes et peut être appliqué sur le logarithme ou la racine carrée des valeurs afin d'améliorer la représentation des valeurs faibles.

V.2.3 Le coefficient de corrélation :

Il s'exprime par :

$$R = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((Y_{iobs} - \bar{Y}_{obs}) \times (Y_{imod} - \bar{Y}_{mod}))^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{iobs} - \bar{Y}_{obs})^2 \times \sum_{i=1}^n (Y_{imod} - \bar{Y}_{mod})^2}} \quad (V.3)$$

V.2.4 Le coefficient de détermination :

Il est exprimé par R^2 , il représente le taux de corrélation entre les séries simulées et observées, il faut donc chercher le maximiser afin de vérifier l'accord entre les deux séries.

V.2.5 La moyenne biaisée :

$$B = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (Y_{imod} - Y_{iobs})^2 \quad (V.4)$$

La moyenne biaisée permet de mesurer la tendance que le modèle a de sous-estimer ou de surestimer les observations. Les critères de validation considérés pour tous les modèles développés dans cette étude sont : le critère de Nash et l'erreur.

En plus de ces critères numériques permettant l'estimation et la quantification de la distance entre les observations et les simulations, deux autres tests ont été usités, ils consistent en une simple analyse visuelle des résultats sur deux graphes ($Y_{MOD} = f(Y_{OBS})$), et un deuxième graphe montrant le degré de confusion entre les valeurs observées et simulées.

V.3 ORDINOGRAMME DES PROCEDURES ALGORITHMIQUES

Les modèles Neuroflous développés pour simuler le débit solide sont calibrés durant une période dite de calage pour estimer les paramètres des modèles. Leurs performances seront testées en période de validation pour valoriser la capacité prédictive de ces modèles.

Le premier modèle consiste à simuler les débits solides par apprentissage annuel de la période de calage. Les données de l'apprentissage annuel sont ainsi constituées par fusion de l'éventail des données annuelles de la période de calage.

Le deuxième modèle consiste à simuler les débits solides à l'échelle annuelle par un apprentissage mensuel de chaque mois constituant la période de validation. Les données de l'apprentissage mensuel sont constituées par fusion de l'ensemble de données mensuelles dans l'éventail des données de calage.

Un nouveau concept des variables adimensionnelles est introduit dans le troisième modèle Neuroflou. Il consiste à la normalisation des grandeurs physiques, à l'état brute, par la division de chacune par la moyenne mensuel, tant en période de calage qu'en période de validité.

Une modélisation Neuroflou à apprentissage mensuel est ainsi effectuée sur les variables adimensionnelles. Une transformation inverse des valeurs adimensionnelles ainsi simulées en période de validation permet de déduire la puissance de ce modèle.

Dans cette perspective, nous avons conçu un programme en MATLAB permettant la modélisation débit solide débit liquide par les différentes approches. La Figure V-4 illustre l'ensemble des procédures développées dans ce programme

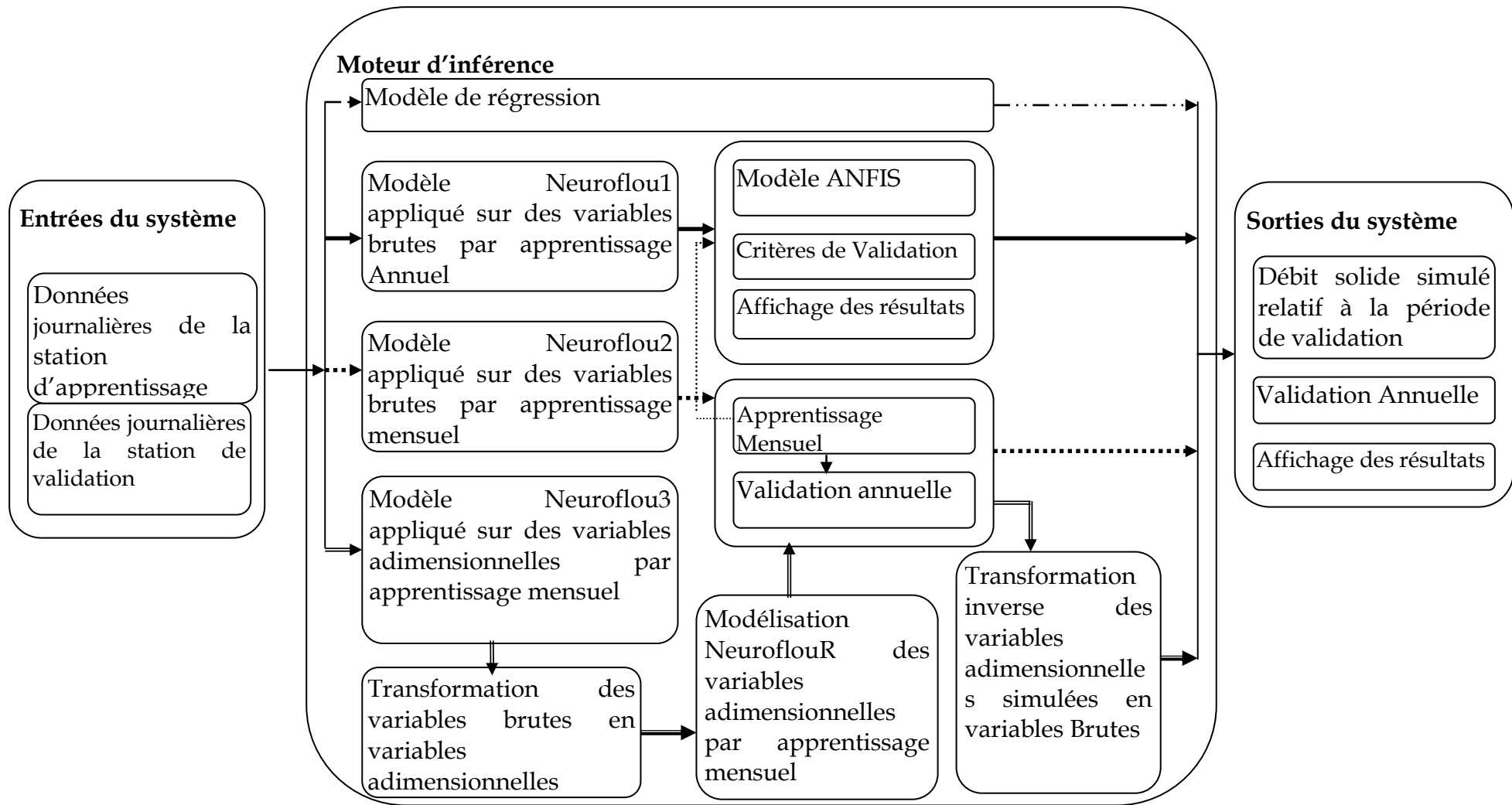


Figure V .4: Ordigramme des procédures de simulation débit liquide- débit solide par les modèles Neuroflows.

V.4 SIMULATION NEUROFLOU EN UTILISANT LES VARIABLES BRUTES

La capacité de simulation d'un modèle doit être testée sur des échantillons présentant une variance élevée. Pour cela, nous avons choisie, pour la validation des performances du modèle flou par rapport au modèle empirique, trois échelles de temps. Une échelle journalière au pas de temps horaire, une à l'échelle mensuelle puis annuelle au pas de temps journalier.

Les modèles utilisés pour simuler les concentrations en MES sont calibrés durant une période dite de calage pour estimer les paramètres des modèles, et leurs performances seront testées en période de validation pour juger de la capacité prédictive de ces modèles.

V.4.1 Echelle journalière au pas de temps horaire

Concernant les données journalière, nous avons choisi quatre épisodes débit-MES au pas de temps horaire de la station de Lakhdaria (090501) pour leur taille et leur variance.

Le premier épisode correspond aux données horaires enregistrées le 18/01/1972. La durée d'apprentissage est 14 Heures tandis que pour la durée de validation est de 9 heures. Le deuxième épisode correspond aux données horaires enregistrées le 06/03/1986. La durée totale d'enregistrement est 22 heures dont 13 heures consacrée à l'apprentissage. Le troisième épisode correspond aux données de 19 heures d'enregistrement le 05/03/1988 dont 13 heures consacrées à l'apprentissage. Et enfin, Le quatrième épisode correspond aux données horaires enregistrées le 26/04/1989 de taille (19 heures) dont 13 heures pour l'apprentissage.

Les critères de validité des deux modèles pour les quatre épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V.1, V.2, V.3 et V.4) tant en période de calage qu'en période de validation.

Les droites de corrélation entre le débit solide observé et le débit solide simulé par les deux modèles (empirique, flou) sont illustrés dans les figures (V-5, V-7, V-9, V- 11) correspondant respectivement aux épisodes (episode1, episode2, episode3, episode4).

Les figures (V-6, V-8, V-10, V-12) illustrent la variation temporaire des MES simulées et observées correspondant respectivement aux quatre épisodes cités précédemment dans le même ordre.

• Episode1

Date : 18/01/1972

Durée (H) : 23

Qmax (m3/s): 1360,0

MES max (g/l) : 76,4

Nombre de calage : 14

Nombre de règles : 7

Formule empirique: $Q_s = 0.42C^{0.69}$

	Méthode de Simulation	Empirique	Floue
Calage	Nash (%)	51,9	88,7
	Erreur (%)	1,24	0,1
Validation	Nash (%)	14,5	96,0
	Erreur (%)	25,8	0,17
	Coefficient de corrélation (%)	61,44	96,2

Tableau V .1:

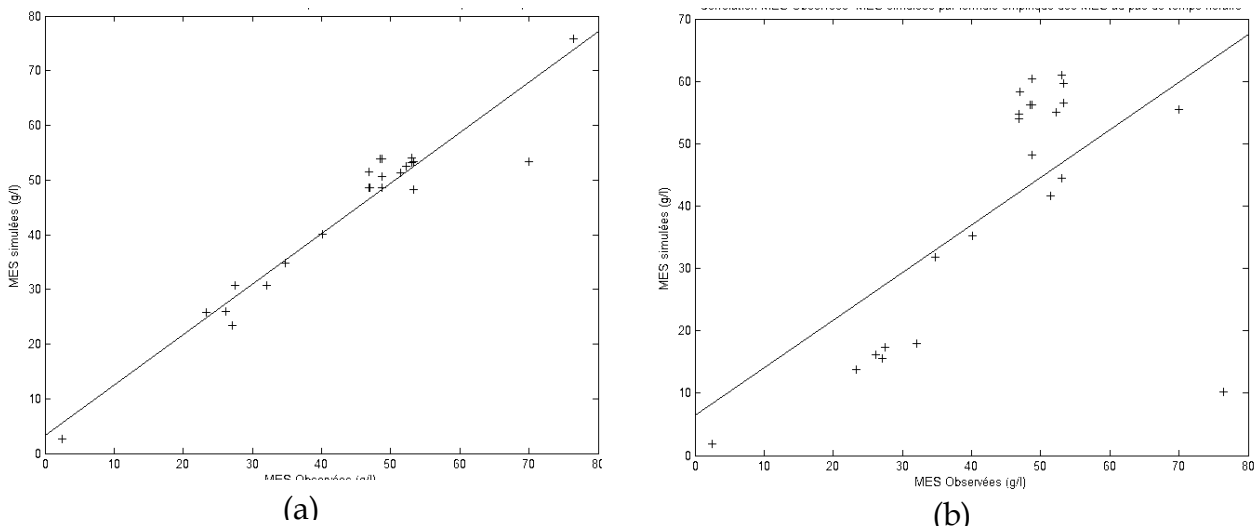


Figure V .5: MES simulées- MES observées pour l'épisode1 (a) modèle flou (b) modèle empirique

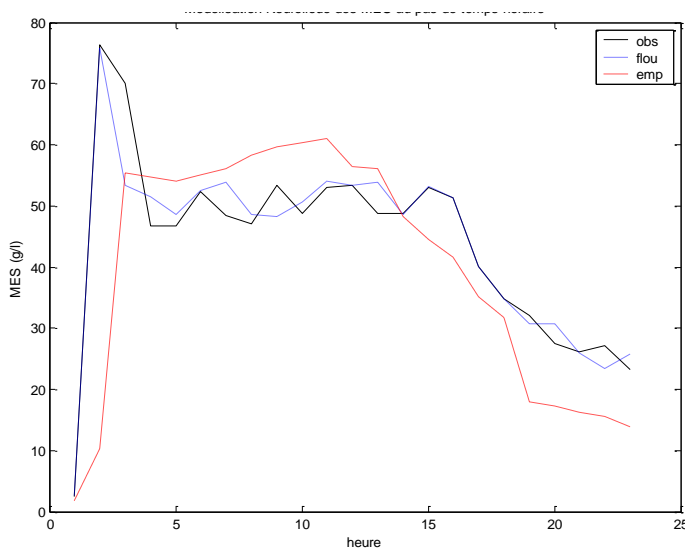


Figure V .6: Variation des MES au pas de temps horaire pour l'épisode1

• Episode2

Date : 06/03/1986
 Durée (H) : 22
 Qmax (m3/s): 709,0
 MES max (g/l): 46,1

Nombre de calage : 13
 Nombre de règles : 6
 Formule empirique : $Q_s = 0.51Q^{0.68}$

	Méthode de Simulation	Empirique	Floue
Calage	Nash (%)	60,8	83,5
	Erreur (%)	1,63	0,5
Validation	Nash (%)	1300	82,7
	Erreur (%)	53,9	2,4
	Coef_correlation (%)	92.79	98.9

Tableau V .2: Critères de validation pour l'épisode2 (06/03/86)

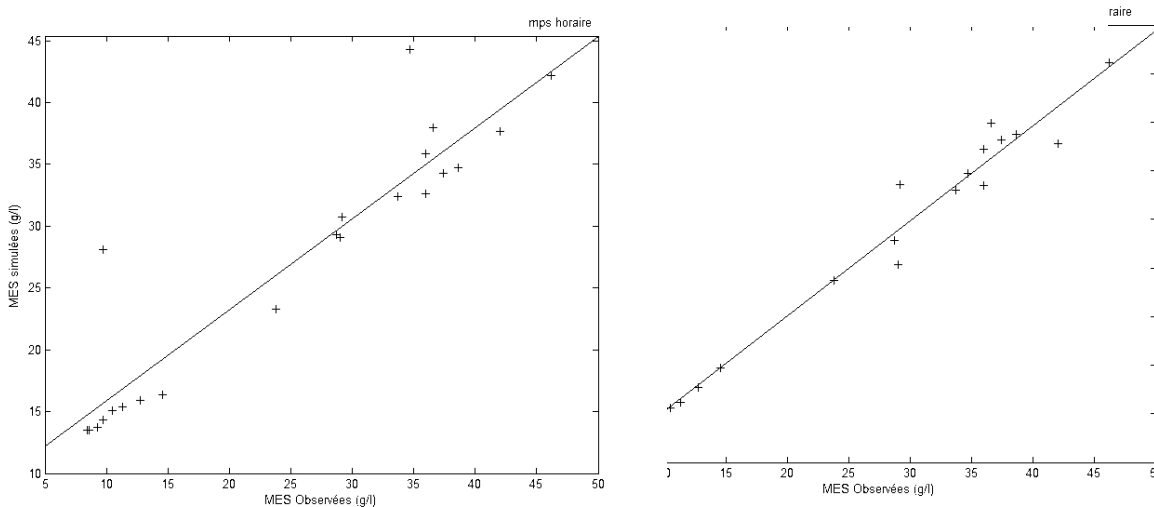


Figure V .7: MES simulées- MES observées pour l'épisode2 (a) modèle empirique (b) modèle flou

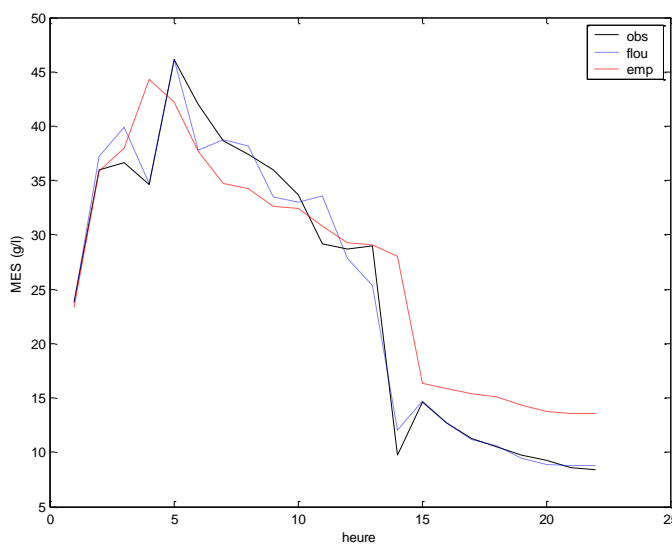


Figure V .8: Variation des MES au pas de temps horaire pour l'épisode2

• Episode3

Date : 05/03/1988
 Durée (H) : 19
 Qmax (m3/s): 213.5
 MES max (g/l): 24,0

Nombre de calage : 12
 Nombre de règles : 5
 Formule empirique : $Q_s=0.58Q^{0.62}$

	Méthode de Simulation	Empirique	Floue
Calage	Nash (%)	51,3	94,4
	Erreur (%)	1,3	0,9
Validation	Nash (%)	93,0	91,3
	Erreur (%)	60,5	4,1
	Coefficient corrélation (%)	83.66	97.9

Tableau V .3: Critères de validation pour l'épisode3 (05/03/1988)

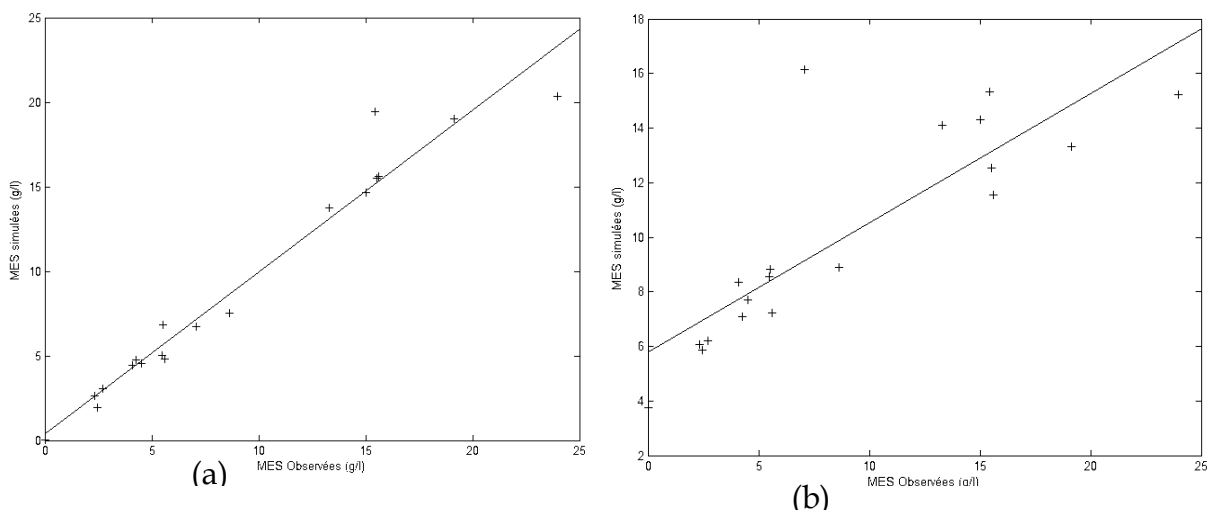


Figure V .9: MES simulées- MES observées pour l'épisode3 (a) modèle flou (b) modèle empirique

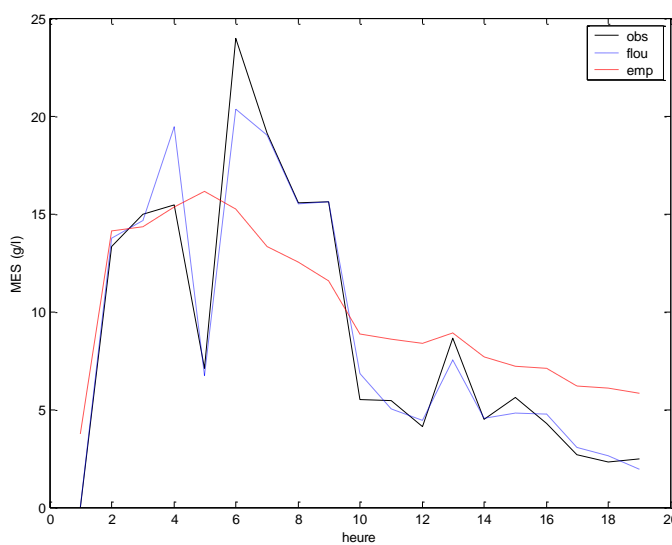


Figure V .10: Variation des MES au pas de temps horaire pour l'épisode3 (05/03/88).

• Episode4

Date : 26/04/1989

Durée (H) : 19

Qmax (m3/s) : 139.5

MES max (g/l) : 70.8

Nombre de calage : 13

Nombre de règles : 7

Formule empirique : $Q_s = 0.26 * Q^{1.08}$

	Méthode de Simulation	Empirique	Floue
Calage	Nash (%)	31,3	91,4
	Erreur (%)	2,6	2,6
Validation	Nash (%)	-247,1	82,5
	Erreur (%)	14,7	3,9
	Coefficient corrélation (%)	42.56	95.6

Tableau V .4: Critères de validation pour l'épisode4 (empirique, floue)

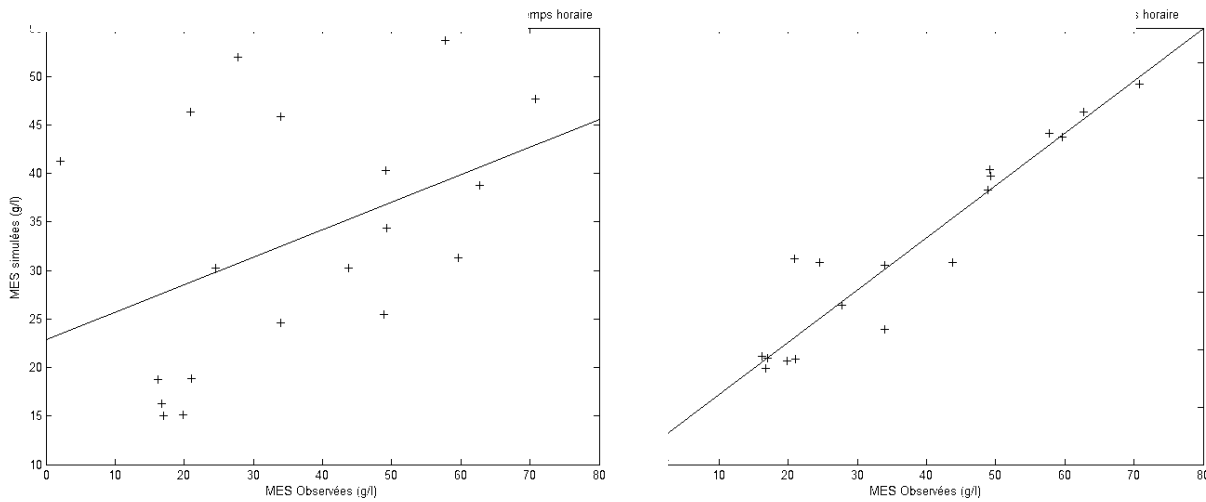


Figure V .11: MES simulées- MES observées pour l'épisode4 (a) modèle empirique (b) modèle floue

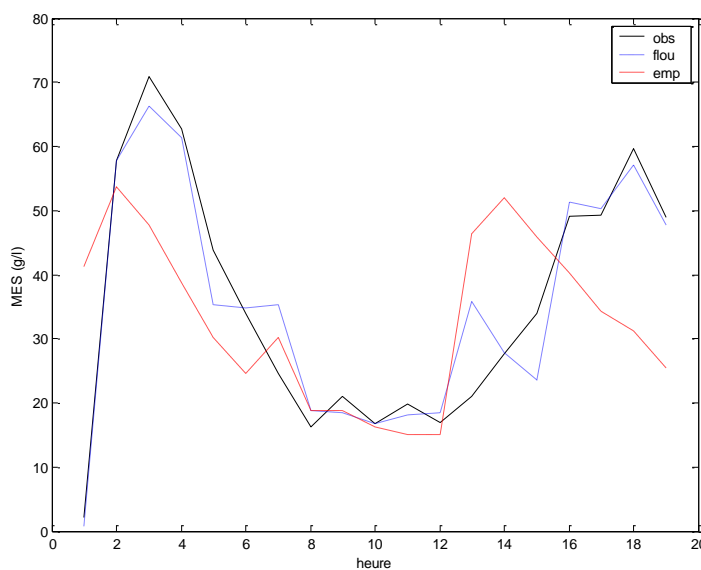


Figure V .12: Variation MES au pas de temps horaire pour l'épisode4.

- **Résultats et interprétations**

Le modèle flou, a donné des résultats très performants à cette échelle (voir tableaux (V.1, V.2, V.3 et V.4)). En effet, en période de calage, le critère de Nash est souvent supérieur à 88 % et l'erreur sur le bilan ne dépasse pas 2,6% (Tableau V-4). En période de validation, le critère de Nash est supérieur à 82,5% (Tableau V-4), avec une amélioration pour l'épisode 1 de 96 % (Tableau V.1). L'erreur sur le bilan est très faible et ne dépasse pas 4,1 % (Tableau V-3). Le coefficient de corrélation pour les différents épisodes est supérieur à 95,6%.

Pour l'ensemble des épisodes, on note que le modèle flou assure une reproduction assez correcte des valeurs des concentrations MES durant les crues, les pics des valeurs sont généralement bien reproduits, ainsi que les différentes tendances lors des décrues (voir Figures (V-6, V-8, V-10, V-12)). L'épisode 3 enregistre ainsi la meilleure performance de simulation pour le modèle flou et le critère de Nash est supérieur à 91,3 % pour les deux périodes (Tableau V-3). Tandis que le modèle empirique surestime les valeurs des concentrations MES durant les décrues, et les sous-estime aux pics. Notons, à titre d'exemple, que pour l'épisode 1, le pic de la concentration observée est de 76 (g/L) tandis que la valeur estimée est de 10 g/L (Figure V-6).

Pour le modèle empirique, les résultats obtenus sont relativement moins performants. Les valeurs des critères de validité en période de calage sont médiocres, elles sont inférieures à 61 % pour le critère de Nash (Tableau V-2), et comprises entre (1,24% et 2,6%) pour le critère de l'erreur. En phase de validation, il est à signaler une dégradation de la simulation, le critère de Nash est souvent négatif et atteint -1 300 pour l'épisode 2 (Tableau V-2). Les valeurs de l'erreur sont supérieures à 14,5% et elles arrivent jusqu'à 60,5% (Tableau V-3).

Pour les valeurs du coefficient de corrélation elles sont entre 42% et 93%. Notons que pour l'épisode 2, le coefficient de corrélation est de 92,8% malgré les valeurs erronées des deux autres critères, soit Nash de -1300 et l'erreur de 53,9% (Tableau V-2). On peut, donc, avoir de bonnes valeurs du coefficient de corrélation malgré que les valeurs de Nash et de l'erreur soient médiocres. Il est nécessaire, donc, d'associer au coefficient de corrélation, pour la validation d'un modèle quelconque, les deux autres critères (Nash, et l'erreur).

V.4.2 Période d'observation mensuelle au pas de temps journalier

La simulation des débits solides en suspension au pas de temps journalier présente un grand intérêt du fait qu'elle permet d'anticiper l'évolution de

l'envasement des barrages à partir des données hydrométriques journalières. Cette simulation est tributaire de la taille des séries de données utilisées et de leur qualité.

Concernant les données à l'échelle mensuelle au pas de temps journalier, nous avons choisi, pour la validation des modèles développées, quatre épisodes débit-MES de la station de Lakhdaria (090501). Il s'agit des mois de janvier, février, Mars et mai de l'année 1987. La période d'apprentissage est composée d'un cumul de données enregistrées au mois correspondant pendant les années d'apprentissage (1984-1986).

