

11 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة حسيبة بن بوعلي بالشلف
UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALI. CHLEF
كلية العلوم و علوم الهندسة
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
قسم الري
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE



MEMOIRE
Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER
Spécialité : Hydraulique
Option : Hydraulique urbaine

Présenté par: ZEKOUA Naima

**Modélisation des crues de oued
Ouahrane pour la gestion intégrée
des risques d'inondation**

Soutenu publiquement:

06 juillet 2009

Devant le jury composé de :

Pr : Saaed Hamoudi. A.
Pr : Remini. B.
Mr : Benaouda .H.
Dr : Ezziane. K.
Dr : Remaoun .M.

Professeur UHB Chlef
Professeur USD Blida
Maître assistant A UHB Chlef
Maître de conférences UHB Chlef
Maître de conférences UHB Chlef

Président
Examinateur
Examinateur
encadreur
Co- encadreur

Résumé	
Sommaire	
Remerciement	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale et problématique.....	1

Chapitre I :

Processus hydrologiques et genèse des crues

1-1- Introduction.....	5
1-1-1-Processus hydrologique	5
1-2-1-Ecoulement souterrain	6
1-2-2-Ecoulement de surface	7
1-2-3-Ecoulement sub-surface	8
1-2-4-Ecoulement direct sur cours d'eau	8
1-3-Déffinition d'une crues	8
1-3-1- Evolution d'une formation des crues	9
1-3-2- Genèse des crues.....	9
1-3-3 -Réponse hydrologique et formation des crues.....	12
1-4- Origine des crues	14
1-4-1- Aspect météorologiques.....	14
1-4-2-Aspect hydrologique et hydrique du bassin versant.....	15
1-5-Hydrogramme de crue	15
1-5-1- Transformation de la pluie en hydrogramme de crue.....	15
1-5-2 -Séparation des écoulements sur l'hydrogramme de crue.....	18
1-6-Régimes hydrologiques	20
1-6-1-Régimes et échelles temporelles.....	20
1-6-2-Régime hydrologique a l'échelle spatiale	21
1-6-3-Impact de l'homme sur la variation de régime hydrologique	22
1-6-4-Influence de Réchauffement climatique sur le régime hydrologique.....	22
1-7-Conclusion	23

Chapitre II :

Modélisation hydrologiques et modèles pluie-débit

2-1-Introduction.....	26
2-2-Définition des modèles.....	26
2-2-1-Quelques éléments de vocabulaire.....	27
2-2-2-Pourquoi des modèles hydrologiques ?	31
2-3-Typologie des modèles.....	32
2-3-1-Modèle physique	32
2-3-2-modèles mathématiques.....	33
2-3-2-1-Modèles déterminismes et stochastiques.....	34
2-3-2-2-Modèles paramétriques, à base physique.....	35
2-3-2-3-Modèles analytiques (statistique) Modèle empirique Modèle conceptuels	35
2-3-2-4-Modèles globaux, modèles discrétises (distribués)	36
2-3-2-5-modèles conceptuels (globaux, distribués)	37
2-4-Modélisation pluie- débit.....	37
2-4-1-Objet et enjeux de la modélisation pluie-débit.....	38
2-4-2-Choix d'un modèle hydrologue.....	39
2-5-Présentation de quelques modèles	40
2-5-1-Modèle a base physique distribuée (SHE)	40
2-5-2-Modèle conceptuel distribué (TOPMODEL)	41
2-5-3-Modèle conceptuel global de la famille de GR (génie rural)	42

2-5-3-1-Modèle conceptuel global GR1A	42
2-5-3-2-Modèle conceptuel global GR2M	43
2-5-3-3-Modèle conceptuel global (GR4 j), (GR3J)	43
2-6-Conclusion	45

Chapitre III :

Bassin de oued Ouahrane : étude géomorphologique

3-1-Introduction	47
3-2-Présentation générale	48
3-3-situation géographique.....	49
3-4-Géologie de bassin de Oued Ouahrane	50
3-5-Étude géomorphologiques	51
3-5-1-Relief	51
3-5-1-1-Superficie et Périmètre	52
3-5-1-2 -Forme du bassin	52
3-5-1-3 -Altitudes	53
3-5-1-4 Indices de pente et relief	55
3-5-1-5-Classes des pentes	55
3-5-1-6-Profil en long	56
3-5-2-Constitution du réseau hydrographique	57
3-5-3- Morphométrie du réseau hydrographique	58
3-6- Caractères lithologiques du bassin versant et perméabilité.....	58
3-7- Végétation et l'occupation du sol	60
3-8 Paramètres climatiques	60
3-8-1- Températures	61
3-8-2-Evapotranspiration	61
3-8-3 Vents.....	61
3-9-Conclusion	62

Chapitre IV :

Bassin de oued Ouahrane : étude hydropluviométrique

4-1 Introduction	64
4-2 -Equipement hydro pluviométrique du bassin.....	64
4-3 Critique des données hydro-pluviométriques	65
4-4 Précipitations annuelles mensuelle et saisonnière	66
4-4 -1-Estimation de la lame d'eau précipitée (1972/71- 2003/04)	66
4-4-2 Variations annuelles et inters annuels	67
4-4-3 Variation mensuelles et saisonnières	70
4-4-4 Pluies maximales journalières.....	71
4-5-Variations interannuelles des écoulements moyens et extrêmes	73
4 -5-1-Variation des débits annuels.....	73
4-5-2-Variations mensuelles des écoulements moyens et maximaux	76
4-5-3-Variabilité journalière de l'écoulement	77
4-6-Relation écoulement et pluie	78
4-6-1-A l'échelle annuelles	78
4-6-2-Relation mensuelle des pluies et écoulements mensuels, moyens et maximaux.....	80
4-6-3-Relation pluie débit a l'échelle journalière	82
4-7-Conclusion	84

Chapitre V :

