

Remerciements

Ce mémoire est l'aboutissement d'un travail effectué au sein du laboratoire Géo-Ressources & Environnement, sis à la faculté des sciences et techniques de Fès. Je tiens donc à remercier vivement tous les professeurs du laboratoire et le doyen de la faculté monsieur **Mustapha IJAALI**.

Le travail de recherche mené par un doctorant ne peut aboutir sans la direction, la collaboration et l'aide de plusieurs personnes qui en contribuent de près ou de loin. C'est à toutes ces personnes que j'adresse mes sincères remerciements et ma grande reconnaissance.

Je remercie tout d'abord mes directeurs de thèse monsieur **Abderrahim LAHRACH** et monsieur **Abdel-Ali CHAOUNI** pour la confiance, la patience et le temps précieux qu'ils m'ont accordé en acceptant de diriger cette thèse. C'est grâce à leur disponibilité, leurs directives précieuses, leurs recommandations pertinentes et décisives et surtout leurs qualités humaines d'écoute, de communication et de compréhension que ce travail de recherche a pu être réalisé.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail : monsieur **Abdelhadi EL OUALI** en tant que président, messieurs **Mohamed Najib ZAGHLOUL**, **Hassan TABYAOUI** et **Said BOUTALEB** en tant que rapporteurs et monsieur **Mohamed FAOUZI** en tant qu'examinateur. Toute ma gratitude pour le temps précieux que vous avez accordé à la lecture de ce mémoire, et surtout pour la qualité des remarques et des conseils pertinents et instructifs.

La réalisation de cette étude ne pourrait jamais être évidente sans la collaboration des services de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou, qui ont mis à notre disposition les données nécessaires. Je tiens donc à exprimer toute ma gratitude envers le personnel de l'ABHS, et à leur tête monsieur **Abdellah BOURAK**, chef de la division de développement et de gestion des ressources en eau, un expert du domaine que je considère avec fierté, à la fois un encadrant qui m'a tracé le chemin depuis les études fondamentales en licence, mais aussi un frère et un grand ami qui m'accompagne avec ses conseils, ses directives et son soutien moral et matériel.

Toutes les expressions de mes sentiments les plus chaleureux et distingués sont adressées à ma femme **Malika EL-HAMDOUNY**, non seulement pour son soutien, sa patience et son accompagnement, mais aussi pour sa contribution effective en tant que jeune chercheuse dans différentes étapes de l'élaboration de ce travail.

Finalement, je voudrais remercier ma famille, ma belle-famille, mes amis et mes collègues, ainsi que toute personne ayant contribué d'une façon ou d'une autre, de près ou de loin, dans l'élaboration de ce modeste travail.

Résumé

Le bassin de Sebou, situé au nord du Maroc, renferme presque le tiers des ressources en eau de surface du pays. Il se caractérise par un contraste marqué sous les deux plans physique et hydroclimatique, vu son vaste étendue et sa situation géographique à cheval entre des domaines nettement différents géomorphologiquement et géologiquement.

D'autre part, il s'agit d'un bassin très peuplé, abritant 6,8 millions d'habitants (RGPH 2014) répartis sur des agglomérations concentrées le long des principaux cours d'eau, d'où leur exposition au risque de crues et d'inondation. Cette situation, conjuguée aux effets des changements climatiques, rend de plus en plus compliqué, la tâche de la prévision et la gestion des crues dans le bassin.

L'objectif de ce travail de recherche est l'élaboration d'un modèle de prévision des crues, qui servira comme outil de gestion et d'aide à la décision. L'idée s'inscrit dans le cadre d'un essai d'amélioration et de modernisation des moyens actuels de suivi et de prévision hydrologique. On essaie de profiter de la révolution actuelle en matière d'acquisition des données hydroclimatiques et topographiques, et des automatismes de traitement offerts par les outils informatiques en perpétuel développement.

La méthodologie suivie lors de ce travail est basée essentiellement sur la modélisation hydrologique pluie-débit, la modélisation hydraulique et les SIG.

Le travail consistait dans un premier temps, à concevoir un modèle hydrologique pluie-débit à l'aide de l'outil HEC-HMS, ayant pour objet d'analyser le comportement hydrologique du bassin en crue. Les simulations effectuées ont permis de quantifier les apports des principaux sous bassins. Ainsi, les résultats ont montré que le bassin de l'Ouergha était à l'origine de la belle partie des apports de la plaine du Gharb. Sa contribution était de 47% et 62% durant les deux événements déc. 2009 et janv.-févr. 2010 respectivement.

Dans un deuxième temps, un modèle hydraulique a été élaboré en utilisant l'outil HEC-RAS. Il a permis de simuler la propagation de l'onde de crue dans le Sebou en aval du barrage Allal El Fassi, et d'en déterminer les paramètres nécessaires à la prévision et la gestion des crues. La simulation a révélé que la crue du 10-11 Octobre 2008 a parcouru les 60 km entre le barrage et la station dar Arsa en 8 heures. La vitesse d'écoulement a atteint plus de 5 m/s, alors que la profondeur maximale a dépassé 10m.

Les résultats de la modélisation hydraulique ont été exploités par la suite dans la délimitation des zones inondables au niveau du tronçon étudié. Ce qui nous a permis de mettre en évidence l'exposition de plusieurs infrastructures, douars et terrains agricoles au risque d'inondation.

Mots clés : bassin de Sebou, crues, prévision, modélisation hydrologique et hydraulique, SIG, HEC-HMS, HEC-RAS.

Abstract

The Sebou basin, located in northern Morocco, contains almost a third of surface-water resources of the country. It is characterized by a marked contrast under both physical and hydroclimatic plans, given its large area and its geographical situation between regions significantly different geomorphologically and geologically.

In addition, it is a very densely populated basin, with 6.8 million inhabitants spread over agglomerations concentrated along the main rivers, which explains their exposure to the risk of flooding. This situation, combined with the effects of climate change, complicates the prediction and the management of flooding in the basin.

The objective of this research is to develop a flood forecasting model, which will serve as a management and decision-making support tool.

The idea is an attempt to improve and modernize current means of monitoring and hydrological forecasting. We are trying to take advantage of the current revolution in hydroclimatic and topographic data production, and automatic processing offered by computer tools in perpetual development. The methodology followed during this work is essentially based on hydrological rainfall-runoff modeling, hydraulic modeling and GIS.

Firstly, the work consists in designing a hydrological rainfall-runoff model using the HEC-HMS tool, intended to analyze the hydrological functioning of the basin during floods. We carried out simulations to quantify the contributions of the main sub-basins. In a second step, a hydraulic model was developed using the HEC-RAS tool. It allowed simulating flood wave propagation in the Sebou downstream of the Allal El Fassi dam, and to determine the necessary parameters for flood forecasting and management (level, flows, speed, time, etc.).

The results of the hydraulic modeling were subsequently exploited to delineate the flood zones in the studied section. This allowed us to highlight the exposure of several infrastructures, douars and agricultural lands to the risk of flooding.

Keywords: *Sebou basin, flood, forecasting, hydrological and hydraulic modeling, GIS, HEC-HMS, HEC-RAS.*

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	II
Abstract	III
Table des matières	IV
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XIII
Liste des photos	XIV
Liste des Abréviations et des Acronymes	XV
Introduction générale	1

Première partie : Cadre général de l'étude

Introduction	5
--------------------	---

Chapitre I : Présentation du bassin du Sebou

1. Situation géographique et découpage administratif	7
2. Aperçu géologique	8
2.1. Le massif hercynien central	10
2.2. Le Moyen Atlas	12
2.2.1. Le Causse moyen-atlasique	13
2.2.2. Le Moyen Atlas plissé	15
2.3. Le Rif	16
2.4. Le sillon Sud-Rifain	17
3. Relief	23
3.1. Hypsométrie	23
3.2. Pente	24
4. Climatologie	25
4.1. Précipitations	25
4.2. Température	27
4.3. Evaporation	28
5. Hydrologie de surface	28
5.1. Réseau hydrographique du bassin	28

5.2. Aménagement Hydraulique	29
5.3. Analyse des apports	30
5.4. Régime hydrologique	32
5.5. La qualité des ressources en eau.....	32
6. Hydrogéologie	34
6.1. Le complexe Gharb-Mamora	36
6.1.1. La nappe de Mamora	36
6.1.2. La nappe du Gharb	36
6.2. Le système aquifère du Saïs	37
6.3. La nappe du couloir Fès-Taza	38
6.4. Les nappes du causse moyen atlasique.....	38
6.5. Les nappes du Moyen Atlas plissé	38
7. Aperçu socioéconomique.....	39
7.1. Population.....	39
7.2. Activités économiques.....	39
7.2.1. Agriculture	39
7.2.2. Industrie	40
7.2.3. Artisanat.....	40
7.2.4. Tourisme.....	40

Chapitre II : Gestion des ressources en eau du bassin du Sebou

Introduction.....	43
1. L'utilisation des ressources, les besoins et leur évolution	44
1.1. Le domaine de l'irrigation	44
1.2. Le domaine de l'alimentation en eau potable.....	45
1.3. Le domaine de la production de l'énergie hydroélectrique	46
1.4. La demande en eau industrielle	46
2. La gestion des ressources en eau	47
2.1. L'Agence du Bassin Hydraulique	47
2.2. Le Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau	48
2.3. Le Plan National de l'Eau.....	48
2.4. L'approche de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau	48
2.5. Les contraintes de la gestion des ressources en eau	49
2.5.1. Irrégularité spatio-temporelle des ressources en eau.....	49
2.5.2. Surexploitation des eaux souterraines	50
2.5.3. Sous-valorisation des ressources en eau.....	50

2.5.4. Erosion des bassins versants.....	51
2.5.5. Pollution.....	51
2.5.6. Inondations	52

Chapitre III : Problématique et objectifs de la recherche

Introduction.....	55
1. Problématique	56
1.1. Crue et inondation – Généralités	56
1.1.1. Définitions	56
1.1.2. Typologie des crues	57
1.1.3. Impact des crues	58
1.2. Crues et inondations dans le bassin de Sebou	59
1.2.1. Aperçu historique	59
1.2.2. Les types de crues et les zones concernées.....	59
1.2.3. Gestion des crues dans le bassin de Sebou	60
2. Objectifs de la recherche.....	62
Conclusion	63

Deuxième partie : Approche, Méthodologie et démarche

Introduction.....	65
-------------------	----

Chapitre I : Etude des crues – principaux approches et méthodes

Introduction.....	67
1. Prédétermination des crues extrêmes.....	68
1.1. Méthodes approximatives.....	68
1.1.1. La transposition	68
1.1.2. Les méthodes empiriques	69
1.1.3. Méthodes pseudo-empiriques	70
1.2. Méthodes déterministes	71
1.3. Méthodes statistiques.....	72
2. Prévion des crues.....	76
2.1. Les modèles hydrologiques	77
2.2. Les modèles hydrauliques	79
Conclusion	81

Chapitre II : Approche méthodologique et démarche suivie

Introduction.....	83
1. Méthodologie de la modélisation hydrologique	84
1.1. Présentation de l’outil HEC-HMS.....	84
1.2. Principe du calcul hydrologique par HEC-HMS.....	85
1.2.1. Fonction de production.....	86
1.2.2. Fonction de transfert.....	89
1.2.3. Débit de base	91
1.2.4. L’écoulement dans les cours d’eau.....	92
2. Méthodologie de la modélisation hydraulique et la délimitation des zones inondables.....	94
2.1. Présentation générale de l’outil HEC-RAS	95
2.2. Principes du calcul hydraulique par HEC-RAS	95
2.2.1. Modélisation en régime permanent	96
2.2.2. Modélisation en régime transitoire	99
2.3. Le coefficient de rugosité du sol (coefficient de Manning-Strickler)	100
3. Données utilisées et démarche suivie	100
3.1. Données utilisées	100
3.1.1. Données hydroclimatiques	100
3.1.2. Caractéristiques des barrages.....	100
3.1.3. Topographie.....	101
3.1.4. Autres données	103
3.2. Démarche de l’élaboration du modèle hydrologique	103
3.2.1. Préparation des données	103
3.2.2. Elaboration du modèle du bassin à l’aide de HEC-GeoHMS	105
3.2.3. Complétion du modèle hydrologique sous HEC-HMS	105
3.2.4. Lancement de la simulation et calage du modèle	105
3.2.5. Validation du modèle.....	107
3.3. Démarche de l’élaboration du Modèle hydraulique et de la cartographie des zones inondables.....	107
3.3.1. Préparation des données requises	107
3.3.2. Elaboration de la géométrie du modèle sous ARCGIS	107
3.3.3. Complétion du modèle sous HEC-RAS	110
3.3.4. Simulation et calage du modèle.....	110
3.3.5. Cartographie des zones inondables.....	110
Conclusion	111

Troisième partie : Présentation des résultats, interprétation et discussion

Introduction.....	113
-------------------	-----

Chapitre I : Présentation et discussion des résultats de la modélisation hydrologique

Introduction.....	115
1. Description du modèle hydrologique élaboré	116
2. Calage du modèle hydrologique	118
2.1. La branche de l'Ouergha	118
2.2. La branche du Beht.....	124
2.3. La branche principale du Sebou	130
2.4. La station de Belksiri.....	137
3. Validation du modèle hydrologique	140
3.1. La branche de l'Ouergha	140
3.2. La branche du Beht.....	144
3.3. La branche principale du Sebou	146
3.4. La station Belksiri.....	149
4. Synthèse et discussion des résultats de la modélisation hydrologique	150
Conclusion	152

Chapitre II : Modélisation de la propagation des crues dans le Sebou en aval du barrage Allal El Fassi

Introduction.....	154
1. Présentation du tronçon modélisé	155
2. Description du modèle hydraulique élaboré	156
2.1. Composantes physiques du modèle.....	156
2.2. Topographie utilisée	157
2.3. Conditions aux limites.....	158
2.4. Coefficients de rugosité.....	159
3. Résultats de la simulation hydraulique de l'événement d'octobre 2008	159
3.1. Calage du modèle	159
3.2. Description des résultats de la simulation de l'événement d'octobre 2008	162
4. Cartographie des zones inondables.....	168
Conclusion	172
Conclusion générale	174

Références bibliographiques	178
Annexes	186

Liste des figures

Figure 1. Situation géographique et découpage administratif du bassin versant de Sebou.....	7
Figure 2. Principales unités structurales du bassin du Sebou.	8
Figure 3. Carte géologique simplifiée du bassin du Sebou.....	9
Figure 4. Situation du massif central au sein de la meseta marocaine	10
Figure 5. Situation du Moyen Atlas.	13
Figure 6. Situation du domaine rifain.....	17
Figure 7. Situation du sillon sud-rifain.....	18
Figure 8. Situation du couloir Fès-Taza	19
Figure 9. Situation du bassin Fès-Meknès	20
Figure 10. Situation du bassin du Gharb et du plateau de Mamora	21
Figure 11. Topographie du bassin du Sebou. DEM issu de la mission ASTER GDEM	23
Figure 12. Carte des pentes du bassin de Sebou, élaborée à base d'ASTER GDEM.....	24
Figure 13. Carte des isohyètes du bassin du Sebou	26
Figure 14. Stations de mesures hydroclimatiques de l'ABHS dans le bassin du Sebou	27
Figure 15. Réseau hydrographique et grands barrages du bassin du Sebou	29
Figure 16. Variabilité interannuelle des apports en eau en millions de m3	31
Figure 17. Evolution des apports en eau de surface du bassin de Sebou entre 1939/40 et 2015/16 ..	31
Figure 18. Qualité globale des eaux de surface du bassin de Sebou (ABHS, 2013)	33
Figure 19. Répartition de la qualité des eaux de surface à l'échelle du bassin de Sebou.....	33
Figure 20. Carte des principales nappes au niveau du bassin du Sebou.....	35
Figure 21. Coupe géologique au niveau de la Mamora.....	36
Figure 22. Les zones irriguées dans le bassin de Sebou	44
Figure 23. Evolution du niveau piézométrique de la nappe profonde du Sais	50
Figure 24. Les composantes du risque	56
Figure 25. Les courbes d'alerte des barrages Al Wahda et Idriss 1er	61
Figure 26. Ajustement graphique selon la loi de Gumbel des PJMax observées au niveau de la station Khnichet sur la période 1970-2015	75
Figure 27. Les trois délais potentiels d'anticipation des crues.....	77
Figure 28. Propagation d'une onde de crue entre une section amont et une section aval.....	79
Figure 29. Interactions entre différentes composantes d'un système hydrologique. Processus générant l'écoulement à l'exutoire d'un bassin versant.....	85
Figure 30. Schématisation des deux fonctions de production et de transfert.....	86
Figure 31. Hydrogramme simplifié montrant les deux composantes principales, l'écoulement de surface et l'écoulement de base	91
Figure 32. Schématisation simplifiée du délai (lag).....	93
Figure 33. Représentation des termes de l'équation de l'énergie	96
Figure 34. Schématisation des termes du principe de la quantité de mouvement	98
Figure 35. Méthodologie suivie lors de la modélisation hydraulique	109
Figure 36. Modèle hydrologique élaboré sous HEC-HMS	116
Figure 37. Les branches du bassin du Sebou considérées lors de la présentation et l'analyse des résultats.....	117
Figure 38. Hydrogrammes simulé (Outflow) et observé (Observed Flow) à la station Bab Ouender - Evènement Décembre 2009	119

Figure 39. Hydrogrammes simulé et observé à la station Ain Aicha - Evènement Décembre 2009...	119
Figure 40. Hydrogrammes simulé et observé à la station Tabouda - Evènement Décembre 2009....	120
Figure 41. Hydrogrammes simulé et observé à la station Khnichet - Evènement Décembre 2009....	120
Figure 42. Comparaison des hydrogrammes optimisé et observé à la station Khnichet	122
Figure 43. Résultats de la simulation de l'évènement déc. 2009 au niveau du barrage Al Wahda	123
Figure 44. Hydrogramme simulé et observé à la station Souk El Had - Evènement déc. 2009	125
Figure 45. Hydrogramme simulé vs observé à la station Oueljet Soltane - Evènement déc. 2009	125
Figure 46. Comparaison des hydrogrammes optimisé et observé à la station Souk El Had	128
Figure 47. Comparaison des hydrogrammes optimisé et observé à la station Oueljet Soltane	128
Figure 48. Résultats de la simulation de l'évènement déc. 2009 au niveau du barrage Kansera.....	130
Figure 49. Hydrogrammes simulé et observé à la station Pont du Mdez - Evènement déc. 2009	131
Figure 50. Hydrogrammes simulé et observé à la station Azzaba - Evènement déc. 2009	131
Figure 51. Hydrogrammes simulé et observé à la station Dar El Arsa - Evènement déc. 2009	132
Figure 52. Hydrogrammes simulé et observé à la station Azib Soltane - Evènement déc. 2009.....	133
Figure 53. Comparaison des hydrogrammes optimisé et observé à la station Azib Soltane	135
Figure 54. Résultats de la simulation de l'évènement déc. 2009 au niveau du barrage Idriss 1er.....	136
Figure 55. Hydrogrammes simulé et observé à la station Belksiri - Evènement déc. 2009	137
Figure 56. Comparaison des hydrogrammes optimisé et observé à la station Khnichet.....	139
Figure 57. Hydrogrammes simulé et observé à la station Ain Aicha - Evènement de validation.....	140
Figure 58. Hydrogrammes simulé et observé à la station Khnichet - Evènement de validation	141
Figure 59. Résultats de la simulation de l'Evènement de validation au niveau du barrage Al Wahda	142
Figure 60. Hydrogramme simulé vs observé à la station Oueljet Soltane - Evènement de validation	144
Figure 61. Résultats de la simulation de l'Evènement de validation au niveau du barrage Kansera..	145
Figure 62. Hydrogrammes simulé et observé à la station Azib Soltane - Evènement de validation...	147
Figure 63. Résultats de la simulation de l'Evènement de validation au niveau du barrage Idriss 1er	148
Figure 64. Hydrogrammes simulé et observé à la station Belksiri - Evènement de validation	149
Figure 65. Situation du tronçon modélisé de l'Oued Sebou.....	155
Figure 66. Composantes physiques (Geometric Data) du modèle hydraulique élaboré	157
Figure 67. MNT élaboré sous ARCGIS à base du DEM AW3D30, corrigé localement par des levées topographiques	158
Figure 68. Historique des crues maximales enregistrées au barrage Allal El Fassi jusqu'à 2008.....	159
Figure 69. Hydrogrammes à l'entrée et à la sortie du barrage Allal El Fassi au cours de l'évènement d'Octobre 2008	160
Figure 70. Hydrogrammes de crue observés en amont et à l'aval du tronçon étudié au cours de l'évènement de Février 2008	161
Figure 71. Hydrogrammes simulé et observé dans la station Dar Arsa au cours de l'évènement 10-11/10/2008.....	162
Figure 72. Profil en long correspondant à la simulation l'évènement Oct. 2008.....	163
Figure 73. Comparaison de deux profils en travers l'un en amont et l'autre en aval	165
Figure 74. Zoom sur le profil en long montrant l'effet de barrage exercé par les deux ponts introduits dans le modèle	166
Figure 75. Hydrogrammes dans trois stations de l'oued Sebou montrant la propagation de l'onde de crue du 10-11/10/2008	167
Figure 76. Extension des zones inondables correspondantes à la crue d'Octobre 2008.....	168
Figure 77. Terrain agricole inondé en aval au niveau de la confluence du Sebou et Agay	169

Figure 78. Inondation de la station de pompage ONEP, et de la RN°8	170
Figure 79. Douars et terrains agricoles inondés en amont de Fès	170
Figure 80. Douars et terrains agricoles inondés en aval de Fès	171

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des grands barrages dans le bassin du Sebou.	30
Tableau 2. Prévision de l'évolution des superficies irriguées et de la demande en eau agricole du bassin de Sebou.....	45
Tableau 3. Evolution des besoins estimés en eau potables du bassin de Sebou	45
Tableau 4. Evolution de la consommation en eau des unités industrielles isolées	46
Tableau 5. Historiques des principaux événements d'inondation entre 1950 et 2009 dans le bassin de Sebou.....	53
Tableau 6. Les trois modèles numériques d'élévation DEM testés	101
Tableau 7. Les points de contrôle (stations hydrologiques et barrages) choisis au niveau de chaque branche du bassin.....	118
Tableau 8. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Khnichet - Evènement Décembre 2009.....	121
Tableau 9. Résultat de l'optimisation des paramètres au niveau de la station Khnichet	121
Tableau 10. Résultat de la fonction objective pour l'optimisation au niveau de la station.....	123
Tableau 11. Tableau récapitulant les principaux résultats pour le barrage Al Wahda - Evènement Décembre 2009	124
Tableau 12. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Souk El Had - Evènement Décembre 2009	126
Tableau 13. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Oueljet Soltane - Evènement Décembre 2009	126
Tableau 14. Résultat de l'optimisation des paramètres au niveau de la station Souk El Had	127
Tableau 15. Résultat de l'optimisation des paramètres au niveau de la station Oueljet Soltane	127
Tableau 16. Résultat de la fonction objective pour l'optimisation au niveau de la station Souk EL Had	129
Tableau 17. Résultat de la fonction objective pour l'optimisation au niveau de la station Oueljet Soltane.....	129
Tableau 18. Tableau récapitulant les principaux résultats pour le barrage Kansera - Evènement Décembre 2009	130
Tableau 19. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Azib Soltane - Evènement Décembre 2009	133
Tableau 20. Résultat de l'optimisation des paramètres au niveau de la station Azib Soltane	134
Tableau 21. Résultat de la fonction objective pour l'optimisation au niveau de la station Azib Soltane	135
Tableau 22. Tableau récapitulant les principaux résultats pour le barrage Idriss 1 ^{er} - Evènement Décembre 2009	137
Tableau 23. Tableau récapitulant les principaux résultats pour la station Belksiri - Evènement Décembre 2009	138
Tableau 24. Résultat de l'optimisation des paramètres au niveau de la station Belksiri.....	138
Tableau 25. Résultat de la fonction objective au niveau de la station Belksiri	139
Tableau 26. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Ain Aicha - validation	141
Tableau 27. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Khnichet - validation	142
Tableau 28. Tableau récapitulatif des principaux résultats pour le barrage Al Wahda - validation	143
Tableau 29. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Oueljet Soltane - validation.....	144

Tableau 30. Tableau récapitulant les principaux résultats pour le barrage Kansera - validation	145
Tableau 31. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Azib Soltane - validation.....	147
Tableau 32. Tableau récapitulant les principaux résultats pour le barrage Idriss 1 ^{er} - validation	149
Tableau 33. Tableau récapitulant les principaux résultats pour la station Belksiri - validation.....	150
Tableau 34. Contribution des trois branches principales du bassin au apports totaux (A.T.) vers la plaine du Gharb	151
Tableau 35. Coefficient de rugosité N de Manning après calage du modèle.....	162
Tableau 36. Principaux paramètres hydrauliques au niveau de quelques stations représentatives..	164

Liste des photos

Photo 1. Déversement du barrage Al Wahda en février 2010	143
Photo 2. Déversement du barrage El Kansera en février 2010	146
Photo 3. Déversement du barrage Idriss 1er en février 2010	148
Photo 4. Le pont portugais pendant la crue du 10-11/10/2008.	160

Liste des Abréviations et des Acronymes

ABH : Agences des Bassins Hydrauliques
ABHS : Agence du Bassin Hydraulique de Sebou
AEP: Alimentation en Eau Potable
ALOS: Advanced Land Observing Satellite
ASTER: Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AW3D30: ALOS World 3Dimensional-30m
DEM: Digital Elvation Model
DPH : Domaine Publique Hydraulique
DRH : Direction Régionale de l'Hydraulique
EEA: European Environment Agency
ESA: European spatial Agency
FAO: Food and Agriculture Organization
GDEM: Global Digital Elevation Model Advanced
GeoTIFF: Georeferenced Tagged Image File Format
GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GOFC-GOLD: Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics
GRADEX : Gradient de la distribution Exponentielle
HEC-GeoHMS: Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System
HEC-GeoRAS: Hydrologic Engineering Center's Geospatial River Analysis System
HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System
HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center's
HWSD: Harmonized World Soil Database
IGBP: International Geosphere-Biosphere Programme
IIASA: International Institute for Applied Systems Analysis
IRES : Institut Royal des Etudes stratégiques
JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency
JRC: Joint Research Centre
UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
LOB: left Over Bank
METI: Ministry of Economy, Trade and Industry (Japan)
MNE: Modèle Numérique d'Elévation
MNT: Modèle Numérique du Terrain
NASA: National Aeronautics and Space Administration

NSE : Nash–Sutcliffe model Efficiency coefficient

OMM: Organisation météorologique mondiale

ONEP: Office National de l'Eau Potable

ONU : L'Organisation des Nations unies

PDAIRE : Plans Directeurs d'Amenagement Integre des Ressources en Eau

PJMax : Précipitations Maximales Journalières

PNE: Plan National de l'Eau

PNI: Plan National de protection contre les Inondations

RGPH: Recensement Général de la Population et de l'Habitat

RMS Error: Root-Mean-Square Error

ROB : Right Over Bank

SAU: Superficie Agricole Utile

SCS CN: Soil Conservation Service Curve Number

SIG : Système d'Information Géographique

SRTM Shuttle Radar Topography Mission

STEP : Station de Traitement des Eaux Polluées

UNEP: United Nations Environment Program

UNISDR: United Nations International Strategy for Disaster Reduction

USACE: United States Army Corps of Engineers

USACE: United States Army Corps of Engineers

WGS84: World Geodetic System 1984

Introduction générale

Introduction générale

Contexte général / problématique

Dans un contexte de changements climatiques alarmants, et de développement exponentiel des activités anthropiques sur les plaines d'inondations (infrastructure, activités économiques, résidentielles...), les crues et les inondations au cours des dernières décennies ont provoqué des catastrophes dévastatrices, étant à l'origine d'importants dégâts humains et matériels à l'échelle de la planète.

En effet, selon *the Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (2015)*, rapport bisannuel publié par *The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR)* : le Bureau des Nations Unies pour la Réduction des Risques de Catastrophes, les inondations touchent plus de personnes que tout autre risque naturel. Les dégâts moyens annuels liés aux inondations sont estimés à 104 Milliards de Dollars US selon le même rapport, ce qui correspond au double des dépenses de santé publique dans le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord.

Au Maroc, comme dans la plupart des pays du monde, la gestion des ressources en eau en général, et particulièrement des crues et des inondations constitue un souci majeur tant pour les services compétents que pour les chercheurs.

Le contexte hydroclimatique du pays est caractérisé par une irrégularité spatiotemporelle très marquée. Elle se manifeste par une distribution contrastée des précipitations, engendrant un régime hydrologique de forte hydraulité pendant la saison pluviale, et de séquences d'étiage sévère durant la saison sèche. Situation qui implique le développement d'une stratégie de gestion intégrée des ressources en eau, capable à la fois de répondre aux besoins des populations et de leurs activités (agriculture, industrie ...) surtout pendant la période déficitaire, et de les protéger contre les crues et les inondations dévastatrices au cours de la période excédentaire.

À l'instar des pays optant pour l'approche de développement durable, et accordant un intérêt particulier au secteur de l'eau, le Maroc a réalisé plusieurs pas dans le bon sens, afin d'atteindre les objectifs mentionnés plus haut. En effet, sur le plan législatif, la loi n° 10-95 (remplacée depuis 2015 par la loi N°36.15) a constitué une plateforme adéquate pour promouvoir la valorisation, la gestion, la planification et le développement des ressources en eau à l'échelle du pays (Dahir n°1-95-154 (1995)). Sur le plan institutionnel, ladite loi a créé les Agences des Bassins Hydrauliques (ABH), établissements publics autonomes ayant pour mission d'évaluer, de planifier et de gérer les ressources en eau au niveau des bassins hydrauliques. Parmi les missions principales accordées aux ABH, la réalisation d'études et d'interventions visant la gestion des crues et de protection contre les inondations.

Le bassin versant de Sebou qui contient 30% des ressources en eau de surface du Maroc (ABHS, 2011), reflète relativement la problématique de l'hétérogénéité hydroclimatique, et soulève par conséquence, la question de la gestion des ressources hydrique, notamment celle des crues.

Grace aux aménagements hydrauliques de grande envergure comme les grands barrages (Al Wahda, Driss 1^{er}, ...), la galerie de transfert de Matmata, les barrages collinaires, ainsi que d'autres structures de protection, les services concernés (l'ABHS depuis 2002) ont réussi au fil du temps à réduire considérablement le risque d'inondation, notamment après la mise en service du barrage d'Al Wahda en 1996.

Cependant, les crues enregistrées en 2009 et 2010 ont fortement remis en question la protection contre les inondations à plusieurs endroits à l'échelle du bassin (ABHS, 2011). En effet, un inventaire exhaustif des sites à risques d'inondation dans le bassin du Sebou, a été réalisé dans le cadre du Plan National de protection contre les Inondations (PNI) et complété par les commissions provinciales de lutte contre les inondations, permettant d'inventorier 109 sites à risques d'inondation classés en trois catégories selon le degré de gravité des inondations qu'ils ont subis, et le degré d'urgence de l'intervention déterminé sur la base de l'ampleur des dégâts constatés.

Il reste à signaler que le bassin du Sebou est doté d'un réseau de mesure hydroclimatique bien réparti sur toute la zone d'action de l'agence, ce qui permet le suivi de la pluviométrie et de l'état hydrologique des principaux cours d'eau.

Objet de la recherche

Le présent travail de recherche a pour objet général, d'investiguer la problématique des crues et des inondations dans le bassin du Sebou. Il cherche à profiter d'une manière optimale du réseau de mesure hydroclimatique, à travers la simulation hydrologique et hydraulique.

On propose un modèle intégré de prévision et de gestion des crues, qui simule dans un premier temps, le transfert pluie – débit, et exploite dans un second temps, les résultats obtenus pour procéder à une modélisation hydraulique menant vers la délimitation des zones inondables, fruit final du modèle.

Organisation du mémoire

Le mémoire de la thèse est organisé en trois parties, contenant chacune plusieurs chapitres. En plus d'une introduction générale et une conclusion/discussion vers la fin.

- **L'introduction générale** traite les points suivants :
 - Le contexte problématique de la thèse, à savoir les crues et les inondations à l'échelle de la planète et du Maroc, la menace qu'elles représentent pour les riverains, leurs activités et leurs biens, ainsi que l'aggravation de plus en plus, de la situation parallèlement à l'accroissement de l'occupation des plaines d'inondations et lits majeurs des cours d'eau, et dans un contexte de changements climatiques alarmant ;
 - La situation au niveau de l'ABHS (la zone d'étude), les efforts et les mesures menés pour gérer les crues et minimiser le risque d'inondation ;
 - L'objet général de la thèse ;

- L'organisation du mémoire.
- **La première partie** intitulée « **cadre générale de l'étude** » contient trois chapitres :
 - Le premier présente la zone d'étude (le bassin du Sebou) : sa situation géographique, son carte physique et socioéconomique ;
 - Le deuxième traite l'approche de la gestion des ressources hydriques au niveau du bassin de Sebou, afin de répondre aux besoins en évolution ;
 - Le troisième chapitre détaille la problématique des crues et inondations dans la zone d'étude, et présente les objectifs de l'étude.
- **La deuxième partie** « **Approche méthodologique et démarche** » est organisée aussi en trois chapitres :
 - Le premier représente une revue de littérature qui récapitule les approches principales de gestion des crues à l'échelle nationale et internationale ;
 - Le deuxième présente l'approche et la méthodologie adoptées pour réaliser ce travail ;
 - Le troisième expose en détail, la démarche suivie au cours de l'élaboration des modèles hydrologique et hydraulique.
- **La troisième partie** est consacrée à **la présentation et l'analyse des résultats** obtenus. Elle contient deux chapitres, le premier traite les résultats de la modélisation hydrologique, et le deuxième discute ceux de la modélisation hydraulique.
- **La conclusion générale** récapitule l'analyse des résultats de la modélisation, et discute les recommandations et perspectives de développement de la prévision et la gestion des crues dans le bassin.

Première partie : Cadre général de l'étude

Introduction

Dans le but de bien présenter de ce travail de recherche, la première partie est dédiée à la présentation de son cadre général à travers trois chapitres qui mettent la lumière sur la zone d'étude, la problématique et les objectifs.

Le premier chapitre est réservé à la description de la zone d'étude, qui correspond au bassin hydrologique de Sebou. Il traite sa situation géographique, son aspect physique : géologie, relief, climatologie, hydrologie et hydrogéologie, avec un aperçu socio-économique vers la fin.

Le deuxième chapitre se penche sur la question de la gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin de Sebou. Il donne, tout d'abord, un aperçu sur l'évolution des besoins et demandes en eau de la population et des activités du bassin, il dénombre ensuite les modalités de gestion des ressources en eau, ainsi que les contraintes et les difficultés auxquelles s'affronte cette gestion.

Le troisième et dernier chapitre de cette partie, présente la problématique de la gestion des crues, abordé par ce travail de recherche, ainsi que les objectifs fixés.

Chapitre I : Présentation du bassin du Sebou

1. Situation géographique et découpage administratif

Le bassin versant de de l'oued Sebou est situé au nord du Maroc entre les méridiens 4° et 7° Ouest et les parallèles 33° et 35°Nord. Il constitue une immense cuvette d'environ 40 000 km² de superficie, soit 6% du territoire national, partagée entre des unités géomorphologiques distinctes :

- La chaîne rifaine au Nord ;
- Le couloir Fès-Taza à l'Est ;
- Le Moyen Atlas au Sud-Est ;
- Le massif central au Sud ;
- La plaine de Sais au centre ;
- La plaine du Gharb et le plateau de la Mamora débauchant vers l'océan Atlantique à l'Ouest.

Le bassin est drainé par l'oued Sebou qui prend naissance dans le Moyen Atlas et parcourt environ 500 km, avant de rejoindre l'océan Atlantique à Mehdià près de Kénitra.

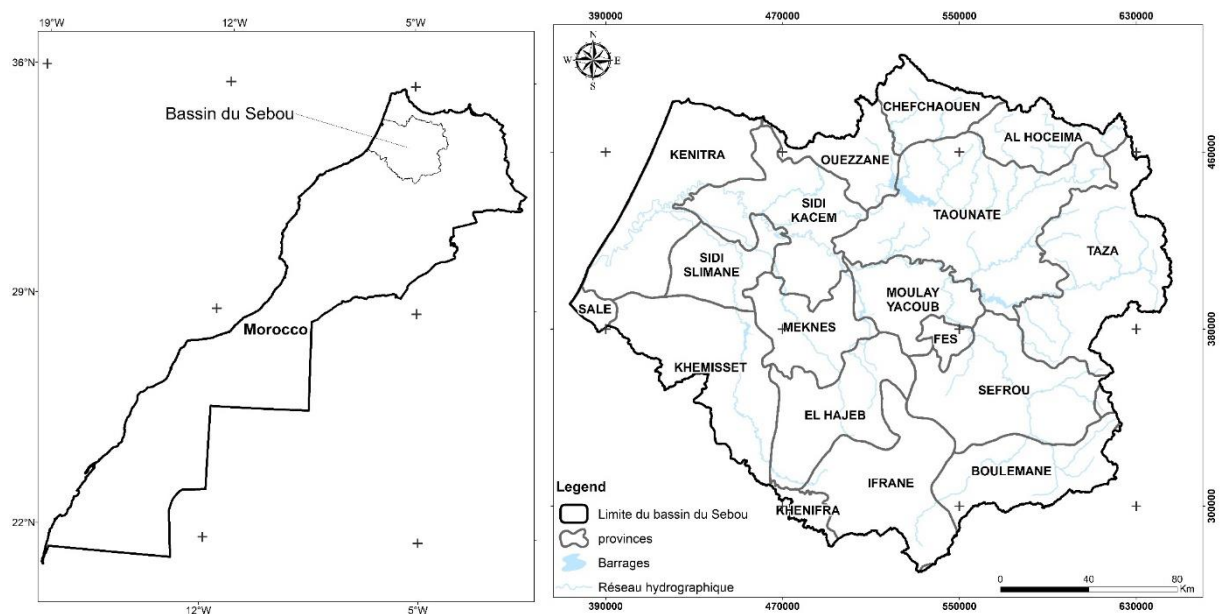


Figure 1. Situation géographique et découpage administratif du bassin versant de Sebou

Il s'agit du deuxième bassin à l'échelle nationale du point de vue potentiel hydrique, avec 30% des ressources en eau de surface du Maroc.

Il s'agit aussi du deuxième bassin le plus peuplé du royaume, abritant une population de l'ordre de 6.8 millions (RGPH 2014), soit environ 20% du total de la population marocaine, répartis sur :

- 18 Préfectures et Provinces ;
- 82 Commune Urbaines ;

- 287 Communes Rurales.

La zone du bassin hydrographique du Sebou couvre quasi-totalement les régions administratives du Gharb-Chrarda-Beni Hssen, et de Fès-Boulemane. Il couvre aussi partiellement les régions de Meknes-Tafilalet et de Taza-Al Hoceima-Taounate.

Le territoire du bassin abrite une activité agricole et industrielle importante diversifiée, qui contribuent vivement à l'économie nationale, mais qui constitue une pression sur les ressources en eau d'un point de vue quantitatif et qualitatif.

2. Aperçu géologique

Comme déjà signalé plus haut, Le bassin de Sebou peut être subdivisé en plusieurs unités structurales bien distinctes, dont l'histoire géologique diffère sur les deux plans lithologique et stratigraphique (fig.2&3).

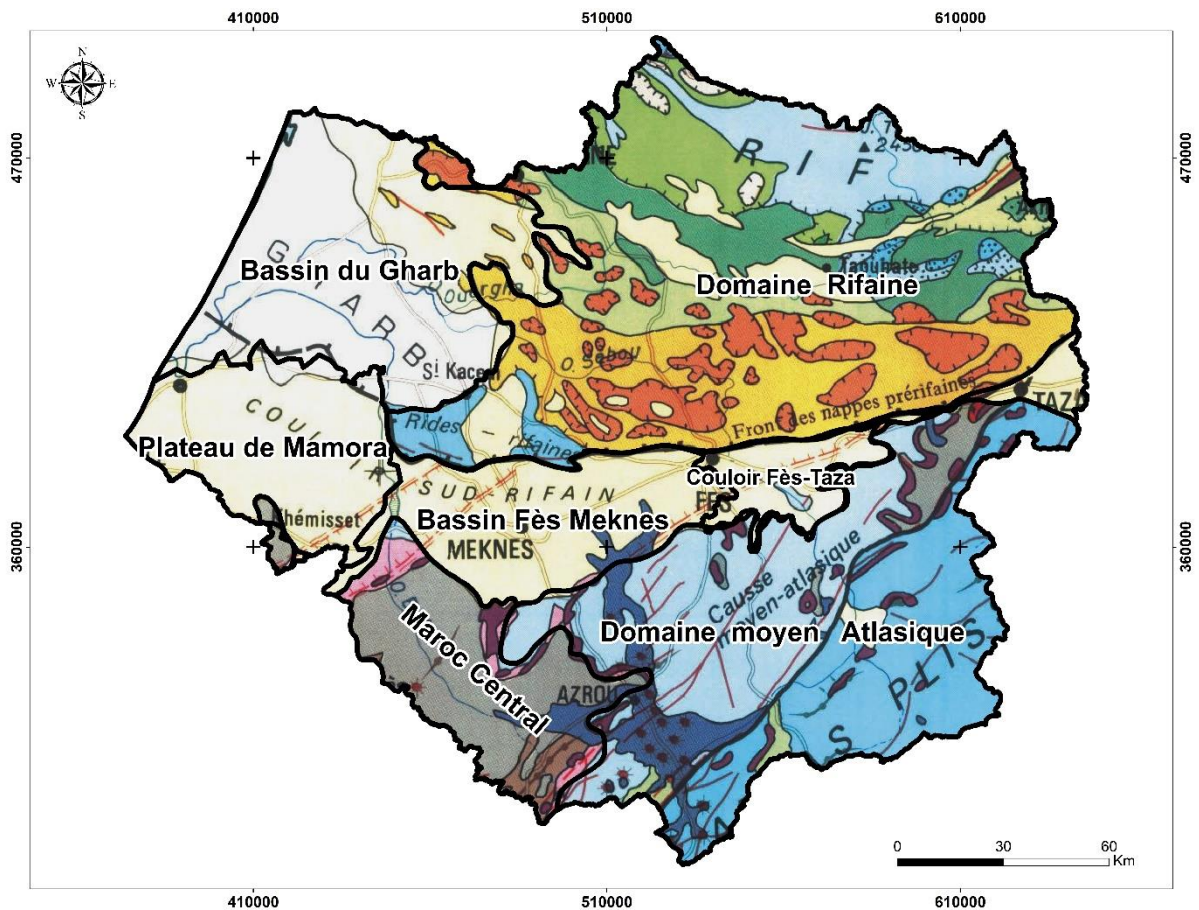


Figure 2. Principales unités structurales du bassin du Sebou. D'après la carte structurale du Maroc au 1/2 000 000

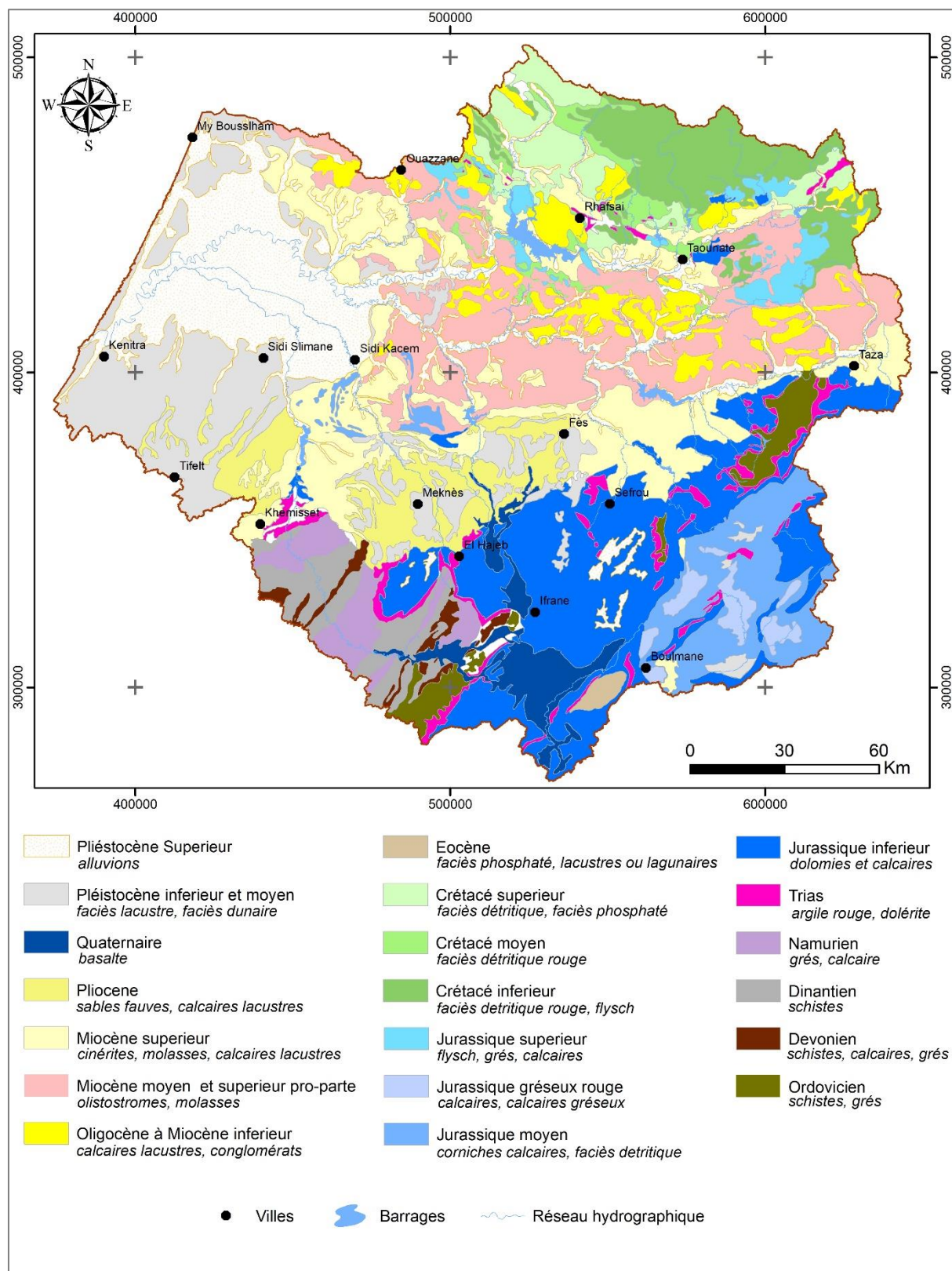


Figure 3. Carte géologique simplifié du bassin du Sebou établit sur la base de la carte géologique du Maroc au 1/1000000

2.1. Le massif hercynien central

Le massif hercynien central (fig.4) appartient au domaine mésétien marocain, dont la déformation, le métamorphisme et le magmatisme sont attribués à l'orogénèse varisque ou hercynienne. La déformation contrastée des formations paléozoïques hétérogènes ont permis de subdiviser la meseta marocaine en plusieurs zones structurales, dont le massif central, structuré en synclinaux et anticlinaux (Michard, 1976 ; Piqué & Michard, 1981, 1989 ; Piqué, 1994).

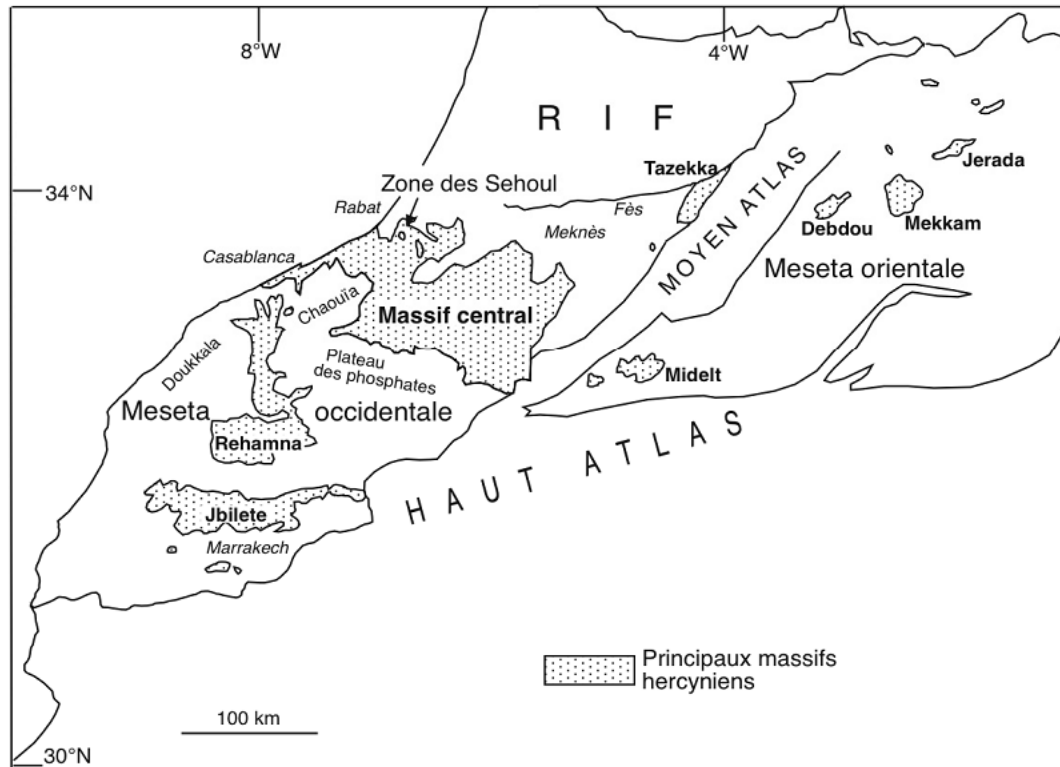


Figure 4. Situation du massif central au sein de la meseta marocaine (Piqué et al, 2007)

Le précambrien

Les formations précambriennes n'affleurent que ponctuellement dans la partie orientale du massif central, dans les régions de Bou Acila et Goaida (Morin, 1960) et du Jbel Hadid (Morin, 1962).

Ce sont des roches volcaniques acides ou andésitiques sous des calcaires du Cambrien inférieur (Piqué et al, 2007).

Le Cambrien

Le Cambrien inférieur est caractérisé par des formations carbonatées à tendance récifale, développée sur l'ensemble de la Meseta, du Jbel Irhoud jusqu'à l'est du Massif Central. Ces carbonates sont déformées et métamorphiques au cœur des anticlinaux les plus érodés (Piqué, 1994).

Les schistes à intercalations volcaniques, faisant 800 à 1000 mètres d'épaisseur, observés dans l'anticlinal du pays Zaïane à l'est du Massif central, sont datés par corrélation avec les schistes à Paradoxides de la meseta côtière au Cambrien moyen ; les quartzites de Zaïan dont l'épaisseur atteint 3000 à 4000 mètres, sont attribuées au Cambrien supérieur, voir à l'Ordovicien (Cailleux, 1994).

Les basaltes et dolérites de l'est du Maroc central, présentent des caractères de tholéites intraplaques (Ouali et al, 2003).

L'Ordovicien

À l'Ordovicien, la quasi-totalité de la Meseta correspondait à une plateforme peu profonde. La sédimentation dominée par des shales micacés à niveaux ferrugineux liés à des fluctuations du niveau marin, passe à des quartzites vers l'Ordovicien supérieur (Caradoc et Ashgill). Cependant, la région de Zaïane recevait encore une sédimentation pélitique (Piqué et al, 2007 ; Michard, 1976).

Le Silurien

Parallèlement à la transgression, le facies quartzitique de l'ordovicien supérieur, passe progressivement à des siltites puis à des shales, ce qui explique les difficultés rencontrées lors de l'établissement d'une colonne stratigraphique du silurien (Michard, 1976 ; Bensaid, 1979). Au Silurien supérieur, on note l'apparition de dépôts carbonatés.

Il est à noter que les shales sont souvent confondus avec les schistes dans la littérature géologique marocaine (Piqué et al, 2007).

Le Dévonien

Au cours du Dévonien inférieur et moyen la sédimentation continue en concordance sur les formations siluriennes, avec un facies généralement carbonaté à intercalations pélitiques.

Au Dévonien supérieur, la déformation dans le cadre de l'orogénèse hercynienne commence, et le régime extensif façonnera la paléogéographie, et par conséquent, la sédimentation : les bassins reçoivent des turbidites, les rides et les hauts-fonds des calcaires récifaux ou noduleux, alors que les bordures des rides reçoivent des faciès détritiques de conglomérats et d'olistostromes (Hoepffner, 1987 et 1994).

Le Carbonifère

Les mouvements tectoniques hercyniens reprennent. Les dépôts qui sont essentiellement des molasses et des flyschs dont l'épaisseur et la répartition sont larges, enregistrent cette activité tectonique qui se manifeste par plusieurs phases de métamorphisme et de magmatisme granitique. Plusieurs discordances sont visibles : discordance majeure du Viséen supérieur, discordance namurienne, éowestphalienne (Piqué, 1994).

Le Permien

Le Permien et même le Permo-Trias est lacunaire au niveau de toute la meseta. Ceci peut être expliqué par une érosion généralisée reliée selon Piqué (1994) à la pénéplanation de la chaîne hercynienne entamée au Westphalien.

On peut donc conclure que le massif central constitue un terrain hercynien érodé, pénéplané, où l'affleurement est dominé par des faciès métamorphiques notamment les schistes qui sont généralement imperméables, avec quelques massifs granitiques.

Ces terrains paléozoïques sont plongés vers l'Est sous la couverture secondaire du Moyen Atlas.

2.2. Le Moyen Atlas

Le Moyen Atlas, constitué avec le Haut Atlas, le domaine structural Atlasique marocain, la partie la plus montagneuse, la plus déformée dans le cadre de l'orogénèse alpine (Michard, 1976), avec une lithostratigraphie type constituée d'un socle paléozoïque modelé par l'orogénèse varisque, et une couverture méso-cénozoïque discordante, essentiellement carbonatée, structurée par l'orogénèse alpine.

Caractérisé par un allongement général NE-SW, le Moyen Atlas est délimité par le sillon Sud-Rifain et le Prérif au Nord-Ouest, la meseta à l'Ouest, la vallée de Moulouya à l'Est, et par le Haut Atlas au Sud (fig.5).

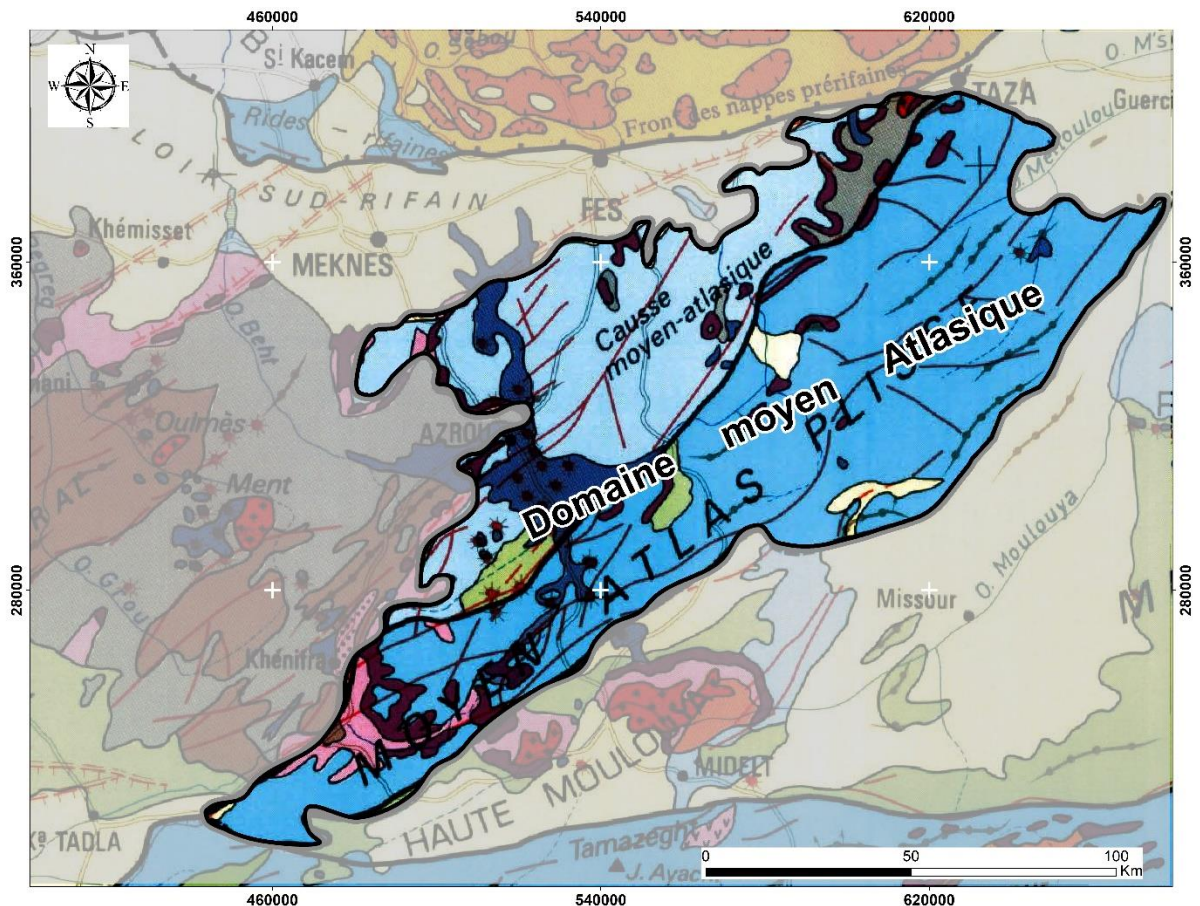


Figure 5. Situation du Moyen Atlas. Extrait de la carte structurale du Maroc au 1/2000000

Classiquement, la littérature géologique marocaine subdivise le Moyen Atlas d'un point de vue structural en deux parties bien distinctes séparées par l'accident Nord Moyen atlasique, le Causse moyen-atlasique tabulaire au Nord-Ouest, et le Moyen Atlas plissé au Sud-Est.

2.2.1. Le Causse moyen-atlasique

Dès 1936, Termier qualifie les terrains tabulaires situés au nord-ouest de l'accident nord moyen-atlasique de Causse. Il s'agit d'un territoire où la couverture post-triasique dominée par les carbonates essentiellement du Lias, a resté relativement peu ou pas déformée, bien qu'elle soit affectée par une tectonique cassante très marquée. L'accident de Tizi N'Tretten constitue une ligne de failles majeure qui subdivise le causse en deux parties : l'une septentrionale au nord-ouest et l'autre méridionale au sud-est (Colo, 1961 ; Sabaoui, 1998). Les structures sont sous forme de vastes ondulations ou de synclinaux à large rayon de courbure (Bentayeb et Leclerc, 1977).

D'un point de vue lithostratigraphique, le Moyen Atlas tabulaire est constitué d'une couverture méso-cénozoïque, reposant sur un substratum paléozoïque qui affleure à la faveur des boutonnières : Tazekka, Bsabis, El-Menzel ...

Le substratum paléozoïque

Les formations géologiques du socle hercynien présentent une grande affinité à celles rencontrées dans le domaine mésétien (Michard, 1976). En effet, les affleurements primaires montrent une prédominance des schistes érodés au sein desquelles pointent des barres résistantes de grès, de quartzites et de calcaires, ou encore des granites (Hoepffner, 1987 et 1994).

La couverture méso-cénozoïque

Permo-Trias

Reposant en discordance majeure angulaire sur la surface d'érosion post-hercynienne, le Permo-Trias est distingué par les argiles rouges violacées, souvent gypsifères et salifères. On distingue les argilites inférieurs et supérieurs, entre les deux s'intercale une épaisse formation de dolérites, qui correspond à des coulées de basaltiques de l'ouverture de l'océan Atlasique. Des conglomérats de transgression sont rencontrés à la base des argiles rouges (Baudelot et al., 1986 ; Sabaoui, 1987).

Lias

La majeure partie des matériaux qui constitue le corps du causse Moyen atlasique s'est déposé au cours du Lias. La sédimentation était généralement carbonatée sous forme de dolomies et calcaires, avec parfois des niveaux de marnes et calcaires marneux ou dolomitiques de faible importance/épaisseur. Le passage entre le Lias inférieur et moyen est pratiquement inaperçu, alors qu'au Lias supérieur, un changement important de dépôt est enregistré, avec la tendance vers un faciès marno-calcaire à partir du Toarcien, qui devient marneux au cours du Bajocien moyen. La série liasique se termine par les calcaires corniches du Bajocien supérieur (Michard, 1976 ; Laadila et Delfaud 1989 ; Fedan, 1985 et 1989).

Crétacé et Cénozoïque

Les dépôts du crétacé sont très réduits, et ne sont présents que dans le grand synclinal de Békrit-Timhadite, au contact du Moyen Atlas plissé (Lepoutre & Martin, 1967). Les alternances marno-calcaires du Cénomanien et Turonien, et les marnes du Sénonien reposent en discordance sur le Jurassique. Le Cénozoïque est pratiquement absent au niveau du Moyen Atlas (Bentayeb et Leclerc, 1977).

Quaternaire

Les formations sédimentaires quaternaires sont de faible importance à leur tour à l'échelle du Moyen Atlas tabulaire. Ils se réduisent selon Bentayeb et Leclerc (1977) à :

- Des accumulations essentiellement argileuses au fond de cuvettes, résultant de la décomposition des carbonates et du ruissellement périphérique ;

- Ou encore des travertins quaternaires ou plio-quaternaire qui se développent à l'émergence des grandes sources émanant des carbonates liasiques.

Par ailleurs, le causse moyen atlasique est marqué par une activité volcanique d'âge plio-quaternaire. Martin (1981) estime que les coulées basaltiques couvrent une superficie de 1500 km² du Moyen Atlas septentrional dans les régions de Timahdite, Michlifen et Azrou-Ifrane. D'après des forages et des compagnies géophysiques, l'épaisseur des basaltes varie entre quelques mètres et plusieurs dizaines de mètres pouvant atteindre par endroit 150 à 200 m (Bentayeb et Leclerc, 1977).

2.2.2. Le Moyen Atlas plissé

Situé entre les deux accidents majeurs nord moyens atlasique et sud moyen atlasique, le Moyen Atlas plissé est nettement distingué du Moyen Atlas tabulaire du point de vue structural. Il correspond à des terrains très accidentés qui s'organisent en une succession de rides anticlinales parallèles orientées généralement NE-SW, séparées par des zones synclinales.

Cependant, la lithostratigraphie présente de grandes similitudes, dues à une histoire géologique commune jusqu'au début du mésozoïque. Par la suite l'orogénèse alpine aura des répercussions sur la couverture post-paléozoïque qui correspond essentiellement aux dépôts carbonatés et marneux du Jurassique (Martin, 1981 ; Zeryouhi, 1977).

Le socle paléozoïque

L'affleurement des terrains paléozoïques est très restreint à l'échelle du Moyen Atlas plissé, on ne peut les observer qu'au Nord-Ouest dans le massif de Tazzeka, ou au Sud au niveau du massif d'Aouli (Zeryouhi, 1977). La lithologie est très semblable à celle du domaine mésétien (Michard, 1976), avec la prédominance des faciès métamorphiques essentiellement schisteux, et de roches magmatiques.

La couverture méso-cénozoïque

- Le complexe volcano-détritique **Permo-triasique** (argiles rouges à évaporites et basaltes doléritiques) occupe les cœurs des anticlinaux.
- Les carbonates du **Lias inférieur** et **moyen** forment l'ossature des rides.
- La majeure partie des cuvettes synclinales du Moyen Atlas plissé est couverte par les dépôts marneux (marnes de Bouleman) et marno-calcaires du **Dogger**.
- Les séries gréseuses qui affleurent dans les synclinaux de Skoura, Tilmircet, AïtYoub et Bou-Rached, sont attribuées au **Malm**.
- Le **Crétacé** et **Tertiaire** sont présents sous forme de dépôts marno-calcaires observés essentiellement dans les synclinaux.
- Enfin, des coulées basaltiques d'âge **Quaternaire**, s'épanchent dans le Haut Guigou et au nord-est du Moyen Atlas.

2.3. Le Rif

Du point de vue structural, le Rif correspond à une chaîne de collision constituée d'un empilement d'unités tectoniques, entre lesquelles existent des contacts de nappes de charriage. Trois domaines majeurs sont distingués (Andrieux, 1971 ; Chalouan et Michard, 2004 ; Michard et al, 2008) :

- Le **domaine interne** ou domaine d'Alboran, constitué essentiellement de terrains paléozoïques déformés métamorphiques. Trois unités structurales sont distinguées :
 - **Les Sebtides** correspondent à des formations métamorphiques (Gneiss kinzigitiques, Gneiss micaschistes de Filali, schistes et quartzites de Federico) et ultrabasiques (péridotites mantelliques de Beni Bousera) (Kornprobst, 1974 ; Michard et al, 1983 ; Chalouan et al, 2001) ;
 - **Les Ghomarides** sont dans la majeure partie constitués de roches paléozoïques peu métamorphiques (Chalouan, 1986) ;
 - **La dorsale calcaire** est un empilement d'écailles carbonatées calcaro-dolomitiques (Didon, 1973).
- Les **nappes des Flyschs** correspondent à des terrains allochtones charriées sur le domaine externe, sont composées de quatre ensembles de nappes (Chalouan, 1986) :
 - **Nappe prédorsalienne** : forme un olistostrome au front de la dorsale calcaire. Il renferme des olistolites provenant de la dorsale calcaire et des nappes maurétaniennes et numidiennes.
 - **Nappes maurétaniennes** : correspondent aux nappes de Tisirène et de Beni Ider, constituées essentiellement de matériau gréseux d'âge crétacé inférieur à Miocène inférieur.
 - **Nappes massyliennes** : correspondent aux nappes de Chouamat-Melloussa, à matériau schisto-quartzitique d'âge crétacé.
 - **Nappe numidienne** : à matériau constitué essentiellement d'argiles d'âge Oligocène et de grès du Miocène inférieur.
- Le **domaine externe** est subdivisé en Intra, Méso et Prérif :
 - **L'Intrarif** : renferme l'unité de Ketama à lithologie constituée essentiellement des schistes et quartzites du Crétacé inférieur, l'unité de Tanger à matériau marneux du Crétacé supérieur, et l'unité de Loukkos à marnes d'âge Eocène.
 - **Le Mésorif** : chevauché par l'Intrarif, il n'affleure qu'à la faveur des fenêtres à travers ce dernier. La lithologie du Mésorif est dominée par des flyschs d'âge Jurassique supérieur de la Forêt d'Izzarène, des flyschs tertiaires de l'unité de Zoumi, et des facies métamorphiques de l'unité de Tamsamani.
 - **Le Prérif** : on distingue le Prérif interne caractérisée par des calcaires jurassiques alignés au front sud du Mésorif, et le Prérif externe qui correspond à un olistostrome d'âge Miocène moyen ayant glissé sur l'avant-pays donnant naissance aux rides pré-rifaines.

À signaler que des terrains allochtones provenant du Mésorif et de l'Intrarif, ont glissé vers l'extérieur (sur le Prérif) pour donner les nappes rifaines : nappes de Sanhadja, Bou Haddoud, Aknoul, Ouezzane...

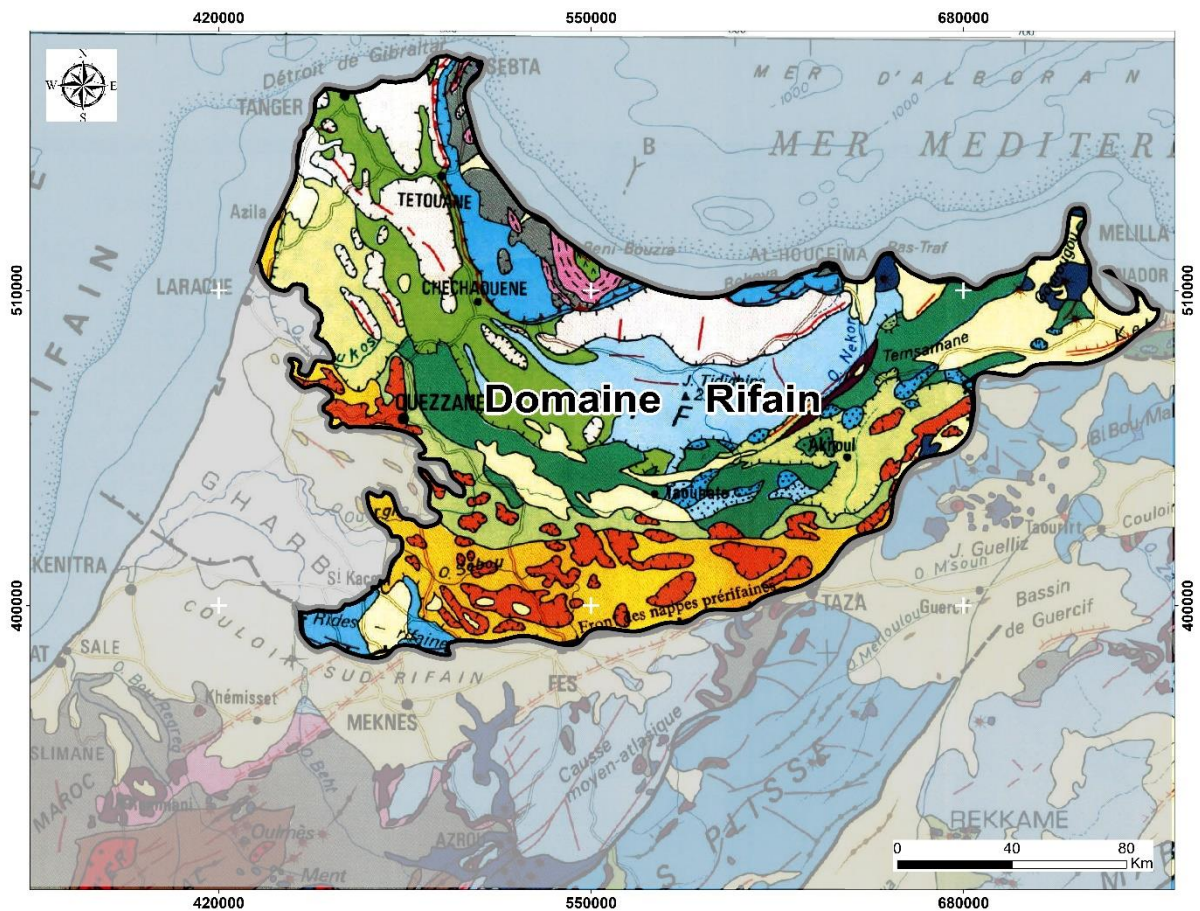


Figure 6. Situation du domaine rifain. Extrait de la carte structurale du Maroc au 1/2000000

2.4. Le sillon Sud-Rifain

Le sillon Sud-Rifain forme une dépression qui s'étend de la côte Atlantique à l'Ouest, jusqu'au col de Touahar à l'Est, là où se ferme le couloir de Fès –Taza. Il se situe entre de grands domaines géologiquement très différents (Boumir, 1990) :

- La chaîne rifaine au Nord, caractérisée par une forte déformation liée au cycle alpin, qui se manifeste essentiellement par des charriages importants, un métamorphisme et une schistosité, dont l'histoire s'étend du Trias au Miocène supérieur ;
- Au Sud, le causse moyen-atlasique à structure tabulaire peu déformée, essentiellement calcaro-dolomitique du Jurassique, et les terrains paléozoïques du Maroc central à socle structuré par la tectonique hercynienne.