Le premier épisode (épisode 01_87) correspond aux données journalières enregistrées pendant tous le mois de janvier 1987, la durée d'apprentissage de 93 jours, correspond au cumul de données journalières enregistrées le mois de janvier des années (1984-1986). Le deuxième épisode (épisode 02_87) correspond aux données journalières du mois de février 1987, la période de calage correspond au cumul de données journalières enregistrées le mois de février des années d'apprentissage. Le troisième épisode (épisode 03_87) correspond aux données journalières du mois de Mars 1987, la durée de calage de 93 jours, correspond au cumul de données journalières enregistrées le mois de Mars des années d'apprentissage. Et enfin, Le quatrième épisode (épisode 05_89) correspond aux données journalières du mois de Mai 1989, dont la durée de calage de 90 jours, correspond au cumul de données journalières enregistrées le mois de Mai des années d'apprentissage.

Les critères de validité des deux modèles pour les quatre épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V.5, V.6, V.7 et V.8) tant en période de calage qu'en période de validation.

Les droites de corrélation entre le débit solide observé et le débit solide simulé par les deux modèles (empirique, flou) sont illustrés dans les figures (V-13, V-15, V-17, V-19) correspondant respectivement aux épisodes (épisode 01_87, épisode 02_87, épisode 03_87, épisode 05_89).

Les figures (V-14, V-16, V-18, V-20) illustrent la variation temporaire des MES simulées et observées correspondant respectivement aux quatre épisodes (Episode1, épisode2, épisode3, épisode4) cités précédemment.

• Episode01_87

Date de validation: janvier/1987
 Durée (jour) : 31
 Qmax (m3/s) : 154,83
 MES max (g/l) : 18.61

Nombre de calage (jour) : 93
 Nombre de règles : 7

	Méthode de Simulation	Empirique	Floue
Calage (Jan 84,85, 86)	Nash (%)	-95.92	71.79
	Erreur (%)	166.2	0.37
Validation	Nash (%)	21.84	98.76
	Erreur (%)	155.01	0.7
	Coefficient de corrélation (%)	80.31	99.42

Tableau V .5: Critères de validation pour l'épisode5 (Janvier/1987)

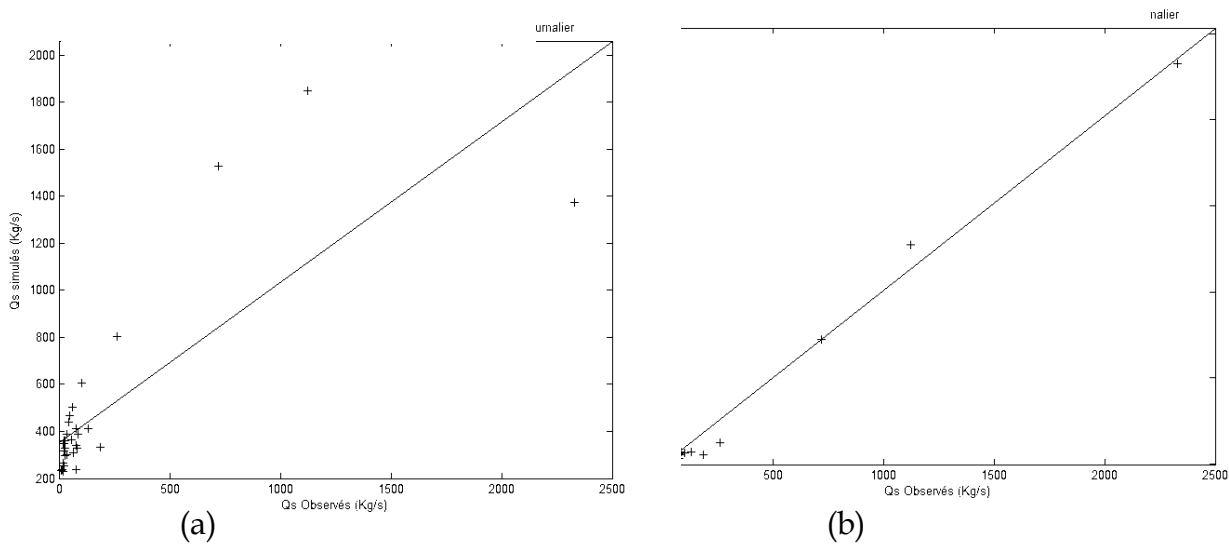


Figure V .13: Qs_simulé Qs_observé pour l'épisode5: (a) modèle empirique (b) modèle flou

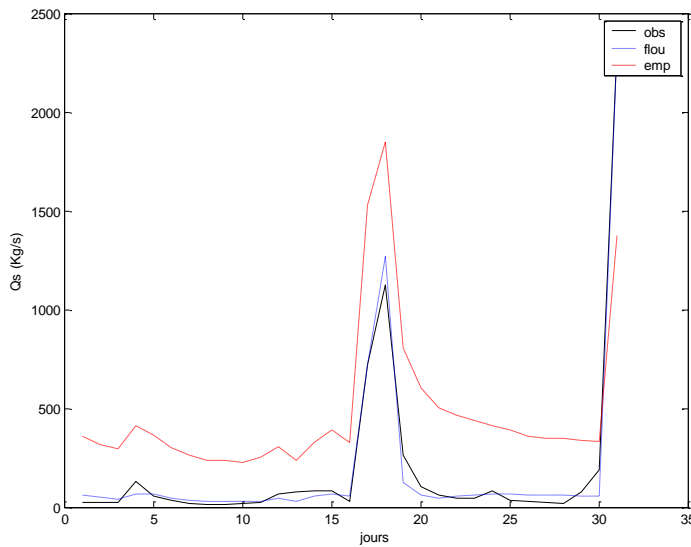


Figure V .14: Variation de Qs au pas de temps journalier pour l'épisode5 (Janvier 1987).

• Episode 02_87

Date de validation: février/1987
 Durée (jour) : 28
 Qmax (m3/s) : 395.44
 MES max (g/l) : 27.87

Nombre de calage (jour) : 84
 Nombre de règles : 7

	Méthode de Simulation	Empirique	Floue
Calage (Fév 84, 85,86)	Nash (%)	-5.64	97.30
	Erreur (%)	0.235	9.84
Validation	Nash (%)	72.08	98.67
	Erreur (%)	39.49	7.13
	Coefficient de corrélation (%)	0.9067	99.43

Tableau V .6: Critères de validation pour l'épisode6 (Fev. 1987).

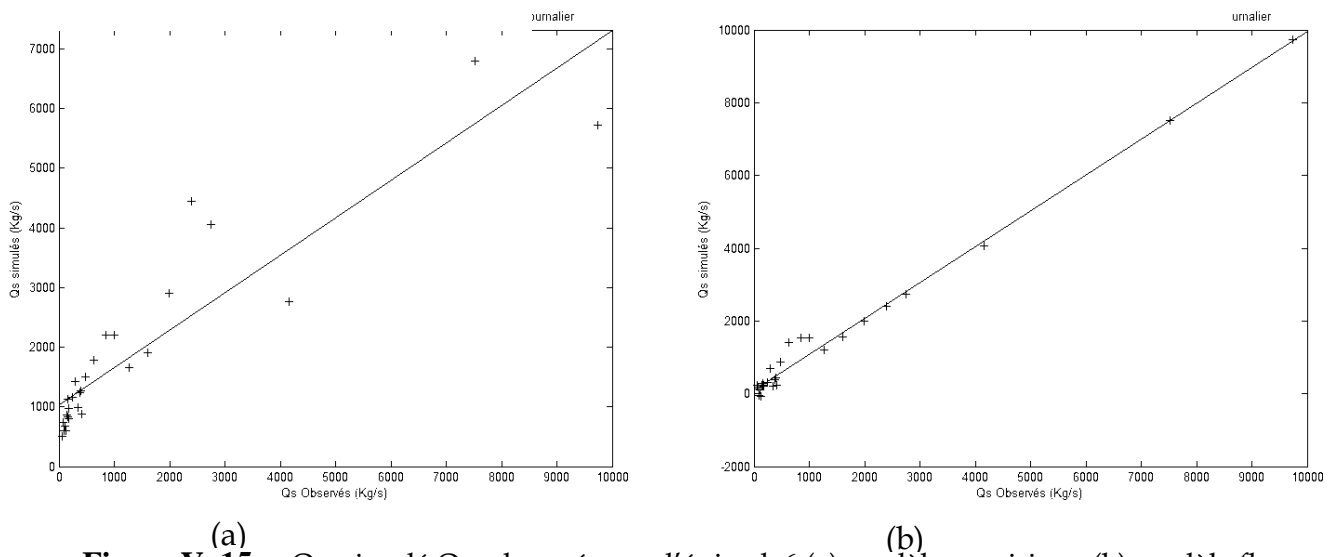


Figure V .15: Qs_simulé Qs_observé pour l'épisode6 (a) modèle empirique (b) modèle flou

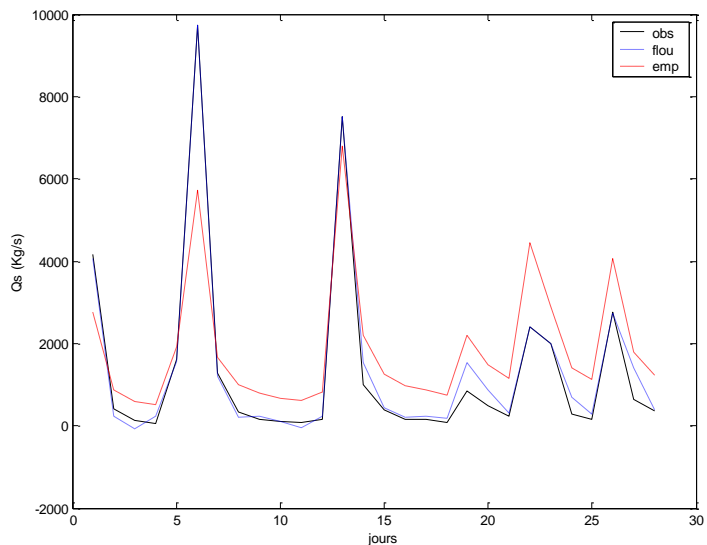


Figure V .16: Variation du débit solide au pas de temps journalier pour l'épisode6.

• Episode 03_87

Date de validation: Mars/1987
 Durée (jour) : 31
 Qmax (m3/s) : 100.8
 MES max (g/l) : 12

Nombre de calage (jour) : 93
 Nombre de règles : 7

	Méthode de Simulation	Empirique	Floue
Calage (Fév 84,85,86)	Nash (%)	-211.9	93.92
	Erreur (%)	208.0	0.73
Validation	Nash (%)	-1428	87.17
	Erreur (%)	1839	12.1
	Coefficient corrélation (%)	88.42	93.69

Tableau V.7: Critères de validation des deux modèles pour l'épisode7

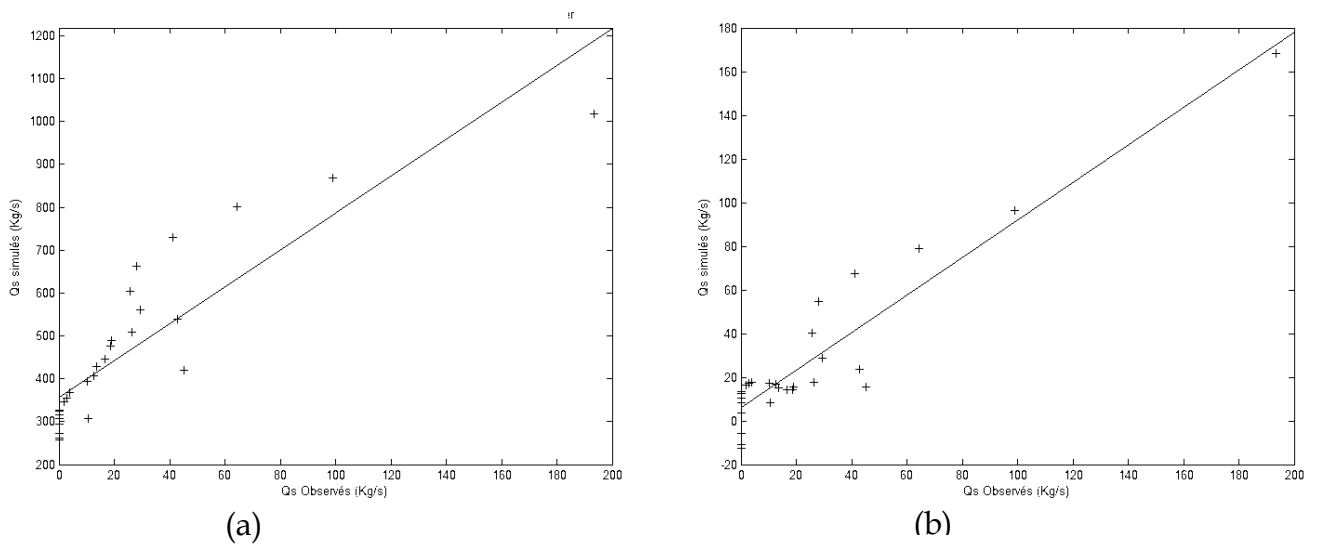


Figure V.17: Qs_simulé Qs_observé pour l'épisode7 (a) modèle empirique (b) modèle flou

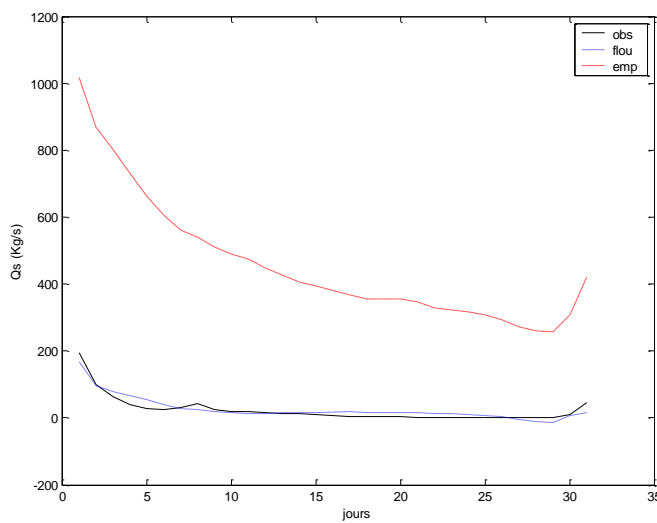


Figure V.18: Variation du débit solide au pas de temps journalier pour l'épisode7.

• Episode 05_89

Date de validation: mai/1989
 Durée (jour) : 31
 Qmax (m3/s) : 32.970
 MES max (g/l) : 70.8

Nombre de calage : 93
 Nombre de règles : 7

	Méthode de Simulation	Empirique	Floue
Calage (Jan 84,85,86)	Nash (%)	-473.52	89.17
	Erreur (%)	354.7	3.56E-4
Validation	Nash (%)	7.71	71.47
	Erreur (%)	34.44	0.0023
	Coefficient de corrélation (%)	63.98	84.55

Tableau V .8: Critères de validation des deux modèles pour l'épisode8 (mai/1989)

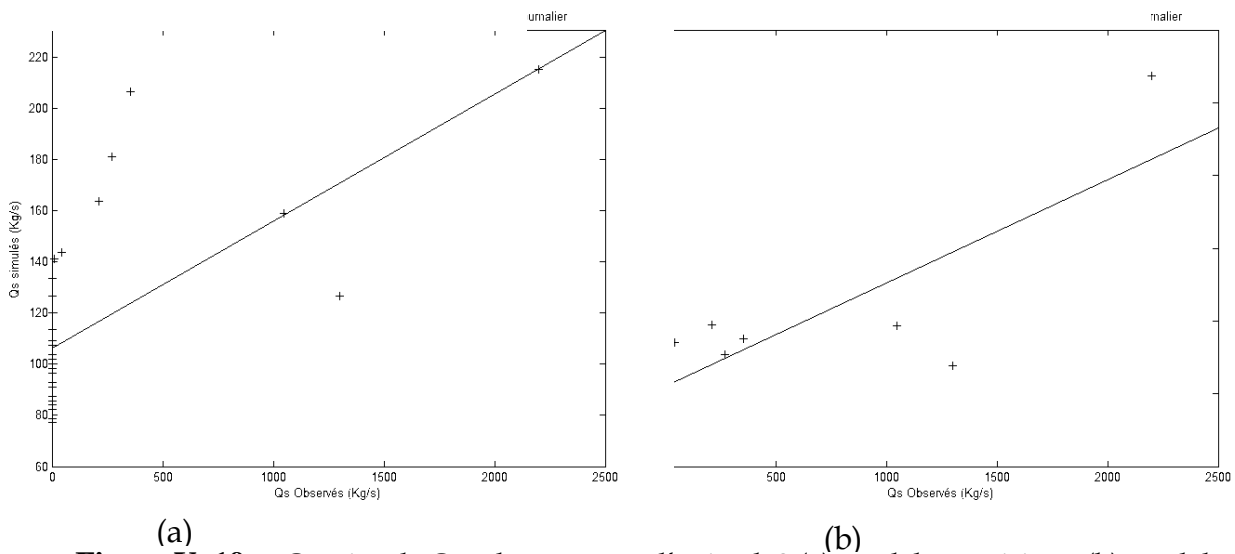


Figure V .19: Qs_simulé Qs_observé pour l'épisode8 (a) modèle empirique (b) modèle flou

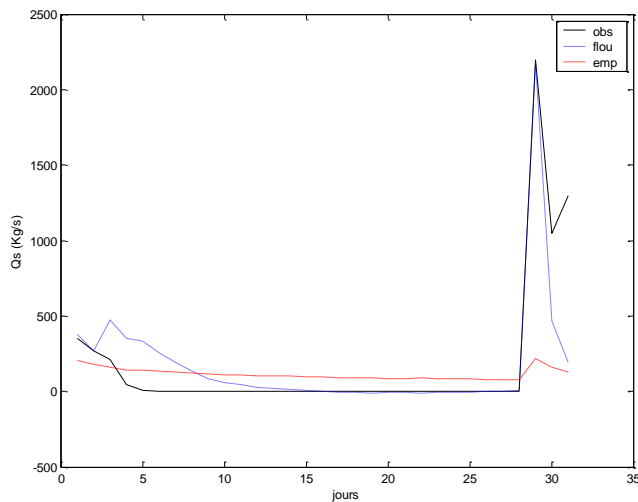


Figure V .20: Variation du débit solide au pas de temps journalier pour l'épisode8.

- **Résultats et interprétations**

Le modèle flou, a donné des résultats très performants à cette échelle (voir tableaux (V.6, V.7 et V.8)). En effet, en période de calage, le critère de Nash est souvent supérieur à 90 % sauf pour le mois de janvier 87 où le critère de Nash est de 71,8% (Tableau V-5). L'erreur sur le bilan ne dépasse pas 9,8% (Tableau V-6). En période de validation, le critère de Nash est supérieur à 87% (Tableau V-7) excepté le mois de mai 1989 où le critère de Nash est de 71.5%. Notons que ce critère dépasse les 98% pour les périodes humides (janvier et février 1978) (voir respectivement les tableaux V-5 et V-6). L'erreur sur le bilan est relativement faible et ne dépasse pas 12 % (Tableau V-7). Le coefficient de corrélation pour la majorité des épisodes est supérieur à 93% sauf au mois de mai 1989 où le coefficient de corrélation est de 84,5%.

Pour le modèle empirique, les résultats obtenus sont médiocres en période de validation qu'en période de calage. Les valeurs du critère de Nash pour la période d'apprentissage sont toutes négatives (Tableaux V-6, V-7, V-8, V-9), pour les valeurs de l'erreur elles sont complètement erronées. En période de validation, le critère de Nash est inférieur à 72% et il atteint -1428 pour le mois de Mars 1987 (Tableau V-7). Les valeurs de l'erreur sont supérieures à 44% et elles arrivent jusqu'à 1839% (Tableau V-7). Les valeurs des coefficients de corrélation obtenues par le modèle empirique en période de validation sont supérieures à 80% excepté le mois de Mai 1989 où la valeur atteint 63%.

Notons aussi que, pour le modèle flou, une reproduction meilleure des valeurs du débit solide durant les périodes humides que dans les périodes sèches. Tandis que le modèle empirique surestime les valeurs du débit solide autant en période humide qu'en période sèches. Notons, à titre d'exemple, que pour le mois de mars 1987, le pic du débit solide observé est de l'ordre de 200 (Kg/s) tandis que la valeur estimée est de l'ordre de 1000 (Kg/s) (Figure V-18).

On remarque donc, que pour les mois où la fluctuation journalière du débit solide est très importante, le modèle neuroflou donne de meilleures valeurs des critères de validité.

V.4.3 Période d'observation annuelle au pas de temps journalier

La simulation à cette échelle permet de mieux comprendre la complexité simuler le phénomène de transport solide la variation temporaire des paramètres hydroclimatiques.

La simulation a été faite à partir des données de la période comprise entre janvier 1984 et juillet 1989. L'objectif principal est de tester les modèles sur un éventail de données relativement court, pour étudier le pouvoir prédictif de ces modèles. Nous avons choisi, pour la période de validation des modèles développés à cette échelle, deux années d'observation de la station de Lakhdaria (090501). Il s'agit des années 1974 et 1975.

Pour l'apprentissage, à cette échelle, nous avons développé deux concepts distincts.

Le premier, appelé, conventionnellement, **Apprentissage Annuel**, consiste à construire les années d'apprentissage année par année en considérant l'éventail de données de la période de calage. En effet, la période d'apprentissage est composée, tous simplement, d'un cumul de données enregistrées aux années (1984-1986).

Le deuxième, appelé **Apprentissage Mensuel**, Consiste à construire les valeurs des débits solides simulés, par assemblages de douze mois, de l'année de validation, simulés à une échelle mensuelle. L'apprentissage d'un mois quelconque, est composé d'un cumul de données enregistrées au mois correspondant pendant les années d'apprentissage. Les valeurs d'apprentissage du mois de janvier, par exemple, correspondent, donc, à l'assemblage de toutes les valeurs mesurées au mois de janvier pendant les années d'apprentissage (1984-1989). Ce concept a été introduit pour

La modélisation débit liquide débit solide à cette échelle a été effectuée par trois modèles : Un modèle empirique, un modèle neuroflou, noté **Flou_Annuel**, basé sur le concept de l'apprentissage annuel et, enfin, un modèle neuroflou, noté **Flou_Mensuel**, basé sur le concept de l'apprentissage mensuel.

Les critères de validité des trois modèles pour les deux épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V-9 et V-10) tant en période de calage qu'en période de validation.

Les droites de corrélation entre le débit solide observé et le débit solide simulé par les modèles flous (Flou_Annuel , Flou_Monsuel) sont illustrées dans les figures (V-21, V-23) correspondant respectivement aux années 1974 et 1975.

Les figures (V-22, V-24) illustrent la variation temporaire des débits solides observés et simulés par les trois modèles correspondant respectivement aux années 1974 et 1975.

• Episode 1974

Période de validité : année 1974

Nombre de calage (jour) : 5159

Durée (jour): 365 Nombre de règles : 7

Qmax (m3/s) :

Q solide Max (Kg/s) : 12

	Méthode	Empirique	Floue_Annuel	Floue_Mensuel
Calage	Nash (%)	36.5985	43.6765	/
	Erreur(%)	9.0053	2.362	/
Validation	Nash (%)	39.86	43.572	94,56
	Erreur(%)	18.5254	29.075	3,833
	R (%)	63.34	66.85	87.09

Tableau V .9: Critères de validation des deux modèles année 1974 (empirique, flou)

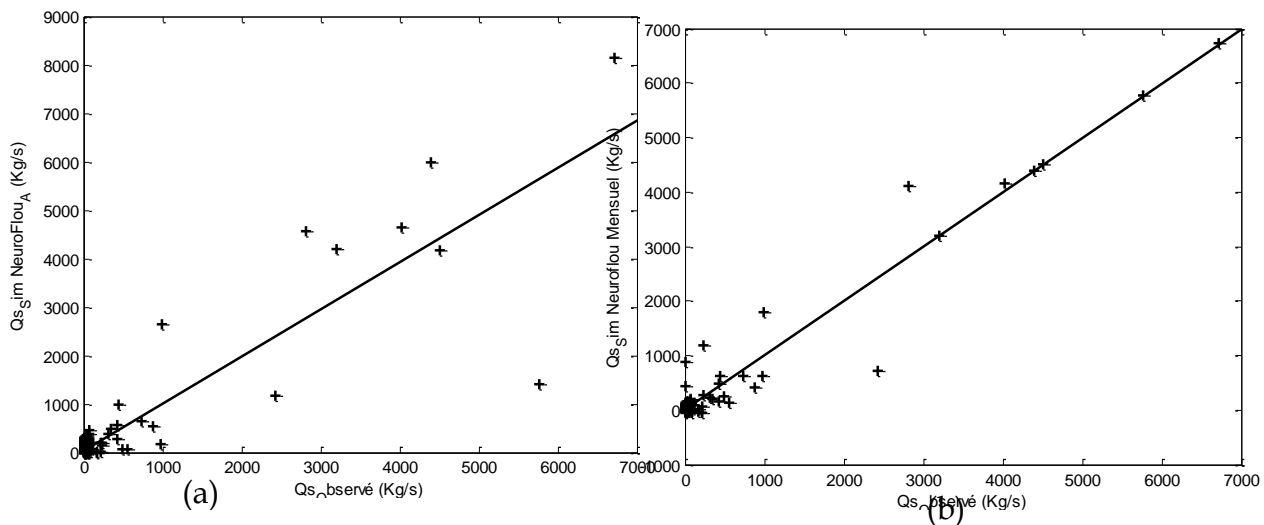


Figure V .21: Corrélation Qs Sim- Qs Obs pour l'année 1974 (a) flou_Annuel (b) flou_Mensuel

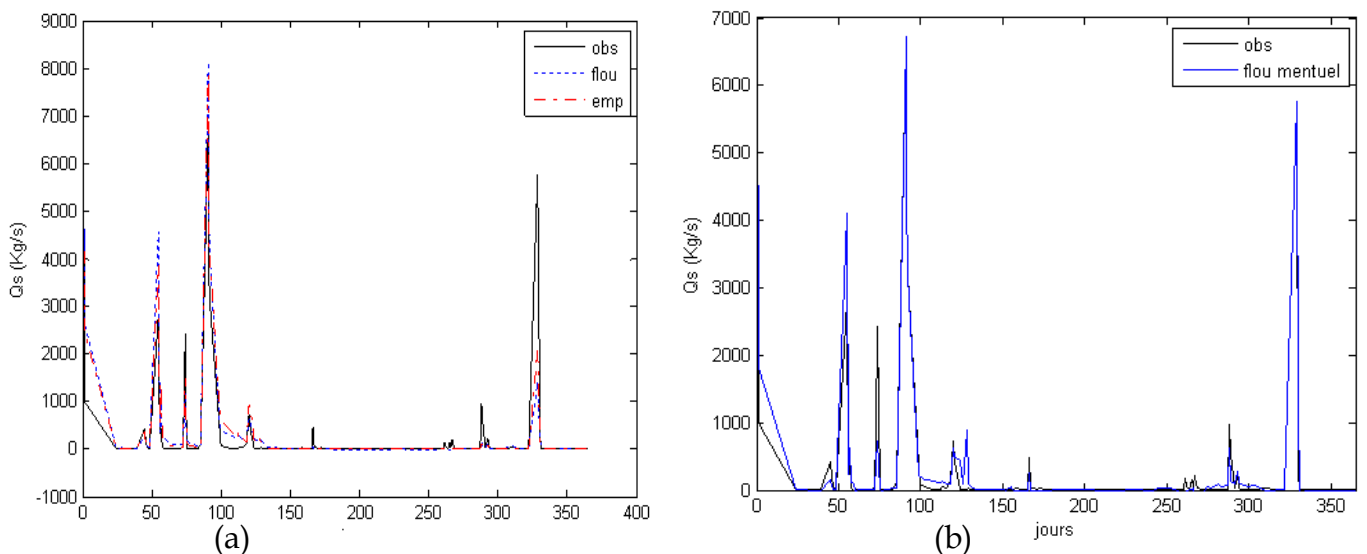


Figure V .22: Simulation de la Variation annuel (1974) du débit solide par modèle flou à apprentissage (a) annuel (b) mensuel.