Sensibilité de modèle GR4J

5-1-Introduction	87
------------------------	----

5-2-Structure et fonctionnement de modèle GR4J.....	87
5-2-1-Description mathématique.....	89
5-2-2-Fonction de production	90
5-2-2-1-Réservoir de suivi d'humidité du sol (fonction de production).....	90
5-2-3-Fonction de transfert	93
5-2-3-1-Hydrogrammes unitaires	93
5-2-3-2-Fonction d'échange	94
5-2-3-3-Réservoir de routage (Fonction de transfert)	95
5-2-4-Ecoulement total	95
5-3-Optimisation des paramètres de modèle GR4j	95
5-4-Analyse de la réponse du bassin de oued Ouahrane au couple pluie débit	96
5-4-1-Type de crue.....	97
5-4-2-Structure du hyétogrammes de pluie l'hydrogramme de débit.....	98
5-4-3-Décalage temporel entre le pic de pluie et le pic de débit.....	100
5-5-Test de sensibilité des paramètres de GR4J.....	101
5-5-1-Paramètre de la fonction de production X_1	101
5-5-2-Paramètre d'échange souterrain X_2	102
5-5-3-Paramètre de capacité de routage X_3	103
5-5-4-Paramètre de temps de base de l'hydrogramme unitaire X_4	104
5-6-Sensibilité du modèle aux conditions initiales	105
5-6-1- Taux de remplissage initial du réservoir de production (S_0/X_1)	105
5-6-2- Taux de remplissage initial du réservoir routage (R_0/X_3).....	107
5-7-Conclusion	108

Chapitre VI :

Calage de modèle et prédétermination des crues

6-1-Introduction	111
6-2- Procédures de calage	112
6-2-1 Période de mise en route.....	112
6-2-2-Période test	112
6-2-3- Critères d'évaluation du modèle	112
6-3- Application sur le logiciel GR4J.....	113
6-3-1- Calage de modèle	113
6-3-2-Analyse des résultats	114
6-4- Réponse de fonction d'échange souterrain.....	115
6-4-1-Changement du fonctionnement du modèle (fonction d'échange souterrain)	115
6-4-2-Teste de validation de la nouvelle formulation de modèle	116
6-5-Prédétermination des débits de crue	122
6-5-1- Prédétermination de débit par l'approche d'un modèle pluie débit de GR4J	122
6-5-1-1-Prédétermination des débits de points	124
6-5-1-2-Correction de débit simulé	126
6-5-1-3-Vérification des résultats	127
6-5-2- Prédétermination de débit de pointe par l'approche Méthodes sommaires (Méthode rationnelle)	130
6-6-Conclusion	134
Conclusion générale	137
Bibliographie	139

Dédicace

Je dédie ce travail

**A mes parents qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire par leur encouragement et leur soutien moral, que Dieu leur accorde la santé et le bonheur.*

**A mon frère Mohamed*

**A mes soeurs*

**A tous mes amis de :*

-Hôpital Mustapha Bacha à Alger et spécialement Pr Fodhil

Dr Karach, Aziza et Akila

-Centre universitaire de Khemis Miliana et spécialement Mounia Fethia et Zahia

*-Université de Hassiba Ben Bouali promotion magister
2005/2006.*

Zekouda Naima

Remerciements

Toute ma reconnaissance et mon respect vont à, Mr EZZIANE Karim, maître de conférences de UHB Chlef, qui a accepté de diriger ce travail et surtout pour la confiance qu'il m'a gracieusement accordée lors de ce travail. Il m'a fait bénéficier de son savoir et de son expérience. Il a su par ses idées, ses conseils, ses explications et ses critiques conduire ce travail à sa fin.

Je tiens à remercier aussi le co-promoteur Mr REMAOUNE Mohamed, maître de conférences de UHB Chlef, pour avoir accepté de suivre ce travail et apporter son aide précieuse. Il n'a jamais hésité à m'aider, non seulement par ses idées scientifiques mais aussi par sa compréhension, ses connaissances surtout les démarches concernant logiciel GR4J.

Je remercie chaleureusement Mr C.Perrin, chercheur au Cemagref d'Antony, Il a contribué à améliorer la qualité de ce travail par ses idées et ses encouragements, ses orientations et sa documentation. Il n'a pas hésité à répondre de mes questions et supporter surtout mes fautes d'orthographe. Je salue chez lui sa modestie et son accessibilité permanente.

SAAD HAMOUDI Abdelamir, Professeur à UHB Chlef, notre enseignant en post-graduation qui a accepté de présider cette soutenance. Je lui exprime ma sincère reconnaissance de son aide documentaire notamment durant l'année théorique.

J'adresse toute ma gratitude à monsieur REMINI Boualem professeur à USD Blida, notre enseignant en post-graduation pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je tiens à remercier monsieur Hamid BEN AOUDA maître assistant A, à l'université de Hassiba Ben Bouali Chlef d'avoir accepté de faire partie de mon jury .

Notre gratitude à Melle KHELFAOUI Mounia maître assistante à CUKM de son aide surtout la correction des fautes d'orthographe et ses encouragements ; Mr AISSET Djilali magister en hydraulique de son aide et de son orientation surtout concernant les démarches de GR4J, Mr MEHAIGUENE Madgid maître assistant au C.U.K M pour son aide.

Notre devoir aussi de présenter nos remerciements aux services étatiques qui nous ont porté aide pour l'acquisition des données hydro-climatiques sur le bassin de oued Ouahrane. L'agence nationale des ressources hydriques : A.N .R.H (Blida ; Alger).

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, à tous ceux qui m'ont encadré, à tous ceux qui m'ont encouragé, à tous ceux qui m'ont accordé leur confiance, à tous ceux qui m'ont montré leur intérêt, à vous tous MERCI.