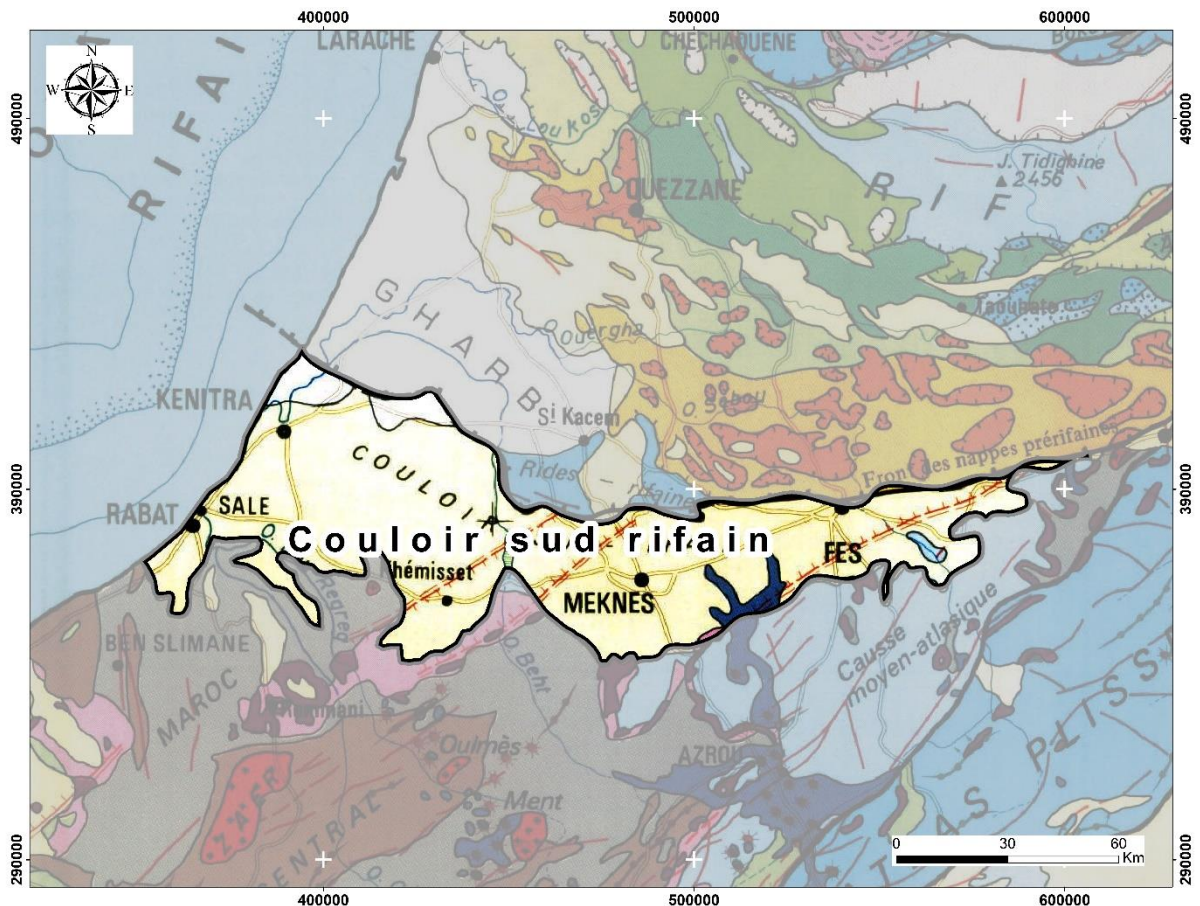


Figure 7. Situation du sillon sud-rifain. Extrait de la carte structurale du Maroc au 1/2000000

Le sillon sud-rifain est le résultat de l'effondrement des bordures septentrionales de la Meseta occidentale et du Causse moyen-atlasique au Miocène supérieur (Boumir, 1990).

▪ Le couloir Fès-Taza

Le couloir de Fès-Taza constitue la partie orientale du sillon sud-rifain. Il est limité au Nord par les nappes pré-rifaines, à l'Ouest par le bassin de Fès-Meknès, et au Sud par le causse moyen-atlasique. Ce couloir correspond à un détroit qui se rétrécit vers l'Est pour s'étrangler complètement au Col de Touahar (Amraoui, 2005).

De point de vue lithostratigraphique, le socle paléozoïque avec sa couverture volcano-détritico-permo-triasique et carbonatée liasique du causse constituent la base du sillon sud-rifain, sur laquelle vient s'installer une épaisse formation marneuse au miocène supérieur qui comble le bassin, et des dépôts plio-Quaternaire limités sous forme de dépôts lacustres de dépressions résiduelles, de travertins ou d'alluvions. (Fassi, 1999).

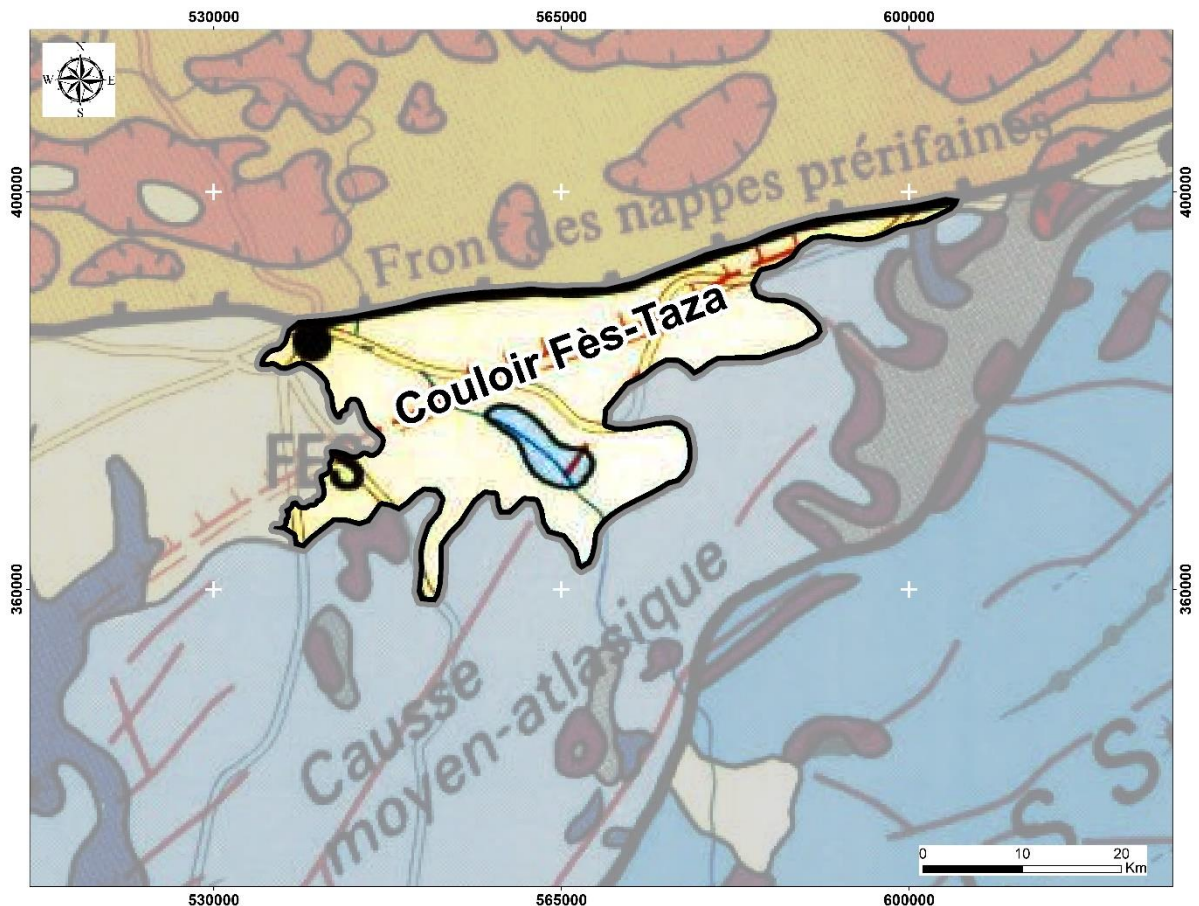


Figure 8. Situation du couloir Fès-Taza. Extrait de la carte structurale du Maroc au 1/2000000

▪ Le bassin de Fès-Meknès

Le bassin de Fès-Meknès occupe la partie médiane du Sillon sud-rifain. Il se prolonge par le couloir de Fès-Taza vers l'Est, et par le plateau de Mamora et la plaine du Gharb vers l'Ouest.

Il s'agit d'une vaste dépression qui constituait au Miocène supérieur un bassin d'avant-fosse de la chaîne rifaine en surrection (Taltasse, 1953 ; Ahmamou, 2002). Les compagnies géophysiques et les forages profonds montrent que les formations du causse moyen atlasique plongent progressivement du Sud vers le Nord sous les marnes miocènes, par le biais de plusieurs failles. Des dépôts essentiellement lacustres du Plio-Quaternaire, couvrent les formations cénozoïques.

Le socle Paléozoïque

Correspond aux formations déformées métamorphiques qui affleurent dans le massif central au sud-est du bassin de Fès-Meknès. Généralement ce sont des schistes bruns violacés, à intercalations de bancs gréseux.

Le Trias

Représenté par les dépôts détritiques d'argiles rouges violacées gypsifères salifères, entre lesquelles s'intercalent les basaltes doléritiques.

Le Jurassique

Caractérisé par l'épaisse série carbonatée de dolomies et calcaires essentiellement d'âge liasique.

Le Miocène

Représenté par les marnes bleues à intercalations de turbidites gréseuses du Tortonien, dont l'épaisseur atteint 1000 mètres à Fès. Des calcaires gréseux ou des molasses sont rencontrés à la base de la série, alors qu'elle est surmontée par une formation sahélienne grés-sableuse peu épaisse.

Le Plio-Quaternaire

Représenté par trois faciès lacustres : les calcaires lacustres de Saïs, les conglomérats poudingues vers l'est du bassin et les sables fauves du plateau de Meknès.

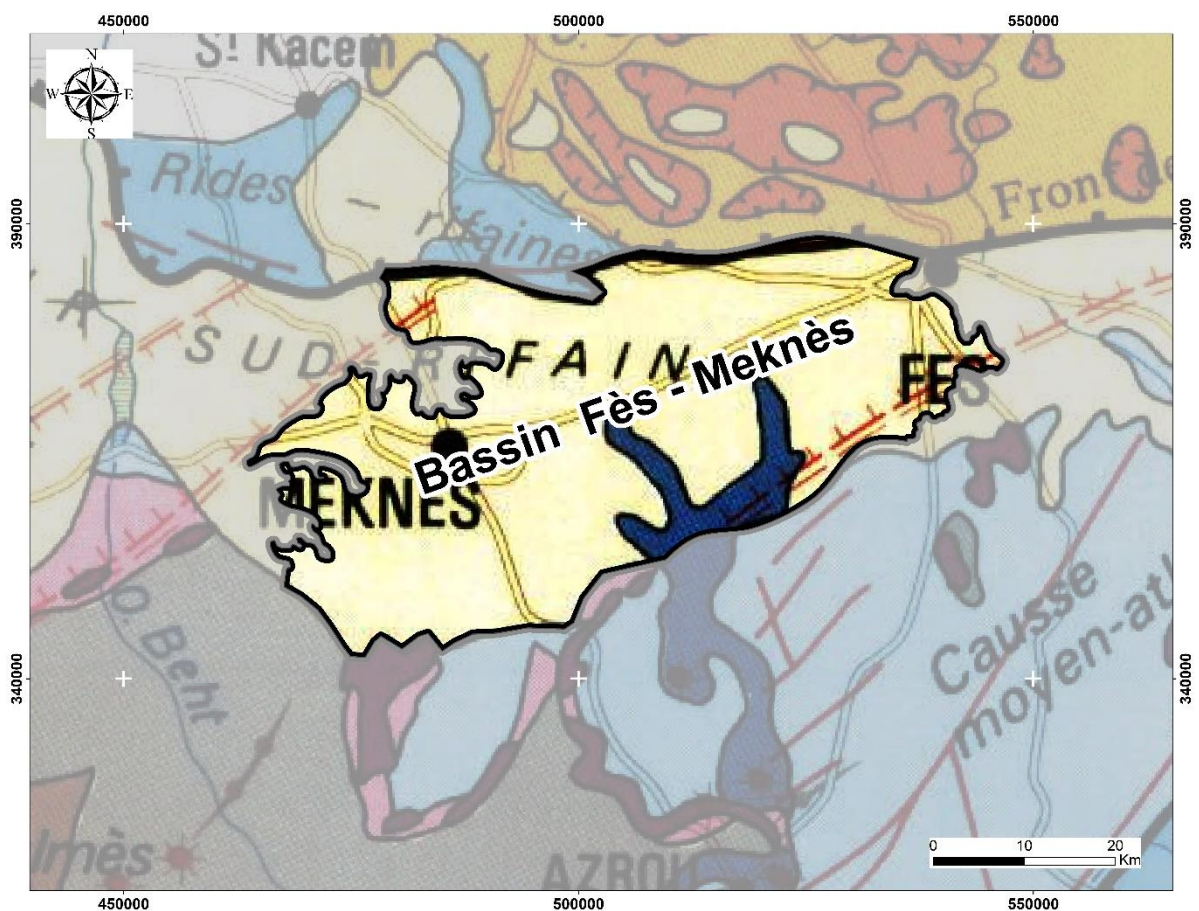


Figure 9. Situation du bassin Fès-Meknès. Extrait de la carte structurale du Maroc au 1/2000000

▪ Le bassin du Gharb et le plateau de la Mamora

Situés entre le domaine rifain au Nord et mésétien au sud (fig.10), le bassin du Gharb avec le plateau de la Mamora constitue la partie la plus occidentale du sillon sud-rifain. Le socle paléozoïque de la meseta plonge progressivement vers le Nord sous le bassin, alors que les nappes de charriage pré-rifaines les chevauchent vers le Sud et le Sud-Ouest (Combe, 1975).

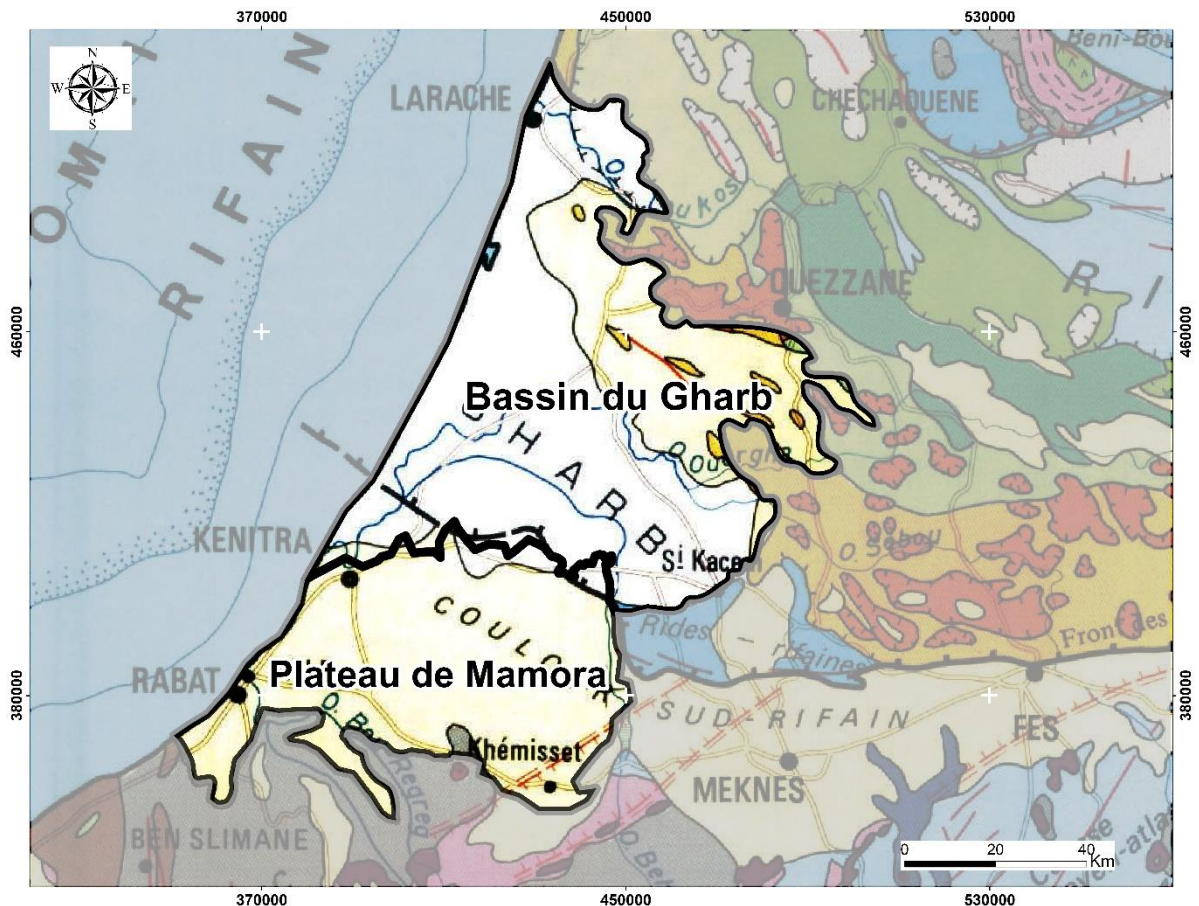


Figure 10. Situation du bassin du Gharb et du plateau de Mamora. Extrait de la carte structurale du Maroc au 1/2000000

Le bassin du Gharb

Le bassin du Gharb correspond à une dépression dissymétrique, colmaté et transformé en plaine alluviale de l'Oued Sebou aval. L'évolution structurale est liée à la surrection de la chaîne rifaine. La subsidence qui a commencé depuis le Miocène moyen, continue jusqu'à l'actuel (Piqué et Michard, 1989).

Le comblement du bassin du Gharb à partir du Miocène terminal résultait de l'obstruction du sillon sud-rifain par la remontée isostatique du seuil de Taza, et le glissement de la nappe pré-rifaine vers le sud. La surrection de la chaîne rifaine et l'instabilité de la marge pré-rifaine ont provoqué le déversement d'énormes quantités de matériaux terrigènes sous forme d'olistostrome vers le bassin (Combe, 1975 ; Cirac, 1985).

La sédimentation au niveau du bassin du Gharb au néogène était conditionnée par l'interaction de plusieurs facteurs (Cirac, 1985 ; Michard, 1976) :

- La subsidence tectonique avec l'initiation des failles synsédimentaires ;
- L'accumulation d'énormes apports en provenance de deux zones émettrices, bien définies par la nature et la granulométrie des matériaux :
 - La marge septentrionale pré-rifaine ne fournit que des éléments très fins, silt-argileux, parmi lesquelles sont transportés des tests de micro-organismes arrachés aux formations crétacées et tertiaires de l'arrière-pays ainsi que des carapaces d'ostracodes.
 - La marge mésétienne, libère des matériaux beaucoup plus grossiers, principalement vers le sommet de la série ;
- Les changements du niveau marin qui ont joué un rôle important dans les parties les moins profondes du bassin.

L'ensemble de ces facteurs a conduit à des changements spatio-temporels rapides de faciès et de puissance des dépôts cénozoïques de comblement du bassin :

Le miocène moyen et supérieur, est représenté par une épaisse série de marnes, dont la puissance varie de quelques centaines de mètres sur les bordures pour atteindre plus de 2000 mètres au centre de la plaine, suivant la subsidence du bassin.

Le Pliocène affleure au niveau des bordures du bassin, caractérisé par des faciès régressifs variés : lumachelles et conglomérats au Nord, sables jaunes à l'Est, des sables et grès coquilliers au Sud-Est.

Le Quaternaire, représenté par des dépôts marins : calcaires, grès et sables au niveau des zones côtières, et par des dépôts détritiques terrigènes dans les zones émergées.

La Mamora

La Mamora, située entre la plaine du Gharb au Nord et la meseta au Sud (fig.10), constitue un plateau qui s'abaisse progressivement vers le nord. Elle présente à l'Ouest du plateau des ondulations en rides et dépressions parallèles au littoral, qui peuvent avoir une origine tectonique et/ou sédimentaire (Texier et al, 1992).

La formation dite de la Mamora, qui correspond à des argiles sableuses pouvant atteindre une vingtaine de mètres d'épaisseur, repose sur le Moghrébien (Choubert, 1965) représenté par des calcarénites bioclastiques ou de conglomérats à matrice calcaire (Cirac, 1985, Wernli, 1979). L'ensemble de ces dépôts, considérés par Texier et al (1992) comme une seule formation Plio-Quaternaire dont la frange superficielle a été érodée, repose à son tour sur les marnes miocènes du comblement du bassin sud-rifain.

3. Relief

3.1. Hypsométrie

Afin d'étudier et de caractériser le relief du bassin versant de Sebou, nous nous sommes basé principalement sur le modèle numérique d'élévation ASTER GDEM, élaboré par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) en collaboration avec le Ministère japonais de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI). Les deux organismes ont publié conjointement la deuxième version de l'émission : Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM V2) en 2011. Par conséquent, le GDEM ASTER est disponible gratuitement à l'échelle globale.

Il s'agit d'un DEM ou MNE (Modèle Numérique d'Élévation) de haute résolution (30 mètres) géoréférencé avec le système de coordonnées géographiques WGS84, et publié sous forme de dalles de taille 1°x1° (à peu près 110km x 110km) au format GeoTIFF avec une marge d'erreur affirmée de 7 à 14 mètres suivant l'axe z.

Un MNE diffère du MNT par le fait que le premier représente l'élévation et non pas la surface du terrain naturel. Cela dit que tout objet au-dessus de celle-ci : arbre, bâtiment..., sera pris en compte.

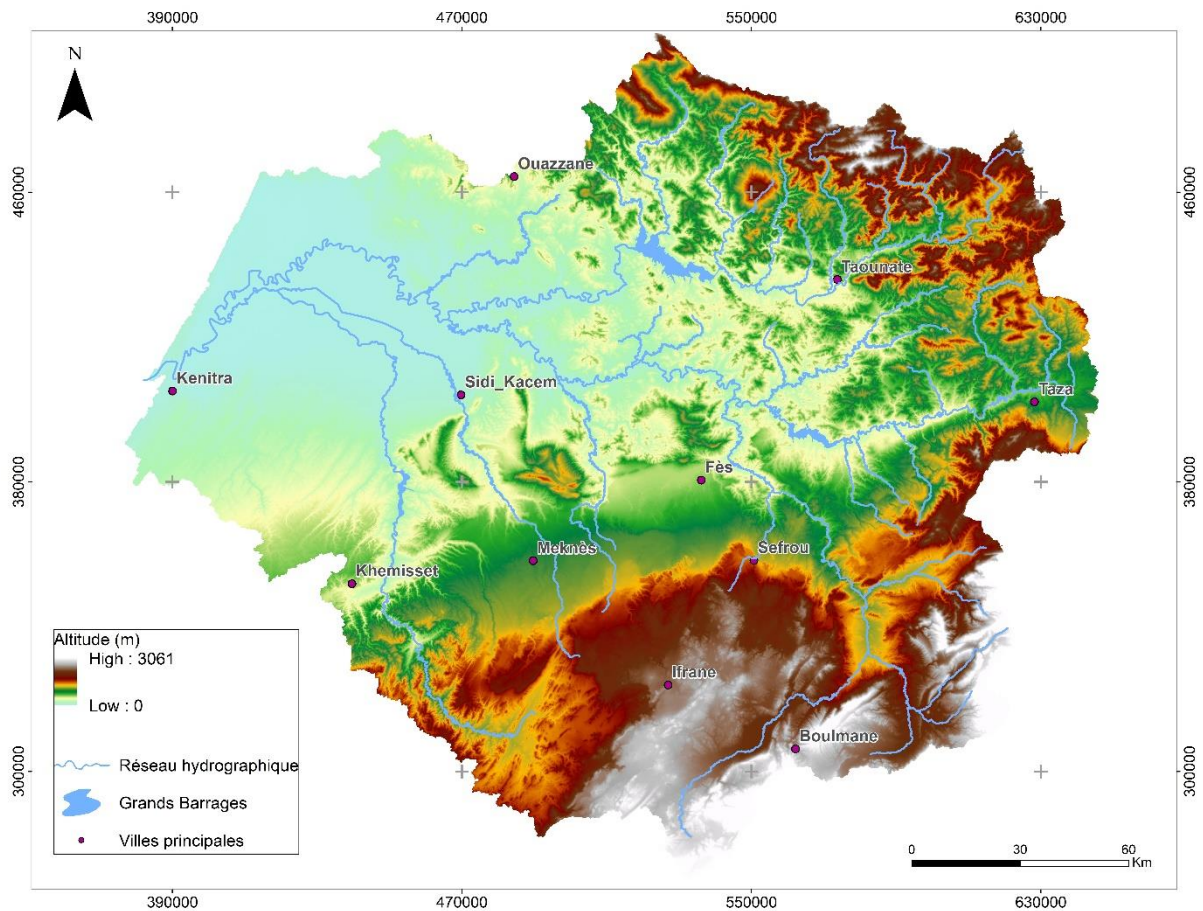


Figure 11. Topographie du bassin du Sebou. DEM issu de la mission ASTER GDEM

3.2. Pente

La carte des pentes renseigne sur la variation de la raideur du relief. Cette variation joue un rôle primordial dans la détermination des caractéristiques du bassin versant. Elle renseigne sur la topographie du bassin. Cette carte montre que les pentes les plus rudes se concentrent dans la partie amont du bassin. Le reste du bassin est caractérisé par des pentes faibles à modérées.

En conclusion, on peut dire qu'il s'agit d'un bassin d'accumulation où la sédimentation l'emporte sur l'érosion, puisque la quasi-totalité de la superficie (88.3%) présente une pente faible à modérée. On peut donc constater qu'il s'agit d'un vieux bassin.

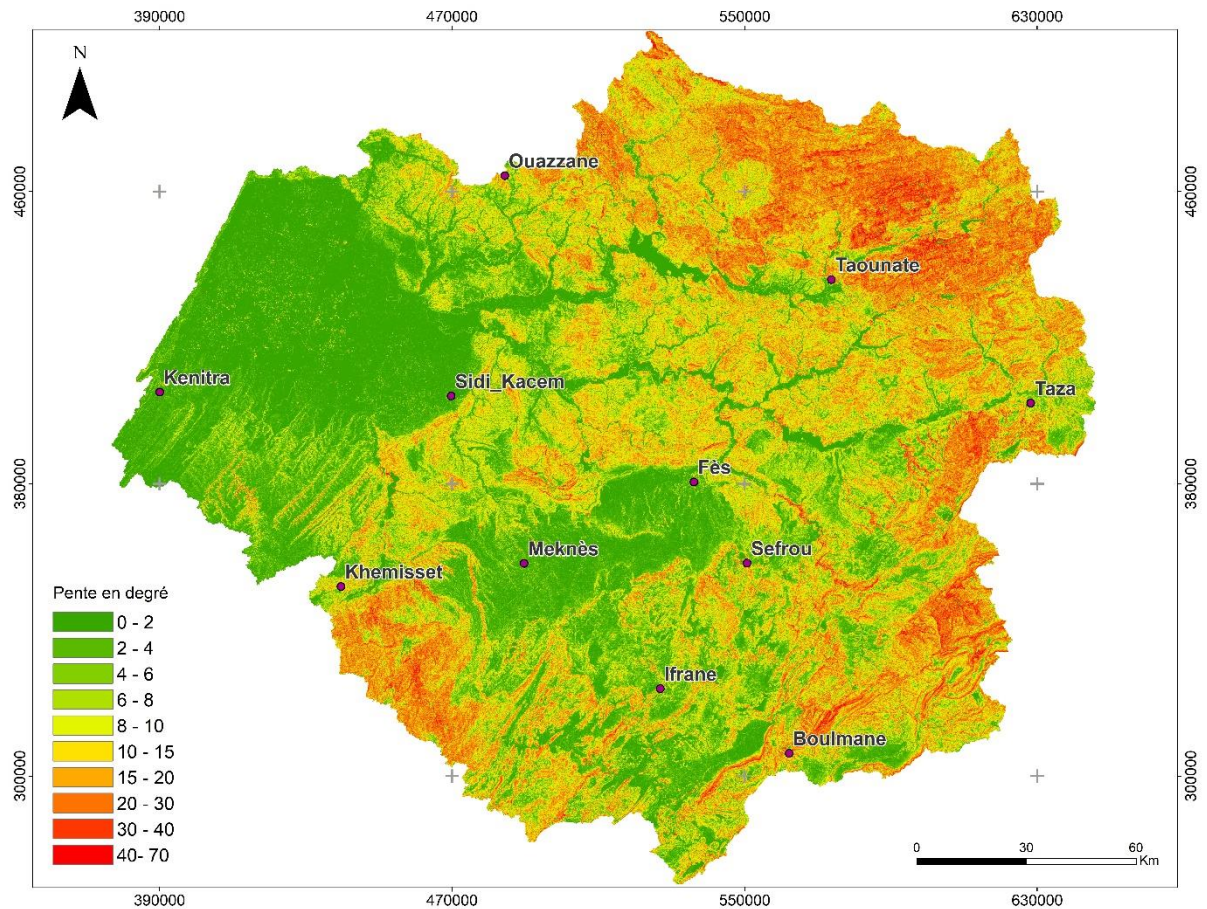


Figure 12. Carte des pentes du bassin de Sebou, élaborée à base d'ASTER GDEM

4. Climatologie

Le climat du bassin de Sebou est globalement de type méditerranéen ; Il est fortement influencé par le relief des montagnes rifaines et atlasique en amont, et par l'Atlantique en aval. L'influence océanique diminue en s'éloignant du littoral, et le climat devient continental vers l'intérieur. A cela se rajoute l'effet de l'altitude contrastée entre des crêtes montagneuses qui dépassent les 3000 mètres, et des plaines où elle est modérée ou faible : 400 à 500 mètres sur la plaine de Sais, 0 à 20 mètres au niveau du Gharb. La latitude constitue quant à elle un facteur déterminant vu l'immense superficie du bassin (40 000 km²) (ABHS, 2005 et 2011).

L'ensemble de ces principaux facteurs explique la variabilité climatique à l'échelle du bassin, et plusieurs microclimats locaux sont observés.

4.1. Précipitations

Les précipitations sont caractérisées par une irrégularité interannuelle marquée, et on peut observer des séries d'années pluvieuses qui succèdent à des séries d'années sèches.

L'analyse d'une longue série de données pluviométriques enregistrées à l'échelle du bassin de Sebou sur une période de 70 ans entre 1939 et 2010, révèle une moyenne annuelle de l'ordre de 600 millimètres (ABHS, 2005 et 2011). Cependant, la répartition spatiale des précipitations montre un contraste flagrant entre les différentes régions du bassin (fig.13) :

- Sur les versants orientaux du Moyen Atlas (haut Sebou), et le Moyen Sebou (région de Fès, vallées des oueds Rdat, R'dom et Beht) la pluviométrie moyenne annuelle ne dépasse les 400 à 550 mm ;
- Sur la zone littorale, elle est légèrement supérieure : 500 à 600 mm ;
- Elle devient nettement plus importante sur le causse moyen atlasique, avec 700 à 900 mm à Ifrane ;
- Le maximum de pluies est enregistré sur les reliefs rifains correspondant à l'amont du bassin de l'Ouergha : 1000 à 1200 mm.

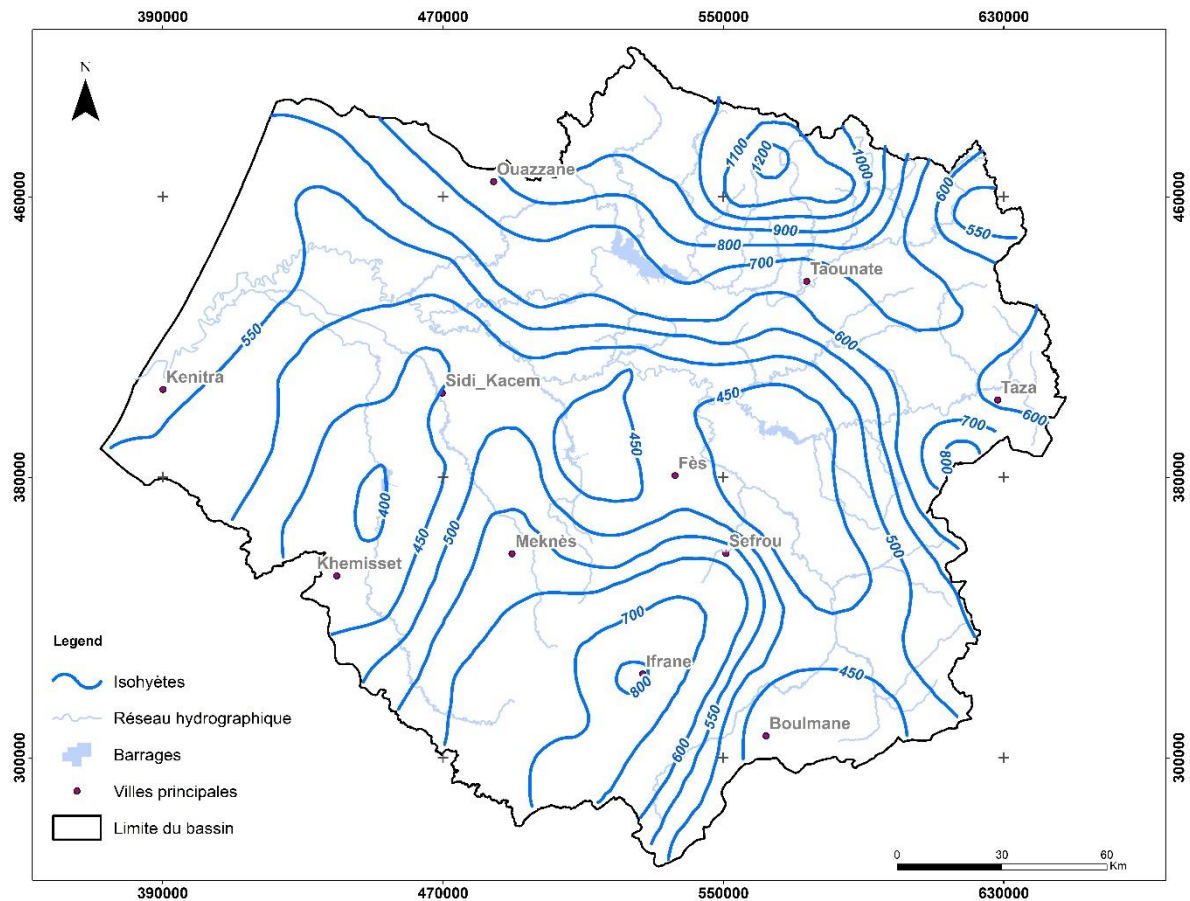


Figure 13. Carte des isohyètes du bassin du Sebou, établie à base des précipitations moyennes annuelles sur la période 1973-2003

La carte des isohyètes compte parmi les méthodes les plus utilisées pour estimer la répartition de la pluviométrie à partir des mesures ponctuelles. La fiabilité d'une telle représentation dépend d'un grand nombre de facteurs, dont la longueur de la série de données dont on dispose, et la densité du réseau de mesure.

L'organisation météorologique mondiale donne des directives très larges pour la densité minimale de pluviomètres à installer pour différents milieux. La densité minimum recommandée pour une région côtière est d'un pluviomètre tous les 900 km². Par contre pour une région de colline il faut un pluviomètre tous les 575 Km² et pour une région de montagne, il faut un pluviomètre tous les 250 Km².

En ce qui concerne le bassin du Sebou, cette règle est respectée puisque l'on dispose de 10 postes pluviométriques pour une superficie de moins de 9 000 Km en zone côtière, 23 stations pour une zone de montagne d'environ 6000 Km² et 30 stations pour une zone de collines d'une superficie d'environ 22 000 km².

L'établissement de la carte des isohyètes (fig.13) s'est basé sur les séries des précipitations moyennes annuelles sur la période 1973-2003. Il s'agit de données issues des mesures ponctuelles au niveau de plusieurs postes pluviométriques (Annexe 1) bien réparties sur le

bassin (fig.14). L'interpolation entre les différents points a été basée sur la méthode du Krigeage sous ARC-GIS.

Il faut signaler que les séries de pluies journalières recueillies auprès des services de l'ABHS ont été analysées, traitées et complétées par des méthodes statistiques (Annexe 2) afin de les rendre utiles.

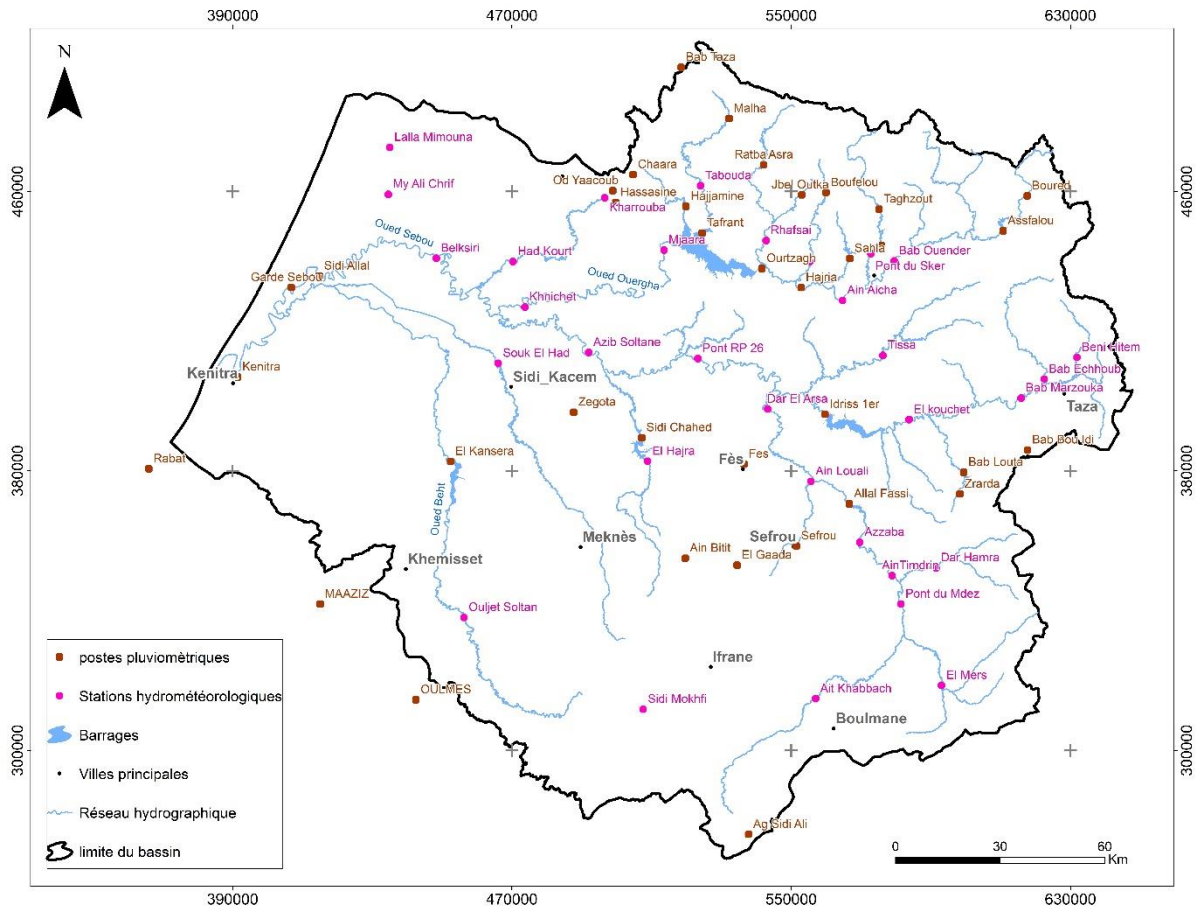


Figure 14. Stations de mesures hydroclimatiques de l'ABHS dans le bassin du Sebou

4.2. Température

Le climat du bassin de Sebou est caractérisé par une saison chaude et une autre froide. La saison chaude s'étale du mois d'avril jusqu'à octobre avec des valeurs maximales enregistrées en juillet et août, et la saison froide correspond à la période comprise entre novembre et mars, les températures minimales étant enregistrées en janvier.

L'hiver est caractérisé généralement par une alternance d'épisodes de froid sévère et d'épisodes tièdes. Pendant l'été, la température est très élevée sans refroidissement nocturne notable dans les zones internes continentales, et elle est modérée à plus ou moins élevée dans les zones montagneuses et côtières avec refroidissement nocturne.

Les zones internes du bassin enregistrent des températures extrêmes très marquées, avec des amplitudes thermiques élevées, alors que les zones côtières connaissent des valeurs modérées.

En fin, Nous signalons que la température moyenne annuelle au niveau du bassin, calculée à partir d'une longue série d'observation, varie généralement entre 10 et 20°C (ABHS, 2005 et 2011).

4.3. Evaporation

La température relativement élevée sur une grande partie du bassin, cause une évaporation importante surtout pendant la saison chaude, puisque 65% de la lame annelle évaporée est enregistré entre les deux mois de mai et septembre.

Mis à part les orages surtout dans le Moyen Atlas, L'absence de pluies significatives en été pratiquement sur toute la superficie du bassin, explique l'évaporation potentielle assez élevée. En effet, l'évaporation potentielle moyenne annuelle varie entre 1600 mm sur la côte et 2000 mm vers l'intérieur.

Au cours de l'année, l'évaporation potentielle moyenne est maximale en juillet et août avec près de 300 mm/mois, et minimale en décembre et janvier avec moins de 50 mm/mois (ABHS, 2005 et 2011).

5. Hydrologie de surface

5.1. Réseau hydrographique du bassin

Le cours d'eau principal est l'Oued Sebou, qui prend naissance dans le Moyen Atlas est parcourt environ 600 km avant de débaucher dans l'océan atlantique à Mehdia près de la ville de Kenitra. Les principaux affluents sont l'Inaouene, l'Ouergha et l'Oued Beht.

La majeure partie de la zone moyenne atlasique du bassin (6 000 km²) est drainée par le haut Sebou, alors que la zone rifaine est drainée essentiellement (7 300 km²) par l'Oued Ouergha.

L'Oued Inaouene, qui rejoint le Sebou en aval de la ville de Fès, draine avec son affluent Oued lebene, une superficie de l'ordre de 5 200 km² au niveau de la zone pré-rifaine des provinces de Taza et de Taounate, ainsi que la partie orientale du couloir Fès-Taza.

Le moyen Sebou collecte les eaux du centre du bassin (5 400 km²), essentiellement la partie centrale du couloir sud-rifain, par le biais de ses affluents : oued Boufekrane, oued Ouislane, oued Fès, oued El Mehraz et oued Mikkès.

Juste après sa confluence avec l'Ouergha, le Sebou se jette dans la plaine alluviale du Gharb où il dessine un trajet méandrique qui draine environ 6 000 km².

L'Oued Beht draine une superficie de 9 000 km² au sud-ouest du bassin, avant de rejoindre le Sebou dans la plaine du Gharb près de Sidi Allal Tazi.

En fin, l'oued Sebou compte jusqu'à maintenant trois barrages : Allal El Fassi qui régularise les eaux du haut Sebou, Sidi Chahed sur l'oued Mikkès (affluent du moyen Sebou), et le barrage de garde en aval, il permet de maintenir le niveau du plan d'eau pour assurer le pompage.

Le barrage Allal El Fassi constitue avec Idriss 1^{er} un complexe hydraulique permettant de dériver une partie des eaux du haut Sebou vers le bassin de l'oued Inaouene, profitant ainsi de la chute existante entre les deux oueds pour la production de l'énergie et des possibilités de stockage plus importantes dans la retenue du barrage Idriss 1^{er}. Le transfert est effectué via la galerie de Matmata de 4,5 m de diamètre et 15,5 km de longueur, avec un débit maximal de 38 m³/s.

Barrage	Cours d'eau	X (km)	Y (km)	Cote NGM (m)	Date de mise en service	Capacité (millions m ³)
Allal El Fassi	Sebou	566.650	370.540	418.50	15-12-1990	63.7
Bab Louta	Bou Sbaa	599.400	379.600	560.00	28-12-1999	34.0
Garde Sebou	Sebou	406.840	432.500	006.50	1991	37.0
Bouhouda	Sra	575.900	444.500	382.00	14-10-1998	55.5
El Kansera	Beht	452.450	382.700	122.50	1934	230.0
Idriss I	Inaouene	559.700	396.200	217.00	12-03-1973	1157.0
Sahla	Sahla	566.800	440.800	372.00	16-06-1994	62.0
Sidi Chahed	Mikkès	507.200	389.500	210.00	22-01-1997	170.0
Al Wahda	Ouergha	515.060	442.200	166.00	12-11-1996	3714.0
Asfalou	Asfalou	610.720	448.720	745.00	25-11-1999	316.9

Tableau 1. Caractéristiques des grands barrages dans le bassin du Sebou. (ABHS)

5.3. Analyse des apports

L'ABHS est doté d'un réseau de stations hydrométriques qui permet le suivi du comportement hydrologique des principaux cours d'eau à l'échelle du bassin.

Avec un apport moyen annuel qui dépasse les 5,6 milliards de mètres cubes, le Sebou compte parmi les bassins les plus riches en ressources hydriques à l'échelle nationale. Les ressources en eau annuelles sont de l'ordre de 887m³ par habitant (la moyenne nationale est de 604 m³/hab).

Ces apports sont caractérisés par une grande variabilité spatio-temporelle, encore plus accentuée que celle observée au niveau des précipitations. Les études menées dans le cadre de l'actualisation du PDAIRE (Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau) en 2011, estiment un coefficient de variation (rapport de l'écart-type à la moyenne) compris entre 0,60 et 0,80 qui reflète une forte variation interannuelle.

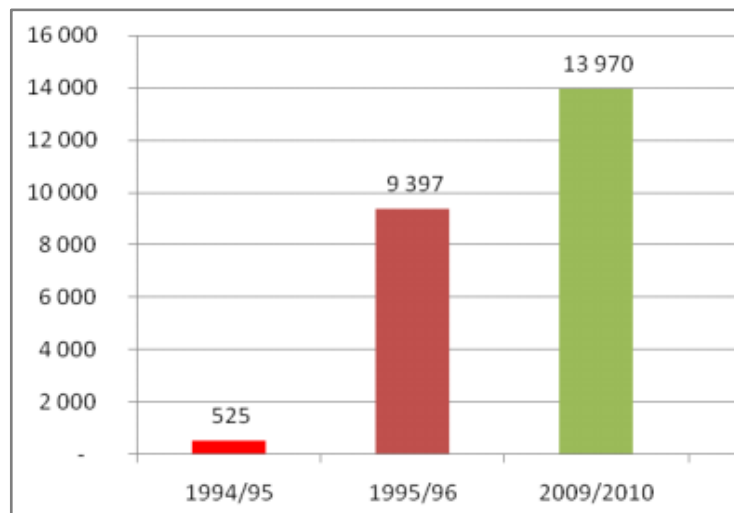


Figure 16. Variabilité interannuelle des apports en eau en millions de m³ (ABHS)

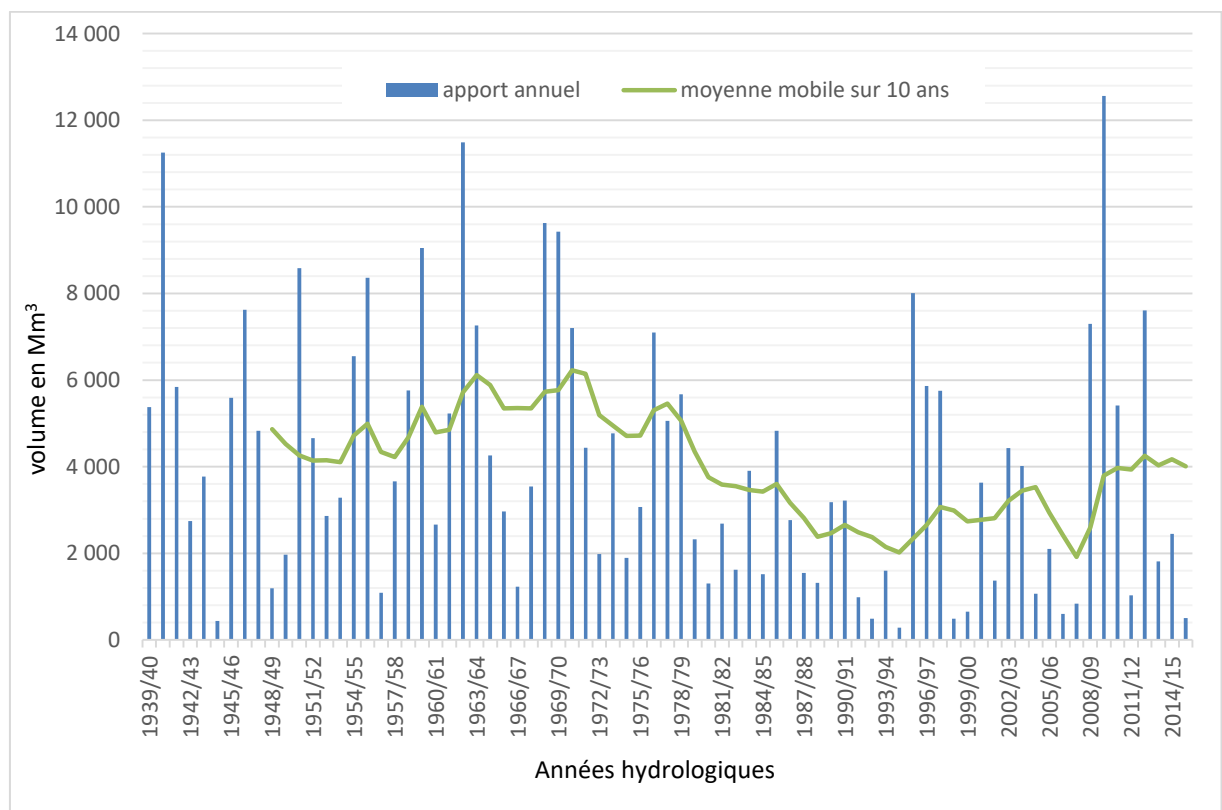


Figure 17. Evolution des apports en eau de surface en millions m³ du bassin de Sebou entre 1939/40 et 2015/16 (ABHS)

L'analyse du graphique montre que les apports annuels peuvent varier considérablement d'une année à l'autre (1994/95 année très sèche et 1995/96 année humide). D'autre part, la comparaison des deux séries 1939-1973 et 1973-2010 montre une diminution de 40% des apports moyennes.

Quant à la variation spatiale, les études ont montré que les zones du haut et bas Sebou, ainsi que le bassin de l'oued Mikkès, produisent un débit spécifique (débits moyens annuels par unité de surface du bassin versant) qui ne dépasse 11/s par km² ; le bassin d'Inaouene produit 3 à 4 l/s par km², alors que le bassin de l'Ouergha atteint 10 à 15 l/s par km². Le coefficient de ruissellement varie entre 10 % environ dans le haut Sebou, là où les terrains carbonatés karstifiés à forte perméabilité prédominent, et 40 % dans le bassin de l'Ouergha, caractérisé par des formations géologiques généralement marneuses imperméable avec une forte pluviométrie.

5.4. Régime hydrologique

Le contraste géologique net en amont du bassin de Sebou entre le contexte Atlasique et celui du Rif, explique l'existence de deux régimes hydrologiques différents :

- Le domaine moyen atlasique est caractérisé par la prédominance des formations géologiques carbonatées karstifiées perméables, favorisant l'infiltration et donc atténuant l'ampleur des crues du haut Sebou lors de la saison pluviale. La résurgence des eaux souterraines assure un écoulement pendant la saison sèche.
- Le domaine rifain est caractérisé, par contre, par des formations marneuses imperméables, favorisant le ruissellement et engendrant des crues violentes au niveau de l'Ouergha durant la saison pluviale. Celui-ci est caractérisé par un étiage très marqué au cours de la saison sèche.

Une étude de détection d'évolutions dans les régimes hydrologiques du bassin du Sebou, menée par Benjamin RENARD de « l'Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement (CEMAGREF France) », et publiée par l'Institut Royal des Etudes stratégiques (IRES) en 2010, montre que les débits mensuels intra-annuels de l'Ouergha et de l'Inaouene sont caractérisées par une forte variabilité, avec des étiages marqués en été, et des écoulements maximaux en hiver (janvier-février). Le haut et moyen Sebou présente une variabilité intra-annuelle modérée, avec des étiages moins marqués, et des écoulements maximaux plutôt au printemps (mars-avril).

L'étude a analysé les séries de débits journaliers de onze stations situées dans le bassin du Sebou, sur la période 1949-2006, elle conclue une baisse des écoulements, notamment à partir des années quatre-vingts, se manifestant par une diminution des modules annuels, une aggravation des étiages et une diminution des volumes et des durées en période de crue.

5.5. La qualité des ressources en eau

Le réseau de surveillance de la qualité des eaux de surface au niveau du bassin de Sebou est constitué de 68 stations (ministère chargé de l'eau, 2014), dont 14 (réseau de référence) dans les tronçons non influencés par les sources de pollution, 30 (réseau opérationnel) dans les tronçons influencés par les sources de pollution, 24 (réseau complémentaire) pour couvrir l'intégralité des masses d'eau, et des stations pour le suivi de la qualité des eaux des retenues des barrages.

Les résultats de la surveillance montrent que la qualité des eaux au niveau des cours d'eau est très mauvaise en aval des grandes agglomérations : Fès, Sefrou, Meknès, Taza, Sidi Kacem,

Sidi Slimane..., alors qu'elle est bonne en amont du bassin : le haut Sebou, l'oued Inaouene (sauf à l'aval de Taza), l'oued Ouergha, et en amont de l'oued Beht.

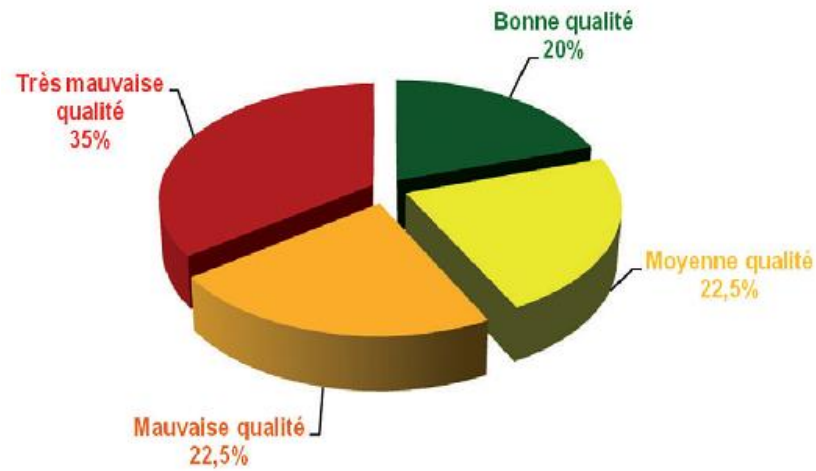


Figure 18. Qualité globale des eaux de surface du bassin de Sebou (ABHS, 2013)

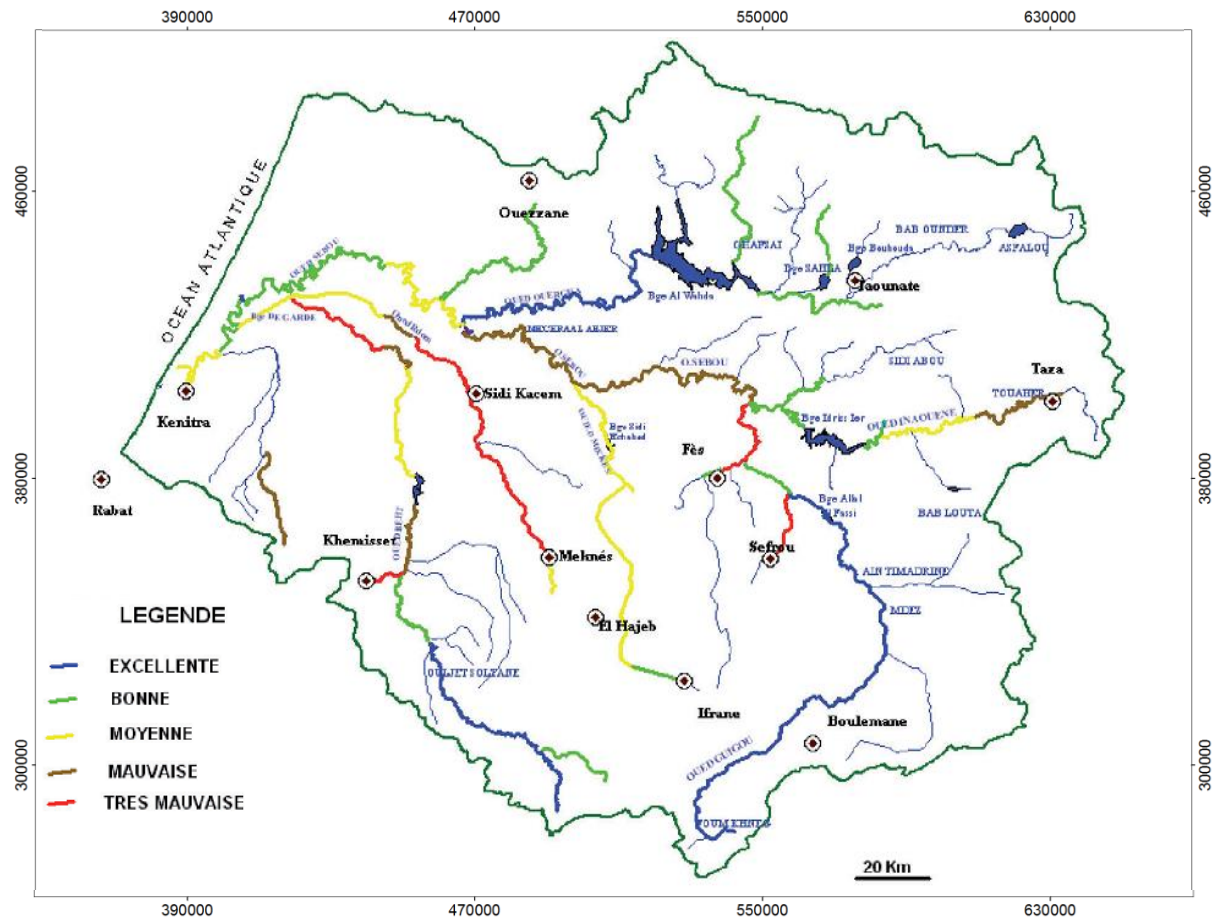


Figure 19. Répartition de la qualité des eaux de surface à l'échelle du bassin de Sebou (ABHS, 2013)

Les sources de pollution sont multiples :

- Pollution issue de l'activité domestique : 86% des eaux usées des villes dans le bassin, dont le volume est estimé à 80 millions de m³, sont déversés dans les cours d'eau.
- Pollution issue de l'activité industrielle : L'activité industrielle variée, essentiellement les sucreries, les papeteries et les huileries, génère une pollution organique de l'ordre de 3,5 millions équivalents-habitants.
- Pollution issue de l'activité agricole : le développement de la culture intensive, et l'utilisation des engrais et des produits phytosanitaires constituent une source de pollution surtout en nitrates.

6. Hydrogéologie

Les ressources en eau souterraines mobilisables du bassin du Sebou sont estimées à 1020 millions de mètres cubes, soit 25% du potentiel national, emmagasinées dans plusieurs unités hydrogéologiques dont les principales sont :

- Le système aquifère Gharb-Maâmora ;
- Le système aquifère du Saïs ;
- Les nappes du couloir de Fès-Taza,
- La nappe du causse moyen atlasique,
- La nappe du Moyen Atlas plissé.

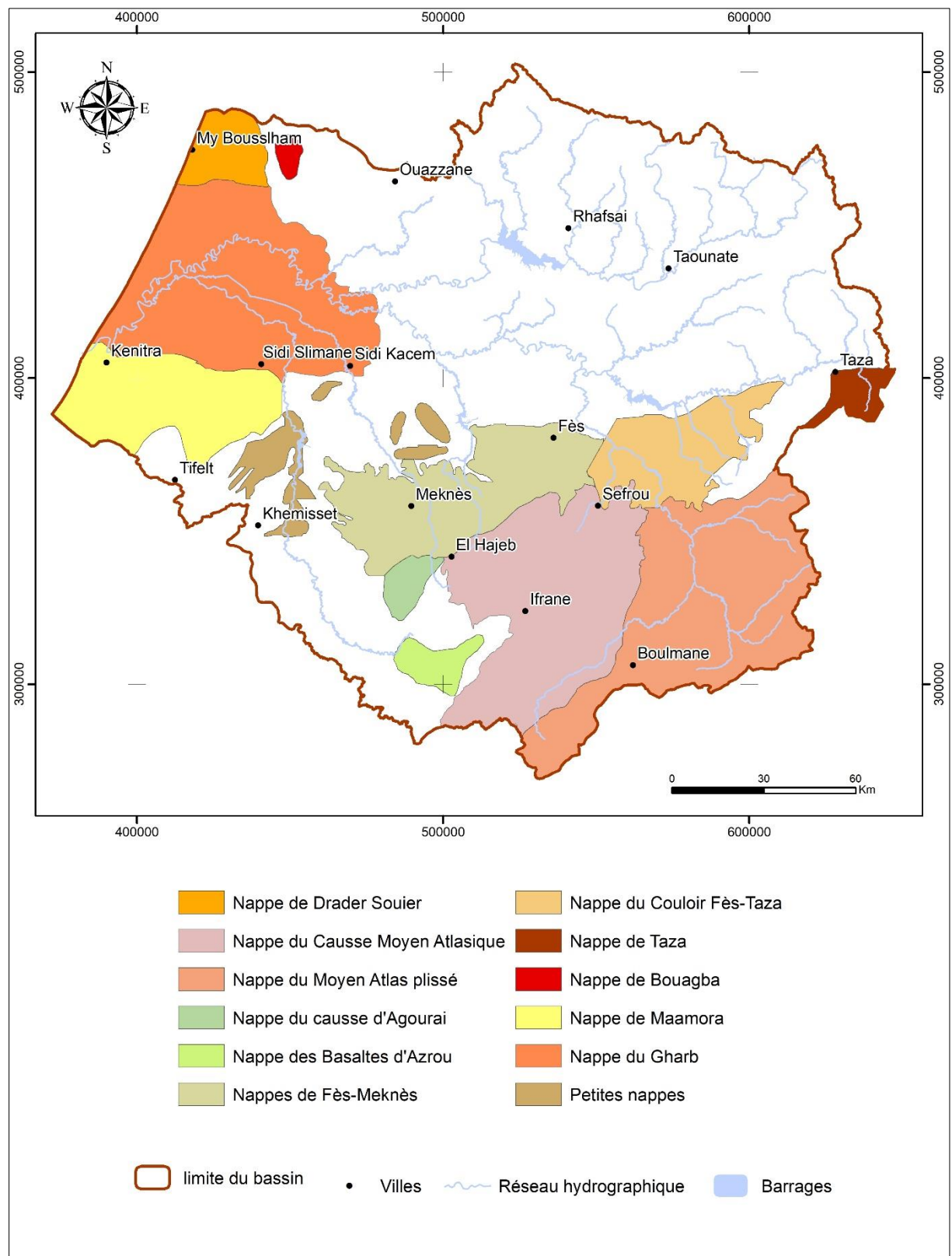


Figure 20. Carte des principales nappes au niveau du bassin du Sebou (ABHS, 2013)

6.1. Le complexe Gharb-Mamora

Peut-être subdivisé en deux sous-unités :

6.1.1. La nappe de Mamora

L'aquifère correspond aux sables, sables argileux et calcarénites du Plio-quaternaire, l'ensemble repose sur un substratum imperméable constitué par les marnes du Miocène.

La profondeur de la nappe varie généralement entre 20 et 40 m, pouvant dépasser localement 80 m dans les zones de subsidence. L'épaisseur saturée est de 30 mètres en moyen au centre de la plaine, elle atteint 75 à 100 m au nord. Au Sud, l'aquifère se biseaute.

Il s'agit d'une nappe phréatique, qui s'alimente essentiellement par infiltration directe des eaux pluviales. L'écoulement est généralement vers le nord et le nord-ouest en direction de la nappe du Gharb et de l'océan.

En plus des pertes par écoulement vers l'océan et vers la nappe du Gharb, la nappe de Mamora est drainée par plusieurs cours d'eau : l'oued Beht, Fouarat, Tiflet... à cela s'ajoute les quantités prélevées pour l'alimentation en eau potable (AEP), et pour l'agriculture. Le bilan est légèrement déficitaire, évalué d'environ 10 Mm³/an, ce qui se traduit par une baisse du niveau piézométrique, et par une intrusion des eaux marines dans la zone littorale.

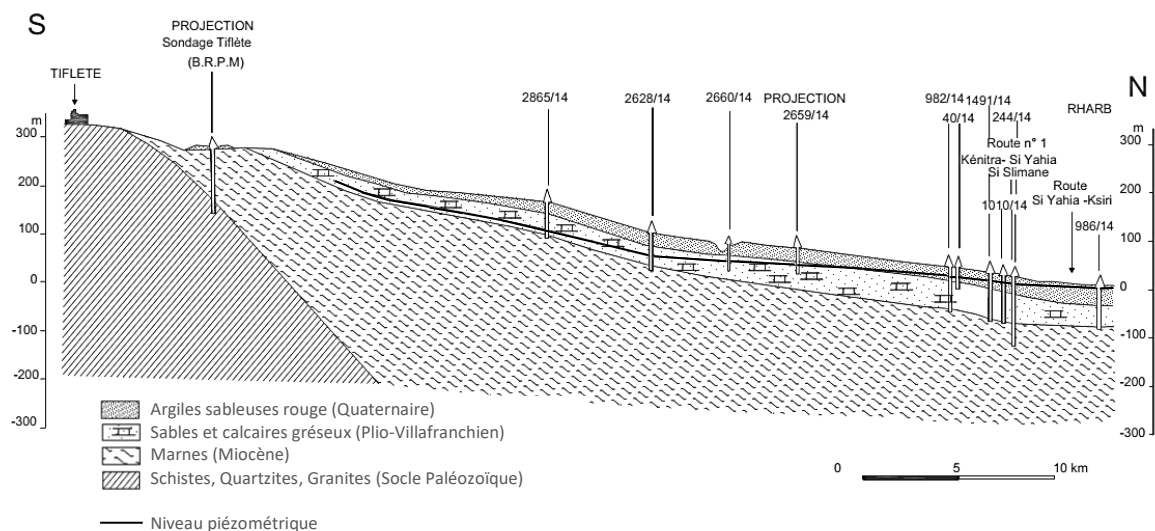


Figure 21. Coupe géologique au niveau de la Mamora (Combe, 1975)

6.1.2. La nappe du Gharb

D'une superficie de 4000 km², le bassin du Gharb renferme deux unités aquifères : une nappe superficielle libre et une nappe profonde captive.

La nappe superficielle

Circule dans des formations de sables fins silteux du Quaternaire récent, que l'on rencontre dans la partie centrale du Gharb. Le substratum de la nappe est constitué par une épaisse série limoneuse semi-perméable. Le niveau de l'eau est généralement compris entre 40 et 60 m.

C'est un aquifère à intérêt hydrogéologique limité, qui peut devenir localement très productif en raison de l'intercalation de lentilles sableuses plus perméables.