• Episode 1975

Période de validité : année 1975

Nombre de calage (jour) : 5159

Durée (jour): 365

Nombre de règles : 7

Qmax (m3/s) :

MES Max (g/l) : 12

	Méthode	Empirique	Floue_ A	Floue_ Mensuel
Calage	Nash (%)	36.599	43.949	-
	Erreur (%)	9.0053	1.5144	-
Validation	Nash (%)	65.015	70.763	74.68
	Erreur (%)	42.412	35.79	29.99
	R (%)	84.99	85.34	87.27

Tableau V .10: Critères de validation des deux modèles année 1975(empirique, flou)

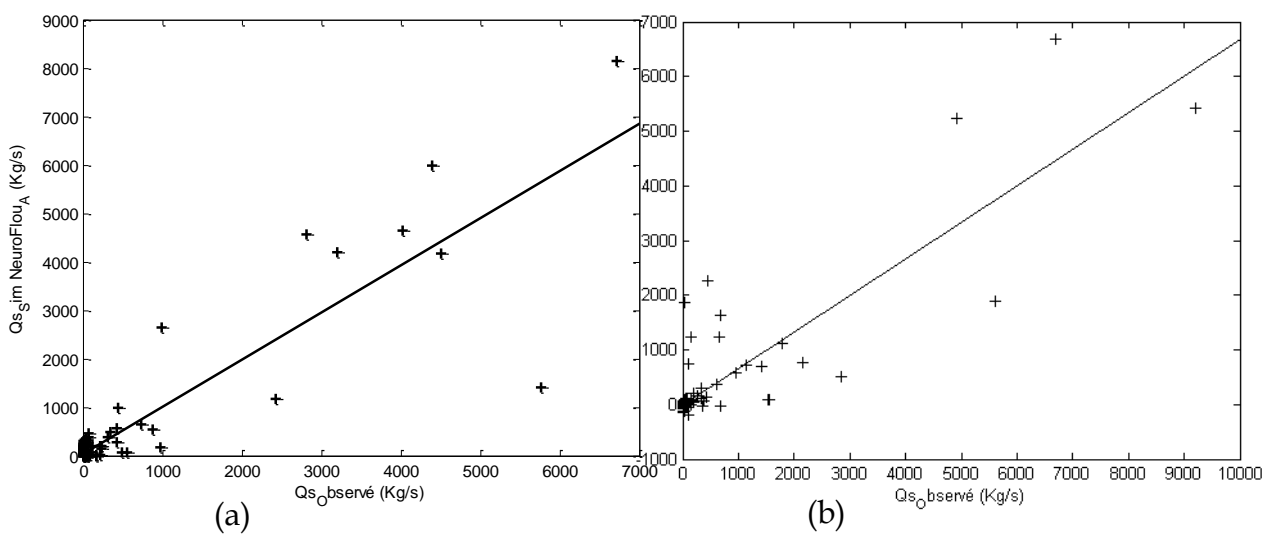


Figure V .23: Corrélation Qs Sim- Qs_Obs pour l'année 1975 (a) flou_Annuel (b) flou_Mensuel

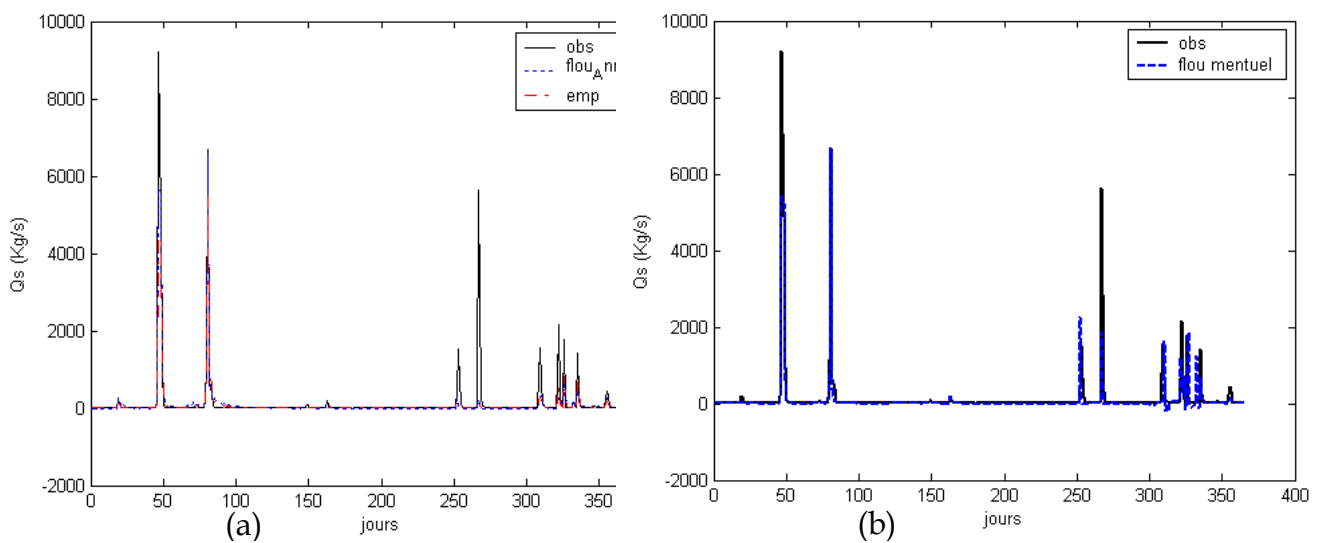


Figure V .24: Simulation de la Variation annuel (1975) du débit solide par modèle flou à apprentissage (a) annuel (b) mensuel.

- **Résultats et interprétations**

Pour le modèle empirique, les résultats obtenus sont médiocres en période de validation qu'en période de calage. Les valeurs du critère de Nash pour la période d'apprentissage sont inférieures à 36,5% (Tableaux V-9, V-10), pour les valeurs de l'erreur elles sont relativement faible (9%). En période de validation, la valeur du critère de Nash est comprise entre 39% et 65%. Les valeurs de l'erreur sont comprises entre 18% et 42%. Les valeurs des coefficients de corrélation obtenues par le modèle empirique en période de validation sont comprises entre à 63% et 85%.

Pour le modèle Flou_Annuel, les résultats obtenus sont mauvais mais relativement meilleurs que ceux obtenus par le modèle empirique. En effet, Les valeurs du critère de Nash pour la période d'apprentissage sont inférieures à 43,9% (Tableaux V-9, V-10), pour les valeurs de l'erreur elles sont relativement faible, elles sont inférieures à 2,3%. En période de validation, la valeur du critère de Nash est comprise entre 63,5% et 70,7%, soit une moyenne de 67%. Les valeurs de l'erreur sont comprises entre 29% et 36%, soit une moyenne de 32%. Les valeurs des coefficients de corrélation obtenues par ce modèle en période de validation sont comprises entre à 66% et 85%.

Le modèle flou_Monsuel, a donné des résultats relativement bons comparés à ceux obtenus par les deux modèles cités précédemment (voir tableaux (V- 9, V-10)). En effet, la valeur du critère de Nash est comprise entre 75% et 94,5%, soit une moyenne de 85%. L'erreur sur le bilan est comprise entre 3,8% et 29%, soit une moyenne de 16%. Le coefficient de corrélation pour les deux années est proche de 87%. On remarque que, pour la même valeur du coefficient de corrélation, on peut avoir des valeurs des critères de Nash et de l'erreur différentes, ce qui confirme l'indisponibilité d'associer les trois critères pour la validation d'un modèle.

Notons aussi que le modèle Flou_Mensuel, donne une reproduction meilleure des valeurs du débit solide (Figure V-22 (b) et V-24 (b)) comparé au modèle Flou_Annuel.

V.4.4 Conclusions

En comparant les résultats des modèles en fonction des échelles temporelles, nous pouvons noter la complexité de la relation débit-MES à l'échelle annuelle au pas de temps journalier. En effet, si au pas de temps horaire la non linéarité constitue la grande difficulté de simulation, au pas de temps journalier, le modèle se trouve confronté à des cas difficilement modélisables (ex. : débit élevé, concentration MES

faible, débit faible, concentration MES élevée). Néanmoins, les résultats obtenus par l'approche floue sont satisfaisants.

Une amélioration de la simulation est observée durant la phase de validation, et cela contrairement au pas de temps horaire, où on observe généralement une dégradation de la modélisation entre la phase de calage et celle de validation.

On remarque aussi qu'à l'échelle journalière au pas de temps horaire, les valeurs de l'erreur sur le bilan sont meilleures que celles de l'échelle mensuelle et l'échelle annuelle. Soit une valeur moyenne de l'erreur de 2.6% pour l'échelle journalière, 5% pour l'échelle mensuelle et 16% pour l'échelle annuelle. On conclue, donc, que la précision est inversement proportionnelle à l'échelle.

La mauvaise qualité des résultats, obtenus par le modèle flou à apprentissage annuel, peut être expliquée par le fait que lors de l'apprentissage annuel certains détails de la réalité, très complexe, seront dissimulés par l'assemblage des données de l'année toute entière, entre autre, l'effet saisonnier. En effet, un débit liquide faible en période humide peut engendrer un débit solide beaucoup plus important que celui engendré par un débit liquide fort en période sèche.

Cependant, Le modèle Flou_Mensuel, a été conçu dans l'objectif d'englober au maximum, lors de l'apprentissage, l'effet saisonnier. La qualité supérieure des résultats obtenus à différentes échelles, en période de validation comme en période de calage, en utilisant ce nouveau concept donne un avantage supplémentaire aux modèles Neuroflous.

Notons que, dorénavant, seuls les modèles Neuroflous à apprentissage mensuel seront utilisés pour la simulation débit liquide débit solide de part la médiocrité des résultats obtenus par le modèle neuroflou à apprentissage annuel et le modèle empirique.

V.5 SIMULATION NEUROFLOU EN UTILISANT DES VARIABLES ADIMENSIONNELS

L'analyse statistique des données hydrologiques montre que les écarts entre les grandeurs physiques observées sont remarquables, que se soit entre stations voisines ou même au sein de la même station. Au niveau d'une station, une grande fluctuation des valeurs observées, notamment à l'échelle saisonnière (périodes sèche, période humide).

Il est évident que les écarts entre les grandeurs physiques de deux stations différentes sont certainement flagrants. Ceci est dû essentiellement aux écarts

géométriques des sous bassins versants en amont de chaque station. La comparaison entre les valeurs observées devient plus complexe s'il s'agit de bassins versant éloignés. Les variations climatiques, Dans le cas de deux stations appartenant à des bassins versants différents, s'ajoute à la distorsion spatiotemporelle pour rendre la comparaison des grandeurs physiques plus complexe. Cette comparaison devient ambiguë lorsqu'il s'agit de deux bassins éloignés, ou les variations hydro climatiques deviennent plus importantes.

Pour donner un pouvoir prédictif généralisé de notre modèle neuroflou à apprentissage mensuel appliqué sur les variables brutes (on l'appelle **Flou_Brute**), nous avons introduit intuitivement la notion de rapports adimensionnels des grandeurs physiques. Les variables adimensionnelles rendent la comparaison des événements se passant dans des endroits différents plausible.

Ce nouveau concept, appelé conventionnellement **Flou_Adimensionnel**, consiste à la normalisation des grandeurs hydrologiques, à l'état brute, par la division de chacune par la moyenne mensuel, tant en période de calage, qu'en période de validité. Un apprentissage mensuel des variables adimensionnelles, ainsi obtenues, permet d'augmenter le pouvoir prédictif de notre modèle.

Le passage aux variables brutes par Une transformation inverse des variables adimensionnelles ainsi simulées, est appelé **Flou_Dimensionnel**

Dans le but de concevoir la puissance du modèle ainsi développé, basé sur un apprentissage neuronale mensuel appliqué sur des variables floues adimensionnelles, nous avons considéré trois cas de figure cité ci-dessous.

V.5.1 Apprentissage dans la même station

Nous avons choisi dans cette partie de l'étude la station de lakhdaria (090501) comme station de référence, pour la validation des différents modèles Neuroflous développés à deux échelles, mensuelle et annuelle, au pas de temps journalier.

V.5.1.1 Période d'observation mensuelle au pas de temps journalier

Les épisodes (09_03_86, 09_10_86 et 09_12_86), choisis pour la période de validation, correspondent respectivement aux mois de Mars, Octobre et Décembre de l'année 1986. La période d'apprentissage est composée d'un cumul de données enregistrées au mois correspondants pendant les années d'apprentissage (1979-1984).

Les critères de validité des deux modèles pour les trois épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V.11, V.12, V.13) tant en période de calage qu'en période de validation.

Les droites de corrélation débit solide observé et le débit solide simulé par les deux modèles (Flou_Brute et Flou_Dimensionnel) sont illustrés dans les figures (V-25, V-27, V-27) correspondant respectivement aux épisodes mois de Mars, Octobre et Décembre de l'année 1986.

Les figures (V-26, V-28, V-30) illustrent la variation temporaire des débits solides simulées et observées correspondant respectivement aux trois épisodes cités précédemment.

• Episode 09_03_86

Station à modéliser : 090501

Nombre de règles : 7

Station de référence : 090501

Mois de validation : Mar.1986

années de calage : 1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ ADim	Floue_ Dim
Calage	Nash (%)	83.69	81.61	81.61
	Erreur (%)	1.88	0.26	0.26
Validation	Nash (%)	97.21	60.55	60.55
	Erreur (%)	8.03	7.31	7.31
	Coefficient de corrélation (%)	98.70	79.38	79.38

Tableau V .11: Critères de validation (Episode 02_09_03_86).

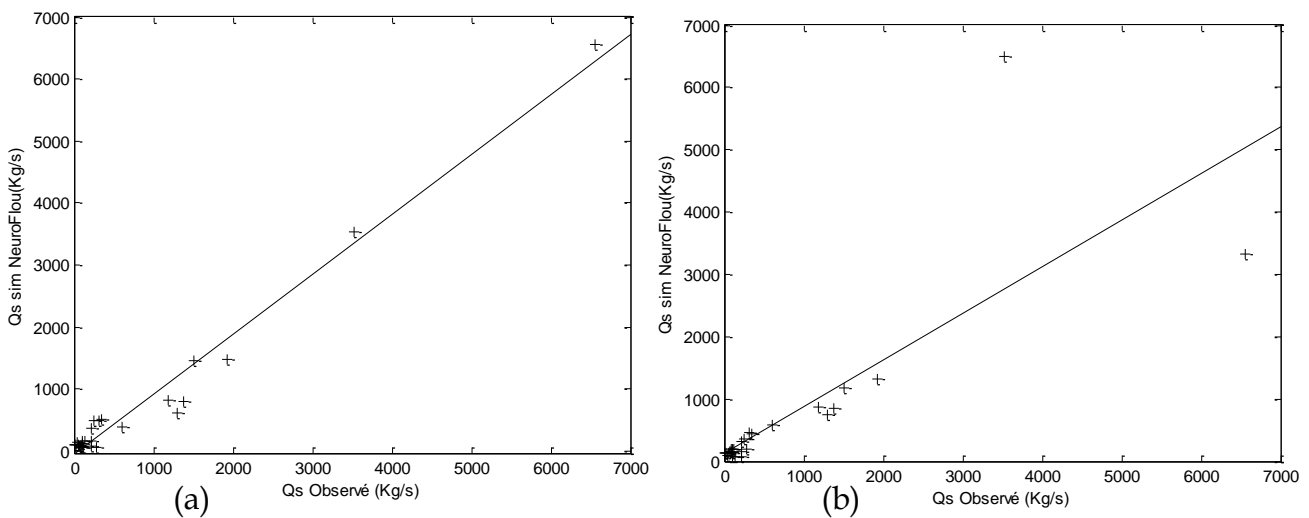


Figure V .25: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_03_86) (a) Flou_Brute (b) Flou_Dim



Figure V .26: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_03_86).

• Episode 09_10_86

Station à modéliser : 090501

Station de référence : 090501

Mois de validation : Oct.1986

Nombre de règles : 7

années de calage : 1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADIM	Floue_Dim
Calage	Nash (%)	69.85	63.17	63.17
	Erreur (%)	1.37	5.06	5.06
Validation	Nash (%)	42.68	16.55	16.55
	Erreur (%)	8.03	87.65	87.65
	Coefficient de corrélation (%)	65.64	71.60	71.60

Tableau V .12: Critères de validation (Episode 02_09_10_86)

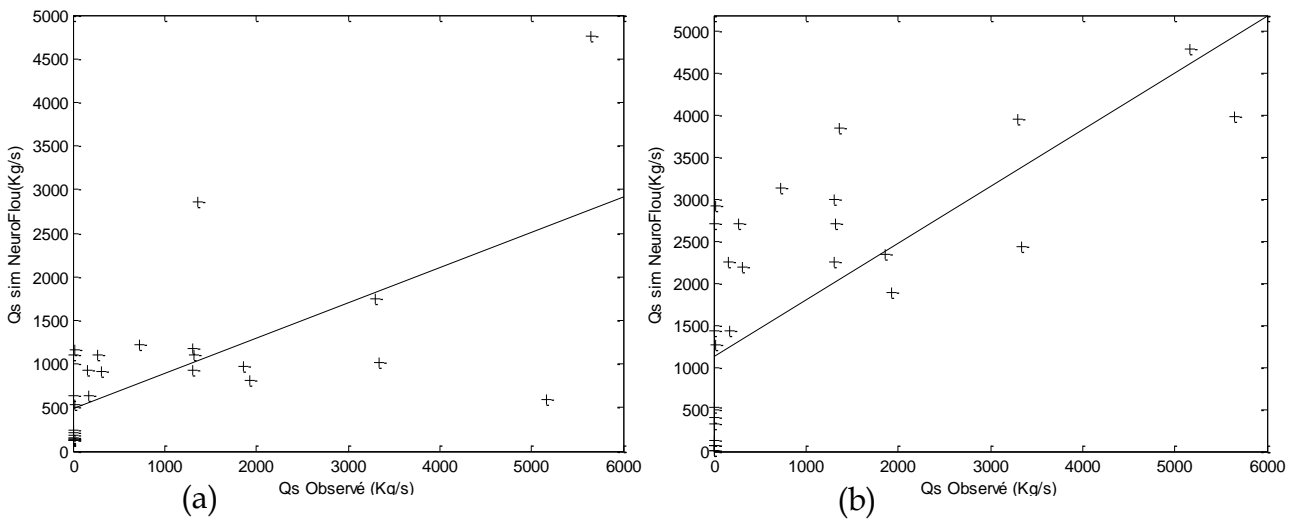


Figure V .27: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_10_86) (a) flou_brute (b) Flou_Dim

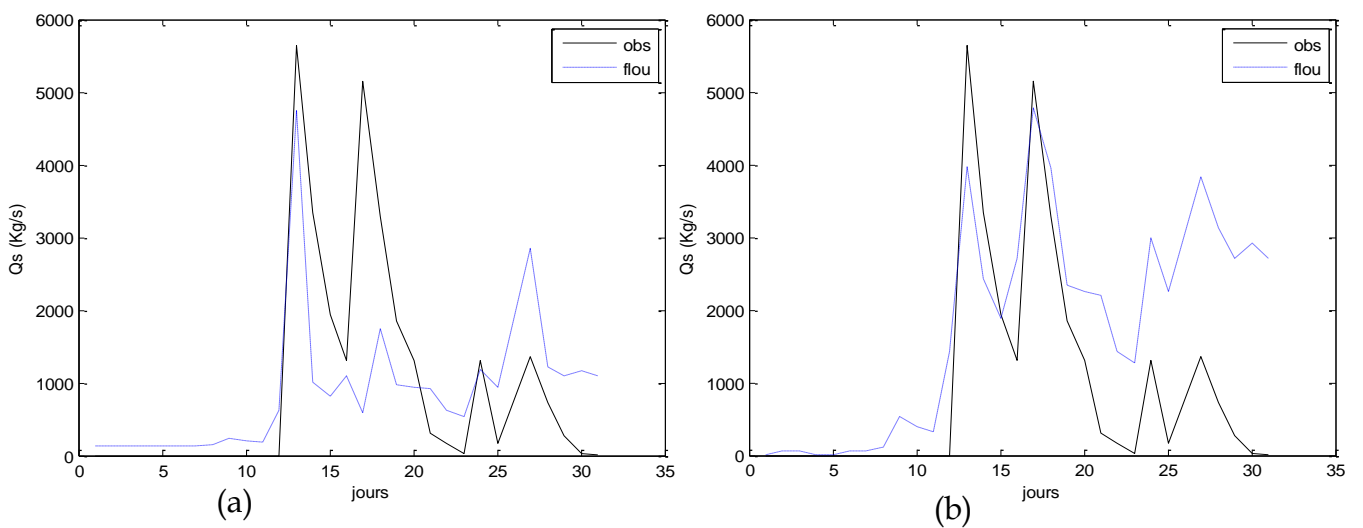


Figure V .28: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_10_86)

• Episode 09_12_86

Station à modéliser : 090501
 Station de référence : 090501
 Mois de validation: Déc.1986

Nombre de règles : 7
 années de calage :1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ ADim	Floue_ Dim
Calage	Nash (%)	74.07	73.50	73.50
	Erreur (%)	1.45	0.41	0.41
Validation	Nash (%)	87.36	42.46	42.46
	Erreur (%)	11.31	8.06	8.06
	Coefficient de corrélation (%)	97.39	66.57	66.57

Tableau V .13: Critères de validation (Episode 02_09_12_86)

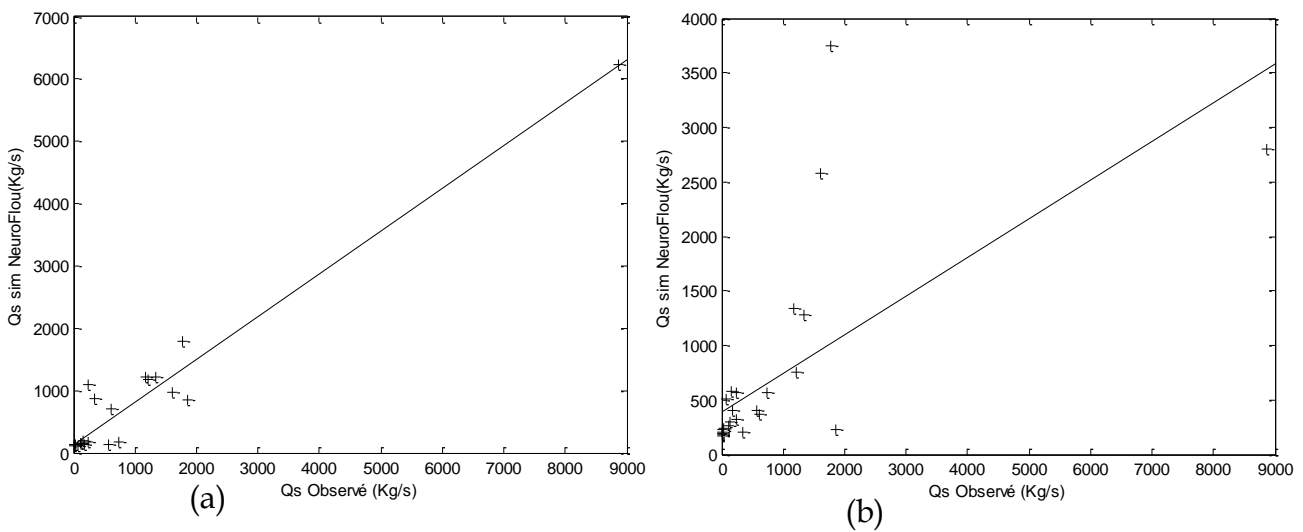


Figure V .29: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_12_86) (a) flou_brute (b) Flou_Dim

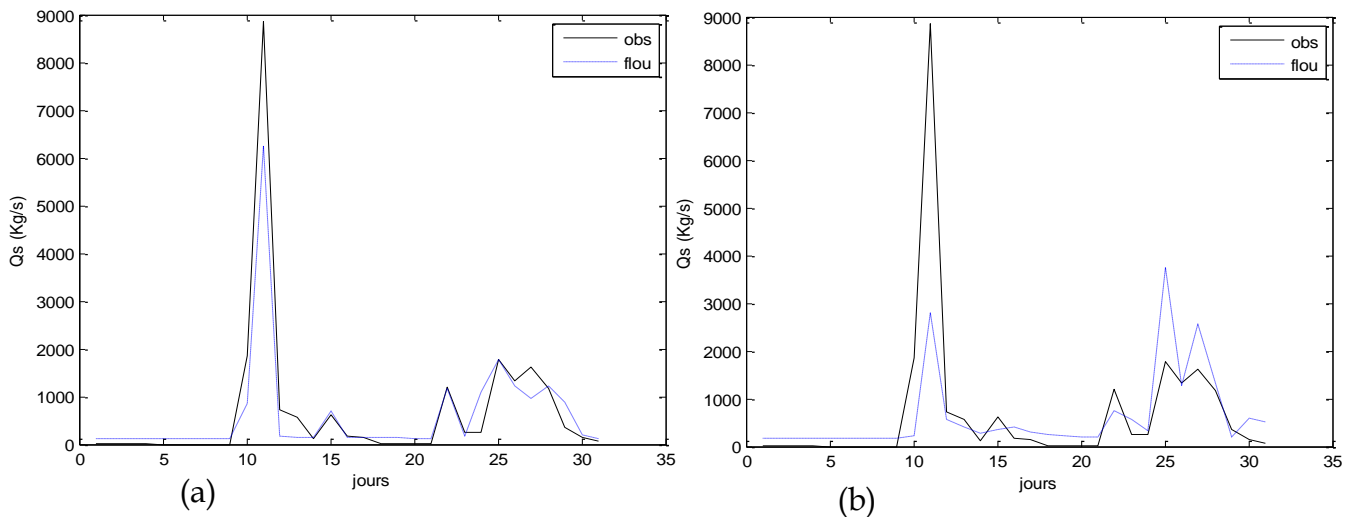


Figure V .30: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_12_86).

- **Résultats et interprétations**

Les résultats obtenus à l'échelle mensuelle montrent que le modèle Neuroflou appliqué sur les variables brutes, donne des résultats satisfaisants contrairement au modèle Neuroflou appliqué sur les variables adimensionnelles, qui donne des résultats médiocres. En effet, pendant la période de validation, le critère de Nash, pour le premier modèle, dépasse les 97% pour l'épisode09_03_86, tandis qu'il est relativement faible pour le deuxième modèle, soit 60.55% (voir tableau -V.11)

Les résultats du modèle flou à apprentissage mensuel appliqué sur des variables brutes sont nettement supérieurs par rapport au modèle flou à apprentissage mensuel appliqué sur les variables adimensionnelles, à différentes échelles (échelle mensuelle, échelle annuelle) et à différentes périodes (période de calage, période de validation).

Ce résultat peut être expliqué par le fait qu'au niveau de la même station la transformation en variable adimensionnelle ne fait qu'augmenter les risques d'erreurs sans, pour autant, apporter des éléments nouveaux permettant de réduire la distorsion temporelle (par l'effet des variations saisonnières).

Il est, donc, préférable d'opérer directement sur les variables brutes pour réduire les risques d'erreurs.