Liste des figures :

Figure 1-1 : Répartition des précipitations sur un bassin versant	6
Figure 1-2: Deux situations distinctes ou la nappe peut contribuer au débit de la rivière (a) et la nappe peut drainer le cour d'eau (b)	7
Figure 1-3 Types des écoulements de surface.....	8
Figure 1-4 : principaux processus d'écoulement superficiel et souterrain (Amboise 98).....	10
Figure 1- 5 : Réponse hydrologique du bassin versant.....	12
Figure 1-6: Influence de la forme de bassin versant sur Hydrogramme de crue.....	13
Figure 1-7 Représente les cinq cheminements on distinguant par Dunne (1978).....	17
Figure 1-8 : Transformation de la pluie en Hydrogramme de crue.....	17
Figure 1- 9 : Analyse des événements pluies débits, Roche [1963].....	19
Figure 1-10 : Variabilité de régime a l'échelle spatiale (deux Hydrogrammes d'une même crue observée à l'amont et à l'aval)	21
Figure1-11: Impact de l'homme sur la variation de régime hydrologique	22
Figure 2-1 : Représentation schématique d'un modèle hydrologique.....	27
Figure 2-2 : Classification des modèles propose par Gaume (2007)	34
Figure 2-3 : Intérêt d'un modèle pluie-débit	39
Figure 2-4 : Structure de modèle SHE.....	41
Figure 2-5 : Structure de modèle TOPMODEL.....	42
Figure 2-6 : Structure générale du modèle GR4j.....	44
Figure 3-1 : Image satellite de bassin d'étude	48
Figure 3-2 : Situation géographiques du bassin de oued Ouahrane.....	48
Figure 3-3: Localisation du bassin de oued Ouahrane dans le bassin du moyenne Cheliff (REMAOUN. M 2007).....	49
Figure 3-4 : Carte géologique du bassin de oued Ouahrane.....	51
Figure 3-5 : Reliefs de bassin de oued Ouahrane.....	52
Figure 3-6: Rectangle équivalent à trois dimensions de oued Ouahrane.....	53
Figure 3-7: Carte d'altimétrie du bassin du oued Ouahrane.....	53
Figure 3-8: Courbe Hypsométrique du bassin versant de Oued Ouahrane.....	54
Figure 3-9 : Carte des pentes du bassin de oued Ouahrane.....	56
Figure 3-10 : Profil en long de Oued Ouahrane.....	57
Figure 3-11 : Carte du réseau hydrographique du bassin de oued Ouahrane.....	57
Figure 3-12 : Carte de lithologie de oued Ouahrane.....	59
Figure 3-13 : Carte d'occupation du sol du bassin de oued Ouahrane.....	60
Figure 4-1 : Double cumulée de pluie annuelle entre Bénairia et Oued Farès.....	65
Figure 4-2 : Carte de pluviométrie de bassin de oued Ouahrane.....	67
Figure 4-3: Variation de la pluie annuelle du bassin de oued Ouahrane (72/73 05/06).....	69
Figure 4-4 : Ajustement des précipitation annuelles des deux stations (loi de Gauss).....	70
Figure 4-5 : Variations de la précipitation mensuelle du bassin de oued Ouahrane	71
Figure 4-6 : Ajustement de la loi de Gumbel des pluies Journalières maximale.....	73
Figure 4-7 : Variation des débits interannuelles entre (83/84-02/03) de Ouled Farès.....	73
Figure 4-8: Ajustement de débit moyenne annuelles de station de Ouled farès entre (83/84-02/03).....	75
Figure 4-9 : Variation des débits mensuelles (moyens et maximaux).....	77
Figure 4-10: Variation journalière du débit du bassin de oued Ouahrane	78
Figure 4-11 : Variation des pluies annuelles en fonction des écoulements moyennes Annuelles (station de Ouled Farès et Bénairia).....	79
Figure 4-12 : Écoulement moyen annuel en fonction de la pluie (station de Ouled Farès et de Bénairia).....	80
Figure 4-13 : Les valeurs des pluie et des écoulements mensuelles moy entre (83/03) de station de Ouled farés.....	81
Figure 4-14 : Corrélacion (max et moy) d'écoulement mensuelle	

<i>en fonction de pluie mensuelle(s. de Ouled Farès).....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 4-15 : Variation des pluies) et des écoulements journalières maximaux.....</i>	<i>83</i>
<i>Figure 4-19 Corrélations des pluie et écoulement journalières maximaux.....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 5-1 : Organigramme du model GR4J.....</i>	<i>89</i>
<i>Figure 5-2 : Fonctionnement de réservoir de vidange</i>	<i>92</i>
<i>Figure 5-3 : Crue provoqué par un succession des pluies intenses (période humide)</i>	<i>97</i>
<i>Figure 5-4 : Crue provoqué pluies intenses et isolées (crue de période sèche).....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 5-5 : Hyétogrammes de pluie et de l'hydrogramme de crue sont similaires.....</i>	<i>98</i>
<i>Figure 5-6 : Pic de débit est indépendant de l'intensité de la pluie.....</i>	<i>99</i>
<i>Figure 5-7 : Débit journalier et pluie journalière des deux stations.....</i>	<i>100</i>
<i>Figure 5-8 : Les pics de pluie et les pics de débit sont dans le même jour</i>	<i>100</i>
<i>Figure 5-9 : L'influence du paramètre de capacité de production du sol sur l'hydrogramme de crue.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 5-10 : Influence du paramètre d'échange sur l'hydrogramme de crue</i>	<i>103</i>
<i>Figure 5-11 : Influence du paramètre capacité de routage sur l'hydrogramme de crue</i>	<i>104</i>
<i>Figure 5-12 : Influence du paramètre temps de base de hydrogramme unitaire sur l'hydrogramme de crue.....</i>	<i>105</i>
<i>Figure 5-13 :L'influence de taux de remplissage initiale (S0/X1) sur l'hydrogramme de crue (période entre 1/10/2000 et 31/08/2002 S.ouled Farès).....</i>	<i>106</i>
<i>Figure 5-14 :L'influence de (S0/X1) sur l'hydrogramme de crue (a)début de période entre 1/10/2000 et 31/08/2002 (b) la fin de même période de S.ouled Farès).....</i>	<i>106</i>
<i>Figure 5-15 :L'influence de (R0/X3) sur l'hydrogramme de crue période entre 1/09/2001 et 31/08/2003 station de Bénairia).....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 5-16 :L'influence de (R0/X3) sur l'hydrogramme de crue (début de période entre 1/09/2001 et 31/08/2003S.Bénairia).....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 6-1: Hydrogrammes de crue de la période entre le 1/8/98 et 31/7/00(crue du 24/10/00)</i>	<i>114</i>
<i>Figure 6-1: Hydrogrammes de crue de la période entre le 1/8/98 et 31/7/00(crue du 24/10/00) ...</i>	<i>114</i>
<i>Figure 6-3: Nash et R² de la nouvelle fonction (1) et l'ancien fonction (2) des deux stations</i>	<i>118</i>
<i>Figure6-4: Variation du paramètre d'échange souterrain X2 avec la version GR4J de Perrin et la version modifier.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 6-5: Crue du 10-11-01 selon la station de Ouled Fares (Coefficient de Nash (Q)=85.1 et R2=0.42)</i>	<i>120</i>
<i>Figure 6-6: Crue du 18-12-99 selon la station de Ouled Farés (Coefficient de Nash (Q)=57.3etR2=0.56)</i>	<i>120</i>
<i>Figure 6-7: Taux de remplissage de S/X₁ de la crue du 5-2-87(X₁=172 mm) et de la crue de 10-11-2001(X₁=181 mm).....</i>	<i>121</i>
<i>Figure 6-8: Taux de remplissage de R/X₃ avec (X₃=2.7mm) pour les deux périodes (85/87et 2000/2001).</i>	<i>121</i>
<i>Figure 6-9:Taux de remplissage avec F=f(R/X₃) (a) et F=f(S/X₁) (crue de 24-10-00).....</i>	<i>122</i>
<i>Figure 6-10: Corrélation de débits journaliers entre 83et2003 du bassin de oued Ouahrane</i>	<i>124</i>
<i>Figure 6-11: Corrélation des débits de pointe observés et Simulés par le GR4J.</i>	<i>125</i>
<i>Figure 6-12: Corrélation de débit de pointe avec la correction de simulation.....</i>	<i>127</i>
<i>Figure 6-13 : Simulation de débit avec le GR4J de (Perrin et de modifier) période humide.....</i>	<i>128</i>
<i>Figure 6-14 : Simulation de débit avec le GR4J de (Perrin et de modifié) période sèche.....</i>	<i>128</i>
<i>Figure 6-15 Corrélations de débit de pointe par la version de perrin 2003 et perrin modifier.....</i>	<i>129</i>
<i>Figure 6-16: Vérification des résultats sur le bassin de oued Allala.....</i>	<i>129</i>
<i>Figure 6-17: Corrélation de débit de pointe du bassin de oued Allala.....</i>	<i>130</i>
<i>Figure 6-18: Corrélation de débit de pointe observé et celui calculé par la formule rationnelle.....</i>	<i>133</i>
<i>Figure 6-19 : Débit de pointe calculé par méthode rationnelle et modèles pluie-débit</i>	<i>113</i>