La nappe profonde

Correspond à un système aquifère multicouche, semi-captif sur une grande partie de son étendue. Elle circule à l'est du bassin dans des graviers et conglomérats, et à l'ouest (zone côtière) et au sud dans des niveaux sableux, gréseux et calcarénites. Ces formations sont séparées par des niveaux limono-argileux. L'ensemble repose sur un substratum très épais qui correspond aux marnes du Miocène.

La profondeur maximale de l'aquifère profond est de 350 m au sud-est du Bassin. Elle diminue progressivement vers le Nord pour atteindre 100 à 150 m. A l'Ouest, cette profondeur atteint 250 m.

6.2. Le système aquifère du Saïs

Constitué de deux principaux réservoirs :

- Le premier correspond aux carbonates (calcaires et dolomies) du lias renfermant une nappe profonde sous pression lithostatique exercée par les marnes miocènes du bassin. L'alimentation s'effectue par infiltration au niveau du causse moyen atlasique, là où ces formations affleurent à la surface et constitue une nappe libre.
- Le deuxième réservoir est superficiel, formé de dépôts lacustres plio-quaternaires à l'Est, et de dépôts sahéliennes à l'Ouest :
 - Au niveau du plateau de Meknès, le réservoir correspond essentiellement aux sables, grès et conglomérats du Sahélien et du Pliocène, et localement aux calcaires lacustres ;
 - Vers l'Est, dans la plaine du Saïs, le réservoir est principalement constitué des calcaires lacustres et conglomérats du Plio-Villafranchien.

Les deux réservoirs profond et superficiel sont séparés par l'épaisse formation de marnes tortoniennes imperméables, dont la puissance peut atteindre 1000 m. Ils peuvent communiquer directement au sud du bassin là où ils sont adjacents, ou indirectement au nord par drainance ascendante à partir de la nappe profonde en charge (Amraoui, 2005).

6.3. La nappe du couloir Fès-Taza

Le couloir de Fès-Taza renferme un aquifère profond important, constitué par les carbonates liasiques qui correspondent au prolongement souterrain vers le Nord-Ouest de la couverture mésozoïque du causse moyen atlasique. Il s'agit d'une nappe captive, vu que le réservoir se loge entre deux formations imperméables : un substratum triasique argileux (argiles rouges), et une couverture miocène marneuse (marnes bleues). Un autre aquifère de faible importance hydrogéologique est représenté par les grès du Miocène.

Les mouvements tectoniques ont subdivisé l'aquifère liasique en plusieurs compartiments généralement limités par des failles, à la faveur desquelles apparaissent plusieurs sources qui drainent la nappe.

L'alimentation se fait par infiltration des eaux pluviales, par drainance descendante depuis les formations de couverture, et par les écoulements latéraux souterrains provenant de la nappe profonde de Fès-Meknès.

6.4. Les nappes du causse moyen atlasique

Logées essentiellement dans les calcaires et dolomies du Lias, formations carbonatées ayant resté quasi-tabulaires, et qui affleure sur la majeure partie de la superficie du causse.

L'alimentation se fait par infiltration des eaux pluviales et de la fonte des neiges. Le taux d'infiltration est relativement très élevé (35 à 40%), vu que les formations carbonatées du lias sont karstifiées.

L'exsurgence des eaux souterraines se fait principalement à la périphérie du Moyen Atlas tabulaire, au contact du Lias avec son substratum triasique imperméable : Ras El Ma, Sidi Rached, Oum-Er-Rbia...

D'autres modalités de perte des eaux de ces nappes sont répertoriés : alimentation des réservoirs profonds et superficiels du sillon sud-rifain, drainage par l'oued Sebou des bassins de Sefrou et d'Annoeur-Bsabis, drainage par les basaltes quaternaires de la vallée de l'oued Tigrigra des eaux des bassins de Ras-El-Ma et d'Aîn-Leuh.

6.5. Les nappes du Moyen Atlas plissé

Les calcaires et dolomies du Lias constituent, comme dans le Moyen Atlas tabulaire, les formations aquifères les plus importantes. Elles sont le siège de fissuration et de karstification très développés, ce qui explique la prédominance du régime turbulent. Ces réservoirs s'étendent sur une superficie d'environ 4200 km² en amont du bassin de Sebou.

La structure complexe du Moyen Atlas plissé, en rides anticlinales et cuvettes synclinales, commande l'écoulement souterrain qui se fait généralement le long des zones synclinales et débouche dans de petits bassins qui coïncident généralement avec les principales cuvettes synclinales du Moyen Atlas plissé : le bassin du Haut Guigou, le bassin du Mdez, le bassin des Marmoucha, le bassin de Berkine - Bou Rached, les bassins de la bordure orientale de la chaîne.

Cette nappe assure l'écoulement d'importantes sources du haut Sebou (principalement la source de Sebou, dont le débit est de l'ordre de 2 m³/s). Elle est exploitée pour l'AEP des centres de la province de Boulemane et pour l'irrigation.

L'alimentation est particulièrement favorable vu la géologie de la région d'une part, et la pluviosité importante d'autre part. Ce qui fait du Moyen Atlas plissé un véritable château des eaux souterraines alimentant et régularisant deux des principaux oueds du Maroc, Sebou et Moulouya :

- Un versant oriental méditerranéen qui alimente le bassin de la Moulouya ; soit par des sources de déversement à la faveur des failles et flexures affectant les structures anticlinales, soit par abouchement direct entre le Miocène inférieur conglomératique et le Lias sous la couverture marneuse du Miocène de la plaine de Guercif, ou encore par abouchement avec les conglomérats du Miocène et les calcaires du Turonien en Haute-Moulouya.
- Un versant occidental atlantique qui alimente le bassin du Sebou, par le biais de grosses sources qui régularisent l'écoulement.

7. Aperçu socioéconomique

7.1. Population

Selon les résultats du dernier recensement général de 2014, le territoire du bassin versant du Sebou abrite environ 3,7 millions d'habitants en milieu urbain, et 3,1 millions en milieu rural, soit une population totale de l'ordre de 6,8 millions d'habitants, ce qui représente 20,2% de la population du royaume. Le Sebou est donc, le deuxième bassin le plus peuplé du Maroc. Le taux d'accroissement entre 2004 et 2014 est de 9,68 % contre 1,4% pour le Maroc.

Le taux d'urbanisation atteint 54,56% en 2014, légèrement inférieur à la moyenne nationale. Le nombre de centres urbains est de 74 dont les plus importants sont Fès et Kénitra avec une population qui dépasse 1 million, et Meknès avec plus de 800 milles habitants. Le bassin compte environ 280 communes rurales.

7.2. Activités économiques

Le bassin de Sebou dispose d'une activité agricole et industrielle qui contribue de façon importante à l'économie nationale.

7.2.1. Agriculture

L'activité la plus prépondérante au niveau du bassin de Sebou est l'agriculture. La superficie agricole utile (SAU) est évaluée à 1 873 000 ha, soit environ 20% du potentiel national. L'occupation de la SAU est très diversifiée, et on observe une dominance des céréales (60%), le reste est occupé par de plantes fruitières (14.4 %), légumineuses (6.6 %), cultures industrielles -betterave et canne à sucre (4.2 %), cultures oléagineuses (3.6 %), cultures maraichères (3.1 %), cultures fourragères (1.7%).

L'agriculture irriguée en grande hydraulique représente 6% de la SAU. Elle correspond essentiellement aux cultures sucrières, maraîchage, élevage..., concentrée dans les périmètres du Gharb et du Beht. L'agriculture irriguée dans les périmètres de petite et moyenne hydraulique est localisée en particulier dans le périmètre du Moyen Sebou - Inaouene, sous forme de cultures céréalières et élevage. Le reste est représenté par une agriculture intensive irriguée à partir de pompes privées avec des aménagements tels que des abris serres, particulièrement sur la zone côtière, ou encore une agriculture en bour, qui représente un potentiel.

7.2.2. Industrie

La facilité d'accès et la disponibilité des ressources, ont favorisé le développement de l'activité industrielle dans le bassin de Sebou, particulièrement dans les grands pôles urbains (Fès, Kenitra, Meknès). On en distingue :

- Des industries lourdes (raffinerie, sucrerie, cimenterie, ...) ;
- Des unités moyennes à petites : l'agro-alimentaire (laiteries, huileries, conserveries...), les tanneries, le textile, la papeterie, ...

A ces activités industrielles, s'ajoute la production de l'énergie hydroélectrique, qu'est l'une des plus importantes au niveau national grâce aux centrales hydroélectriques associées aux grands barrages que sont Idriss 1er, El Kansera, Allal El Fassi et Al Wahda, qui représentent une puissance installée de 540 MW.

7.2.3. Artisanat

Le bassin est doté d'une activité artisanale forte, concentrée dans la ville de Fès où plus de 5600 unités de production sont recensés (cuir, bois, métaux, laine, argile, or ...) employant plus de 30 000 artisans.

La médina de constitue une véritable "ville musée" : boiserie sculptée, bronzes ciselés, zelliges polychromes, moucharabieh, colonnes et plâtres sculptés... La ville de Meknès regorge également de nombreuses activités artisanales de grande qualité : broderies, couture traditionnelle, travail du bois, maroquinerie...

7.2.4. Tourisme

Le potentiel touristique est constitué des villes impériales (Fès et Meknès), des zones de montagne, des sources thermales et des plages. L'activité touristique a renoué avec la croissance notamment grâce à la mise en place de liaisons aériennes directes reliant Fès à d'autres capitales européennes.

La ville de Fès est l'une des plus anciennes cités de l'Islam. Sa médina a été classée en 1981 par l'UNESCO dans la liste du Patrimoine mondial. C'est une ville millénaire, fondée à la fin du huitième siècle par Idriss I. Étendue sur 282 ha, elle est dotée d'un réseau d'eau traditionnel

ayant une longueur de 70 km desservant les bains, les bassins, les jardins et près de 4000 fontaines publiques et privées.

Parmi les environs qui présentent un intérêt touristique, la station d'Ifrane, Dayet Aoua et circuit des lacs, ...

La ville de Meknès a été classée en décembre 1996 Patrimoine Universel de l'Humanité par la Commission Inter-Gouvernementale de L'U.N.E.S.CO. Outre son intérêt architectural évident, la Kasbah de Meknès revêt une importance singulière, puisqu'il s'agit de la première grande œuvre de la dynastie des Alaouites, dynastie qui règne au Maroc depuis plus de 300 ans.

A proximité, le site de Volubilis est classé Patrimoine Universel et attire de nombreux touristes, de même que la cité de Moulay Idriss.

Chapitre II : Gestion des ressources en eau du bassin du Sebou

Introduction

La gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin versant, nécessite dans un premier temps, la bonne connaissance des potentialités hydriques, des contraintes qui régissent leurs gestion et exploitation, ainsi que des besoins et demandes en eau et leur évolution dans les différents domaines.

La création des agences des bassins hydrauliques dans le cadre de la loi 10-95, a permis d'institutionnaliser et de régionaliser les efforts de la gestion et la planification dans le secteur de l'eau. Ainsi, les ABHs, à travers le Plan Directeur d'Aménagement Intégrée des Ressources en Eau (PDAIRE) tracent les grandes lignes de la politique du secteur de l'eau dans leurs zones d'actions, et veillent à leurs applications.

L'approche de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE), désormais la stratégie adoptée par le Maroc, se base sur une vision globale qui tient compte de la dynamique des ressources en eau au sein des bassins hydrographiques, avec une implication de l'ensemble des acteurs du domaine de l'eau dans un nouveau cadre de gestion, permettant de concilier au mieux l'ensemble des usages pour le développement, tout en préservant les besoins des générations futures.

1. L'utilisation des ressources, les besoins et leur évolution

1.1. Le domaine de l'irrigation

Le bassin du Sebou présente un potentiel agricole très important. La Surface Agricole Utile (SAU) est estimée à près de 1,8 millions d'hectares, soit 20% de la SAU nationale. 357000 Ha de cette superficie sont irrigués, dont environ 110000 Ha Irriguées en grande hydraulique notamment au niveau de la plaine du Gharb, et 247000 ha en petite et moyenne hydraulique et en irrigation privée.

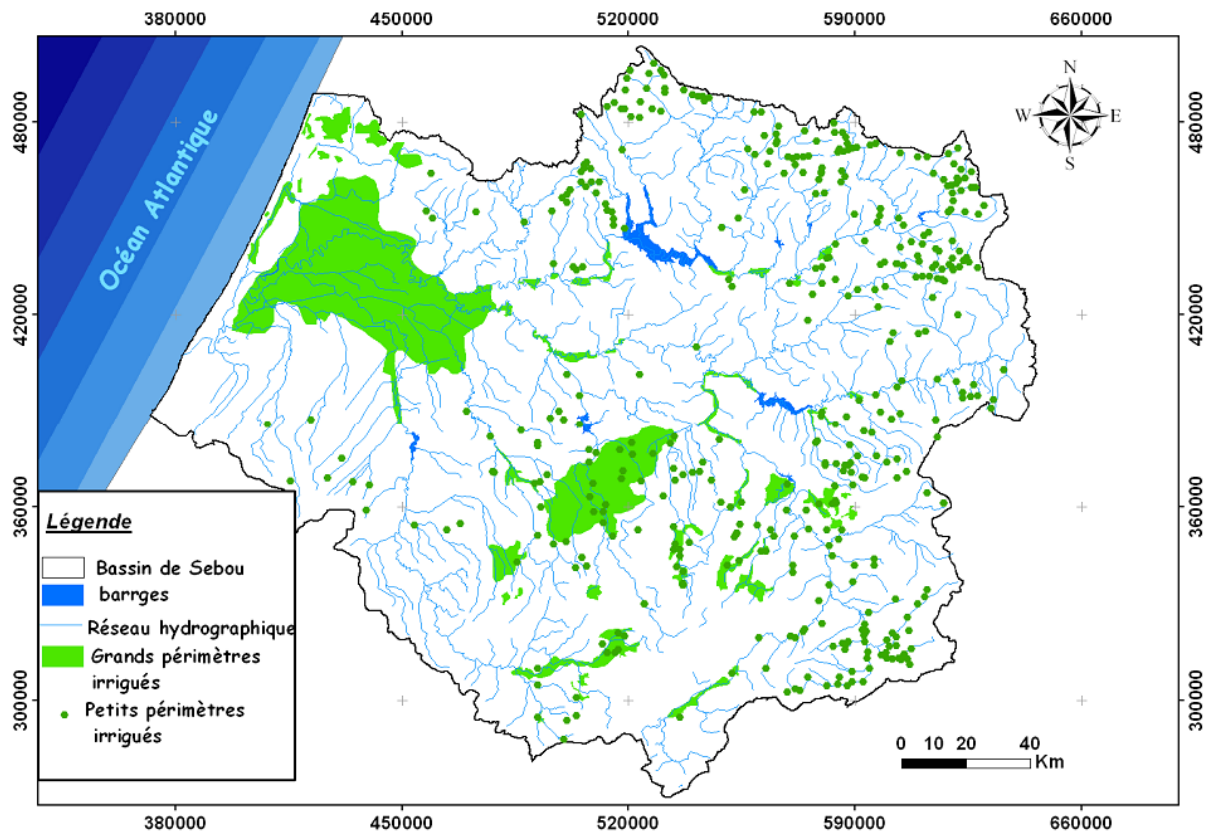


Figure 22. Les zones irriguées dans le bassin de Sebou (ABHS, 2011)

Cependant, l'irrigation dans le bassin du Sebou reste dominée par les méthodes gravitaires classiques, ce qui est à l'origine de pertes énormes.

Les ressources en eau disponibles à l'irrigation ont trois origines :

- Les eaux de surface non régularisées en amont des barrages

L'irrigation par les eaux de surface non régularisées en amont des barrages, se développe sur les terrasses des vallées et les prélèvements sont soumis aux aléas de la disponibilité de la ressource des régimes naturels des oueds. Les principaux secteurs irrigués sur les vallées des oueds en amont des barrages sont : L'oued Inaouene amont, l'oued Guigou dans la région de

Boulemane, l'oued Sebou en amont du barrage Allal Al Fassi, les oueds Ain Smane, Ain Chkef et El Himer à l'amont de Fès, l'oued Beht en amont du barrage Al Kansera...

- Les eaux de surface régularisées par les barrages

Irriguent des terrains essentiellement situées dans la plaine du Gharb, dominée par des grands barrages : El Kansera, Idriss Ier et Al Wahda.

- Les eaux souterraines

L'irrigation à partir des eaux souterraines, se développe dans les zones caractérisées par la disponibilité des ressources en eaux à de faibles profondeurs. Il s'agit surtout des deux nappes du Gharb et de Saïs et le Moyen Atlas.

	Etat actuel				Horizon du PDAIRE (2030)			
	Grande Hydraulique	Irrigation privée	Petite et Moyenne Hydraulique	Total	Grande Hydraulique	Irrigation privée	Petite et Moyenne Hydraulique	Total
Superficie en ha	108056	169800	77169	355025	216689	107485	88304	412478
Demande en eau Mm³	1083	1173	617	2875	1809	767	656	3232

Tableau 2. Prévision de l'évolution des superficies irriguées et de la demande en eau agricole du bassin de Sebou (ABHS, 2011)

1.2. Le domaine de l'alimentation en eau potable

Les besoins en eau potable urbaines et rurales ont été évalués par l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou, dans le cadre des études d'actualisation du PDAIRE.

Les estimations ont été basé sur :

- L'analyse critique des statistiques de consommations, de distribution et de production sur la période 1994-2004 ;
- Des fiches des Besoins en eau potable établies par l'ONEP en Mars 2006 ;
- L'exploitation de différentes sources d'informations sur les dotations unitaires en milieu rural, et des rendements objectifs des réseaux de distribution notamment de grandes métropoles urbaines.

Ces études ont conduit à l'évaluation des besoins en eau potable pour différents horizons : 2010, 2015, 2020, 2025 et 2030.

Besoins en Mm ³	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Milieu urbain	181	209	227	244	271	294
Milieu Rural	30	42	54	74	94	103
Total	211	251	281	318	365	397

Tableau 3. Evolution des besoins estimés en eau potables du bassin de Sebou (ABHS, 2011)

1.3. Le domaine de la production de l'énergie hydroélectrique

Le bassin de Sebou est doté de plusieurs installations hydroélectriques, associées aux barrages Idriss Ier, El Kansera, Al Wahda et Allal El Fassi, produisant en moyen près de 600 GWH par an. D'autres usines hydroélectriques de moindre importance se situent à Ras El Ma (province de Taza), à Oued Fès aval (Préfecture Fès), à Oued Aggay (Province de Sefrou) et à Oued Boufekrane (Préfecture de Meknès).

La valorisation des eaux des barrages futurs, à travers les usines prévues au niveau de Mdez, Ain Timedrine, Ouljet Soltane, Bab Ouender, et Asafalou, permettra d'élever la production hydroélectrique au niveau du bassin du Sebou à 1000 GWH/an.

1.4. La demande en eau industrielle

L'activité industrielle au niveau du bassin de Sebou est localisée essentiellement au niveau des grandes villes et centres, à l'intérieur ou à leur périphérie immédiate. Les unités industrielles sont généralement alimentées à partir des réseaux d'eau potable, et par conséquent, leur consommation est comptabilisée dans celles des centres urbains.

D'autres unités industrielles isolées, situées loin des centres, sont de grosses consommatrices d'eau prélevées à partir de la nappe, ou à partir des ressources superficielles. Le traitement de données de différentes sources, dans le cadre des études d'actualisation du PDAIRE, concernant la consommation des unités isolées, a abouti aux résultats récapitulés dans le tableau 4.

Activité	Unité	localité	Consommation en eau en milliers de m ³ /an					
			2005	2010	2015	2020	2025	2030
Fabrication de pâte à papier	cellulose du Maroc	Sidi Yahia	13 002	14 356	15 850	17 500	19 321	21 332
Fabrication de pâte à papier	Kenitra (CMCP)	Kenitra	13 762	15 195	15 195	15 195	15 195	15 195
Fabrication de pâte à papier	Meknès (SIFAP)	Meknes	296	327	327	327	327	327
Lait, fromages...	Centrale laitière	Meknes	248	302	367	447	544	662
Fabrication des détergents	Cosuni	Ras Elma Fes	36	40	44	49	54	60
Transformation des algues	Setexam	Kenitra	462	485	510	536	564	592
Conserve des légumes, huile d'olive	Nora	Saba Ayoun	40	44	49	54	60	66
Huile d'olives	LOUSRA	Ain Taoujdate	40	44	49	54	60	66
Production de sucre	Suc. Bel KSIRI- G	Bel Ksiri	320	337	354	372	391	411
Production de sucre	Suc. Bel KSIRI- CAS	Bel Ksiri	267	281	295	310	326	343
Production de sucre	Suc. Dar EL Gueddari	Dar El Gueddari	646	679	714	750	788	829
Fab. de l'alcool éthylique	SOTRAMEG	Allal Tazi	205	215	226	238	250	263
Tanneries	Tanneries		132	146	161	178	197	217
Huileries	Huileries		76	84	92	102	113	124
Production de vin			712	750	793	839	793	839
Total			31 453	34 570	36 331	38 274	40 420	42 791

Tableau 4. Evolution de la consommation en eau des unités industrielles isolées (ABHS, 2011)

2. La gestion des ressources en eau

2.1. L'Agence du Bassin Hydraulique

La création des agences de bassins hydrauliques (ABH) dans le cadre de la loi 10-95 sur l'eau, a constitué certainement une décision novatrice en matière de la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle des bassins. Il s'agit d'organismes publics dotés de la personnalité morale et de l'autonomie financière, qui viennent compléter l'architecture de l'organisation administrative de la gestion de l'eau, et constituer un organisme fédérateur des acteurs concernés par la gestion de l'eau au niveau régional.

Les agences des bassins traduisent la politique de décentralisation de la gestion de l'eau, prévue par la loi 10-95. Ils ont pour objet principale, de planifier et gérer les ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant, en concertation avec l'ensemble des acteurs de l'eau, en veillant à la protection du domaine public hydraulique dans le but d'un développement durable.

Ainsi, les ABHs sont chargées de :

- Elaborer le Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau (PDAIRE) et de veiller à son application ;
- Délivrer les autorisations et les concessions d'utilisation du Domaine Publique Hydraulique (DPH) ;
- Fournir les aides financières et l'assistance technique dans le domaine de la pollution des ressources en eau, de l'aménagement et de l'utilisation du DPH ;
- Réaliser les mesures et les études nécessaires à l'évaluation, la planification et la gestion des ressources en eau ;
- Réaliser les mesures de qualité de l'eau et d'appliquer les dispositions réglementaires relatives à la protection des ressources en eau et à la restauration de leur qualité ;
- Proposer et d'exécuter les mesures adéquates pour assurer l'approvisionnement en eau en cas de pénurie d'eau ou pour prévenir les risques d'inondation ;
- Gérer et contrôler l'utilisation des ressources en eau mobilisées ;
- Réaliser les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les inondations ;
- Tenir un registre des droits d'eau reconnus et des concessions et autorisations de prélèvement d'eau accordées.

L'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou, Instaurée par le décret 2.00.477 du 14 Novembre 2000, pris en application de l'article 20 de la loi 10-95 sur l'eau, est administrée par un Conseil d'Administration présidé par l'autorité gouvernementale chargée des ressources en eau, et dans lequel sont représentés tous les acteurs intervenant dans le domaine de l'eau au niveau du bassin versant.

Elle a pour missions :

- L'évaluation, la planification et l'aménagement des ressources en eau ;

- Le suivi qualitatif et quantitatif des ressources en eau ;
- Le recouvrement des redevances financières ;
- La gestion et la sauvegarde du Domaine Public Hydraulique ;
- L'entretien, la maintenance et l'exploitation des ouvrages hydrauliques ;
- L'assistance technique et la réalisation de prestations aux usagers ;
- Le développement du partenariat, ...

2.2. Le Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau

Le Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau (PDAIRE) constitue un document très important de planification et de gestion des ressources en eau du bassin versant. Son élaboration a été confiée, selon l'article 20 de la loi sur l'eau 10-95, aux agences des bassins hydrauliques.

Les grandes lignes du PDAIRE porte essentiellement sur le cadre naturel et socio-économique de la zone d'action de l'agence, l'évaluation des ressources en eau et de leur utilisation, l'état de l'aménagement et schémas de développement de ces ressources.

2.3. Le Plan National de l'Eau

À base des résultats et conclusions des PDAIRE, un Plan National de l'Eau (PNE) est établi par l'administration, et approuvé par décret, après avis du Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat. La consistance du PNE porte sur l'état des lieux du secteur de l'eau :

- Contexte institutionnel et réglementaire ;
- Acquis et contraintes ;
- Synthèse des connaissances des ressources en eau ;
- Demande en eau ;
- Orientations et priorités en matière de développement des ressources en eau ;
- Plan de financement ;
- Suivi de la mise en œuvre.

2.4. L'approche de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau

Le principe de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) a été adopté par le comité administratif de coordination de l'ONU et le Groupe intersecrétariats pour les ressources en eau, depuis 1992 à l'occasion de la conférence de Dublin, et ensuite en 1993 par l'ONU au cours du Sommet « Planète Terre » de Rio. Ultérieurement, notamment lors du Sommet mondial pour le développement durable à Johannesburg en 2002, la gestion intégrée des ressources en eau a été considéré comme un pilier du développement durable.

« La gestion intégrée des ressources en eau est un processus qui favorise l'exploitation coordonnée et la gestion de l'eau, des sols et des ressources connexes pour offrir, de façon équitable, un maximum de bien-être économique et social sans compromettre la viabilité des écosystèmes vitaux » Partenariat mondial pour l'eau, Comité consultatif technique, (2000).

En effet le développement économique et social doit être impérativement lié à la protection des écosystèmes naturels et leurs composantes biologiques et physiques (sols, air et eau).

Au niveau national, la GIRE a été instauré par la loi 10-95 sur l'Eau, la Stratégie Nationale de l'Eau et la circulaire interministérielle sur la GIRE. Elle a été considérée comme une approche participative et concertée, qui implique tous les acteurs du secteur de l'eau dans la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique. L'objectif est de rationaliser l'exploitation des ressources et de les préserver en termes de quantité et de qualité, afin de garantir un développement socio-économique durable et équitable.

La stratégie de GIRE se traduit à l'échelle du bassin à travers le PDAIRE, par la convention GIRE concertée et ratifiée par les parties prenantes de la gestion des ressources en eau, et par des plans d'action GIRE locaux pour la mise en œuvre d'actions concrètes concernant le suivi des ressources en eau, la gestion de la demande, le développement et le contrôle des ressources en eau et des actions de sensibilisation.

La GIRE constitue donc une approche intersectorielle, intégrant les dimensions écologique, économique et social pour atteindre des bénéfices multiples et transversaux. Elle prend en compte les aspects technique, social et politique (la résolution de conflits, la gestion de la demande et de l'usage dans les différents sens économique, environnemental ou géopolitique...).

2.5. Les contraintes de la gestion des ressources en eau

La gestion des ressources en eau au niveau du bassin de Sebou, est soumise à plusieurs contraintes de différentes natures. Certains sont d'ordre naturel, comme l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations et des apports hydriques, d'autres sont reliées à l'action de l'homme, à titre d'exemple : l'érosion, l'urbanisation incontrôlée, la croissance démographique...

2.5.1. Irrégularité spatio-temporelle des ressources en eau

L'irrégularité spatio-temporelle des précipitations constitue un facteur limitant du développement socio-économique du bassin. Le contexte hydroclimatique est caractérisé par une répartition spatiale inégale des précipitations et des ressources par rapport aux points de besoin et de consommation, ce qui implique un déséquilibre important entre l'offre (ressources) et de la demande (besoins) notamment dans le secteur agricole.

En outre, une forte irrégularité interannuelle (succession d'années sèches et d'années humides), constitue une véritable complexité face à la réponse aux besoins pendant les années déficitaires, et à la protection contre le risque d'inondation pendant les années excédentaires. En effet, la maîtrise de cette irrégularité a nécessité la construction de grands barrages pour emmagasiner des apports des années à forte hydraulité, afin de mobiliser le maximum d'apport et en bénéficier pendant la sécheresse.

Il est à signaler que l'évolution dans le temps des apports d'eau de surface au cours des dernières décennies est marquée d'une manière générale, par une nette diminution.

2.5.2. Surexploitation des eaux souterraines

L'accroissement de la demande en eau agricole a conduit à une surexploitation des eaux souterraines, dont l'effet, combiné à celui de la succession d'années de sécheresse sévère, est nettement ressenti, en particulier au niveau des nappes de Fès-Meknès et de la Mamora.

Les conséquences de la surexploitation des nappes sont multiples, et peuvent être résumées comme suit :

- La diminution sévère du niveau piézométrique, ce qui induit à :
 - L'assèchement des sources (cas de plusieurs sources sur la plaine de Saïs), et des dayas (cas de Dayet Aoua) ;
 - La diminution des aires d'artésianisme de la nappe profonde du Saïs ;
 - L'augmentation du coût de pompage.
- La perturbation de l'approvisionnement en eau potable et en eau d'irrigation du petit et moyen hydraulique traditionnelle ;
- L'intrusion des eaux marines salées. C'est le cas des deux nappes de Maâmora et de Mnasra ;
- Diminution des débits d'étiage des cours d'eau et dégradation de la qualité des eaux et des écosystèmes.

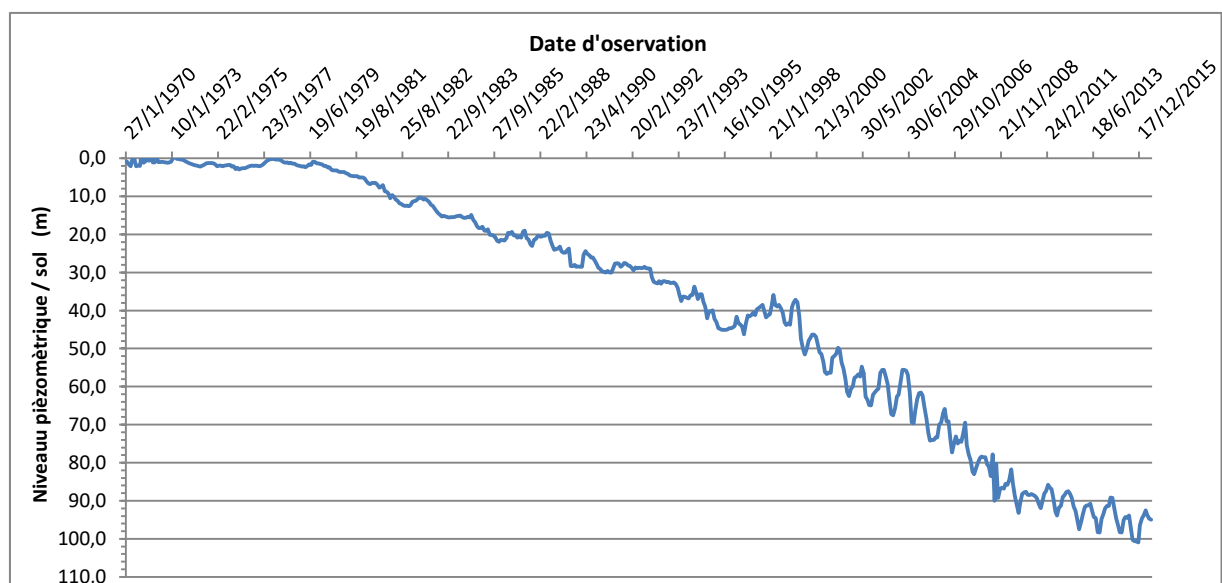


Figure 23. Evolution du niveau piézométrique de la nappe profonde du Saïs (piézomètre Haj Kaddour 290/22) (ABHS)

2.5.3. Sous-valorisation des ressources en eau

Le bassin de Sebou nécessite plus d'efforts en matière d'économie d'eau, et de valorisation des ressources en eau mobilisées. En effet, la superficie des terrains agricoles non encore aménagée, en aval des barrages, est estimée à des dizaines de milliers d'hectares. D'autre part, le mode

d'irrigation gravitaire reste prépondérant et dominant par rapport aux méthodes efficaces. Ce système d'irrigation non performant, est à l'origine de pertes d'eau importantes évaluées à 50 %.

2.5.4. Erosion des bassins versants

Le bassin du Sebou, et particulièrement le sous bassin de l'Ouergha au nord, est caractérisé par une érosion intense, favorisée par de nombreux facteurs naturels, qui sont essentiellement :

- Le facteur lithologique : la prédominance des formations marneuses friables favorables à l'érosion ;
- Le facteur topographique : des terrains accidentés caractérisés par la prédominance des pentes fortes ;
- Le facteur climatologique : la partie septentrionale du bassin est caractérisée par de fortes intensités pluviométriques ;
- Le couvert végétal : peu dense et faible de nature.

A ces facteurs naturels, s'ajoute l'action de l'activité anthropique, à travers la déforestation à cause de l'exploitation excessive du potentiel productif ligneux, et l'accentuation du défrichement du sol par l'extension des terres agricoles.

La dégradation des sols au niveau du préif est évaluée globalement entre 1000 et 2000 Tonnes/km²/an, pouvant atteindre 6000 T/km²/an dans certaines régions. Elle est par contre moins forte dans les régions du Moyen Atlas (500 à 1000 T/km²/an).

Cette situation a pour conséquences directes des pertes économiques liées à la détérioration des terrains agricoles en bad-lands, en plus du problème de l'envasement des retenues de barrages.

2.5.5. Pollution

Le bassin du Sebou est le plus pollué de tous les bassins du Maroc, avec une charge polluante totale dépassant les 7,5 millions équivalents habitant. La détérioration de la qualité des eaux de surface et souterraines dans le bassin a atteint des niveaux critiques qui risquent d'entraver le développement économique et social du bassin.

Les sources de pollution sont diversifiées. A titre d'exemple, on peut distinguer :

- La pollution d'origine domestique

Le volume annuel d'eau usée rejetée par les centres urbains du bassin est estimé à 100 millions de m³, dont 86% sont déversés dans les cours d'eau, 12% dans la mer et 2% épandus sur les sols. Ces rejets génèrent une pollution organique totale annuelle de l'ordre de 76.000 tonnes de DBO₅, représentant 25 % du total national.

- La pollution d'origine industrielle

L'activité industrielle concentrée dans les grandes villes, à laquelle s'ajoutent des milliers d'huileries traditionnelles, génère près de 3,5 millions d'équivalents-habitants de pollution organique, dont près de 70% proviennent des sucreries, des papeteries et des huileries.

- La pollution d'origine agricole

Le bassin de Sebou compte parmi les régions agricoles les plus importantes du Maroc, l'importance de la surface agricole utile dont il dispose. La culture intensive à recours à l'irrigation et à l'utilisation abusive des engrais et des produits phytosanitaires, d'où la contamination des eaux de surface par ruissèlement, et des eaux souterraines par infiltration des eaux entraînant ces produits.

Les charges polluantes sont constituées essentiellement des nitrates estimés à 8670 tonnes par an de l'azote total, et des phosphates estimés à 2050 tonnes par an.

- La pollution par les décharges publiques

Le bassin abrite plusieurs décharges publiques non contrôlées localisés généralement dans les alentours des villes, souvent en contact directe avec les milieux hydriques (cours d'eau et nappes). Cette situation constitue une source de pollution non négligeable, engendrant des lixiviats qui contaminent les eaux superficielles ou souterraines.

A l'exception de la ville de Fès qui dispose d'une décharge publique bien aménagée, la majorité des autres villes sont au stade des études d'aménagement, ou de choix de nouveaux sites.

2.5.6. Inondations

L'examen de l'historique des événements hydrologiques du bassin de Sebou montre que des inondations catastrophiques ont été enregistrées au fil du temps, et qui ont causé d'énormes dégâts humains et matériels. La chronologie des principaux événements vécus entre 1950 et 2009 est donnée par le tableau 5.

Les orages violents et brusques que reçoivent les zones de montagnes, et qui surviennent en été ou en automne, donnent lieu à des crues débordantes au niveau des petits bassins versant ne dépassant pas quelques dizaines de km², caractérisés par un temps de montée de quelques heures. Ces crues sont difficiles à prévoir et à annoncer, et les populations n'y sont pas toujours bien préparées en raison du caractère très aléatoire de leur occurrence. C'est le mode d'inondation qui survient dans le Moyen Atlas (Sefrou, Ifrane, Boulemane et Taza), ainsi que dans quelques sites isolés au niveau du couloir Fès-Taza. Lorsqu'il s'agit des précipitations généralisées de l'hiver ou du printemps, des crues à temps de montée important se produisent, engendrant des inondations qui peuvent être longues et dévastatrices.

Les études inscrites dans le cadre de la réalisation du Plan National de protection contre les Inondations (PNI), complétées par les travaux des commissions provinciales de lutte contre les inondations, ont permis de retenir 109 sites à risques d'inondation, classés en trois catégories selon le degré du risque : faible, moyen et fort.

Sites	Année de l'événement	Dommages encourus
Plaine du Gharb	1973, 1989, 1996, 2000	Inondation de plus de 140.000 ha (terrains agricoles, infrastructures, enclavement des agglomérations, etc...)
Plaine et centre de Guigou	1970, 1995, 2001, 2002	Inondation d'environ 1500 ha de terres agricoles, la coupure de plusieurs routes et pistes rurales, l'inondation des locaux administratifs et des habitations du centre de Guigou, douars se trouvant dans la plaine.
Ville de Taza	1995 et 2000	Inondations des maisons (quartier El Malha, douar Chlouh et dépôt de munition) et terrains agricoles, coupures de certaines routes.
Centre de Timahdite	1995	Inondation des logements, qui longent l'oued Guigou et de la RN13
Ville d'El Hajeb	1998, 2002	Inondation de la ville et de la RN 13
Ville de Sefrou	1950, 1992 et 1994	Inondation de la ville par les crues des chaâbas
Ville de Fès	1950, 1989	Inondation des quartiers qui se trouvent à l'aval des barrages My Arafâ et Gaâda ainsi que ceux qui longent l'oued El Himmer
Fès, Sefrou, Boulemane	Octobre 2008	Démolition du pont Mdez situé sur la route reliant Sefrou à Adrej, coupure de la route Fès-El Menzel au niveau du pont Azzaba sur Sebou, inondation des stations hydrologiques Mdez et Aïn Timedrine, coupure de la route Fès-Taza à cause de la submersion du pont sur Sebou et inondation de la station ONEP alimentant la ville de Fès.
Kénitra, Sidi Kacem	Février 2009	Inondation de 80 000 ha dans la plaine du Gharb, inondations de plusieurs douars dans les Provinces de Sidi Kacem et Kénitra et déplacement d'un millier de personnes.

Tableau 5. Historiques des principaux événements d'inondation entre 1950 et 2009 dans le bassin de Sebou (ABHS)

Outre les facteurs naturels (pluviosité, lithologie, topographie...) qui favorisent la genèse des crues violentes, le risque d'inondation ainsi que les dégâts sont aggravés par le facteur humain à travers :

- L'extension rapide et non contrôlé de l'urbanisation dans des espaces exposés aux inondations (zones d'expansion et d'épandage des crues, talwegs, zones à proximité des chaâbas, ...) ;
- L'extension et l'empiétement de l'urbanisation et des terrains agricoles sur les lits mineurs des oueds, réduisant ainsi leur débitance ;
- Le sous dimensionnement de certains ouvrages de franchissement (buses, dalots...) ;
- L'aménagement des sections des cours d'eau par des ouvrages agricoles de dérivation entraînant le rehaussement incontrôlé de la ligne d'eau ;
- Le comblement et l'effacement des cours d'eau et chaâbas par les déchets, déblais et remblais ;
- L'absence d'entretien systématique des cours d'eau.

Chapitre III : Problématique et objectifs de la recherche

Introduction

L'analyse de l'ensemble des caractéristiques physiques et socioéconomiques présentées dans le premier chapitre, montre qu'il s'agit d'un bassin avec un potentiel hydrique important, caractérisé par des contrastes spatio-temporels de plus en plus élevés, en relation avec l'impact des changements climatiques. Au moment où la sécheresse peut être considérée comme un caractère général des dernières décennies au Maroc, on a enregistré des chiffres record en matière crues (cas de 2008 et 2010 au niveau du bassin de Sebou à titre d'exemple).

Cependant, la composante naturelle n'est pas le seul facteur responsable de l'augmentation du risque d'inondation. Le changement que subit l'aléa (phénomène hydroclimatiques), est accompagné par l'évolution des enjeux et l'augmentation de la vulnérabilité. En effet, la croissance démographique a conduit à l'extension de l'urbanisation et des activités socioéconomiques, qui occupent de plus en plus les plaines d'inondation, les lits majeurs des grands oueds, et parfois même les lits mineurs des petits cours d'eau.

Le présent chapitre aura donc pour objet, de détailler la problématique de la prévision et la gestion des crues et inondations dans le bassin de Sebou. L'aspect théorique de ces phénomènes naturels introduira la discussion, ensuite, on abordera l'historique des inondations à l'échelle du bassin, leurs impacts et leur gestion par les services compétents (DRH, ABHS, autorité...). Vers la fin, l'objectif de ce travail de recherche sera présenté.

1. Problématique

1.1. Crue et inondation – Généralités

1.1.1. Définitions

Il convient tout d'abord, de rappeler que la notion du risque est complexe, et habituellement mal perçue. Lorsqu'on parle du risque naturel, et particulièrement, du risque de crues, en réalité deux composantes principales sont à évoquer, l'aléa et l'enjeu. La définition $\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Enjeu}$ devient de plus en plus usuelle.

L'aléa, notion souvent confondue avec le risque dans la culture populaire, désigne le phénomène naturel caractérisé par la fréquence de son occurrence, et son intensité ou violence. Dans notre cas, Il s'agit des crues qui dépendent des phénomènes météorologiques (précipitations et température notamment), des caractéristiques physiques du bassin versant et éventuellement/souvent des activités anthropiques agissant sur ces caractéristiques.

L'enjeu englobe tout élément exposé, susceptible d'être affecté par l'aléa : personnes, habitations, activités économiques, infrastructures, patrimoines, environnement ...

La vulnérabilité traduit la fragilité de l'enjeu impliqué. Elle peut être mesurée par sa capacité à résister face à l'événement naturel, et par sa résilience, c-à-dire sa faculté de récupérer son fonctionnement normal suite à des altérations et des perturbations provoquées par l'aléa. Evidemment, un élément sera d'autant plus vulnérable si ses capacités sont plus faibles.

Le risque constitue donc, la résultante de l'interaction entre l'ensemble de ces composantes : Aléa, enjeu ou exposition et vulnérabilité (fig.24).

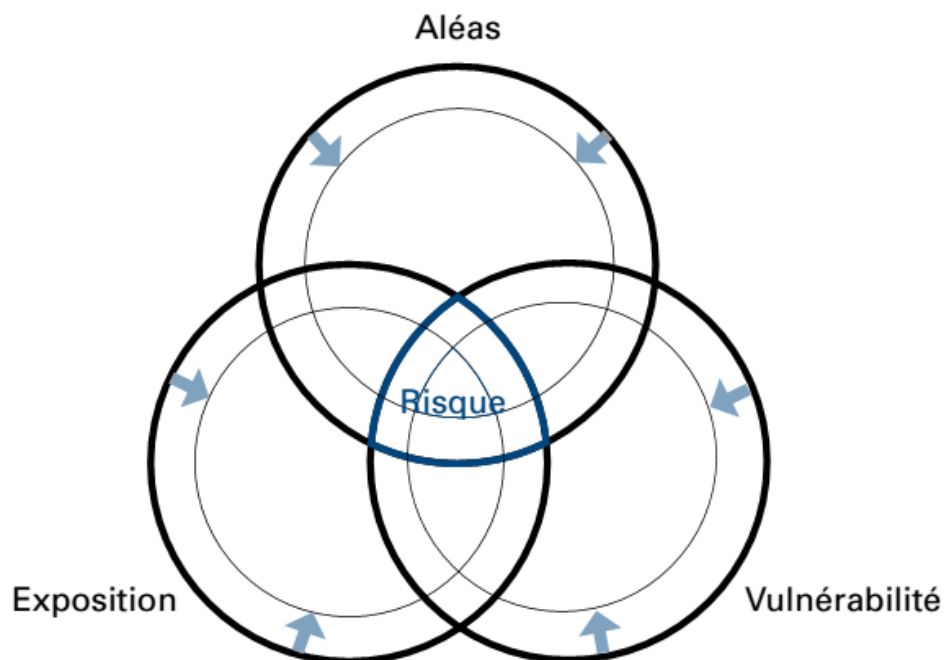


Figure 24. Les composantes du risque. Les flèches montrent les mesures d'atténuation de ces composantes, et par conséquent, du risque. (OMM, 2006)

Selon le glossaire international d'hydrologie de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2012), une crue est définie comme la montée, du débit et par conséquent du niveau d'un cours d'eau jusqu'à un maximum, suivie d'une redescente qui s'effectue plus lentement. Il s'agit d'un écoulement relativement fort que ce soit de point de vue hauteur d'eau ou débit.

L'inondation étant la submersion par l'eau débordante du lit normal d'un cours d'eau en crue, des zones qui ne sont pas normalement submergées. Évidemment, d'autres types d'inondation existent : remonté des eaux de la nappe, inondation des zones côtières par submersion marine, etc., mais nous nous intéressons ici des inondations en relation avec les crues.

1.1.2. Typologie des crues

Selon la nature et le mode de genèse des crues, on peut en distinguer plusieurs types, dont les principaux sont les suivants (OMM, 2011) :

- **Crues éclair** : Ce sont des crues qui résultent des orages violents de courte durée, s'abattant sur des petits bassins versant de superficie réduite. Ce genre de crues s'observe notamment dans les régions montagneuses de fortes pentes.

Les dégâts sont généralement dramatiques, le courant d'eau rapide et très violent emporte tout ce qui se trouve sur son passage : humains, animaux, véhicules, routes, ponts ...

- **Crues fluviales** : Les crues fluviales caractérisent les cours d'eau qui drainent les bassins versant de grandes superficies. La montée des eaux s'effectue d'une manière relativement lente suite à des précipitations généralisées sur le territoire du bassin. Lorsque le débit devient supérieur à la capacité d'évacuation du lit majeur du cours d'eau, des débordements se produisent principalement dans les plaines d'inondation.

Les crues fluviales sont généralement moins dévastatrices grâce à leur caractère progressif, cependant, ils mettent en jeu des débits et des volumes d'eau considérables, inondant de vastes zones.

- **Crues urbaines** : Lorsque de fortes précipitations s'abattent en milieu urbain dont les lits majeurs des cours d'eau ont été envahis par les bâtiments, et la quasi-totalité des surfaces des bassins ont été aménagées et imperméabilisées, l'accumulation des eaux et le ruissèlement dépassent largement la capacité des systèmes d'évacuation des eaux pluviales. L'écoulement qui devient de plus en plus rapide et violent vers les parties aval des villes menace les vies et les biens. La situation s'aggrave souvent à cause du colmatage des systèmes d'évacuation par les débris et les déchets, et du manque d'entretien.

- **Crues simples** : résultant d'un épisode pluvial fort, de plusieurs heures voire plusieurs jours, s'abattant sur un bassin versant et provoquant de graves crues. Ils sont associés généralement à des perturbations cycloniques, des dépressions et des orages de latitudes moyennes.

- **Crues multiples** : résultant de plusieurs perturbations météorologiques successives de fortes précipitations. Les crues multiples peuvent affecter les grands bassins hydrographiques des zones de latitudes moyennes en hiver, lorsque des séries de dépressions actives se succèdent.
- **Crues liées à la fonte des neiges** : Concernent les régions où de forts cumuls de neige se produisent en hiver (montagnes et hautes latitudes). La fonte de neige au printemps à cause de l'augmentation de la température génère un ruissellement important pouvant provoquer des crues et des inondations à l'aval du bassin versant, surtout lorsque ce phénomène coïncide avec de fortes pluies, et le sous-sol reste encore gelé.
- **Crues liées à des embâcles – débâcles** : le phénomène d'embâcle résulte de l'accumulation dans un cours d'eau, de matériaux de différentes natures : des morceaux de végétaux (branches, troncs, feuilllets...), des sédiments (rochers et débris), des bancs morcelés de glace... Cette accumulation joue le rôle d'une digue de barrage bloquant ou ralentissant l'écoulement. Il en résulte une accumulation et une augmentation du niveau d'eau à l'amont. Lorsque la charge exercée par l'eau accumulée est suffisamment grande, la digue naturelle cède provoquant une crue brutale qui se propage vers l'aval. On parle alors de débâcle.
La rupture de ces « barrage » naturels peut engendrer des glissements de terrain, des coulées de débris, et de graves inondations peuvent survenir. Il s'agit d'un phénomène très difficile à prédire.

1.1.3. Impact des crues

Les crues et les inondations qui en résultent ont de fortes incidences socioéconomiques, environnementales et écologiques, se manifestant par des pertes en vies humaines, des dégâts matériels, la dégradation de l'environnement.

Dans le monde entier, les crues sont responsables de 15% des décès liés aux catastrophes naturelles. Au cours de la décennie 2001-2010, les désastres hydrologiques constituent le type de catastrophe qui a causé le plus de victimes. Les inondations sont responsables de plus de 50000 morts et affectent en moyenne 75 millions de personnes chaque année (OMM, 2011).

Sur le plan économique, les dégâts des crues se mesurent généralement en pertes directes et indirectes ; les pertes directes correspondent aux dommages immédiats atteignant toute sorte d'infrastructures et de biens : routes, ponts, bâtiments, agriculture..., alors que les pertes indirectes résident dans les répercussions qui résultent de ces dégâts directs.

Ces phénomènes ont aussi de lourds impacts sur l'environnement. En effet, des problèmes de migrations massives, de pénuries en matières essentielles (eau, produits alimentaires...), de malnutrition, d'épidémies, ... apparaissent souvent au niveau des zones affectées par les catastrophes hydroclimatiques. La dégradation de l'environnement est accompagnée naturellement par une détérioration des milieux naturels et des équilibres écologiques y installées.

1.2. Crues et inondations dans le bassin de Sebou

1.2.1. Aperçu historique

Vue sa situation géographique, sa superficie et richesse en ressources hydriques, Le bassin du Sebou, a enregistré au cours de l'histoire, des inondations catastrophiques qui ont resté gravé dans sa mémoire. Les conséquences ont souvent été néfastes, se manifestant par d'énormes dégâts humains et matériels.

Ainsi, on a dénombré une centaine de victimes au cours des crues qui ont dévasté la ville de Sefrou le mois de septembre en 1950. Des inondations ont aussi affecté la ville de Fès en 1950 et 1989, El Hajeb en 1997 et 2002, Moulay Yacoub, Fès, Sidi Slimane... en 2008 et 2009. La plaine de Gharb qui constitue la débauche de l'oued Sebou dans la partie aval du bassin, enregistre des crues récurrentes. Les plus redoutables sont celles survenues en 1963, 1973, 1996 et 2009.

1.2.2. Les types de crues et les zones concernées

L'analyse de l'historique des événements ayant affecté le bassin de Sebou, prouvent que celui-ci est menacé par différents types de crues : lentes, brutales, torrentielles et urbaines.

Les Crues lentes caractérisent les cours d'eau à écoulement de type fluvial. Elles sont générées dans les plaines par les oueds drainant des grands bassins versants. C'est le cas des Oueds Sebou, Beht et Rdom dans la plaine du Gharb.

Les crues brutales se produisent suite à une atténuation rapide de pente, et par conséquent, de la capacité de transit des cours d'eau issus des hautes montagnes. Au niveau du bassin de Sebou, ces phénomènes concernent les plaines situées au piémont des grands reliefs du Rif et de l'Atlas, où les débordements en nappe inondent les habitations, les terrains agricoles, les infrastructures (routes, chemins, réseaux d'irrigation ...). C'est le cas de l'oued Guigou, et l'oued Fès par exemple.

Les crues torrentielles quant à elles, intéressent les petits bassins de montagne, là où se réunissent plusieurs facteurs favorables à l'apparition de ce genre de crues : pentes fortes, terrains imperméables, dénudés, escarpés et ravinés, exposées aux perturbations météorologiques et propices au développement de cellules orageuses. Ce genre de crues affecte des villes importantes comme Taza, Sefrou, Azrou, El Hajeb, ainsi que plusieurs autres agglomérations installées au bord des cours d'eau drainant les bassins de taille réduite, situés dans les grands reliefs Rifains et Atlasiques.

Les crues urbaines ou pluviales résultent, comme leur nom l'indique, du ruissellement et de l'accumulation des eaux de pluies tombées directement sur le périmètre urbain. Le phénomène est accentué par l'imperméabilisation des terrains urbanisés, et par la détérioration des cours d'eau et du réseau d'assainissement pluvial de l'agglomération. Les zones concernées sont Sefrou, Ifrane, Boulemane, El Hajeb, Taounate, Taza et Fès.

1.2.3. Gestion des crues dans le bassin de Sebou

Au niveau du bassin du Sebou, le côté technique de la gestion des crues est confié principalement aux services de l'agence du bassin hydraulique de Sebou, qui ne cesse, depuis sa création, d'amplifier ses efforts, et d'améliorer ses moyens et méthodes. En effet, l'ABHS assure la protection contre les crues et les inondations à travers l'exploitation d'un réseau de mesures hydrométriques répartie sur toute la zone d'action, la gestion des barrages, ainsi qu'à travers la réalisation d'études et travaux nécessaires.

▪ Les études

La gestion des crues commence par l'accomplissement préalable des études convenables. Dans ce sens l'ABHS a mené des études de conception des schémas d'aménagements appropriés de lutte contre les inondations portant sur des dizaines de sites répartis sur l'ensemble des provinces et préfectures dépendant de la zone d'action de l'agence.

Plusieurs autres études en relation avec la lutte contre les inondations ont été réalisées, citons à titre d'exemple, la détermination des zones inondables à intégrer dans les documents urbains de 21 centres, les études des systèmes d'alerte et de prévision des crues (amont du barrage Allal Fassi, Ouergha, ville de Fès), et notamment l'étude du schéma directeur de protection de la plaine du Gharb, d'un montant de trois millions de dirhams, vu les enjeux socio-économiques que présentent la plaine.

▪ Les travaux

L'ABHS assure, à côté de ses partenaires, les investissements nécessaires à la protection contre les crues dans le bassin du Sebou, à travers la réalisation des programmes d'aménagements de différentes natures :

- Les canalisations des cours d'eau ;
- La réalisation d'ouvrages de franchissement sur les oueds et les chaabats, et la reconstruction des ouvrages sous dimensionnés ;
- L'endiguement des berges des oueds et des chaabats, et la réalisation de murs de protection ;
- L'augmentation de la capacité des chaabats et des oueds par le recalibrage et le reprofilage ;
- La création d'ouvrages d'écêtement et de stockage des crues à travers la réalisation et l'achèvement des barrages et lacs collinaires.

Ces efforts de lutte contre les inondations dans le bassin du Sebou, ont connu une forte impulsion à partir de 2008.

▪ L'annonce de crues

Le réseau de stations de mesures dont l'ABHS dispose, comprend des postes reliés par radio, permettant de communiquer les cotes des oueds et les précipitations, ainsi que l'état des retenues

des barrages. Cela permet la surveillance des événements hydrométéorologiques au niveau des principaux cours d'eau à l'échelle du bassin.

Le suivi permet d'anticiper la genèse des crues, et de les annoncer dans des délais suffisants pour prendre les mesures nécessaires pour faire évacuer les zones inondables.

En vue d'améliorer l'annonce de crue, et afin de l'étendre à l'échelle des petits bassins, L'ABHS a mené des études et des programmes de renforcement et de modernisation de son réseau de stations, tel que la mise en place des systèmes de télémesure. Cependant, ces efforts restent dans le cadre d'expériences pilotes, et ont confronté plusieurs difficultés de natures différentes : techniques, logistiques, matérielles, ...

▪ Gestion des barrages

La protection contre les inondations compte parmi les principaux objectifs des barrages. Leurs retenues permettent le stockage et le laminage des fortes crues.

Les services compétents de l'ABHS établissent des courbes d'alerte (fig.25) pour chaque barrage, en se basant sur des simulations de l'exploitation des retenues. Il s'agit de créer des creux dans la retenue avant la période pluvieuse en vue d'en stocker le maximum et minimiser les lâchers.

Ainsi, on réalise des lâchers préventifs avant le pic de la crue, ensuite, au cours de celle-ci, on contrôle le débit sortant en fonction du niveau de la retenue, de manière à réduire le maximum possible, les conséquences des crues à l'aval.

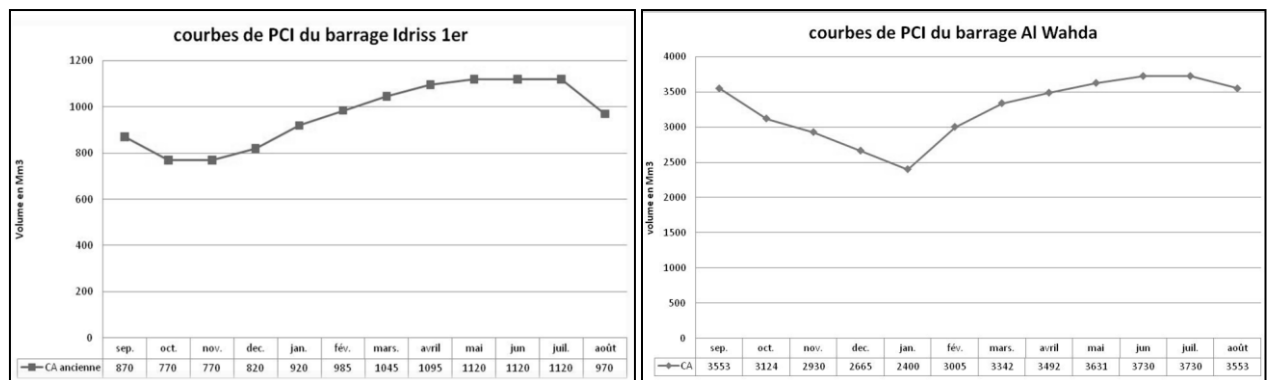


Figure 25. Les courbes d'alerte des barrages Al Wahda et Idriss 1er (ABHS)

Malgré ces efforts déployés par les services de l'ABHS, la problématique des inondations liées aux crues ne cesse de se compliquer, pour des raisons citées plus haut : changements climatiques, croissance démographique et anthropisation des sites inondables...

Les fluctuations et les événements enregistrés au cours de cette dernière décennie prouvent la persistance du problème.

Il s'avère donc, que ces outils techniques de protection contre les inondations doivent être développés, modernisés et renforcés, et surtout s'inscrire dans le cadre d'une nouvelle approche

de gestion intégrée des crues, qui dépasse la vision réduite de lutte contre l'aléa à travers des mesures souvent structurelles et localisées.

2. Objectifs de la recherche

Le présent travail de recherche a pour objet général, d'investiguer la problématique des crues et des inondations qui en résultent, dans le bassin versant du Sebou. Plus précisément, on se focalise sur la question de la prévision et la gestion des crues dans le but de la protection contre les inondations, mais également et au même temps, la valorisation des eaux de crues afin de répondre aux besoins hydriques des populations.

Ce travail constitue donc, un essai de contribution à l'amélioration des outils de prévision et de gestion des ressources en eau à travers l'élaboration d'un modèle intégré, qui cherche à profiter d'une manière optimale du réseau de mesure hydroclimatique existant, à travers la simulation hydrologique et hydraulique.

Afin d'aboutir à un système intégré de prévision et de gestion des crues, nous envisageons, dans un premier temps, l'élaboration d'un modèle hydrologique qui simule le transfert pluie – débit à l'échelle du bassin de Sebou. Les résultats obtenus sont exploités, dans un second temps, par un modèle hydraulique menant vers la délimitation des zones inondables, au niveau d'un site choisi comme cas d'étude.

L'importance de ce modèle réside dans :

- La prévision des hydrogrammes de crues le long des principaux cours d'eau du bassin, à partir des pluies enregistrées par les postes pluviométriques ;
- La maîtrise du temps de propagation entre les stations hydrologiques et les barrages, ainsi que le débit de pointe et le temps de base de l'hydrogramme ;
- Le suivi du niveau d'eau des barrages et par conséquent, la maîtrise des opérations de gestion (déversement et lâchées) ;
- La simulation de la propagation de l'onde de crues dans l'endroit choisi, et la détermination des principales caractéristiques hydrauliques : temps de propagation, niveau des plus hautes eaux, étendu des zones inondables ...

Conclusion

L'analyse de l'ensemble des données présentées dans la première partie décèle, d'une part, l'ampleur des phénomènes hydrologiques qui se déroulent dans le bassin de Sebou, et de l'autre part, l'importance de la problématique de la gestion des crues.

En effet, on est en présence d'une vaste zone avec un potentiel hydrique important, caractérisée par des contrastes spatiotemporels très marqués, et abritant une population dont la croissance entraîne l'augmentation des activités et des besoins en eau.

Cette situation explique le degré de complexité de la problématique de gestion des ressources eau à l'échelle du bassin, notamment en ce qui concerne la gestion des crues. Une complexité qui ne cesse de s'amplifier malgré les efforts consentis par l'agence du bassin hydraulique de Sebou, d'où la nécessité de développer et de moderniser les approches et moyens actuelles, afin de pouvoir relever le défi, et suivre le rythme des changements marquant les différentes composantes du problème.

L'objectif de ce travail de recherche est donc, de contribuer au développement des outils de prévision et de gestion des ressources en eau dans le bassin, à travers l'élaboration d'un modèle de prévision des crues, se basant sur la simulation hydrologique et hydraulique.

Deuxième partie : Approche, Méthodologie et démarche

Introduction

Comme nous l'avons déjà mentionné dans le troisième chapitre de la première partie, l'apport de ce travail consiste en l'élaboration d'un modèle de prévision et de gestion des crues, et ce dans le but de contribuer au développement des méthodes et outils utilisés actuellement. Il s'agit a priori, d'un travail surtout méthodologique, raison pour laquelle nous avons jugé intéressant, de consacrer la deuxième partie au développement de l'approche, méthodologie et démarche suivis au cours de cette recherche.

Un premier chapitre rappelant les principales moyens et méthodes utilisées dans l'étude des crues, introduira cette partie. On procèdera tout d'abord, à la description de l'évolution des approches, avant d'attaquer les méthodes principales utilisées communément dans l'étude des crues et la protection contre les inondations qui en dérivent.

Le deuxième chapitre détaille l'approche et la méthodologie adoptées dans ce travail, il traite la modélisation hydrologique et hydraulique comme outils de gestion des crues.

La démarche suivie pour l'élaboration des modèles est décrite dans le troisième et dernier chapitre.

Chapitre I : Etude des crues – principaux approches et méthodes

Introduction

L'étude des crues peut prendre différents aspects selon l'objectif final envisagé, qui rejoigne souvent la protection des populations et des biens contre le risque qu'elles présentent, ou la gestion des ressources hydriques. Ainsi, l'étude peut porter sur la prévision des phénomènes hydroclimatiques à un certain délai raisonnable, permettant de se préparer à la gestion d'un évènement juste avant et au cours de son occurrence, afin d'éviter ou réduire au maximum leurs effets dévastateurs. Un autre aspect concerne la détermination des caractéristiques des crues, notamment leur comportement statistique (détermination de la fréquence d'apparition d'un événement de telle magnitude, ou d'une période de retour donnée 10, 20, 50, 100, 1000 ans ...), d'où la notion de débit de projet à base de laquelle les aménagements hydrauliques de protection et de gestion (barrages, ponts, digues, canalisations...) sont dimensionnés.

A ces deux aspects, peut s'ajouter un troisième plus global, il s'agit de celui qui prend pour objet la maîtrise et la compréhension du comportement du système hydrologique dans un bassin versant, dans la dimension d'instaurer une gestion intégrée et efficiente des ressources hydrique, sous différents plans : hydrologique, hydraulique, environnemental, écologique...

Nous nous intéresserons dans ce chapitre, à la présentation et la discussion des deux premiers aspects qui sont en relation directe avec notre sujet de recherche.

1. Prédétermination des crues extrêmes

La prédétermination des crues correspond à la détermination préalable de leurs caractéristiques hydrologiques, généralement le débit et le volume, sous leur aspect statistique. Il ne s'agit pas de faire une prévision, c'est-à-dire d'estimer la date de l'occurrence d'un événement spécifié, mais de calculer, en se basant sur l'historique, la probabilité de son occurrence.

En pratique, on cherche à estimer la probabilité de dépassement ou de non-dépassement d'un débit donné, autrement dit, estimer sa période de retour.

L'importance d'une telle prospection est, généralement, la production de l'information utile pour le choix des modalités adéquates de gestion des ressources, et d'aménagements de protection contre les crues et les inondations qu'elles causent. Ainsi, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (barrages, ponts, dalots, buses, canal...) est basé sur le débit de pointe et le volume d'eau caractérisant une crue de fréquence choisie. D'autre part, la délimitation des zones inondables qui en dérivent permet la réglementation et la gestion de l'occupation des sols au niveau des plaines d'inondations.

Les méthodes utilisées sont assez diversifiées, et le choix doit obéir essentiellement à la nature de l'étude, au contexte de la zone d'étude et aux données disponibles.

1.1. Méthodes approximatives

D'habitude, on a recours aux méthodes dites approximatives, lorsqu'on a peu ou pas de données disponibles. On distingue la transposition ou la régionalisation, les méthodes empiriques et les méthodes pseudo-empiriques (Musy, 1998).

1.1.1. La transposition

Elle constitue une solution dans le cas de l'absence de mesure des données hydrométéorologiques dans la zone d'étude. Le principe est simple, on procède à des études hydrologiques sur un bassin analogue dans lequel on dispose de données observées, avant de transposer les résultats obtenus vers le bassin d'intérêt. Ce qui explique l'appellation « méthodes analogiques ».

Cette transposition se fait par le biais de coefficients calculés en se basant sur les caractéristiques physiques des deux bassins analogues.

Les bassins analogues doivent appartenir au même contexte géographique et hydroclimatique général. Et l'analogie doit concerner un certain nombre de caractéristiques physiques et hydrologiques : surface, forme, pente, orientation, densité de drainage, géologie, pédologie, occupation/utilisation du sol, aménagement...

Parmi les méthodes les plus utilisées dans ce sens, celle dite de Francou-Rodier, développée dans le cadre d'un « essai de classification des crues maximales observées dans le monde », une étude publiée par Jean Francou et Jean Rodier en 1967.

L'étude a classé plusieurs centaines de crues observées à travers le monde dans un diagramme $\log Q = f(\log A)$, avec Q et A respectivement, le débit de pointe et la surface du bassin. Il s'est avéré que les débits de pointes étaient plus ou moins alignés dans des régions homogènes (régionalisation). Francou et Rodier ont donc déduit la formule générale suivante :

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{A}{A_0}\right)^{1-\frac{k}{10}}$$

Où :

Q : débit de pointe en m^3/s ;

Q_0 : débit de pointe en m^3/s observé dans un bassin analogue ;

A : superficie du bassin étudié en km^2 ;

A_0 : superficie du bassin analogue en km^2 ;

k : coefficient de Francou-Rodier.

La méthode de Francou-Rodier a été adaptée au contexte marocain suite à des analyses sur plusieurs bassins (Ouarda et al, 2001). La formule proposée est :

$$Q = 10^6 \left(\frac{A}{10^8}\right)^{1-\frac{k}{10}}$$

Avec k qui varie entre 4 et 5.

La méthode de transposition de Francou-Rodier est largement utilisée actuellement par les bureaux d'étude dans le cas des bassins non jaugés.

1.1.2. Les méthodes empiriques

Ces méthodes se basent sur des coefficients empiriques établis et validés par expérimentation à des endroits et à des contextes définis. Dès lors, l'utilisateur doit adapter les formules à la zone d'étude concernée.

Selon la nature des données sur lesquelles elles se basent, on peut distinguer :

- Les formules se basant sur les caractéristiques du bassin versant uniquement

Le débit est fonction d'un certain nombre de caractéristiques physiques du bassin (morphologie, sol, couvert végétal...). Nous citons à titre d'exemple, les formules de Kursteiner, Melli, Hofbauer, Muller, Graeger et Justin ...

- Les formules faisant intervenir la période de retour

En plus des caractéristiques du bassin, ces formules utilisent la période de retour pour estimer les débits de pointes. Les plus utilisées sont celles de Fuller et de Coutagne.

- Les formules faisant intervenir les précipitations

Elles font intervenir les précipitations sous forme d'un paramètre qui peut être le module pluviométrique annuel, comme dans le cas de la formule de Iskowski ou de Fersi, la pluie de 24 heures comme le cas de la formule de Possenti, ou autres paramètres.

- Les formules faisant intervenir les précipitations et le temps de concentration

En plus des paramètres cités précédemment, ces formules utilisent le temps de concentration. C'est le cas de la formule de Turazza, largement utilisée dans les études hydrologiques au Maroc.

1.1.3. Méthodes pseudo-empiriques

Elles se distinguent par rapport aux méthodes empiriques par le fait qu'elles sont partiellement conceptuelles. La formule intègre des coefficients strictement empirique, d'où l'appellation "pseudo-empiriques", et d'autres conceptuels.

La méthode la plus utilisée au Maroc et à l'échelle internationale est celle dite rationnelle. Son principe est très simple, le débit est la résultante du produit de la superficie, de l'intensité de précipitation et du temps de concentration du bassin.

Afin de pouvoir atteindre le débit maximal, la méthode se base sur deux hypothèses importantes :

- L'intensité de la pluie est constante et généralisée sur tout le bassin ;
- La durée de l'averse excède le temps de concentration.

On suppose que le débit de pointe est atteint, lorsque toute la surface du bassin contribue à l'écoulement à l'exutoire. Chose qui ne se réalise que si la durée de l'averse est supérieure ou égale au temps de concentration, et que cette averse est uniforme et généralisée sur la superficie du bassin.