V.5.1.2 Période d'observation annuelle au pas de temps journalier

La simulation a été faite à partir des données de la période comprise entre janvier 1974 et juillet 1984. Nous avons choisi, pour la période de validation des modèles développés à cette échelle, deux années d'observation de la station de Lakhdaria(090501). Il s'agit des années 1986 et 1987.

Les critères de validité des deux modèles pour les deux épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V-14 et V-15).

Les droites de corrélation entre le débit solide observé et le débit solide simulé par les modèles flous (Flou_Brute , Flou_Dimensionnel) sont illustrées dans les figures (V-31, V-33) correspondant respectivement aux années 1986 et 1987.

Les figures (V-32, V-34) illustrent la variation temporaire des débits solides observés et simulés par les deux modèles correspondant respectivement aux années 1986 et 1987.

• Episode 09_86

Station à modéliser : 090501
 Station de référence : 090501
 Année de validation : 1986

Nombre de règles : 7
 années de calage : 1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADim	Floue_Dim
Validation	Nash (%)	74.74	43.64	38.64
	Erreur (%)	9.02	19.05	30.49
	Coefficient de corrélation (%)	87.31	67.07	67.36

Tableau V .14: Critères de validation (Episode 02_09_86)

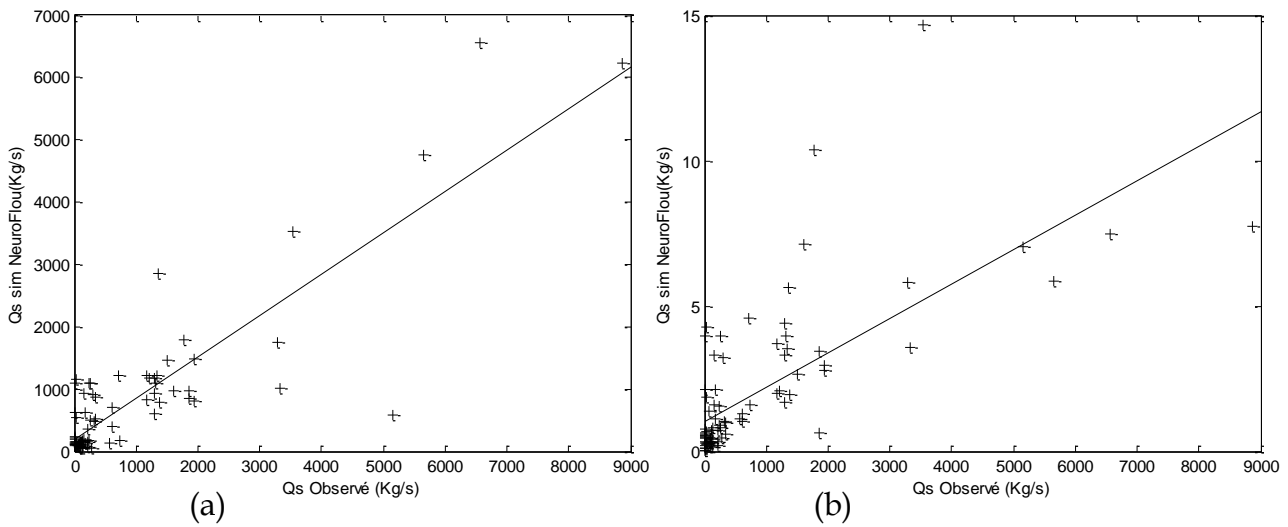


Figure V .31: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_86) (a) Flou_Brute (b) Flou_Dim

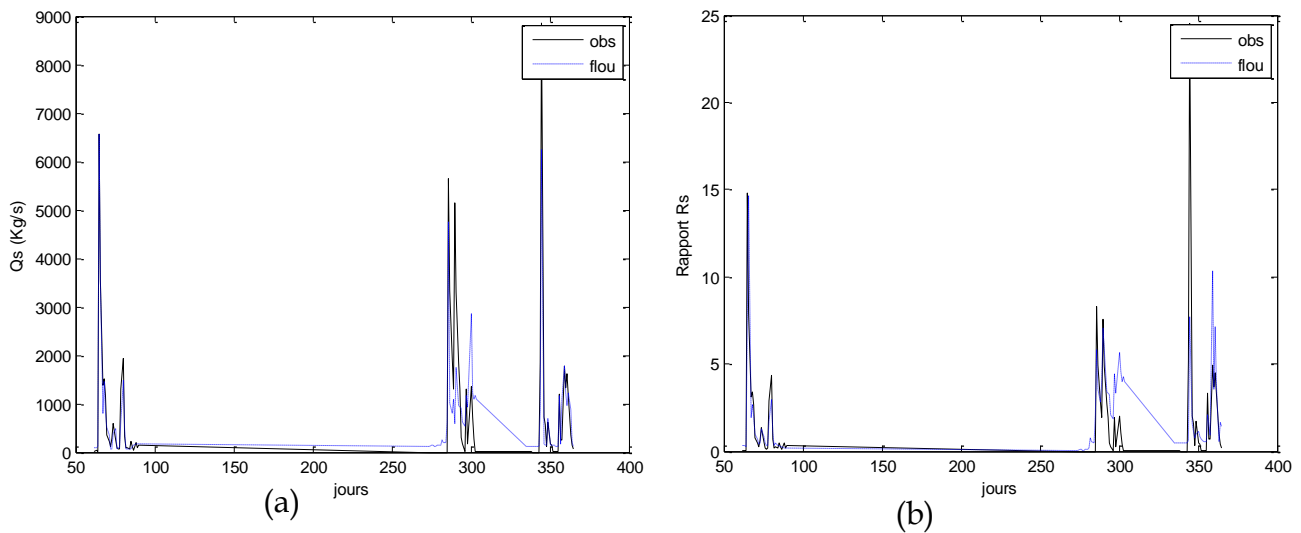


Figure V .32: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_86).

• Episode 09_87

Station à modéliser : 090501
 Station de référence : 090501
 Année de validation : 1987

Nombre de règles : 7
 années de calage : 1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADim	Floue_Dim
Validation	Nash (%)	92.50	42.80	66.19
	Erreur (%)	14.84	34.30	28.94
	Coefficient de corrélation (%)	96.75	81.89	90.23

Tableau V .15: Critères de validation (Episode 02_09_87)

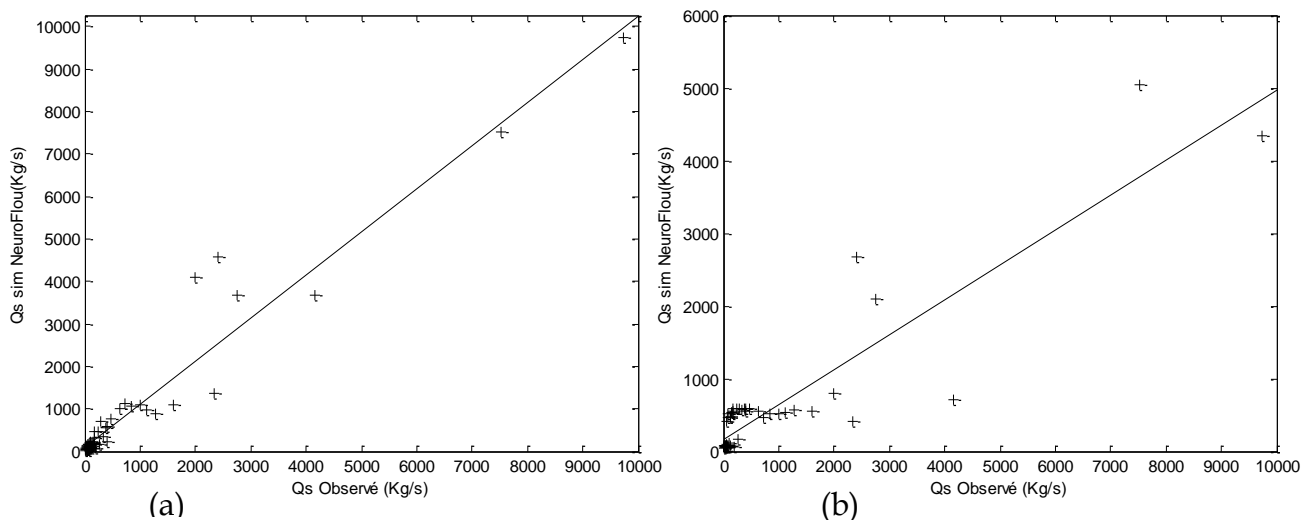


Figure V .33: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_87) (a) Flou_Brute (b) Flou_Dim

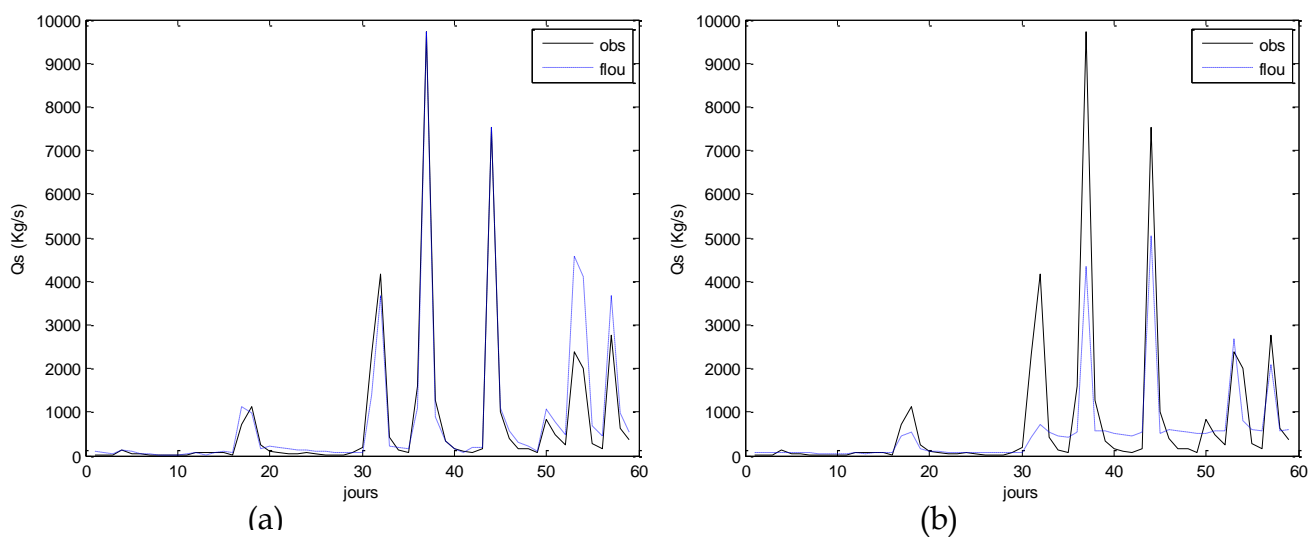


Figure V .34: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_87).

- **Résultats et interprétations**

Pour le modèle flou utilisant les variables adimensionnelles, les résultats obtenus sont médiocres par rapport à ceux obtenus par le modèle flou utilisant les variables brutes. En effet, en période de validation, Les valeurs du critère de Nash, obtenues par le modèle flou_adimensionnel sont inférieures à 66%, l'erreur supérieur à 30% et le coefficient de corrélation est supérieur à 68%. Tandis que pour le modèle flou utilisant des variables brutes, le coefficient de Nash est supérieur à 75%, l'erreur sur le bilan est inférieur à 14% et le coefficient de corrélation est supérieur à 87% (Tableaux V-14, V-15).

Notons aussi que le modèle Flou_Brute, donne une reproduction meilleure des valeurs du débit solide (Figure V-32 (b) et V-34 (b)) comparé au modèle Flou_adimensionnel.

Ces résultats confirment les conclusions obtenues pour les périodes d'observations mensuelles, et affirment que lors de l'apprentissage au sein de la même station il n'est pas nécessaire d'effectuer des changements de variables, étant donné que cette transformation mathématique n'exclue pas la distorsion temporelle des événements par les effets saisonniers.

V.5.2 Apprentissage de deux stations du même bassin versant

Pour pouvoir valider le modèle neuroflou à apprentissage mensuel utilisant des variables adimensionnelles, sur deux stations, on doit choisir un bassin versant disposant d'un couple de données débit liquide débit, débit solide dans deux stations hydrométriques différentes.

Le bassin versant considéré est celui de Draa Elkifane. Nous avons choisie la station Beloua (021803) comme station de référence pour la taille relativement importante de son historique de données comparée à celle de la station (021909). Les épisodes choisis pour l'échelle mensuelle correspondent respectivement aux mois de Mars, Octobre et Décembre de l'année 1986. Pour l'échelle annuelle; nous avons choisi les années 1986 et 1987.

V.5.2.1 Période d'observation mensuelle au pas de temps journalier

Les épisodes (02_03_86, 02_10_86 et 02_12_86), choisis pour la période de validation, correspondent respectivement aux données du mois de Mars, Octobre et Décembre de l'année 1986 observées à la station à modéliser (021909). La période d'apprentissage est composée d'un cumul de données enregistrées au mois correspondants pendant les années d'apprentissage (1979-1984) au niveau de la station de référence(021803).

Les critères de validité des deux modèles pour les trois épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V.16, V.17, V.18) tant en période de calage qu'en période de validation.

Les droites de corrélation débit solide observé et le débit solide simulé par les deux modèles (Flou_Brute et Flou_Dimensionnel) sont illustrés dans les figures (V-35, V-37, V-39) correspondant respectivement aux épisodes mois de Mars, Octobre et Décembre de l'année 1986.

Les figures (V-36, V-38, V-40) illustrent la variation temporaire des débits solides observées et simulés par les deux modèles correspondant respectivement aux trois épisodes cités précédemment.

• Episode 02_03_86

Station à modéliser : 021909
 Station de référence : 021803
 Mois de validation : Mar.1986

Nombre de règles : 7
 années de calage : 1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ ADim	Floue_ Dim
Calage	Nash (%)	95.34	93.89	93.89
	Erreur (%)	1.04	1.14	1.14
Validation	Nash (%)	5.49	99.53	99.53
	Erreur (%)	111.36	9.25	9.25
	Coefficient de corrélation (%)	88.85	99.80	99.80

Tableau V .16: Critères de validation (Episode 02_03_86).

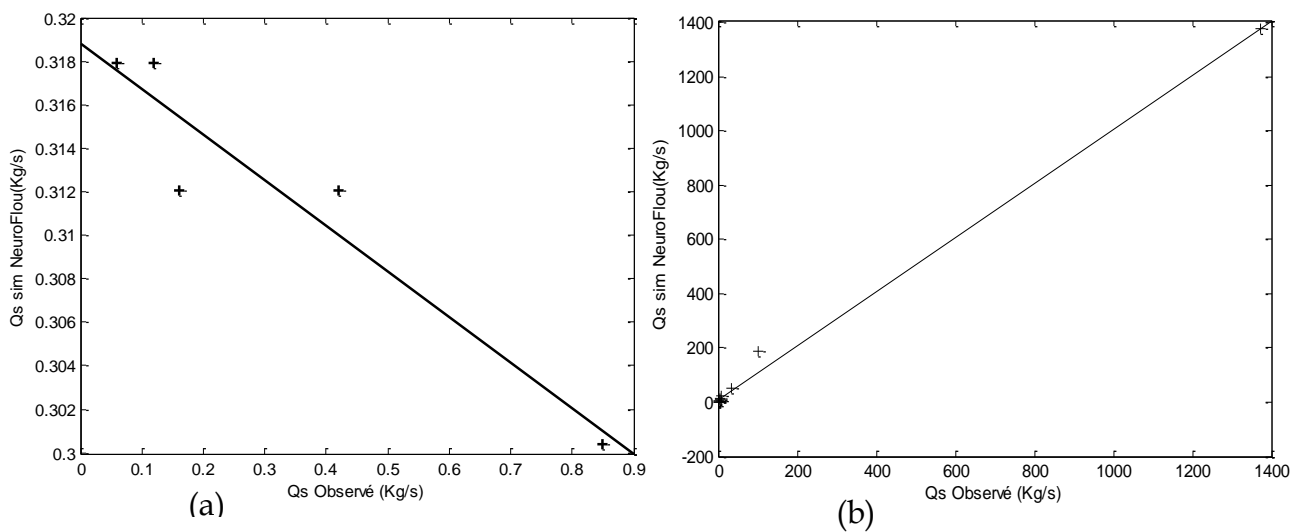


Figure V .35: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_03_86) (a) Flou_Brute (b) Flou_Dim

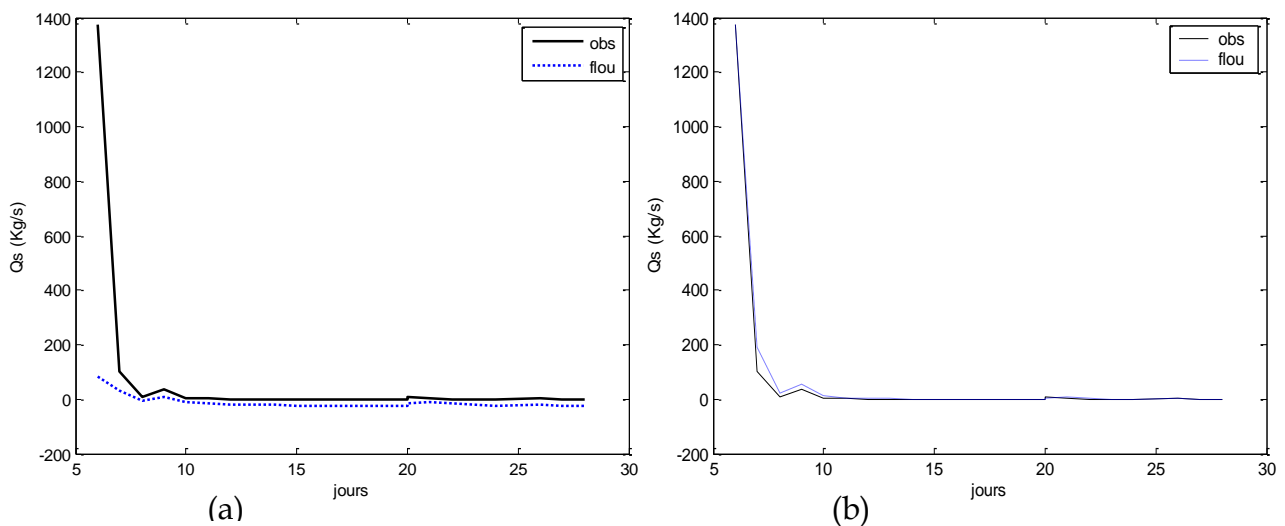


Figure V .36: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_03_86).

• Episode 02_10_86

Station à modéliser : 021909
 Station de référence : 021803
 Mois de validation : Oct.1986
 Qmax (m3/s) :

Durée de validation(jour) :
 Nombre de calage (jour) :
 années de calage :1979-1984
 Nombre de règles : 7

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADim	Floue_Dim
Calage	Nash (%)	99,82	99,78	97,84
	Erreur (%)	0,00	0,81	0,79
Validation	Nash (%)	4,35	89,90	89,97
	Erreur (%)	3,09	6,56	6,56
	Coefficient de corrélation (%)	95	95.3	95.38

Tableau V .17: Critères de validation (Episode 02_10_86)

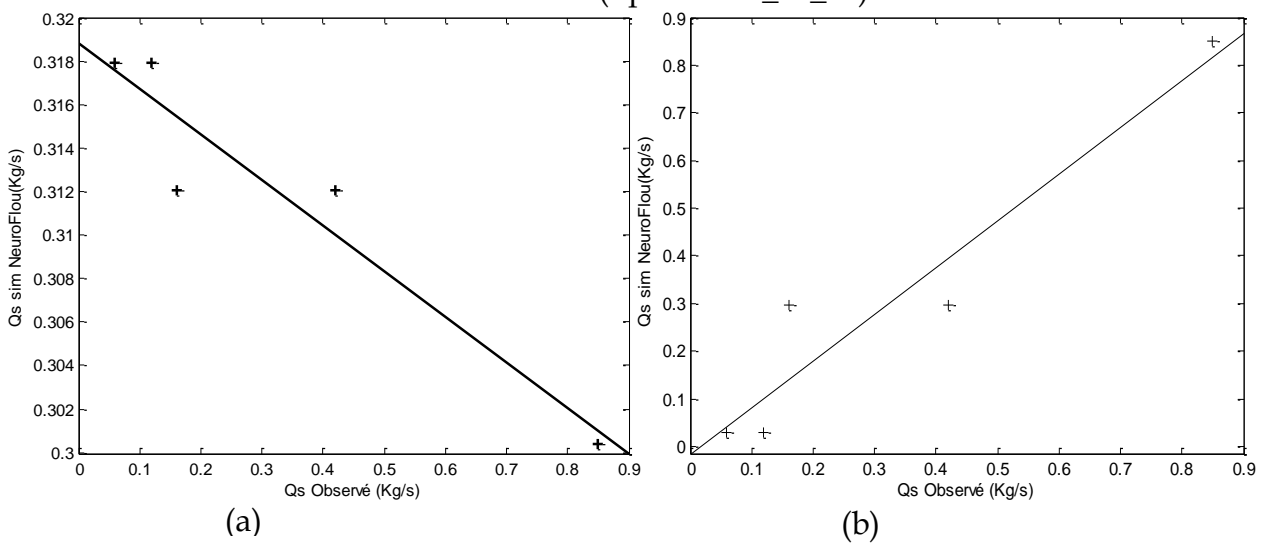


Figure V .37: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_10_86) (a) Flou_Brute (b) flou_ADim (c) Flou_Dim

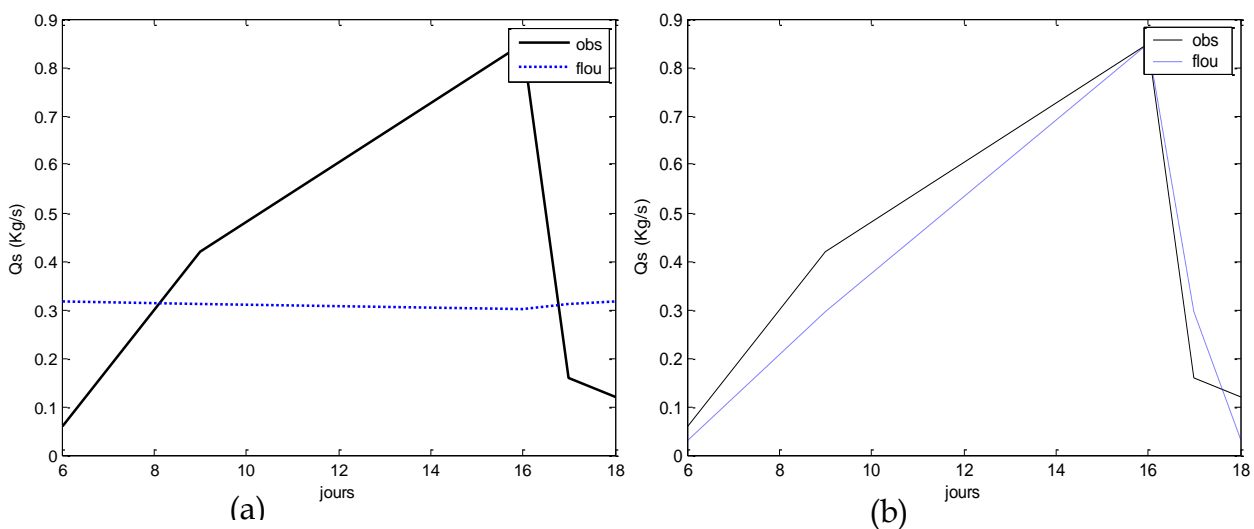


Figure V .38: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_10_86)

• Episode 02_12_86

Station à modéliser : 021909
 Station de référence : 021803
 Mois de validation: Déc.1986

Nombre de règles : 7
 années de calage : 1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ ADim	Floue_ Dim
Calage	Nash (%)	97,89	97,84	97,84
	Erreur (%)	0,05	0,79	0,79
Validation	Nash (%)	73,54	70,97	70,97
	Erreur (%)	9,73	22,88	22,88
	Coefficient de corrélation (%)	87,44	89,35	89,35

Tableau V .18: Critères de validation (Episode 02_12_86)

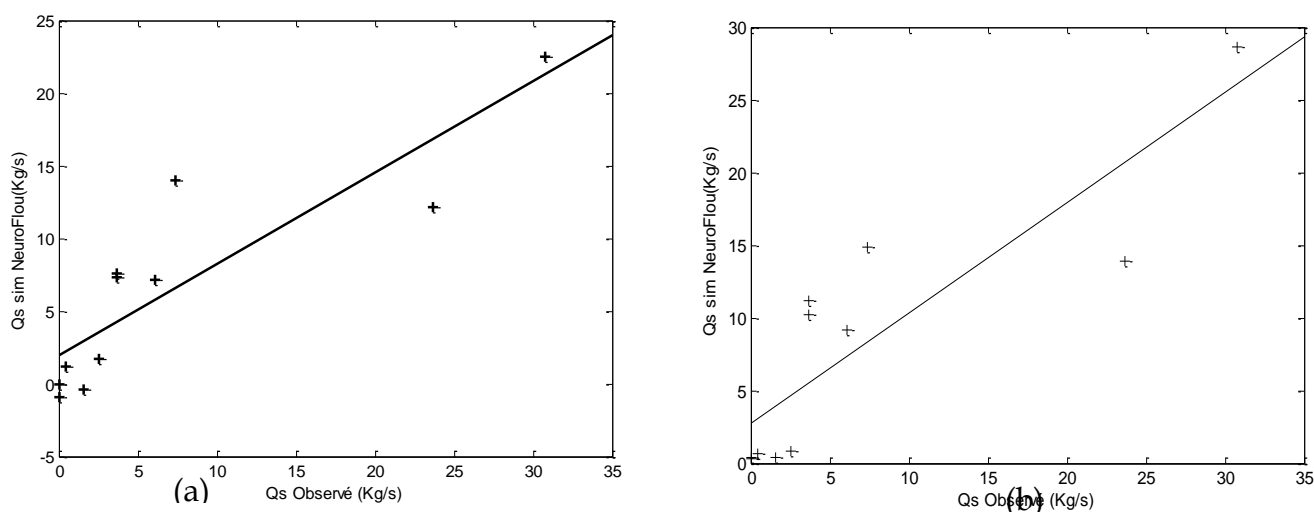


Figure V .39: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_12_86) (a) Flou_Brute (b) Flou_Dim

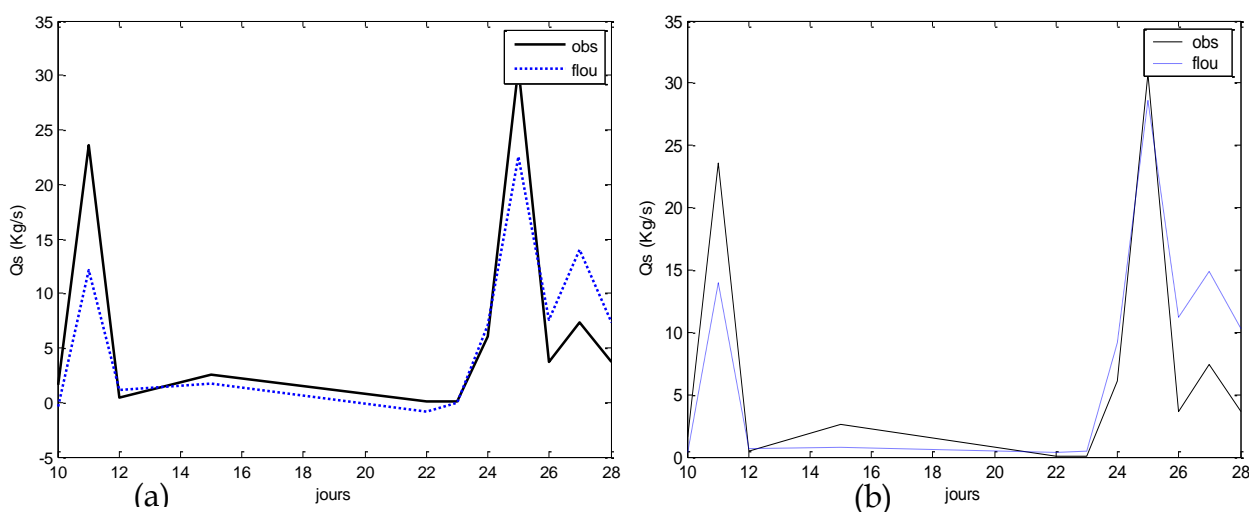


Figure V .40: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_12_86).