Liste des tableaux :

<i>Tableau 3-1 : Répartition des superficies en fonction des tranches d'altitude</i>	54
<i>Tableau 3-2 : Calcule indice de pente de (Roche)</i>	55
<i>Tableau 3-3 : de répartition des déférentes formations géologiques du bassin de oued Ouahran</i>	59
<i>Tableau 3-4 : Moy interannuelles des températures entre 1983 et 2003 du bassin de oued Ouahrane (ANRH Alger)</i>	61
<i>Tableaux 3-5 Moyennes interannuelles des évapotranspirations entre 1983 et 2003 du bassin de oued Ouahrane (ANRH Alger)</i>	61
<i>Tableau 3-6 Synthétique de deuxième chapitre</i>	62
<i>Tableau 4-1 : Coordonnées des stations pluviométriques et hydrométriques</i>	64
<i>Tableau 4-2 : Estimation de la lame d'eau précipitée (197271- 2003/04)</i>	66
<i>Tableau 4-3 : Pluie annuelle de oued Ouahrane</i>	68
<i>Tableau 6-4 : Paramètres statistiques des pluie de oued Ouahrane</i>	69
<i>Tableau 4-5 : Estimation des précipitations annuelles pour différentes fréquence</i>	70
<i>Tableau 4-6 : Indice saisonnier des pluies sur le bassin de oued Ouahrane</i>	71
<i>Tableau 4-7 : Pluie journalières maximum entre (72/06) des stations de Ouled Farès et Bénairia</i>	72
<i>Tableau 4-8 : Valeurs de variables réduite de Gumbel</i>	72
<i>Tableau 4-9: Variation interannuelle des débits moyens et maximaux de la station de Ouled Farès</i>	74
<i>Tableau 4-10 : les débits Moyens et maximaux mensuels interannuels (Ouled farès83/84).</i>	76
<i>Tableau 4-11 : Variation des écoulement moyenne annuelles en fonctions des pluie annuelles des deux stations (83/03)</i>	79
<i>Tableau 4-12 : Valeurs des pluie et des écoulements mensuelles .max, moy entre (83/03) de station de Ouled farès</i>	80
<i>Tableau 4-13 : Bassin du oued Ouahrane (1983-2003) : répartition des pluies maximales journalières et de l'écoulement maximal journalier</i>	84
<i>Tableau 5-1 : Moyenne journaliers de l'évapotranspiration potentielle de chaque mois de la période entre 1983 à2003 (ANRH Alger)</i>	101
<i>Tableau 6-1: Résultats du calage pour les différentes crues avec la version de (Perrin et al. 2003)</i>	113
<i>Tableau 6-2 : Résultats de calage pour différentes valeurs de «n»de la nouvelle fonction d'échange souterrain</i>	117
<i>Tableau 6-3 : résultats de calage avec la nouvelle fonction d'échange souterrain pour n =3.5</i>	119
<i>Tableau 6-4 : Moyennes, médianes et écart-types des paramètres.</i>	123
<i>Tableau 6-5 : Débit de pointe observé et le simulé par le GR4J</i>	125
<i>Tableau 6-6 : Médianes des paramètres du crue de période sèche</i>	126
<i>Tableau 6-7 : Débit simulé par GR4j de crue de période sèche</i>	127
<i>Tableau 6-8 : Valeurs des paramètres (médiane) du bassin de oued Ouahrane. Version de Perrin et Perrin modifier</i>	128
<i>Tableau 6-9 : Valeurs de coefficients d'écoulement pour différents types et couvertures de sol</i>	131
<i>Tableau 6-10 : Paramètres spécifiques nécessaires à l'application de ces quatre formules</i>	132
<i>Tableau 6-11 : Résultats du temps de concentration calculés par les quatre formules</i>	132
<i>Tableau 6-12 : Résultats des débit de pointe calculer par les quatre formules des deux stations Pluviométriques</i>	133