La formule de la méthode rationnelle s'écrit comme suit :

$$Q = C_r \times I \times A$$

Où :

- C_r : le coefficient de ruissellement ;
- I : l'intensité de la pluie ;
- A : l'air du bassin versant.

On suppose que la fréquence (ou période de retour T) du débit maximum est égale à celle de la précipitation maximale engendrant ce débit. On parle donc d'une pluie $P(t_c, T)$ de durée t_c , et de fréquence T . La forme rationnelle devient :

$$Q_T = \frac{C_r \times P(t_c, T) \times A}{3,6 \times t_c}$$

Ou encore :

$$Q_T = \frac{C_r \times I(t_c, T) \times A}{3,6}$$

Où :

Q_T : le débit maximal en m^3/s pour la période de retour T ;

C_r : le coefficient de ruissellement ;

$I(t_c, T)$: l'intensité moyenne de la pluie en mm/h , pour une durée t_c et une période de retour T ;

$$I(t_c, T) = P(t_c, T)/t_c$$

t_c : le temps de concentration du bassin en heures. Il peut être estimé par plusieurs formules : Giandotti, Turazza, Ventura, Kirpich ... ;

A : l'air du bassin versant en km^2 .

1.2. Méthodes déterministes

Lorsque les données hydroclimatiques sont disponibles au niveau du bassin étudié, les méthodes approximatives sont écartées à la faveur des méthodes déterministes. Les débits sont estimés en passant par la fonction de production, la fonction de transfert et la fonction d'acheminement (Musy, 1998). Le résultat obtenu correspond dans ce cas à un hydrogramme de crue et non pas simplement un débit de pointe, ce qui rend possible l'estimation des caractéristiques nécessaires pour le dimensionnement des ouvrages notamment de rétention.

Deux approches peuvent être distinguées :

- Une approche évènementielle

Les calculs portent sur des événements pluviométriques précis. On commence par définir la pluie de projet en analysant les séries disponibles, ensuite on détermine les conditions initiales d'humidité, avant de procéder aux calculs aboutissant à un hydrogramme qui doit être calé sur la base des données observées dont on dispose.

- Une approche continue

Les calculs concernent une série pluviométrique continue dans le temps. Cela nécessite plus de données notamment en matière d'évapotranspiration. L'avantage de cette approche est de

pouvoir, à partir de longues chroniques continues de précipitations, reconstituer des catalogues de crue (Musy, 1998) disponible pour l'analyse.

1.3. Méthodes statistiques

Les méthodes statistiques sont envisagées dans le cas où on dispose de longues séries de données hydrométéorologiques. La méthode la plus utilisée dans l'hydrologie est l'analyse fréquentielle, qui sera détaillée ci-après.

L'analyse fréquentielle ou probabiliste consistant à exploiter l'historique des événements hydroclimatiques passés, dans le but d'en définir la probabilité d'apparition dans le futur.

Il s'agit d'une méthode de prédiction, basée sur la description du comportement statistique du phénomène en question à travers une équation mathématique, en tant que loi permettant de déterminer la probabilité d'apparition d'événement d'intensité donnée.

L'analyse passe par une multitude d'opérations successives discutées et détaillées par plusieurs auteurs (Rodier, Musy, Ababou, ...), pouvant être résumées dans Trois étapes principales :

- La préparation de l'échantillon

L'échantillon étant dans notre cas une série de données pluviométriques ou débitométriques, doit subir un traitement préalable à toute exploitation. Ce traitement ou cette préparation consiste en un formatage (mise en forme), une complétion et une critique des données en question.

La mise en forme est basée généralement sur la statistique descriptive dont les outils tentent à condenser, réduire et classer les valeurs de la variable. La complétion correspond à un essai de reconstitution, généralement statistique, d'éventuelles données manquantes à travers la régression linéaire. Alors que la critique porte sur l'homogénéité et la fiabilité des chiffres dont on dispose, afin d'en éliminer ceux qui sont aberrants. Notant que ces aberrations résultent généralement de deux sortes d'erreurs :

- Erreurs aléatoires : commises par exemple lors de mesure ou de transcription de données ;
- Erreurs systématiques : dues à un changement d'appareillage, de station ...

- L'ajustement statistique

C'est ici qu'on effectue l'essentiel du travail. Il s'agit d'approcher le comportement de la variable étudiée par la loi statistique la plus appropriée. C'est donc un travail de modélisation qui nécessite le choix du modèle ou loi mathématique décrivant au mieux la variabilité du phénomène en question. Autrement dit, il s'agit de définir les paramètres du modèle, loi ou fonction de répartition qui s'ajuste mieux aux données observées de pluies ou de débits.

Le choix du modèle fréquentiel est décisif dans la qualité et la validité des résultats de l'analyse fréquentielle. Il obéit à des considérations théoriques et expérimentales ; le premier type est en relation avec les fondements mathématiques et la philosophie de chaque loi, alors que le

deuxième évoque l'expérience de terrain, et par conséquent, l'adaptabilité des lois aux contextes locaux. Il est à signaler, qu'en règle générale, les fonctions les plus simples, contenant le moins de paramètres, sont favorisées dans la mesure où leur utilisation réduit au maximum l'incertitude.

Nous nous limiterons dans le cadre de ce travail, à décrire brièvement la loi de Gumbel, largement utilisée par les hydrologues pour ajuster le comportement des phénomènes hydroclimatiques extrêmes.

Pour commencer, il faut signaler que la distribution des valeurs extrêmes obéit à la loi des extrêmes généralisés, qui s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\left(1 - c \frac{x-a}{b}\right)^{1/c}\right)$$

Où :

a : Paramètre de position ;
 b : Paramètre d'échelle ;
 c : Paramètre de forme.

La fonction de répartition de la loi de Gumbel dite aussi loi double exponentielle, s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right)$$

Posons :

$$u = \frac{x-a}{b}$$

La loi de Gumbel devient :

$$F(x) = \exp(-\exp(-u))$$

D'où :

$$u = -\ln(-\ln(F(x)))$$

u est dite la variable réduite de Gumbel, son utilisation facilite la détermination de la valeur x_q d'un quantile, correspondant à la distribution $F(x_q) = q$, en fonction des deux paramètres a et b , puisque l'expression est linéaire :

$$x_q = a + bu_q$$

Différentes techniques peuvent être utilisées pour estimer les paramètres a et b , notamment l'ajustement graphique à l'œil ou à l'aide d'une régression statistique en utilisant Excel ou autres utilitaires, et l'ajustement analytique selon une méthode mathématique comme celle des moments.

La Méthode graphique repose sur le fait que l'expression d'un quantile correspond comme déjà signaler, à l'équation d'une droite. Il est dès lors possible d'en déduire les paramètres a et b , en appliquant la démarche suivante :

- 1) Trier les valeurs de la variable x (séries annuelles de précipitations maximales journalières PJMax par exemple) dans l'ordre croissant, et attribuer un rang de classement (de 1 jusqu'à n) à chaque valeur.
- 2) Estimer la probabilité de non-dépassement qu'il convient d'attribuer à chaque valeur. Il existe de nombreuses formules d'estimation de la fonction de répartition à l'aide de la fréquence empirique. Des simulations ont montré que pour la loi de Gumbel, il faut utiliser la fréquence empirique de Hazen donnée par la formule suivante :

$$F(x) = \frac{r - 0.5}{n}$$

Où :

r : la valeur de rang ;

n : la taille de l'échantillon.

On calcule donc la fréquence empirique pour chaque rang, en utilisant la formule de Hazen.

- 3) Calculer la variable réduite de Gumbel en utilisant la formule suivante :

$$u = -\ln(-\ln(F(x)))$$

- 4) Etablir le graphique x en fonction de u , et tracer la courbe de tendance linéaire, une droite qui passe le mieux par les points obtenues (fig.26).
Il est à signaler que l'ajustement graphique présente l'avantage de fournir une représentation visuelle des données, ce qui permet une vérification simple de la qualité de l'ajustement de la loi utilisée aux données étudiées.

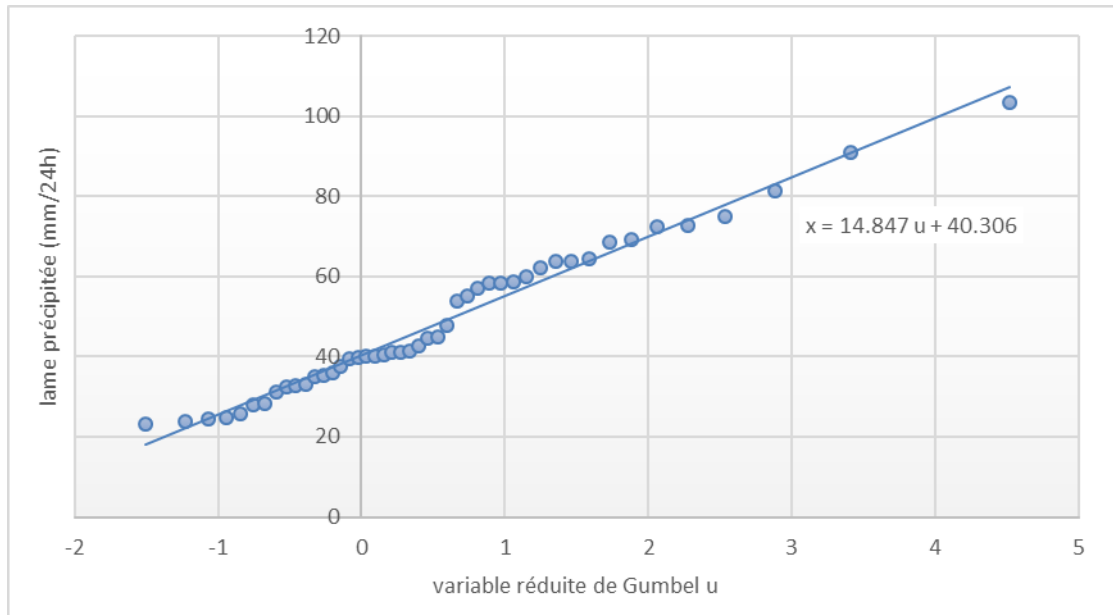


Figure 26. Ajustement graphique selon la loi de Gumbel des PjMax observées au niveau de la station Khnichet sur la période 1970-2015

- 5) A partir de l'équation de la droite de tendance, déterminer les deux paramètres a et b de la loi de Gumbel. La pente b de la droite correspond au **Gradient** de la distribution **Exponentielle**, d'où l'appellation de la méthode de GRADEX.

- Estimation de la variable x pour différentes périodes de retour

Les paramètres a et b de la loi de Gumbel étant déterminés, il est possible d'estimer la valeur de la variable x étudiée pour différentes périodes de retour comme suit :

- 1) Calculer la fréquence de non dépassement $F(x)$ pour chaque période de retour T :

$$F(x) = 1 - \frac{1}{T}$$

- 2) Calculer la variable de Gumbel u :

$$u = -\ln(-\ln(F(x)))$$

- 3) Estimer la valeur de la variable x suivant l'équation de la droite d'ajustement :

$$x = bu + a$$

Selon la nature et la quantité de données disponibles, l'analyse probabiliste peut concerner des séries pluviométriques, débitmétriques ou les deux à la fois.

En effet, dans les bassins jaugés, lorsque des séries hydrométriques suffisamment longues sont disponibles, leur traitement peut aboutir directement aux débits de différentes périodes de retour. Dans le cas contraire, on a recours aux séries pluviométriques disponibles, qui seront traitées dans un premier temps afin d'en sortir les pluies pour différentes périodes de retour, et exploitées dans un second, pour calculer les débits correspondants à l'aide de formules généralement empiriques.

2. Prévision des crues

Le glossaire international d'hydrologie (OMM, 2012) définit la prévision des crues comme « *la prévision du niveau, du débit, du temps d'apparition et de la durée d'une crue, et plus spécialement du débit de pointe en un point donné d'un cours d'eau, résultant des précipitations et de la fonte des neiges* ».

Elle se distingue de la prédétermination principalement par son rattachement à un temps spécifique (Coulibaly et al., 1999).

La prévision des crues constitue un élément indispensable à leur gestion. Les mesures axées uniquement sur la prévention et la protection ne peuvent en aucun cas, être totalement efficaces, et sont souvent dépassées. La prévision est donc une mesure complémentaire qui vient renforcer toute stratégie de gestion, en mettant à la disposition des intervenants ou des gestionnaires, de l'information précieuse à propos des comportements de l'aléa, qui conditionnera la nature des mesures, et qui fournira, plutôt, des solutions et des possibilités, autres que le structurel (réglementation, solutions temporaires : évacuation, barrières temporaires démontables...).

Même une intervention structurelle efficace et réussie, nécessite la connaissance préalable du système hydrologique en question. L'ensemble des caractéristiques physiques et le comportement hydrologique du bassin versant doivent faire l'objet d'études pertinentes afin de bien les cerner et les contrôler. Les approches et outils dans ce sens, sont multiples et diversifiés.

En réalité, Il n'existe pas de schéma type d'un système de prévision des crues, vu la grande variabilité des circonstances et des composantes d'un contexte à l'autre, qui mène à plusieurs types de crues nécessitant chacun, un modèle adapté (OMM, 2011).

Ainsi, au sein d'un même bassin versant, on peut assister à des crues éclair en amont, et à des crues lentes en aval au niveau des plaines d'inondation. Ce qui suppose l'implication des approches différentes. Mais c'est principalement l'objectif de la prévision des crues qui détermine le modèle ou la méthode utilisée.

Actuellement, la prévision des crues repose en général sur la modélisation mathématique et la simulation numérique. Elle se sert de l'intégration de deux familles de modèles : les modèles hydrologiques ou modèle de transfert pluie-débit, et les modèles hydrauliques ou modèle de propagation de l'onde de crue.

Roche et al (2012) distingue trois délais potentiels d'anticipation des crues (fig.27) :

- Le délai T_1 , correspondant au temps de la prévision météorologique. Selon le type de la perturbation ce délai pourra varier de plusieurs dizaines à quelques centaines de minutes ;
- Le délai T_2 , c'est le temps de concentration des pluies sur la surface du bassin concerné. Il peut atteindre plusieurs heures ;
- Le délai T_3 , lié au temps de propagation, peut donner de quelques heures à quelques jours supplémentaires d'anticipation.

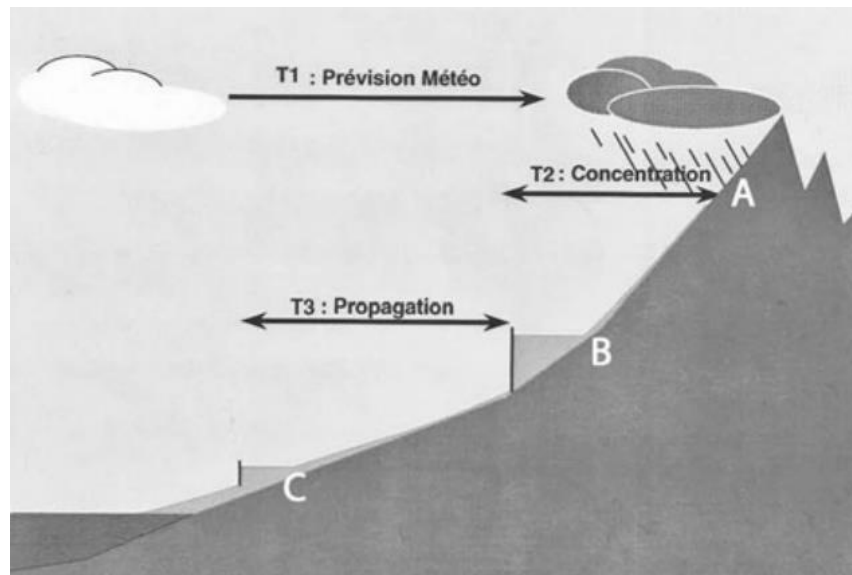


Figure 27. Les trois délais potentiels d'anticipation des crues selon Roche et al (2012)

Selon la situation du site d'intérêt dans le bassin, la prévision peut tirer profit uniquement du premier délai dans le cas d'un point situé très en amont. C'est le cas du point A (fig.27) par exemple. Elle peut tirer profit des deux premiers délais si le point cible est à l'exutoire d'un bassin versant amont équipé de pluviomètres, le point B par exemple. C'est à ce niveau-là que les modèles hydrologiques pluie-débit interviennent pour anticiper et quantifier la formation de la crue. Enfin, la prévision peut profiter des trois délais lorsque le site est assez en aval pour pouvoir exploiter les mesures issues des stations hydrométriques par les modèles hydrauliques de propagation. C'est le cas du point C.

2.1. Les modèles hydrologiques

Un modèle hydrologique est une représentation schématique, à l'aide d'équations ou lois mathématiques décrivant partiellement ou complètement un système hydrologique. C'est un essai de simulation du comportement de ce système, soit pour reproduire des états vécus ou pour prévoir ou prédéterminer des états futurs du système. La simulation débute par un état initial et est soumise à des conditions aux limites (forçages) (Pappenberger et al, 2006).

La complexité des systèmes hydrologiques sur les deux plans structurel et fonctionnel fait que leur connaissance à travers l'observation (ou la mesure) reste toujours très limitée et partielle.

D'où la nécessité de la simplification et de la schématisation à travers les équations mathématiques (Roche et al, 2012).

Il faut signaler que par modèle hydrologique, nous désignons ici le modèle pluie-débit comportant deux fonctions principales, une fonction de production qui estime la lame d'eau nette ruisselée, et une fonction de transfert qui traduit ce ruissèlement en débit coulant dans le réseau hydrographique.

Plusieurs classifications des modèles pluie-débit peuvent être rencontrées dans la littérature. Ainsi, Selon la façon avec laquelle un modèle pluie-débit décrit le processus hydrologique concerné, on distingue :

- Les modèles conceptuels : lorsqu'il s'agit d'une simple relation statistique reliant la pluie au débit à l'exutoire, sans lien direct avec la physique des processus ;
- Les modèles physiques : le modèle est fondé sur la description des processus physiques à travers la résolution des équations de la mécanique des fluides basées sur l'équation de Saint-Venant ;
- Les modèles semi-physiques : basés aussi sur des équations de la mécanique des fluides, mais avec des simplifications qui ignore la description de certains phénomènes ou les schématiser d'une manière excessive.

Si on s'intéresse de la façon dont le modèle est implémenté sur le bassin versant, on peut distinguer :

- Les modèles globaux : considèrent le bassin dans son intégrité comme une seule unité qui produit un débit en sortie. Dans ce cas, les paramètres et les équations représentent le comportement moyen du bassin ;
- Les modèles distribués : discrétisent le bassin en mailles indépendantes régulières ou irrégulières en se basant généralement sur un modèle numérique de terrain ;
- Les modèles semi-distribués : la discrétisation spatiale limitée sous forme de sous-bassins versants ou unités hydrologiquement homogènes comme le modèle HEC-HMS.

Quel que soit le type du modèle, la simulation peut être continue ou événementielle.

- La simulation est continue lorsqu'on s'intéresse de l'état du système pendant une durée relativement longue, pour couvrir des périodes humides et des périodes sèches qui se succèdent. Ce type de modélisation nécessite plus de données, notamment en matière d'évapotranspiration. Les conditions initiales ne sont pas nécessaires, puisque le calcul est continu dans le temps ;
- La simulation est événementielle lorsqu'on s'intéresse de l'état du système au cours d'un évènement bien déterminé, par exemple la réponse du bassin à un épisode pluvial d'une durée donnée. L'évapotranspiration n'est pas exigée dans ce cas, cependant il faut introduire les conditions initiales ;

2.2. Les modèles hydrauliques

Un modèle hydraulique s'intéresse plutôt à la simulation de l'écoulement dans un cours d'eau (hydraulique à surface libre). Il permet de décrire la propagation de l'onde de crue le long d'un cours d'eau sous différents aspects : niveau d'eau, débit, vitesse, temps de propagation, type d'écoulement...

La comparaison des hydrogrammes de crue observés en deux points d'un cours d'eau, en l'absence d'apports intermédiaires significatifs, révèle les modifications que l'hydrogramme entré au modèle comme condition à la limite subit en se propageant vers l'aval. Ainsi, on perçoit une atténuation du pic, une augmentation du temps de base et un décalage temporel du débit de pointe (fig.28). C'est ce temps de propagation qui donne sens à la prévision des modèles hydrauliques.

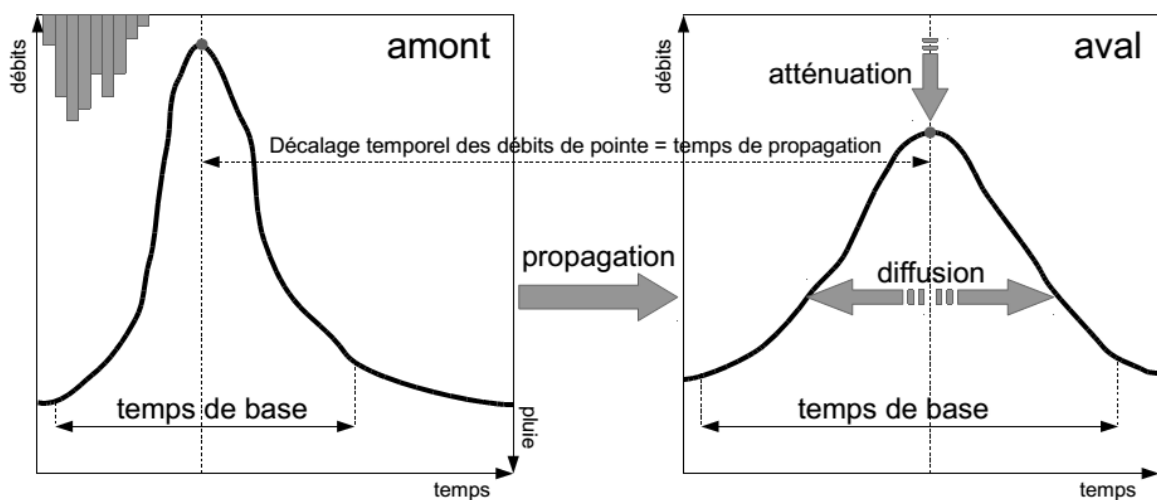


Figure 28. Propagation d'une onde de crue entre une section amont et une section aval (Habert, 2016)

Afin de décrire ces modifications qui affectent l'hydrogramme en propagation, les modèles de propagation sont fondés sur des hypothèses simplificatrices dont le degré de schématisation est plus ou moins poussé. Il s'agit donc d'un critère de classification très important, qui permet de distinguer les modèles conceptuels et d'autres à base physique.

Les modèles conceptuels considèrent la propagation de façon globale. Ils permettent tout simplement d'estimer un débit moyen transitant à travers les sections transversales du cours d'eau étudié, ce qui explique leur simplicité et leur facilité à mettre en œuvre. Alors que les modèles à base physique se basent sur les équations fondamentales de l'hydraulique à surface libre pour décrire les phénomènes qui expliquent l'évolution spatiale et temporelle de l'hydrogramme en propagation. On peut constater facilement que ce deuxième type de modèle exige plus de paramètres et une bonne connaissance du terrain (topographie, rugosité, ...).

D'autre part, les modèles hydrauliques se distinguent par leur degré de description spatiale. Ainsi, un modèle peut simuler l'écoulement suivant les trois dimensions de l'espace, on parle

de modèle 3D qui se base généralement sur les équations de Navier-Stokes, pouvant représenter la complexité du terrain. Les modèle 2D négligent les fluctuations verticales et ne considèrent que l'écoulement dans le sens longitudinal et transversal. Dans le cas des modèles unidimensionnel 1D, seul l'écoulement dans le sens longitudinal est pris en considération. Les modèles 2D et 1D se basent sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant simplifiées.

En pratique, la propagation se fait souvent suivant la ligne du cours d'eau uniquement, en absence d'écoulement secondaires importants dans le lit majeur ou sur la plaine d'inondation, les modèles 1D suffisent donc pour décrire ce type d'écoulement. On évite les modèles 3D et 2D qui n'apporteront pas d'amélioration significatives tout en exigeant beaucoup plus de données surtout topographiques (Horritt & Baters, 2002).

Conclusion

Alors que la prédétermination des crues calcule la probabilité de l'occurrence d'un évènement d'une ampleur donnée, la prévision a pour objet d'estimer la date de l'occurrence d'un évènement spécifié. Dans les deux cas, la modélisation se propose de plus en plus, comme la solution la plus efficiente.

Les dizaines d'années d'exercice sur terrain, et le cumul de l'expérience en hydrologie et en hydraulique au fil des temps, expliquent une telle diversité de méthodes et modèles de calcul exposés dans ce chapitre. Aujourd'hui, nous avons affaire à un large éventail de choix, allons des modèles qui essaient de décrire la complexité du terrain dans la réalité, jusqu'à ceux qui schématisent au maximum les phénomènes et les processus, passant par des modèles plus ou moins simplifiés.

Généralement le choix d'une méthode ou d'un modèle dépend de l'objectif de l'étude, des particularités de la zone étudiée et de la nature et la quantité des données disponibles. Ce sont ces éléments qui déterminent la nature et le degré de simplification et de schématisation à faire, et par conséquent, les hypothèses de base pour la modélisation.

Chapitre II : Approche méthodologique et démarche suivie

Introduction

Le bassin de Sebou, rappelons-le, s'étale sur une superficie de 40 000 km², ce qui explique le contexte très contrasté sous différents plans : climatiques surtout pluviométrique, géologique et par conséquent hydrogéologique, occupation/utilisation des sols...

L'élaboration d'un modèle de gestion des crues à l'échelle d'un tel bassin, abritant environ 30% des ressources en eau de surface nationales, est un exercice assez compliqué, qui nécessite la mobilisation de moyens et méthodes puissants et adaptés, capables de répondre aux exigences de l'étude, notamment l'analyse et le traitement des quantités extraordinaires d'informations et de données (topographiques, hydroclimatiques...) mises en jeu.

L'approche méthodologique adoptée et la démarche suivie, ont été conditionné principalement par les objectifs tracés, la disponibilité des données surtout topographiques et hydroclimatiques, ainsi que par les particularités de la zone d'études évoquées plus haut.

En effet, le travail a été basé sur la modélisation hydrologique et hydraulique couplées au SIG. Cette approche, ainsi que la démarche suivie, seront détaillées dans ce chapitre.

1. Méthodologie de la modélisation hydrologique

La première étape qui constitue la base de la présente étude, consiste à élaborer un modèle pluie-débit ayant pour objet d'analyser le fonctionnement hydrologique du bassin du Sebou. A travers la simulation des évènements historiques et probables, on essaie de quantifier et de décrire les composantes principales de l'écoulement et de la genèse des crues.

Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons choisie d'utiliser l'outil HEC-HMS qui représente un environnement complet et intégré de travail, permettant l'acquisition et l'organisation de données, leurs traitements par plusieurs modèles de calcul, et enfin la restitution des résultats.

En se basant essentiellement sur les manuels *User's Manual* (Scharffenberg, 2016) et *Technical Reference Manual* (Feldman, 2000), une description succincte des principales caractéristiques et avantages de cet outil est proposée dans ce qui suit.

1.1. Présentation de l'outil HEC-HMS

Le système de modélisation hydrologique HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) est un outil développé par le corps des ingénieurs de l'armée des Etats Unis (*U.S. Army Corps of Engineers (USACE)*).

Profitant d'une expérience de plus de 30 ans, dans la simulation des processus hydrologiques, et de la succession de plusieurs versions de plus en plus améliorées, HEC-HMS est capable de gérer un large éventail de contextes géographiques et hydroclimatiques. Il inclue la plupart des modèles et méthodes couramment utilisés en hydrologie appliquée, offrant à l'utilisateur la possibilité de choisir la représentation la plus adéquate au bassin versant étudié. À travers les résultats obtenus dans le cadre de plusieurs études, l'outil a prouvé son adaptabilité au contexte climatique semi-aride, notamment dans la gestion des crues.

Les éléments d'un modèle hydrologique HEC-HMS sont :

- Le modèle du bassin (*basin model*) : Une représentation physique du bassin, incluant les éléments hydrologiques essentiels (sous bassins, biefs, jonctions, réservoirs, exutoires, etc.) connectés entre eux dans un réseau dendritique.
- Le modèle météorologique (*meteorologic model*) : permet d'introduire, de décrire et d'analyser les données météorologiques (précipitations, évapotranspiration, fonte des neiges ...).
- Les spécifications de control de la simulation (*control specifications*) : permettent de déterminer la date et le temps du début et de la fin de la simulation, en plus de l'intervalle de temps du calcul.

La simulation est lancée suite à une combinaison d'un modèle de bassin, un modèle météorologique et des spécifications de contrôle.

A l'instar des autres logiciels développés par le centre d'ingénierie hydrologique (HEC), HEC-HMS présente l'avantage d'être disponible en freeware, interopérable avec ARCGIS par le biais du module HEC-GeoRAS dédié spécifiquement à ce propos, et qui permet d'automatiser la délimitation des sous bassins et la détermination de leurs caractéristiques.

1.2. Principe du calcul hydrologique par HEC-HMS

L'outil HEC-HMS permet de représenter et de modéliser l'ensemble des processus hydrologique déterminant le débit à l'exutoire (fig.29). Ces processus sont essentiellement la fonction de production et celle de transfert (fig.30), auxquelles s'ajoute deux fonctions complémentaires le débit de base et l'écoulement dans les cours d'eau.

La description de la modélisation de ces principales fonctions sera basée essentiellement sur le manuel de référence technique de HEC-HMS (2000). On se focalisera surtout sur les modèles et méthodes choisies et utilisés dans le cadre cette étude.

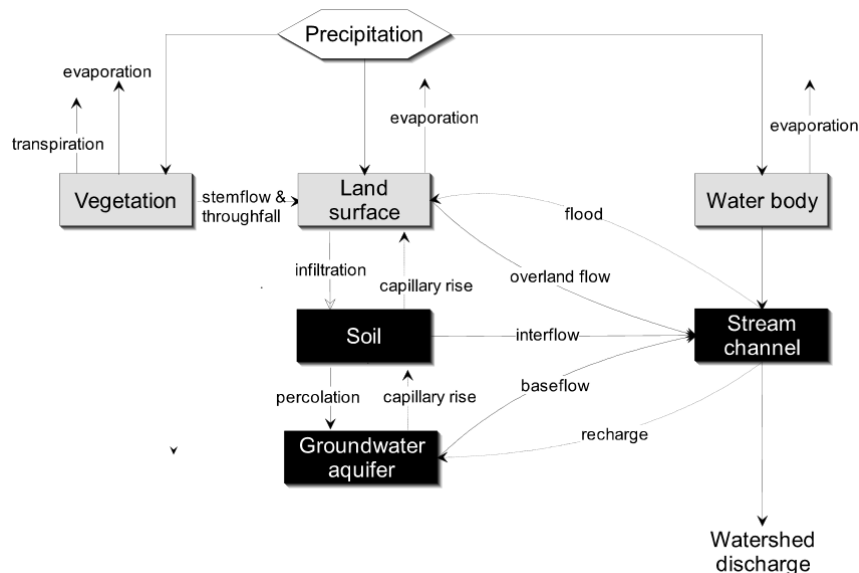


Figure 29. Interactions entre différentes composantes d'un système hydrologique. Processus générant l'écoulement à l'exutoire d'un bassin versant (Feldman, 2000)

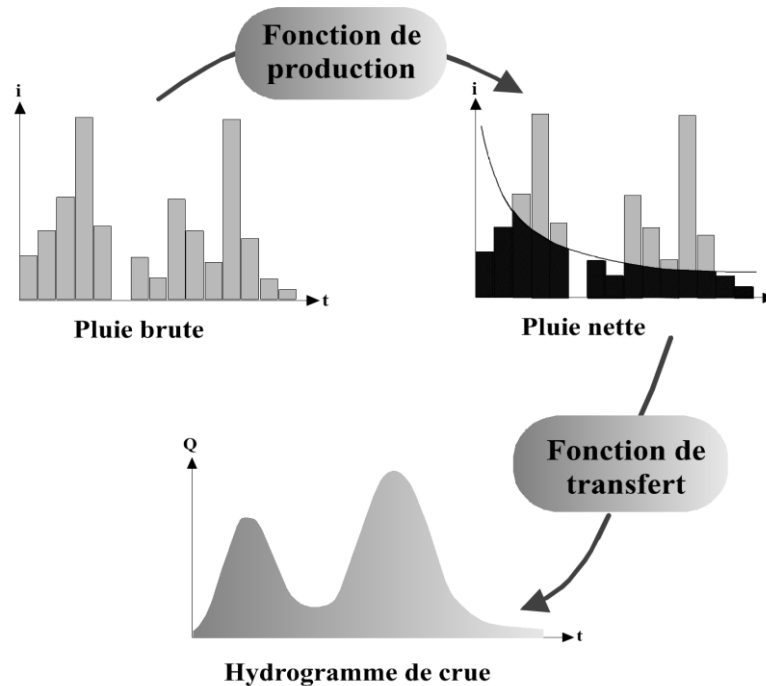


Figure 30. Schématisation des deux fonctions de production et de transfert du modèle hydrologique (Musy, 2016)

1.2.1. Fonction de production

La fonction de production estime la pluie nette correspondant à la portion de la pluie brute qui contribue à l'écoulement de surface. Dans HEC-HMS, la simulation des pertes par interception, évaporation, évapotranspiration, infiltration... s'effectue à l'aide de différentes méthodes qui déterminent les pertes en précipitations pour chaque intervalle de temps de calcul, avant de les soustraire de la lame d'eau précipitée. L'excès constitue la lame écoulee - supposée uniforme - sur la surface du bassin, d'où le volume ruisselé.

Les principales méthodes ou modèles proposés par HEC-HMS ainsi que leurs principes de base sont énumérés brièvement ci-dessous :

- La méthode *Initial and constant* : considère un taux de perte constant durant l'évènement pluvieux. Une valeur de perte initiale est introduite comme condition initiale pour représenter l'interception par les plantes et le stockage dans les dépressions du sol, et un taux constant de perte est déterminé ;
- La méthode *Deficit and constant* : diffère de la précédente par la possibilité de renouvellement de la perte initiale après de longues périodes sans précipitations. En plus de la perte initiale et le taux constant de perte, un taux de récupération doit être donc spécifié ;
- La méthode *SCS curve number* : estime l'excès de précipitation en fonction des précipitations cumulées, utilisation/occupation du sol et de l'humidité du sol ;

- La méthode *Green and Ampt* : les pertes sont estimées par l'équation de Richards qui dérive de la loi de Darcy et celle de la conservation de masse ;
- La méthode *soil moisture accounting* : diffère des précédentes par la prise en compte des deux situations humide et sèche du temps. Elle s'adapte, de ce fait, à la simulation continue dans le temps.

Pour notre cas, nous avons adopté la méthode *SCS curve number* pour estimer les pertes en précipitations. Ce choix est justifié par les motifs suivants :

- Les résultats satisfaisants obtenus dans le cadre de plusieurs études ayant porté sur des bassins méditerranéens (Brocca et al, 2009 a et b ; Trambly et al, 2010) ;
- Nous disposons de la répartition spatiale de la valeur du *curve number*, issue d'une étude en cours à l'échelle du bassin versant du Sebou ;
- La méthode est adaptée à la simulation événementielle que nous envisageons, elle tient compte de l'humidité du sol comme condition initiale.

La méthode *SCS curve number* permet de calculer l'excès de précipitation en se basant sur l'équation suivante :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Avec :

P_e : cumul de l'excès de précipitations au temps t ;

P : précipitations cumulées au temps t ;

I_a : perte ou rétention initiale ;

S : rétention potentielle.

Une relation empirique entre I_a et S a été établie suite à l'analyse des résultats issus des petits bassins expérimentaux :

$$I_a = 0.2 S$$

L'excès de précipitations devient donc :

$$P_e = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S}$$

La rétention maximale potentielle S est reliée aux caractéristiques du bassin versant à travers le paramètre *Curve Number* (CN) :

$$S = \frac{25400 - 254 CN}{CN}$$

1.2.2. Fonction de transfert

Comme déjà signalé plus haut, une fois les pertes sont estimées l'excès de précipitation ou pluies nettes résultant de la fonction de production sont transformées en ruissellement à la surface. La fonction de transfert sous HEC-HMS propose plusieurs méthodes ou modèles pouvant être subdivisés en deux catégories, des modèles empiriques basés sur un hydrogramme unitaire (Clark, Snyder, SCS, ...), et un modèle conceptuel essayant de décrire le processus de transfert de l'excès de précipitation en débit à l'exutoire, en se basant sur la méthode d'onde cinématique.

- Le modèle conceptuel est un modèle d'onde cinématique (*kinematic wave*), qui représente les processus physiques régissant le ruissellement des précipitations excédentaires sur la surface du bassin et dans les petits canaux collecteurs.
- Les modèles empiriques basés sur l'hydrogramme unitaire classiques tentent d'établir une relation entre le ruissellement et l'excès de précipitation, sans examen détaillé des processus internes. Les paramètres du modèle ont une signification physique limitée. Leurs valeurs sont surtout estimées par optimisation.

L'hydrogramme unitaire donne le débit de ruissellement par l'équation de convolution suivante :

$$Q_n = \sum_{i=1}^n P_i U_{n-i+1}$$

Où :

Q_n : le débit au temps $n \cdot \Delta t$;

P_i : la lame précipitée excédentaire entre $[i \cdot \Delta t]$ et $[(i+1) \cdot \Delta t]$;

U_{n-i+1} : la valeur de l'hydrogramme unitaire au temps $(n - i + 1)$.

Différentes méthodes basées sur l'hydrogramme unitaire ont été testées dans le cadre de cette étude. Les résultats obtenus étaient plus ou moins rapprochés les uns des autres, cependant, nous avons constaté une grande capacité de l'hydrogramme unitaire de Clark à reproduire les événements simulés.

Sabol G.V. (1988) a montré que ce modèle, ayant une base théorique solide, est très adapté aux grands bassins versants caractérisés par une diversité topographique et en couverture de sol. Le choix de l'hydrogramme unitaire de Clark est justifié aussi par son adaptabilité à la modélisation événementielle (Tramblay et al, 2010).

Afin de transformer les pluies excédentaires en écoulement, le modèle de l'hydrogramme unitaire de Clark décrit deux processus importants :

- La translation

Il s'agit d'estimer le temps nécessaire pour la circulation de l'excédent de pluies depuis son origine jusqu'à l'exutoire du bassin. Pour ce faire, le modèle utilise un histogramme temps-surface qui décrit l'évolution, en fonction du temps, de la surface du bassin contribuant à l'écoulement à l'exutoire.

Cette relation temps-surface est décrite dans HEC-HMS comme suit :

$$\text{Pour } t \leq \frac{t_c}{2} : \quad \frac{A_1}{A} = 1.414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1.5}$$

$$\text{Pour } t > \frac{t_c}{2} : \quad \frac{A_1}{A} = 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1.5}$$

Avec :

A_1 : la surface cumulée contribuant à l'écoulement au temps t ;

A : la surface totale du bassin versant ;

t_c : le temps de concentration du bassin.

- L'atténuation

La réduction de l'ampleur de l'écoulement par un effet de stockage exercé par la surface du bassin versant.

L'effet de stockage est représenté par le modèle de réservoir linéaire basé sur l'équation de continuité :

$$\frac{ds}{dt} = I_t - O_t$$

Où :

$\frac{ds}{dt}$: taux de variation temporelle des eaux stockées au temps t ;

I_t : le débit entré au réservoir au temps t ;

O_t : le débit sorti du réservoir au temps t (débit à l'exutoire du bassin).

Le stockage au temps t est lié au débit à l'exutoire du bassin par la relation :

$$S_t = R * O_t$$

Avec R est le coefficient du stockage, un paramètre propre au réservoir.

La combinaison et la résolution des équations ci-dessus par une approximation de différences finies donnent :

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1}$$

Où :

O_t : le débit sortant du réservoir au temps t ;

I_t : le débit entrant au réservoir au temps t ;

C_A et C_B : des coefficients de routage calculés comme suit :

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad \text{et} \quad C_B = 1 - C_A$$

Le débit moyen au temps t est :

$$\overline{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2}$$

Nous pouvons conclure que le modèle de l'hydrogramme unitaire de Clark estime le débit à l'exutoire pour une lame d'eau excédentaire en calculant la translation du volume d'eau vers l'exutoire en fonction du temps, et en prenant en considération l'effet de stockage à cours-terme exercé par la surface du bassin.

Le modèle exige deux paramètres, le temps de concentration et le coefficient de stockage. Ils sont estimés et optimisés par calibration basée sur des séries de pluies et débits observés.

Le temps de concentration a été calculé par la méthode TR 55 sous ARC-GIS d'une manière automatique pour l'ensemble des sous-bassins. Le tableau récapitulant ces calculs figure dans l'annexe 3.

1.2.3. Débit de base

Un hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin est constitué de deux composantes principales, l'écoulement de surface ou rapide, et l'écoulement sous terrain ou de base. L'écoulement de sub-surface étant considéré négligeable ici.

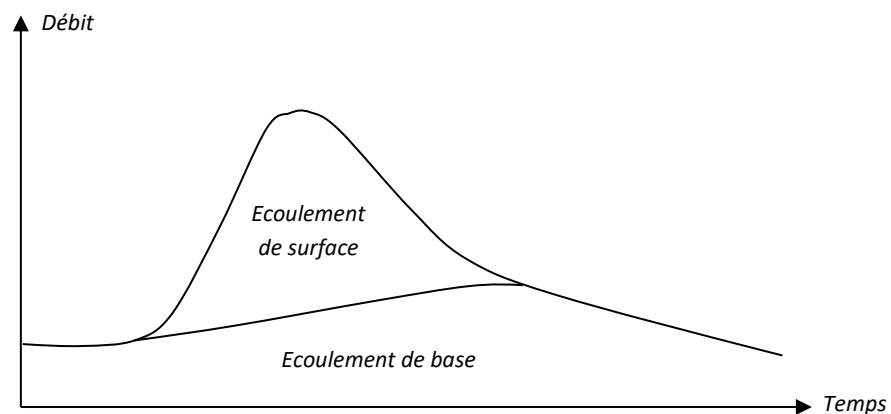


Figure 31. Hydrogramme simplifié montrant les deux composantes principales, l'écoulement de surface et l'écoulement de base

Le débit de base correspond à la portion des eaux pluviales infiltrées dans le sous-sol qui rejoignent la surface et régularise d'une manière différée l'écoulement des cours d'eau.

L'estimation de la contribution de l'écoulement souterrain permet d'améliorer nettement la conception du modèle. La forme de la courbe de décrue de l'hydrogramme ainsi que le volume de la crue sont influencés par le débit de base.

Trois alternatives différentes sont proposées par la plateforme HEC-HMS pour modéliser le débit de base :

- Débit constant à variation mensuelle : le modèle considère un débit de base constant pouvant varier d'un mois à l'autre. La valeur de débit introduite par l'utilisateur s'ajoute à l'écoulement de surface à chaque intervalle de temps de calcul.
- Modèle de récession exponentielle : le débit de base est estimé par la formule suivante :

$$Q_t = Q_0 k^t$$

Où :

Q_t : le débit de base au temps t ;

Q_0 : le débit de base initial ;

k^t : la constante de récession exponentielle.

Les paramètres du modèle sont donc Q_0 le débit de base initial au début de la simulation, et k^t la constante de récession exponentielle.

Le modèle de récession exponentielle est recommandé dans les zones caractérisées par un régime d'écoulement pluvial, raison pour laquelle nous l'avons adopté dans cette étude.

- Modèle de réservoir linéaire : il simule le stockage et l'écoulement des eaux dans le sous-sol à un réservoir à comportement linéaire. C'est un modèle adapté à la simulation continue.

1.2.4. L'écoulement dans les cours d'eau

C'est une fonction de routage qui permet de simuler la propagation dans les biefs, de l'hydrogramme généré à partir des processus décrits plus haut. Il s'agit de calculer l'hydrogramme en aval du cours d'eau, en se basant sur l'hydrogramme introduit en amont comme condition à la limite.

Plusieurs modèles de routage sont disponibles dans la plateforme HEC-HMS, ils se basent tous sur la résolution des équations de base de l'écoulement à surface libre.

- L'équation de quantité de mouvement : tient compte des forces exercées sur l'eau en écoulement à surface libre (force de gravité, pressions, frottements). L'équation unidimensionnelle s'écrit :

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$$

Où :

S_f : le gradient d'énergie ; S_0 : la pente du fond ; V : la vitesse ; y : la profondeur ;
 x : la distance parcourue par l'écoulement ; t : le temps ; g : l'accélération de la pesanteur ; $\frac{\partial y}{\partial x}$: gradient de pression ; $\frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x}$: accélération convective ; $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$: accélération locale.

- L'équation de continuité : elle décrit le volume d'eau dans le tronçon, en prenant en compte le volume entrant, le volume sortant et le volume emmagasiné dans le bief.

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q$$

Où :

q : apport latéral par unité de longueur du chenal ; A : section mouillée ; B : largeur de la section mouillée ; V : vitesse ; y : profondeur ; x : distance parcourue par l'écoulement ; t : temps.

Parmi les modèles proposés par HEC-HMS, nous citons :

- Le modèle de délai (*Lag*)

Le principe est très simple, on considère que l'hydrogramme en aval n'est rien d'autre que l'hydrogramme amont décalé d'un délai ou *lag* (fig.32).

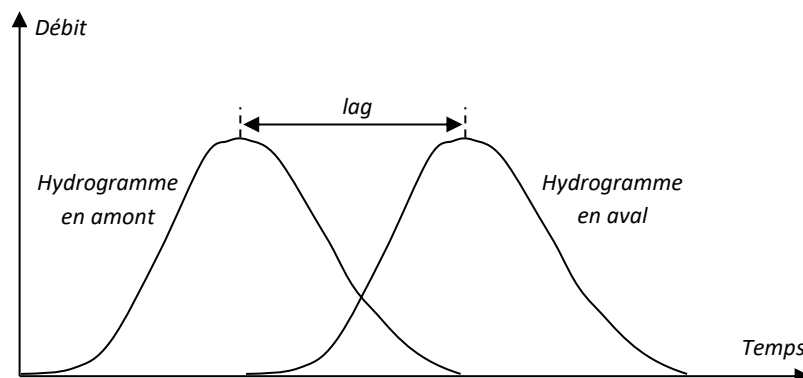


Figure 32. Schématisation simplifiée du délai (*lag*)

- Le modèle de Muskingum

Utilise une approximation simplifiée en différences finies de l'équation de continuité :

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2} \right) = \left(\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} \right)$$

Où :

I_{t-1} et I_t : débits entrant aux temps $t - 1$ et t respectivement ;
 O_{t-1} et O_t : débits entrant aux temps $t - 1$ et t respectivement ;
 $S_t - S_{t-1}$: stockage dans le chenal aux temps $t - 1$ et t respectivement.

Le volume d'eau stocké dans le chenal est donné par la relation suivante :

$$S_t = KO_t + KX(I_t - O_t) = K[XI_t + (1 - X)O_t]$$

Où :

K : temps de parcours de l'onde de crue dans le tronçon ;
 X : paramètre de pondération ($0 < X < 0.5$).
 KO_t : stockage dans le prisme d'eau qui s'écoule dans le tronçon, et dont la surface est considérée plane ;
 $KX(I_t - O_t)$: volume sur/sous le plan d'eau, dû à la turbulence de l'écoulement.

La combinaison des deux équations précédentes donne :

$$Q_t = \left(\frac{\Delta t - 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t} \right) I_t + \left(\frac{\Delta t + 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t} \right) I_{t-1} + \left(\frac{2K(1 - X) - \Delta t}{2K(1 - X) + \Delta t} \right) Q_{t-1}$$

Le programme calcule donc, l'hydrogramme en aval à partir de celui introduit en amont, une fois la condition initiale et les paramètres K et X sont précisés.

➤ Modified Puls

Comme le précédent, ce modèle est basé aussi sur une approximation en différences finies de l'équation de continuité, en plus d'une représentation empirique de l'équation de quantité de mouvement (Chow, 1964).

➤ Muskingum Cunge

C'est un essai d'amélioration du modèle de Muskingum proposée par Cunge (1969) et Ponce (1978). Il est basé toujours sur une combinaison des équations de continuité et de quantité de mouvement.

2. Méthodologie de la modélisation hydraulique et la délimitation des zones inondables

Dans le but d'élaborer des modèles hydrauliques qui permettent de simuler la propagation de l'onde de crue dans des sites déterminés dans les objectifs, nous avons choisi d'utiliser l'outil HEC-RAS. Nous avons opté pour une simulation unidimensionnelle en régime permanent.

Les profils d'eau issus du calcul hydrauliques sont exploités sous ARC-GIS pour générer les zones inondables.

2.1. Présentation générale de l'outil HEC-RAS

Développé par l'*US Army Corps of Engineers*, depuis 1995, HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) est un système intégré de modélisation multitâche, qui permet de calculer le profil d'eau en régime permanent, faire des simulations unidimensionnelles et bidimensionnelles en régime transitoire, calculer le transport solide, et simuler de la pollution des eaux.

Tout comme HEC-HMS, Il présente de nombreux avantages dont les plus importants sont :

- Un outil libre (*freeware*) ;
- Bien documenté avec un manuel d'utilisateurs et un autre de références techniques ;
- Doté d'une interface simple qui permet l'acquisition des données, leur stockage, leur analyse et la restitution des résultats sous forme de tableaux et de graphiques ;
- Présente la possibilité d'échange avec des SIG, notamment avec ARC-GIS via le module HEC-GeoRAS développé également par l'USACE spécialement pour assurer cette interopérabilité.

C'est un outil largement utilisé actuellement, aussi bien dans les travaux de recherche que dans les études techniques. Il a prouvé son performance en matière de modélisation unidimensionnelle.

Reste à signaler que nous nous sommes servis de la dernière version (HEC-RAS 5.0.3) disponible gratuitement sur le site officiel du corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis.

Nous considérons que l'écoulement au niveau des tronçons modélisés s'effectue essentiellement dans le sens longitudinal, la modélisation unidimensionnelle sera donc adoptée. Celle-ci présente l'avantage d'être moins compliquée par rapport à la modélisation bi ou tridimensionnelle :

- Elle demande moins de données topographiques ;
- Elle exige peu de paramètres qui sont généralement faciles à estimer ;
- Les équations sont simplifiées et le calcul est plus rapide.

Horrit & Bates (2002) ont montré que malgré ces simplifications, les résultats de la simulation 1D sous HEC-RAS, sont comparables à ceux de la modélisation 2D sous Telemac 2D.

2.2. Principes du calcul hydraulique par HEC-RAS

La version actuelle de HEC-RAS permet d'exécuter le calcul hydraulique unidimensionnel, bidimensionnel et uni-bidimensionnel combiné. Elle assure la modélisation de l'écoulement en régime permanent et en régime transitoire.

En ce qui suit, une présentation des bases théoriques de la modélisation unidimensionnelle par HEC-RAS est abordée, en se basant sur le manuel de références hydraulique (Brunner, 2016).

2.2.1. Modélisation en régime permanent

✚ L'équation de conservation de l'énergie

Le calcul du profil d'eau en régime permanent que ce soit en écoulement torrentiel, fluvial ou mixte, est basé sur la solution de l'équation de conservation de l'énergie.

La variation de la surface de l'eau entre deux sections transversales (fig.33), est donnée par l'équation suivante :

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Où :

Z : l'altitude du fond du chenal ;

Y : la profondeur de l'eau ;

α : coefficient de pondération de vitesse ;

V : la vitesse moyenne ;

g : l'accélération de la pesanteur ;

h_e : la perte de charge.

Le diagramme suivant, schématise les termes de l'équation de la conservation de l'énergie :

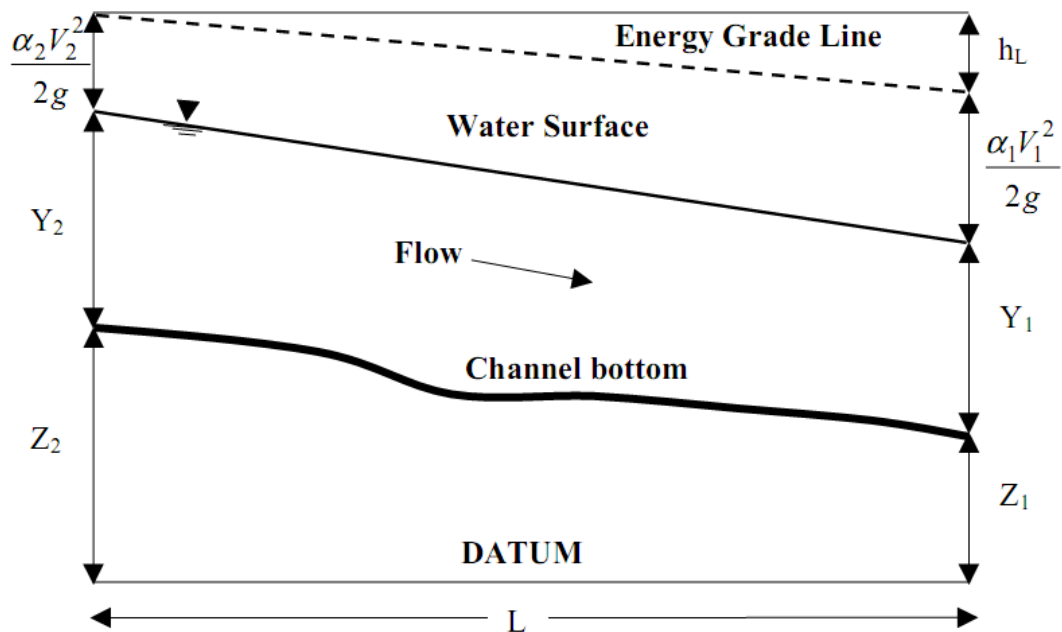


Figure 33. Représentation des termes de l'équation de l'énergie (Brunner, 2016)

Les pertes d'énergie sont évaluées en fonction des frottements (en relation avec le coefficient de *Manning*) et les effets de contraction–expansion du chenal :

$$h_e = L\bar{S}_f + C \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g}$$

Où :

L : longueur de tronçon (distance entre les deux points) ;

$\bar{S}_f$: pente de frottement entre les deux points ;

C : coefficient de contraction ou expansion.

L'altitude du plan d'eau au niveau d'une cross-section est calculée en combinant les deux équations précédentes, selon la procédure suivante :

- Supposer une altitude du plan d'eau au niveau de la section transversale amont, à base de laquelle sont déterminées la capacité totale d'acheminement et la vitesse ;
- Calculer $\bar{S}_f$ et résoudre l'équation précédente pour définir h_e ;
- A partir des résultats obtenus, calculer l'altitude du plan d'eau au niveau de la section transversale en question, et la comparer avec la valeur supposée au début ;
- Répéter la procédure selon des itérations jusqu'à ce que la valeur calculée respecte une tolérance donnée (0.003 mètres par défaut).

La valeur de l'altitude du plan d'eau au niveau de chaque cross-section se base au début sur la surface d'eau dans la section précédente, ensuite, lors des itérations suivantes elle est prise égale à la valeur supposée plus 70% de l'erreur issue de la première approximation (valeur calculée - valeur supposée).

L'équation de conservation de la quantité de mouvement

L'équation de conservation de l'énergie est applicable uniquement dans le cas d'un écoulement à variation graduelle. Lors du passage de l'écoulement fluvial à l'écoulement torrentiel ou l'inverse, des changements rapides de débit sont opérés, et cette équation n'est plus valide.

L'équation de conservation de la quantité de mouvement est donc utilisée, notamment dans le cas des ressauts hydrauliques, de ponts et de confluences des cours d'eau. Elle dérive de la deuxième loi de Newton appliquée à une quantité d'eau entre deux sections transversales (fig.34).

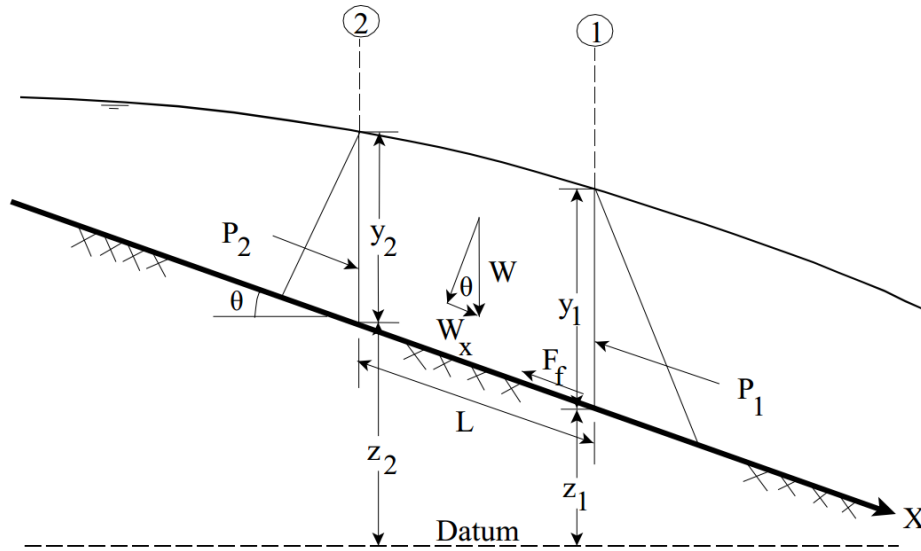


Figure 34. Schématisation des termes du principe de la quantité de mouvement (Brunner, 2016)

La variation de la quantité de mouvement par unité de temps est donnée par :

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x$$

Où :

P : force de pression hydraulique ;

W_x : force due au poids de l'eau dans la direction x ;

F_f : pertes dues aux frottements externes ;

Q : débit ;

ρ : densité de l'eau ;

ΔV_x : changement de vitesse entre les deux points 1 et 2 dans la direction x.

Le développement et la simplification des termes de cette équation aboutissent à la formule suivante :

$$\frac{Q_2^2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_0 - \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L \bar{S}_f = \frac{Q_1^2 \beta_1}{g A_1} + A_1 \bar{Y}_1$$

Où :

Q : débit au niveau de la cross-section i ;

β : force de pression hydraulique ;

A : section mouillée ;

$\bar{Y}$: profondeur ;

L : distance entre les deux cross-sections ;

S_0 : pente du chenal ;

$\bar{S}_f$: pente de la ligne d'énergie (pente de frottement) ;

g : accélération de la pesanteur.

2.2.2. Modélisation en régime transitoire

L'écoulement en régime transitoire dans un cours d'eau est gouverné par deux lois physiques : le principe de la conservation de masse ou de continuité, et le principe de la conservation de la quantité de mouvement. Mathématiquement, ces lois sont décrites par des formes simplifiées de l'équation de Saint-Venant.

✚ L'équation de conservation de masse

Après simplification, l'équation de conservation de masse appliquée à un volume unitaire d'eau dans le chenal, s'écrit :

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

Où :

A_T : section mouillée ;

Q : débit ;

q_l : débit latéral entrant par unité de longueur.

✚ L'équation de conservation de la quantité de mouvement

La forme finale simplifiée de l'équation de conservation de la quantité de mouvement utilisé par HEC-RAS, est la suivante :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{dz}{dx} + S_f \right) = 0$$

Où :

Q : débit ;

V : vitesse ;

A : section mouillée ;

g : accélération de la pesanteur ;

$\frac{dz}{dx}$: pente de la surface d'eau ;

S_f : pente de frottement.

2.3. Le coefficient de rugosité du sol (coefficient de Manning-Strickler)

Le coefficient de Manning (n) est défini par la formule :

$$Vitesse = \frac{1}{n} * R_h^{2/3} * S^{1/2} \quad \begin{cases} R_h = \text{Rayon hydraulique} \\ S = \text{Surface} \end{cases}$$

Le coefficient de Strickler (k) est également utilisé dans la littérature et correspond à l'inverse du coefficient de Manning :

$$k = \frac{1}{n}$$

Les différentes études effectuées sur les supports d'écoulement de l'eau, surtout celles effectuées par Ven Te Chow en 1959, ont défini des ordres de grandeur pour la valeur du coefficient de Manning ainsi que pour celui de Strickler. Le tableau qui résume les résultats obtenus par V. Chow, et qui compte parmi les références les plus utilisés par les hydrauliciens, est présenté dans l'annexe 4.

3. Données utilisées et démarche suivie

3.1. Données utilisées

3.1.1. Données hydroclimatiques

Il s'agit essentiellement des précipitations et des débits. L'évapotranspiration étant de faible importance dans le cas de la modélisation événementielle qu'est le cas de la présente étude.

Ainsi, les séries journalières de pluies et débits enregistrées au niveau des différentes stations hydrométéorologiques appartenant à l'ABHS, ont fait l'objet d'un traitement statistique rigoureux, dans le but de critiquer les données observées et tester leur consistance et leur homogénéité, compléter les séries qui présentent des lacunes, avant de calculer et préparer les différentes formes de données qui seront utilisées au cours de l'étude (pluies moyennes annuelles, pluies journalières maximales, pluies de différentes fréquence, débits horaires, ...).

Les méthodes statistiques utilisées sont présentées brièvement dans l'annexe 2.

3.1.2. Caractéristiques des barrages

Les barrages sont modélisés dans HEC-HMS par l'élément *Reservoir*. Plusieurs méthodes sont proposées pour définir les règles de gestion de la retenue. Ceux-ci exigent des données de différentes natures (Caractéristiques géométriques et techniques de la digue, bathymétrie de la retenue, lois de lâchers et de déversement, règles de gestion et courbes d'alertes ...).

Les services de l'ABHS ont mis à notre disposition les séries des apports, de turbinage, de déversement, de vidange, ainsi que l'évolution de la cote et le volume total de la retenue. Il a été donc possible d'en extraire – après traitement – les données nécessaires à la modélisation et le calage des retenues des barrages existants.

3.1.3. Topographie

La topographie des bassins versants est l'une des caractéristiques physiques primordiale qui conditionne l'écoulement à la surface. D'un point de vue hydrologique, elle agit sur le temps de concentration et par conséquent sur le pic de l'hydrogramme de la crue. Alors que sur le plan hydraulique, la topographie détermine l'ensemble des caractéristiques en relation avec la propagation de l'onde de la crue (vitesse du courant, débordement, étendue des zones inondables...).

En ce qui concerne l'étude hydrologique, afin de pouvoir délimiter les sous-bassins et d'extraire leurs caractéristiques physiques d'une manière automatisée sous ARCGIS, trois modèles numériques d'élévation différents ayant toutes la même résolution spatiale (30 mètres), ont été testés et comparés (tab.6).

DEM	SRTM	ASTER GDEM (V2)	AW3D30
Organisme	NASA : United States National Aeronautics and Space Administration	METI : Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan and NASA : United States National Aeronautics and Space Administration	JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency
Mission	Shuttle Radar Topography Mission	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2)	ALOS : Advanced Land Observing Satellite "DAICHI"
Année	Elaboré en 2000, disponible gratuitement depuis 2014	2011	2016
Résolution	30 mètres	30 mètres	30 mètres

Tableau 6. Les trois modèles numériques d'élévation DEM testés

Le traitement et l'analyse des trois DEMs à l'aide des outils Arc-Hydro-Tools sous ARCGIS a montré qu'en se basant sur AW3D30, les limites des sous-bassins ainsi que le réseau hydrographique sont tracés avec le minimum d'erreur. Nous avons donc décidé de l'utiliser pour préparer le modèle hydrologique HEC-HMS.

Pour l'étude hydraulique qui exige généralement une topographie plus fine (Werner, 2000 ; Geoffroy, 2007), en plus du DEM AW3D30, nous avons eu recours à des données obtenues par restitutions et levés topographiques réalisés localement par l'ABHS dans le cadre de différents projets.

3.1.4. Autres données

Des cartes topographiques au 1/50000 géo-référencés et mosaïquées, en plus des images satellites ont été utilisées comme fond permettant de vérifier les éléments extraits automatiquement, notamment les lignes de partage des eaux et le réseau hydrographique. Ils ont servi aussi pour vérifier l'occupation/utilisation du sol, et pour digitaliser des entités pour situations.

Nous nous sommes aussi servis de la carte géologique du Maroc au 1/1 000 000 pour présenter globalement la géologie du bassin de Sebou.

Par ailleurs, et dans le but d'acquérir une base de données Occupation/utilisation du sol à l'échelle du bassin, nous avons eu recours à une carte élaborée dans le cadre du projet **GlobCover**, une initiative de l'agence spatiale européenne (ESA) qui a débuté en 2005 en collaboration avec JRC, EEA, FAO, UNEP, GOFC-GOLD et IGBP.

Après traitement, la carte a été mise à la disposition des chercheurs gratuitement par l'ESA et l'université catholique de Louvain en 2010. D'une résolution spatiale de 300 mètres, la carte dispose de 22 types couvertures différentes, et elle est projetée en WGS 84.

En plus de la carte d'occupation du sol, nous avons eu recours aussi à une carte des types de sols Harmonized World Soil Database (HWSD) v 1.2, qui correspond à une base de données raster comportant plus de 16 000 types de sols à l'échelle globale. C'était le fruit d'une collaboration entre Food and Agriculture Organization (FAO) et International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).

3.2. Démarche de l'élaboration du modèle hydrologique

L'élaboration du modèle hydrologique sous HEC-HMS passe tout d'abord par la collecte et la préparation des données de différentes natures (hydroclimatiques, topographiques, occupation/utilisation du sol, caractéristiques des barrages, stations pluviométriques et hydrologiques, ...). Ensuite l'essentiel du traitement de ces données s'effectue à l'aide de HEC-GeoHMS sous ARCGIS aboutissant à l'élaboration du Modèle du Bassin. Le résultat est exporté vers HEC-HMS où un modèle météorologique et des spécifications de contrôle sont ajoutés. Après l'exécution du modèle, les paramètres sont calibrés, et le modèle est validé en fonction des hydrogrammes observés.

3.2.1. Préparation des données

▪ Données topographiques

Comme déjà mentionné plus haut, nous avons décidé d'utiliser le modèle numérique d'élévation AW3D30, disponible sous forme de dalles de 1°x1°.

Les dalles sont donc mosaïquées et découpées suivant la limite du bassin du Sebou, le système de coordonnées est transformé en Lambert conique conforme (système métrique), avant de

procéder à un traitement préalable visant le comblement des vides, et le traçage des lignes de cours d'eau dans quelques endroits qui présentent des problèmes.

▪ **Données pluviométriques**

Après avoir déterminé les stations pluviométriques qui seront utilisés, deux événements ont été choisis au niveau de chaque station à partir des séries de pluies journalières. Le premier s'étale du 12 au 27 décembre 2009, il a été utilisé pour le calage du modèle. Le deuxième du 22 janvier au 24 février 2010, celui –ci a servi pour la validation du modèle. Les séries des pluies journalières des deux événements au niveau de chaque station pluviométrique sont donnés par l'annexe 5.

En outre, un ajustement statistique à la loi de Gumbel a été réalisé dans le but d'extraire les pluies de période de retour deux ans, nécessaires au calcul du temps de concentration pour chaque sous-bassin automatiquement sous ARCGIS. Les résultats de l'ajustement sont donnés par l'annexe 6.

▪ **Données hydrologiques**

Comme pour les données pluviométriques, nous avons procédé à l'extraction des hydrogrammes de crues enregistrés au niveau des stations hydrologiques du bassin comme réponse aux deux événements mentionnés plus haut.

Il est à signaler que les séries de débit obtenus auprès des services de l'ABHS sont au pas de temps horaire, mais avec beaucoup de lacunes, ce qui a nécessité une interpolation linéaire pour les combler. Nous rappelons ici que les séries de débits observés sont indispensables pour le calage et la validation du modèle.

Les séries de débits instantanés (horaires) observés lors des deux événements au niveau de chaque station hydrologique sont donnés par l'annexe 5.

▪ **Données en relation avec les retenues des barrages**

L'ABHS a mis à notre disposition les restitutions des barrages existants dans sa zone d'action. Elles contiennent les séries journalières des apports, côte, volume, évaporation, turbinage, irrigation, vidange et déversement, sous forme de volumes exprimés en 1000 mètres cubes.

En se basant sur ces données, nous avons calculé les débits moyens journaliers sortants des barrages, ainsi que celui dérivés à partir de Allal El Fassi vers Idriss 1^{er}, et ce durant les deux événements déterminés auparavant.

Nous avons aussi préparé les séries côte-volume de l'ensemble des barrages, elles sont introduites comme des données paires *paired data* jouant le rôle de règles de gestion.

▪ **Utilisation/occupation du sol - Types de sols**

Ces deux bases de données cartographiques ont été reclassées afin de pouvoir les exploiter pour générer des valeurs de numéros de courbes *Curve Number* (CN) exprimant pour chaque sous-bassin les pertes par infiltration.

3.2.2. Elaboration du modèle du bassin à l'aide de HEC-GeoHMS

La construction d'un modèle HEC-HMS pour un bassin de 40 000 kilomètres carrés est un exercice pénible et compliqué, vu le nombre d'éléments (sous-bassins, tronçons, jonctions, barrages, stations hydrologiques...) qu'il doit contenir. Nous avons donc eu recours à l'extension HEC-GeoHMS sous ARCGIS qui permet, par le biais d'un large éventail d'outils efficaces et adaptés, d'automatiser le traitement d'un modèle numérique de terrain, et de créer l'ensemble des éléments constitutifs d'un modèle du bassin d'une manière efficace est relativement rapide.

Le travail sous ARCGIS consiste donc à :

- Un traitement préalable se manifestant essentiellement par le calcul des directions d'écoulement, l'accumulation des eaux, la détermination des lignes de courant et la délimitation des sous-bassins ;
- La création d'un projet permettant de déterminer l'air de l'étude et son exutoire ;
- La modification des sous-bassins en fonction des stations hydrologiques et des barrages ;
- L'extraction de l'ensemble des caractéristiques physiques des éléments créés ;
- Le calcul de quelques paramètres hydrologiques comme le temps de concentration, et l'établissement des polygones de Thiessen ;
- Exporter le modèle du bassin créé vers HEC-HMS.