- *Résultats et interprétations*

Pour le modèle flou utilisant les variables adimensionnelles, les résultats obtenus sont meilleurs par rapport à ceux obtenus par le modèle flou utilisant les variables brutes. En effet, en période de validation, Les valeurs du critère de Nash, obtenues par le modèle flou_adimensionnel sont supérieures à 90%, l'erreur est inférieure à 9% et le coefficient de corrélation est supérieur à 96%. Tandis que pour le modèle flou utilisant des variables brutes, le coefficient de Nash est inférieur à 6%, l'erreur sur le bilan est supérieure à 3% et le coefficient de corrélation est supérieur à 88% (Tableaux V-16, V-17, V-18).

Notons aussi que le modèle Flou_adimensionnel, donne une reproduction meilleure des valeurs du débit solide comparé au modèle Flou_Brute (voir Figures V-36 (b), V-38 (b) et V-40 (b)).

Ces résultats confirment les conclusions obtenues pour les périodes d'observations mensuelles, et affirment que lors de l'apprentissage au sein de la même station il n'est pas nécessaire d'effectuer des changements de variables.

V.5.2.2 Période d'observation annuelle au pas de temps journalier

La simulation a été faite à partir des données observées pendant la période comprise entre 1979 et 1984 au niveau de la station de référence (021803). Nous avons choisi, deux épisodes (02_86 et 02_87), pour la période de validation des modèles développés à cette échelle, soit respectivement les données des années 1986 et 1987 observées à la station à modéliser (021909).

Les critères de validité des deux modèles pour les deux épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V-19 et V-20).

Les droites de corrélation entre le débit solide observé et le débit solide simulé par les modèles flous (Flou_Brute , Flou_Dimensionnel) sont illustrés dans les figures (V-41, V-43) correspondant respectivement aux années 1986 et 1987 des la station à simuler.

Les figures (V-42, V-44) illustrent la variation temporaire des débits solides observés et simulés par les deux modèles correspondant respectivement aux années 1986 et 1987 des la station à simuler.

• Episode 02_86

Station à modéliser : 021909
 Station de référence :021803
 Année de validation :1986

Nombre de règles :7
 années de calage :1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ ADim	Floue_ Dim
Validation	Nash (%)	8.1270	99.43	99.530
	Erreur (%)	106.23	9.10	9.441
	Coefficient de corrélation (%)	75.36	99.74	99.79

Tableau V .19: Critères de validation (Episode 02_86)

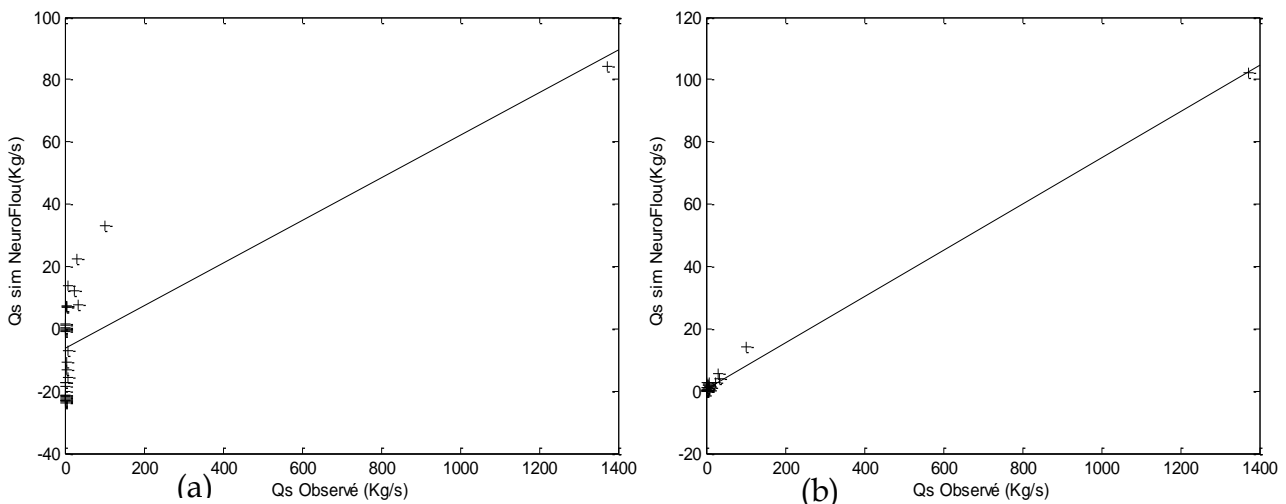


Figure V .41: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_86) (a) Flou_Brute(b) flou_ADim
 (c)Flou_Dim

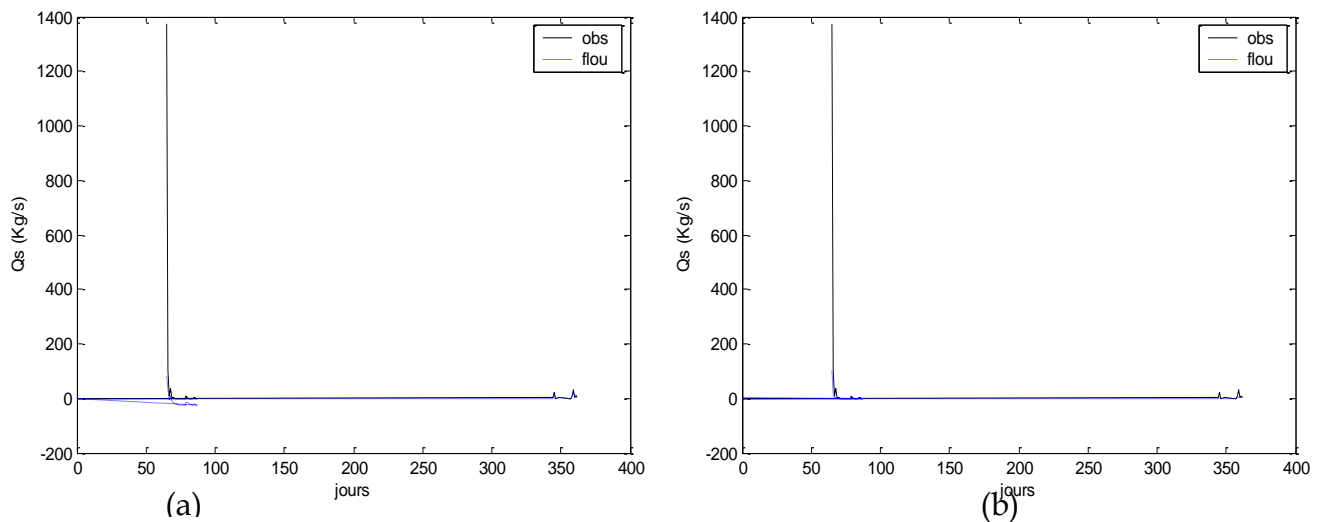


Figure V .42: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_86).

• Episode 02_87

Station à modéliser : 021909

Nombre de règles : 7

Station de référence : 021803

Année de validation : 1987

années de calage : 1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADim	Floue_Dim
Validation	Nash (%)	14.77	84.27	93.36
	Erreur (%)	90.01	4.78	3.12
	Coefficient de corrélation (%)	77.89	92.35	97.25

Tableau V .20: Critères de validation (Episode 02_87)

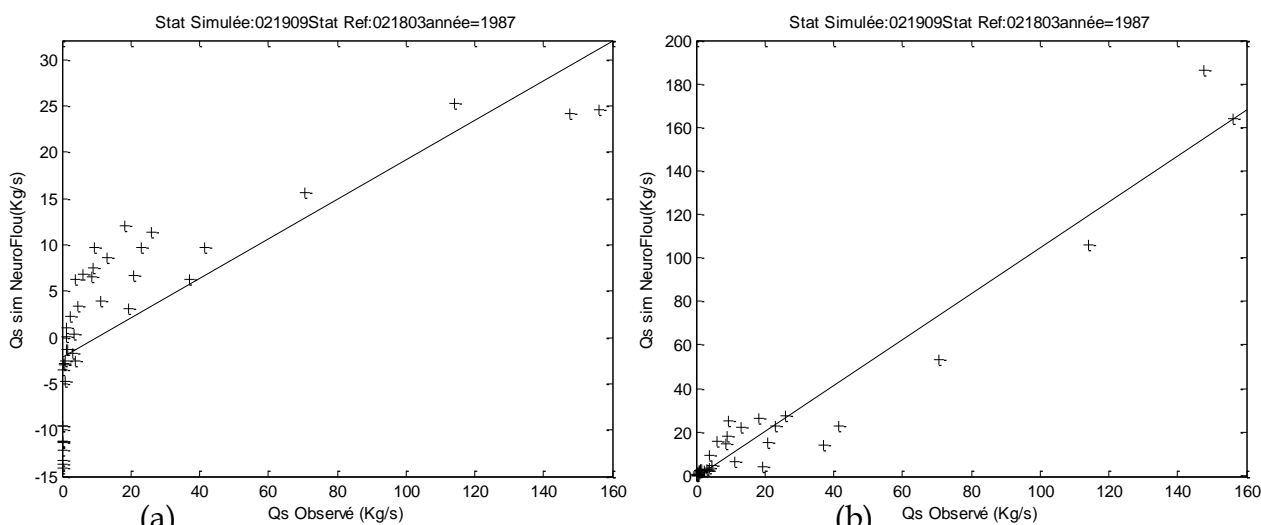


Figure V .43: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_87) (a) Flou_Brute (b) flou_ADim (c) Flou_Dim

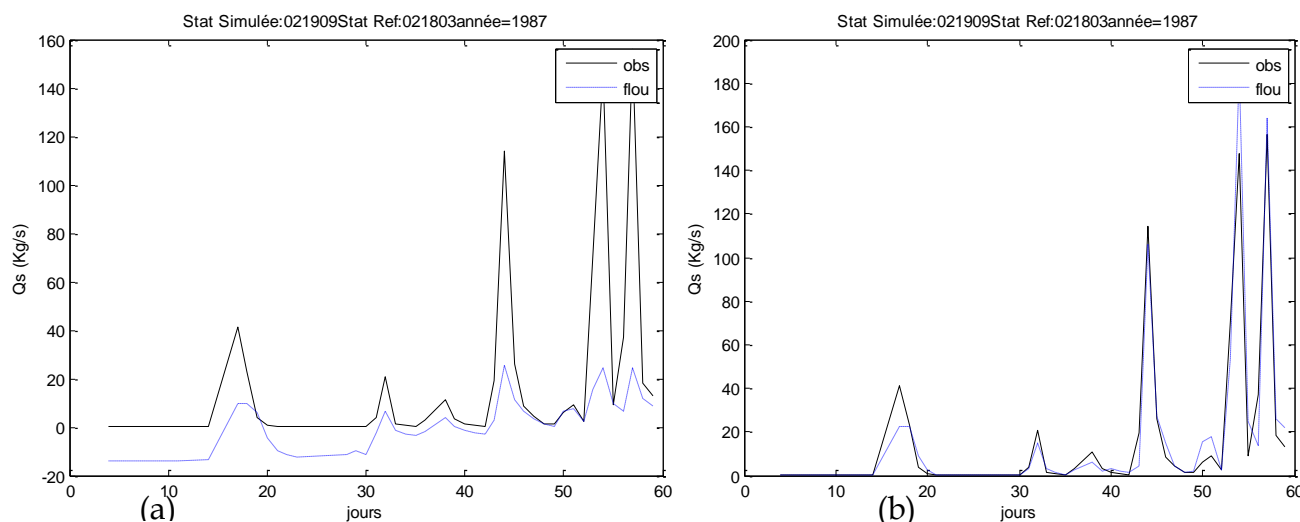


Figure V .44: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_87).

- **Résultats et interprétations**

Pour le modèle flou utilisant les variables adimensionnelles, les résultats obtenus sont meilleurs par rapport à ceux obtenus par le modèle flou utilisant les variables brutes. En effet, en période de validation, Les valeurs du critère de Nash, obtenues par le modèle flou_adimensionnel sont supérieures à 93%, l'erreur est inférieure à 9% et le coefficient de corrélation est supérieur à 97%. Tandis que pour le modèle flou utilisant des variables brutes, le coefficient de Nash est inférieur à 15%, l'erreur sur le bilan est supérieure à 90% et le coefficient de corrélation est supérieur à 75% (Tableaux V-19, V-20).

Notons aussi que le modèle Flou_adimensionnel, donne une reproduction meilleure des valeurs du débit solide comparé au modèle Flou_Brute (voir Figures V-42 (b), V-44 (b)).

On peut donc conclure que l'apprentissage de la loi de comportement du transport solide est possible, par apprentissage sur la base de la série de données des stations voisines appartenant au même bassin versant.

V.5.3 Apprentissage entre deux bassins versants proches

Pour la simulation des débit solide d'une station hydrométrique quelconque, à partir des données d'une station se trouvant dans un bassin versant proche, par apprentissage mensuel des paramètres flou utilisant le concept variable adimensionnelle, Nous avons choisie la station (021909) du bassin versant de Draa Elkifane comme station à simuler, la station d'apprentissage est celle de Lakhdaria (090501) situé au bassin versant de l'Isser. Notons que les conditions hydro climatiques, des deux bassins versant choisis, sont semblables.

Les épisodes choisis pour l'échelle mensuelle correspondent respectivement aux mois de Mars, Octobre et Décembre de l'année 1986. Pour l'échelle annuelle nous avons choisi les années 1986 et 1987.

V.5.3.1 Période d'observation mensuelle au pas de temps journalier

Les épisodes (09_02_03_86, 09_02_10_86 et 09_02_12_86), choisis pour la période de validation, correspondent respectivement aux données du mois de Mars, Octobre et Décembre de l'année 1986 observées à la station à modéliser (021909) du bassin versant de Draa ElKiffan. La période d'apprentissage est composée d'un cumul de données enregistrées au mois correspondants pendant les années d'apprentissage (1974-1984) au niveau de la station de référence(090501) du bassin versant de l'Issir.

Les critères de validité des deux modèles pour les trois épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V- 21, V- 22, V- 23) tant en période de calage qu'en période de validation.

Les droites de corrélation débit solide observé et le débit solide simulé par les deux modèles (Flou_Brute et Flou_Dimensionnel) sont illustrés dans les figures (V-45, V-47, V-49) correspondant respectivement aux épisodes cités précédemment.

Les figures (V-46, V-48, V-50) illustrent la variation temporaire des débits solides observées et simulés par les deux modèles correspondant respectivement aux trois épisodes cités précédemment.

• Episode 09_02_03_86

Station à modéliser : 021909

Nombre de règles : 7

Station de référence : 090501

Mois de validation : Mar.1986

années de calage : 1974-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADim	Floue_Dim
Calage	Nash (%)	84.19	83.00	83.00
	Erreur (%)	1.32	0.81	0.81
Validation	Nash (%)	18.79	99.49	99.49
	Erreur (%)	76.15	9.23	9.23
	Coefficient de corrélation (%)	83.82	99.78	99.78

Tableau V .21: Critères de validation (Episode 02_09_03_86).

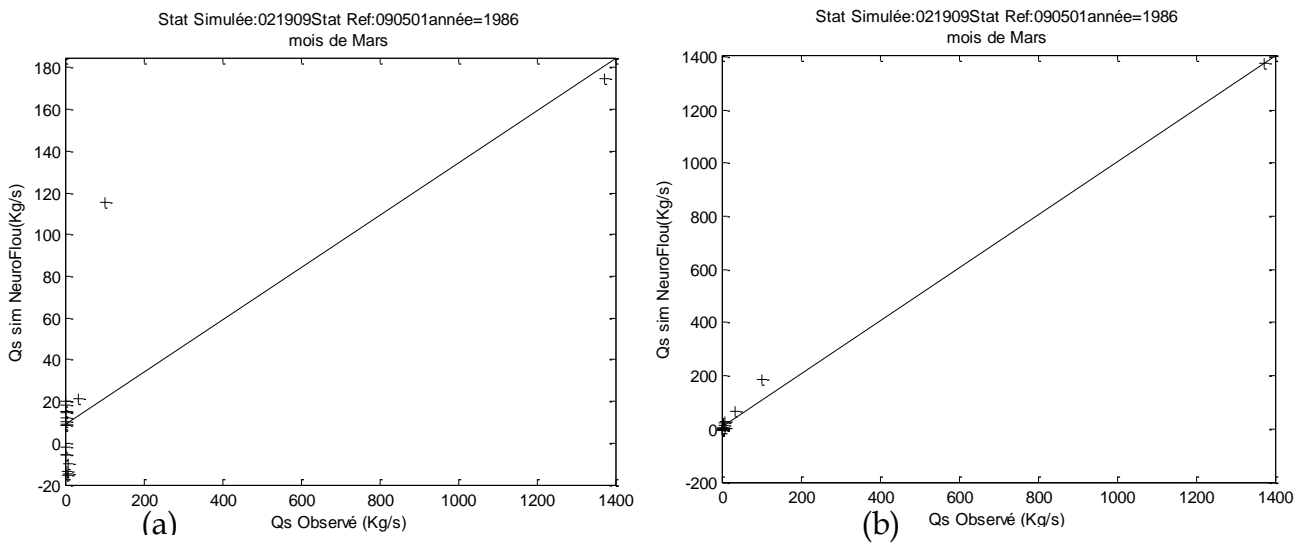


Figure V .45: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_03_86) (a) Flou_Brute(b) Flou_Dim

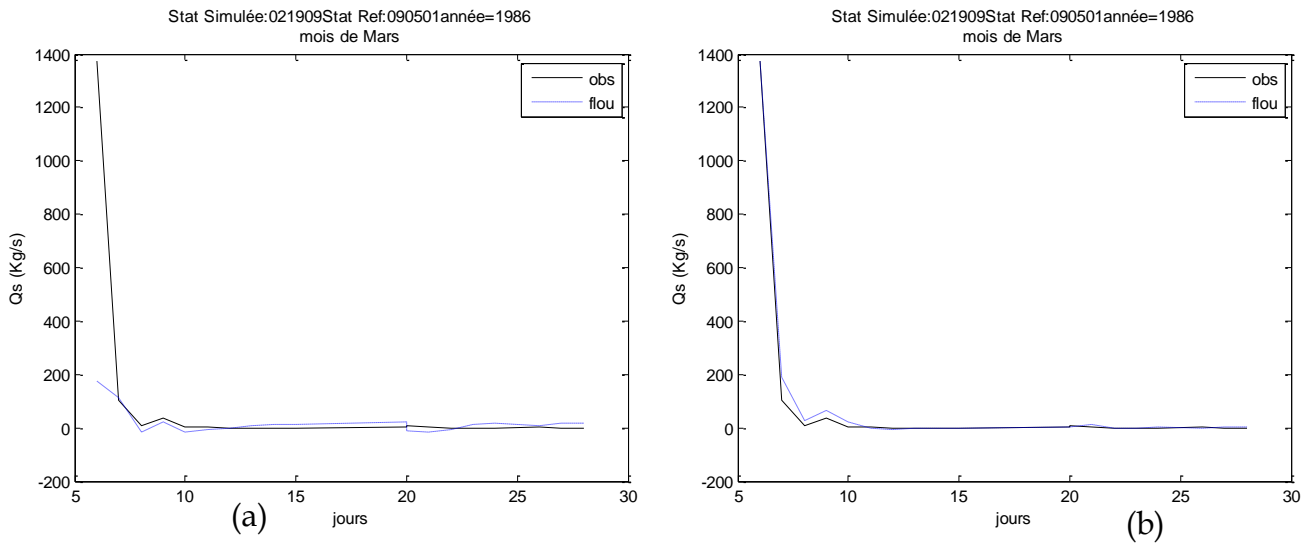


Figure V .46: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_03_86).

• Episode 09_02_10_86

Station à modéliser : 021909
 Station de référence : 090501
 Mois de validation : Oct.1986
 Qmax (m3/s) :

Durée de validation (jour) :
 Nombre de calage (jour) :
 années de calage :1974-1984
 Nombre de règles :7

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADim	Floue_Dim
Calage	Nash (%)	69.23	63.07	63.07
	Erreur	0.13	0.23	0.23
Validation	Nash (%)	-4753738.29	20.39	20.39
	Erreur	19719.06	30.74	30.74
	Coefficient de corrélation (%)	95.28	65.54	65.54

Tableau V .22: Critères de validation (Episode 02_09_10_86)

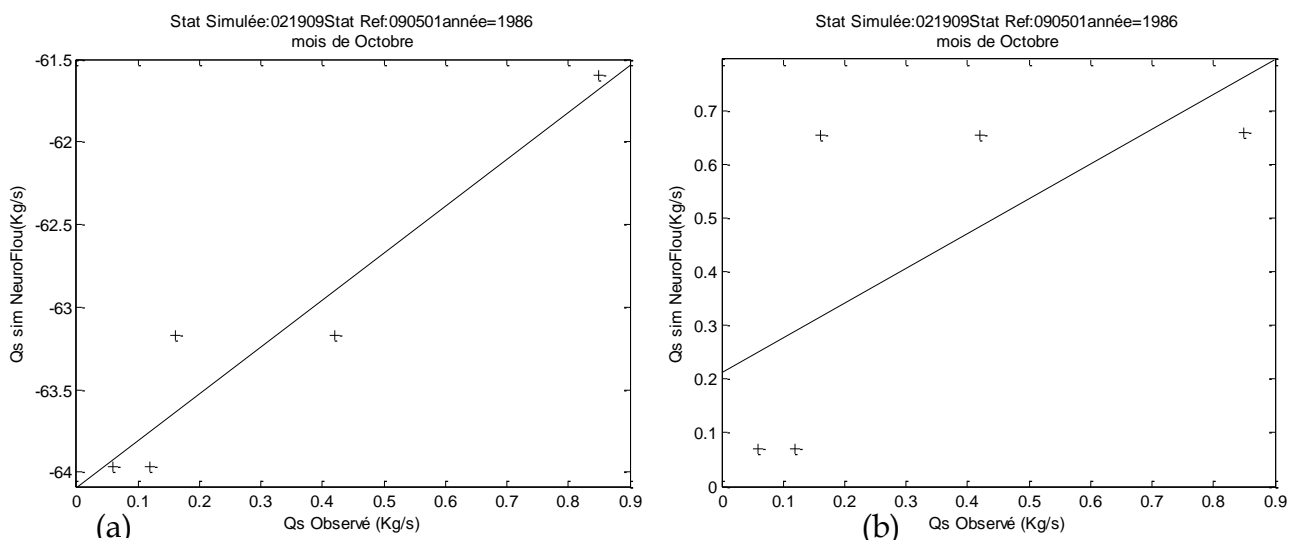


Figure V .47: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_10_86) (a) Flou_Brute (b) Flou_Dim

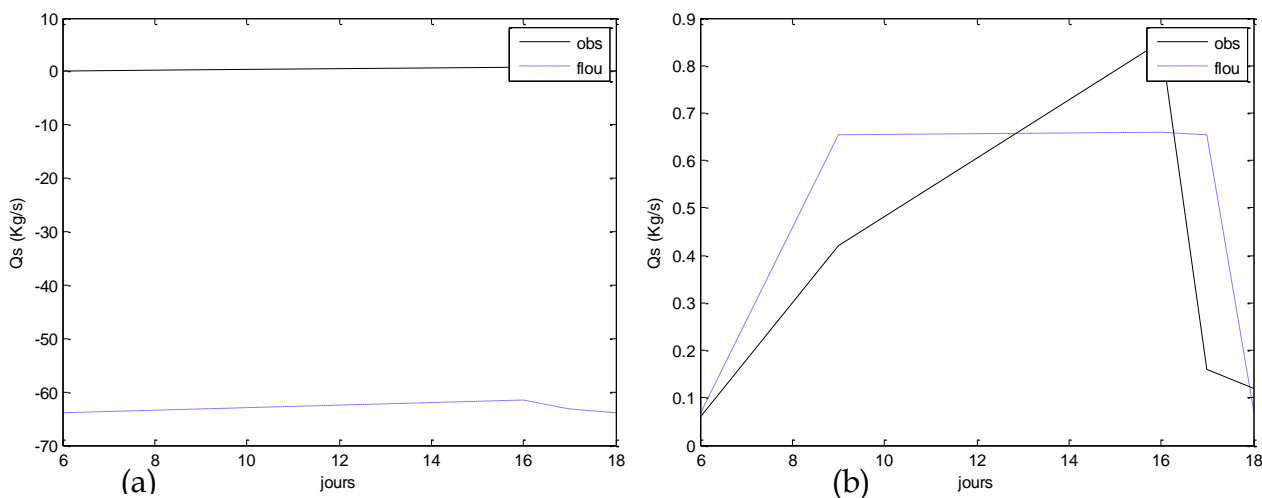


Figure V .48: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_10_86)

• Episode 09_02_12_86

Station à modéliser : 021909
 Station de référence : 090501
 Mois de validation: Déc.1986

Nombre de règles : 7
 années de calage :1974-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ ADim	Floue_ Dim
Calage	Nash (%)	74.41	73.85	73.85
	Erreur (%)	0.14	0.32	0.32
Validation	Nash (%)	-535.01	42.48	42.48
	Erreur (%)	184.48	23.80	23.80
	Coefficient de corrélation (%)	87.44	84.79	84.79

Tableau V .23: Critères de validation (Episode 02_09_12_86)

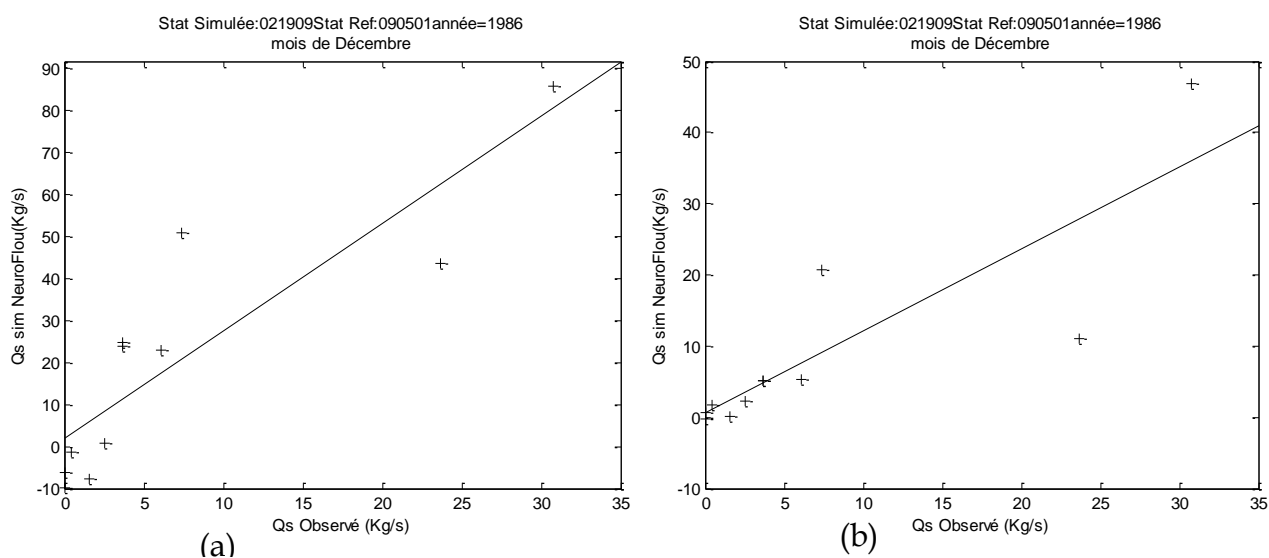


Figure V .49: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_12_86) (a) Flou_Brute(b) Flou_Dim

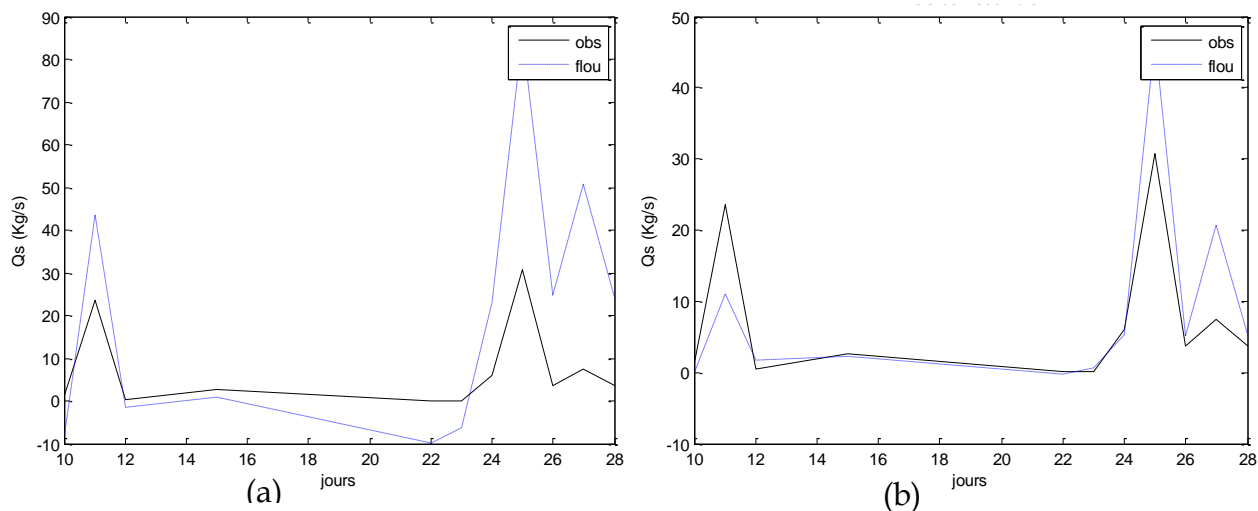


Figure V .50: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_12_86).