الملخص

إن تقديرات التدفق الفيضانات العنيفة تعاني الكثير من الغموض ونقص المعطيات (القياسات الميدانية) تعكس جانبا من هذا الأخير. كل المؤشرات البشرية و المادية تؤكد مدى اهتمامها بالفيضانات العنيفة المفاجئة و القوية خاصة و أن الخسائر الناتجة عن الغمر هي غالبا في ارتفاع مستمر. قمنا باقتراح طريقة النمذجة لأجل التقدير المسبق لتدفق الفيضانات العنيفة و ذلك بعد دراسة مختلف المسالك الهيدرولوجية لاسيما تلك المسؤولة عن تكوين الفيضانات العنيفة متبوع بدراسة مختلف النماذج الهيدرولوجية المستخدمة لتحويل التساقط إلى تدفق. التحليل الزمني والمكاني لظاهرة الفيضانات بين في اغلب الحالات مدى ارتباطها بعنصر التساقط كعامل منشئ و متحكم في سعة الفيضانات العنيفة و امتدادها المجالي. و من بين هذه النماذج نجد النموذج التصوري التجريبي الإجمالي الذي يوضح العلاقة ما بين التساقط و التدفق و ذلك بتتابع مختلف الخزانات وهو نموذج يعتمد على أربع معاملات, ميزة و صلابة هذا النموذج تظهر في إمكانية اختبار و تغيير بنيته و ذلك تبعا للمميزات الحوض و نظام سيالته. كما يمكننا هذا النموذج بتقدير المسبق للتدفق الفيضانات العنيفة للأحواض التي لم يتم بها قياس التدفق.

الكلمات المفتاح: الهيدرولوجيا، النمذجة الرياضية، فيضان عنيف، واد وهران، تدفق فيضي، نموذج GR4J

Résumé

L'estimation des débits de crues souffre de nombreuses indéterminations. Le manque de données explique en partie cette méconnaissance. Les enjeux humains et matériels justifient qu'on s'intéresse aux crues soudaines et violentes avec les dommages dus aux inondations sont en constante augmentation. Nous proposons une méthodologie de modélisation pour la prédétermination de débit de crue. Après une étude des différents processus hydrologiques principalement responsables de la genèse de crues et les différents modèles hydrologiques existant pour la transformation de la pluie en débit l'analyse spatio-temporelle du phénomène des crues a fait ressortir dans la plupart du temps leur étroite liaison avec les pluies, notamment les séquences maximales : facteur générateur et déterminant de l'amplitude et de l'expansion des crues. Parmi ces modèles on trouve le modèle conceptuel ou empirique global qui représente le lien entre la pluie et le débit par des agencements variés de réservoirs, c'est un modèle qui comporte 4 paramètres. L'avantage et la robustesse de notre modèle est de tester et de changer sa structure suivant les caractéristiques du bassin et le régime du bassin, comme on peut envisager de prédéterminer les débits de crue des bassins versants et d'étudier le cas des bassins versants non jaugés.

Mots clés : hydrologie, crue, oued Ouahrane, modélisation mathématique, débit de pointe modèle GR4

Abstract

The estimate of the flows of rising suffers from many indeterminations. The lack of data explains this ignorance partly. The human and material stakes justify that one is interested in the risings sudden and violent as much as the damage due to the floods are in constant increase. We propose a methodology of modeling for the predetermination of flow of rising. After a study of the various hydrological processes mainly responsible for the genesis of raw follow-up by the study of different hydrological models existing for the transformation from the rain into flow, the space-time analysis from the phenomenon of the risings emphasized their close connection with the rains, generating factor and determining amplitude and expansion of the risings. Among these models one finds the model conceptual or empirical total which represents the bond between the rain and the flow by varied fittings of tanks, it is a model comprising 4 parameters. The advantage and the robustness of our model is to test and to change its structure according to the characteristics of the basin and the mode of the basin, one can plan to predetermine the flows of raw basins slopes and to study the case of the basins not measured slopes.

Key Words: *hydrology, flood, oued Ouahrane, modelling mathematic, top of the flow, model GR4J*

Introduction générale et problématique

La gestion de l'eau est d'une importance capitale dans le développement de l'occupation du territoire, elle pose des problèmes d'usage, de pénurie et d'inondation. Nous nous sommes intéressés à ce dernier problème qui constitue le premier risque parmi les autres catastrophes naturelles.

Entre les années 1985 et 2003, les pertes humaines dues aux catastrophes naturelles des inondations (événement brutal entraînant des dégâts humains et socio-économiques) ont augmenté de 60 %, cette augmentation est essentiellement attribuée au réchauffement de la planète et à la mauvaise gestion des espaces urbains.

Entre 1994 et 2004, les catastrophes naturelles ont touché 2,5 milliards de personnes et ont causé le décès de 478100 personnes et des pertes économiques estimées à 690 milliards de dollars. Ces catastrophes des inondations demeurent et dévastatrices, touchant plusieurs pays à travers le monde.

Similairement aux autres pays du monde, le passif de l'Algérie a été marqué par de nombreuses inondations. Au cours de la décennie écoulée, les inondations en Algérie sont les plus meurtrières que celles survenues dans les pays du bassin méditerranéen. On peut citer la pluie diluvienne du 10 novembre 2001 survenue à Bab El Oued entraînant près de 735 victimes et plus de 30000 de sans abris et d'importants dégâts matériels.

La gestion du risque d'inondation demande des méthodes qui conduisent à des modèles de prédétermination des débits essentiellement utilisés lorsque les observations historiques sont absentes ou insuffisamment nombreuses.

Le cours d'eau constitue, dans cette démarche d'appréhension des hydro systèmes, un objet d'intérêt privilégié, en raison de l'accès aisé qu'il offre à la ressource. La connaissance de son débit est aujourd'hui un instrument indispensable à la gestion des systèmes aquatiques notamment pour la prévision de débits, la gestion d'ouvrages de retenue et le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques.