3.2.3. Complétion du modèle hydrologique sous HEC-HMS

Une fois le modèle du bassin est ouvert sous HEC-HMS, selon les méthodes choisies pour modéliser chaque élément, les paramètres qui manquent sont ajoutés. Le reste des composantes principales est créé :

- Un modèle météorologique ayant pour objet de décrire les conditions aux limites des sous-bassins. Il permet d'introduire les données météorologiques, et de préciser la façon avec laquelle les pluies sont générées à l'échelle de chaque sous-bassin. Plus précisément, il détermine le taux d'influence de chaque station pluviométrique sur le sous-bassin en se basant sur les polygones de Thiessen établis auparavant ;
- Des spécifications de contrôle de la simulation, il s'agit de préciser la date et heure de début et de fin de la simulation ;
- Les données d'entrée qui sont sous forme de séries temporelles *time series data* comme les pluies et des débits enregistrés au niveau et stations hydrométéorologiques, ou sous forme de données paires *paired data* comme les courbes côte-volume caractéristiques des retenues des barrages

3.2.4. Lancement de la simulation et calage du modèle

Lorsque toutes les composantes du modèle sont en place, le calcul est lancé, et on passe directement au calage des paramètres ayant été estimés au début. Le calage du modèle peut s'effectuer manuellement en modifiant les valeurs des paramètres, ou encore par optimisation automatique après avoir précisé les paramètres concernés.

L'optimisation est un processus qui consiste à ajuster les paramètres du modèle jusqu'à ce qu'il reproduit les hydrogrammes observées avec le maximum de fidélité possible. Le degré d'ajustement de l'hydrogramme simulé à celui observé est quantifié sous HEC-HMS par une fonction appelée la fonction objective.

Plusieurs fonctions sont disponibles. Chacune évalue la qualité d'ajustement entre l'hydrogramme calculé et celui observé d'une manière différente, selon les poids attribués aux différents critères et l'importance donnée aux différentes erreurs (*First Lag Autocorrelation, Maximum Absolute Residual, Mean Absolute Residual, Mean Squared Residual, Nash Sutcliffe, Peak-Weighted RMS Error, Percent Error Peak, Percent Error Volume, RMS Error, RMS Log Error, Sum Absolute Residuals, Sum Squared Residuals, Time-Weighted Error, Variance Absolute Residual*).

Après la comparaison des résultats obtenus par plusieurs tests, nous avons opté pour la fonction *Percent Error Peak* qui permet, le plus, de se rapprocher de l'allure générale de l'hydrogramme observé, notamment du côté débit de pointe, caractéristique déterminante du risque d'inondation.

Deux procédures de recherche sont proposées pour minimiser la fonction objective lors de l'opération d'optimisation :

- La première dite *Univariate gradient method*, évalue et ajuste les paramètres un par un, en gardant à chaque fois les autres constants ;
- La deuxième dite *Nelder and Mead method*, utilise un algorithme appelée *downhill simplex method* pour évaluer simultanément l'ensemble des paramètres et en déterminer celui à ajuster.

La performance du modèle est donc évaluée, graphiquement, essentiellement à travers la comparaison entre les hydrogrammes observés et ceux simulés, et numériquement à l'aide de la valeur de la fonction objective choisie « *Percent Error Peak* », en plus du coefficient de Nash-Sutcliffe largement utilisé en hydrologie pour tester l'efficacité des modèles.

Le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (*NSE*) est exprimé comme suit :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q})^2}$$

Où :

- i : le pas de temps d'observations ;
- n : le nombre total d'observations ;
- $Q_{obs,i}$: le débit observé au temps i ;
- $Q_{sim,i}$: le débit simulé au temps i ;
- $\bar{Q}$: la moyenne des débits observés.

Il est à noter que les résultats d'une simulation seront d'autant meilleurs que le critère *NSE* se rapproche de 1 (100%), et que la fonction objective est faible ou nulle (le cas idéal).

Il reste à signaler que l'optimisation porte sur les paramètres issus d'une première estimation approximative, et qui affectent sensiblement les caractéristiques de l'hydrogramme calculé.

Chaque opération d'optimisation concerne les éléments (sous-bassins, tronçons) en amont du point de contrôle (station hydrologique) concerné, mais en aval du point d'optimisation antécédente.

3.2.5. Validation du modèle

Après l'optimisation des paramètres du modèle, l'étape finale consiste à valider le bon fonctionnement de celui-ci, à travers une simulation basée sur un événement différent de celui utilisé lors de la première simulation (de calage).

3.3. Démarche de l'élaboration du Modèle hydraulique et de la cartographie des zones inondables

La démarche suivie pour élaborer le modèle hydraulique ressemble beaucoup à celle discutée dans le paragraphe précédent. Elle consiste dans un premier temps, à créer sous ArcGIS le fichier décrivant la géométrie du modèle, l'exploiter ensuite vers HEC-RAS, le compléter en rajoutant les paramètres qu'il faut. Un fichier décrivant les données d'écoulement est également créé, il abrite les débits entrés au modèle, les conditions aux limites et éventuellement les conditions initiales (BRUNNER, 2016 a & b)).

Une fois les résultats de la simulation sont validés, ils sont réexportés vers ArcGIS où ils seront exploités pour cartographier les zones inondables.

La figure 35 présente les règles générales de l'élaboration d'un modèle hydraulique sous HEC-RAS à l'aide de HEC-GeoRAS (CAMERON & ACKERMAN, 2011).

3.3.1. Préparation des données requises

Elle concerne essentiellement les débits en entrée du modèle et les données topographiques. Les débits correspondent aux sorties du modèle hydrologique, ils sont pris sous forme de pointes de crue lorsqu'il s'agit de la simulation en régime permanent, ou sous forme d'hydrogrammes de crue lorsque la simulation est en régime transitoire.

La topographie mise à notre disposition est généralement sous forme de fichier Autocad DWG. Elle provient des missions de restitutions et des levés topographiques effectués sur le terrain. On procède donc sous ArcGIS à l'extraction des éléments altitudinaux ponctuels ou linéaires et à l'élimination de tout autre élément. Les éléments retenus sont transformés en fichiers de forme, exploités pour générer des modèles numériques de terrain de haute résolution.

3.3.2. Elaboration de la géométrie du modèle sous ARCGIS

La construction de la géométrie du modèle hydraulique s'effectue à l'aide de l'extension HEC-GeoRAS sous ArcGIS. Il s'agit de créer les éléments physiques ou géométriques du modèle.

Après la mise en place des couches utilisées comme fonds d'extraction de l'information (cartes topographiques, MNT, images satellitaires, stations hydrologiques...), les outils *preprocessing* de l'extension HEC-GeoRAS permettent d'une manière organisée de numériser les entités suivantes :

- Le réseau hydrographique : essentiellement à partir du MNT en prenant en considération le tracé des rivières sur la carte et l'image satellitaire.
- Les lignes berges (bank lines) : en se basant essentiellement sur la topographie du MNT. Ces lignes permettent de délimiter le lit majeur du cours d'eau.
- Les lignes d'écoulement (Flow path centerlines) : enveloppent les deux entités précédentes. Ils n'ont pas de signification physique, leur utilité est de permettre de calculer la distance entre les profils en travers suivant trois directions parallèles : channel, left overbank, and right overbank.
- Les lignes des profils en travers (Cross section cut lines) : c'est l'entité la plus importante à laquelle il faut accorder le maximum d'attention puisque c'est le profil en travers qui détermine l'altitude de la surface d'écoulement et la variation de sa pente, ainsi que la topographie de la plaine d'inondation.

Après la création de ces entités, on procède à l'extraction de l'ensemble des attributions relatives à chaque élément (topologie, distances, altitudes, ...).

L'étape finale est d'enregistrer le résultat et de l'exporter sous forme d'un fichier SDF (**RASimport.sdf**) que reconnaît HEC-RAS.

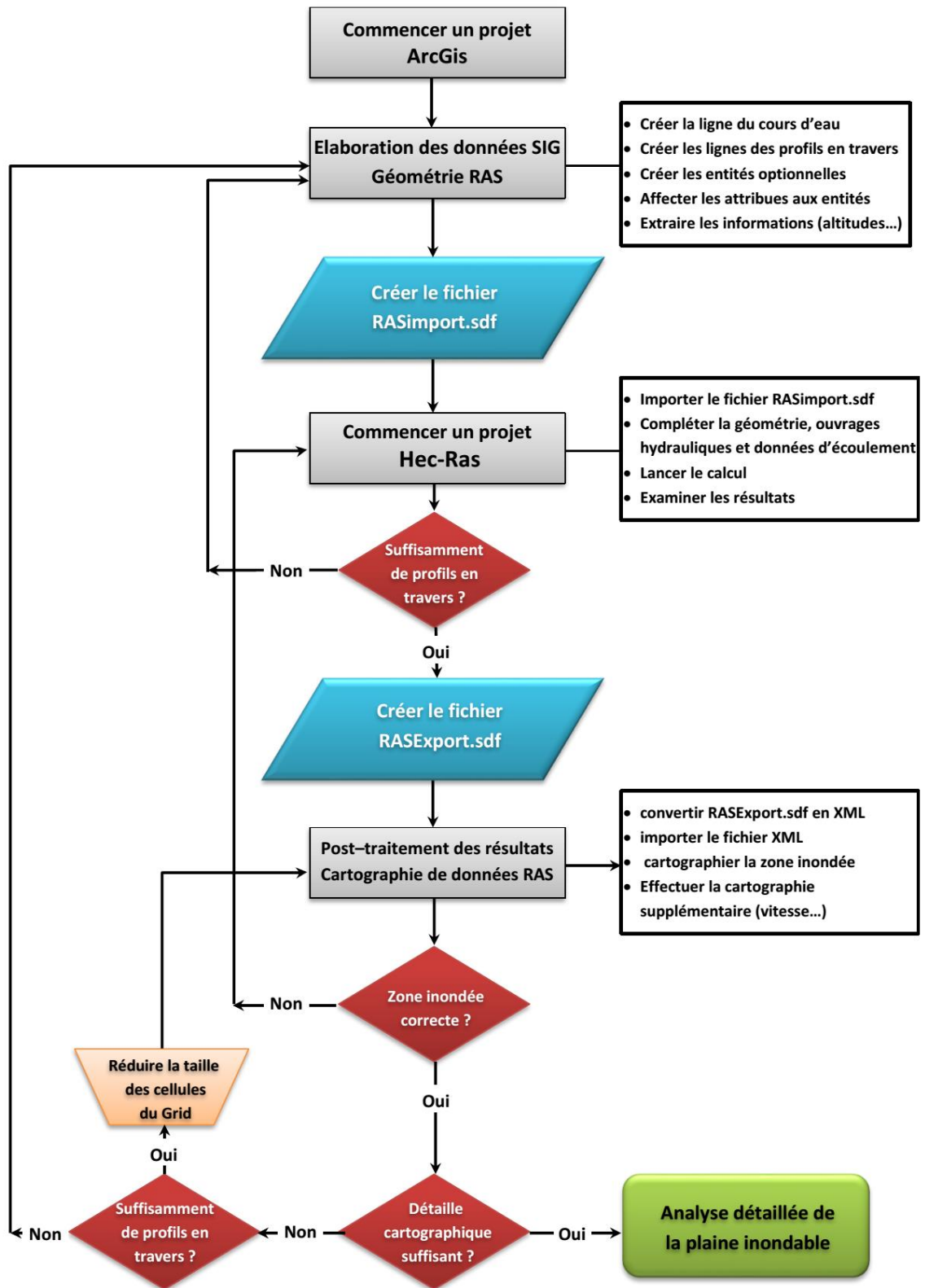


Figure 35. Méthodologie suivie lors de la modélisation hydraulique (Brunner, 2016)

3.3.3. Complétion du modèle sous HEC-RAS

Le fichier des données géométriques élaboré à l'aide de HEC-GeoRAS est importé sous HEC-RAS où il sera complété en :

- Définissant la rugosité du sol à travers le coefficient de Manning, en se basant sur le tableau de référence de Van Te Chow (1959), à la lumière de la description détaillée effectuée sur terrain de l'état du chenal et des berges ;
- Ajoutant les ouvrages hydrauliques susceptibles d'influencer l'écoulement, avec une description détaillée de leurs caractéristiques physiques (dimensions, dispositifs d'évacuation, côtes d'entrée et de sortie, profil du remblai ...). Dans notre cas, nous avons intégré un pont (le pont portugais) ;
- Interpolant les profils en travers, si nécessaire, pour assurer la stabilité du calcul ;
- Elaborant pour chaque simulation, un fichier des données d'écoulement. Il contient les entrées du modèle (débits de pointe dans le cas de la simulation en régime permanent ou hydrogrammes dans le cas de la simulation en régime transitoire), les conditions aux limites et les conditions initiales.

3.3.4. Simulation et calage du modèle

Une fois les composantes du modèle sont en place, les simulations sont lancées. On procède à la correction des erreurs opérées, avant de passer à l'étape du calage. Celui-ci, obéissant toujours à la même philosophie, consiste à ajuster les paramètres du modèle, notamment le coefficient de rugosité, pour avoir des résultats calculés qui s'approche le plus possible des données observées.

Lorsque le modèle est calé en utilisant plusieurs événements, les résultats de la simulation hydrauliques peuvent être restitués et exploités.

3.3.5. Cartographie des zones inondables

Les résultats issus du modèle HEC-RAS sont importés dans ArcGIS, où ils seront traités par les outils *postprocessing* de l'extension HEC-GeoRAS, afin de cartographier l'extension des zones inondables et la répartition des vitesses pour différents profils d'eau obtenu par simulation hydraulique.

Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de présenter la méthodologie et la démarche suivies au cours de cette étude. Nous avons donc discuté les grands traits de l'approche utilisée pour élaborer le modèle de gestion des eaux de surface, qui comporte un modèle hydrologique, un modèle hydraulique et un SIG pour cartographier les zones inondables.

Il s'agit donc d'une approche géomatique basée sur la modélisation hydrologique et hydraulique couplées au SIG. Pour la modélisation hydrologique et hydraulique, nous avons utilisé les logiciels développés par le corps d'ingénierie hydrologique de l'armée américaine, qui sont respectivement HEC-HMS assisté par l'extension HEC-GeoHMS, et HEC-RAS assisté par l'extension HEC-GeoRAS.

Le logiciel HEC-HMS présente l'avantage d'abriter la majorité des modèles mathématiques les plus utilisés en matière de production et de transfert. Après plusieurs tests, nous avons choisi celles qui nous ont servi au mieux pour reproduire les événements observés.

Les résultats de la modélisation hydrologique peuvent constituer les entrées des modèles hydrauliques élaborés sous HEC- RAS. Simple et efficace, celui –ci se base sur les équations classiques de la mécanique des fluides, pour générer les profils d'eau résultant de la propagation de l'onde de crue.

Les résultats issus de la modélisation hydraulique sont exploités à leur tour par l'extension HEC-GeoRAS sous ArcGIS pour délimiter les zones inondables correspondant à chaque profil calculé.

Les données utilisées sont de différentes natures : hydroclimatiques (pluies, débits...), topographiques (DEM, levées, restitutions), caractéristiques des barrages (courbes cote-volume, restitutions...), ... Elles sont généralement à l'état brut, et nécessitent des traitements spécifiques avant qu'elles soient utilisables.

Troisième partie : Présentation des résultats, interprétation et discussion

Introduction

Après avoir détailler, dans la deuxième partie, la méthodologie et la démarche suivie au cours de l'élaboration des différentes composantes des modèles objet de ce travail de recherche, la troisième et la dernière partie sera consacrée la présentation et la discussion des résultats du travail mené.

Ainsi, le premier chapitre aura pour objet de présenter le fruit de la modélisation hydrologique. Il commencera par la description du modèle élaboré, avant de passer à la discussion des simulations effectuées. Tandis que le deuxième chapitre détaillera les résultats de la modélisation hydraulique, avant de passer à la présentation et la discussion de la délimitation des zones inondables.

Chapitre I : Présentation et discussion des résultats de la modélisation hydrologique

Introduction

Le travail de modélisation hydrologique en se basant sur l'utilitaire HEC-HMS a abouti à l'élaboration d'un modèle physique semi-distribué, représentant l'ensemble du territoire du bassin topographique de l'oued Sebou, malgré sa superficie qui s'approche des 40 000 km².

La grande superficie du bassin nous a poussés de discrétiser le bassin en un nombre relativement très élevé de sous-bassins et biefs, afin de pouvoir décrire les contrastes hydroclimatiques et géologiques des différentes parties. 9 grands barrages ont été représentés dans le modèle en plus de la galerie de Matmata.

Le présent chapitre présentera l'architecture physique des différentes composantes du modèle, avant de passer à la discussion et l'interprétation des résultats de calage et paramétrage du modèle dans un deuxième temps. Par la suite, l'analyse du comportement hydrologique du bassin et ses sous-bassins à travers la simulation de deux événements de l'année hydrologique 2009/2010, fera l'objet d'une description détaillée.



Figure 37. Les branches du bassin du Sebou considérées lors de la présentation et l'analyse des résultats

- La branche principale du Sebou

Correspond au bassin de l'oued Sebou à la confluence avec l'Ouergha. Cette branche abrite 4 grands barrages et 5 stations hydrologiques.

Le cours d'eau principal (le Sebou) est contrôlé, de l'amont vers l'aval, par la station Pont Mdez, la station Azzaba, le barrage Allal El Fassi, la station Dar El Arsa et la station Azib Soltane. L'Inaouene est contrôlé par la station Bab Merzouka et les deux barrages Bab Louta et Idriss 1^{er}. Alors que l'oued Mikkès est régulé par le barrage Sidi Chahed.

- La branche de l'Ouergha au nord

Correspond au bassin de l'oued Ouergha, dont le réseau est régulé par quatre barrages, Asfalou, Bouhoda et Sahla en amont, et Al Wahda en aval (à M'jaara).

Quatre stations hydrologiques ont été choisies pour contrôler cette branche, Bab Ouender, Ain Aicha et Tabouda en amont du Barrage Al Wahda, et Khnichet en aval juste avant la confluence avec le Sebou.

- La branche du Beht au sud-ouest

Correspond au bassin de l’oued Beht jusqu’à sa confluence avec le Sebou. Le Beht amont est contrôlé par la station hydrologique Oueljet Soltane avant de se jeter dans le lac du barrage Asfalou, celui-ci régule l’essentiel des eaux produites par cette branche. L’affluent R’dom est contrôlé par la station Souk El Had.

Branche	Stations hydrologiques	barrages
Branche Ouergha	Bab Ouender Ain Aicha Tabouda Khnichet	Asfalou Bouhouda Sahla Al Wahda
Branche Beht	Oueljet Soltane Souk El Had	Kansera
Branche Sebou	Pont du Mdez Azzaba Dar El Arsa Bab Merzouka Azib Soltane Belksiri	Allal Fassi Bab Louta Idriss 1er Sidi Chahed

Tableau 7. Les points de contrôle (stations hydrologiques et barrages) choisis au niveau de chaque branche du bassin

Elles sont toutes représentées par les principaux cours d’eau, sur lesquels ont été installés les grands barrages et les stations hydrologiques principales, jouant le rôle de points de contrôle. Cela nous a permis de bien caler le modèle, et bien cerner et analyser le fonctionnement hydrologique au niveau de chaque branche, et par conséquent, au niveau du bassin tout entier.

En aval de sa confluence avec l’Ouergha et Rdat, le Sebou est contrôlé par la station Belksiri à l’entrée de la plaine du Gharb. Nous avons donc jugé intéressant de présenter les résultats obtenus au niveau de cette station.

2. Calage du modèle hydrologique

L’évènement utilisé pour le calage du modèle a été enregistré en fin 2009. Il s’étale sur 16 jours du 12/12/2009 au 27/12/2009 (annexe 5).

Les résultats de la première simulation effectuée en vue du calage seront présentés au niveau de chacune des trois branches principales du bassin, à l’aide des stations hydrologiques et barrages choisis comme points de contrôle (tab. 7).

2.1. La branche de l’Ouergha

Au niveau de cette branche, les deux stations hydrologiques de Bab Ouender et Ain Aicha montrent un hydrogramme simulé proche de celui observé, surtout pour le débit maximal (*Peak Flow*) (fig. 38 & 39). Au niveau de la station de Tabouda, l’allure générale de l’hydrogramme

observé a été reproduite par la simulation, mais on note beaucoup de différences en ce qui concerne les pics (fig. 40).

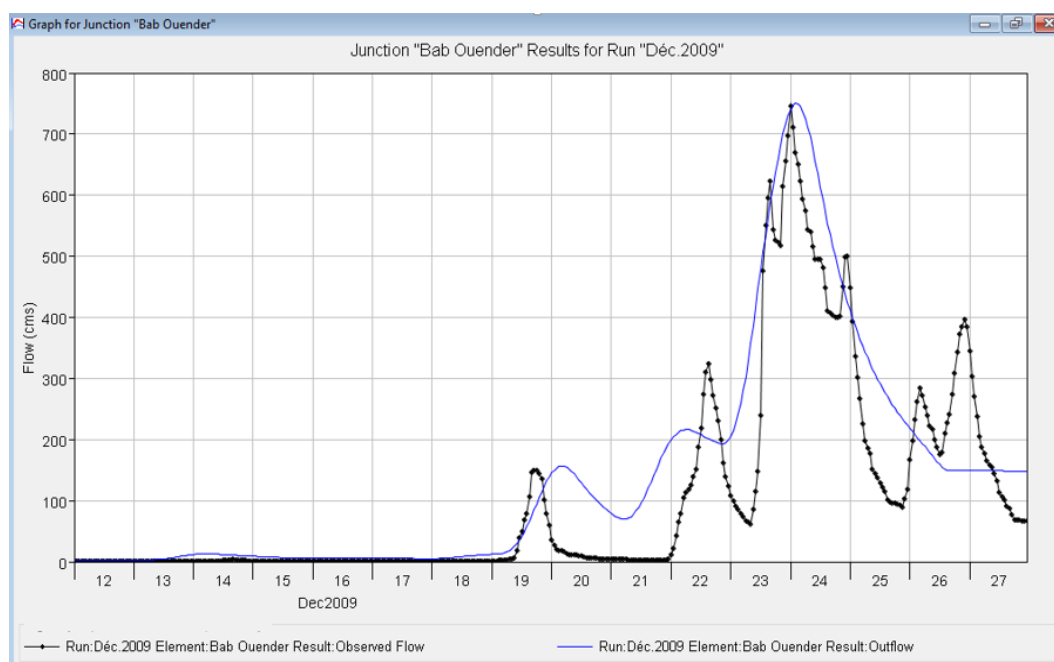


Figure 38. Hydrogrammes simulé (Outflow) et observé (Observed Flow) à la station Bab Ouender - Evènement Décembre 2009

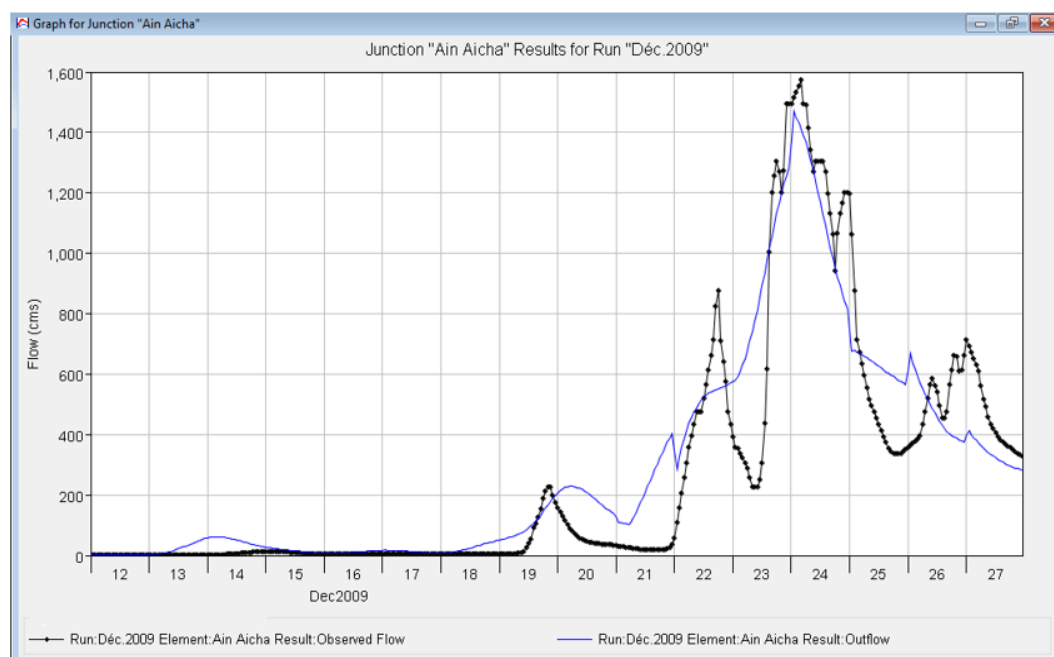


Figure 39. Hydrogrammes simulé et observé à la station Ain Aicha - Evènement Décembre 2009

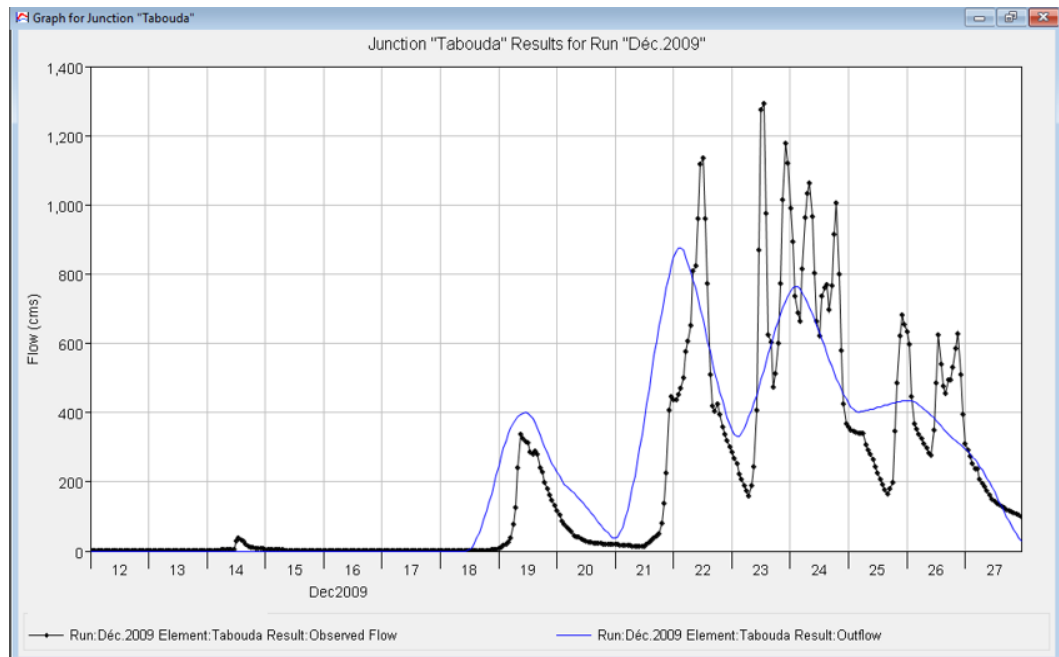


Figure 40. Hydrogrammes simulé et observé à la station Tabouda - Evènement Décembre 2009

Cependant, on observe une très bonne corrélation entre les deux hydrogrammes simulé et observé au niveau de la station de Khnichet (fig. 41), qui constitue un point de contrôle extrêmement important presque à l'exutoire du bassin de l'Ouergha.

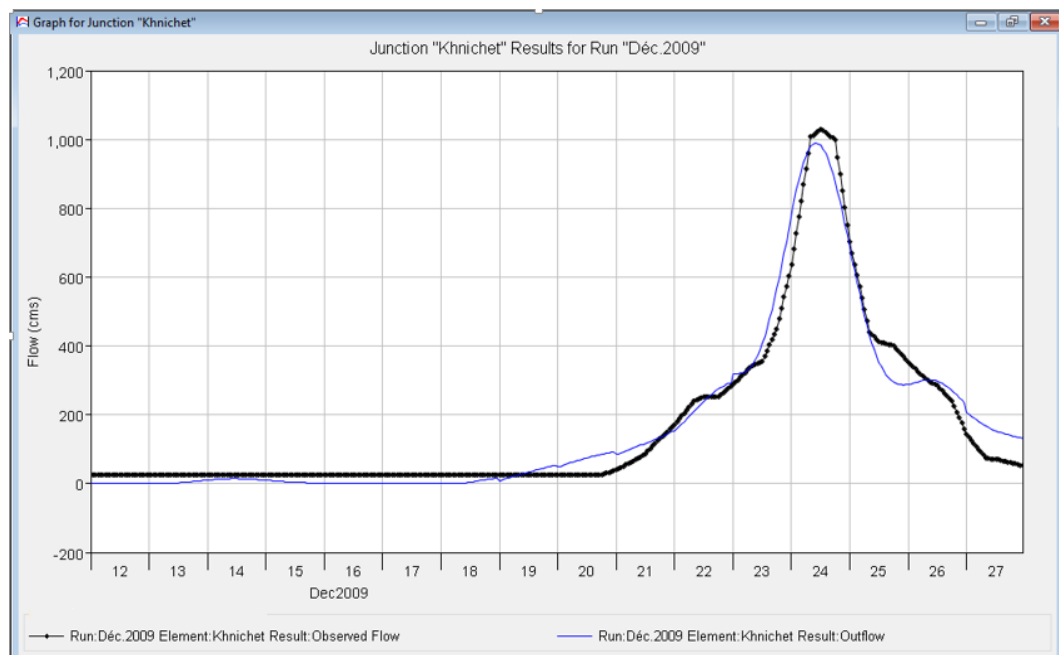


Figure 41. Hydrogrammes simulé et observé à la station Khnichet - Evènement Décembre 2009

Le tableau récapitulatif des résultats obtenus au niveau de cette station (tab.8) montre un coefficient de Nash-Sutcliffe de l'ordre de 95,9%, ce qui prouve une efficacité très élevée du modèle.

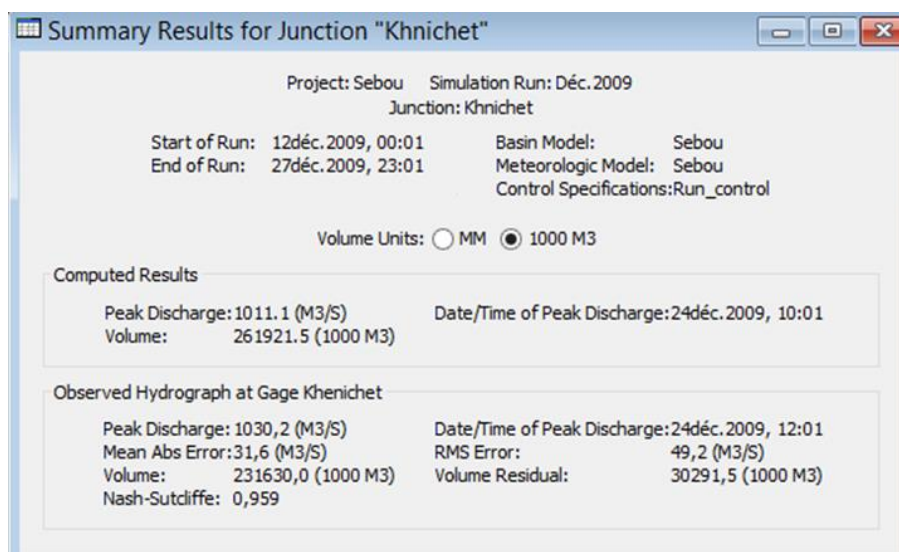


Tableau 8. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Khnichet - Evènement Décembre 2009

Après un ajustement manuel préliminaire, l'optimisation automatique a permis de raffiner encore plus les paramètres du modèle, ce qui a mené à améliorer sensiblement sa performance.

Le tableau 9 donne les valeurs initiales et celles optimisées pour les paramètres des éléments hydrologiques directement en amont de la station Khnichet (W1920 : sous-bassin de l'Ouergha en aval du barrage Al Wahda ; R1350 : le tronçon de l'oued Ouergha en aval du même barrage).

Optimized Parameter Results for Trial "Khnichet"

Project:Sebou Optimization Trial:Khnichet

Start of Trial: 12déc. 2009, 00:01 Basin Model: Sebou
End of Trial: 27déc. 2009, 23:01 Meteorologic Model:Sebou

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
W1920	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	11	11.938	0.08
W1920	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	31	33.231	-0.09
W1920	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	0.35	0.48959	0.11
W1920	Initial and Constant - Initial Loss	MM	146	145.20	-0.74
W1920	Simple Canopy - Initial Storage	%	0	0.0976741	0.00
W1920	Simple Canopy - Max Storage	MM	0.5	2.1804	-0.01
W1920	Simple Surface - Initial Storage	%	0	0.0433012	0.00
W1920	Simple Surface - Max Storage	MM	4	1.8635	0.01
R1350	Muskingum - K	HR	98	97.628	-0.16
R1350	Muskingum - x		0.1	0.27067	0.06

Tableau 9. Résultat de l'optimisation des paramètres au niveau de la station Khnichet

On note une légère « correction » pour l'ensemble des paramètres, par rapport aux valeurs proposées initialement suite aux calculs d'estimation et à l'ajustement manuel. La sensibilité de la fonction objective (*Objective Function Sensitivity*) très faible également pour l'ensemble des paramètres témoigne de la stabilité du modèle. Il convient de rappeler que cette sensibilité exprime le taux de changement en pourcentage de la fonction objective suite à un changement de 1% de la valeur du paramètre.

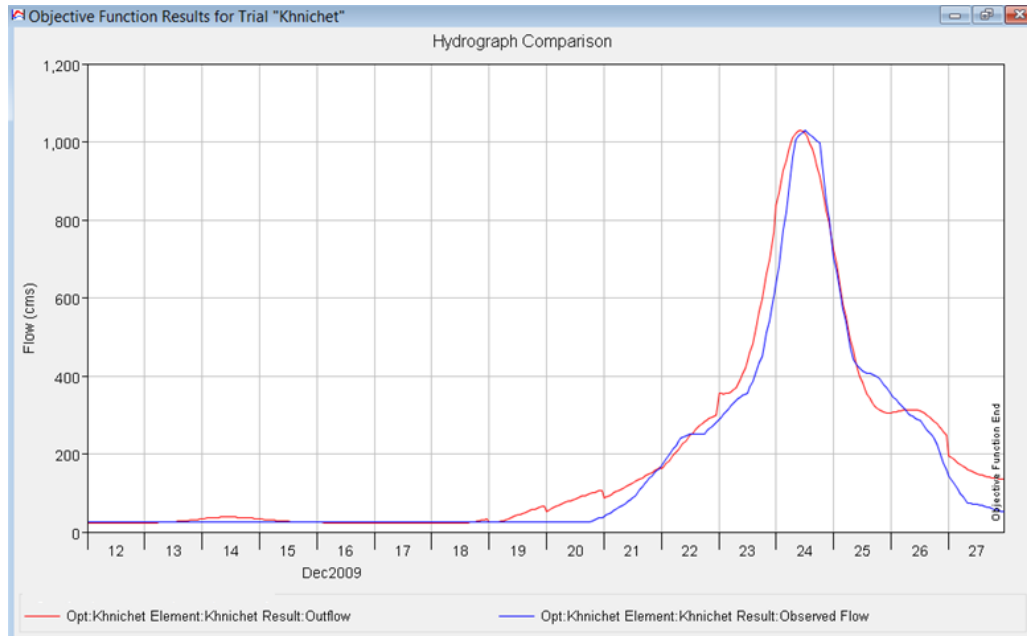


Figure 42. Comparaison des hydrogrammes optimisé (en rouge) et observé (en bleu) à la station Khnichet

La comparaison des deux hydrogrammes simulé et observé à la station Khnichet après optimisation, montre comme nous l'avons déjà signalé, une légère amélioration, notamment en matière de débit de pic (fig. 42). Les résultats de la fonction objective (tab.10) confirment ces remarques, puisque sa valeur, à l'issue des itérations de l'optimisation, diminue jusqu'à 0.76. La différence entre le pic observé et celui simulé est nulle (0%), avec décalage de temps de deux heures. Alors qu'on observe une légère surestimation en volume de l'ordre de 11,26%.

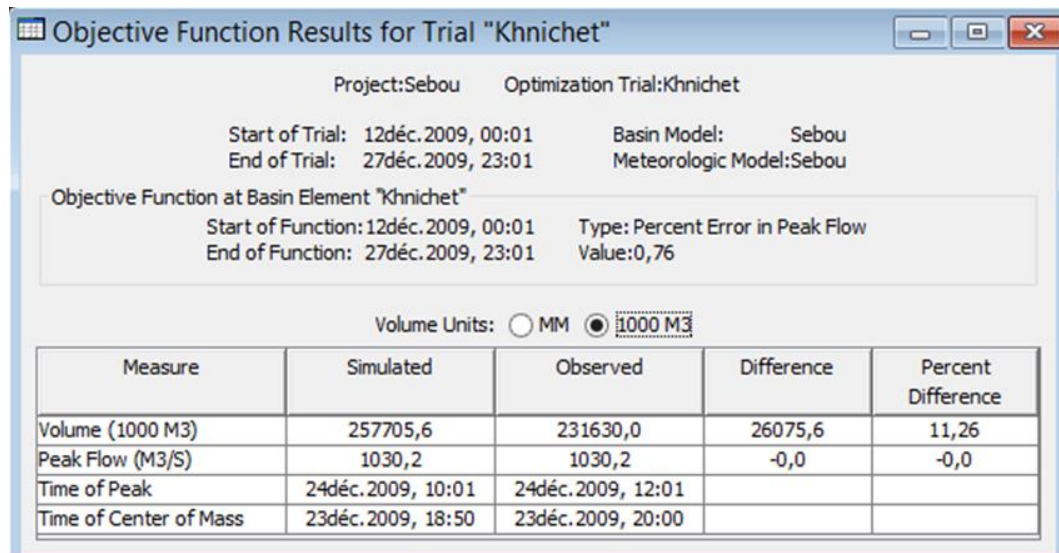


Tableau 10. Résultat de la fonction objective pour l'optimisation au niveau de la station

En ce qui concerne le stockage dans les réservoirs, les résultats de la gestion des apports, des sorties, en plus de l'évolution de la côte et du volume stocké, au cours de l'événement de décembre 2009, sont donnés par la figure 43 pour le barrage Al Wahda. Les résultats des trois autres grands barrages Asfalou, Sahla et Bouhouda se trouvent dans l'annexe 7.

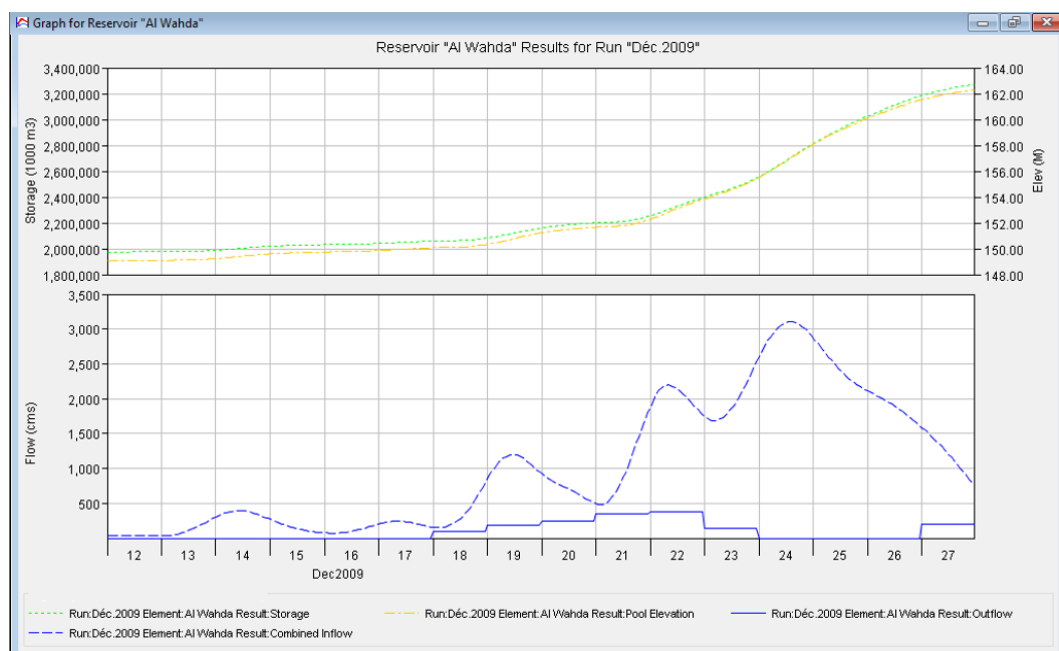


Figure 43. Résultats de la simulation de l'événement Décembre 2009 au niveau du barrage Al Wahda. En vert : l'évolution de la côte, en orange : l'évolution du volume stocké, en bleu discontinu : les apports, et en bleu continu : les sorties.

Le barrage Al Wahda présente la particularité d'être doté du réservoir le plus important à l'échelle nationale, avec une capacité qui s'élève à environ 3,7 milliards de mètres cubes. D'autre part, à l'échelle de la branche de l'Ouergha, il constitue le collecteur – régularisateur des eaux de la belle partie du bassin, dont celles issues des trois autres barrages.

La comparaison des apports et des sorties (fig.43) met en évidence le rôle capital du barrage dans le laminage de la crue lors de l'événement simulé, et par conséquent, dans la protection de la plaine du Gharb contre les inondations.

En effet, au moment où les apports au cours de l'évènement étudié ont enregistré un débit maximal (*peak Inflow*) de 3107.2 m³/s et un volume total (*Inflow Volume*) de 1,43 milliards m³, les sorties n'ont pas dépassé 378.4 m³/s en terme de pic (*peak Discharge*) et 0,13 milliards m³ en terme de volume (Tab.11). La différence en volume a été stockée dans le réservoir du barrage, ce qui explique l'augmentation de la cote et du stockage (fig.43).

Summary Results for Reservoir "Al Wahda"

Project: Sebou Simulation Run: Déc. 2009
Reservoir: Al Wahda

Start of Run: 12déc. 2009, 00:01 Basin Model: Sebou
End of Run: 27déc. 2009, 23:01 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: Run_control

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Inflow: 3107.2 (M3/S) Date/Time of Peak Inflow: 24déc. 2009, 14:01
Peak Discharge: 378.4 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 22déc. 2009, 00:01
Inflow Volume: 1430552.7 (1000 M3) Peak Storage: 3269221.3 (1000 M3)
Discharge Volume: 136184.2 (1000 M3) Peak Elevation: 162.3 (M)

Observed Hydrograph at Gage barrage Al Wahda

Peak Discharge: 378,4 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 22déc. 2009, 00:01
Mean Abs Error: 0,0 (M3/S) RMS Error: 0,0 (M3/S)
Volume: 136184,2 (1000 M3) Volume Residual: 0,0 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 1,000

Tableau 11. Tableau récapitulant les principaux résultats pour le barrage Al Wahda - Evènement Décembre 2009

2.2. La branche du Beht

Les résultats de la simulation de l'événement Décembre 2009 pour les deux principaux cours d'eau Beht et Rdom ont été satisfaisants. Le modèle a pu reproduire les hydrogrammes observés avec un taux d'erreur acceptable.

Ainsi, l'analyse graphique des résultats obtenus au niveau des deux stations Souk El Had et Oueljet Soltane (fig.44&45) montre que les hydrogrammes simulés et observés ont généralement la même allure.

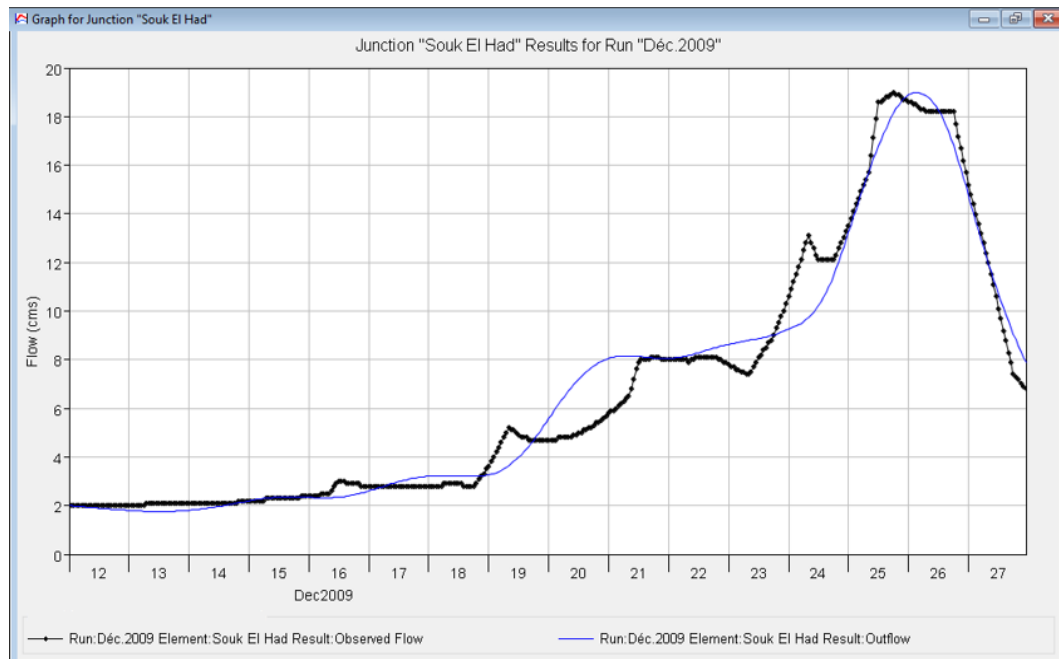


Figure 44. Hydrogramme simulé et observé à la station Souk El Had - Evènement Décembre 2009

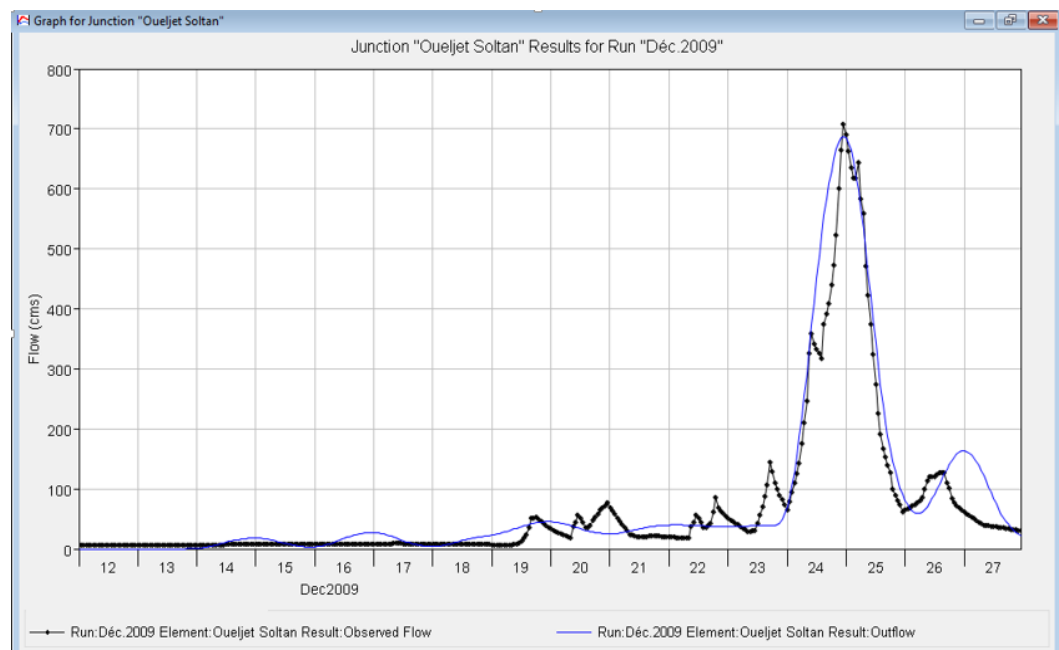


Figure 45. Hydrogramme simulé vs observé à la station Oueljet Soltane - Evènement Décembre 2009

Le coefficient de Nash Sutcliffe est de l'ordre de 96,9 et 90,6% pour la station de Souk El Had et Oueljet Soltane respectivement, témoignant d'une efficacité très satisfaisante du modèle (tab.12&13). Ceci se traduit par des valeurs simulés et observés très proches en matière de débit de pointe et de volume :

- Pour la station Souk El Had, les valeurs simulées et observées de débit de pointe et de volume sont sensiblement les mêmes, 9,3 millions m³ et 19 m³/s respectivement. Et on note un décalage de temps de 9 heures.
- Pour la station Oueljet Soltane, on trouve un volume simulé de 105,7 contre 90,8 millions m³ observé, et un débit de pointe simulé de 687,7 contre 707,7 m³/s observé.

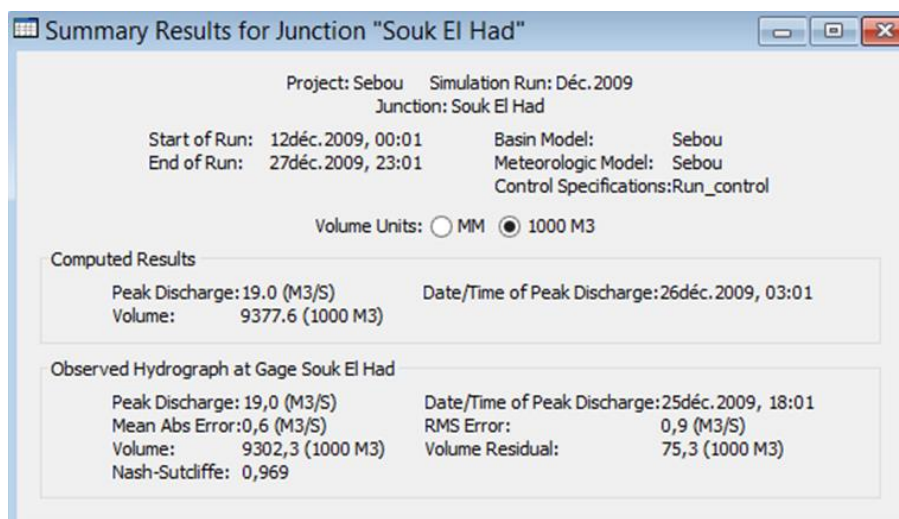


Tableau 12. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Souk El Had - Evènement Décembre 2009

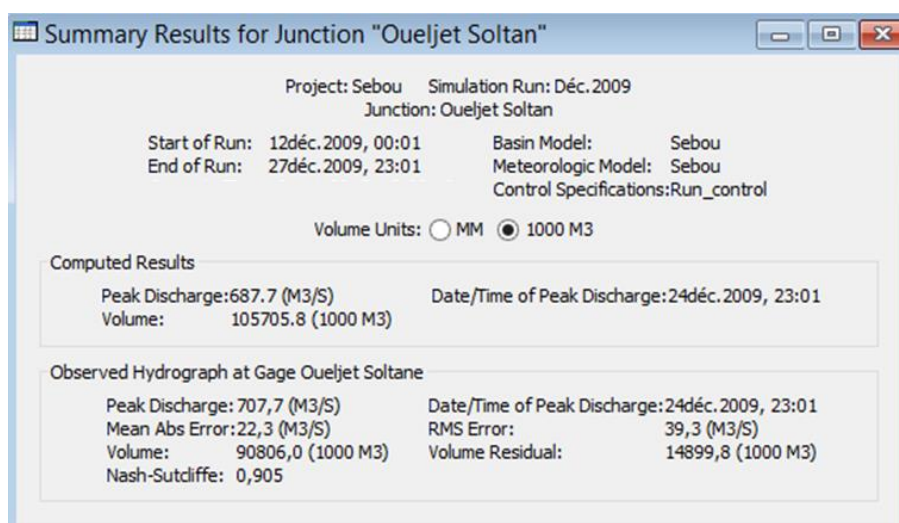


Tableau 13. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Oueljet Soltane - Evènement Décembre 2009

Les résultats de l'optimisation automatique pour les deux stations Souk El Had et Oueljet Soltane sont donnés par les figures 46-47 et les tableaux 14-15-16-17.

Les tableaux 14-15 permettent de comparer les valeurs initiales et optimisées des différents paramètres. La sensibilité de la fonction objective montre que le modèle est stable pour tous les

paramètres sauf *Simple Canopy - Max Storage* (la lame maximale intercepté par le couvert végétal) à la station Souk El Had, et *Clark Unit Hydrograph- Storage Coefficient* (le coefficient de stockage exercé par le bassin). Ces deux paramètres montrent une sensibilité élevée.

Project:Sebou Optimization Trial:Souk El Had

Start of Trial: 12déc.2009, 00:00 Basin Model: Sebou
End of Trial: 27déc.2009, 23:00 Meteorologic Model:Sebou

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
W980	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	30	29.959	-1.94
W980	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	56	55.986	-1.61
W980	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	0.356	0.35618	0.74
W980	Initial and Constant - Initial Loss	MM	114	114.01	-1.10
W980	Simple Canopy - Max Storage	MM	0.1	0.11956	102.85
W980	Simple Surface - Max Storage	MM	0.3	0.29172	1.20

Tableau 14. Résultat de l'optimisation des paramètres au niveau de la station Souk El Had

Project:Sebou Optimization Trial:OUELJET SOLTANE

Start of Trial: 12déc.2009, 00:01 Basin Model: Sebou
End of Trial: 27déc.2009, 23:01 Meteorologic Model:Sebou

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
W1090	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	8	7.9331	54.21
W1090	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	19	19.238	2.08
W1090	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	0.46	0.43204	0.74
W1090	Initial and Constant - Initial Loss	MM	148	148.09	0.00
W1090	Simple Canopy - Max Storage	MM	0.5	0.74666	2.95
W1090	Simple Surface - Max Storage	MM	1	1.0914	3.53

Tableau 15. Résultat de l'optimisation des paramètres au niveau de la station Oueljet Soltane

Le calcul basé sur les paramètres optimisés en utilisant la fonction objective *Percent Error Peak* a apporté une légère amélioration du débit de pointe pour la station Oueljet Soltane (fig.47). La valeur du pic a augmenté de 687,7 à 707,7 m³/s pour correspondre exactement à la valeur observée (tab.13&17).

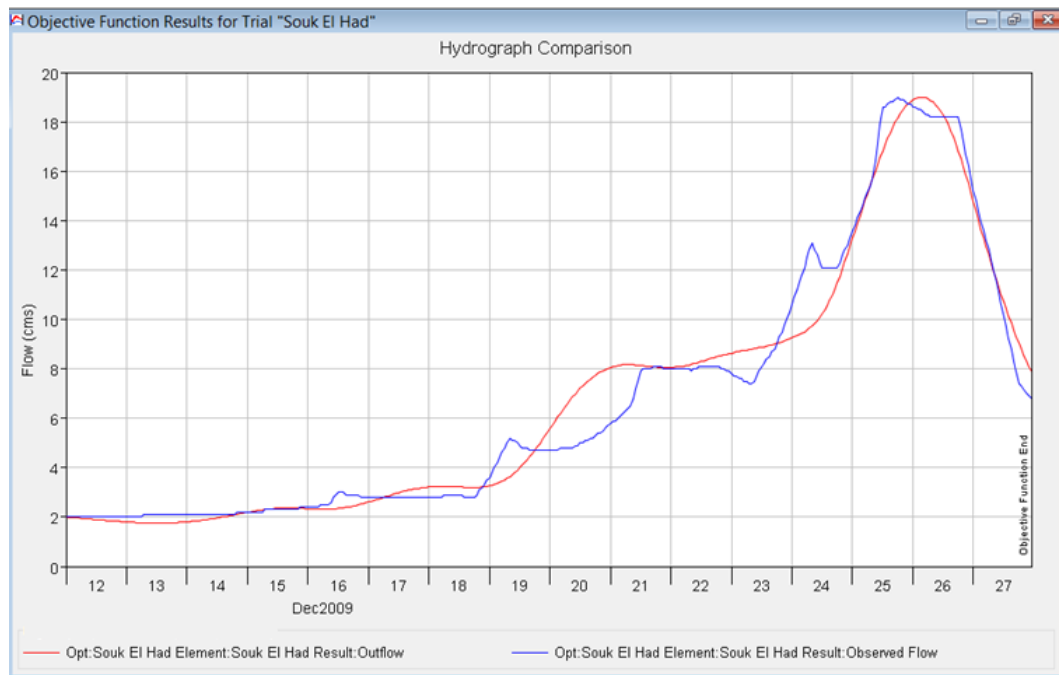


Figure 46. Comparaison des hydrogrammes optimisé (en rouge) et observé (en bleu) à la station Souk El Had

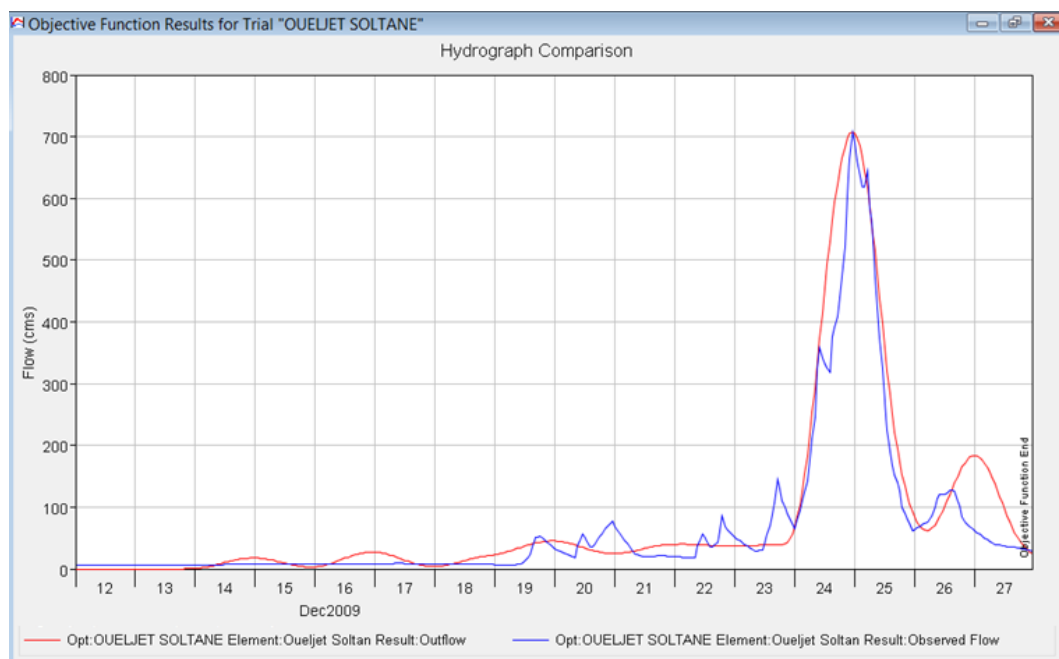


Figure 47. Comparaison des hydrogrammes optimisé (en rouge) et observé (en bleu) à la station Oueljet Soltane

Le résultat final est donc très satisfaisant, puisque la simulation présente une erreur nulle en débit de pointe pour les deux stations, et une erreur de 0,8% et 20,33% en volume total respectivement au niveau de la station Souk El Had et Oueljet Soltane (tab.16&17).

Objective Function Results for Trial "Souk El Had"

Project:Sebou Optimization Trial:Souk El Had

Start of Trial: 12déc.2009, 00:00 Basin Model: Sebou
End of Trial: 27déc.2009, 23:00 Meteorologic Model:Sebou

Objective Function at Basin Element "Souk El Had"

Start of Function: 12déc.2009, 00:00 Type: Percent Error in Peak Flow
End of Function: 27déc.2009, 23:00 Value:0,00

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (1000 M3)	9378,7	9302,0	76,7	0,82
Peak Flow (M3/S)	19,0	19,0	-0,0	-0,0
Time of Peak	26déc.2009, 03:00	25déc.2009, 18:00		
Time of Center of Mass	23déc.2009, 01:19	23déc.2009, 01:39		

Tableau 16. Résultat de la fonction objective pour l'optimisation au niveau de la station Souk EL Had

Objective Function Results for Trial "OUELJET SOLTANE"

Project:Sebou Optimization Trial:OUELJET SOLTANE

Start of Trial: 12déc.2009, 00:01 Basin Model: Sebou
End of Trial: 27déc.2009, 23:01 Meteorologic Model:Sebou

Objective Function at Basin Element "Oueljet Soltan"

Start of Function: 12déc.2009, 00:01 Type: Percent Error in Peak Flow
End of Function: 27déc.2009, 23:01 Value:0,01

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (1000 M3)	109262,6	90806,0	18456,5	20,33
Peak Flow (M3/S)	707,7	707,7	-0,0	-0,0
Time of Peak	24déc.2009, 23:01	24déc.2009, 23:01		
Time of Center of Mass	24déc.2009, 09:37	24déc.2009, 05:03		

Tableau 17. Résultat de la fonction objective pour l'optimisation au niveau de la station Oueljet Soltane

Du point de vue stockage, l'analyse des résultats de la simulation (fig.48 et tab.18) montre qu'au moment où les apports du barrage Kansera au cours de l'événement, ont atteint un volume total de 199,99 millions m3 avec un débit de pointe de 547,4 m3/s, les sorties n'ont pas dépassé 33,94 millions m3 en terme de volume et 56,5 m3/s en terme de pointe. La différence en volume a été stockée dans la retenue du barrage, ce qui explique la hausse de la côte et du stockage observée dans la figure 48.

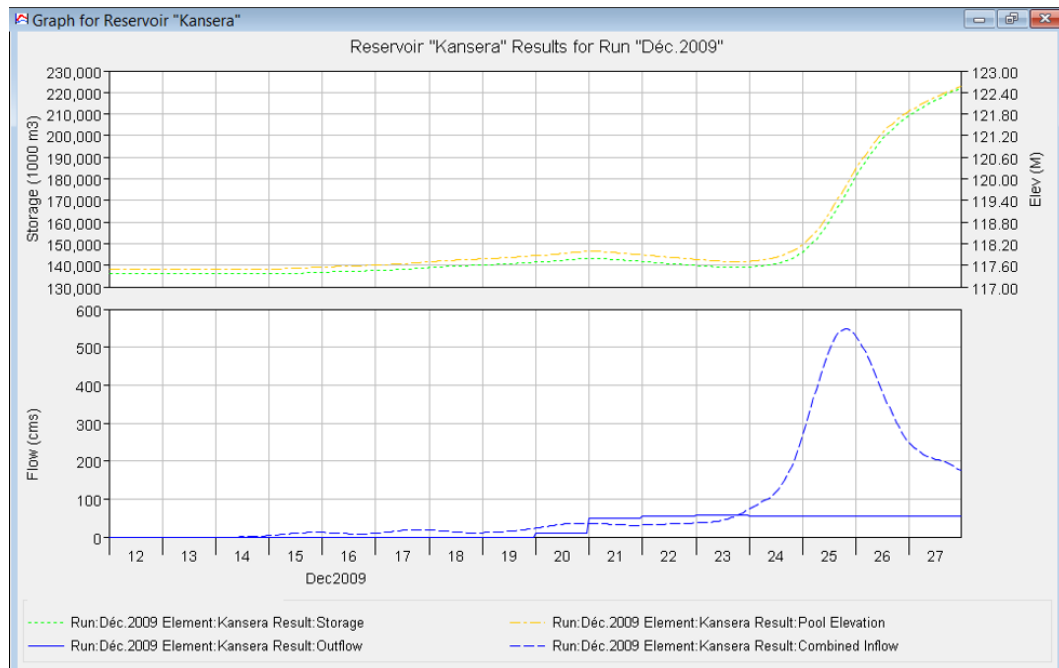


Figure 48. Résultats de la simulation de l'événement Décembre 2009 au niveau du barrage Kansera

Summary Results for Reservoir "Kansera"

Project: Sebou Simulation Run: Déc. 2009
Reservoir: Kansera

Start of Run: 12déc. 2009, 00:01 Basin Model: Sebou
End of Run: 27déc. 2009, 23:01 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: Run_control

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Inflow:	547.4 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	25déc. 2009, 19:01
Peak Discharge:	56.5 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	23déc. 2009, 00:01
Inflow Volume:	119992.4 (1000 M3)	Peak Storage:	221969.1 (1000 M3)
Discharge Volume:	33941.3 (1000 M3)	Peak Elevation:	122.6 (M)

Tableau 18. Tableau récapitulatif des principaux résultats pour le barrage Kansera - Evènement Décembre 2009

Ces résultats révèlent le rôle important du barrage Kansera dans le laminage de la crue de décembre 2009, et par conséquent, dans la protection de la plaine du Gharb contre les inondations.

2.3. La branche principale du Sebou

Comme dans la branche de l'Ouergha, l'analyse des résultats montrent que les hydrogrammes simulés se corrélaient généralement avec ceux observés avec un taux d'erreur acceptable. Et on note une amélioration remarquable en aval, au niveau de la station Azib Soltane.

Ainsi, au niveau des stations hydrologiques Pont du Mdez, Azzaba et Dar El Arsa (fig.49, fig.50, fig.51), nous avons obtenu des hydrogrammes simulés qui reproduisent l'allure générale de ceux observés, mais on note beaucoup de différences en ce qui concerne les pointes de débits.

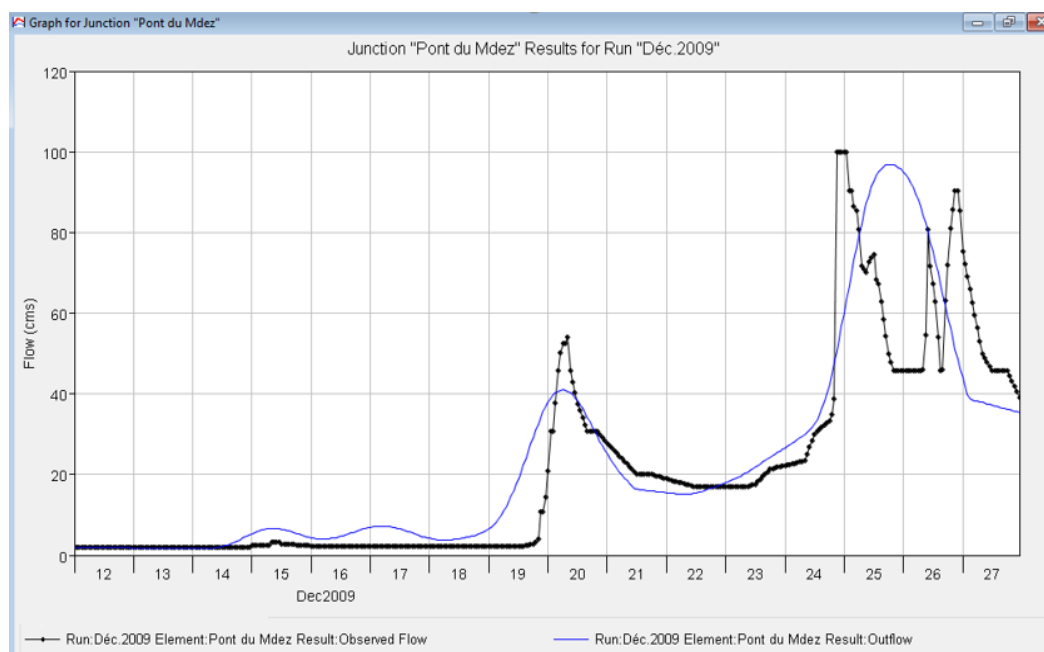


Figure 49. Hydrogrammes simulé et observé à la station Pont du Mdez - Evènement Décembre 2009

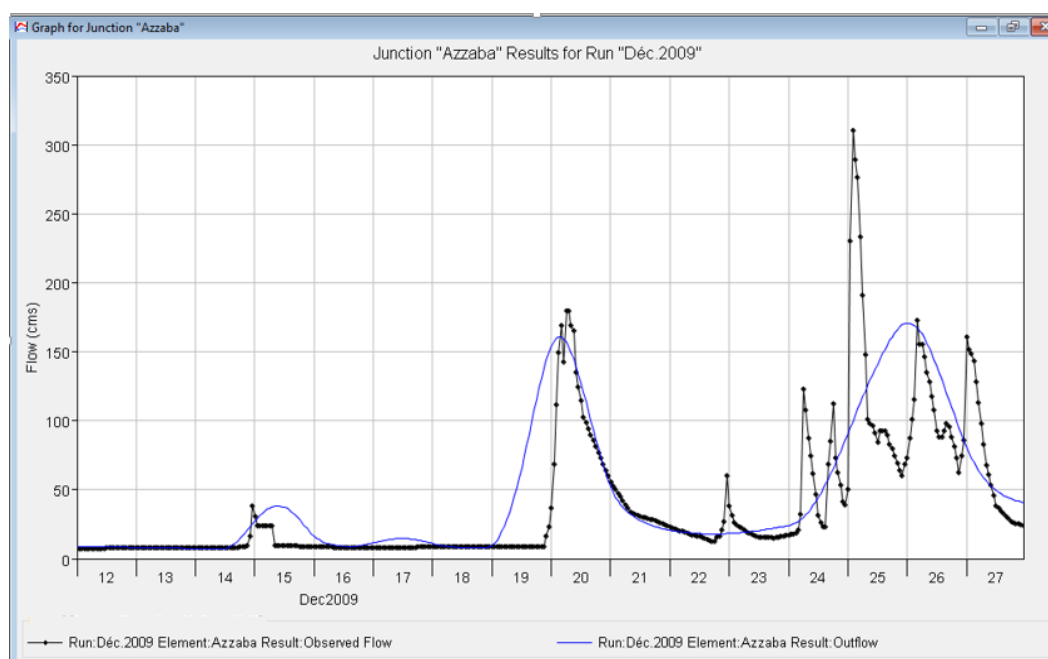


Figure 50. Hydrogrammes simulé et observé à la station Azzaba - Evènement Décembre 2009

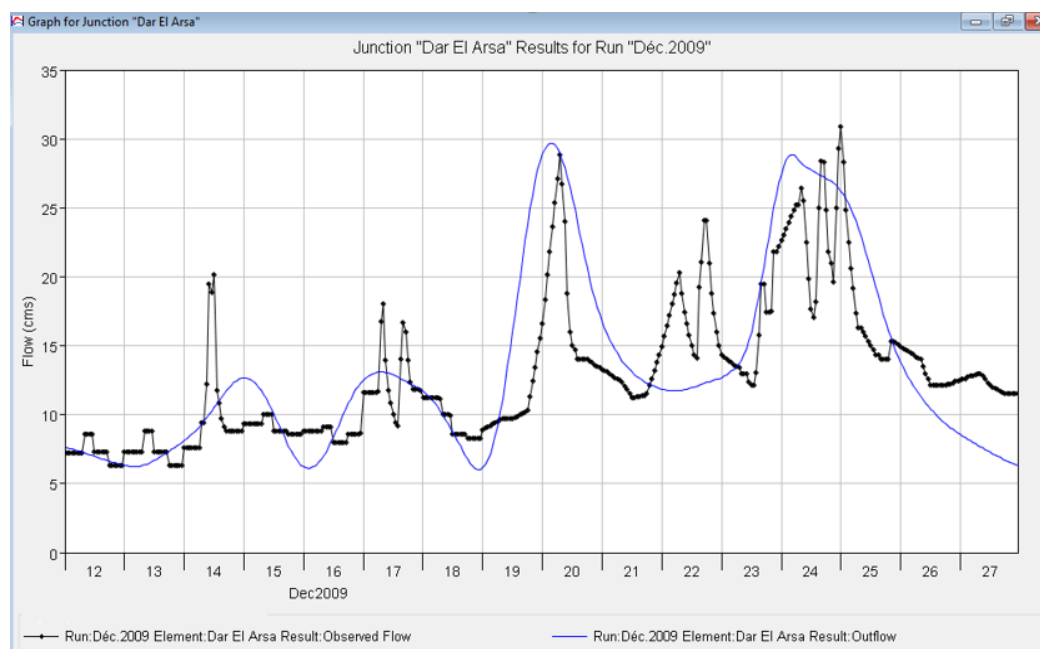


Figure 51. Hydrogrammes simulé et observé à la station Dar El Arsa - Evènement Décembre 2009

Cependant, on observe une très bonne corrélation entre les deux hydrogrammes simulé et observé au niveau de la station d’Azib Soltane (fig. 52), ce qui prouve que la simulation a été très satisfaisante à ce point-là.