- *Résultats et interprétations*

Pour le modèle flou utilisant les variables adimensionnelles, les résultats obtenus sont meilleurs par rapport à ceux obtenus par le modèle flou utilisant les variables brutes. En effet, en période de validation, Les valeurs du critère de Nash, obtenues par le modèle flou_adimensionnel sont supérieures à 20%, l'erreur est inférieure à 30% et le coefficient de corrélation est supérieur à 65%. Tandis que pour le modèle flou utilisant des variables brutes, les critères de Nash et de l'erreur donnent des valeurs erronées, Le coefficient de corrélation est supérieur à 83% (Tableaux V-21, V-22, V-23).

Notons aussi que le modèle Flou_adimensionnel, donne une reproduction meilleure des valeurs du débit solide comparé au modèle Flou_Brute (voir Figures V-48 (b), V-50 (b), V-52 (b)).

On remarque aussi que, malgré les valeurs aberrantes de l'Erreur et de Nash, le coefficient de corrélation obtenu par le modèle flou brute est meilleur par rapport au celui obtenu par le modèle flou adimensionnel, il est donc, nécessaire d'associer les trois critères à la fois pour pouvoir valider un modèle de simulation.

V.5.3.2 Période d'observation annuelle au pas de temps journalier

La simulation a été faite à partir des données observées pendant la période comprise entre 1974 et 1984 au niveau de la station de référence (090501) du bassin versant de l'Isser. Nous avons choisi, deux épisodes (09_02_86 et 09_02_87), pour la période de validation des modèles développés à cette échelle, soit respectivement les données des années 1986 et 1987 observées à la station à modéliser (021909) du bassin versant de Draa ElKiffan.

Les critères de validité des deux modèles pour les deux épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V-23 et V-24).

Les droites de corrélation entre le débit solide observé et le débit solide simulé par les modèles flous (Flou_Brute , Flou_Dimensionnel) sont illustrés dans les figures (V-51, V-53) correspondant respectivement aux années 1986 et 1987 de la station à simuler.

Les figures (V-52, V-54) illustrent la variation temporaire des débits solides observés et simulés par les deux modèles correspondant respectivement aux années 1986 et 1987 de la station à simuler.

• Episode 09_02_86

Station à modéliser : 021909
 Station de référence : 090501
 Année de validation : 1986

Nombre de règles : 7
 années de calage : 1974-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ ADim	Floue_ Dim
Validation	Nash (%)	19.60	99.24	99.48
	Erreur (%)	82.82	11.77	9.97
	Coefficient de corrélation (%)	64.46	99.66	99.76

Tableau V .24: Critères de validation (Episode 02_09_86)

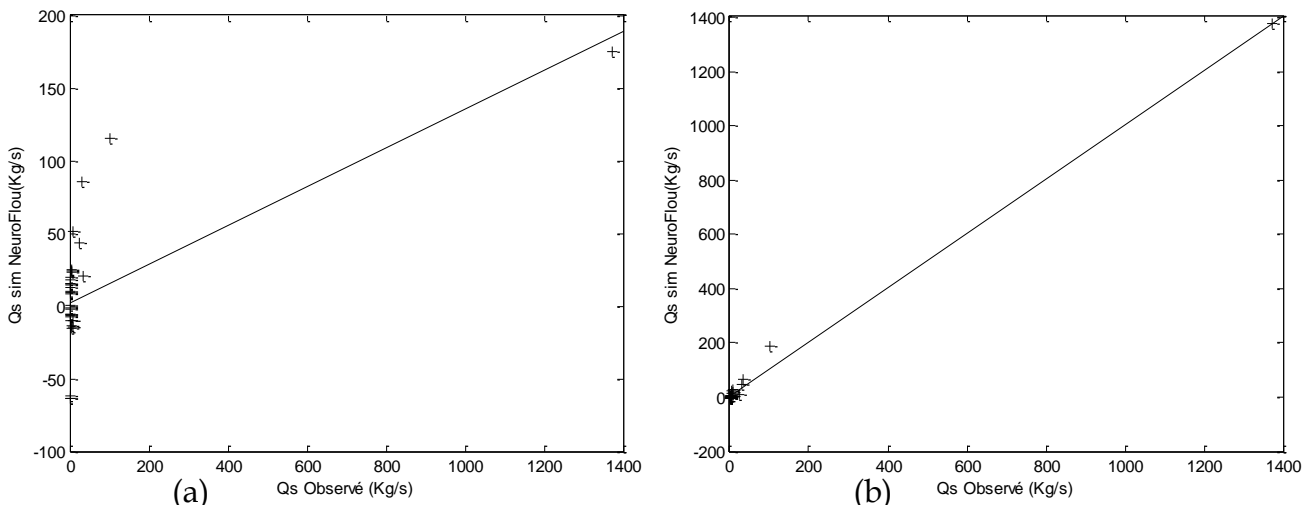


Figure V .51: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_86) (a) Flou_Brute (b) flou_ADim (c) Flou_Dim

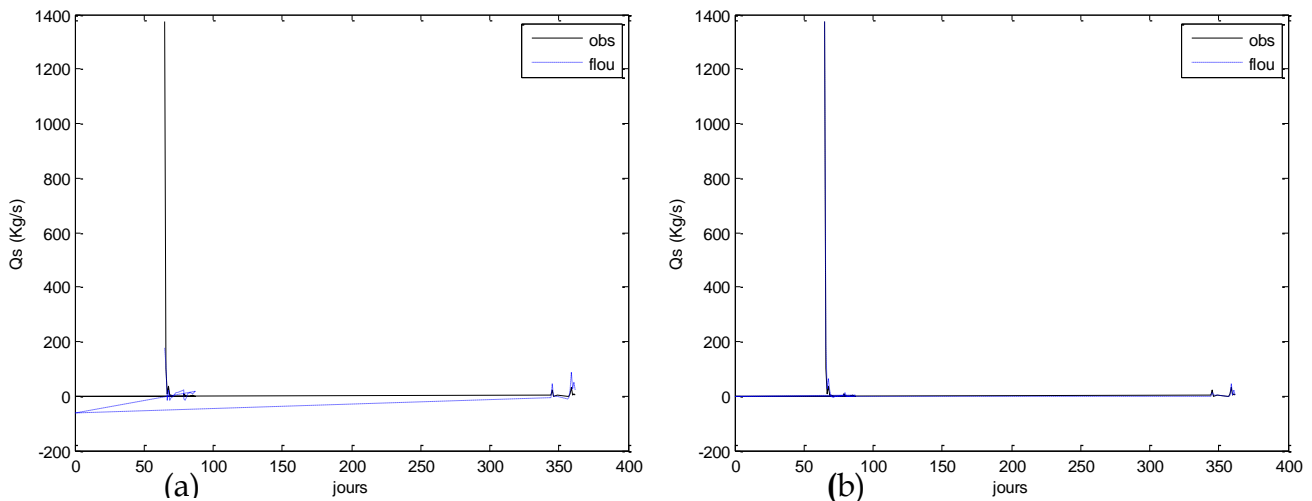


Figure V .52: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_86).

• Episode 09_02_87

Station à modéliser : 021909
 Station de référence : 090501
 Année de validation : 1987
 Qmax (m3/s) :

Durée de validation(jour) :
 Nombre de calage (jour) :
 années de calage :1974-1984
 Nombre de règles :7

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ ADim	Floue_ Dim
Validation	Nash (%)	34.23	80.01	82.18
	Erreur (%)	72.57	30.37	31.96
	Coefficient de corrélation (%)	91.41	95.83	96.97

Tableau V .25: Critères de validation (Episode02_09_87)

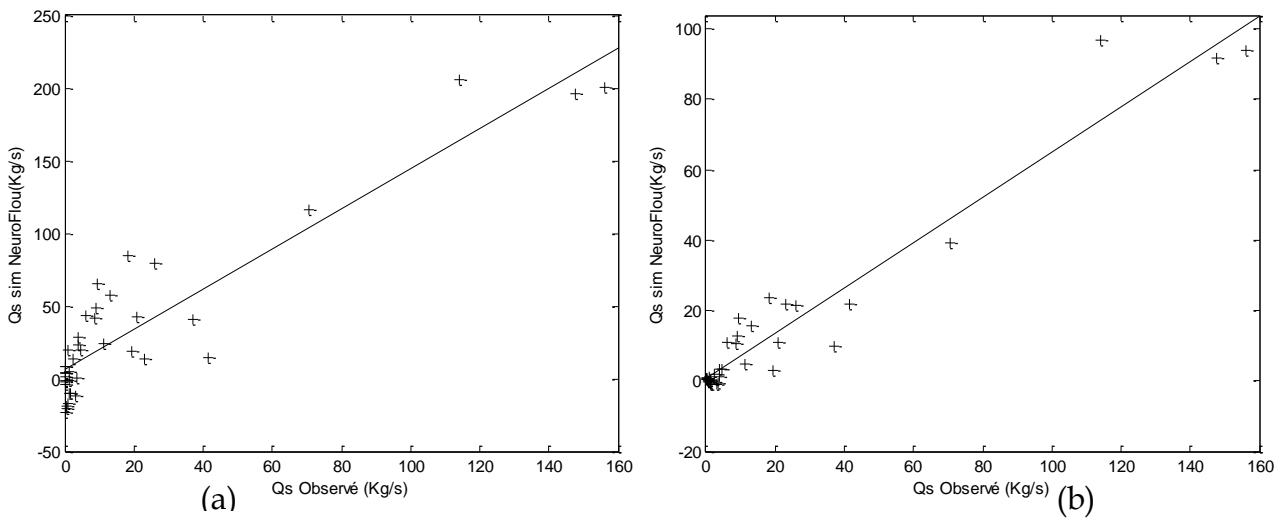


Figure V .53: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_09_87) (a) Flou_Brute(b) flou_Adim (c)Flou_Dim

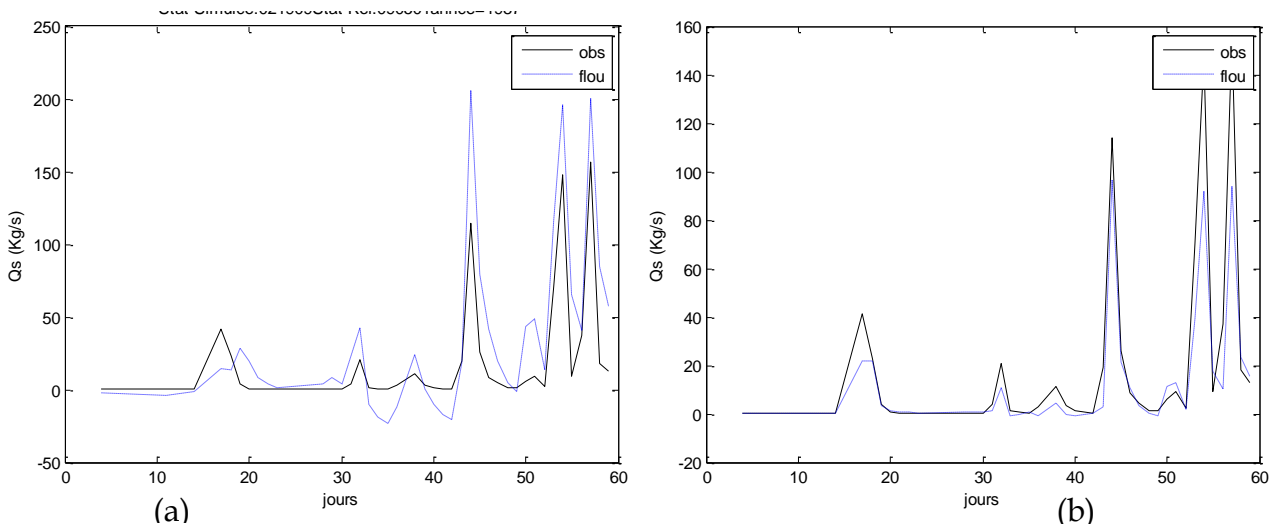


Figure V .54: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_09_87).

- *Résultats et interprétations*

Pour le modèle flou utilisant les variables adimensionnelles, les résultats obtenus sont meilleurs par rapport à ceux obtenus par le modèle flou utilisant les variables brutes. En effet, en période de validation, Les valeurs du critère de Nash, obtenues par le modèle flou_adimensionnel sont supérieurs à 82%, l'erreur est inférieure à 31% et le coefficient de corrélation est supérieur à 97%. Tandis que pour le modèle flou utilisant des variables brutes, le coefficient de Nash est inférieur à 34%, l'erreur sur le bilan est supérieure à 72% et le coefficient de corrélation est supérieur à 64% (Tableaux V-24, V-25).

Notons aussi que le modèle Flou_adimensionnel, donne une reproduction meilleure des valeurs du débit solide comparé au modèle Flou_Brute (voir Figures V-52 (b), V-54 (b)).

On peut conclure qu'en admettant une erreur maximale de l'ordre de 30%, l'apprentissage de la loi de comportement du transport solide est possible, par apprentissage sur la base de la série de données des stations voisines appartenant à des bassins versants proches.

V.5.4 Apprentissage entre deux bassins versants éloignés

Pour la simulation des débits solides d'une station hydrométrique quelconque, à partir des données d'une station se trouvant dans un bassin versant éloigné, par apprentissage mensuel des paramètres flou utilisant le concept variable adimensionnelle, Nous avons choisie la station (050901) du bassin versant d'El Hodna comme station à simuler, la station d'apprentissage est celle de Lakhdaria (021803) situé au bassin versant de Draa Elkifane. Notons que les conditions hydro climatiques, des deux bassins versant choisies, sont différentes.

Les épisodes choisis pour l'échelle mensuelle correspondent respectivement aux mois de Mars, Octobre et Décembre de l'année 1986. Pour l'échelle annuelle nous avons choisi les années 1986 et 1987.

V.5.4.1 Période d'observation mensuelle au pas de temps journalier

Les épisodes (02_05_03_86, 02_05_10_86 et 02_05_12_86), choisis pour la période de validation, correspondent respectivement aux données du mois de Mars, Octobre et Décembre de l'année 1986 observées à la station à modéliser (050901) du bassin versant d'El Hodna. La période d'apprentissage est composée d'un cumul de données enregistrées au mois correspondants pendant les années d'apprentissage (1974-1984) au niveau de la station de référence (021803) du bassin versant de Draa ElKiffan.

Les critères de validité des deux modèles pour les trois épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V-26 , V- 27, V- 28) tant en période de calage qu'en période de validation.

Les droites de corrélation débit solide observé et le débit solide simulé par les deux modèles (Flou_Brute et Flou_Dimensionnel) sont illustrés dans les figures (V-55, V-57, V-59) correspondant respectivement aux épisodes cités précédemment.

Les figures (V-56, V-58, V-60) illustrent la variation temporaire des débits solides observées et simulés par les deux modèles correspondant respectivement aux trois épisodes cités précédemment.

• Episode 02_05_03_86

Station à modéliser : 050901
 Station de référence : 021803
 Mois de validation : Mar.1986
 Qmax (m3/s) :

Durée de validation(jour) :
 Nombre de calage (jour) :
 années de calage :1979-1984
 Nombre de règles :7

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADIm	Floue_Dim
Calage	Nash (%)	95.269	93.961	97.782
	Erreur (%)	2.8995	0.53173	0.6251
Validation	Nash (%)	7.7626	96.701	93.202
	Erreur (%)	99.893	15.704	15.704
	Coefficient de corrélation (%)	93.524	99.358	99.35

Tableau V .26: Critères de validation (Episode 02_05_03_86).

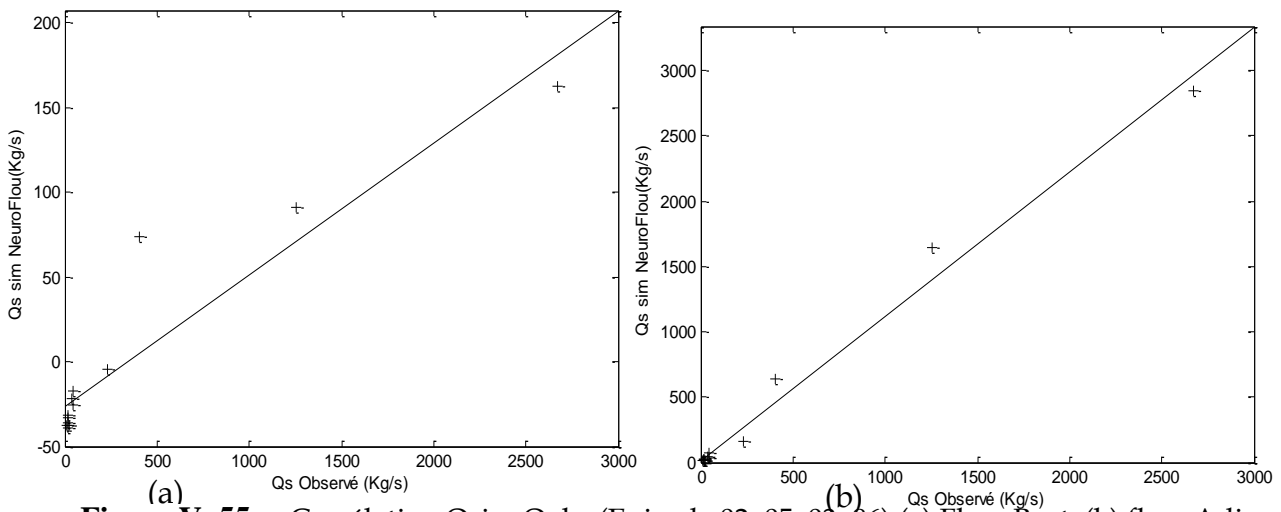


Figure V .55: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_05_03_86) (a) Flou_Brute(b) flou_ADIm (c)Flou_Dim

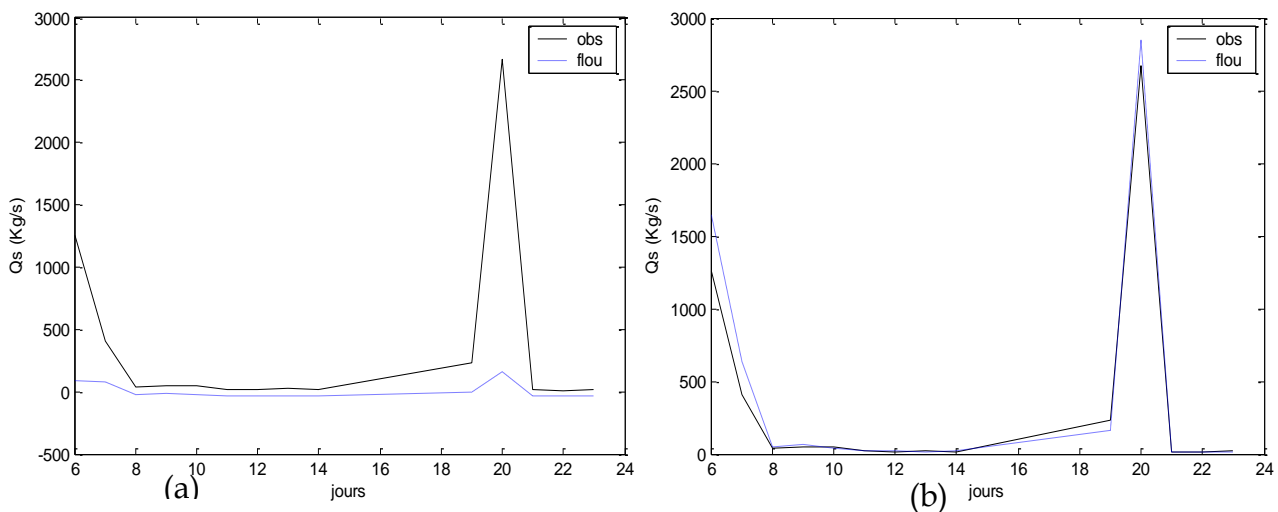


Figure V .56: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_05_03_86).

• Episode 02_05_10_86

Station à modéliser :050901

Station de référence :021803

Mois de validation : Oct.1986

Nombre de règles :7

années de calage :1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADim	Floue_Dim
Calage	Nash (%)	99.78	99.62	99.62
	Erreur (%)	3.23	0.15	0.15
Validation	Nash (%)	48.93	99.53	99.53
	Erreur (%)	55.72	1.24	1.24
	Coefficient de corrélation (%)	85.75	99.78	99.78

Tableau V .27: Critères de validation (Episode 02_05_10_86)

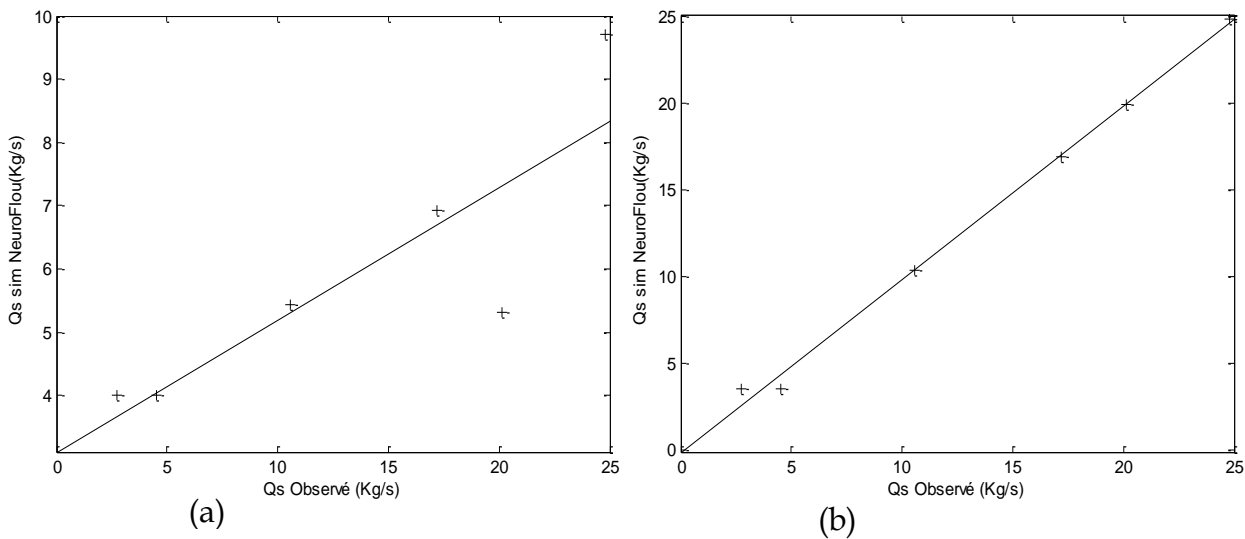


Figure V .57: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_05_10_86) (a) Flou_Brute (b) flou_Adim (c) Flou_Dim

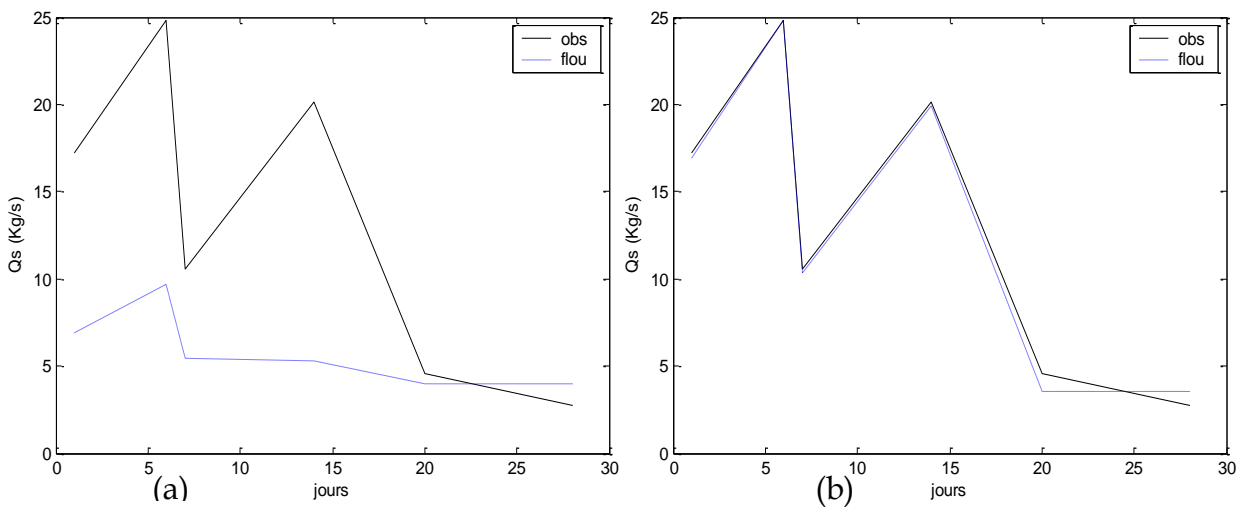


Figure V .58: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_05_10_86)

• Episode 02_05_12_86

Station à modéliser :050901

Station de référence :021803

Mois de validation: Déc.1986

Nombre de règles :7

années de calage :1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADIM	Floue_Dim
Calage	Nash (%)	97.89	97.79	97.79
	Erreur (%)	0.29	0.68	0.68
Validation	Nash (%)	7.68	89.35	89.35
	Erreur (%)	69.93	13.64	13.64
	Coefficient de corrélation (%)	96.09	97.19	97.19

Tableau V .28: Critères de validation (Episode 02_05_12_86)