De nombreuses recherches se sont donc attachées, depuis plus d'un siècle, à essayer de comprendre les processus de génération des débits et le fonctionnement du bassin versant qui représente l'entité hydrologique de production et de concentration des écoulements. Le moyen, pour arriver à comprendre la génération des débits et à établir des simulations, est de remonter jusqu'à leurs causes premières qui sont les pluies.

Introduction générale et problématique

Ainsi, on a essayé d'appliquer un modèle permettant d'obtenir une représentation simplifiée et facilement utilisable de ce lien entre pluie et débit. Cependant, comme d'autres disciplines s'attachant à comprendre et à représenter des systèmes naturels, la modélisation pluie-débit et plus généralement l'hydrologie continentale sont confrontées à la difficulté d'appréhension des systèmes étudiés du fait de leur complexité intrinsèque. Leurs caractéristiques spatiales sont très hétérogènes où de nombreux facteurs influencent leur dynamique temporelle et leur observation reste encore aujourd'hui difficile et coûteuse.

Notre travail de recherche s'inscrit comme une vision de gestion du risque lié aux crues. Il a pour vocation de fournir de nouveaux éléments d'analyse aux décideurs au cours de la phase de prévision des inondations dans le domaine de la modélisation de la transformation de pluie en débit et de sa représentation à l'échelle du bassin versant. Son objectif principal est d'améliorer les méthodes de la prédétermination du débit de pointe par une adaptation au bassin versant de oued Ouahrane.

Dans ce mémoire, nous allons fournir quelques éléments de réponse à la problématique de la prédétermination des débits de crues.

- ❖ Dans un premier temps selon le chapitre 1, nous allons tenter de comprendre quels sont les processus physiques susceptibles d'être responsables de la genèse des crues ainsi que la variation de régime hydrologique à l'échelle temporelle et spatiale.
- ❖ Puis, nous présentons dans le chapitre 2, les différents modèles déjà existants sur la modélisation pluie débit utilisée pour la prédétermination des débits (écoulements) et nous testerons la potentialité de quelques uns de ces modèles
- ❖ Le chapitre 3 examine les principales caractéristiques du bassin versant de oued Ouahrane, qui a été choisi comme bassin d'application de notre travail pour la diversité et la disponibilité des données, malgré l'absence quasi-totale d'études. De plus, on présente les données du milieu physique disponibles et l'interprétation que nous pouvons en faire relativement au fonctionnement hydrologique de ce bassin versant.
- ❖ La présence du chapitre 4, aura pour objectif d'étudier les écoulements extrêmes des crues et leurs places dans les écoulements moyens. On va tenter d'extraire les rapports relatifs et potentiels entre les pluies en tant que facteur fondamental et générateur des crues à des niveaux temporels décroissants; échelle annuelle, mensuelle et journalière, pour essayer de comprendre le mécanisme du phénomène extrême et le comportement hydrologique du bassin versant.

Introduction générale et problématique

- ❖ On a essayé dans le chapitre 5 de présenter les formules mathématiques des quatre paramètres du modèle GR4J et leurs influences sur la prévision des crues ainsi que celles engendrées par la variation des conditions initiales. Avant d'étudier la sensibilité des paramètres, il faut d'abord tester le couple pluie-débit observé au moment des fortes crues enregistrées pour comprendre la réponse du bassin versant. Le choix du modèle GR4J définitif dans notre étude a été très délicat, du fait des niveaux de performance assez semblables atteints par plusieurs structures. La version du modèle GR4J nous permet de faire des modifications de la structure où de nombreuses versions ont donné des résultats assez proches.

- ❖ Enfin, dans le dernier chapitre nous développerons une modélisation adaptée à la prédétermination des crues avec une étude comparative avec la méthode rationnelle. Après avoir défini et testé le modèle, nous avons utilisé, après modification de certains paramètres (X_2), le modèle conceptuel à réservoir fonctionnant en continu au pas de temps journalier; le GR4J (modèle du Génie Rural) fondé sur l'hydrogramme unitaire de transformation pluies-débits. Une approche est alors proposée utilisable sur des bassins non jaugés.

Conclusions générales

Conclusions générales

L'objectif général de ce travail était de parvenir à proposer une approche méthodologique pour la prédétermination des débits de crue des petits bassins versants.

Ce contexte particulier nous a confronté à la problématique des bassins peu ou pas jaugés dans lesquelles les modèles hydrologiques classiques ne trouvent que difficilement leur place. Il ne s'agit pas donc d'exposer ce qu'il aurait été possible de faire avec suffisamment d'observations, mais bien de développer une méthodologie de modélisation à partir des rares observations disponibles.

Notre point de départ dans le chapitre 1 était constitué par les synthèses hydrologiques existant sur la genèse des crues se heurte donc à un premier problème, qui est lié à l'identification des processus déterminants dans la formation des crues. Un second problème est celui de la description du milieu, et de l'obtention des caractéristiques mises en jeu par les processus identifiés. Ces caractéristiques sont différentes d'un processus à l'autre ; on s'intéressera par exemple uniquement à la surface dans le cas d'un processus hortonien. De façon générale, la variabilité spatio-temporelle de ces caractéristiques est difficile à appréhender.

Les discussions présentées au chapitre 2 font ressortir que de tels modèles semblent actuellement les plus aptes à apporter des réponses à une grande partie des questions d'hydrologies opérationnelles dans les domaines de la gestion de la ressource en eau, de la prévision des risques et de l'ingénierie hydrologique. Comme d'autres types de modèles, ils sont cependant encore peu capables de prévoir des effets de changements d'occupation des sols ou de climat. Par ailleurs, leur caractère global, qui leur permet de se soustraire aux problèmes de prise en compte de la forte hétérogénéité spatiale du bassin, ne leur permet pas de représentations des flux ou des chemins de l'eau au sein du bassin. Il implique par ailleurs une détermination numérique (calage) de leurs paramètres qui n'ont pas de signification physique a priori. Nos recherches se sont plus particulièrement intéressées au modèle du Génie Rural (GR), succédant ainsi à celles réalisées autour de *Claude Michel par Edijatno (1991)*, *Yang (1993)*, *Makhlouf (1994)* et *Nascimento (1995)*.