Situé en aval de la branche, avant la confluence du Sebou avec l’Ouergha, la station Azib Soltane est dotée d’une importance capitale puisqu’elle contrôle l’apport de la quasi-totalité de cette branche.

Du point de vue graphique, les deux hydrogrammes simulé et observé (fig.52) présentent une grande corrélation. Ils sont presque superposés pour la plupart du temps au cours de l’évènement, et on note une coïncidence parfaite des deux pointes calculée et observée.

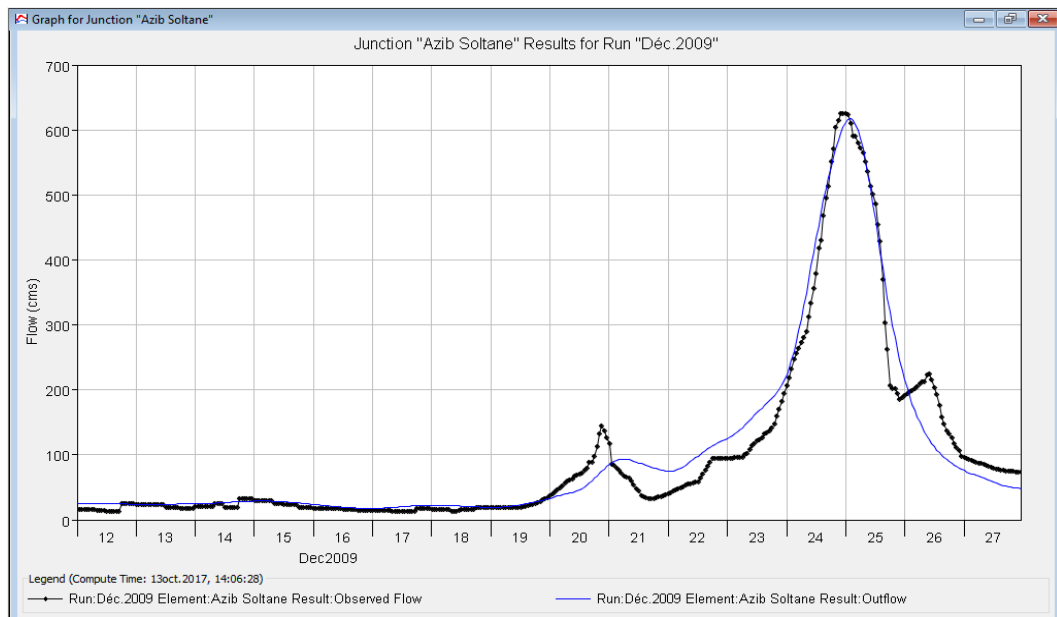


Figure 52. Hydrogrammes simulé et observé à la station Azib Soltane - Evènement Décembre 2009

En plus de la corrélation graphique, les chiffres du tableau récapitulatif des résultats obtenus au niveau de cette station (tab.19) montrent que l'efficacité du modèle est très satisfaisante, puisque le coefficient de Nash-Sutcliffe atteint 96,3%.

Summary Results for Junction "Azib Soltane"

Project: Sebou Simulation Run: Déc. 2009
Junction: Azib Soltane

Start of Run: 12déc. 2009, 00:01 Basin Model: Sebou
End of Run: 27déc. 2009, 23:01 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: Run_control

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 622.4 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 24déc. 2009, 23:01
Volume: 134263.6 (1000 M3)

Observed Hydrograph at Gage Azib Soltane

Peak Discharge: 624,6 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 24déc. 2009, 22:01
Mean Abs Error: 16,7 (M3/S) RMS Error: 26,9 (M3/S)
Volume: 134993,8 (1000 M3) Volume Residual: -730,2 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 0,963

Tableau 19. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Azib Soltane - Evènement Décembre 2009

En ce qui concerne l'optimisation automatique, les calculs ont abouti à améliorer performance du modèle. Nous nous limitons ici à la présentation des résultats relatifs à la station Azib Soltane.

En effet, le tableau 20 donne les valeurs initiales et celles optimisées pour quelques paramètres des éléments hydrologiques importants en amont de la station Azib Soltane, mais en aval des autres points de contrôle : Dar El Arsa, Idriss 1^{er} et Sidi Chahed.

Optimized Parameter Results for Trial "Azib Soltane"					
Project:Sebou		Optimization Trial:Azib Soltane			
Start of Trial: 12déc.2009, 00:01		Basin Model: Sebou			
End of Trial: 27déc.2009, 23:01		Meteorologic Model:Sebou			
Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
W1580	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	15	15.143	0.07
W1580	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	19	19.187	-1.77
W1580	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	7	7.1216	0.00
W1580	Initial and Constant - Initial Loss	MM	110	110.14	0.00
R1590	Muskingum - K	HR	2	2.0281	-8.96
R270	Muskingum - K	HR	8	7.9537	-0.03
W1630	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	8	8.0142	0
W1630	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	7	7.1054	0
W1630	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	2	2.0958	-1.40
W1630	Initial and Constant - Initial Loss	MM	55	55.152	-12.93
R1650	Muskingum - K	HR	8	8.0120	-0.09
W810	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	5	4.9251	-0.11
W810	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	32	31.978	0
W810	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	1.4	1.0382	0
W810	Initial and Constant - Initial Loss	MM	160	159.99	-1.40
R290	Muskingum - K	HR	2	2.0638	9.52
R300	Muskingum - K	HR	7.5	7.7069	-9.29

Tableau 20. Résultat de l'optimisation des paramètres au niveau de la station Azib Soltane

Les valeurs optimisées sont proches de celles proposées initialement, ce qui témoigne d'une bonne estimation préalable. La sensibilité de la fonction objective est très faible pratiquement pour l'ensemble des paramètres ce qui prouve la stabilité du modèle.

L'hydrogramme simulé en se basant sur les paramètres optimisés est donné par la figure 53. La comparaison des deux hydrogramme simulé et observé à la station Azib Soltane après optimisation montre une légère amélioration de la valeur du débit de pointe.

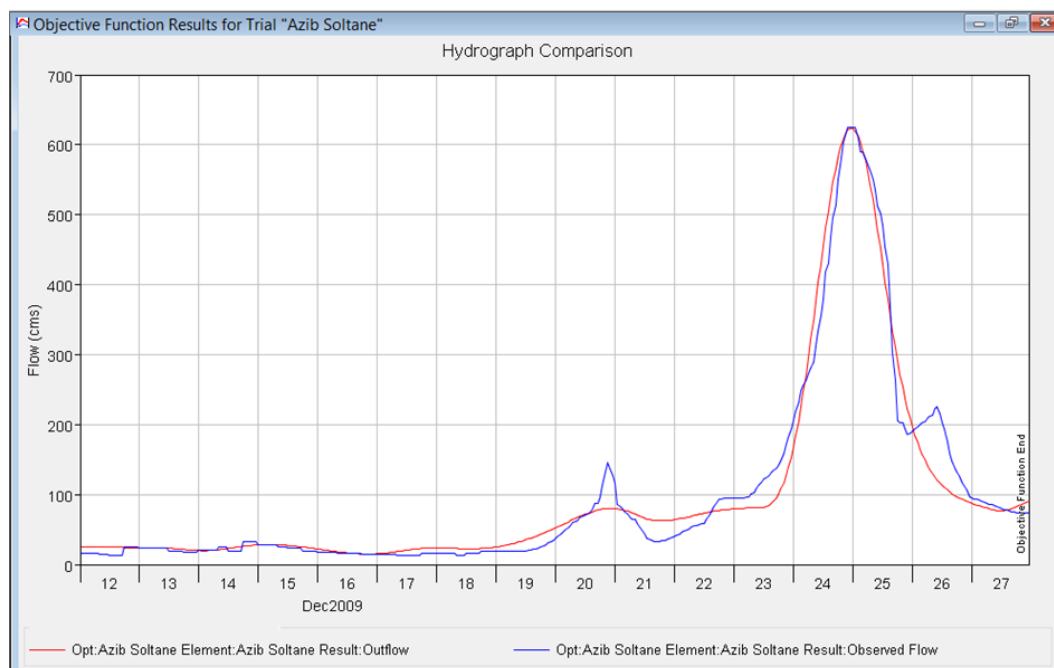


Figure 53. Comparaison des hydrogrammes optimisé (en rouge) et observé (en bleu) à la station Azib Soltane

Ainsi, les résultats de l'optimisation (tab.21) montrent que la différence entre l'hydrogramme observé et celui simulé ne dépasse pas 0.1% pour le pic, et 1.37% pour le volume. Le décalage de temps entre les deux pics est de deux heures.

Objective Function Results for Trial "Azib Soltane"

Project:Sebou Optimization Trial:Azib Soltane

Start of Trial: 12déc.2009, 00:01 Basin Model: Sebou
End of Trial: 27déc.2009, 23:01 Meteorologic Model:Sebou

Objective Function at Basin Element "Azib Soltane"

Start of Function: 12déc.2009, 00:01 Type: Percent Error in Peak Flow
End of Function: 27déc.2009, 23:01 Value: 126470,01

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (1000 M3)	133150,8	134993,8	-1843,0	-1,37
Peak Flow (M3/S)	623,7	624,6	-0,9	-0,1
Time of Peak	25déc.2009, 00:01	24déc.2009, 22:01		
Time of Center of Mass	23déc.2009, 13:16	23déc.2009, 19:32		

Tableau 21. Résultat de la fonction objective pour l'optimisation au niveau de la station Azib Soltane

Le réseau hydrographique de cette branche est régularisé actuellement par 4 grands barrages. Le plus important est Idriss 1^{er} sur l'Inaouene, doté d'une retenue d'environ 1,1 milliards m3

de capacité, et dont les résultats de la simulation seront présentés ici. Les résultats relatifs aux autres barrages figurent dans l'annexe 7.

La figure 54 et le tableau 22 donnent les résultats de la simulation de l'évènement décembre 2009 au niveau du barrage Idriss 1^{er}.

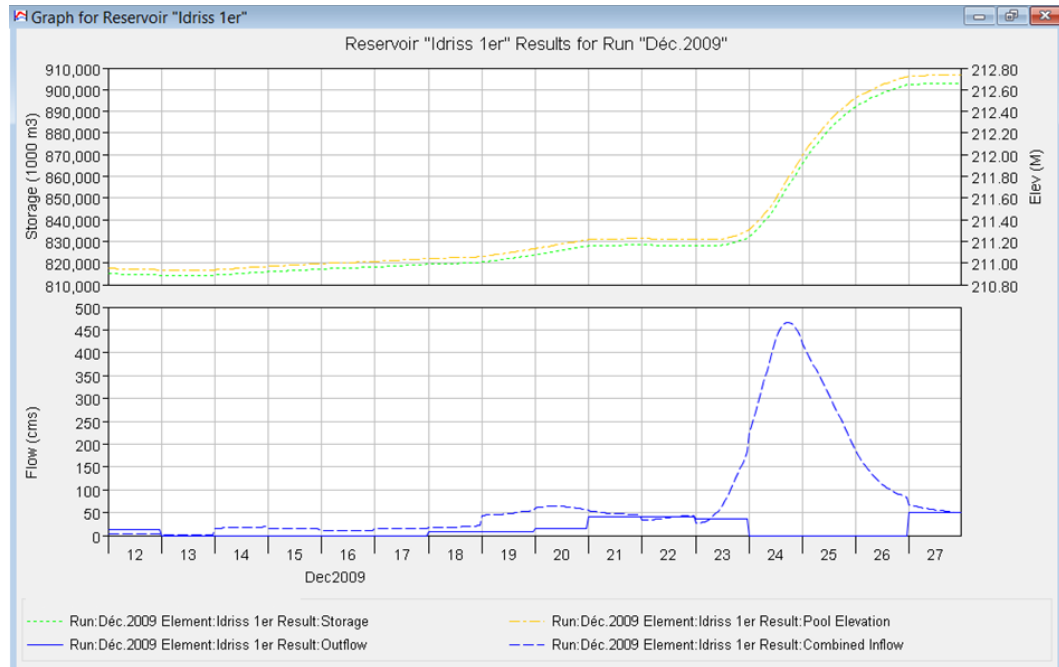


Figure 54. Résultats de la simulation de l'évènement Décembre 2009 au niveau du barrage Idriss 1er.

La comparaison des apports et des sorties révèle, encore une fois, le rôle joué par le barrage dans le laminage de la crue lors de l'évènement simulé, et par conséquent, dans la protection contre les inondations.

En effet, les apports au cours de l'évènement ont enregistré un débit maximal de 466,4 m³/s et un volume total de 106 millions m³, alors que les sorties n'ont pas dépassé 50,5 m³/s en terme de pic et 18 millions m³ en terme de volume (Tab.22). La différence en volume a été stockée dans le réservoir du barrage, ce qui explique l'évolution de la côte et du stockage (fig.54).

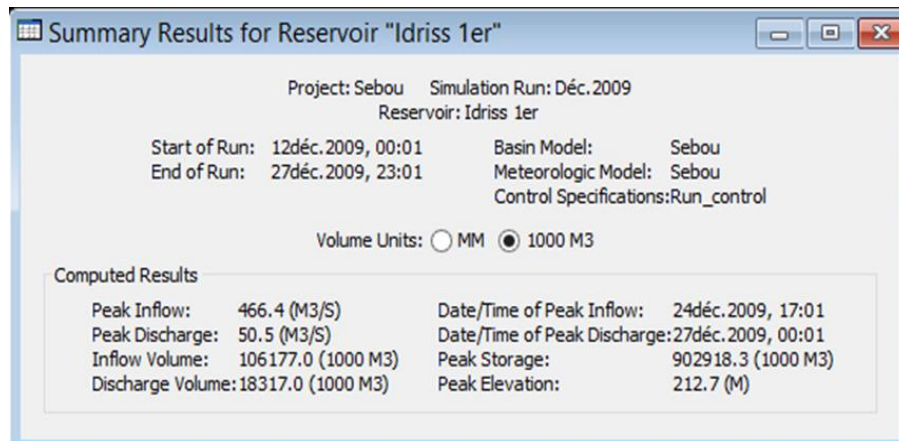


Tableau 22. Tableau récapitulant les principaux résultats pour le barrage Idriss 1^{er} - Evènement Décembre 2009

2.4. La station de Belksiri

Située en aval de la confluence du Sebou avec l'Ouergha, la station hydrologique Belksiri est d'une importance capitale pour l'étude des crues à l'échelle du bassin de Sebou. Elle contrôle les eaux provenant des deux branches Sebou et Ouergha en plus du bassin Rdat, permettant ainsi de mesurer le volume de la crue et son débit de pointe à l'entrée de la plaine du Gharb.

Les résultats de la simulation de l'évènement de décembre 2009 au niveau de cette station ont été très satisfaisants. Le modèle a reproduit l'hydrogramme observé avec une erreur négligeable en débit de pointe et très faible en volume.

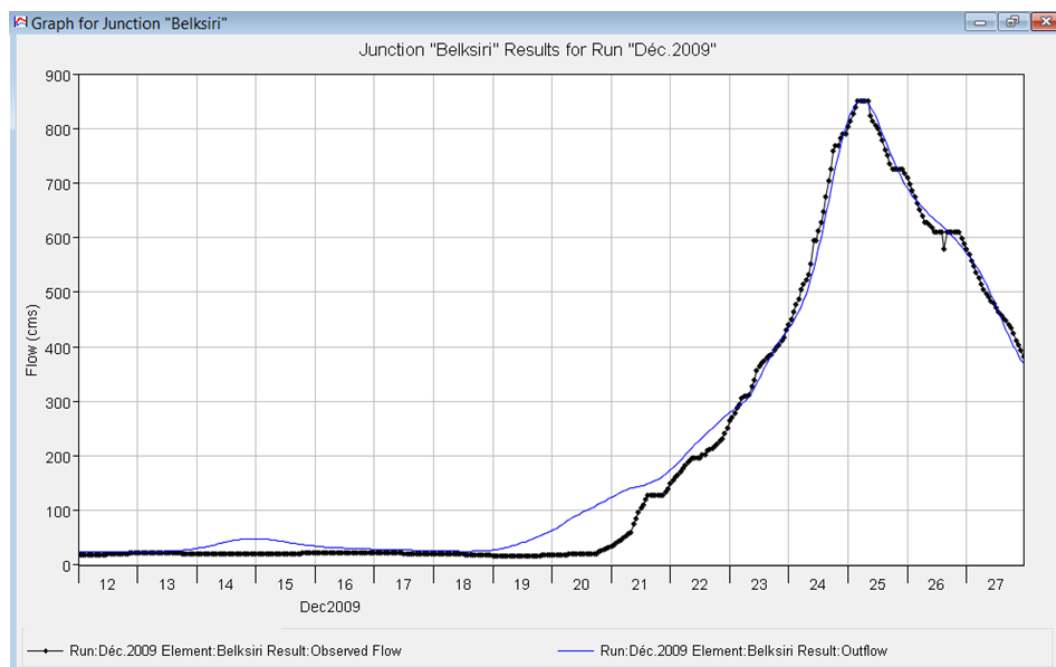


Figure 55. Hydrogrammes simulé et observé à la station Belksiri - Evènement Décembre 2009

Ainsi, l'analyse de la figure 55 montre que les deux hydrogrammes simulé et observé sont très corrélables. Le critère de Nash-Sutcliffe (tab.23) est de 98,8% témoignant d'une efficacité très élevée du modèle.

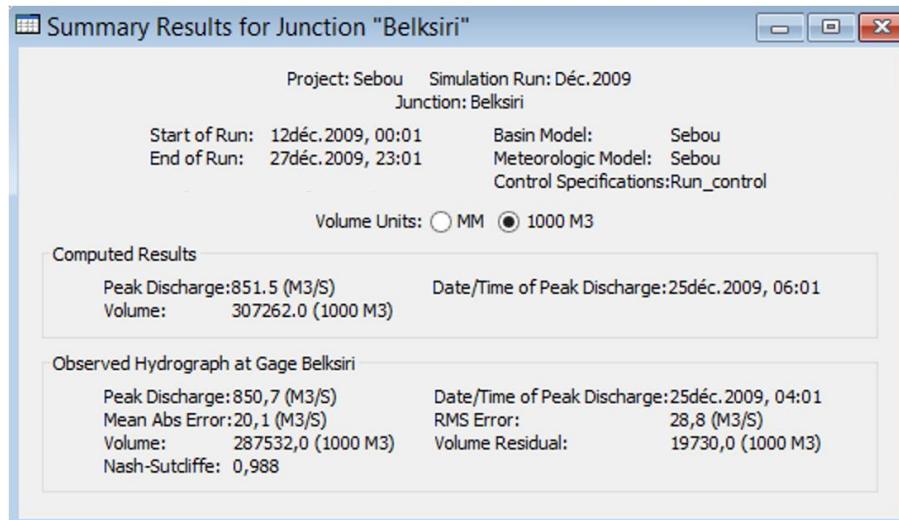


Tableau 23. Tableau récapitulatif des principaux résultats pour la station Belksiri - Evènement Décembre 2009

L'optimisation des paramètres au niveau de la station Belksiri a donné les résultats récapitulés dans le tableau 24. On note sensibilité très faible pour l'ensemble des paramètres, ce qui indique la stabilité du modèle.

Optimized Parameter Results for Trial "Belksiri"					
		Project: Sebou Optimization Trial: Belksiri			
		Start of Trial: 12déc. 2009, 00:01	Basin Model: Sebou		
		End of Trial: 27déc. 2009, 23:01	Meteorologic Model: Sebou		
Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
W740	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	44	44.204	-3.60
W740	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	18	12.000	10.17
W740	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	0.8	0.79592	-1.90
W740	Initial and Constant - Initial Loss	MM	200	200.00	1.04
W1570	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	53	53.000	-0.67
W1570	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	23	23.000	-2.83
W1570	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	0.3	0.30000	-0.55
W1570	Initial and Constant - Initial Loss	MM	23	23.000	0.00
R1450	Muskingum - K	HR	7.5	7.5000	0.64
Reach-1	Muskingum - K	HR	4	4.0000	0.84
R180	Muskingum - K	HR	3	3.0000	0.35
R240	Muskingum - K	HR	50	50.000	-0.75
R100	Muskingum - K	HR	3	3.0000	-2.50
R110	Muskingum - K	HR	1	1.00000	-9.03
R160	Muskingum - K	HR	5	5.0000	4.68

Tableau 24. Résultat de l'optimisation des paramètres au niveau de la station Belksiri

L'hydrogramme calculé à base des paramètres optimisés (fig.56) présente presque la même allure que celui simulé précédemment (fig.55).

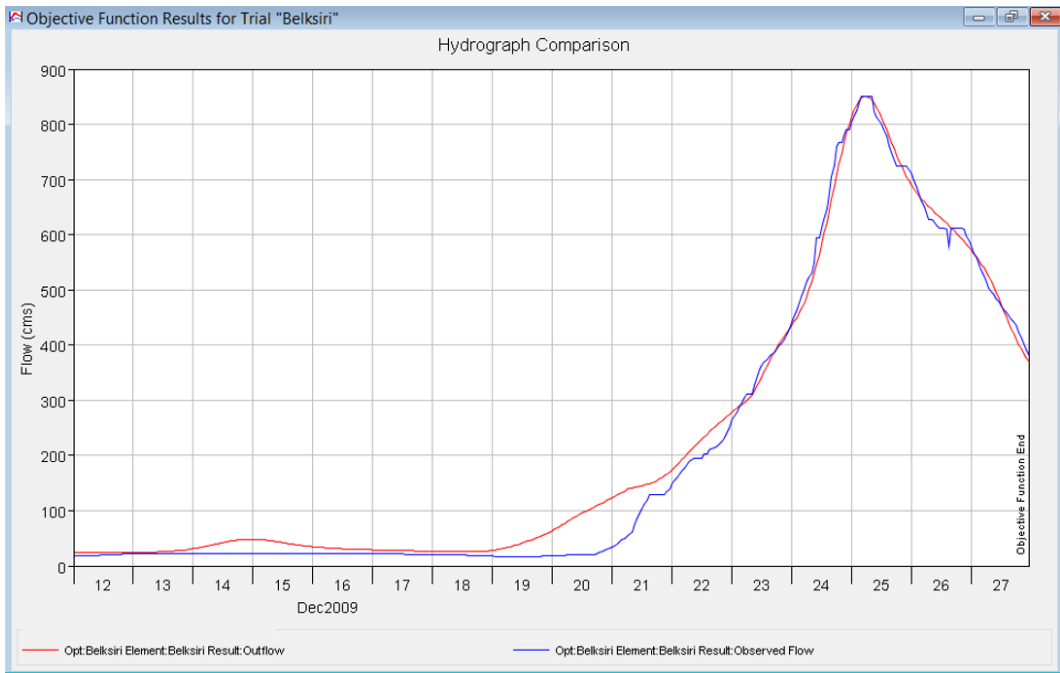


Figure 56. Comparaison des hydrogrammes optimisé et observé à la station Khnichet

Les résultats de la fonction objective (tab.25) affirment que l'optimisation a légèrement augmenté le pic pour coïncider exactement avec celui observé, la différence est donc de 0%. Alors que le volume total reste toujours légèrement surestimé avec un taux de 6,88%. Le décalage de temps entre les deux pics est de deux heures.

Objective Function Results for Trial "Belksiri"

Project:Sebou Optimization Trial:Belksiri

Start of Trial: 12déc.2009, 00:01 Basin Model: Sebou
End of Trial: 27déc.2009, 23:01 Meteorologic Model:Sebou

Objective Function at Basin Element "Belksiri"

Start of Function: 12déc.2009, 00:01 Type: Percent Error in Peak Flow
End of Function: 27déc.2009, 23:01 Value:0,00

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (1000 M3)	307311,2	287532,0	19779,2	6,88
Peak Flow (M3/S)	850,7	850,7	0,0	0,0
Time of Peak	25déc.2009, 06:01	25déc.2009, 04:01		
Time of Center of Mass	24déc.2009, 09:29	24déc.2009, 18:25		

Tableau 25. Résultat de la fonction objective au niveau de la station Belksiri

3. Validation du modèle hydrologique

L'événement utilisé pour la validation du modèle s'étale sur 34 jours, du 22 janvier 2010 jusqu'au 24 février 2010 (annexe 5).

Pour des raisons de simplification et de lisibilité, la présentation des résultats obtenus sera limitée aux points de contrôle les plus importants au niveau des trois branches du bassin. Les résultats détaillés de la simulation de cet événement sont donnés par l'annexe 8.

3.1. La branche de l'Ouergha

A l'échelle de cette branche, les points choisis pour présenter les résultats de la deuxième simulation sont les deux stations Ain Aicha et Khnichet, ainsi que le barrage Al Wahda.

Au niveau de la station Ain Aicha, les hydrogrammes simulé et observé (fig.57) ont la même allure générale, mais avec des différences remarquables dans les pointes de débit.

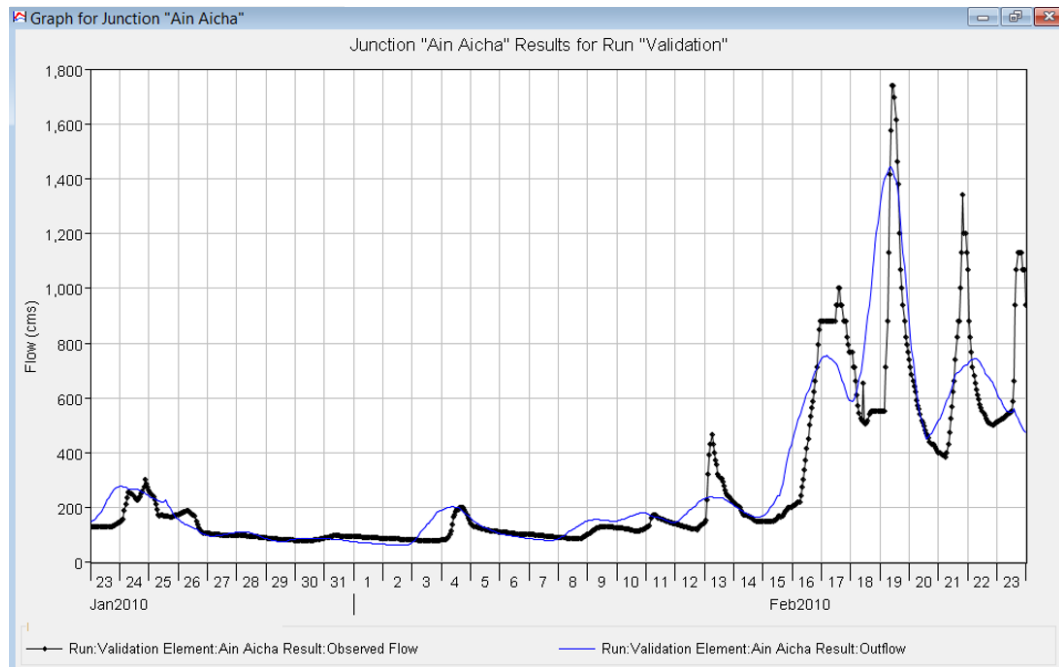


Figure 57. Hydrogrammes simulé et observé à la station Ain Aicha - Evénement de validation

Le coefficient de Nash-Sutcliffe est de 73,7%, ce qui indique une efficacité inférieure par rapport à la première simulation, mais qui reste satisfaisante.

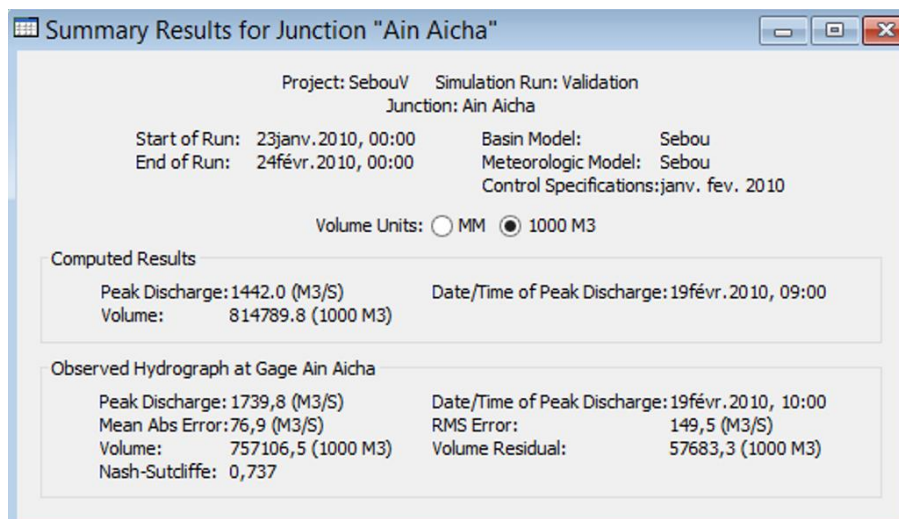


Tableau 26. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Ain Aicha - Evènement de validation

Cependant, au niveau de la station Khnichet, la comparaison graphique (fig. 58) montre une très bonne corrélation entre les deux hydrogrammes simulé et observé. Les deux courbes sont pratiquement superposées pour la majeure partie de l'évènement.

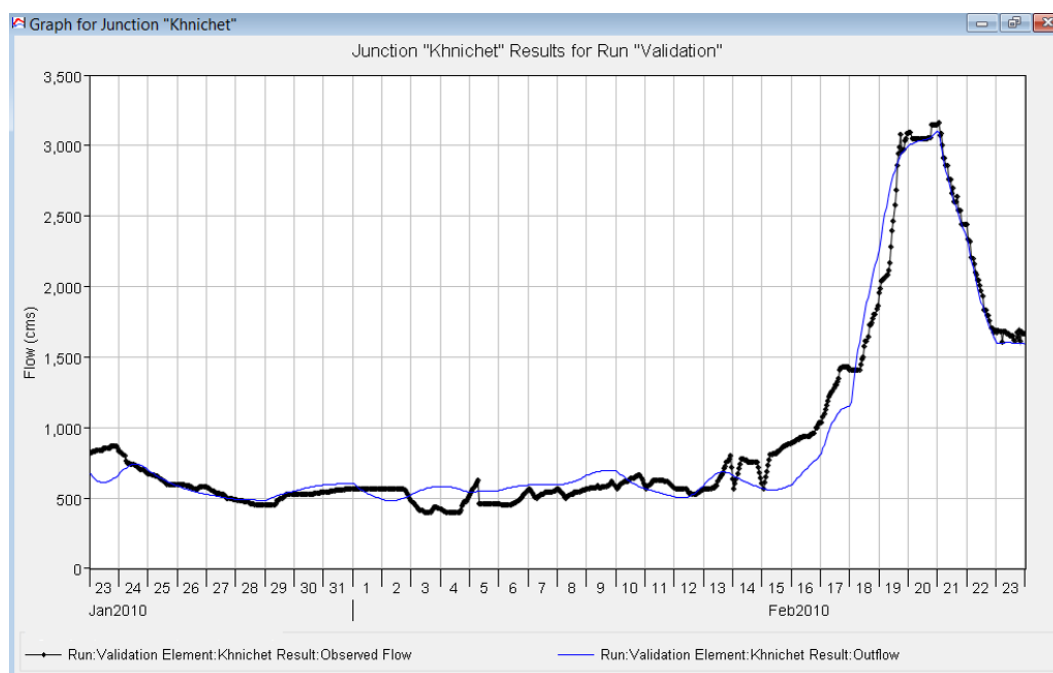


Figure 58. Hydrogrammes simulé et observé à la station Khnichet - Evènement de validation

Le tableau récapitulatif des résultats obtenus au niveau de cette station (tab.27) donne un coefficient de Nash-Sutcliffe très élevé (96,7%), ce qui prouve une efficience très satisfaisante du modèle.

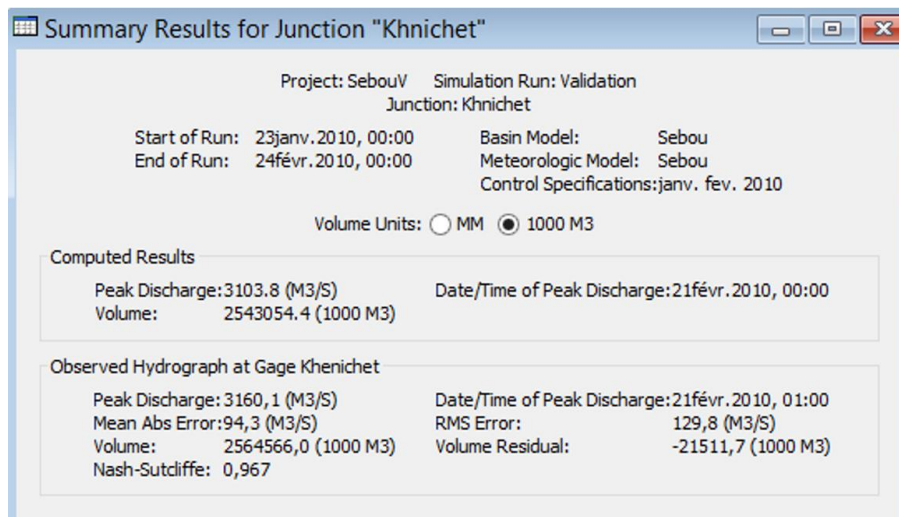


Tableau 27. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Khnichet - Evènement de validation

Par ailleurs, les résultats de la simulation au niveau du barrage Al Wahda (fig.59 et tab.28) ont enregistré des chiffres records en matière de débits et de volumes au cours de l'évènement janvier-février 2010. En effet, l'apport total était de l'ordre de 2,4 milliards m3, et les sorties ont atteint 2,2 milliards m3. Alors que le débit a légèrement dépassé 2670 m3/s comme pointe pour les apports et 2980 m3/s comme pointe pour les sorties.

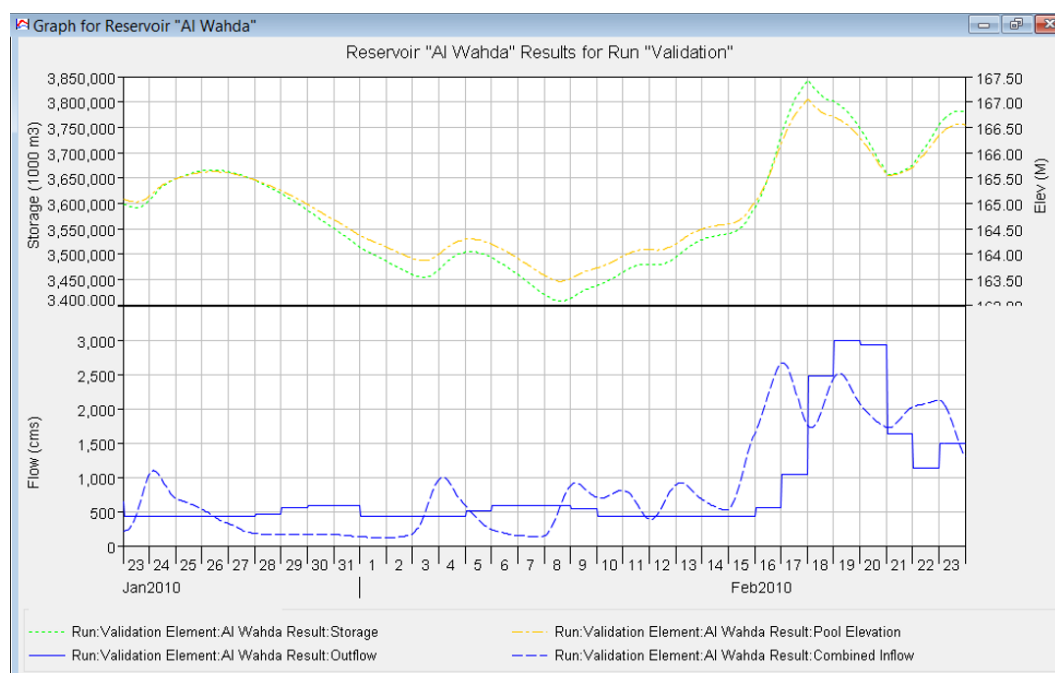


Figure 59. Résultats de la simulation de l'Evènement de validation au niveau du barrage Al Wahda

Summary Results for Reservoir "Al Wahda"

Project: SebouVSimulation Run: Validation
Reservoir: Al Wahda

Start of Run: 23janv. 2010, 00:00Basin Model: Sebou
End of Run: 24févr. 2010, 00:00Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: janv. fev. 2010

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Inflow: 2670.4 (M3/S)Date/Time of Peak Inflow: 17févr. 2010, 02:00
Peak Discharge: 2986.0 (M3/S)Date/Time of Peak Discharge: 19févr. 2010, 01:00
Inflow Volume: 2401196.6 (1000 M3)Peak Storage: 3841701.9 (1000 M3)
Discharge Volume: 2219309.8 (1000 M3)Peak Elevation: 167.0 (M)

Observed Hydrograph at Gage barrage Al Wahda

Peak Discharge: 2986,0 (M3/S)Date/Time of Peak Discharge: 19févr. 2010, 01:00
Mean Abs Error: 0,0 (M3/S)RMS Error: 0,0 (M3/S)
Volume: 2219309,8 (1000 M3)Volume Residual: 0,0 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 1,000

Tableau 28. Tableau récapitulant les principaux résultats pour le barrage Al Wahda - Evènement de validation

L'analyse de ces résultats a révélé l'échec de cette mégastructure hydraulique à gérer les apports exceptionnels de l'évènement simulé. En effet, malgré l'effort de vidange entretenu pour préparer la retenue à un tel scénario, l'évènement a commencé avec un volume stocké de 3,6 milliards m3 ce qui correspond à un taux de remplissage de plus de 97%.



Photo 1. Déversement du barrage Al Wahda en février 2010 (ABHS)

3.2. La branche du Beht

Au niveau de cette branche, les points choisis pour présenter les résultats de la simulation de validation sont la station hydrologique Oueljet Soltane et le barrage Kansera.

Pour la station Oueljet Soltane, l'analyse graphique des résultats (fig.60) montre que le modèle a pu reproduire l'hydrogramme observé sauf pour une période de trois jours, le 17-18-19 février, où on note une grande erreur sur les deux plans volume et pic.

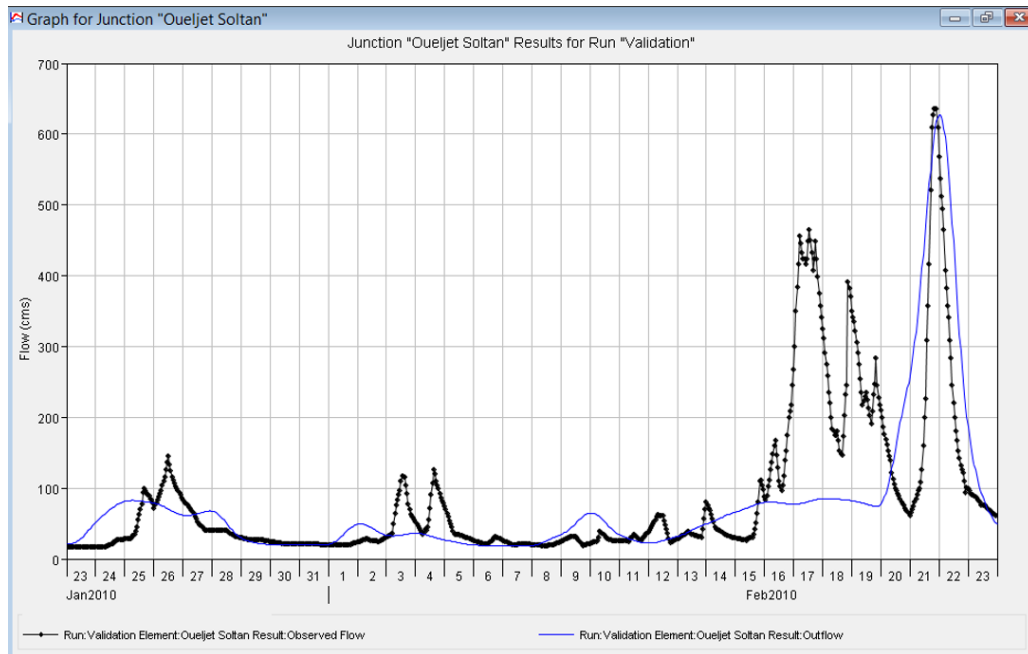


Figure 60. Hydrogramme simulé vs observé à la station Oueljet Soltane - Evènement de validation

Ces observations sont confirmées par le coefficient de Nash-Sutcliffe (tab.29) qui n'a pas dépassé 30,9% témoignant d'une efficacité faible au niveau de cette station.

Summary Results for Junction "Oueljet Soltan"

Project: SebouV Simulation Run: Validation
Junction: Oueljet Soltan

Start of Run: 23janv.2010, 00:00 Basin Model: Sebou
End of Run: 24févr.2010, 00:00 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications:janv. fev. 2010

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge:627,0 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge:22févr.2010, 00:00
Volume: 211159.2 (1000 M3)

Observed Hydrograph at Gage Oueljet Soltane

Peak Discharge:636,0 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge:21févr.2010, 20:00
Mean Abs Error:50,0 (M3/S) RMS Error: 91,9 (M3/S)
Volume: 234390,4 (1000 M3) Volume Residual: -23231,2 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 0,309

Tableau 29. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Oueljet Soltane - Evènement de validation

Pour le barrage Kansera, l'analyse des résultats de la simulation (fig.61 et tab.30) montre que la retenue du barrage a reçu au cours de l'événement de validation des apports de l'ordre de 204,2 millions m³, avec un pic de 494,1 m³/s. En contrepartie, les sorties ont atteint 261,5 m³ avec un maximum de débit de 323,4 m³/s.

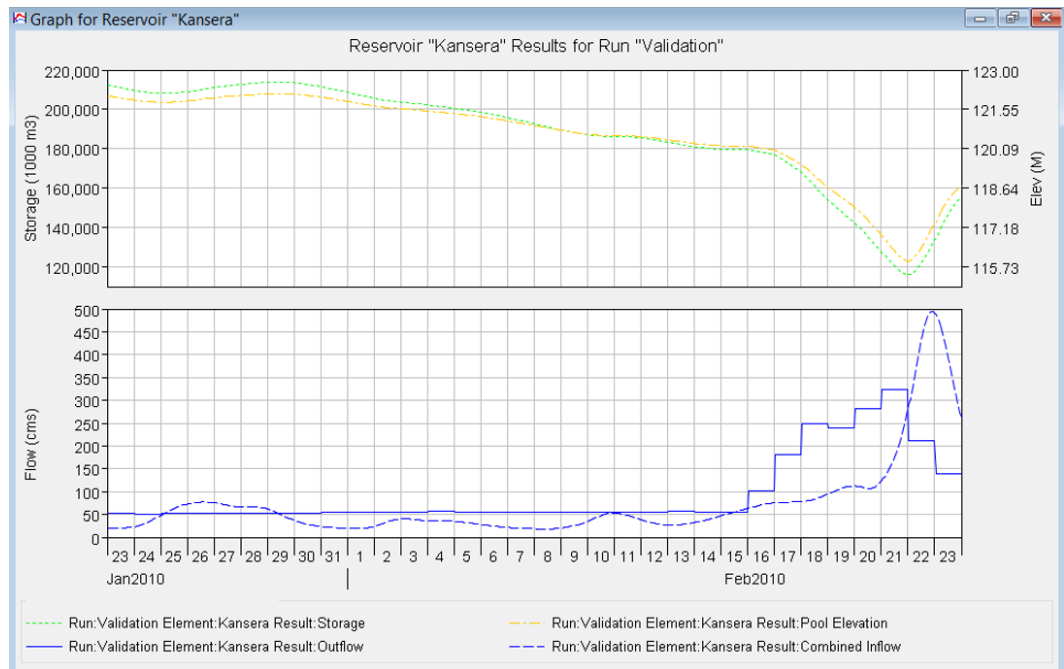


Figure 61. Résultats de la simulation de l'Evènement de validation au niveau du barrage Kansera

Summary Results for Reservoir "Kansera"

Project: SebouV Simulation Run: Validation
Reservoir: Kansera

Start of Run: 23janv. 2010, 00:00 Basin Model: Sebou
End of Run: 24févr. 2010, 00:00 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: janv. fév. 2010

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Inflow: 494.1 (M3/S) Date/Time of Peak Inflow: 22févr. 2010, 22:00
Peak Discharge: 323.4 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 21févr. 2010, 01:00
Inflow Volume: 204120.6 (1000 M3) Peak Storage: 213938.4 (1000 M3)
Discharge Volume: 261550.4 (1000 M3) Peak Elevation: 122.1 (M)

Tableau 30. Tableau récapitulatif des principaux résultats pour le barrage Kansera - Evènement de validation

Ces résultats révèlent le rôle important du barrage Kansera dans le laminage de la crue de janvier – février 2010, et par conséquent, dans la protection de la plaine du Gharb contre les inondations.



Photo 2. Déversement du barrage El Kansera en février 2010 (ABHS)

3.3. La branche principale du Sebou

La description des résultats de la validation sera limitée ici à la station Azib Soltane et le barrage Idriss 1^{er}.

Au niveau de la station Azib Soltane, l'analyse de la figure 62 montre que le modèle a réussi à reproduire l'hydrogramme observé avec un taux d'erreur acceptable. Les deux hydrogrammes simulé et observé présentent une grande corrélation.

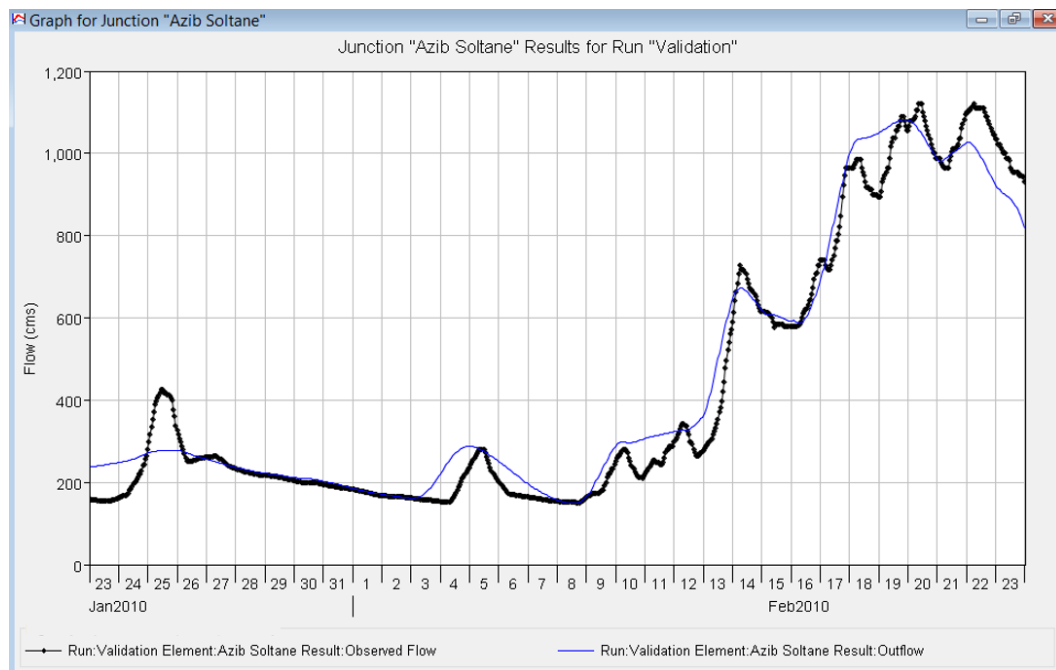


Figure 62. Hydrographes simulé et observé à la station Azib Soltane - Evènement de validation

Les chiffres du tableau récapitulatif des résultats obtenus au niveau de cette station (tab.31) confirment ces observations. Le coefficient de Nash-Sutcliffe a atteint 96,9 %, ce qui prouve que l'efficacité du modèle est très élevée.

Summary Results for Junction "Azib Soltane"

Project: SebouV Simulation Run: Validation
Junction: Azib Soltane

Start of Run: 23janv.2010, 00:00 Basin Model: Sebou
End of Run: 24févr.2010, 00:00 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications:janv. fev. 2010

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge:1082.3 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge:19févr.2010, 21:00
Volume: 1223230.2 (1000 M3)

Observed Hydrograph at Gage Azib Soltane

Peak Discharge: 1121,3 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge:20févr.2010, 09:00
Mean Abs Error:41,0 (M3/S) RMS Error: 57,8 (M3/S)
Volume: 1182094,0 (1000 M3) Volume Residual: 41136,1 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 0,969

Tableau 31. Tableau récapitulatif des résultats obtenus à la station Azib Soltane - Evènement de validation

La figure 63 et le tableau 32 donnent les résultats de la simulation de l'Evènement de validation au niveau du barrage Idriss 1^{er}.

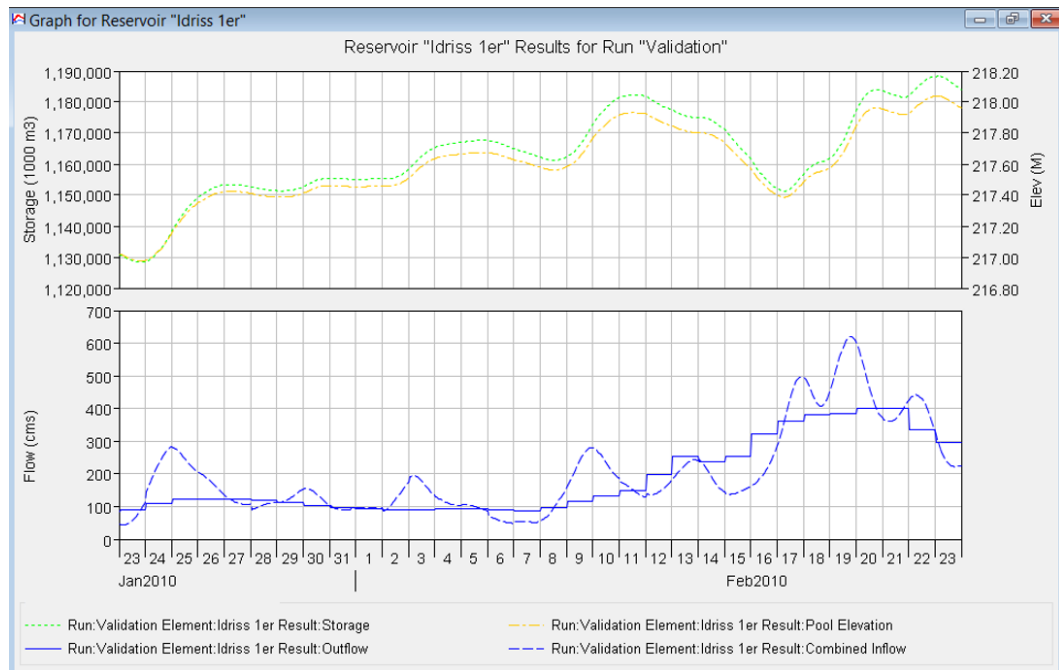


Figure 63. Résultats de la simulation de l'Évènement de validation au niveau du barrage Idriss 1er

La comparaison des apports et des sorties révèle, encore une fois, l'ordre de grandeur des phénomènes hydrologiques exceptionnels enregistrés au cours de cet évènement. Le rôle joué par le barrage dans le laminage de la crue était limité malgré sa grande capacité.

Il est très important de signaler qu'on a assisté au déversement du barrage Idriss 1^{er} (photo.3) pour la deuxième fois depuis sa mise en service en 1973, ce qui a considérablement augmenté les apports de la branche Sebou qui se sont écoulés vers la plaine du Gharb.



Photo 3. Déversement du barrage Idriss 1er en février 2010 (ABHS)

En effet, les apports au cours de l'évènement ont dépassé un volume total de 567,2 millions m³, avec un débit maximal de 620,4 m³/s. Les sorties ont atteint 513,9 millions m³, avec un pic de 401,8 m³/s (Tab.32).

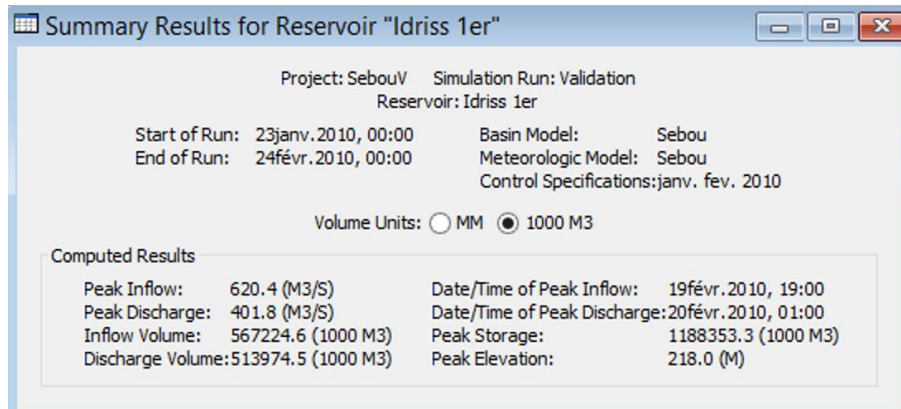


Tableau 32. Tableau récapitulant les principaux résultats pour le barrage Idriss 1^{er} - Evènement de validation

3.4. La station Belksiri

Les résultats de la simulation de l'évènement de validation au niveau de la station Belksiri sont récapitulés dans la figure 64 et le tableau 33.

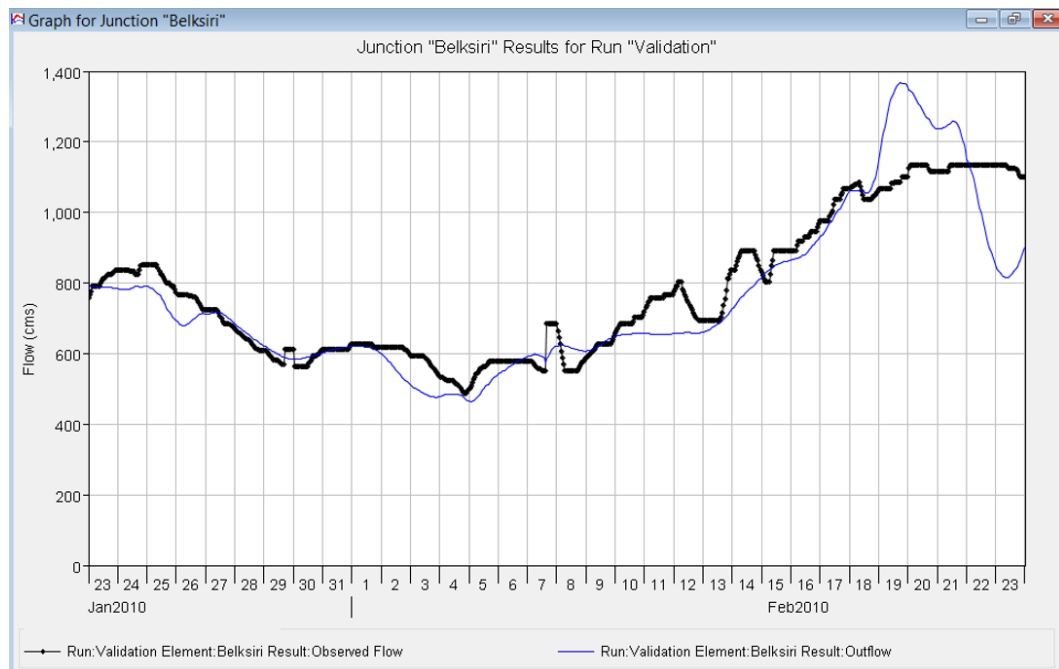


Figure 64. Hydrogrammes simulé et observé à la station Belksiri - Evènement de validation

L'analyse de ces résultats témoigne d'une performance satisfaisante du modèle. Les deux hydrogrammes simulé et observé sont très corrélables sauf vers la fin de l'évènement (fig.64).

Le critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (tab.33) est assez élevé (77,8%) pour confirmer la validité du modèle au niveau de ce point.

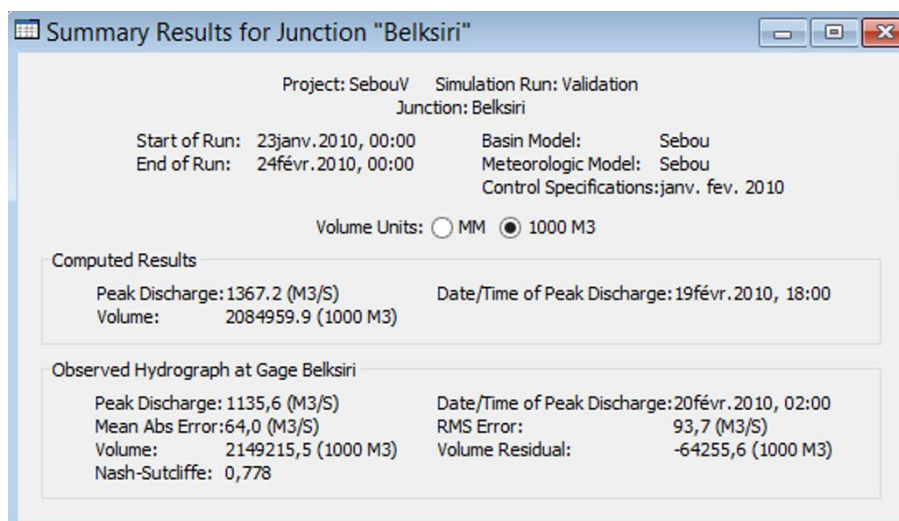


Tableau 33. Tableau récapitulant les principaux résultats pour la station Belksiri - Evènement de validation

4. Synthèse et discussion des résultats de la modélisation hydrologique

L'analyse des résultats obtenus dans la plupart des stations pour les deux événements simulés, montre que le modèle a réussi à reproduire globalement les hydrogrammes de crues sous leurs différents aspects, notamment le débit de pointe et le volume total, avec un taux d'erreur acceptable.

L'écart entre les valeurs estimées et celles optimisées était faible pour la quasi-totalité des paramètres, ce qui témoigne d'une bonne estimation préalable. Cependant, l'optimisation a pu améliorer sensiblement les résultats de la simulation notamment en matière de débit de pointe.

D'une manière générale, le coefficient de Nash-Sutcliffe était élevé pour la plupart des stations hydrologique utilisées, ce qui indique une efficacité très satisfaisante du modèle.

D'autre part, l'analyse quantitative des résultats de la simulation a permis de quantifier et de comparer les apports des trois branches principales du bassin du Sebou (tab.34). Dès lors, nous avons arrivé à évaluer la contribution de chaque branche à la genèse des inondations dans la plaine du Gharb, qui constitue une zone d'une importance capitale en matière de lutttes contre les crues et les inondations.

Branche	Superficie (km2)	Pluies brutes	pertes	ruissellement	Stockage Grands barrages	Apports à la plaine du Gharb	Contribution au A.T. (%)
		volume en million m3					
Evénement déc. 2009							
Beht	9700	1490	1299	191	86	105	21
Ouergha	7300	2726	1093	1632	1400	232	47
Sebou	16600	2424	2143	281	124	157	32
total	33600	6640	4535	2105	1611	494	100
Evénement janv. - févr. 2010							
Beht	9700	1799	1446	353	25	328	8
Ouergha	7300	3057	312	2745	291	2454	62
Sebou	16600	3099	1845	1254	53	1201	30
total	33600	7955	3603	4352	369	3983	100

Tableau 34. Contribution des trois branches principales du bassin au apports totaux (A.T.) vers la plaine du Gharb

Ainsi, les chiffres montrent que la surface des trois branches a reçu durant l'évènement de déc. 2009 (16 jours) un volume total de précipitation de l'ordre de 6640 millions m³, dont 4535 millions m³ ont été perdu par différents modes notamment l'évapotranspiration et l'infiltration, 1611 millions m³ ont été stockés dans les grands barrages, et le reste qui constitue 494 millions m³ a atteint la plaine du Gharb. Le bassin de l'Ouergha a contribué de 47% de ces apports.

Lors de l'évènement de janvier-février 2010 (30 jours), le volume total des précipitations qui se sont abattues sur les trois branches était de 7955 millions m³, dont des pertes de l'ordre de 3603 millions m³, et un volume stocké qui n'a pas dépassé 369 millions m³. Les apports vers la plaine du Gharb ont été de 3983 millions m³. La contribution du bassin de l'Ouergha à lui seul a atteint 62% pour cet évènement.

L'importance des phénomènes hydrologiques au niveau du bassin de l'Ouergha peut être expliquée par deux principaux facteurs :

- Le premier est d'ordre climatique, la partie rifaine notamment Jbel Ouedka est la zone la plus arrosée du bassin, voir du Maroc ;
- Le deuxième est géologique, la prédominance des formations marneuses imperméables favorise le ruissellement à la surface du sol.

L'ampleur de la réponse hydrologique du bassin de l'Ouergha mise en évidence par les résultats de la simulation, justifie non seulement l'existence du plus grand barrage du pays (Al Wahda), mais aussi la projection d'un autre barrage au niveau de la station hydrologique Bab Ouender, avec une retenue qui dépasse un milliard de mètres cubes. Ce qui permettra d'augmenter la capacité de mobilisation des ressources en eau de surface.

Conclusion

Grace à un large éventail de méthodes et techniques en la matière, l'outil de modélisation hydrologique HEC-HMS nous a aidé à la construction d'un modèle pluie-débit consistant à l'échelle du bassin de Sebou tout entier.

Les simulations effectuées ont conduit à décrire les événements choisis avec un taux d'erreur acceptable. Les paramètres issus de l'optimisation ont parvenu sensiblement à améliorer la performance du modèle. Pour la plupart des stations, nous avons arrivé à reproduire globalement les hydrogrammes de crues sous leurs différents aspects, notamment le débit de pointe et le volume total.

L'analyse des résultats obtenus a permis de comprendre et de caractériser le comportement hydrologique des différents sous-bassins de Sebou, et de quantifier leurs apports. Il s'est avéré que le bassin de l'Ouergha est à l'origine de la majeure partie des apports d'eau de la plaine du Gharb. Sa contribution durant les deux événements simulés de décembre 2009 et janvier-février 2010 était respectivement de 47% et 62%.

Dès lors, le modèle élaboré s'apprête à toute exploitation visant soit la simulation d'événements hydroclimatiques vécus pour décrire le fonctionnement du bassin versant lors des crues historiques (fonction descriptive), ou encore la simulation d'événements météorologiques probables (pluies de différentes périodes de retour, prévisions météorologiques) afin de prévoir leur réponse hydrologique (fonction prédictive).

Le modèle peut aussi simuler l'impact d'éventuelles modifications affectant le bassin en relation avec des aménagements projetés, ou un changement de l'occupation du sol pouvant résulter de l'accroissement de l'anthropisation, notamment l'extension de zones urbanisées.

Chapitre II : Modélisation de la propagation des crues dans le Sebou en aval du barrage Allal El Fassi

Introduction

Après avoir réalisé un modèle hydrologique Pluie-Débit pour l'ensemble du bassin versant du Sebou, et afin de pouvoir exploiter les résultats qui en découlent, nous avons procédé à l'élaboration d'un modèle hydraulique ayant pour objet de simuler la propagation de l'onde de crue dans les principaux cours d'eau du bassin.

En raison de la rareté des données topographiques fines indispensables à la modélisation hydraulique, nous nous sommes limités à un cas d'étude, là où nous avons réussi à acquérir des données issues de levées topographiques. Nous avons donc travaillé sur le tronçon de Sebou en aval du Barrage Allal El Fassi jusqu'à la station hydrologique Dar El Arsa, située juste en amont de la confluence de l'oued Sebou et l'oued Inaouene.

Le tronçon choisi, bien qu'il présente une importance particulière, ne constitue qu'un essai qui doit être généralisé sur l'ensemble du bassin pour pouvoir exploiter amplement les résultats du modèle hydrologique.

L'importance du modèle hydraulique au niveau de ce tronçon est de disposer d'un outil d'aide à la décision pour la gestion des crues en aval du barrage Allal El Fassi. Il permettra de chercher des solutions de protection contre les inondations des populations, des infrastructures et des activités agricoles intensément pratiquées surtout en aval.

Le présent chapitre sera donc consacré à la présentation et la discussion des résultats de la modélisation hydraulique et la délimitation des zones inondables.

Au début, seront présentées les composantes du modèle hydraulique élaboré à l'aide de l'outil HEC-RAS, ainsi que les paramètres hydrauliques introduits. Ensuite, la discussion portera sur la présentation et l'interprétation des résultats de la simulation hydraulique effectuée, et la délimitation des zones inondables qui en dérivent.

1. Présentation du tronçon modélisé

D'une longueur d'environ 60 km, le tronçon choisi pour cette étude correspond à l'oued Sebou en aval du barrage Allal El Fassi jusqu'à la station hydrologique Dar El Arsa. Celle-ci se situe juste en amont de la confluence du Sebou et l'Inaouene (fig.65).