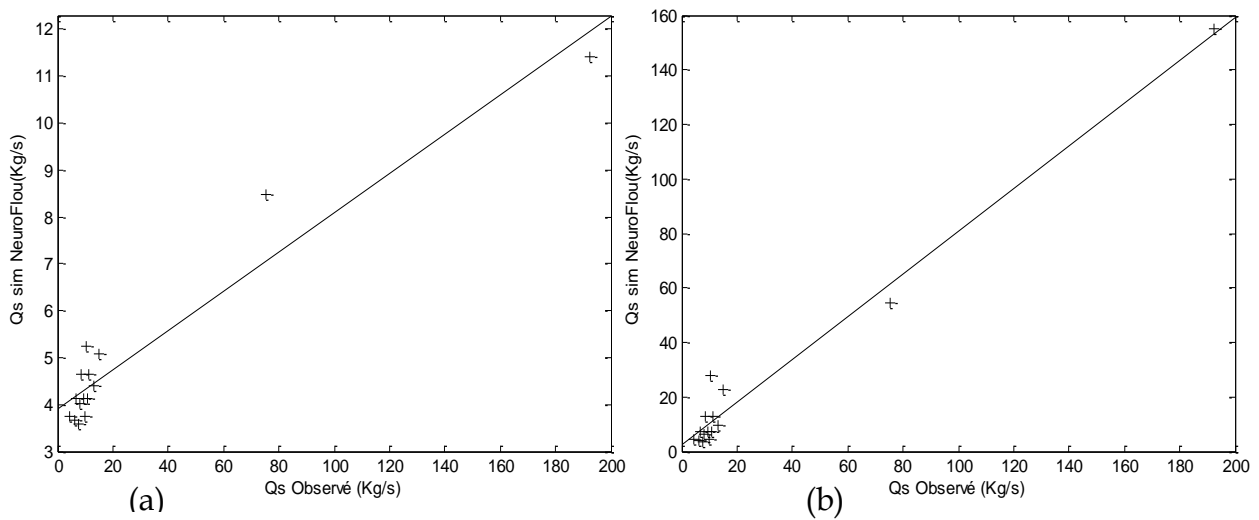


Figure V .59: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_05_12_86) (a) Flou_Brute (b) flou_ADIM (c) Flou_Dim

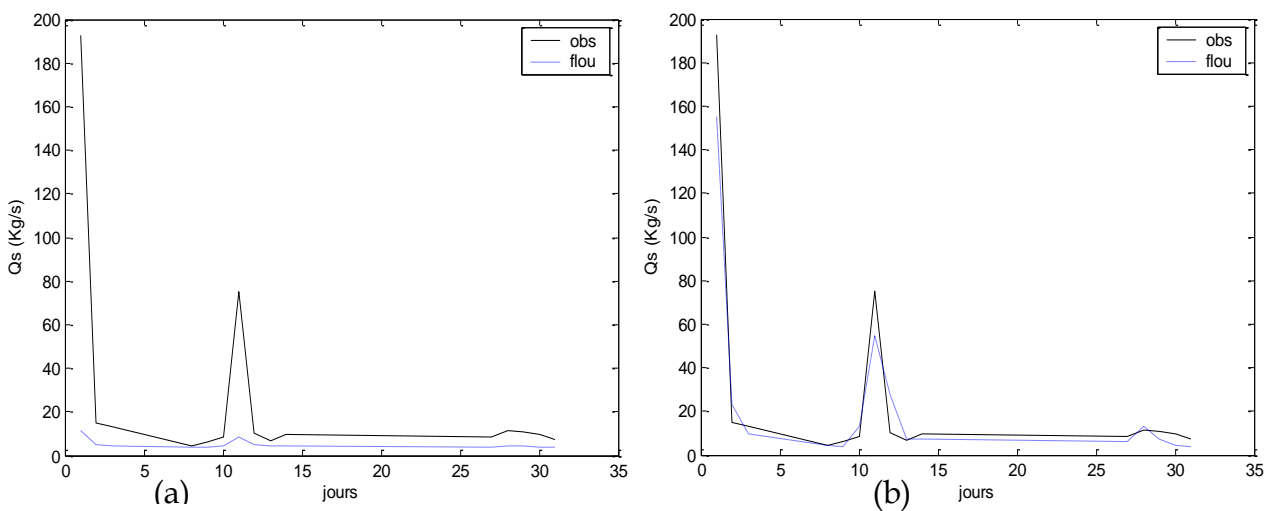


Figure V .60: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_05_12_86).

- **Résultats et interprétations**

Pour le modèle flou utilisant les variables adimensionnelles, les résultats obtenus sont meilleurs par rapport à ceux obtenus par le modèle flou utilisant les variables brutes. En effet, en période de validation, Les valeurs du critère de Nash, obtenues par le modèle flou_adimensionnel sont supérieurs à 90%, l'erreur est inférieure à 15% et le coefficient de corrélation est supérieur à 97%. Tandis que pour le modèle flou utilisant des variables brutes, le critère de Nash est inférieur à 48%, l'erreur est supérieure à 55%, Le coefficient de corrélation est supérieur à 85% (Tableaux V-26, V-27, V-28).

Notons aussi que le modèle Flou_adimensionnel, donne une reproduction meilleure des valeurs du débit solide comparé au modèle Flou_Brute (voir Figures V-56 (b), V-58 (b), V-60 (b)).

V.5.4.2 Période d'observation annuelle au pas de temps journalier

La simulation a été faite à partir des données observées pendant la période comprise entre 1979 et 1984 au niveau de la station de référence (021803) du bassin versant de Draa ElKiffan. Nous avons choisi, deux épisodes (02_05_86 et 02_05_87), pour la période de validation des modèles développés à cette échelle, soit respectivement les données des années 1986 et 1987 observées à la station à modéliser (050901) du bassin versant d'El Hodna.

Les critères de validité des deux modèles pour les deux épisodes sont présentés respectivement dans les tableaux (V-29 et V-30).

Les droites de corrélation entre le débit solide observé et le débit solide simulé par les modèles flous (Flou_Brute , Flou_Dimensionnel) sont illustrés dans les figures (V-61, V-63) correspondant respectivement aux années 1986 et 1987 de la station à simuler.

Les figures (V-62, V-64) illustrent la variation temporaire des débits solides observés et simulés par les deux modèles correspondant respectivement aux années 1986 et 1987 de la station à simuler.

• Episode 02_05_86

Station à modéliser :050901
 Station de référence :021803
 Année de validation :1986

Nombre de règles :7
 années de calage :1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ADim	Floue_Dim
Validation	Nash (%)	-11.349	93.202	93.202
	Erreur (%)	97.81	3.43	3.43
	Coefficient de corrélation (%)	86,146	98,15	98,15

Tableau V .29: Critères de validation (Episode 02_05_86)

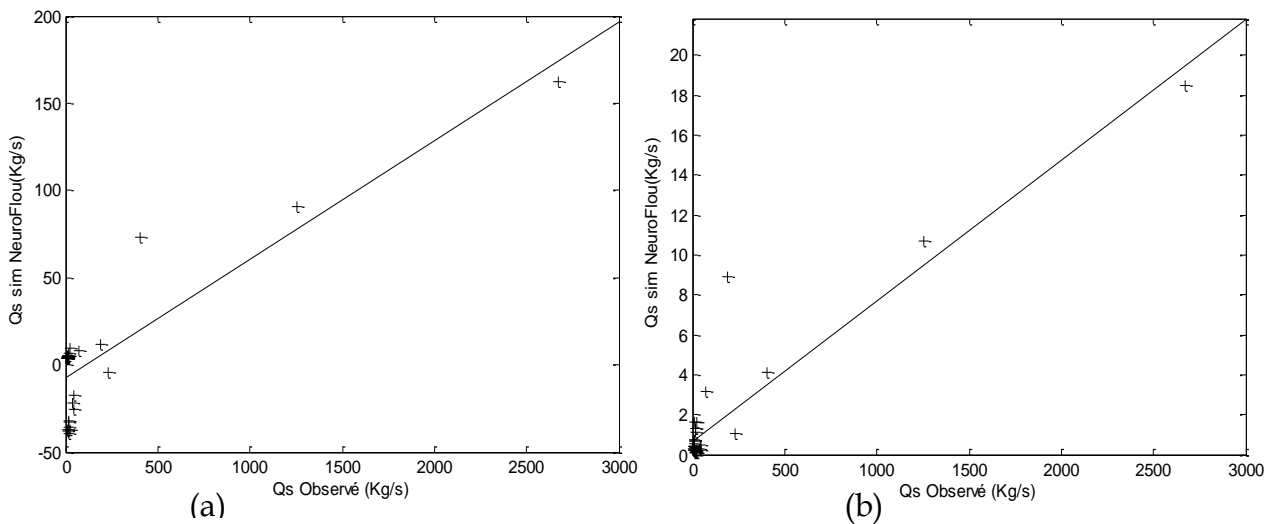


Figure V .61: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_05_86) (a) Flou_Brute(b) flou_ADim (c)Flou_Dim

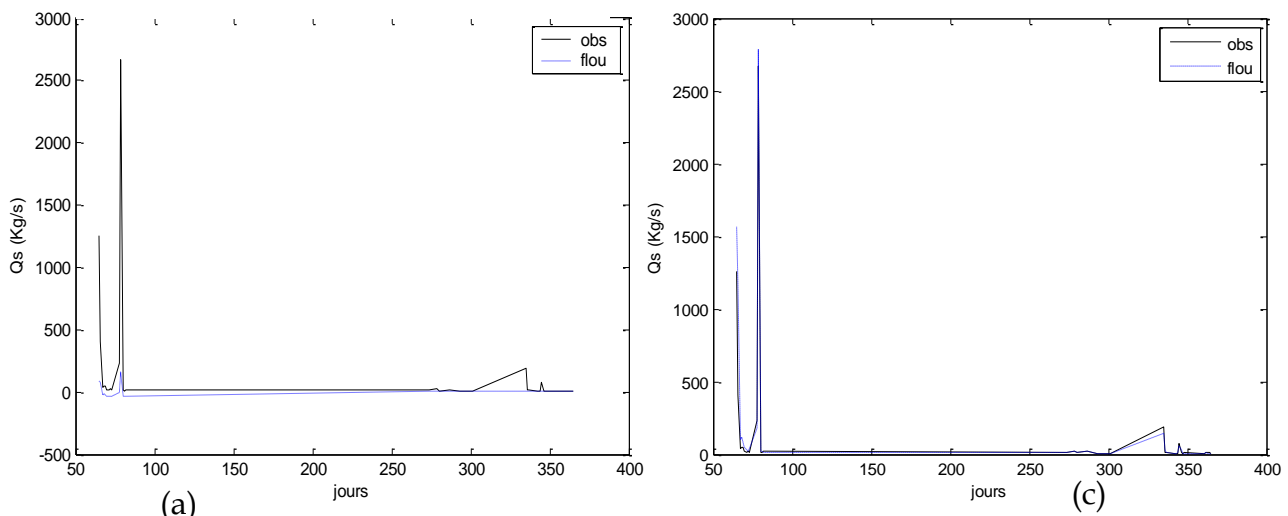


Figure V .62: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_05_86).

• Episode 02_05_87

Station à modéliser :050901
 Station de référence :021803
 Année de validation :1987

Nombre de règles :7
 années de calage :1979-1984

	Méthode de Simulation	Flou_Brute	Floue_ ADim	Floue_ Dim
Validation	Nash (%)	8.06	95.49	98.60
	Erreur (%)	96.57	15.04	10.18
	Coefficient de corrélation (%)	99.39	98.89	99.92

Tableau V .30: Critères de validation (Episode 02_05_87)

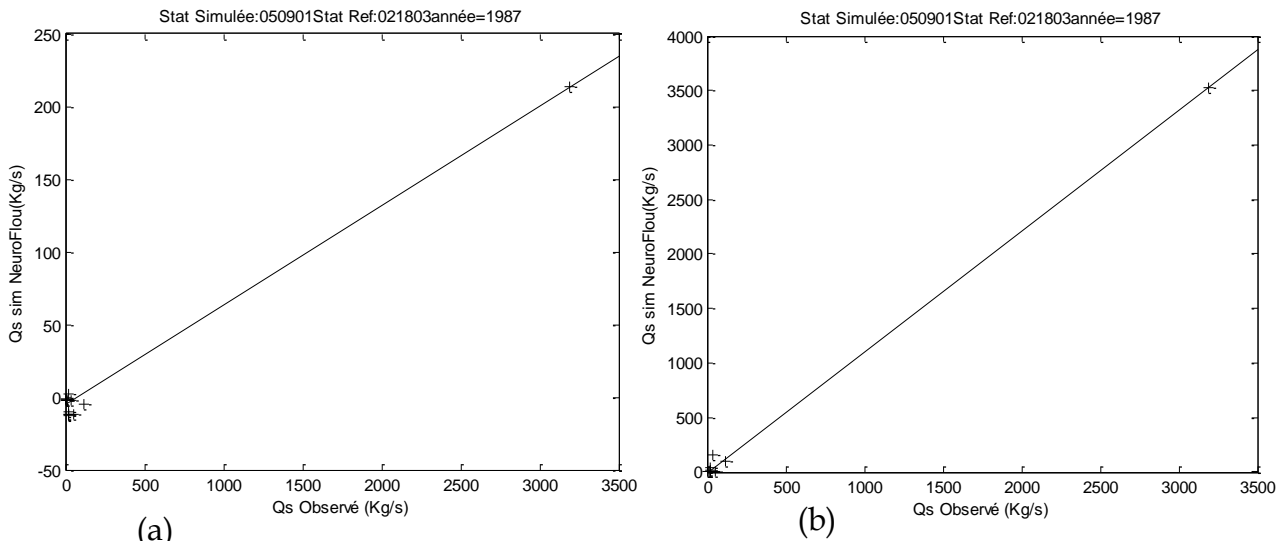


Figure V .63: Corrélation Qsim Qobs (Episode 02_05_86) (a) Flou_Brute (b) flou_Adim (c) Flou_Dim

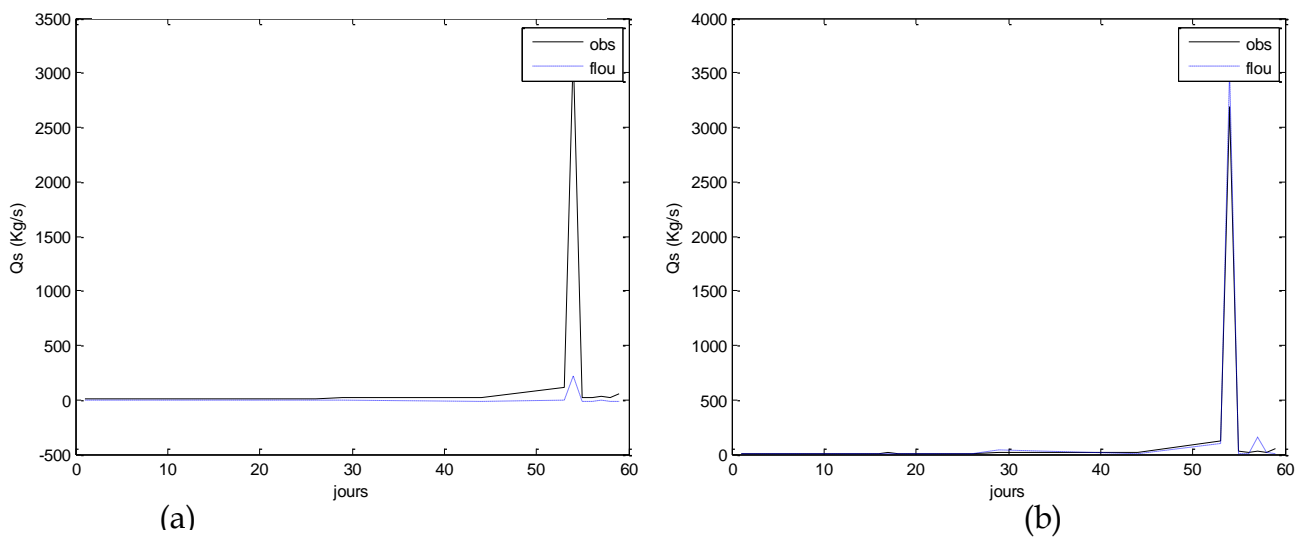


Figure V .64: Variation du débit solide au pas de temps journalier (Episode 02_05_87).

- **Résultats et interprétations**

Pour le modèle flou utilisant les variables adimensionnelles, les résultats obtenus sont meilleurs par rapport à ceux obtenus par le modèle flou utilisant les variables brutes. En effet, en période de validation, Les valeurs du critère de Nash, obtenues par le modèle flou_adimensionnel sont supérieures à 93%, l'erreur est inférieure à 10% et le coefficient de corrélation est supérieur à 98%. Tandis que pour le modèle flou utilisant des variables brutes, le coefficient de Nash est inférieur à 8%, l'erreur sur le bilan est supérieure à 96% et le coefficient de corrélation est supérieur à 86% (Tableaux V-29, V-30).

Notons aussi que le modèle Flou_adimensionnel, donne une reproduction meilleure des valeurs du débit solide comparé au modèle Flou_Brute (voir Figures V-62 (b), V-64 (b)).

L'apprentissage de la loi de comportement du transport solide est, donc, possible, en se basant sur la série de données des stations voisines appartenant même à des bassins versants éloignés.

V.6 CONCLUSION DU CHAPITRE

Pour le modèle empirique, les résultats médiocres obtenus pour les différents exemples traités dans différentes échelles, montrent, davantage, les limites des modèles déterministes dans la compréhension d'un phénomène aussi complexe que le transport solide.

Le modèle flou a donné des résultats performants, que ce soit en calage ou en validation, ce qui justifie le pouvoir prédictif du modèle utilisant une architecture neuronale complexe comparée au modèle empirique utilisant deux paramètres.

On peut conclure que le modèle flou donne une bonne approximation dans les périodes de forte fluctuation de débit relativement aux périodes de faibles fluctuations. Le modèle « raisonne » mieux là où le phénomène d'érosion se manifeste.

Le modèle Flou à apprentissage Mensuel permet d'atténuer les effets saisonniers, contrairement au modèle flou à apprentissage annuel, où certains détails de la réalité, très complexe, seront dissimulés par l'assemblage des données de l'année toute entière.

La qualité supérieure des résultats obtenus par le modèle flou utilisant les variables adimensionnelles avec un apprentissage mensuel, entre des stations appartenant à des Basins versants différents, permet de conclure que le modèle ainsi développé, permet une modélisation généralisée du phénomène de transport solide.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'impact du phénomène d'érosion, au niveau d'un bassin versant, est, sans doute, néfaste sur l'environnement, que se soit en amont, par la dégradation des sols arables, ou en aval, par le phénomène d'envasement des barrages passant par le sapement des berges au niveau des cours d'eaux. Une identification des différents paramètres caractérisant le processus d'érosion ainsi que leurs lois de variation est nécessaire pour la compréhension ainsi que la prévision de ce phénomène.

Deux approches peuvent être distinguées pour la modélisation de l'érosion, Selon l'effet de ce dernier au niveau du bassin versant : la première approche tend vers la modélisation du taux d'érosion en amont, la deuxième s'intéresse à ce qui se passe en aval par la modélisation du transport solide.

Le phénomène du transport solide est d'une complexité incontestable, de part la variabilité « aléatoire » des différents paramètres climatiques et hydrologiques qui ont une influence prépondérante sur le déclenchement du processus de l'érosion. La très forte fluctuation spatiotemporelle de certains de ces paramètres augmente davantage la complexité de ce phénomène et rend, par conséquent, la tâche de modélisation plus difficile. Cette fluctuation caractérise essentiellement notre site d'intérêt qui est l'Algérie du nord en générale et le bassin versant de l'Isser en particulier.

La reconnaissance de l'historique du phénomène de transport solide est capitale pour la modélisation de celui-ci ce qui permet d'anticiper l'évolution des flux solide à l'exutoire d'un bassin, ou en amont des barrages.

Ce travail a, donc, pour objectif la contribution effective dans la modélisation du transport solide, par la recherche d'une relation débit solide débit liquide, et répondre ainsi à certains soucis pratiques qui se résument en premier lieu dans le comblement des données manquantes du débit solide au niveau des stations disposant de des mesures de la turbidité et, en second lieu, dans la prévision du débit solide au niveau de n'importe quelle station hydrométrique existante dans le bassin versant.

Selon les objectifs visés et les difficultés rencontrées lors de notre investigation pour la modélisation du transport solide, on distingue trois niveaux de réflexions :

En premier lieu, deux modèles ont été testés ; l'un empirique et l'autre basé sur la logique floue utilisant un apprentissage neuronal à partir des débits observés du barrage de Beni Amrane très vulnérable aux transports solides.

Il est à noter que le modèle flou (à apprentissage neuronal) utilise une architecture complexe, et cela contrairement à la simplicité du modèle empirique. En effet, le modèle flou est optimisé avec un nombre de règles variant de 5 à 13 règles, et paraît plus robuste que le modèle empirique utilisant deux paramètres.

Notons aussi que si le critère de Nash donne une appréciation des valeurs simulées pour chaque donnée, l'erreur sur le bilan ne permet qu'une estimation globale des flux, et donc incompatible avec la prévision des concentrations des MES en temps réel. Tandis que le coefficient de corrélation donne uniquement une appréciation sur le degré de relation entre les variables simulées et observées. De ce fait, les modèles de simulation des MES doivent être validés en tenant compte des critères de Nash et de l'erreur.

Le modèle flou a donné des résultats performants au pas de temps horaire, le critère de Nash est généralement élevé que ce soit en calage ou en validation, ce qui justifie le pouvoir prédictif du modèle, et cela contrairement au modèle empirique qui utilise une relation de puissance, où les résultats sont médiocres, en particulier en phase de validation.

A l'échelle mensuelle, on peut conclure aussi que le modèle flou donne une bonne approximation dans les périodes de forte fluctuation de débit relativement aux périodes de faibles fluctuations. Autrement dit, la robustesse des modèles flous ainsi développés apparaît mieux lors d'un événement hydrologique, là où le phénomène d'érosion se manifeste.

A l'échelle annuelle et mensuelle Au pas de temps journalier, la simulation débit liquide-débit solide par le modèle flou à apprentissage mensuel donne des résultats satisfaisants et présente un net avantage par rapport au modèle empirique ainsi que le modèle flou à apprentissage annuel.

Pour le modèle empirique, les résultats médiocres obtenus pour les différents exemples traités dans différentes échelles, montrent, davantage, les limites des modèles déterministes dans la compréhension d'un phénomène aussi complexe que le transport solide.

En effet, le modèle Flou à apprentissage Mensuel permet d'atténuer les effets saisonniers, contrairement au modèle flou à apprentissage annuel, où certains détails de la réalité, très complexe, seront dissimulés par l'assemblage des données de l'année toute entière. La qualité supérieure des résultats obtenus à différentes échelles, en période de validation comme en période de calage, en utilisant ce nouveau concept donne un avantage supplémentaire aux modèles Neuroflous.

Dans l'objectif d'étendre le pouvoir prédictif du modèle flou à apprentissage mensuel, à la modélisation d'une station hydrométrique voisine à partir de l'apprentissage dans une station de référence, un nouveau concept a été introduit.

Il consiste à la transformation des variables brutes d'entrées sorties en variables adimensionnelles (rapport débit-solide rapport débit-liquide). Les rapports ainsi obtenus seront modélisés par un modèle flou à apprentissage mensuel. Une transformation inverse, de variables adimensionnelles simulées aux variables brutes, est effectuée.

La transformation en variables adimensionnelles permet de réduire au maximum, les effets de la distorsion des caractéristiques géométriques du bassin versant à l'amont de chaque station.

La qualité supérieure des résultats obtenues par cette approche, que se soit entre des stations existantes dans le même bassin versant ou des stations appartenant à des bassins versants différents voir même éloignés, permet de conclure que le modèle flou à apprentissage mensuel appliqué sur des variables adimensionnelle ainsi développée, permet la modélisation généralisée du phénomène de transport solide.

Perspectives :

L'apprentissage mensuel repose sur l'hypothèse que les paramètres hydroclimatiques du même mois sont semblables chaque année. Cette hypothèse peut être altérée par le fait qu'à l'échelle interannuelle, certains phénomènes peuvent prendre naissance, tel que les changements climatiques. Pour y remédier, une modélisation neurofloue multivariable composée, en plus du débit liquide, d'un complément d'information en entrée, portant certains paramètres climatiques tel que la température et l'humidité du sol, serait, donc, nécessaire.

Il a été constaté que la robustesse des modèles flous apparaît mieux lors d'un événement hydrologique, là où le phénomène d'érosion se manifeste. Il est, donc, nécessaire d'effectuer une clustérisation des événements puis une simulation à une échelle événementielle.

Notons aussi que lors de l'apprentissage annuel ou mensuel, l'information retenue comporte uniquement les valeurs du débit liquide et débit solide dans un ordre aléatoire. Néanmoins, la réponse d'un bassin versant, lors de la montée d'une crue est différente que celle enregistrée, pour le même débit liquide, lors d'une décrue. Il serait, donc, nécessaire d'introduire les données d'apprentissage dans un ordre chronologique des événements.

Il serait intéressant, aussi, d'associer à la modélisation neurofloue multivariable, une analyse spectrale, permettant de prendre en considération la succession chronologique des événements, tout en considérant une échelle de temps rapportée à l'événement hydrologique.

Il serait intéressant de voir aussi l'impacte des différents aménagements dans le bassin versant sur la modélisation du transport solide. Et ce, par clustérisation des années d'apprentissage, relatives à une période de validation, par rapport à cet événement. Citons, à titre d'exemple : la construction de barrage à l'amont de la station hydrométrique, les projets d'aménagements antiérosifs, les différents aménagements des travaux publics.

En terme générale, il serait utile d'introduire, en entrée, toutes informations relatives aux paramètres influençant, de manière directe ou indirecte, le phénomène de transport solide.

Références Bibliographiques

He, who knows only his own side of the case, knows little of that.
-John Stuart Mill-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelali, T., M. Abdesselem et B. Abderrezak. (2003).** Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins versants des régions méditerranéennes algériennes. *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions*. E. Servat, W. Najem, C. Leduc and A. Shakeel. Montpellier, France, IAHS Press. 278: 366-372.
- Achite M. (2007).** Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie du Nord: Bassin versant de l'Oued Mina, thèse de Doctorat Es Science, Université des sciences et de la technologie d'Oran M.B., Algérie.
- Albert, M. (1992).** Les réseaux de neurones comme outils d'aide à la décision floue, rapport de D.E.A, Ingénierie Informatique I.N.S.A de Lyon 64 p
- ANHR. (1992).** Atlas des températures et des évapotranspirations du Nord de l'Algérie.
- ANRH, (1990).** Étude hydrologique du barrage de Beni Amrane. Étude COBA.
- ANRH, (2000).** Actualisation des volumes régularisables. Bulletin Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (Algérie), N° 12/2000.
- Anys, H., F. Bonn et A. Merzouk (1994).** "Remote sensing and GIS based mapping and modeling of water erosion and sediment yield in a semi-arid watershed of Morocco. *Geocarto International* 1: 31-40.
- ARABI M. (1991).** Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen algérien. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 276 p.
- Association E.N.H.Y.D. EnergoProjekt (1992).** Étude générale de la petite et moyenne hydraulique agricole de l'Algérie du Nord. Dossier 2, Dossier 2-Volume 1 et Volume 4, Ministère de l'Équipement et du Logement, Alger.
- Association E.N.H.Y.D. EnergoProjekt (2001).** Étude générale de la petite et moyenne hydraulique agricole de l'Algérie du Nord, Mission1 Dossier 2-Volume 2 et Volume 3, Ministère des ressources en eaux, Alger.
- Atawoo, M. A. et J. M. Heerasing (1997).** Estimation of soil erodibility and erosivity of rainfall patterns in Mauritania. Réunion des scientifiques agricoles, Mauritanie.
- Aubert, G. (1986).** Réflexions sur l'utilisation de certains types de banquettes de "Défense et Restauration des Sols" en Algérie. *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie XXII(2)*: 147-151.
- Baltimore (MD), (1992).** Glorennec, P. Y. 1991. Un réseau neuro flou évolutif. In *Neuro-Nimes*, pages 301-314, Nimes (FR), 1991.
- Bellatreche, A. (1987).**Érosion et perspectives de conservation des sols dans les bassins sédimentaires de Médéa - Beni Slimane - Algérie. Institut des Sciences de la Terre, Spécialité : Géomorphologie. Alger, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene: 272.
- Benaissa, A. (1998).** Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine (Algérie). *Revue Rhumel. Revue des Sciences de la Terre et de l'Aménagement* 6: 111-120.
- Benchetrit, M. (1972).** L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. Paris, Presses universitaires de France.
- Benik, S. R., B. N. Wilson, et al. (2003).** Evaluation of erosion control products using natural rainfall events. *Journal of Soil and Water Conservation* 58(2): 98-105.
- BENKHALED A. et B. REMINI., (2003).** Analyse de la relation de puissance : débit solide - débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrân (Algérie). *Rev. Sci. Eau*, 16, 333-356.