Par ailleurs, le travail d'analyse doit être appliqué sur le bassin versant de Oued Ouahrane où nous avons la possibilité de reconnaître les éléments du terrain importants du point de vue de la nature (la morphologie et la climatologie) et de l'hydrologie des bassins qui représente les

caractéristiques valorisant l'écoulement superficiel. Pour comprendre les liens entre les caractéristiques physiques et climatiques et les réponses hydrologiques des bassins (Chapitre 3). Au-delà des résultats présentés au chapitre 4 et rappelés ultérieurement dans cette conclusion, nous retiendrons que l'originalité de l'approche privilégiée dans le cadre de notre travail découle dans la spécificité de la relation pluie-débit. Cette spécificité s'explique par étude hydropluviométrique des données observées de notre bassin versants et ayant un intérêt de comprendre les caractéristiques des écoulements en fonction des pluies à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière, en relation avec les caractéristiques physiques les plus générales des bassins.

Nous sommes en mesure de proposer suivant le chapitre 5, un modèle pluie-débit plus fiable et plus robustes capable de représenter la réponse hydrologique de notre bassin versant, GR4J (*version de Perrin et al 2003*). Nous avons regroupé les formulations mathématiques des quatre paramètres du modèle correspondant à la fonction de production et la fonction de transfert qui représentent les processus de génération des débits. Afin de comprendre le fonctionnement du modèle, on a testé sa sensibilité par rapport à chaque paramètre comme on a testé les données des couples pluie-débit observés à l'échelle journalière des événements importantes.

Les progrès accomplis durant le chapitre 6 dans l'application du calage de modèle GR4J journalier ne doivent cependant pas occulter les points d'interrogation qui subsistent. Notamment quand ce dernier représente un échange souterrain très élevé sachant que notre site d'étude représente une lithologie d'un sol marneux et argileux (plus de 40%). Dans notre démarche de modifications de la structure qui est basée sur le changement de la fonction d'échange souterrain, pour atteindre à se rapprocher vers une représentation des caractéristiques de notre bassin versant et son régime hydrologique. Nous avons naturellement souhaité utiliser le modèle issu de l'analyse des données pour la prédétermination des débits de crue en comparaison avec les méthodes sommaires souvent employés (méthode rationnelle). Il s'agit en fait d'extrapoler la réponse hydrologique des petits bassins versants pendant des événements l'extrême puis de la traduire par des valeurs des paramètres du modèle pluie-débit à partir des résultats de calage.

Bibliographie

- AISSET Djilali (2006)**, Crues et sécheresses en Algérie, impact sur l'environnement Cas du Moyen Cheliff, thèse de Magister, UHB Chlef, 116p.
- ALEXANDRA Lequien (2003)**, Analyse et évaluation des crues extrêmes par modélisation hydrologique spatialisée. Cas du bassin versant du Vidourle, DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, Université Montpellier II, 67 p.
- AMBROISE, B. (1998)**, La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles. **H*G*A* (Ed.)*, Bucarest, 206 p.
- ALI AGOUMI (2003)**, Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques Besoin réel et urgent d'une stratégie d'adaptation et de moyens pour sa mise en œuvre IISD (International Institute for Sustainable Development) 161, avenue Portage est 6e étage Winnipeg (Manitoba) Canada R3B 0Y ,14 p.
- ANDRÉ Musy, CHRISTOPHE Higy (1998)**, Hydrologie appliquée ; **H*G*A* (Ed.)*, Bucarest, 368 p.
- ARNAUD P., (1997)**, Modèle de Prédétermination des crues basées sur la simulation stochastique des pluies horaires. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, 277 p.
- ARTHUR Marchandise (2007)**, Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques ; thèse e pour obtenir le grade de docteur de l'université Montpellier II, 214 p.
- BENJAMIN Graff (2004)**, Prédétermination des débits de crue des petits bassins versants torrentiels thèse de doctorat de l'université Montpellier II ; 376p.
- BENKHALED Abdelkader (2006)**, Contribution à l'étude du transport solide en suspension. Bassin de oued Ouahrane bassin hydrographique Cheliff –Zahraz ; Thèse de doctorat en science, USTMBO, 175p.
- BIDALOT Yvan (2000)**, Impacts du changement climatique sur les milieux montagnards Mémoire Examen final - Accompagnateur en moyenne montagne, 43 p
- BOUDHRAA Houda (2007)**, Modélisation pluie-débit a base Géomorphologique en milieu semi-aride Rural tunisien : association d'approches Directe et inverse ; Thèse de doctorat en sciences agronomiques institut national agronomique de Tunisie 227p.
- BOULGHOBRA Nouar(2006)**, Protection de la ville de Skikda contre l'inondation essai de PRPR thèse de magister de magister en aménagement des milieux physiques, option " dynamique des milieux physiques et risques naturels" université de Batna, 179p.
- CERNESSON F., (1993)**, Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courantes à rares sur petits bassins versants méditerranéens. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, 240 p.
- CLAUDIA Rojas Serna (2005)**, Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ? Thèse de doctorat de L'ENGREF, 320 p.
- DUBREUIL.P (1974)**, Initiation à l'analyse hydrologique Masson Cie Orstom Paris, 224p.