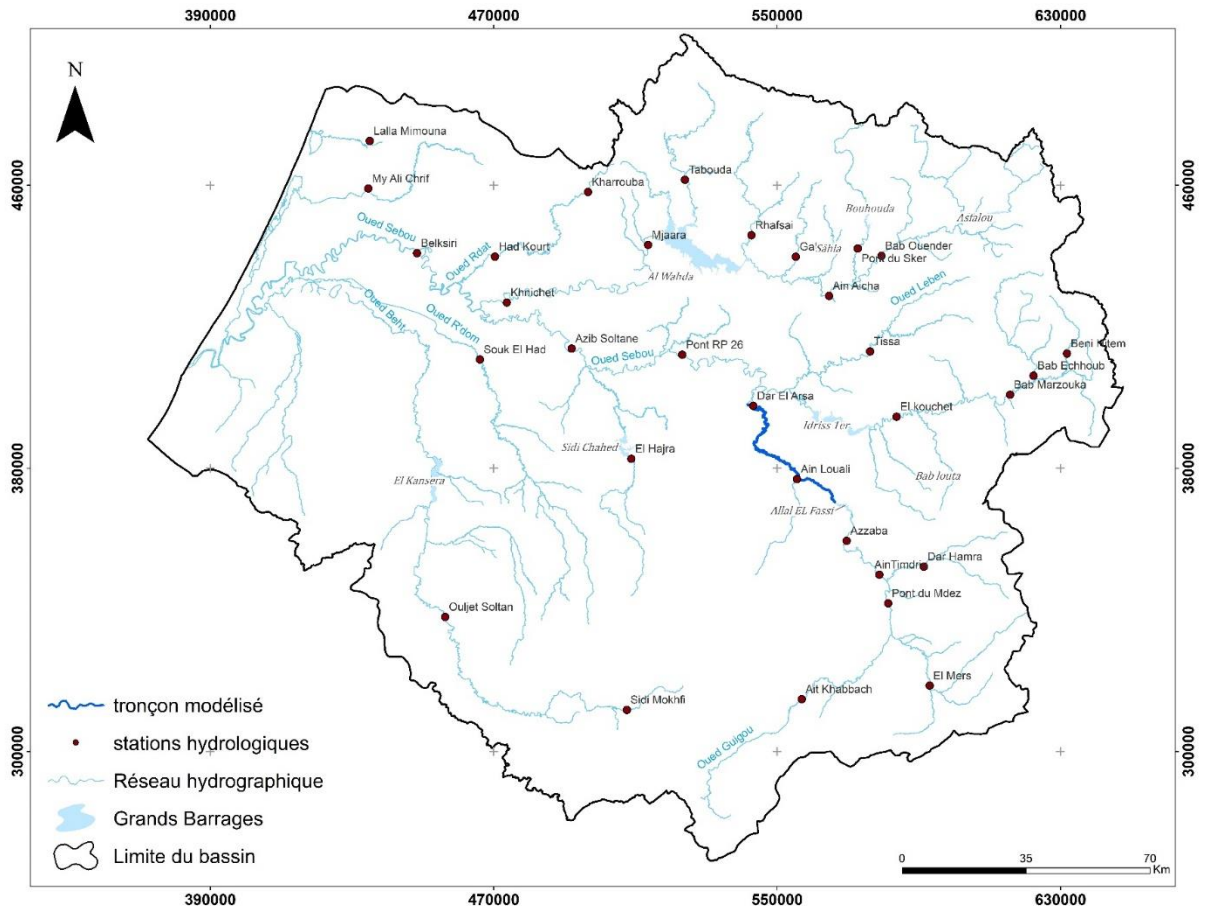


Figure 65. Situation du tronçon modélisé de l'Oued Sebou

Dans le but d'effectuer un diagnostic exhaustif du tronçon de l'oued Sebou étudié, un travail de terrain était nécessaire pour collecter le maximum d'informations utiles pour l'élaboration du modèle hydraulique. Ainsi, une description détaillée de la vallée de l'oued a été effectuée, concernant la géomorphologique, l'état du chenal et des berges, les ouvrages hydrauliques et les aménagements, l'occupation de la plaine d'inondation ...

Suite à ce travail de diagnostic, il s'est avéré que le tronçon étudié peut-être subdivisé en deux parties appartenant à des contextes géomorphologiques et géologiques distincts :

- Une partie amont située à la sortie du Moyen Atlas

Située entre le barrage Allal El Fassi et la confluence avec l'oued Agay, cette partie se caractérise par une vallée étroite avec des rives abruptes. L'oued Sebou est très encaissé au fond de la vallée, et on note l'absence d'un véritable lit majeur. La topographie indique une pente

relativement importante favorisant l'accroissement de la vitesse de l'écoulement. Aucun aménagement ou ouvrage de franchissement à signaler dans cette partie.

- Une partie aval traversant le couloir Fès-Taza pour se jeter dans le début du préif

Elle se situe entre la confluence avec l'oued Agay et la station hydrologique Dar El Arsa. A l'inverse de la partie amont, la vallée s'élargie, le cours d'eau de l'oued Sebou devient méandrique donnant naissance à de larges terrasses agricoles enrichies en limons. La largeur du lit majeur dans certains endroits peut atteindre jusqu'à 1200m.

Cette situation explique l'existence de plusieurs douars le long du tracé de l'oued, dont certains sont exposés au risque d'inondation en cas de crues.

Plusieurs ouvrages de franchissement traversent l'oued Sebou au niveau de ce tronçon. Les plus importants sont :

- le pont assurant le franchissement de l'autoroute Fès-Taza ;
- le pont assurant le franchissement de la route nationale n°6 et la ligne de chemin de fer reliant Fès à Taza ;
- les deux ponts assurant le franchissement de la route nationale n°8 reliant Fès à Taounate, l'ancien pont portugais abandonné et le nouveau pont juste en amont ;
- le pont sur la route provinciale n°5002 vers Hamriya.

2. Description du modèle hydraulique élaboré

2.1. Composantes physiques du modèle

Le modèle unidimensionnel élaboré (fig.66) est constitué de cinq biefs ou tronçons (*Reach*). Trois entre eux représentent l'oued Sebou (Sebou Amont Agay, Sebou Amont Fès et Sebou aval), et les deux autres représentent les deux affluents, oued Agay et oued Fès.

En plus des lignes d'eau, le modèle comporte 329 profils en travers bien répartis le long des cours d'eau pour représenter la géomorphologie et la topographie du tronçon étudié.

Parmi les ouvrages de franchissement énumérés lors du diagnostic, seuls les deux ponts assurant le franchissement de la route nationale n°8 ont été intégrés dans le modèle :

- L'ancien pont portugais abandonné susceptible de créer une perte de charge significative en cas de crue, à cause de son architecture ;
- et le nouveau pont juste en amont, qui constitue une véritable digue sur toute la largeur de la plaine d'inondation.

L'influence des autres ouvrages sur l'écoulement reste très limitée. En pratique, les ponts ne sont intégrés dans un modèle numérique que si l'obstruction exercée par leurs piles est au moins de 5 à 10% de la section débitante de la rivière. A l'exception de l'ancien pont portugais, tous les autres ponts présentent des largeurs d'écoulement trop importantes par rapport aux dimensions des piles.

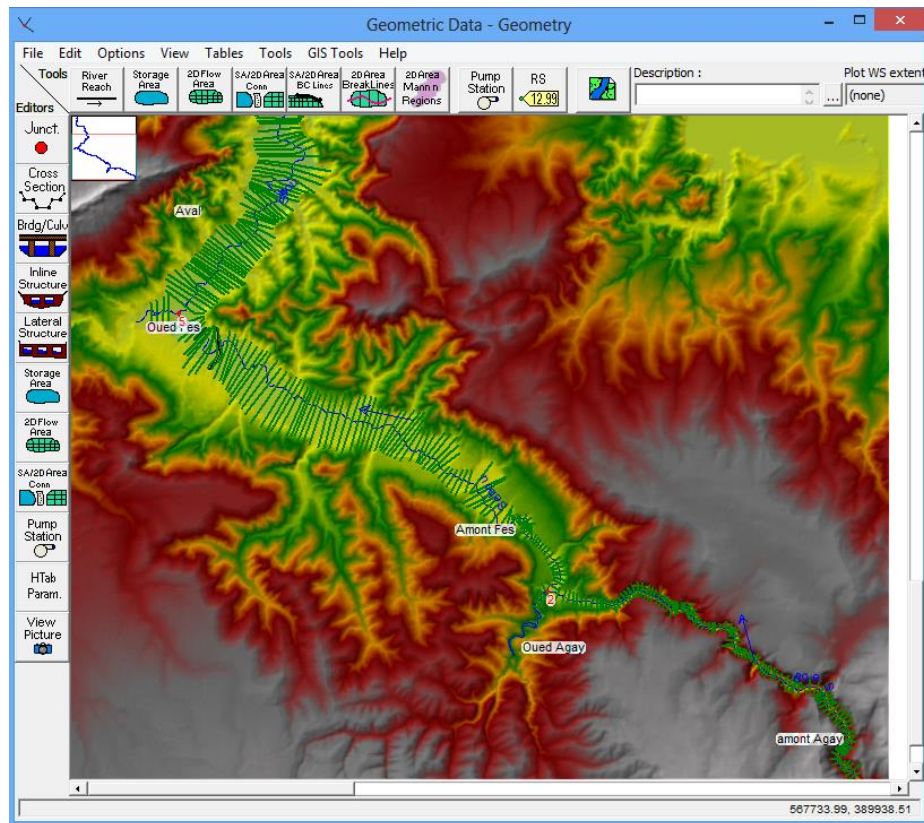


Figure 66. Composantes physiques (Geometric Data) du modèle hydraulique élaboré

2.2. Topographie utilisée

La construction du modèle s'est basée essentiellement sur deux types de données topographiques, le DEM AW3D30 et des levés localement effectués par des topographes sur terrain.

Au niveau de la partie amont du tronçon, là où la vallée est resserrée, nous avons utilisé le DEM AW3D30 qui peut être considéré suffisant pour décrire la morphologie de l'oued qui est profondément encaissé avec une quasi-absence d'un lit majeur. Le laminage dans ce bief sera quasiment nul, et un levé topographique précis dans cette partie de l'oued n'apportera donc pas d'amélioration significative pour le modèle unidimensionnel.

Dans la partie aval, là où la vallée s'élargie pour dépasser 1km par endroit, les profils en travers nécessitent beaucoup plus de précision pour cerner l'effet d'épandage, raison pour laquelle nous avons utilisé des levés topographiques précis effectués par l'ABHS à l'occasion des études antérieures (annexe 9).

L'ensemble des données a été rassemblé dans un seul MNT élaboré sous ARC-GIS (fig.67), et utilisé pour extraire la topographie des éléments du modèle physique sous HEC-GeoRAS.

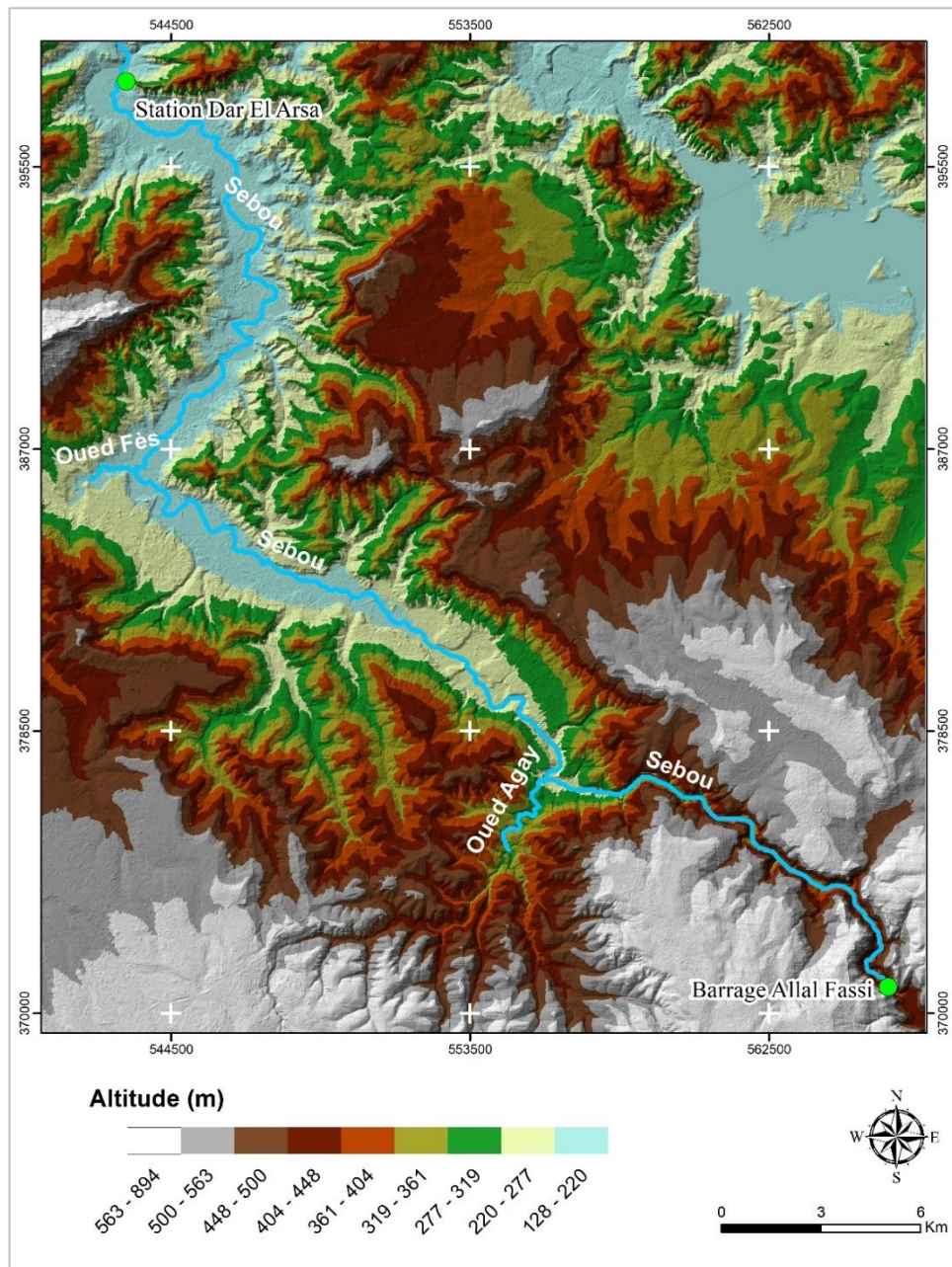


Figure 67. MNT élaboré sous ARCGIS à base du DEM AW3D30, corrigé localement par des levées topographiques

2.3. Conditions aux limites

Dans le cas de la simulation en régime transitoire, la définition des conditions aux limites est indispensable en amont et en aval. Alors, les hydrogrammes issus du modèle hydrologique sont pris comme conditions aux limites en amont. Il s'agit des hydrogrammes sortis du barrage Allal El Fassi. En aval, la pente normale est considérée comme condition aux limites. Elle correspond à la pente du lit de l'oued à l'aval de celui-ci (0.004 m/m).

Pour les conditions initiales, un débit faible arbitraire de l'ordre de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ a été considéré. Cela permet uniquement d'éviter l'instabilité du modèle au début du calcul, observée lorsque le cours d'eau est totalement à sec. Ce débit n'aura évidemment aucune influence sur l'écoulement ou sur la délimitation des zones inondables, vu l'ampleur de l'événement étudié.

2.4. Coefficients de rugosité

Le coefficient de rugosité de Manning a été estimé en se reportant au tableau de référence de Van Te Chow (1959), à la lumière du diagnostic effectué lors de l'étude de terrain.

En raison du contraste décrit précédemment, le coefficient de Manning a été pris initialement égal à :

- 0.05 dans le lit et 0.06 sur les berges à l'aval du barrage Allal El Fassi jusqu'à la confluence avec l'oued Agay ;
- 0.04 dans le lit et 0.05 sur les berges pour le tronçon entre la confluence avec l'oued Agay et celle avec l'oued Fès ;
- 0.04 dans le lit et sur les berges à l'aval jusqu'à la station de Dar Al Arsa.

Au niveau de l'emplacement des ouvrages de franchissement non représentés dans le modèle, le coefficient de friction considéré est égal à 0.05. Cette valeur permet de reproduire le frottement dû aux piles des ponts.

Lors de l'étape de calage, ces coefficients de frottement ont été ajustés afin de mieux reproduire les événements de crues observés.

3. Résultats de la simulation hydraulique de l'événement d'octobre 2008

3.1. Calage du modèle

L'événement ayant servi au calage du modèle hydraulique est celui enregistré le 10-11 Octobre 2008. Il s'agit d'un événement exceptionnel jamais atteint dans l'historique des observations dans le haut Sebou (fig.68).

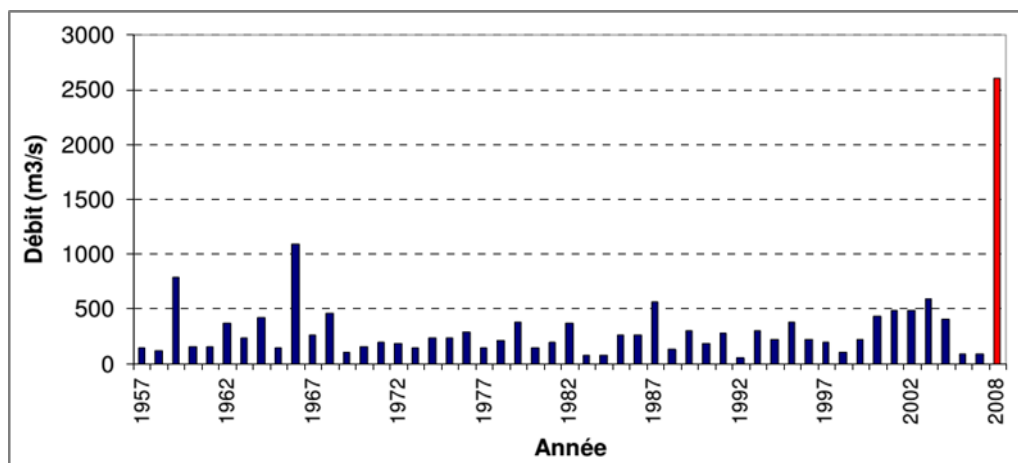


Figure 68. Historique des crues maximales enregistrées au barrage Allal El Fassi jusqu'à 2008 (ABHS)

Le débit de pointe enregistré à l'entrée du barrage Allal El Fassi a atteint $2600 \text{ m}^3/\text{s}$, chiffre qui s'est approché beaucoup de la crue décennallénale adoptée comme crue du projet, qui est de l'ordre de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Le volume total drainé était de 57 millions m^3 , ce qui représente 90% de la capacité de stockage du barrage Allal El Fassi.



Photo 4. Le pont portugais pendant la crue du 10-11/10/2008. Les triangles en rouge indiquent le niveau maximal atteint par les eaux de la crue. (ABHS)

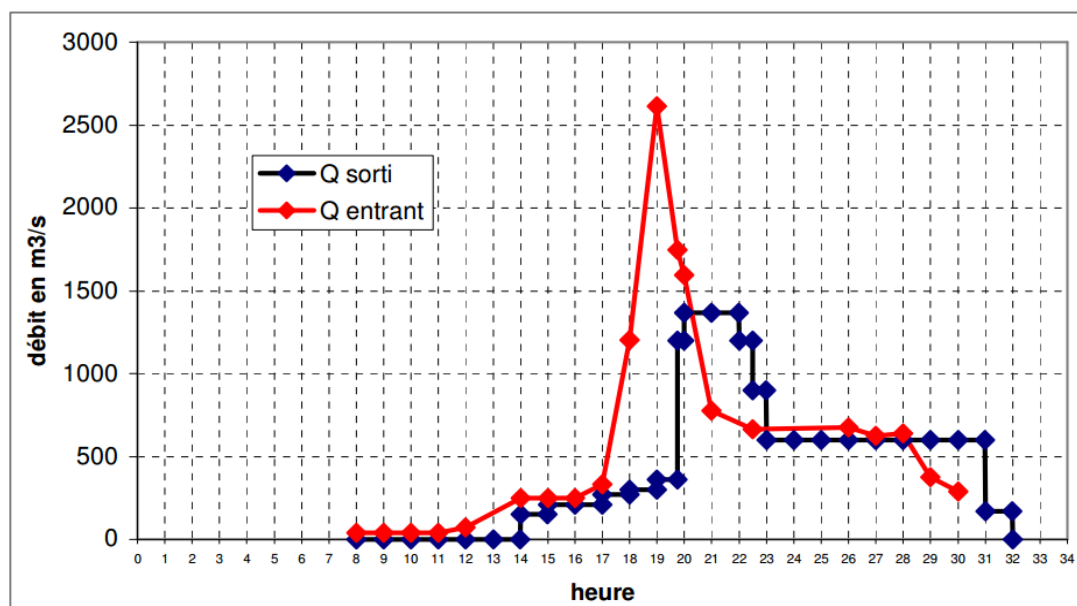


Figure 69. Hydrogrammes à l'entrée et à la sortie du barrage Allal El Fassi au cours de l'événement d'Octobre 2008 (ABHS)

Les hydrogrammes de crue observés à la sortie du barrage Allal El Fassi et au niveau de la station hydrologique Dar Arsa sont donnés par la figure 70.

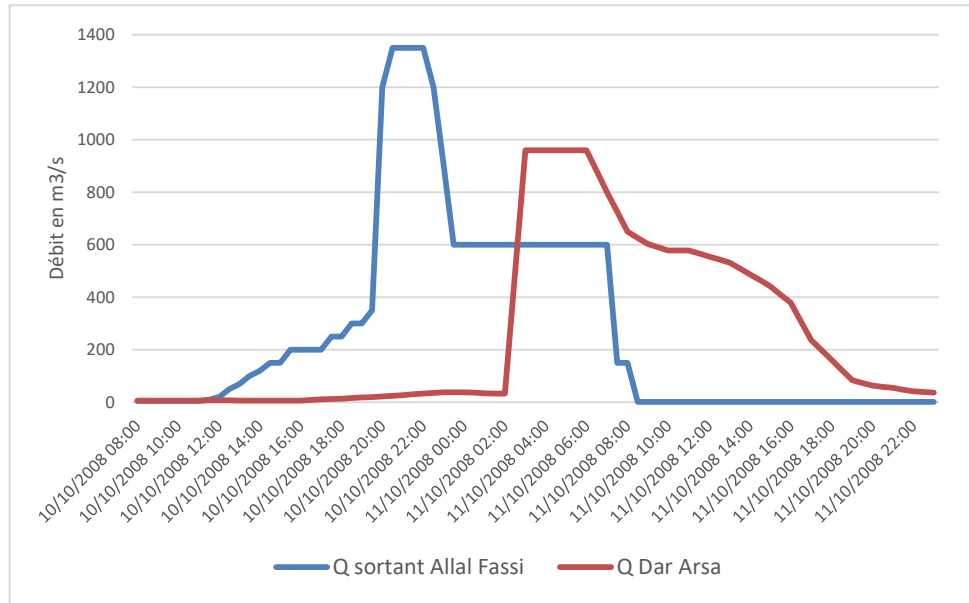


Figure 70. Hydrogrammes de crue observés en amont et à l'aval du tronçon étudié au cours de l'événement de Février 2008 (ABHS)

Le débit de pointe enregistré à la sortie du barrage était de l'ordre de $1370 \text{ m}^3/\text{s}$, alors qu'il ne dépassait $960 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'aval, au niveau de la station Dar El Arsa.

Nous pouvons tout de suite, constater un effet de laminage des crues exercé par la vallée de l'oued, surtout la partie aval, entre la confluence avec l'oued Agay et la station Dar El Arsa.

Le temps de montée de cette crue à l'entrée du barrage peut être estimé à 6 heures selon la figure 69, alors que le temps de propagation de la pointe sur le tronçon entre le barrage et Dar El Arsa est d'environ 7,5 heures selon la figure 70.

Les simulations ont été effectuées sur une durée d'environ 40 heures à partir du 10/10/2008 à 08:00, pour s'assurer de la propagation complète de l'onde de crue depuis le barrage Allal Fassi jusqu'à la station Dar Arsa.

Plusieurs itérations ont été lancées en faisant à chaque fois varier les coefficients de rugosité pour reproduire l'hydrogramme observé au niveau de Dar Arsa.

Les valeurs finales du coefficient de Manning obtenus sont récapitulées dans le tableau suivant :

River	Reach	River Station	N for LOB	N for Channel	N for ROB
Sebou	amont Agay	from 60547.65 to 45990.91	0.08	0.05	0.08
Sebou	Amont Fes	from 45378.04 to 35996.75	0.035	0.034	0.035
Sebou	Amont Fes	from 35796.24 to 25419.09	0.055	0.049	0.055
Sebou	Aval	from 24595.03 to 3279.862	0.042	0.03	0.042
Oued Agay	Oued Agay	from 864.2773 to 79.69843	0.08	0.05	0.08
Oued Fes	Oued Fes	from 1098.039 to 437.0294	0.06	0.044	0.06

Tableau 35. Coefficient de rugosité N de Manning après calage du modèle. LOB : rive gauche, channel : lit, ROB rive droite

La figure 71 donne les deux hydrogrammes simulé et observé au niveau de la station Dar Arsa. La comparaison montre une superposition satisfaisante entre les deux hydrogramme. Ce qui nous pousse à admettre les valeurs du coefficient de rugosité de Manning.

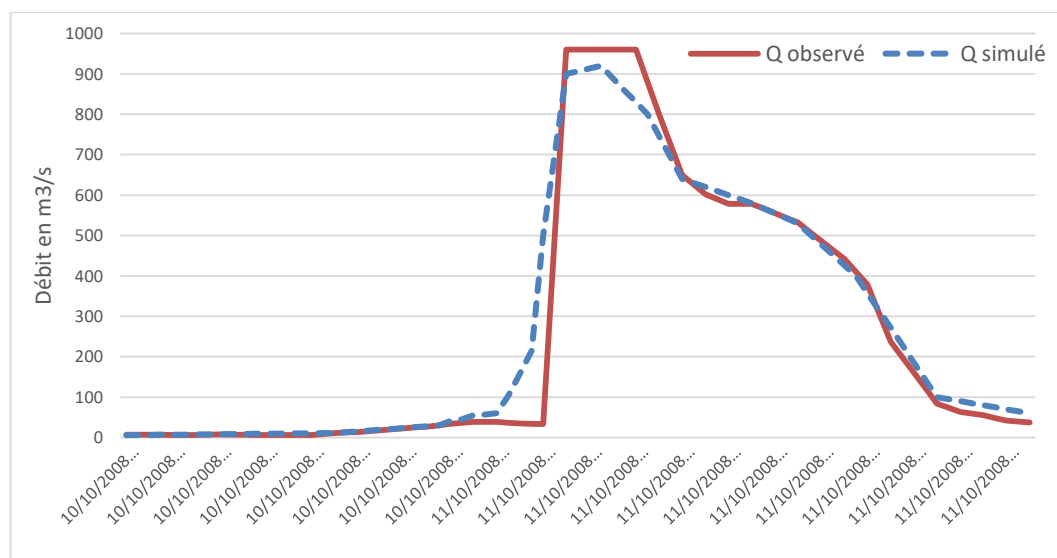


Figure 71. Hydrogrammes simulé et observé dans la station Dar Arsa au cours de l'événement 10-11/10/2008

3.2. Description des résultats de la simulation de l'événement d'octobre 2008

La simulation de la propagation de l'onde de crue du 10-11/10/2008 a révélé l'ampleur d'un événement exceptionnel sur tous les plans. Ainsi, l'analyse du profil en long de l'oued Sebou (fig.72 & tab.36) montre que la profondeur maximale d'eau est très importante en amont, et modérée en aval.

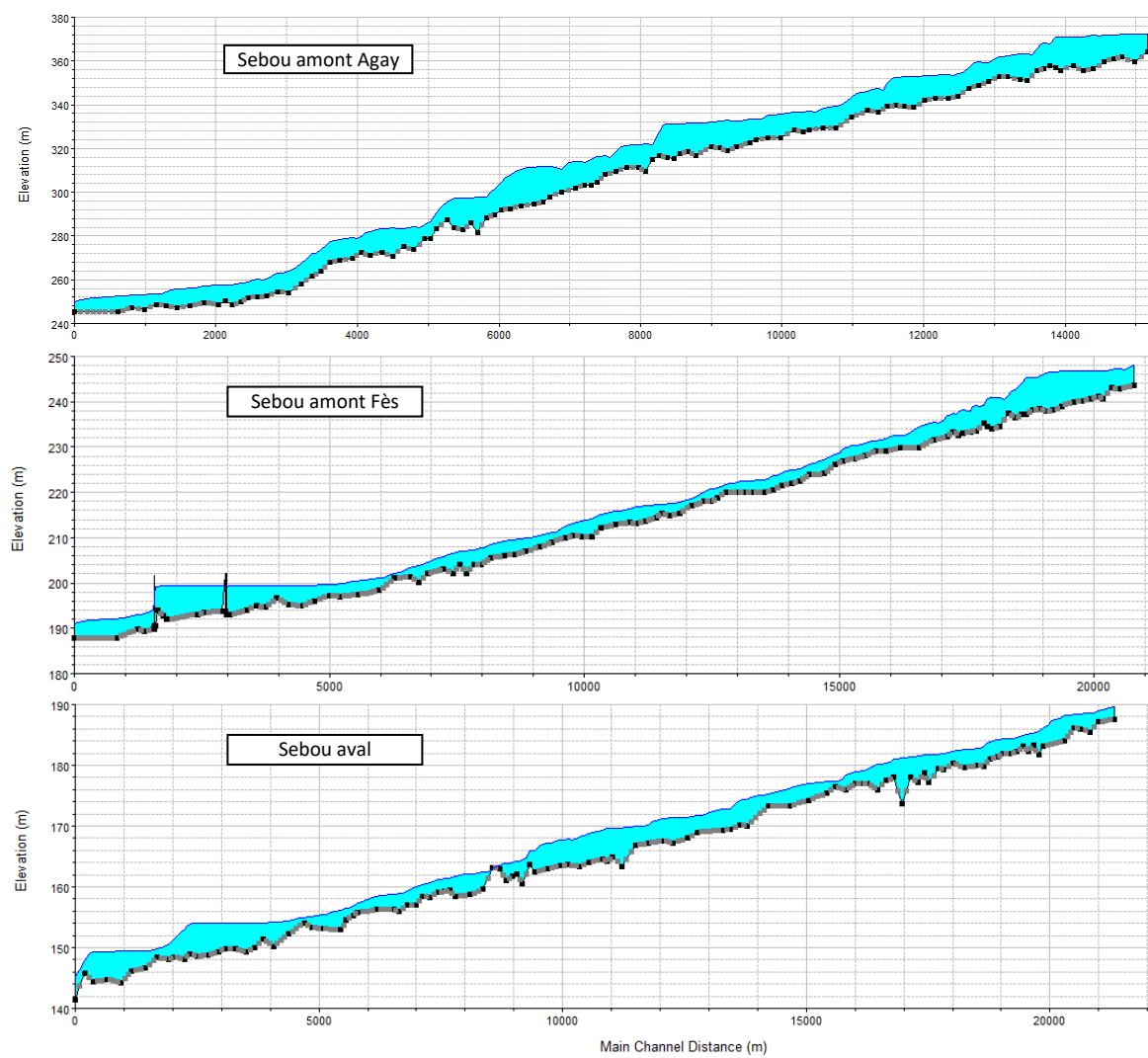


Figure 72. Profil en long (max water surface) correspondant à la simulation l'événement Oct. 2008

Tronçon	River Station	Débit (m³/s)	Altitude Min du lit (m)	Profondeur du lit (m)	Vitesse lit (m/s)	Section (m²)	Largeur Max (m)	Nb. Froude
Sebou amont Agay	60547.65	1370	375	7.76	4.07	336.76	121.84	0.78
	58298.68	1370.03	348	10.15	1.63	838.73	102.88	0.18
	56579.18	1369.93	347	7.60	2.14	639.57	84.17	0.25
	54374.75	1369.82	347	4.18	3.41	401.9	96.15	0.53
	50867.99	1369.69	325	4.24	4.86	174.27	41.07	1.22
	48093.46	1369.67	280	5.12	5.22	262.59	51.29	0.74
	46539.87	1369.65	248	2.51	2.59	541.12	229.94	0.52
Sebou Amont Fès	45082.78	1369.51	238	4.02	2.31	593.88	147.57	0.37
	42270.74	1369.12	235	2.37	3.25	421.08	177.42	0.67
	40316.24	1368.8	226.51	3.93	2.72	722.85	390.06	0.44
	38290.79	1364.96	223.18	3.83	1.68	930.99	302.46	0.27
	36943.66	1364.52	219.58	2.19	1.91	858.35	534.96	0.41
	34545.54	1363.88	206.35	2.62	2.00	711.77	320.04	0.39
	33031.4	1362.72	203.97	2.38	1.78	777.95	356.06	0.37
	31351.49	1327.07	200.45	2.34	0.83	1954.33	1225.96	0.17
	29047.48	1239.03	197.36	6.19	0.30	1454.51	833.03	0.21
	27567.69	Bridge						
	27001.63	1241.31	193.94	6.65	1.62	850.12	714.76	0.4
	26186.98	1167.21	185.9	8.19	0.60	2269.52	192.42	0.05
	26164.27	Culvert						
	25419.09	1167.21	185.9	1.90	3.65	341.35	182.87	0.85
Sebou Aval	24276.09	1165.82	184	1.97	0.85	1459.85	742.13	0.19
	23141.6	1160.57	183.94	0.91	1.73	721.33	816.36	0.58
	21780.86	1157.35	181.5	1.09	1.86	666.46	615.49	0.57
	20691.21	1154.38	173.56	1.17	2.10	590.56	512.47	0.62
	19418.47	1148.36	173.31	1.67	1.96	728.82	520.33	0.48
	17499.71	1143.16	171.81	1.43	2.75	448.16	314.45	0.74
	15341.7	1143.02	166.98	1.48	2.80	445.8	309.61	0.73
	14092.93	1099.47	162.98	1.58	1.15	1042.6	667.62	0.29
	12708.23	1094.96	160.91	3.81	1.01	1227.1	375.27	0.17
	11646.94	1087.4	162	1.48	3.39	349.11	236.62	0.89
	10721.44	1087.21	157.15	0.96	1.76	709.17	670.2	0.57
	10096.51	1018.79	155.68	1.42	1.18	1126.52	957.41	0.32
	9470.309	993.38	152.54	3.16	0.73	1752.1	636.69	0.13
	8715.57	992.62	151.69	4.41	0.34	3919.46	1091.99	0.05
	7346.486	991.91	155	1.25	1.96	556.97	445.8	0.56
	6371.144	951.81	153	0.74	1.68	648.09	872.14	0.62
	5512.459	938.21	150	1.62	0.85	1310.69	912.55	0.21
	4225.453	926.81	148	1.85	3.68	303.74	193.58	0.86
	3279.862	920.89	135	2.48	3.84	279.17	112.78	0.78

Tableau 36. Principaux paramètres hydrauliques au niveau de quelques stations représentatives

Au niveau du tronçon du Sebou en amont de la confluence avec l'oued Agay, la profondeur est très élevée puisqu'elle atteint 10 mètres dans quelques endroits, avec une moyenne de 7.8m le long du tronçon. Ces résultats peuvent être expliqués de point de vue géomorphologique par

l'existante d'une vallée resserrée dans laquelle l'oued est très encaissé. Un débit de l'ordre de 1400 m³/s peut donc facilement provoquer une telle profondeur.

En aval, le comportement hydraulique change radicalement avec le changement de la géomorphologie. Suite à l'ouverture de la vallée et à l'élargissement du lit et de la plaine d'inondation, l'onde de crue est laminée (fig.73), et la profondeur d'eau devient nettement moins importante bien qu'elle reste élevée vue l'ampleur de l'événement.

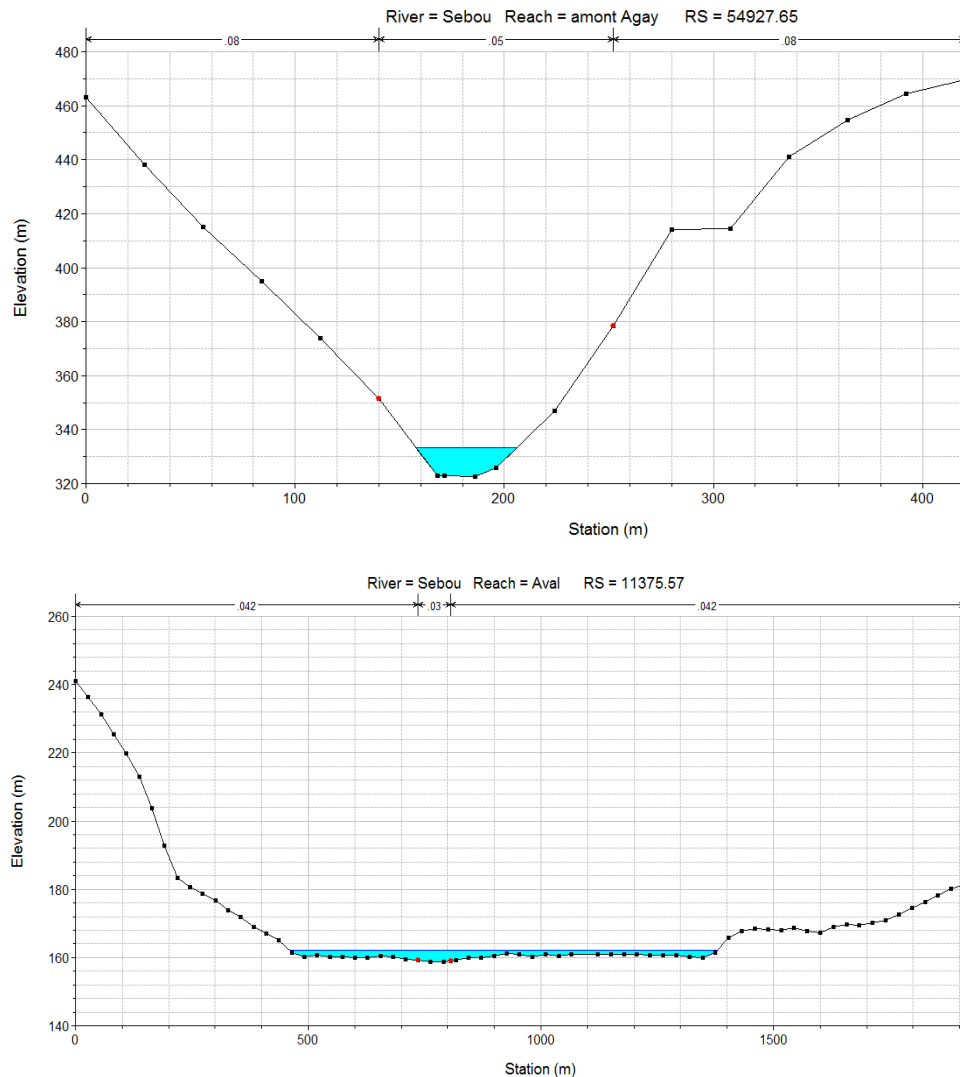


Figure 73. Comparaison de deux profils en travers l'un en amont et l'autre en aval

Ainsi, la tranche d'eau varie généralement entre 2.5 et 4m en amont de Fès (mis à part les trois premiers kilomètres) avec une moyenne de l'ordre de 3.2m, et entre 1.5 et 3m en aval de Fès avec une moyenne de 2.7m.

Il faut signaler qu'à mesure que l'on s'approche des deux ouvrages d'arts représenté dans le modèle, la profondeur croît manifestement (fig.74) témoignant d'un effet d'obstruction et de

stockage qu'ils exercent. Le calcul (tab.36) révèle une profondeur qui dépasse les 6m juste en amont du nouveau pont, et 8m en amont du pont portugais.

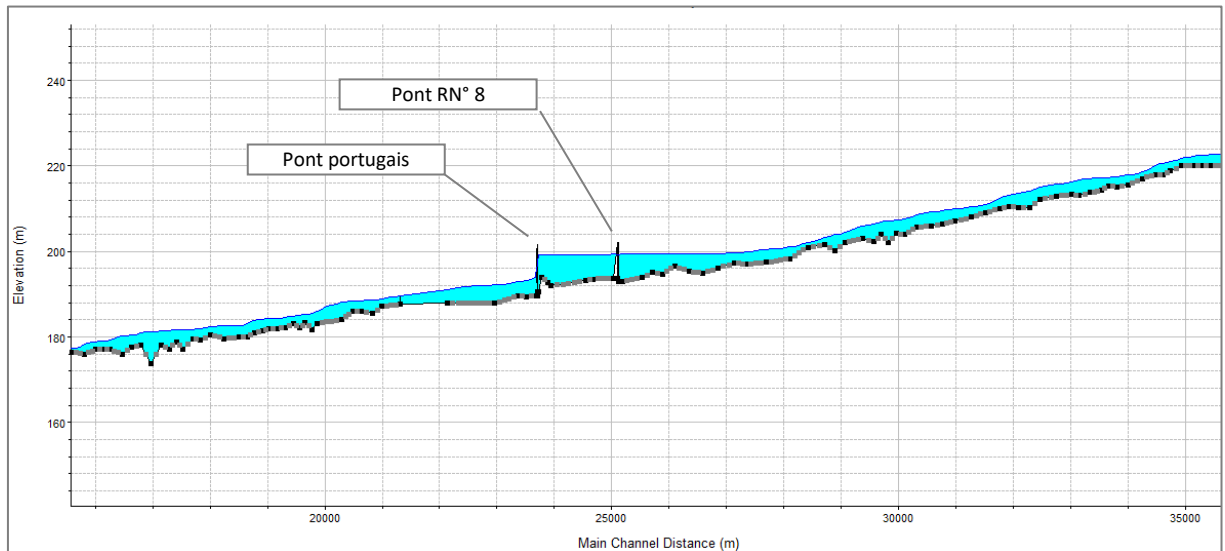


Figure 74. Zoom sur le profil en long montrant l'effet de barrage exercé par les deux ponts introduits dans le modèle

L'examen du tableau des résultats (tab.36) révèle aussi une décroissance de l'amont vers l'aval, du débit maximum transitant le tronçon étudié. Ce qui permet d'apprécier l'effet de laminage exercé par le lit de l'oued.

Ce phénomène s'explique par la variation de la section mouillée et de la vitesse d'écoulement dans le sens longitudinal, puisque celles-ci sont liées au débit par la relation :

$$\text{Débit} = \text{vitesse d'écoulement} \times \text{section mouillée}$$

En se dirigeant vers l'aval, suite à l'ouverture de la vallée de l'oued à la sortie du Moyen Atlas, la section augmente, mais la vitesse diminue considérablement pour deux raisons principales : la diminution de la pente, et la perte de charge hydraulique due à l'étalement de l'onde de crue sur un lit majeur et une plaine d'inondation très larges.

En effet, les résultats de la simulation (tab. 36) présentent des vitesses très élevées sur le tronçon du Sebou en amont d'Agay, pouvant dépasser 5 m/s par endroit. Elles deviennent progressivement faibles au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'aval. En s'approchant des deux ponts, la vitesse diminue fortement pour atteindre 0.3 à 0.6 m/s. Par la suite l'écoulement poursuit vers Dar El Arsa avec des vitesses modérées fluctuant généralement entre 1 et 3 m/s.

Afin de visualiser la propagation de l'onde de crue lors de l'événement étudié, nous avons superposé dans un seul graphique (fig.75) des hydrogrammes calculés au niveau de trois stations différentes du tronçon :

- En amont, à la sortie du barrage Allal El Fassi ;
- Au niveau du pont portugais ;
- Et en aval, au niveau de la station Dar El Arsa.

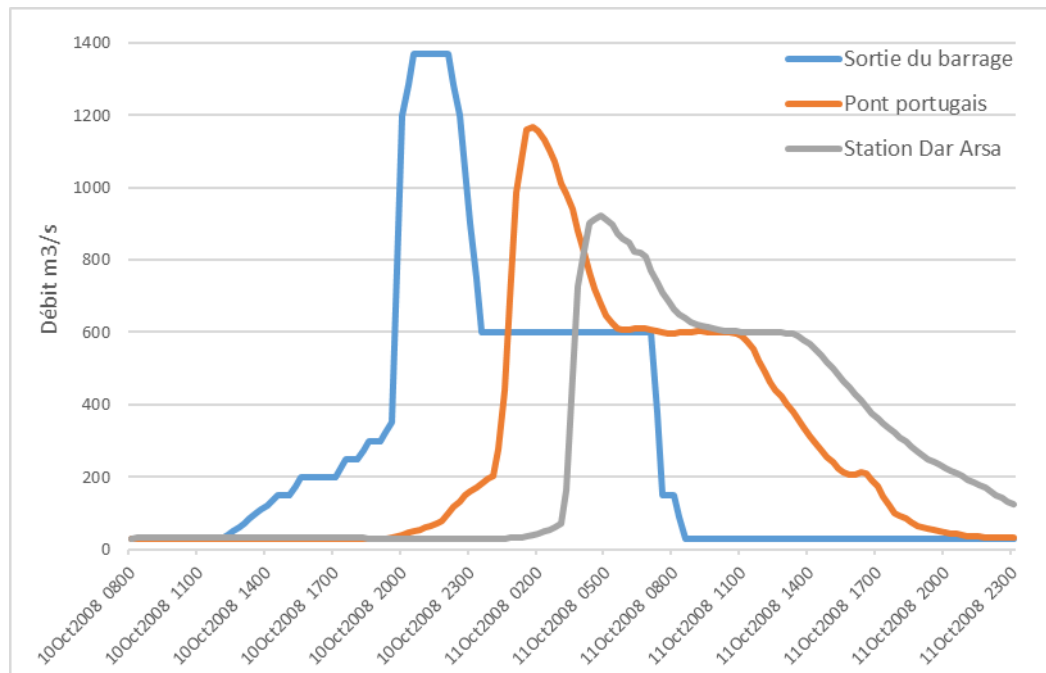


Figure 75. Hydrogrammes dans trois stations de l'oued Sebou montrant la propagation de l'onde de crue du 10-11/10/2008

La comparaison des trois hydrogrammes de crue permet de constater un laminage exercé par le lit de l'oued. Le débit maximal de 1370 m³/s sorti du barrage Allal El Fassi s'atténue pour devenir 1167 m³/s au niveau du pont portugais, et 920 m³/s au niveau de la station Dar El Arsa. Soit un coefficient de laminage total d'environ 0.67.

D'autre part, l'analyse des trois hydrogrammes montre que l'onde de crue n'a nécessité que 5 heures pour se propager entre le barrage Allal El Fassi et le pont portugais, et 3 heures entre le pont et la station hydrologique de Dar El Arsa. Soit un temps de propagation total record de l'ordre de 8 heures sur le tronçon étudié de l'oued Sebou d'environ 60 km.

4. Cartographie des zones inondables

Le profil d'eau issu de la modélisation hydraulique de l'événement du 10-11/10/2008 a été exploité sous ARC-GIS afin de délimiter les zones inondées. Le résultat obtenu est illustré dans la carte de la figure 76.

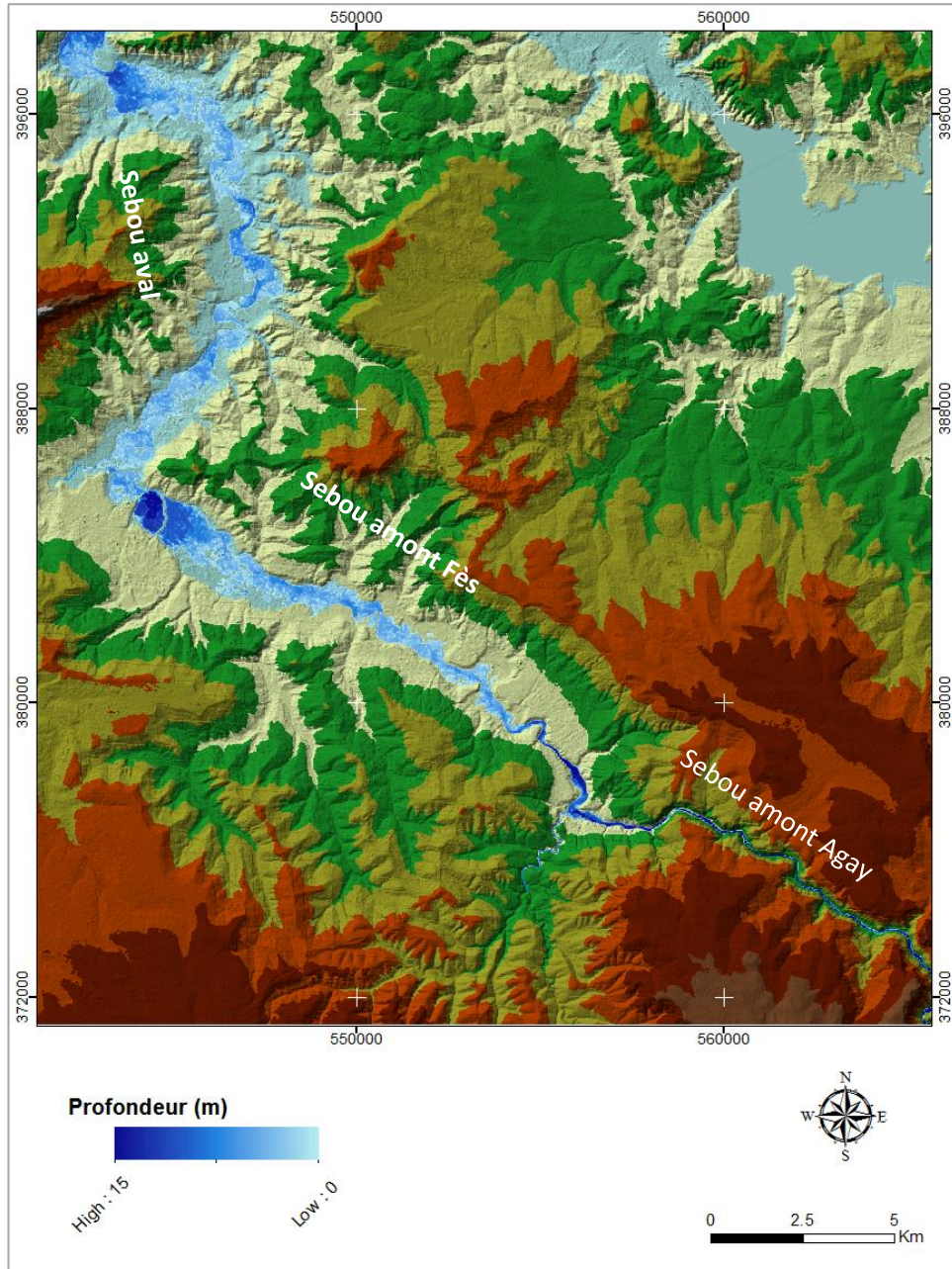


Figure 76. Extension des zones inondables correspondantes à la crue d'Octobre 2008

- Le tronçon du Sebou en amont de l'oued Agay

La propagation de la crue se fait sans aucun débordement dans la partie encaissée située entre le barrage Allal El Fassi et la confluence avec l'oued Agay. La surface d'eau varie généralement

entre 20 et 50 mètres de largeur sur ce tronçon, à l'exception des zones de confluence avec quelques tributaires, là où la largeur devienne plus importante. L'exemple le plus important est celui de Zaouiat Sidi Salem en aval, où des terrains agricoles sont inondés (fig.77).

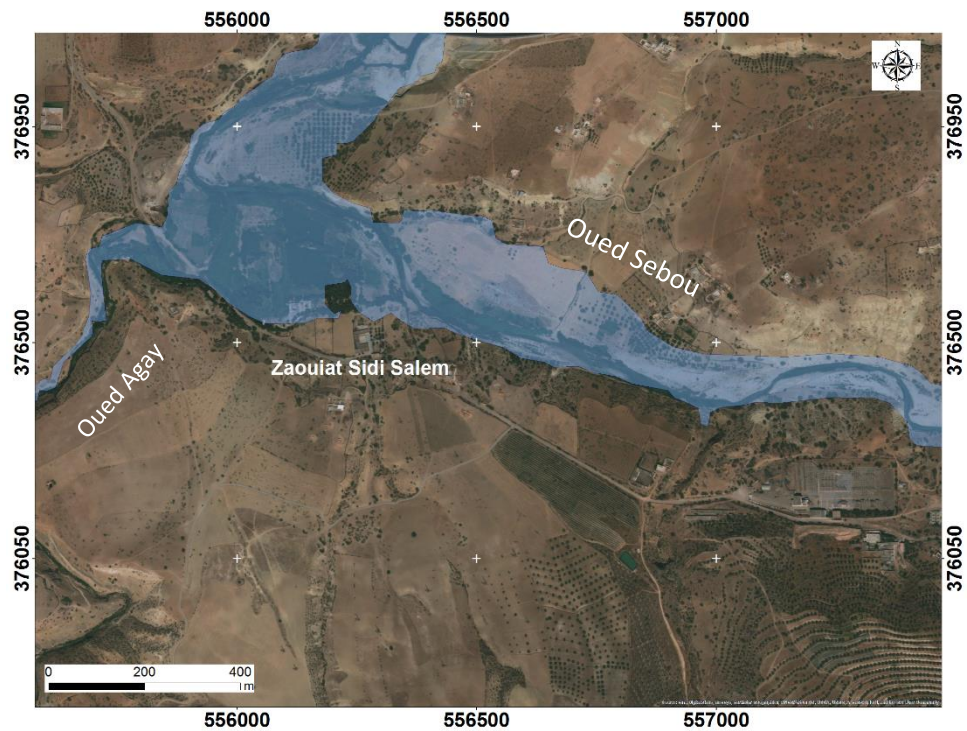


Figure 77. Terrain agricole inondé en aval au niveau de la confluence du Sebou et Agay

- Le tronçon du Sebou en amont de l'oued Fès

Dans cette partie, la vallée de l'oued Sebou s'ouvre progressivement pour devenir évasée, donnant naissance à des débordements qui ont couvert une superficie totale de l'ordre de 8.4 km², affectant ainsi, plusieurs infrastructures, douars et terrains agricoles.

La figure 78 montre que la station de pompage de l'ONEP sur l'oued Sebou a été submergée. En outre, la crue a inondé plusieurs des terrains agricoles, douars et habitats dispersés sur les berges de l'oued, dont les principaux sont : Douar El Mesdoura, El Mekhalif, Sidi Ali Ben Ahmed, Ouled Rhefir et Bled Moulay Idriss (fig.79).

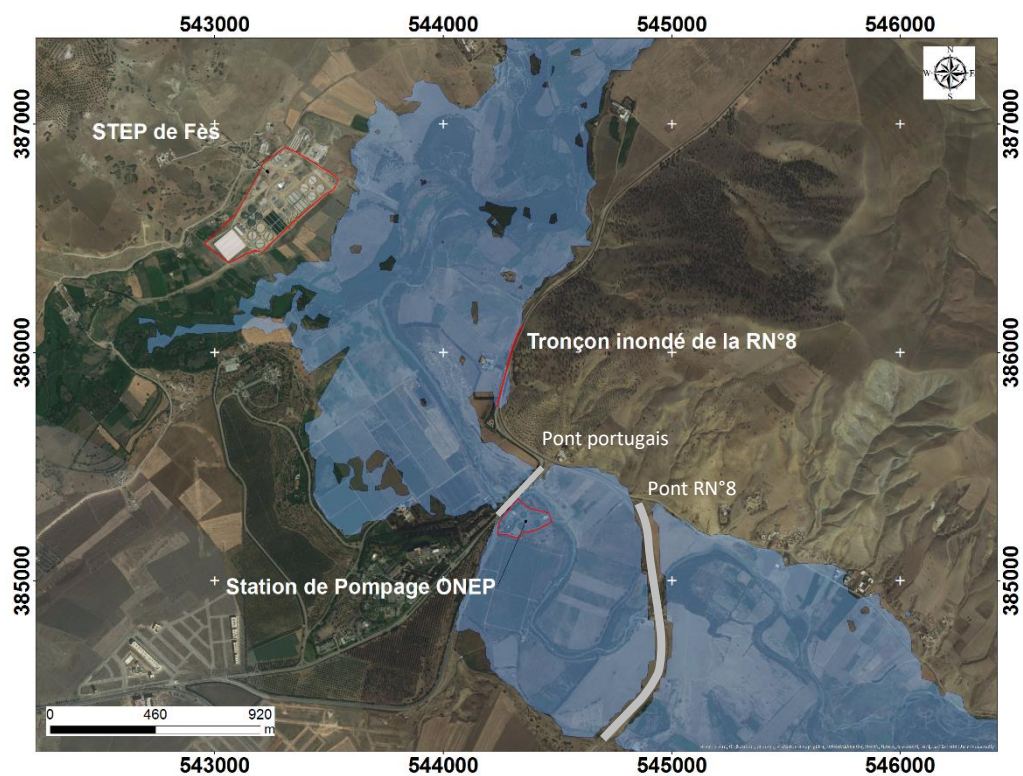


Figure 78. Inondation de la station de pompage ONEP, et de la RN°8

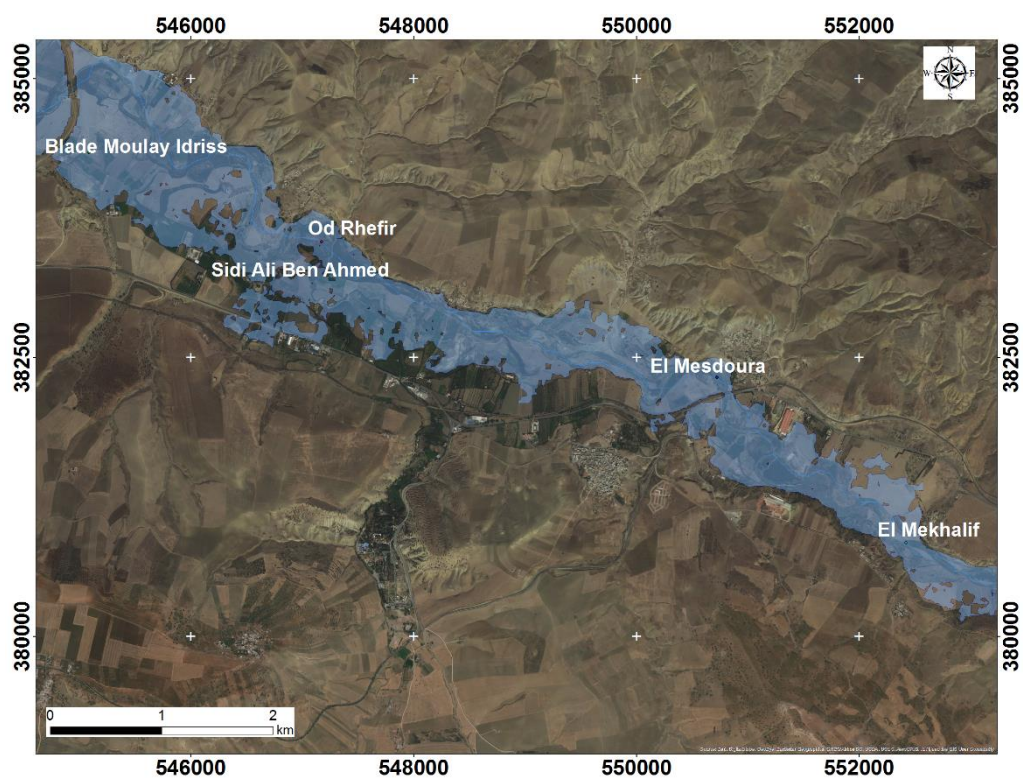


Figure 79. Douars et terrains agricoles inondés en amont de Fès

- Le tronçon du Sebou aval

La vallée du Sebou en aval de la ville de Fès est caractérisée par une activité agricole intense, installée sur une plaine d'inondation très vaste, dans laquelle la rivière est méandriforme. Situation qui favorise le débordement en cas de crue. L'analyse de la carte des zones inondables suite à la propagation de l'onde de crue du 10-11/10/2008 a révélé que les eaux de l'oued ont inondé une superficie de 12.4 km². Les Ouljats situées en aval de Fès ont été totalement submergées. Plusieurs produits agricoles ont été endommagés, notamment au niveau de Bled Rhabet Blal, Jenane Kessous, Jenane El Hablat, Bled Bel Assel et Dar Cheikh Harazem (fig.80).

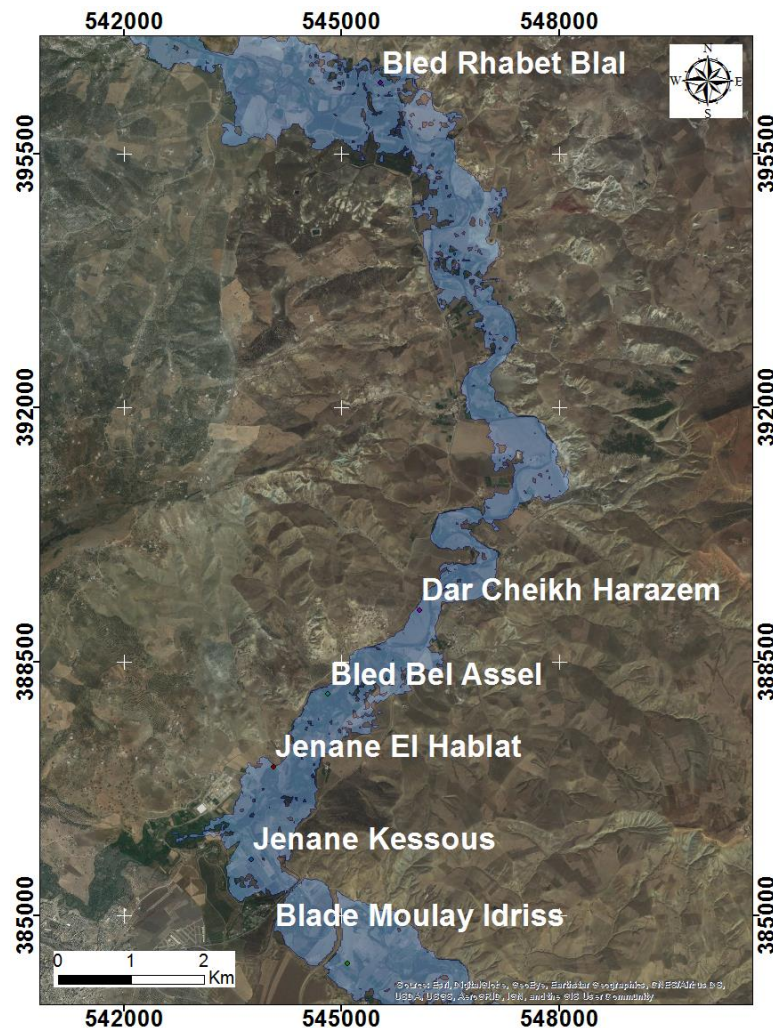


Figure 80. Douars et terrains agricoles inondés en aval de Fès

D'autre part, le débordement des eaux de l'oued Sebou sur la rive droite a touché la route nationale N°8 reliant Fès à Taounate, alors que la station de traitement des eaux polluées sur la rive gauche se situe en dehors de l'extension des zones inondables (fig.78).

Conclusion

En complément du modèle hydrologique, Le modèle hydraulique élaboré à l'aide de HEC-RAS permet de simuler la propagation de l'onde de crue au niveau réseau hydrographique principal. Ainsi, L'étude de la propagation de la crue de 10-11 octobre 2008 en aval du barrage Allal El Fassi a révélé qu'il s'agissait d'un événement exceptionnel. Le temps de propagation dans les 60 kilomètres entre le barrage et la station hydrologique Dar El Arsa n'a pas dépassé 8 heures, la vitesse de l'écoulement a atteint plus de 5 m/s, alors que la profondeur maximale a dépassé les dix mètres en amont.

La modélisation hydraulique a permis de calculer le profil d'eau correspondant à la propagation de la crue étudiée, celui-ci a été exploité dans un SIG pour délimiter les zones inondables. Ainsi, nous avons mis en évidence, l'exposition de plusieurs infrastructures, douars et terrains agricoles au risque d'inondation.

L'exploitation de ce genre de résultats issus de la simulation hydraulique et de systèmes d'information géographique, peut contribuer considérablement à établir des modes d'intervention pour lutter contre les débordements qui peuvent persister malgré les efforts entretenus par les services de l'agence du bassin hydraulique de Sebou et les autres intervenants, à cause des pluies et des crues exceptionnelles enregistrées au cours des dernières années.

Cependant, l'élaboration de documents pertinents et fiables nécessite en plus de la maîtrise de la discipline scientifique et des outils informatiques, la disponibilité de données informatiques de haute résolution et de haute qualité qui coûtent encore très cher (modèle numérique de terrain, images satellitaires, cartes topographiques, cartes d'utilisation des sols...), de données hydrologiques et hydrauliques complètes et à jour, sans oublier l'acquisition des dernières versions de logiciels.

Conclusion générale

Conclusion générale

La récurrence des phénomènes hydroclimatiques extrêmes, notamment en matière de précipitations, crues, inondations et sécheresses, constitue un caractère naturel de la variabilité du climat. Cependant, la fréquence d'apparition de ces phénomènes est en hausse à cause des changements climatiques de plus en plus mis en évidence par les études spécialisées en la matière. Cette situation exige l'amélioration et la modernisation des méthodes de prévision, de prévention et de gestion de ces aléas.

Principaux résultats

Le travail de modélisation mené lors de cette étude a permis d'investiguer la problématique des crues dans un bassin d'une grande étendue, et d'une importance capitale, vu ses caractéristiques hydroclimatiques.

Une approche aussi bien quantitative que qualitative a été suivie. Ainsi, l'élaboration d'un modèle pluie-débit a permis d'aborder la question de la genèse des crues et leur gestion à l'échelle du bassin du Sebou. Les simulations hydrologiques et hydrauliques effectuées ont permis d'analyser le fonctionnement du bassin, en se basant sur la quantification des processus hydroclimatiques impliquées dans la réponse aux événements météorologiques étudiés.

La modélisation hydrologique s'est basée sur la plateforme HEC-HMS assistée par le logiciel ARCGIS. Elle a abouti à l'élaboration d'un modèle physique, semi-distribué et événementiel, bien calé et validé avec deux événements vécus appartenant à l'année hydrologique 2009/2010.

Grâce aux différentes simulations effectuées, Le modèle nous a conduit à décrire les événements choisis avec un taux d'erreur acceptable, permettant de comprendre et de caractériser le comportement hydrologique des différents sous-bassins de Sebou.

Les paramètres issus de l'optimisation ont parvenu sensiblement à améliorer la performance du modèle. Ainsi, pour la plupart des stations, nous avons arrivé à reproduire globalement les hydrogrammes de crues sous leurs différents aspects, notamment le débit de pointe et le volume total, avec un taux d'erreur acceptable.

Les résultats ont montré que le bassin de l'Ouergha est à l'origine de la majeure partie des apports d'eau de la plaine du Gharb. Sa contribution durant les deux événements simulés de décembre 2009 et janvier-février 2010 était respectivement de 47% et 62%. Ce qui nécessite le renforcement de la capacité de stockage par d'autres barrages.

Le travail de modélisation hydraulique quant à lui, s'est basé sur l'code HEC-RAS assisté aussi par ARCGIS. Il a conduit à l'élaboration d'un modèle unidimensionnel au niveau du Sebou en aval du barrage Allal El Fassi sur une longueur totale de 60 kilomètres.

Le modèle hydraulique élaboré a montré que le temps de propagation de la crue de 10-11 octobre 2008, n'a pas dépassé 8 heures pour atteindre la station hydrologique Dar El Arsa. La

vitesse d'écoulement a atteint plus de 5 m/s, alors que la profondeur maximale a dépassé 10m en amont.

La modélisation hydraulique a permis de calculer le profil d'eau correspondant à la propagation de la crue étudiée, celui-ci a été exploité dans un SIG pour délimiter les zones inondables. Ainsi, nous avons mis en évidence, l'exposition de plusieurs infrastructures, douars et terrains agricoles au risque d'inondation, dont la station de pompage de l'ONEP sur l'oued Sebou et la route nationale N°8.

Nous en concluons donc, que les différents dispositifs hydrologiques, hydrauliques et SIG élaborés au cours du présent travail, peuvent être considérés comme un modèle global, qui servira, une fois complété et amélioré, comme outil de prévision des crues et d'évaluation de leurs impacts. On produira ainsi l'information nécessaire, à court terme, à la gestion de l'événement concerné, et à long terme, à la prise de décision en ce qui concerne les aménagements à envisager.

Critiques

L'approche basée sur la modélisation couplée aux SIG constitue, dans notre propre conviction, la solution la plus efficace et surtout la plus efficiente, pour cerner la multitude, la diversité et la variabilité des paramètres et de données à gérer dans un espace géographique, qui peut être parfois très large comme le cas ici.

Cependant, nombreuses sont les critiques qui peuvent interroger la fiabilité des résultats issus d'une telle approche. Ce sont souvent ces reproches qui justifient les débats entre quelques hydrologues optant pour les méthodes classiques sûres, et ceux qui préfèrent suivre le rythme du développement des moyens et méthodes, et en profiter pour franchir des limites non abordables par les approches classiques.

En bref, nous pouvons classer ces critiques en deux catégories :

- La première catégorie touche la modélisation et les modèles mathématiques en eux-même, c.-à-d. leurs propriétés intrinsèques. Le plus important reproche dans ce sens, réside dans la multitude de paramètres à estimer, et dont le cumul de l'erreur peut parfois affecter considérablement le résultat. C'est le cas des modèles objets d'un mauvais calage.
- La deuxième catégorie concerne l'estimation et la quantification des paramètres décrivant les processus naturels à introduire dans le modèle. A titre d'exemple, le caractère spatio-temporel très aléatoire des phénomènes météorologiques (pluies, évaporation...), ou encore l'hétérogénéité des sols et de leur couverture qui implique l'utilisation de valeurs d'infiltration approximatives.

Perspectives

Le travail de modélisation élaboré et présenté dans le cadre de cette thèse, constitue un essai de renforcement et de modernisation des méthodes utilisées actuellement pour prévoir et gérer les crues. Il s'est basé sur une approche consistante qui a permis de traiter une base de données très riche, en utilisant des logiciels performants.