Benkhaled, A. et B. Remini (2003). "Analyse de la relation de puissance : débit solide – débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrân (Algérie)." *Revue des Sciences de l'eau* 16(3): 333-356.

Benmoussa, M., M. Elyamani et A. Saidi (1993). "Application de l'équation universelle des pertes en sol du bassin versant de Oued Tasrafete." *Géo-Observateur* (Octobre): 83-93.

BENOIT E. (1993). Capteurs symboliques et capteurs flous : un nouveau pas vers l'intelligence artificielle. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Berenji H. R. et Khedar. P. (1992). Learning and tuning fuzzy logic controllers through reinforcement. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 3(5):724-740, 1992.

BERENJI R., MALKANI A. et C. COPELAND. (1985). Tether control using fuzzy reinforcement learning, *IEEE/IFES*, Yokohama, Japan, 1315-1319.

BERSINI H. et V. GORRINI. (1993). FUNNY, fuzzy or neural net methods for adaptive process control. *Proceedings of EUFIT*, Allemagne, 55-61.

Bessenese, M. & Al. (2006). Modélisation numérique du cycle sédimentaire d'une retenue de Barrage en Algérie: Cas de la retenue de Zardazas, Algérie équipement, vol 41 : 31-34

BOUCHON-MEUNIER B. (1995). La logique floue et ses applications, Addison-Wesley France, Paris.

Boudjadja, A. "Aménagement des cours d'eau." *Algérie Équipement* 26: 18 - 24.

Boudjadja, A., M. Messahel et H. Pauc (2003). Ressources hydriques en Algérie du Nord. *Revue des Sciences de l'eau* 16(3): 285-304.

Boughattas, N. e. H., M. S. Felfoul, et al. (2003). "Relation entre l'efficacité des lacs collinaires et la sensibilité au ravinement de leur bassin versant en Tunisie centrale." *La houille blanche* 6: 34-40.

Bouguerra, K. (1985). Analyse et interprétation des mesures effectuées sur les microbassins expérimentaux durant l'année 1983-1984. Journées techniques de l'étude "Érosion et transports solides en zone semi-aride", Ministère de l'Hydraulique de l'Environnement et des Forêts. Institut National des Ressources Hydrauliques.

Bouhlassa, S., A. Azenfar et A. Machrouh (1995). "Caesium fallout as a tracer of erosion sedimentation in big catchment." *Applied Radiat. Isot.* 46(6/7): 659-660.

Bouhlassa, S., M. Moukhchane et A. Aiachi. (2000). Estimates of soil erosion and deposition of cultivated soil of Nakhla watershed, Morocco, using ¹³⁷Cs technique and calibration models. *Acta Geologica Hispanica* 35(3-4): 239-249.

Bourouba, M. (1996). "Essai de quantification de l'érosion actuelle à partir des mesures de turbidité en Algérie orientale." *Bulletin de l'ORSTOM* 16: 232-248.

Bourouba, M. (1997). "Les variations de la turbidité et leurs relations avec les précipitations et les débits de oueds semi-arides d'Algérie orientale." *Bulletin de l'ORSTOM* 17: 345-360.

Bourouba, M. (1998). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides de l'Oued Medjerda supérieur (Algérie orientale). *Bulletin de l'ORSTOM* 18: 76-97.

Brahamia, K. (1993). Essai sur la dynamique actuelle dans la moyenne montagne méditerranéenne bassin versant de l'oued Mina zone de Taassalet - Algérie. *Géographie*. Grenoble, Université de Joseph Fourier: 230.

Bromhead, E. N. (1997). The treatment of landslides. *Proc. Instn Civ. Engrs. Geotech. Engng.* 125: 85-96.

Broomhead, D.S. et D. LOWE (1988). Multivariable functional interpolation and adaptive networks, *Complex Systems*, 2, p. 321-355.

Chadi, A. et T. Hadji. (1992). Érosion des sols et envasement des barrages. Algérie Équipement 5: 20-25.

Chebbani, R. et S. Belaidi (1997). Étude de la dynamique du ravinement suivi expérimental de 2 couples de ravines près de Tlemcen (Algérie). ORSTOM Bulletin Réseau Érosion 17: 152-160.

Chen, F., E. T. Kanemasu, L. T. West et F. Rachidi (1993). Analysis of land use and simulation of soil erosion with GIS for the Semi-Arid region of Morocco. Géo Observateur 10: 55-75.

Cherifi, F., Bouzelha, K., Bouhade M. (2005). Procédé actif de protection des berges des rivières et des ouvrages de régularisation contre l'érosion, Algérie équipement, N°39, 29-32

Chow, T. L., H. W. Rees, et al. (1999). Effectiveness of terraces/grassed waterway systems for soil and water conservation: A field evaluation. Journal of Soil and Water Conservation 54(3): 577-583.

Corsini, M.M. (2005). Introduction aux réseaux de neurones, Université Victor Segalen France

Coudé-Gaussen, G. (1995). Les formations superficielles au Maghreb: composantes et réactifs d'un milieu "naturel" fragile. Désertification et aménagement au Maghreb. G.Coudé-Gaussen and P. Rognon. Paris, Éditions l'Harmattan: 89-112.

Coulibaly, p., A. FRANCOIS & B. BERNARD (1999). Préviation Hydrologique par Réseaux de Neurones Artificiels – état de l'art. Can.J.Civ.Eng. 26 PP 293-304

Dai, F. C., C. F. Lee, et al. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. Engineering Geology 64: 65-87.

Daoudi, M., A. Abdellaoui et M. S. Guettouche (1994). SIG pour le suivi et l'évolution de l'érosion par ravinement. Actes de la Conférence Canadienne sur les SIG, Ottawa, Canada.

DECHEMI N., BENKACI T. et A. ISSOLAH, (2003). Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. Rev. Sci. Eau, 16, 407-424.

DEMMAK A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie – Paris.

Demmak, A. (1982). Contribution à l'étude des écoulements solides des cours d'eau d'Algérie, Institut national des ressources hydrauliques.

Donal ,H. (1949). The organisation of the Behavior . WILEY .NEW YORK.

Dreyfus, G. (2004). Réseaux de neurones, Méthodologie et Application EYROLLES, 2004 pp 01-65 Fiesler,E. 1994.

DRIANKOV D., HELLENDOM H. et M. REINFRANK, (1993). An introduction to fuzzy control, Springer-Verlag.

Dumouchel, D. (1991). Les méthodes de contrôle de l'érosion, Service Ressources et aménagement du territoire, vice-présidence Environnement, Hydro-Québec 179.

Finkel, H. J. et M. Finkel. (1986). Engineering Measures: Water Harvesting. Semiarid Soil and Water Conservation. H. J. Finkel, M. Finkel and Z. Naveh. Boca Raton, Floride, CRC Press Ltd: 93-101.

Fournier, F. (1960). Climat et érosion. Paris, Presses Universitaires de France.

François, G & C. François (1998). Cahier technique N° 191, LA LOGIQUE FLOUE , GROUPE SCHNEIDER 30 PP,

GAFREJ R. (1993). Modélisation conceptuelle du transfert des matières en suspension, effet d'échelles spatio-temporelles. Thèse de Doctorat, Université Paris 6, CEMAGREF.

Garouani, A. E., A. Merzouk et A. ozer (2003). Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions,

Montpellier, France, IAHS Press.

Gauthier, E. (1999). Utilisation des Réseaux de Neurones Artificiels pour la Commande d'un Véhicule Autonome ; thèse de doctorat, institut national polytechnique de grenoble 1999 pp37-52.

GLORENNEC P.Y, BARRET C. et M. BRUNET (1992). Application of neuro-fuzzy network to identification and control of nonlinear dynamical systems, Proceedings of IPMU, Mallorca, Spain, 507-510.

Gomer, D. et T. Vogt (2000). Physically based modelling of surface runoff and soil erosion under semi-arid Mediterranean conditions - The example of Oued Mina, Algeria. Soil erosion. Application of physically based models. J. Schmidt. Berlin, Springer: 59-78.

GTZ (1994). Écoulement et érosion dans des petits bassins-versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen. Eschborn, GTZ.

GTZ (1996). L'Aménagement des Zones Marneuses dans les Bassins-Versants des Montagnes de l'Atlas Tellien Semi-aride, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

Guettouche, M. S. (1991). Essai d'une cartographie de l'érosion des sols par télédétection satellitaire SPOT. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, Alger.

Halgamuge K. S. et M. Glistner (1994). Neural networks in designing fuzzy systems for real world applications. Fuzzy Sets and Systems, 65(1):1{12, 1994.

Heesche, K., W. Hauptmann & K. Goser (1997). A neuro-fuzzy topology with complexity reduction for an automotive application. In Neurap, Marseille (FR), 1997.

Hertz, j. & A. Krogh (1991). Introduction to the theory of neural computation. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

Heusch, B. & A. Milliès-Lacroix (1971). "Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin. Application au Maghreb." Mines et Géologie 33: 21-39.

Hinton, G.E & T.J. Sejnowski (1986). Learning and relearning in Boltzmann machines In Parallel Distributed Processing 1, chap 7, Self organization and associative memory, 2nd ed, Springer Verlag, 1984.

Hinton, G.E. (1989). Deterministic Boltzmann machine learning performs, steepest descent in weight-space. Neural Computation, 143-150.

Hodgkin, A.L & A.F. Huxley (1952). A quantitative description of membrane Current and its application in its application to conduction and excitation in nerve. Journal Physiologie, LONDRE 117:500-554, 1952.

Honermann, H. (1991). Nécessité et possibilité d'identification des mesures pour ralentir l'envasement des barrages. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, Alger.

Hopfield, j. j. (1982). Neural Network and physical systems with emergent Collective abilities. Proceedings of the National Academy Of Science , USA 81 , PP.3088-3092,

Horikawa, S. I., T. Furuhashi & Y. Uchikawa(1992). On fuzzy modelling using fuzzy neural networks with the back-propagation algorithm. IEEE Trans. On Neural networks, 3(5):801{805, 1992.

Hughes, A. O., I. P. Prosser, J. Stevenson, A. Scott, H. Lu, J. Gallant et C. J. Moran. (2001). Gully Erosion Mapping for the National Land and Water Resources Audit. Canberra, Australia, CSIRO Land and Water: 19.

Husson, A. (1975). Coefficient de torrentialité et géomorphologie dynamique - Leur apport à l'étude des bassins- versants, Secrétariat d'état à l'hydraulique- Direction des études de milieu et de la recherche hydraulique - Sous-direction des ressources en eau: 17.

HYDROMED (2001). Rapport final du programme de recherche sur les lacs collinaires dans

les zones semi-arides du pourtour méditerranéen. IRD / INRGREF Tunis.

ISL/INCO-MAG et ANB (2002). Avant-projet détaillé du barrage d'Irdjana. Mission 5. Étude hydrologique et de régularisation.

Jang, J-S. R. & Sun, C-T. (1993). Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 4(1):156-159, 1993.

Jang, J-S. R. and Sun, C-T. (1995). Neuro-fuzzy modelling and control. *Proc. of the IEEE*, 83(3):378-406, 1995.

JANG J. (1993). ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy Inference Systems. *IEEE SMC*, 23, 665-685.

Johnson, C. (2003). 5 low-cost methods for slowing streambank erosion. *Journal of Soil and Water Conservation* 58(1): 12-17.

Kadik, B. L'érosion, la conservation et la restauration des sols en Algérie, Ministère de l'Hydraulique, l'Environnement et des Forêts. Institut National de Recherche Forestière.

Kalman, R. (1976). Étude expérimentale de l'érosion par griffes." *Revue de géographie physique et de géologie dynamique* 18(5): 395-406.

Kandel, E.R et Schwatz, J.H, (1987). Principles of Neural Sciences NEW YOURK : Elsevier/North Holland 1987

Kassoul, M., A. Abdelgader et M. Belorgey (1997). Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie." *Revue des sciences de l'eau* 10(3): 339-358.

Kingumbi (1997). Caractérisation morphométrique du bassin versant du Merguellil. Application à la simulation des écoulements de surface et à l'érosion (TUNISIE). École Supérieure des Ingénieurs de l'Équipement Rural. Medjez El Bab, Ministère de l'Agriculture, Tunisie: 96.

Kohonen, T. (1984). Self organization and associative memory, 2nd ed, Springer Verlag, 1984.

Kosko, B. (1992). Neural networks and fuzzy systems: a dynamical approach to machine intelligence. Prentice Hall Int., 1992.

Kouri, L. (1993). L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie) - Étude des processus et types fonctionnels de ravins dans la zone des marnes tertiaires. Laboratoire Environnement, Cartographie, Télédétection. Strasbourg, Université Louis Pasteur.

Kouri, L., H. Vogt et D. Gomer (1997). Analyse des processus d'érosion hydrique linéaire en terrain marneux, bassin de l'oued Mina, Tell oranais, Algérie." *ORSTOM Bulletin Réseau Érosion* 17: 64-73.

Le Cun, y. (1985). Une procédure d'apprentissage pour réseau à seuil asymétrique. In *Cognitiva 85: A la frontière de l'intelligence Artificielle des Sciences de la Connaissance des Neurosciences*, CESTA, Paris, pp. 599-604,

Leasage, C. (2004). Expert et évaluation financière: une approche par la logique floue des biais cognitifs, GREGOR, IAE Paris – Université Paris 1- La Sorbonne

LEFKIR A., T.BENKACI & N. DECHEMI (2006). Quantification du transport solide par la technique floue, application au barrage de Beni Amrane(Algérie). *Revue des Sciences de l'Eau* 19(3) (2006) 247-257

Lippmann, R.P. (1987). An introduction to computing with neural nets. *IEEE Acoustics Speech and Signal Processing Magazine*, 4: 4-22.

Lo, A., S. A. El-Swaify, et al. (1985). Effectiveness of EI30 as an erosivity index in Hawaii. *Soil Erosion and Conservation*. S. A. El-Swaify, W. C. Moldenhauer et A. L., Ankeny, IA, Soil Conservation Society of America: 384-392.

Magdalena, L. (1995). Analysis of hybrid models: fuzzy logic neural nets. Technical report,

Universidad Politécnica de Madrid, 1995. MIX Esprit Project 9119.

Mallat, S. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet, transform, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11, p. 674-693.

MAMDANI E.H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic Plant. Proceedings of the IEE Control and Science, 121, 12, 1585-1588.

MARC, P. (2004). Réseaux de Neurones, Université de l'AVAL

Matthieu, G. (2003). Entraînement de Réseaux de Neurones Récurrent à Pulses Appliqués à la Modélisation d'un Tissus Neuronal Biologique. thèse Maîtrise en Science Appliqué Génie Electrique, ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL 2003 pp 14-20

Mazour, M. (1992). Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant d'Isser, Tlemcen, Algérie. Bulletin Réseau Érosion 12: 300-313.

Megnounif, A., A. Terfous et A. Bouanani. (2003). Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (nord-Ouest Algérien). Revue des Sciences de l'eau 16(3): 369-380.

Menage, X et Hartani ,R. (1993). Synthèse des méthodes d'association des techniques neuronales et des techniques floues. Technical report, LAFORIA Institut Blaise Pascal, Paris, 1993.

Montgomery, D. R., R. H. Wright, et al. (1991). Debris flow hazard mitigation for colluviumfilled swales. Bulletin of the Association of Engineering Geologists 28(3): 303-323.

Moody, J & C.J. DARKEN (1989). Fast learning in networks of locally-tuned processing units, Neural Computation, 1, p. 281-294.

Morel, A. & O. Cayla (1993). Proposition d'un indice «paysage» pour l'évaluation des débits solides: application à 30 bassins-versants d'Algérie tellienne. Revue de géographie alpine 1: 15-32.

Moukhchane, M., S. Bouhlassa & K. Bouaddi (1998). Quantification de l'érosion des sols du bassin versant El Hachef, par le biais du Césium-137 (région de Tanger, Maroc). Bulletin de l'ORSTOM 18: 106-118.

NAKOULA Y. 1997). Apprentissage des modèles linguistiques flous par jeu de règles pondérées. Thèse de Doctorat, Université de Savoie.

NASH J.E. et J.V. SUTCLIFFE (1970). River flow forecasting through conceptual model. Part 1 - a discussion of principles. J. Hydrol., 10, 282-290.

Nauck, D. et Kruse, R. (1993). A fuzzy neural network learning fuzzy control rules and membership functions by fuzzy error backpropagation. In Proc. of the Int.Conf. On Neural Networks, volume 2, pages 1022{1027, San Francisco (CA), 1993.

Oja, E. (1982). A simplified neuron model as a principal component analyser. Journal of Mathematical Biology, 15: 267-273.

P.N.U.D. et O.P.E. (1987). Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord (projet RAB/80/011) - Guide maghrébin pour l'exécution des études et des travaux de retenues collinaires.

PAP/CAR (1998). Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. Split, Croatie, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAM/PNUE) en collaboration avec la FAO.

PAP/CAR (2000). Directives pour la gestion de programmes de contrôle d'érosion et de désertification plus particulièrement destinées aux zones côtières méditerranéennes. Split, Croatie, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires.

Parker, D.B. (1985). Learning logic. Technical report. Center of Computational Research in Economics and Management Science. MIT, Cambridge, MA, 1985.

Paschen, H., D. Gomer, et al. (1998). Management of watersheds with soils on marls in the

Atlas Mountains of Algeria - A proposal for a non-conventional watershed development scheme. *Advances in GeoEcologie* 31: 1099-1106.

Paschen, H., D. Gomer, et al. (1994). Ecoulement et érosion dans des petits Bassins-Versants a sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen

Peretto, P. (1984). Collective properties of neural networks: a statical physics Approach. *biological Cybernetics* 50 , PP.51-62

PICOUET C., HINGRAY B. et J.C., OLIVRY (2001). Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin. *J. Hydrol*, 250, 19-39.

Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten & C. Valentin (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133.

Poesen, J., K. Vandaele et B. v. Wesemael (1998). Gully erosion: importance and model implications. *Modelling soil erosion by water*. J. Boardman and D. Favis-Mortlock. Berlin Heidelberg. 55: 285-311.

Powell, M. J.D. (1987). Radial basis functions for multivariable interpolation: a review, *Algorithms for approximation*, p. 143-167.

Prosser, I. P. et B. Abernethy (1996). Predicting the topographic limits to a gully network using a digital terrain model and process thresholds. *Water Resources Research* 32(7): 2289-2298.

Radhi, M et F. Elyes (2005). COURS sur la logique floue, Association des francophones-Tunisie -2005

Ramdane, M. (1989). La notion de représentativité dans les études de l'érosion. Application au bassin versant de l'Isser. *Revue Eaux et Sols d'Algérie* 2: 40-45.

Ramdane, M. (1985). Cartographie morphodynamique de l'Oued Isser : Objectifs et Intérêts. Journées techniques de l'étude "Érosion et transports solides en zone semi-aride", Ministère de l'Hydraulique de l'Environnement et des Forêts. Institut National des Ressources Hydrauliques.

Raunet, M. (1974). Étude morpho-pédologique dans la région des Béni-Slimane (Algérie) contraintes pour la mise en valeur. *Agronomie tropicale* 29: 259-299.

Remini B. (2005). La problématique de l'eau en Algérie, Collection hydraulique et transport solide. Edition 2005

Remini, B. (1999). Quelques problèmes posés par l'envasement des barrages en Algérie. *Algérie Équipement* 31: 31-32.

Remini, B. (1989). Envasement des barrages dans le Maghreb. *Bulletin International de l'Eau et de l'Environnement* 22: 4-8.

Remini, B. & Al. (1994). Envasement des barrages: Cas du barrage de Oued El Fodda. *Algérie Équipement* 15: 18-21.

Remini, B. & Al. (1996). Évolution de la vase dans trois retenues de barrages en Algérie. *Vecteur Environnement* 29(3): 43-48.

Remini, B. & al. (1996). Les chasses au barrage de Beni Amrane. *Algérie Équipement* 26: 25-27.

Remini, B. et W. Remini. (2003). Les barrages du Maghreb face au phénomène de l'envasement. *Vecteur Environnement* 36(6): 27-29.

Romain, B. (2003). Modèles Impulsionnels de Réseaux de Neurones Biologiques Thèse Doctorat, Paris 2003 pp 03-10.

ROOSE E. (2004). Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive. Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols, *Sécheresse*, 1, 9-18.

- Roose. (1994).** Introduction à la GCES. Bull. Pédol. FAO, Rome, 70, 420 p.
- Roose, É. (1994).** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Rome, Directeur de la Division des publications, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Roose, É., M. Arabi, K. Brahamia, R. Chebbani, M. Mazour & B. Morsli (1993).** Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. CAHIERS ORSTOM.SÉRIE PÉDOLOGIE 28(2): 289-308.
- Roose, É., R. Chebbani & L. Bourougaa. (2000).** Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. Science et changements planétaires / Sécheresse 11(4): 317-326.
- Rouabeh T. (1998).** Etude des transports solides en suspension de l'Oued SAF-SAF dans la Wilaya de Skikda, Magister en Hydraulique, Institut National Agronomique, Alger.
- Rullan-Perchirin, F. (1989).** Les mouvements de masse dans le bassin-versant du Rhumel constantinois: essai méthodologique. Travaux de l'Institut de Géographie de Rheims 69-70-71-72: 151-171.
- RUMELHART, D.E., McClelland, J. L. et al. (1988).** Parallel Distributed Processing Vol. 1. Massachusetts: MIT Press, 1988. 547 p.
- Rumelhart, D.E. (1986).** Learning internal representations by error propagation. Parallel Distributed Processing Explorations in the Microstructure of Cognition. Eds. D. E. Rumelhart and J.L. McClelland, Cambridge, MA, MIT Press, Bradford Books, vol. 1, pp. 318-362,1986.
- Saidi, A. (1991).** Érosion spécifique et prévision de l'envasement. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, Alger.
- Sarzeaud, O. (1995).** Les réseaux de neurones : contribution à une théorie. Ouest Éditions, 1995. ISBN 2-808261-94-4.
- Smati, A. (1996).** Étude méthodologique sur l'hydrologie des retenues collinaires. Résumé et synthèse des principaux résultats et conclusions de l'étude SOGREAH, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
- Soil Survey Division Staff (1993).** Soil survey Manual. USDA Agric. Handbook 18. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- SUGENO M. (1985).** Industrial applications of fuzzy control, Elsevier sciences publications.
- Sulzberger, S. M., Tschichlod-Gurman, N. N. et S. J. Vestli. Fun (1993).** Optimization of fuzzy rule based systems using neural networks. In Proc. of the Int. Conf. on Neural Networks, volume 1, pages 312{316, San Francisco (CA), 1993.
- T. Hashiyama, T. Furuhashi, and Y. Uchikawa (1992).** An interval fuzzy model using a fuzzy neural network. In Proc. of the Int. Joint Conf. on Neural Networks, volume 2, pages {745,750}
- Tahri, M., A. Merzouk, H. F. Lamb et R. W. Maxted (1993).** Étude de l'érosion hydrique dans le plateau d'Imilchil dans le Haut-Atlas central. Utilisation d'un S.I.G. Géo- Observateur (Octobre): 51-60.
- Talbi, O., A. Mendas, A. Bensaid et M. A. Trache (2002).** Mise en place d'un système d'information géographique pour le suivi et la quantification de l'érosion hydrique : application au bassin versant de l'Isser (Tlemcen, Maroc). Science et changements planétaires / Sécheresse 13(3): 175-179.
- Tarek, A. (2004).** Introductions aux systèmes Adaptatifs à base d'apprentissage. Laboratoire A2SI-ESIEE-Paris.
- Tecsalt (2004).** Étude de la protection des bassins versants de l'ensemble des barrages en études d'Avant Projet Détaillé et des bassins versants des barrages en exploitation, Rapport Principal, A.N.B,

Ministère des ressources en eaux.

Tecsuit (2004). Étude de la protection des bassins versants de l'ensemble des barrages en études d'Avant Projet Détaillé et des bassins versants des barrages en exploitation, Phase1, Lot 3, A.N.B, Ministère des ressources en eaux.

Terfous, A., A. Megnouif & A. Bouanani (2001). Étude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau* 14(2): 173- 185.

Tihay, J.-P. (1976). Dynamique des versants et milieux naturels. *Annales de Géographie* 469: 257-280.

Tixeront, J. (1960). Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie, *IAHS*. 53: 26-42.

Touaïbia, B. et M. Achitte (2003). Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques* 48(2): 235-242.

Touaïbia, B., S. Dautrebande, D. Gomer et A. Aidaoui (1999). Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales: bassin versant de l'Oued Mina. *Hydrological Sciences—Journal—des Sciences Hydrologiques* 44(6): 973-987.

TOUZET. (1992). Les Réseaux de Neurones Artificiels – Introduction au Connexionnisme. COURS- EXERCICES- et TRAVAUX PRATIQUES

VAN SICKLE J. et R. BESCHTA (1983). Supply based models of suspended sediment transport in Streams. *Water Resour. Res.*, 19, 768-778.

Vogt, T. et D. Gomer (1992). Estimation du ruissellement et des matières en suspension par l'utilisation d'un SIG intégrant MNT, données Landsat TM et données hydrologiques de terrain. *Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection* 128(4): 7- 17.

Von Neumann, J. (1956). Probabilistics Logics and the synthesis of reliable Organisms from unreliable components. In *Automata Studies*, Eds.C.E.Shannon.

WALLING D.E. et B.W. WEBB, (1981). The reliability of suspended sediment load data. *Erosion and sediment transport measurement, Proceedings of the Florence Synchronposium, IAHS Publ.*, 133, 177-194.

Widrow, b. (1960). In *IRE Western Electric Show and Convention Record*, pp. 96-104, 1960.

Widrow, b. (1962). Generalization and information storage in networks of « Adaline ». In *Self-Organizing Systems*, Eds. M.C. Yovits, G.T. Jacobi et G.D. Goldstein, Washington, 435-461.

WISCHMEIER W.H. et D.D. SMITH, (1960). A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. *Proceedings 7th Int. Congress Soil Sci. Soc.*, 1, 418-425.

Wischmeier, W.J. et D.D. Smith. (1978). Predicting rainfall erosion loss – A guide to conservation planning. *Agricultural handbook no 537*. Washington, DC.

Yuste, R et Tank, D. W. (1996). Dendritic integration in mammalian neurons, a century after Cajal, *Neuron*, 16, pp. 701– 16.

ZADEH L. (1965). Fuzzy sets. *Inf. Contr.*, 8, 338-353. ZADEH L., 1971. Quantitative fuzzy semantics, *Inf. Sci.*, 3, 159-176.

Zaitchik, B. F. and H. M. v. Es (2003). Applying a GIS slope-stability model to site-specific landslide prevention in Honduras. *Journal of Soil and Water Conservation* 58(1): 45-53.