- EDIJATNO, NASCIMENTO, N.O., YANG, X., MAKHLOUF, Z. et MICHEL, C. (1999)**, GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, **44**(2), pp 263-277.
- EDIJATNO et MICHEL C., 1989**, Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n° 2, pp.113-121.
- EDIJATNO (1991)**, Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur/ENGEES, Strasbourg, 242 p.
- EMMA HAZIZA (2003)**, Modélisation mensuelle pluie-debit/ apports de la spatialisation- cas des données de sols Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental Université Montpellier II, 90 p.
- ESTUPINA BORRELL Valérie (2004)**, Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair Application à de petits bassins versants du sud de la France ; thèse de doctorat Ecole Doctorale : Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace de l'institut national polytechnique de Toulouse, 254p.
- GAUME E., PAYRASTE O. et ROSA DA SILVA B., (2003)**, Analyse hydrologique des crues des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard, Rapport Cereve pour le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 94 p.
- GAUME Eric (2007)**, Hydrologie de versants et de bassins versants et modélisation pluie-débit (chapitres 2 et 3) école nationale des ponts et chaussées D.E.A science et technique de l'environnement ; 90p.
- GAUME Eric., (2002)**, Eléments d'analyse sur les crues éclairs. Thèse de doctorat de l'ENGREF, 305 p.
- HENINE Hocine (2004)**, Interfaçage entre un modèle hydrologique et modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluant les SIG ; mémoire de magister en hydraulique école nationale polytechnique, 114p.
- HREICHE Antoine (2003)**, Modélisation conceptuelle de la transformation pluie-débit dans le contexte méditerranéen ; thèse de doctorats de l'université Montpellier et l'université de Saint – Joseph, 257p.
- IDER Karim (2004)**. Modélisation hydrodynamique d'un cours d'eau application à oued Soummam ; mémoire de magister en hydraulique école nationale polytechnique ,124p.
- JAVELLE pierre (2001)**. Caractérisation du régime des crues de modèle débit-durée fréquence convergente approche locale et régionale ; Thèse pour obtenir le grade de docteur de recherche hydrologie hydraulique, Cemagref (Lyon) 277 p.
- JEAN-LUC Payan (2007)**, Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit, Doctorat de l'ENGREF à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts Centre de Paris, 256p.
- JORDAN Frédéric (2007)**, Modèle de prévision et de gestion des crues optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue pour l'obtention du grade de docteur ès sciences école polytechnique fédérale de Lausanne, 284 p.
- KABOUYA.M. (1990)**, Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 p.

- KREIS Nicolas (2004)**, Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d'inondation application a la vallée de la Thur (Haut-Rhin) ; thèse de doctorat Spécialité : Sciences de l'Eau à l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 350p.
- LEQUIEN A., (2003)**, Analyse et évaluation des crues extrêmes par modélisation hydrologique spatialisée : cas du bassin versant du Vidourle. Rapport de DEA de l'Université de Montpellier II, 61 p.
- MAKHLOUF, Zoubir. (1994)**, Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 p.
- MATHEVET Thibault (2005)**, Quels modèles pluie-debit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants thèse Pour obtenir le grade de Docteur de L'ENGREF à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts Centre de : Paris, 463p.
- MEBARKI Azzedine. (2005)**, Hydrologie des bassins de l'est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement, Thèse d'Etat, Université. Mentouri de Constantine 360p
- MICHEL, Charles. (1989)**, Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Cemagref, Antony.
- MIQUEL Jacques (2006-2007)**, Hydrologie statistique introduction a l'étude des processus hydrométéorologiques application a la prédétermination des débits de crues (chapitre 05) école nationale des ponts et chaussées D.E.A science et technique de l'environnement ; 41p.
- MOUELHI Safouane. (2000)**, Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel, annuel et interannuel. Rapport interne d'avancement, Cemagref, 58 p.
- MOUELHI Safouane (2007)**, Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier ; thèse de doctorats l'école Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 323p.
- MSTP, Mission scientifique technique et pédagogique (2007)** L'EAU : enjeux et perspectives de recherche France, 110p
- NAAIM Mohamed (2004)**, Simulation sur modèle réduit de l'influence d'un obstacle sur un écoulement à surface libre Application aux ouvrages de protection contre les avalanches de neige pour obtenir le grade de docteur de l'université Joseph Fourier, 196p.
- NASCIMENTO.N.O (1995)**, Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 p.
- NAULET Robin (2002)**, Utilisation de l'information des crues historiques pour une meilleure prédétermination du risque d'inondation. Application au bassin de l'Ardèche à Vallon Pont-d'Arc et St-Martin d'Ardèche. Pour obtenir les grades de Docteur de l'UJF et de Philosophie docteur de université du Québec _ institut national de la recherche scientifique eau-terre-environnement (INRS-ETE), 322p.
- PAUL Meylan ; ANDRÉ Musy (1999)**, Hydrologie fréquentielle Hydrologie appliquée ; *H*G*A* (Ed.), Bucarest, 415 p.
- PERRIN, Charles. Et LITTLEWOOD, I.G. (2000)**, A comparative assessment of two rainfall-runoff modelling approaches: GR4J and IHACRES, Proceedings of the Liblice

Conference (22-24 September 1998), V. Elias and I.G. Littlewood (Eds.), IHP-V, Technical Documents in Hydrology n° 37, UNESCO, Paris, pp 191-201.

-PERRIN .C, CLAUDE .M, VAZKEN A (2003), Improvement of a parsimonious model for stream flow simulation, journal hydrologique, (279), pp 275-289.

-PERRIN Charles (2000), Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparatif docteur de institut national polytechnique de Grenoble L' INPG, 527p.

-RAKEM, Y. (1999), Analyse critique et reformulation mathématique d'un modèle empirique pluie-débit (GR4J). Thèse de Doctorat, ENPC, 263 p.

REMAOUN Mohamed (2007), Crues et sécheresses en Algérie, Cas du Moyen Cheliff, thèse de doctorat d'Etat, USTHB, 240 p.

-RIBSTEIN Pierre (1990), Modèle de crues et petits bassins versants au Sahel éditions de l'ORSTOM institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération collection études et thèses paris, 305p.

-RIBSTEIN Pierre (1990), Modèle de crues et petits bassins versants au Sahel éditions de l'ORSTOM institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération collection études et thèses paris, 305p.

-ROCHE .P.A (1963), Hydrologie de surface Gauthier Villars ORSTOM, Paris, 430 p

-ROCHE .P.A (1987), Guide de prévision des crues ; ministère chargé de l'environnement ; direction des pollutions et des risques, 350p (tome 1).

-ROCHE .P.A (1987), Guide de prévision des crues ; ministère chargé de l'environnement ; direction des pollutions et des risques, 470p (tome 2).

-SERGE Bouchard (1986), Amélioration d'un modèle hydrologique déterministe et son application à la prévision des ruissellements du bassin du lac St-Jean. Mémoire présenté à l'université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la Maîtrise en ressources et système, 185p

Sites Internet

<http://www.cemagref.fr/webgr/>

<http://echo.epfl.ch/edrologie/>

<http://www.notreplanete.info>

<http://fr.wikipedia.org>