Cependant, le fruit de cet effort peut être amélioré par la suite, en acquérant des données topographiques et hydroclimatiques plus précises, et des paramètres plus fiables. Nous pourrions ainsi aborder plusieurs perspectives :

- L'exploitation du modèle hydrologique élaboré à travers plusieurs simulations événementielles et continues en vue de l'optimisation des opérations de gestion et de planification des ressources en eau à l'échelle du bassin.
Des aménagements hydrauliques de moyen et grande envergure peuvent être proposés en fonction des chiffres simulés, pour lutter contre les inondations, augmenter la capacité de mobilisation, créer une solidarité entre les zones excédentaires et celles déficitaires (galerie de transfert, adduction de l'eau potable ...) ;
- L'étude de différents scénarios pour évaluer l'impact des changements climatiques, l'impact de l'extension de l'urbanisation, le changement de l'occupation/utilisation du sol ... ;
- La simulation de la réponse hydrologique du bassin aux pluies de différentes périodes de retour, et la cartographie des zones inondables qui en résultent ;
- La simulation du fonctionnement hydrologique du bassin en introduisant les barrages projetés et en cours de construction ;
- Le renforcement du modèle et son alimentation par les données de télémesures en vue de la prévision des crues en temps réel.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- ABHS, (2005), Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intégrée des ressources en eau du bassin de Sebou (PDAIRE).
- ABHS, (2011). Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intégrée des ressources en eau du bassin de Sebou, Note de synthèse. 103p.
- ABHS, (2013). Rapport sur l'état des lieux des ressources en eau du bassin de Sebou. 108p.
- AHMAMOU M. (2002). Evolution et dynamique sédimentaires des carbonates fluvio-lacustres Plio-quaternaires dans le Saïs de Fès (Maroc). Thèse de Doctorat d'Etat, Université Mohamed V, Rabat, 230p.
- AMRAOUI F. (2005). Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : cas du Lias de la plaine du Saïs et du Causse Moyen atlasique tabulaire (Maroc). Thèse de Doctorat d'État, Université Hassan II, Ain Chock, 237p.
- ANDRIEUX J. (1971). La structure du Rif central. Étude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un tronçon de la chaîne alpine. *Notes et Mémoire du Service Géologique du Maroc*, n°235, 155p.
- BAMOUMEN H., AARAB El M. & SOULAIMANI A. (2008). Evolution tectono-sédimentaire et magmatique des bassins Viséen supérieur d'Azrou-Khénifra et des Jebilet orientales (Meseta marocaine). *Estudios Geológicos*, 64,2 : 107-122.
- BAUDELLOT S., COLIN J.-P. & OUARHACHE D. (1986). Le niveau sédimentaire associé aux basaltes triasiques sur la bordure septentrionale du Causse d'El-Hajeb (Maroc): données palynologiques et micropaléontologiques (Ostracodes). *Rev. Paléobiol*, 5, 21: 281-287.
- BENSAID M. (1979). L'Ordovicien supérieur, le Silurien et le Dévonien dans l'Est du Maroc central. *Mines, Géologie et Energie*. Rabat, n°46: 83-86.
- BENSAID M., JANVIER P., TERMIER H. & TERMIER G. (1980). Présence du Westphalien inférieur dans la série du Fourhal (Maroc central). *C.R. Acad. Sc. Paris*, n°290: 1329-1332.
- BENTAYEB A. & LECLERC C. (1977). Le Causse moyen atlasique, in Ressources en Eaux du Maroc, Tome 3 : Domaines atlasique et sud-atlasique. *Notes et Mémoire du Service Géologique du Maroc* n°231: 37–66.
- BOUABDELLI M. (1994). Tectonique de l'Est du Massif hercynien central (zone d'Azrou-Khénifra), in Géologie du Maroc central et de la Meseta orientale. *Bulletin de l'Institut Scientifique*. Rabat, n°18: 145-168.

- BOUABDELLI M. & PIQUE A. (1996). Du bassin sur décrochement au bassin d'avant-pays : dynamique du bassin d'Azrou-Khénifra (Maroc hercynien central). *Journal of African Earth Sciences*, n°23: 213-224.
- BOUMIR KH. (1990). Paléoenvironnements de dépôt et transformations post-sédimentaires des Sables fauves du Bassin du Saïs (Maroc). Thèse. Université Nancy I, 176p.
- Brocca L., Melone F., Moramarco T. & Morbidelli R. (2009a). Antecedent wetness conditions based on ERS scatterometer data. *J Hydrol*, n°364: 73–87.
- Brocca L., Melone F., Moramarco T. & Singh V.P. (2009b). Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall-runoff modeling. *J Hydrol Eng*, n°14: 153–165.
- BRUNNER G. (2016 a). HEC-RAS, River Analysis System User's Manual Version 5.0. US ARMY CORPS OF ENGINEERS HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC), 962p.
- BRUNNER G. (2016 b). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US ARMY CORPS OF ENGINEERS HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC), 547p.
- CAILLEUX Y. (1994). Le Cambrien et l'Ordovicien du Maroc central méridional. *Bull. Inst. Sci.*, Rabat, n° 18 : 10-30.
- CAMERON T. & ACKERMAN P.E. (2011). HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS® User's Manual Version 4.3.93. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC), 244p.
- CHALOUAN A. (1986). Les nappes Ghomarides (Rif Septentrional, Maroc), un terrain varisque dans la Chaîne Alpine. Thèse Doctoral, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 317p.
- CHALOUAN A., MICHARD A., FEINBERG H., MONTIGNY R. & SADDIQI O. (2001). The Rif Mountain Building (Morocco): a new tectonic scenario. *Bulletin de la Société géologique*. France, 172, 5: 603-616.
- CHALOUAN A. & MICHARD A. (2004). The Alpine Rif Belt (Morocco): A case of Mountain building in a subduction-subduction-transform Fault Triple Junction. *Pure and Applied Geophysics*, n°161 : 489-519.
- CHAOUNI A. (1996). Apport des données Landsat M.S.S., Radar ERS1-SAR ; modèles numériques de terrain ; données morphométriques et structurales de terrain à la compréhension de la cinématique des principales failles de la péninsule de Tanger depuis l'Oligocène supérieur jusqu'à l'Actuel (Rif septentrional, Maroc). Thèse D.E.S., Université Mohammed V, Rabat, 295p.

- CHARRIERE A. (1990). Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinentale : le Moyen Atlas au SE de Fès (Maroc), Thèse de Doctorat d'Etat, Toulouse, 589p.
- CHOUBERT G. (1965a) - L'étage Moghrébien dans le Maroc occidental. 6^e Congr. I.N.Q.U.A. Madrid. Barcelone, 1957. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, t. 25, n°185: 47-55.
- CHOUBERT G., (1965b). Evolution de la connaissance du Quaternaire au Maroc. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, t.25, n°185: 9-27.
- CHOW V. T. (1959). Open-channel hydraulics. *McGraw-Hill Book Company*, New York, 680p.
- CHOW V. T. (1964). Handbook of Applied Hydrology. *McGraw-Hill Book Company*, New York, 1495p.
- CIRAC P. (1985). Le bassin sud-rifain occidental au Néogène supérieur. Evolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours d'une phase de comblement. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Bordeaux I, France, 283p.
- COLO, G. (1961). Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen-Atlas septentrional. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, n°139. 226p.
- COMBE M. (1975). Le bassin Gharb-Mamora et les petits bassins septentrionaux des oueds Dradère et Souieire, in Ressources en eau du Maroc, Tome 2 : plaines et bassin du Maroc Atlantique. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, n°231: 93–145.
- COULIBALY P., ANCTIL F. & BOBÉE B. (1999). Prévision hydrologique par réseaux de neurones artificiels : état de l'art. *Revue canadienne de génie civil*, vol. 26: 293–304.
- CUNGE J. A. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, 7,2 : 205-230.
- DIDON J. et al. (1973). Homologie entre les deux rives du détroit de Gibraltar. *Bulletin de la Société géologique*. France, Paris, (7), T. XV, n°2 : 77-105.
- DRIDRI A. & FEDAN B. (2001). Rôle du contrôle structural dans la mise en place du réseau hydrographique de Sebou et d'Inaouène entre Fès et Oued Amlil (Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Section Sciences de la Terre*, Rabat, vol. 23 : 67-77.
- EI FELLAH IDRISSE B., HINAJE S. & LAHRACH A. (2005). Influence de la tectonique cassante sur les caractéristiques hydrogéologiques des réservoirs du Causse de Sefrou (Moyen Atlas, Maroc). *18ème Colloque International des Bassins Sédimentaires Marocains*, Fès.

- EI FELLAH IDRISSE B., HINAJE S. & LAHRACH A. (2007). Rôle hydrogéologique des fractures et leur influence sur la répartition des ressources en eau : cas des bassins de Sefrou et de l'Anoceur (Moyen Atlas, MAROC). *4^{ème} Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement*. Faculté des Sciences, Tétouan.
- FASSI-FIHRI O. & FESKAOUI M. (1998). Etude hydrogéologique de l'aquifère liasique du couloir Fès-Taza (Maroc). *Karst Hydrology, IAHS Publ.* n°247 : 99-116.
- FEDAN B. (1985). Naissance et évolution d'une plate-forme carbonatée : l'exemple du Moyen Atlas (Maroc) au cours du Lias; comparaisons avec les régions voisines. *Bulletin de l'Institut Scientifique*. Rabat, n°9 : 43-65.
- FEDAN B. (1989). Evolution géodynamique d'un bassin intraplaque sur décrochements : le Moyen-Atlas durant le Méso-Cénozoïque. Thèse Doct. Es-Sciences, Fac. Sci., Rabat, 338 p., et *Trav. Inst. sci. sér. Géol. et Géogr. phys.*, 18, 144p.
- FELDMAN A.D. (2000). HEC-HMS, Hydrologic Modelling System Technical Reference Manual. US ARMY CORPS OF ENGINEERS HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC), 145p.
- FRANCOU J. & RODIER J. A. (1967). Essai de classification des crues maximales observées dans le monde, *Cahiers de l'ORSTOM*, série Hydrologie, vol. IV, n° 3.
- GEOFFROY J. (2007). Modélisation des paramètres morphogènes du cours inférieur de la Bruche (Bas-Rhin) et analyse de la sensibilité du modèle HEC-RAS à la qualité des données topographiques. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg ,85p.
- HABERT J. (2016). Prévisions des crues en temps réel sur le bassin de la Marne : assimilation in situ pour la correction du modèle hydraulique mono-dimensionnel Mascaret. Thèse Doctoral, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 218p.
- HOEPFFNER C. (1994). La zone Midelt-Tazekka-Bsabis, le domaine interne de la chaîne varisque et ses relations avec le Massif hercynien central, in Géologie du Maroc central et de la Meseta orientale, *Bulletin de l'Institut Scientifique*. Rabat, n°18 : 169-191.
- HOEPFFNER C. (1987). La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc. Thèse Doctorat Science, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 276p.
- HORRITT M.S. & BATERS P.D. (2002). Evaluation of one-dimensional and two-dimensional models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, n°268 : 87–99.
- KORNPORST J. (1974). Contribution à l'étude pétrographique et structurale de la zone interne du Rif (Maroc septentrional). *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, Rabat, n°251, 256p.

- LAADILA M. & DELFAUD J. (1989). Place des stades successifs de dolomitisation dans l'évolution d'une plate-forme carbonatée soumise au rifting téthysien : le Lias inférieur du Moyen Atlas. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 309 : 2101-2104.
- LEPOUTRE B. & MARTIN J. (1967). Le causse moyen atlasique. *Les Cahiers de la recherche agronomique*, n°24 : 207-226.
- MARTIN J. (1981). Le Moyen Atlas central étude géomorphologique. *Notes et Mémoires du Service géologique*, n°258 : 1-447.
- MEYLAN P. & MUSY A. (1998). Hydrologie fréquentielle, *HGA, Bucarest*, 413p.
- MICHARD A. (1976). Eléments de géologie marocaine. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, n° 252, 408p.
- MICHARD A., SADDIQI O., CHALOUAN A. & FRIZON DE LAMOTTE D. (2008). Continental evolution: The geology of Morocco: Structure, stratigraphy, and tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean triple junction. *Lecture Notes in Earth Sciences*, Berlin, vol. 116, 424p.
- MICHARD A., CHALOUAN, A., MONTIGNY R. & OUAZZANI-TOUHAMI M., (1983). Les nappes cristallophylliennes du Rif (Sebtides, Maroc), témoins d'un édifice alpin de type pennique incluant le manteau supérieur, *C. R. Acad. Sci. Paris, Série II*, t.296 : 1337–1340.
- MORIN P. (1960). Les marbres d'origine métamorphique du Maroc central (Géologie et problèmes d'exploitation). *Mines, Géologie et Energie*, n°11 : 31-39.
- MORIN P. (1962). Les séries volcanosédimentaires cambriennes du Maroc central. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 254 : 2396-2398.
- MUSY A. (1998). Hydrologie Appliquée. *HGA, Bucarest*, 366p.
- MUSY A. (2016). *Cours Hydrologie générale* - prof. André Musy. [online] Echo2.epfl.ch. Available at: <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre11/main.html> [Accessed 13 Jan. 2016].
- OMM (2006). Organisation météorologique mondiale. ISBN 92-63-21008-X. *Gestion intégrée des crues : aspect sociaux et participation des parties prenantes*, n°1008,106p.
- OMM (2011). Organisation météorologique mondiale. ISBN 978-92-63-21072-2. *Manuel sur la prévision et l'annonce des crues*, n°1072,154p.
- OMM (2012). Organisation météorologique mondiale. ISBN 978-92-63-03385-8. *Glossaire International d'Hydrologie*, n°385,461p.

- OUALI H., BRIAND B., BUCHARDON J.L. & CAPIEZ P. (2003) : Le volcanisme cambrien du Maroc Central : implications géodynamiques. *C. R. Géosciences*, 335 : 425-433.
- OUARDA T. B. M. J., GINGRAS H., BOBEE B. & LEMONNIER M. (2001). Synthèse des méthodes simples de régionalisation. *Rapport de recherche (R600). INRS-Eau, Québec*.
- PAPPENBERGER P., MATGEN P., BEYEN K.J., HENRY J.B., PFISTER L. & DE FRAIPONT P. (2006). Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions. *Water Resources*, 29 : 1430–1449.
- Partenariat mondial pour l'eau (2000). La gestion intégrée des ressources en eau. Partenariat Mondial de l'Eau / Comité Technique Consultatif. TAC Background Papers. No.4. Stockholm.
- PIQUE A. (1994). Géologie du Maroc. *Editions PUMAG*, Marrakech. 284p.
- PIQUE A. & MICHARD A. (1981). Les zones structurales du Maroc hercynien. *Sciences Géologiques. Bulletin*, n°34: 135-146.
- PIQUE A. & MICHARD A. (1989). Moroccan Hercynides; a synopsis; The paleozoic sedimentary and tectonic evolution at the Northern margin of West Africa. *American Journal of Science*, 289: 286-330.
- PIQUE A., SOULAIMANI A., HOEPFFNER C., BOUABDELLI M., LAVILLE E., AMRHAR M. & CHALOUAN A. (2007). Géologie du Maroc (nouvelle édition). *Editions GEODE*, Marrakech, 287 p.
- PONCE V. M. & YEVJEVICH V. (1978). Muskingum-Cunge method with variable parameters. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 104(HY12), 1663-1667.
- RENARD B. (2010). Détection d'évolutions dans les régimes hydrologiques du bassin du Sebou (Maroc). *Expertise pour l'Institut Royal des Etudes Stratégiques du Maroc (IRES)*, 62p.
- ROCHE P.-A., MIQUEL J., & GAUME E. (2012). Hydrologie quantitative : Processus, modèles et aide à la décision. *Springer Paris*. Paris. 590p.
- SABAOUI A. (1998). Rôles des inversions dans l'évolution méso-cénozoïque du Moyen-Atlas Septentrional (Maroc). L'exemple de la transversale El Menzel – Ribat Al Khayr – Bou Iblane. Thèse de Doctorat d'Etat, Rabat, 410p.
- SABAOUI A. (1987). Structure et évolution alpine du Moyen-Atlas septentrional sur la transversale Tleta des Zerarda –Merhraoua (Sud-Ouest de Taza, Maroc). Thèse de 3ème cycle, Toulouse, 189p.

- SABOL G.V. (1988). Clark unit hydrograph and r-parameter estimation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114/1, 103-111.
- SCHAREFFENBERG W. (2016). HEC-HMS, Hydrologic Modelling System User's Manual Version 4.2.1. US ARMY CORPS OF ENGINEERS HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC), 612p.
- TALTASSE P. (1952). Notes inédit sur l'hydrogéologie des Causses. C.E.H. Services Géologique du Maroc, (1989). Carte géologique du Maroc "Sefrou". *Notes et Mémoire*, N° 354.
- TALTASSE P. (1953). Recherches géologiques et hydrogéologiques dans le bassin lacustre de Fès-Meknès. *Notes et Mémoires du Service géologique*. Maroc, n°115, 300p.
- TERMIER H. (1936). Etudes géologiques sur le Maroc central et le moyen-Atlas septentrional. *Notes et Mémoire du Service et Géologique*. Maroc, Rabat, n° 33, t. 2, pp. 743-1082.
- TEXIER J.-P., LEFÈVRE D., RAYNAL J.-P. (1992). La formation de la Mamora. Le point sur la question du Moulouyen et du Salétien du Maroc nord-occidental. *Quaternaire*, 3, 2 : 63-73.
- Tramblay Y., Bouvier C., Martin C., Didon-Lescot J.F., Todorovik D. & Domergue J.M. (2010). Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modelling. *J Hydrol*, n°387 : 176–187.
- WERNER M.G.F. (2000). Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model. *Physical Chemical Earth*, vol. 26, n°7 et 8 : 517-522.
- WERNLI R. (1979). Le Pliocène de la Mamora (Maroc) : Stratigraphie et foraminifères planctoniques. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 72/1. 119-143.
- ZERYOUHI I. (1977). Le Moyen Atlas plissé, in Ressources en Eau du Maroc, Tome 3 : Domaines atlasique et sud-atlasique. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, n° 231 : 67-88.

Annexes

Annexes

Annexe 1. Postes pluviométriques avec les pluies moyennes annuelles (1973-2003) utilisées pour élaborer la carte des isohyètes

Poste	Province	N° du poste	X (km)	Y (km)	Z (m)	P.moy.an (mm)
Aguelmam Sidi Ali	Khénifra	198	537.81	275.99	2078	437.1
Ain aicha	Taounate	236	564.82	429.03	230	553.2
Ain Bittit	Meknes	6405	519.7	355	760	527.9
Ain timdrine	Sefrou	576	577.92	350.51	642	415.4
Ait Khabbach	Boulemane	748	557.12	314.64	1478	362.4
allal alfassi	Sefrou	876	566.58	370.44	430	354.4
Asfalou	Taounate	1250	610.78	448.73	760	726
Azib soltane	Sidi Kacem	1424	491.79	413.69	45	488.5
Azzaba	Sefrou	1496	569.7	359.6	516	366.2
Bab echhoub	Taza	1523	622.59	406.6	402	667.5
Bab louta	Taza	1548	598.31	380.07	563	378
Bab marzouka	Taza	1564	615.8	400.83	368	609
Bab ouender	Taounate	1568	579.53	440.04	312	768.7
bab taza	Chefchaouen	1586	517.75	495.23	902	1219
Beni Hitem	Taza	1726	631.83	412.78	508	532
Boured	Taza	2338	617.55	458.87	815	528.5
Dar arssa	Fès	2764	543.34	399.73	138	534.3
dar hamra	Sefrou	2778	592.28	352.66	830	497.1
DGH Fès	Fès	3817	536.63	381.85	400	474.7
el kanssera	Khémisset	3401	452.93	382.64	110	369.2
El Kouchet	Taza	3451	583.61	394.56	230	460.5
EL malha	Chefchaouen	5212	532.17	480.83	340	1089
el mers	Boulemane	5824	593.19	318.71	1210	442.6
Elmjaaa	Ouezzane	5128	513.55	443.13	92	601.2
galez	Taounate	3924	555.35	439.9	214	694.9
Garde Sebou	Kénitra	1612	406.81	432.5	15	559.1
Had kourt	SidiKacem	4104	470.34	439.9	30	493.9
Hajiria	Taounate	4148	552.85	432.5	200	561.1
Hajra	Meknès	5844	508.86	382.76	215	459.5
Idriss Ier	Taounate	4250	559.82	395.99	200	473
Jebel Outka	Taounate	4626	553.7	459.79	1115	1673.1
Kenitra	Kénitra	4782	391.5	406.9	5	576.2
kharouba	Taounate	4804	496.65	458.14	180	880.9
khenichet	Sidi Kacem	4868	473.63	426.92	15	506.4
Lalla mimouna	Kenitra	5036	435.08	472.59	15	571.7
Maaziz	Khémisset		415.1	341.9	215	439.9
My Ali Cherif	Khénifra	5520	434.65	459.05	11	534
Oueljet Soltane	Khémisset	6170	456.3	338.05	302	439.6

Oulad yaacoub	Ouezzane	6153	498.86	460.21	340	849.1
Oulmes	Khémisset		442.5	314.5	1138	718
Pont de m'dez	Sefrou	6248	581.45	341.77	725	320.3
Pont de sebou RP26	Fès	6272	523.19	412.21	85	473.3
Pont de sker	Taounate	6288	573.18	441.99	315	748.9
Rabat	Rabat		366	380.6	26	558.9
Rafsai	Taounate	6400	542.82	446.01	180	851.1
sahla	Taounate	6500	566.9	440.78	380	828.1
sefrou	Sefrou	6562	549.37	359.2	840	553.4
sidi chahed	Fès	6769	507.42	389.72	190	467.4
sidi mokhefi	Ifrane	6924	507.72	311.78	1075	524.3
souk el had rdom	Sidi Kacem	7188	466.1	410.81	34	410.8
tabouda	Taounate	7283	524.02	461.74	201	695.8
Tissa	Taounate	8440	576.16	413.02	230	518.1
Aguelmam Sidi Ali	Khénifra	198	537.81	275.99	2078	437.1
Ain aicha	Taounate	236	564.82	429.03	230	553.2
Ain Bittit	Meknes	6405	519.7	355	760	527.9
Ain timdrine	Sefrou	576	577.92	350.51	642	415.4
Ait Khabbach	Boulemane	748	557.12	314.64	1478	362.4
allal alfassi	Sefrou	876	566.58	370.44	430	354.4

Annexe 2. Traitement et analyse des données pluviométriques journalières

1. Tests statistiques d'homogénéité : Doubles cumuls

La critique des données, ainsi que la vérification de l'homogénéité des séries, précèdent toujours toute utilisation des données pluviométriques.

La méthode que nous avons utilisée pour le contrôle des séries pluviométriques est la méthode des doubles cumuls. Cette méthode permet de déceler une hétérogénéité dans une série de données pluviométriques, tel par exemple le déplacement d'un appareil ou une erreur systématique de mesure ou même une valeur aberrante. Elle est basée sur la comparaison des totaux annuels progressivement cumulés de la série que l'on veut contrôler ($y(i)$) et d'une série de référence ($x(i)$), qui peut être soit celle d'un poste fiable, soit une série fictive correspondant à une moyenne régionale. Il faut que la série à tester soit concomitante à la série de référence.

Etant donné que les séries dont nous disposons sont toutes susceptibles de contenir des erreurs, nous avons décidé de faire, pour chaque station un contrôle avec plusieurs autres stations voisines.

On trace donc pour chaque station un graphique avec des points constitués par les couples de cumuls progressifs : $(\sum_1^j x(i), \sum_1^j y(i))$ pour j variant de 1 à n , dans l'ordre chronologique (n étant la taille des échantillons concomitants de $x(i)$ et de $y(i)$ soit de 1958 à 2003).

Lorsque la courbe moyenne ajustée aux points présente une cassure nette on peut localiser en ce point une rupture d'homogénéité. Elle peut être datée, car on a pris soin de faire les cumuls progressifs en respectant la chronologie.

Afin de tester l'homogénéité des séries des pluies annuelles obtenues après correction et reconstitution, nous avons utilisé cette méthode pour la période de référence 1958-2003. Les graphiques en **annexe VI** montrent l'alignement pratiquement parfait des pluies cumulées sur les mêmes lignes droites, donnant lieu à des coefficients de corrélation (r) supérieur à 99%, ce qui confirme l'homogénéité des séries ainsi obtenues.

Remarque : Les séries des stations situées dans les bassins limitrophes et qui ont servi à l'établissement des courbes isohyètes ont également fait l'objet de contrôle d'homogénéité.

2. Analyse fréquentielle des pluies journalières

Pour chaque station dont nous disposons des séries pluviométriques journalières, nous avons extrait les pluies journalières maximales annuelles (P_{jmax}). L'année considérée étant l'année hydrologique qui s'étend de septembre de l'année jusqu'au août de l'année qui suit.

Dans un premier temps, ces P_{jmax} ont été ajustées à la loi de Gumbel par la méthode graphique. Cela a permis d'extraire, pour chaque station le gradex des pluies. Ce gradex correspond à la pente de la droite d'ajustement de l'échantillon des P_{jmax} , c'est aussi un paramètre important pour l'étude des crues ; il permet d'évaluer la lame d'eau ruisselée pour différentes périodes de retour. A partir de cet ajustement graphique des échantillons des P_{jmax} à la loi de Gumbel, nous avons également pu déterminer les pluies journalières (24h) pour des périodes de retour allant de 2 à 10 000 ans.

3. Corrélation linéaire

L'ensemble des séries pluviométriques présente des lacunes plus ou moins fréquentes selon les stations. Pour combler ces vides nous avons utilisé la corrélation linéaire simple entre stations.

a. Définition de la méthode

Cette méthode est surtout utilisée si deux séries X et Y sont de longueurs différentes tout en ayant une partie commune suffisamment longue ou si l'une des stations présente des lacunes à certaines dates.

On étudie tout d'abord la corrélation existant entre les parties concomitantes des deux séries en calculant le coefficient de corrélation linéaire r_{xy} .

Lorsque le coefficient de corrélation indique l'existence d'une relation probante entre deux stations distinctes X et Y (généralement lorsqu'il est supérieur ou égal à 0.8 avec une période de mesure commune supérieur à 10 ans), on trace un graphique $y = f(x)$, le nuage de points est généralement allongé avec une dispersion faible autour de la droite de régression de X en Y dont l'équation s'écrit :

$$Y = my + r_{xy} \cdot \frac{S_y}{S_x} (x - mx)$$

Où mx : moyenne arithmétique de la série X sur la période commune de mesure,

my : moyenne arithmétique de la série Y sur la période commune de mesure,

S_y : écart type de la série X sur la période commune de mesure,

S_x : écart type de la série Y sur la période commune de mesure,

$$\text{et : } r_{xy} = \frac{1}{1-k} \cdot \frac{\sum (x(i)-mx)(y(i)-my)}{S_x \cdot S_y} \quad \text{est le coefficient de corrélation,}$$

k étant le nombre des couples (x ,y) concomitants.

Cette méthode permet de contrôler et de reconstituer les données d'une série à partir d'une autre série d'une station voisine en utilisant l'équation de la droite de régression définie plus haut, et qui constitue la meilleure droite d'estimation de Y à partir de X.

b. Application pour la reconstitution et la complétion des séries mensuelles

Nous avons procédé à des corrélations au pas de temps mensuel, puis annuel entre toutes les stations pluviométriques mises à notre disposition, deux à deux. Les deux tableaux donnent ainsi les coefficients de corrélation (R^2) entre les données pluviométriques mensuelles puis annuelles des différentes stations.

Ces corrélations donnent des coefficients de corrélations acceptables entre des stations géographiquement voisines et appartenant à la même zone pluviométrique homogène. On remarque que les séries annuelles se corrélaient de façon plus satisfaisante que les séries mensuelles.

Cette corrélation linéaire au pas de temps mensuel et annuel entre les différentes stations voisines a été donc utilisée pour combler les lacunes que représentaient certaines stations et

pour reconstituer toutes les séries pluviométriques sur la période de référence entre 1958 et 2015.

Ainsi, lorsque seuls quelques mois de l'année hydrologique sont incomplets ou inexistants, on a complété les mois manquants en utilisant la corrélation linéaire simple au pas de temps mensuel. Lorsque toute l'année hydrologique manque, on a complété les années manquantes en utilisant une corrélation linéaire simple au pas de temps annuel.

Lorsqu'une lacune se présente au niveau de la série mensuelle d'une station donnée Y à une date donnée, on complète à partir de la série de la station X1 ayant le coefficient de corrélation le plus grand en utilisant l'équation de la droite de régression.

La série de la station X1 ne doit pas présenter de lacune à cette date-là, la période commune de mesure ne doit pas descendre en dessous de 5 ans et la distance entre les stations Y et X1 ne doit pas être trop grande et les deux stations doivent appartenir à la même zone homogène. Si l'une de ces conditions n'est pas réalisée, on complète la série Y à partir de la série X2, dont le coefficient de corrélation est le deuxième plus grand, et ainsi de suite.

Annexe 3 : Estimation du Temps de concentration par la méthode TR-55 sous ARCGIS

Blue - GIS defined, Green - user specified, White and yellow - calculated, Red - final result

Watershed Name	W1420	W2470	W1320	W700	W1470	W740	W760	W790	W1570	W810	W830	W870	W2170	W910	W4830	W960	W980	W1080
Watershed ID	142	247	132	70	147	74	76	79	157	81	83	87	217	91	483	96	98	108
Sheet Flow Characteristics																		
Manning's Roughness Coefficient	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Flow Length (ft)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Two-Year 24-hour Rainfall (in)	2.4362	2.6694	2.0713	2.4478	1.8258	1.8062	2.0349	2.6182	1.8887	2.1767	2.394	2.4938	1.6121	1.7312	1.6434	1.5058	1.7348	1.4623
Land Slope (ft/ft)	0.1969	0.2297	0.0984	0.1312	0.1969	0.2297	0.0984	0.0328	0.3937	0.0984	0.0328	0.4265	0.0656	0.0656	0.1312	0.1969	0.0328	0.1312
Sheet Flow Tt (hr)	0.11	0.10	0.16	0.13	0.13	0.12	0.16	0.22	0.10	0.16	0.23	0.08	0.22	0.21	0.16	0.14	0.27	0.17
Shallow Concentrated Flow Characteristics																		
Surface Description (1 - unpaved, 2 - paved)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flow Length (ft)	292573	47084	22081	90091	147852	160378	167877	163448	40652	158843	179751	173008	55823	229384	31882	166261	257453	171263
Watercourse Slope (ft/ft)	0.0045	0.0315	0.0128	0.0174	0.0121	0.0081	0.0076	0.0035	0.0591	0.0187	0.0064	0.0183	0.0197	0.0209	0.0399	0.0284	0.0132	0.0126
Average Velocity - computed (ft/s)	1.08	2.86	1.83	2.13	1.77	1.45	1.41	0.95	3.92	2.21	1.29	2.18	2.26	2.33	3.22	2.72	1.85	1.81
Shallow Concentrated Flow Tt (hr)	75.09	4.57	3.36	11.76	23.14	30.68	33.15	47.56	2.88	20.00	38.68	22.02	6.85	27.32	2.75	16.99	38.58	26.27
Channel Flow Characteristics																		
Cross-sectional Flow Area (ft2)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Wetted Perimeter (ft)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Hydraulic Radius - computed (ft)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Channel Slope (ft/ft)	0.0004	0.0043	0.0002	0.0019	0.0004	0.0002	0.0005	0.0003	0.0002	0.0019	0.0016	0.0028	0.0011	0.0098	0.0036	0.0142	0.0035	0.01
Manning's Roughness Coefficient	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Average Velocity - computed (ft/s)	0.99	3.26	0.70	2.16	0.99	0.70	1.11	0.86	0.70	2.16	1.99	2.63	1.65	4.92	2.98	5.92	2.94	4.97
Flow Length (ft)	129680	80154	20365	174841	212099	204822	308379	62306	223041	186071	166580	116376	95367	111479	174245	12682	220016	326778
Channel Flow Tt (hr)	36.26	6.84	8.05	22.43	59.31	81.00	77.13	20.12	88.21	23.87	23.29	12.30	16.08	6.30	16.24	0.60	20.80	18.28
Watershed Time of travel (hr)	111.46	11.51	11.58	34.32	82.58	111.80	110.45	67.91	91.18	44.03	62.21	34.40	23.14	33.82	19.15	17.72	59.65	44.72

Watershed Name	W1090	W1180	W1230	W1280	W1920	W1380	W1580	W1630	W1830	W2030	W2080	W2130	W2180	W2260	W2280	W2330	W2380	W2430
Watershed ID	109	118	123	128	192	138	158	163	183	203	208	213	218	226	228	233	238	243
Sheet Flow Characteristics																		
Manning's Roughness Coefficient	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Flow Length (ft)	100	100	100	99.9999	100	99.9999	100	100	100	99.9999	99.9999	99.9999	100	100	100.0002	100	100.0002	100
Two-Year 24-hour Rainfall (in)	1.7078	4.815	4.7954	2.9636	2.213	2.467	1.7474	1.795	1.541	3.1317	4.2479	2.8448	1.5842	2.2636	1.5878	1.4499	1.8301	1.7558
Land Slope (ft/ft)	0.164	0.4593	0.4593	0.4921	0.4265	0.3609	0.3609	0.164	0.1969	0.4593	0.2953	0.1969	0.3281	0.164	0.0328	0.0328	0.1969	0.0328
Sheet Flow Tt (hr)	0.14	0.06	0.06	0.07	0.09	0.09	0.10	0.14	0.14	0.07	0.07	0.10	0.11	0.13	0.29	0.30	0.13	0.27
Shallow Concentrated Flow Characteristics																		
Surface Description (1 - unpaved, 2 - paved)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flow Length (ft)	205013.3861	186715.9671	173464.5487	145245.9464	100623.4708	154977.4337	158891.039	53702.3153	127188.8332	80597.4589	231116.6079	143784.1701	201876.4678	59033.6383	77817.221	223775.6481	222739.7512	225199.6428
Watercourse Slope (ft/ft)	0.0174	0.0309	0.0264	0.0415	0.0235	0.012	0.0098	0.0389	0.0384	0.0247	0.0259	0.0272	0.023	0.0768	0.042	0.0209	0.0153	0.0164
Average Velocity - computed (ft/s)	2.13	2.84	2.62	3.29	2.47	1.77	1.60	3.18	3.16	2.54	2.60	2.66	2.45	4.47	3.31	2.33	2.00	2.07
Shallow Concentrated Flow Tt (hr)	26.76	18.29	18.38	12.28	11.30	24.36	27.63	4.69	11.17	8.83	24.72	15.01	22.92	3.67	6.54	26.65	31.00	30.28
Channel Flow Characteristics																		
Cross-sectional Flow Area (ft2)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Wetted Perimeter (ft)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Hydraulic Radius - computed (ft)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Channel Slope (ft/ft)	0.0064	0.004	0.0028	0.0027	0.0008	0.0012	0.0008	0.0011	0.0062	0.0484	0.0213	0.0035	0.0014	0.0026	0.0002	0.0103	0.0034	0.0114
Manning's Roughness Coefficient	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Average Velocity - computed (ft/s)	3.97	3.14	2.63	2.58	1.40	1.72	1.40	1.65	3.91	10.93	7.25	2.94	1.86	2.53	0.70	5.04	2.90	5.30
Flow Length (ft)	390475.3628	56477.9821	127406.891	148408.127	251375.4061	121946.6225	146957.4125	185729.5756	163016.0797	271.3922	1231.7738	16977.2179	49675.8686	178932.598	309.9615	46587.8628	157606.9517	180521.1433
Channel Flow Tt (hr)	27.30	4.99	13.47	15.97	49.71	19.69	29.06	31.32	11.58	0.01	0.05	1.60	7.43	19.63	0.12	2.57	15.12	9.46
Watershed Time of travel (hr)	54.20	23.34	31.90	28.32	61.09	44.13	56.80	36.15	22.90	8.91	24.84	16.72	30.46	23.42	6.95	29.52	46.25	40.00

Annexe 4. Tableau d'estimation du coefficient de rugosité selon le type et l'état du cours d'eau (Van Te Chow, 1959)

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
1. Main Channels			
a. clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. same as "d" with more stones	0.045	0.050	0.060
g. sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150
2. Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, trees and brush along banks submerged at high stages			
a. bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070
3. Floodplains			
a. Pasture, no brush			
1. short grass	0.025	0.030	0.035
2. high grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. no crop	0.020	0.030	0.040
2. mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
2. cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050

3. same as above, but with heavy growth of sprouts	0.050	0.060	0.080
4. heavy stand of timber, a few down trees, little undergrowth, flood stage below branches	0.080	0.100	0.120
5. same as 4. with flood stage reaching branches	0.100	0.120	0.160
4. Excavated or Dredged Channels			
a. Earth, straight, and uniform			
1. clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
2. clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
3. gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.030
4. with short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
b. Earth winding and sluggish			
1. no vegetation	0.023	0.025	0.030
2. grass, some weeds	0.025	0.030	0.033
3. dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030	0.035	0.040
4. earth bottom and rubble sides	0.028	0.030	0.035
5. stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.040
6. cobble bottom and clean sides	0.030	0.040	0.050
c. Dragline-excavated or dredged			
1. no vegetation	0.025	0.028	0.033
2. light brush on banks	0.035	0.050	0.060
d. Rock cuts			
1. smooth and uniform	0.025	0.035	0.040
2. jagged and irregular	0.035	0.040	0.050
e. Channels not maintained, weeds and brush uncut			
1. dense weeds, high as flow depth	0.050	0.080	0.120
2. clean bottom, brush on sides	0.040	0.050	0.080
3. same as above, highest stage of flow	0.045	0.070	0.110
4. dense brush, high stage	0.080	0.100	0.140
5. Lined or Constructed Channels			
a. Cement			
1. neat surface	0.010	0.011	0.013
2. mortar	0.011	0.013	0.015
b. Wood			
1. planed, untreated	0.010	0.012	0.014
2. planed, creosoted	0.011	0.012	0.015
3. unplanned	0.011	0.013	0.015
4. plank with battens	0.012	0.015	0.018
5. lined with roofing paper	0.010	0.014	0.017

c. Concrete			
1. trowel finish	0.011	0.013	0.015
2. float finish	0.013	0.015	0.016
3. finished, with gravel on bottom	0.015	0.017	0.020
4. unfinished	0.014	0.017	0.020
5. gunite, good section	0.016	0.019	0.023
6. gunite, wavy section	0.018	0.022	0.025
7. on good excavated rock	0.017	0.020	
8. on irregular excavated rock	0.022	0.027	
d. Concrete bottom float finish with sides of:			
1. dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.020
2. random stone in mortar	0.017	0.020	0.024
3. cement rubble masonry, plastered	0.016	0.020	0.024
4. cement rubble masonry	0.020	0.025	0.030
5. dry rubble or riprap	0.020	0.030	0.035
e. Gravel bottom with sides of:			
1. formed concrete	0.017	0.020	0.025
2. random stone mortar	0.020	0.023	0.026
3. dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
f. Brick			
1. glazed	0.011	0.013	0.015
2. in cement mortar	0.012	0.015	0.018
g. Masonry			
1. cemented rubble	0.017	0.025	0.030
2. dry rubble	0.023	0.032	0.035
h. Dressed ashlar/stone paving	0.013	0.015	0.017
i. Asphalt			
1. smooth	0.013	0.013	
2. rough	0.016	0.016	
j. Vegetal lining	0.030		0.500

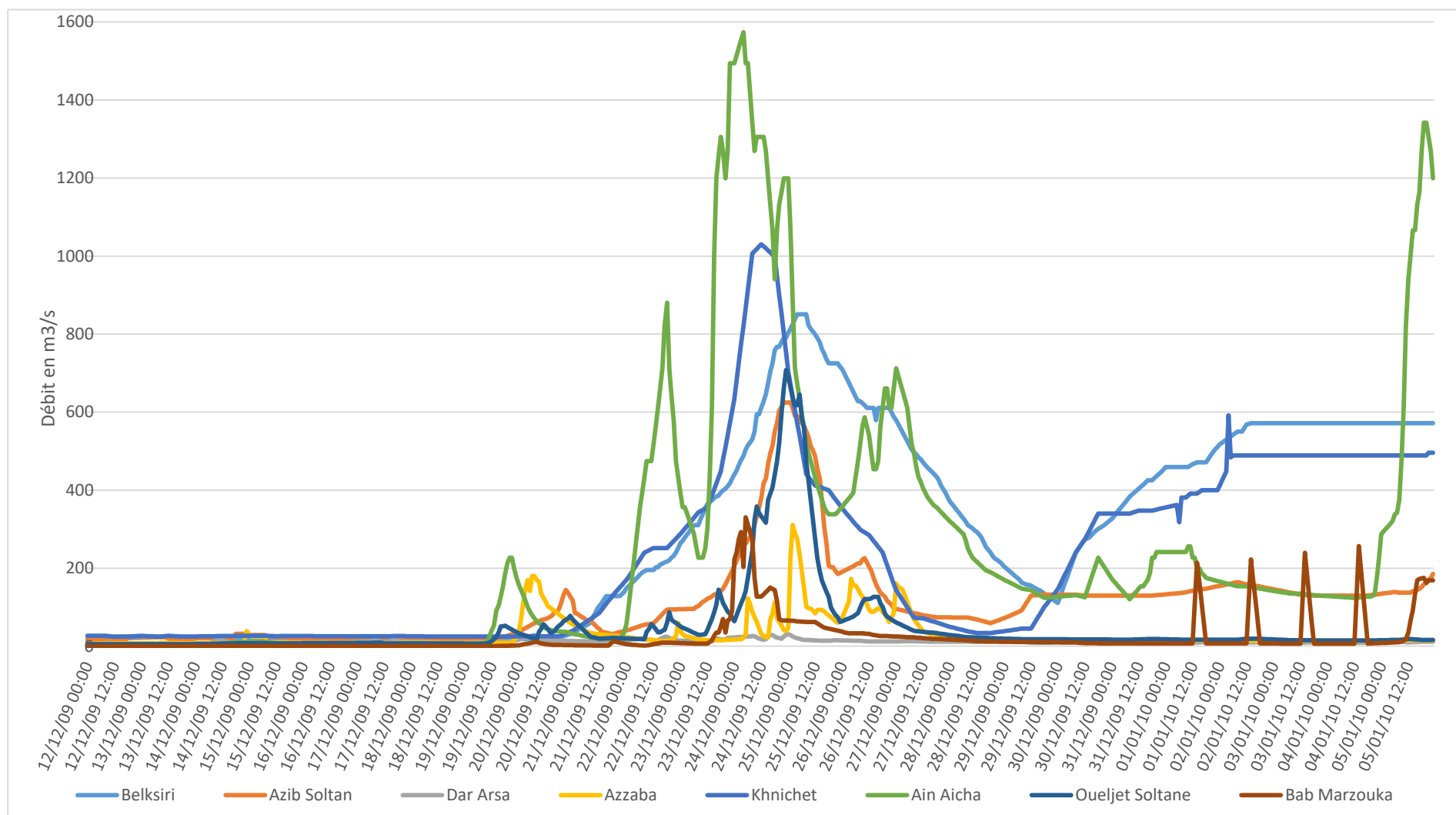
Annexe 5 : Données de pluies et de débits utilisées pour la simulation

Événement 1 : Déc. 2009 (Allant du 12/12/2009 au 27/12/2009)

■ Précipitations journalières en mm

	12/12/2009	13/12/2009	14/12/2009	15/12/2009	16/12/2009	17/12/2009	18/12/2009	19/12/2009	20/12/2009	21/12/2009	22/12/2009	23/12/2009	24/12/2009	25/12/2009	26/12/2009	27/12/2009
Azib Soltane	0	15	5,1	0	1,4	0	39,2	42,9	1,2	45,6	8,8	39,2	0	9,4	4,1	0
Bab Echhoub	0	7,2	11	0	3,8	0,6	21,1	56,9	0,8	7,7	19	70,2	46	4,7	2,4	0
Bab Ouender	0	34	3	0	6,6	0	17,6	33,4	2,6	33,2	19	96	13	15,1	12	0
Bge de garde	0	4,2	0	1,2	0	0	41,3	14,7	0	29,2	8,3	47	3	19	3,3	0
Dar Arsa	0	0	16	0	1,1	15	1,6	32,8	20	5,5	22	25	37	0,9	3,6	1,2
Dar Hamra	0	2,9	12	0	5,2	0,3	0,6	18,8	1	0	1	0	9,8	12,3	0	0
Bge el kanssera	0	0	2,3	0	3,6	0	11,5	11,8	4,5	30,2	2,5	22,8	0	14,3	0	0
Galez	0	47	2,3	0	3,6	0	26,7	16,8	1,2	53,7	18	95,3	6,5	11,9	19	0
Had kourt	0	42	0	0	2	0	14,5	37,5	0	33,5	7,5	78,5	0	24	3,5	0
Hajiria	0	30	0	0	10	0	28,5	21,2	4	44	17	78,6	7,1	15	8	0
Jebel Outka	0	0	0	0	0	0	18	15,9	21	31,3	77	11,2	0	11,9	0,8	0
kharouba	0	72	0	0	7,4	0,2	16	21,5	0,4	62	11	110	23	47,4	10	0
khenichet	0	0	0	0	0	0	2,5	1,3	6	9,3	29	1,2	0,3	7	0	0
Bab Taza	0	50	0	0	27	0	82,7	24,3	3,5	106	39	78,2	70	59,9	39	0
Tissa	0	14	8,7	0	12	0,4	24,8	72,9	0,6	21,1	17	94,6	6,6	6,5	1,1	0
Sidi chahed	0	3,1	3,3	0	10	1,1	6,5	20,6	2,5	19	11	20,5	0	8,6	0	0
Tabouda	0	57	0	0	3,3	0	30,9	15	0,8	74,2	20	79,5	3,1	24,5	17	0
Souk el had	0	0	2,3	0	3,6	0	11,5	11,8	4,5	30,2	2,5	22,8	0	14,3	0	0
Sidi Mokhefi	0	0	13	0	20	0	16,6	20,5	17	24,9	24	19,2	46	0,8	23	0
Bge Sahla	0	45	2,3	0	5	0	18,4	25,3	2,3	50,3	21	109	23	8	18	0
Idriss Ier	0	11	7,3	0	17	0	5,3	32,3	0,3	14,9	8	25,7	4	3,4	0,6	0
DGH fes	0	9,1	4,8	0	25	0,7	1,2	61,1	3,3	17,5	13	21,4	5	0,2	0,1	0,2
Pont RP26	0	0	11	0	3,2	2,6	0,3	29,3	16	6,4	18	18,3	52	0,6	7,7	0
Pont m'dez	0	2,2	2	0	5,5	0	0	12,3	3,7	0	0,5	1,9	8,3	5,6	0	0
Oueljet soltane	0	1,2	9,8	0	12	0	5,5	47,6	0	20,5	9,6	33	13	3,5	1,8	0
Oulad Yaacoub	0	0	0	0	0	0	8	2,8	19	24,2	44	2,6	0	7	0,5	0
Bge allal Fassi	0	0	13	0	6,5	16	0	10,5	9,3	2,4	2,7	1,7	14	3,4	0	0
Ait Khebbach	0	0	3,3	0	0,7	0	1	18,8	1,7	0	4,1	10,6	17	9,2	0	0
Ain timdrine	0	0,5	5,1	0	3,9	0,5	11,9	2,5	0	0	0,1	0,5	7,1	6,5	0	0
Ain Aicha	0	25	1,9	0	4,4	0	13,5	21,5	1,6	23,4	15	72,5	52	17,3	1,5	0
Ag. Sidi Ali	0	5	4	0	0,5	0	9	47,9	1,8	5,2	18	26	14	33,5	5,2	0
My ali cherif	0	56	0	0	0,3	0	15,9	11,3	0	31,4	16	30,4	12	9,1	0,1	0
Elmjaaa	0	67	0	0	4,1	0	14,8	20,8	1,5	63,6	13	114	1,9	30,4	16	0
Lalla Mimouna	0	66	0	0	3,2	0	20,8	8	0,7	34,4	18	18,8	12	27,5	3,1	0
Azzaba	0	2,3	5,8	0	14	1,6	0	14,2	3,2	0,8	0,6	2,1	6,8	5,2	0	0
Kenitra	0	0	9,3	0	0	0	0	30,5	27	34,5	24	39,6	21	11	0	0
Ain Bittit	0	4,5	0	0	8,5	0	6,3	37,2	4	15	11	33	15	4	0	0

■ Débits horaires au niveau des stations hydrologiques principales

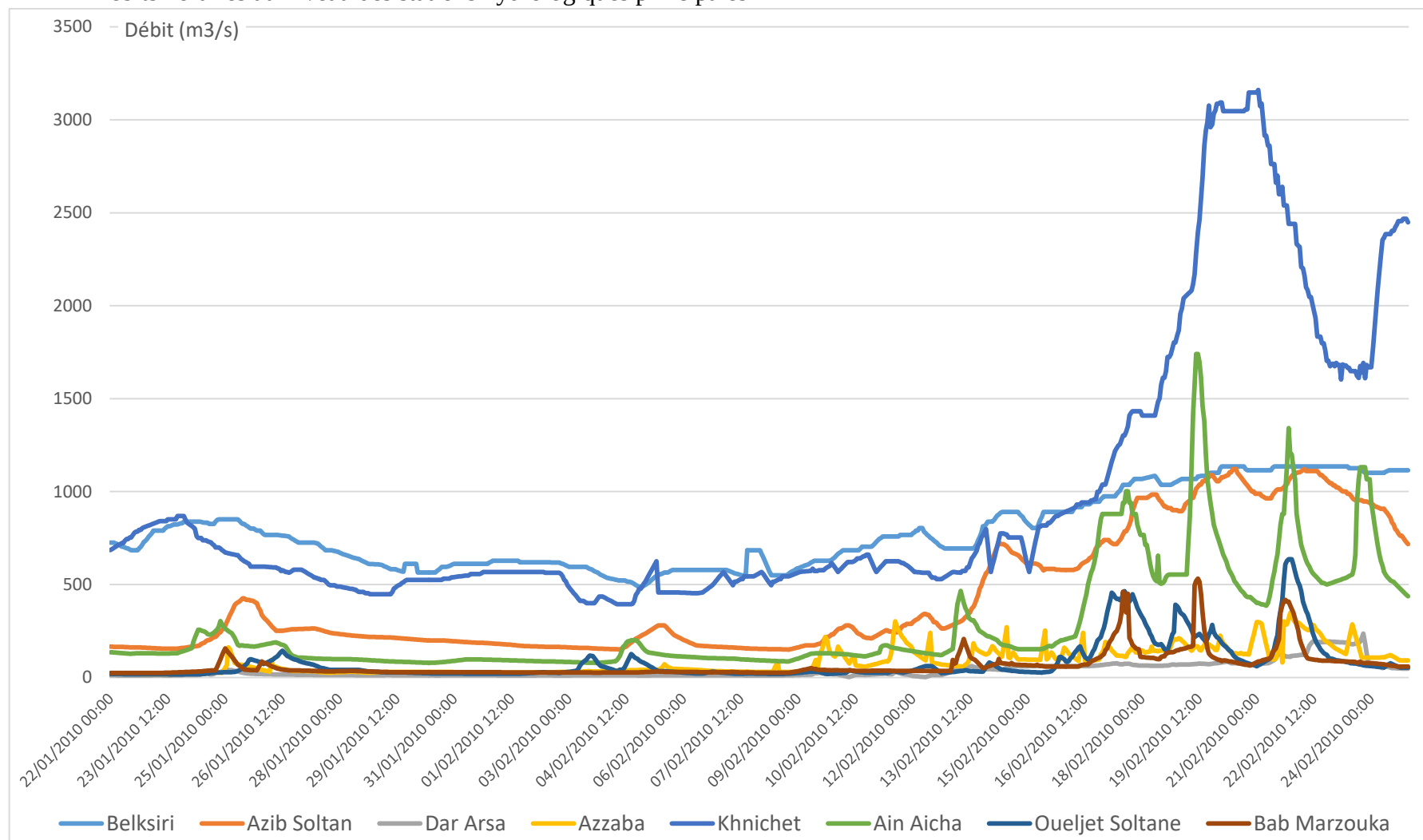


 Événement 2 : Janvier-Février 2010 (Allant du 22/01/2010 au 24/02/2010)

- Précipitations journalières en mm

	24/01/2010	25/01/2010	26/01/2010	27/01/2010	28/01/2010	29/01/2010	30/01/2010	31/01/2010	01/02/2010	02/02/2010	03/02/2010	04/02/2010	05/02/2010	06/02/2010	07/02/2010	08/02/2010	09/02/2010	10/02/2010	11/02/2010	12/02/2010	13/02/2010	14/02/2010	15/02/2010	16/02/2010	17/02/2010	18/02/2010	19/02/2010	20/02/2010	21/02/2010	22/02/2010	23/02/2010	24/02/2010
Azib Soltane	7	4	0	0	0	0	0	3	0	0	4	3	0	0	0	15	2	5	0	28	6	5	10	17	11	28	9	21	5	1	6	0
Bab Echhoub	16	16	0	14	0	1	0	0	0	0	6	11	0	0	0	29	12	12	1	29	10	5	12	44	6	26	10	9	19	1	5	0
Bab Ouender	6	10	2	13	0	3	1	0	0	0	22	2	0	0	0	11	6	16	0	21	6	5	17	34	9	54	6	14	36	3	14	0
Bge de garde	5	8	1	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	4	0	15	0	1	2	2	8	30	1	4	1	7	1	0	0	0
Dar Arsa	20	16	3	0	0	0	0	0	2	0	1	9	0	0	0	5	16	1	5	0	36	0	6	15	16	9	13	6	27	4	19	0
Dar Hamra	13	4	1	1	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	12	11	16	3	4	9	10	3	5	0	11	9	8	17	0	3	0
Bge el kanssera	35	0	0	6	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	7	0	3	0	9	0	2	8	19	0	14	6	11	3	0	0	0
Galez	10	12	1	0	0	1	1	0	0	0	14	4	0	0	0	14	15	15	0	20	9	2	22	29	6	36	11	20	33	10	14	0
Had kourt	5	2	0	2	0	0	1	0	0	0	14	11	0	0	0	11	5	9	0	11	7	5	9	24	4	32	7	16	7	10	2	0
Hajiria	13	9	0	0	0	2	2	0	0	0	3	4	0	0	0	13	7	14	1	24	9	3	16	22	9	36	6	24	12	4	2	0
Jebel Outka	10	8	7	1	0	3	0	0	0	0	44	6	2	0	0	42	14	26	0	27	9	14	65	77	18	58	15	35	45	58	4	0
kharouba	0	3	0	0	0	2	1	0	0	0	17	5	0	0	0	20	8	20	1	31	6	9	23	48	8	50	8	29	27	23	5	0
khenichet	11	1	1	0	0	1	1	4	0	0	8	0	0	0	0	12	2	6	0	25	0	4	13	30	2	23	7	18	3	9	2	0
Bab Taza	10	8	7	1	0	3	0	0	0	0	44	6	2	0	0	42	14	26	0	27	9	14	65	77	18	58	15	35	45	58	4	0
Tissa	13	3	0	5	0	2	0	0	1	14	21	0	0	0	24	6	13	0	0	27	9	4	27	35	0	19	6	15	10	0	12	0
Sidi chahed	8	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	1	2	0	21	0	4	11	10	7	24	2	14	1	5	0
Tabouda	1	13	6	0	0	0	0	0	0	0	20	4	1	0	0	14	2	12	0	15	5	5	28	42	6	50	7	26	36	30	33	0
Souk el had	8	0	0	0	0	0	1	1	2	0	5	0	0	0	0	12	2	8	0	21	2	2	6	11	2	18	12	14	2	0	7	0
Sidi Mokhefi	17	14	10	15	0	0	0	0	11	0	5	0	0	0	0	2	15	0	0	0	8	14	18	11	20	11	13	28	49	13	5	0
Bge Sahla	10	12	1	0	0	1	1	0	0	0	28	5	0	0	0	14	11	19	0	27	9	4	37	35	6	42	9	24	38	5	12	0
Idriss Ier	34	7	0	0	0	0	0	2	0	0	1	1	0	0	0	13	6	7	0	11	6	1	8	17	1	12	8	13	8	0	8	0
DGH fes	28	5	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	14	2	10	0	20	1	2	6	15	0	9	13	12	5	0	0	0
Pont RP26	6	9	5	0	0	0	0	4	0	0	1	12	0	0	0	2	6	5	1	0	19	0	5	6	50	6	10	5	22	2	6	0
Pont m'dez	12	1	0	0	0	0	0	0	0	5	1	0	0	0	0	5	2	5	1	4	4	0	0	5	0	7	1	4	1	0	0	0
Oueljet soltane	6	6	1	0	0	0	0	0	1	8	3	5	0	0	0	12	4	7	2	14	7	4	4	16	2	22	7	11	8	0	3	0
Oulad Yaacoub	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	20	2	0	0	0	17	6	19	0	26	3	8	22	53	4	53	5	33	29	18	26	0
Bge allal Fassi	12	13	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	22	2	7	2	14	1	5	3	3	8	24	4	14	0	6	2
Ait Khebbach	7	3	0	2	0	0	0	1	1	5	4	0	0	0	0	2	2	0	0	1	2	0	3	9	1	14	3	6	8	0	0	0
Ain timdrine	19	8	0	0	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	9	10	9	4	4	12	0	2	4	0	11	4	5	2	0	1	0
Ain Aicha	5	7	2	0	0	0	2	0	0	0	12	2	0	0	0	10	8	13	0	14	14	3	18	16	9	24	5	17	9	1	2	0
Ag. Sidi Ali	8	2	2	0	0	0	0	11	2	3	10	3	0	0	0	9	0	0	0	12	13	5	5	22	8	19	0	16	18	0	0	0
My ali cherif	1	8	0	0	0	1	0	0	0	0	6	1	0	0	1	8	14	16	0	25	2	2	15	44	1	16	7	11	6	3	0	0
Elmjaaa	4	2	3	0	0	1	2	0	0	24	16	0	0	0	0	10	11	5	0	25	11	6	19	28	6	42	4	27	16	11	7	0
Lalla Mimouna	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	7	2	0	0	0	16	4	5	0	5	2	3	21	38	2	17	3	14	6	8	0	0
Azzaba	15	4	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	10	6	5	2	6	7	1	2	4	0	7	9	8	3	0	7	0
Kenitra	9	17	2	3	0	2	0	2	0	1	1	13	0	0	4	6	0	10	0	10	0	25	26	36	2	18	14	12	0	3	4	0
Ain Bittit	12	3	1	0	0	0	0	0	0	6	3	0	0	0	0	22	8	4	1	0	0	19	8	14	14	16	11	3	6	0	8	0

■ Débits horaires au niveau des stations hydrologiques principales



Annexe 6. Résultats de l'ajustement statistique des pluies journalières maximales selon la loi de Gumbel

Pour chaque poste pluviométrique, on donne le résultat graphique de l'ajustement statistique des lames journalières maximales selon la loi de Gumbel, et le tableau de calcul des pluies journalières (24h) pour des périodes de retour allant de 2 à 10 000 ans.

On utilisera les notations suivantes :

T : Période de retour en an ;

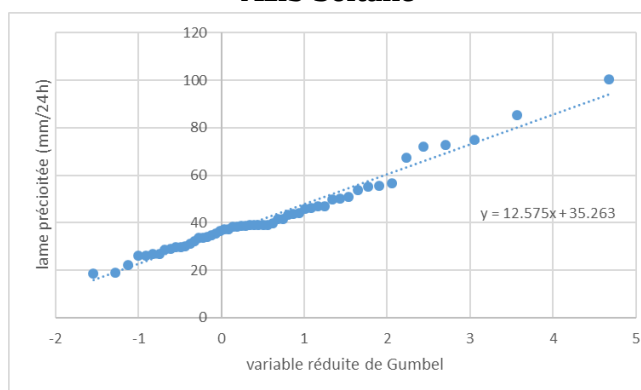
F : Fréquence de non dépassement ;

V.G. : variable de Gumbel ;

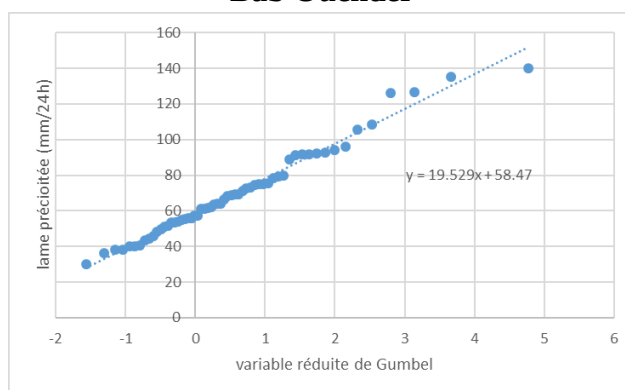
$P(T)$: pluies journalières en mm pour chaque période de retour T ;

$P(24h)$: pluies de 24 heures en mm pour chaque période de retour.

Azib Soltane



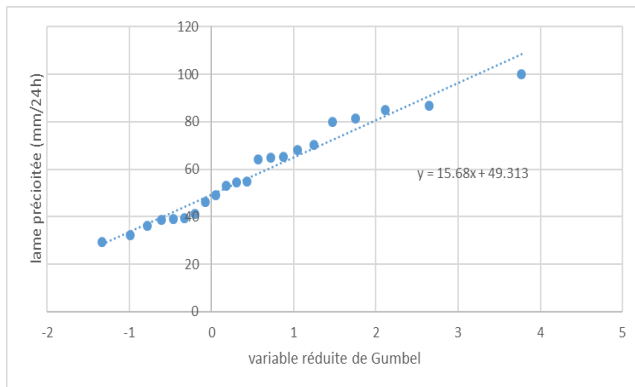
Bab Ouender



T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	39.9	45.9
10	0.9000	2.3	63.6	73.1
20	0.9500	3.0	72.6	83.5
50	0.9800	3.9	84.3	97.0
100	0.9900	4.6	93.1	107.1
1000	0.9990	6.9	122.1	140.4
10000	0.9999	9.2	151.1	173.7

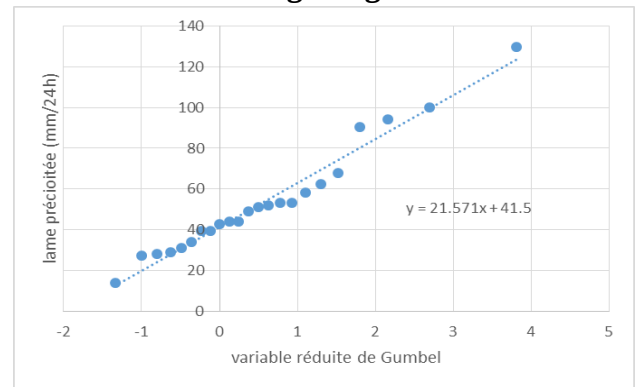
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	65.6	75.5
10	0.9000	2.3	102.4	117.8
20	0.9500	3.0	116.5	133.9
50	0.9800	3.9	134.7	154.9
100	0.9900	4.6	148.3	170.6
1000	0.9990	6.9	193.4	222.4
10000	0.9999	9.2	238.3	274.1

Bab Echhoub



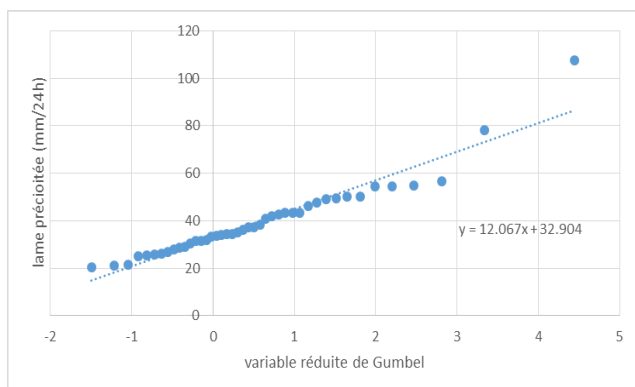
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	55.1	63.3
10	0.9000	2.3	84.6	97.3
20	0.9500	3.0	95.9	110.3
50	0.9800	3.9	110.5	127.1
100	0.9900	4.6	121.4	139.7
1000	0.9990	6.9	157.6	181.3
10000	0.9999	9.2	193.7	222.8

Barrage de garde



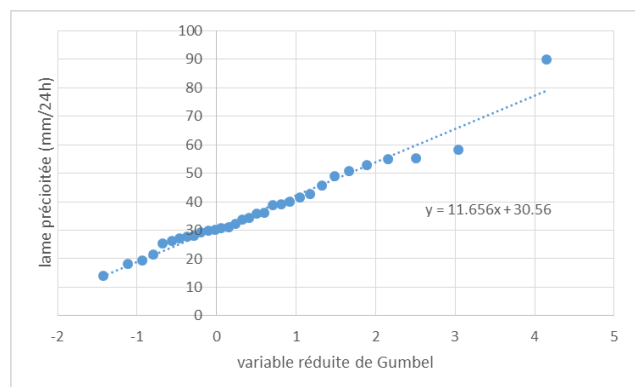
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	72.4	83.3
10	0.9000	2.3	191.2	219.9
20	0.9500	3.0	236.6	272.1
50	0.9800	3.9	295.4	339.7
100	0.9900	4.6	339.4	390.4
1000	0.9990	6.9	485.0	557.7
10000	0.9999	9.2	630.2	724.7

Dar Arsa



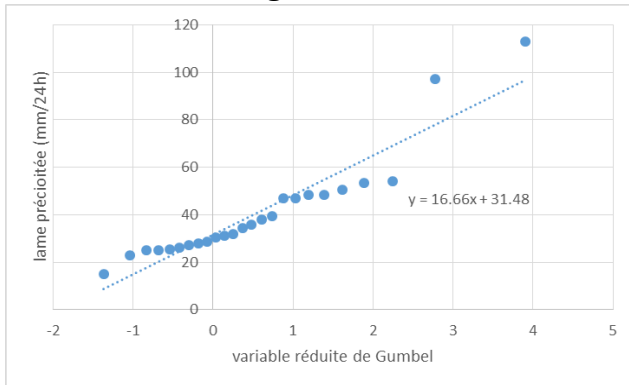
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	37.3	42.9
10	0.9000	2.3	60.1	69.1
20	0.9500	3.0	68.7	79.1
50	0.9800	3.9	80.0	92.0
100	0.9900	4.6	88.4	101.7
1000	0.9990	6.9	116.3	133.7
10000	0.9999	9.2	144.0	165.7

Dar Hamra



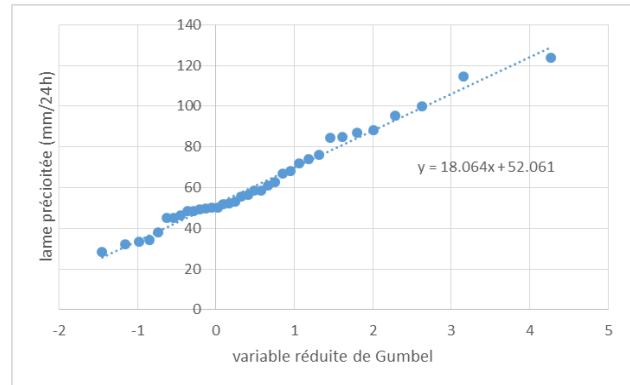
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	34.8	40.1
10	0.9000	2.3	56.8	65.3
20	0.9500	3.0	65.2	75.0
50	0.9800	3.9	76.0	87.4
100	0.9900	4.6	84.2	96.8
1000	0.9990	6.9	111.1	127.7
10000	0.9999	9.2	137.9	158.6

Barrage El Kansera



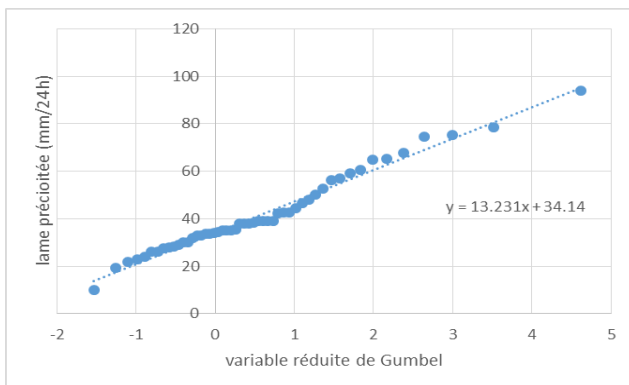
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	37.6	43.2
10	0.9000	2.3	69.0	79.3
20	0.9500	3.0	81.0	93.1
50	0.9800	3.9	96.5	111.0
100	0.9900	4.6	108.1	124.3
1000	0.9990	6.9	146.6	168.5
10000	0.9999	9.2	184.9	212.7

Galez



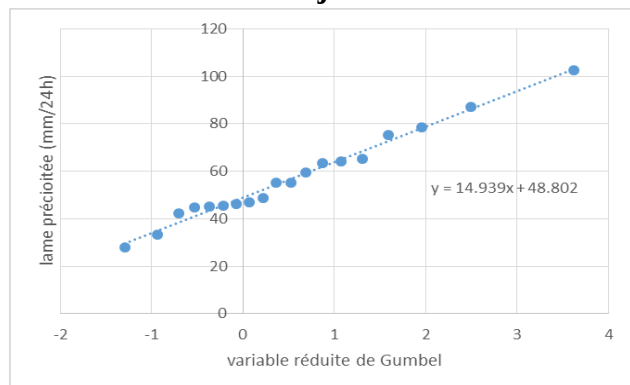
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	58.7	67.5
10	0.9000	2.3	92.7	106.6
20	0.9500	3.0	105.7	121.6
50	0.9800	3.9	122.5	140.9
100	0.9900	4.6	135.2	155.4
1000	0.9990	6.9	176.8	203.4
10000	0.9999	9.2	218.4	251.2

Had Kourt



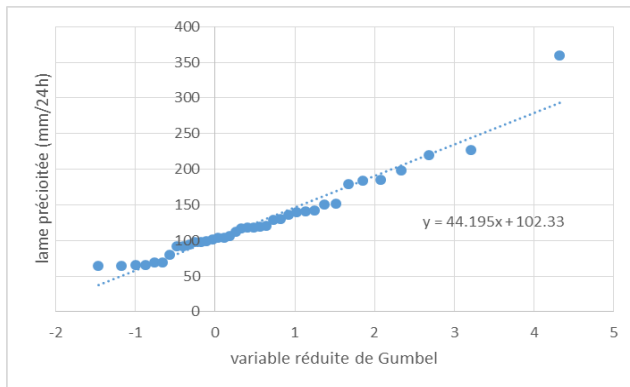
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	39.0	44.8
10	0.9000	2.3	63.9	73.5
20	0.9500	3.0	73.4	84.5
50	0.9800	3.9	85.8	98.6
100	0.9900	4.6	95.0	109.3
1000	0.9990	6.9	125.5	144.4
10000	0.9999	9.2	156.0	179.4

Hajria



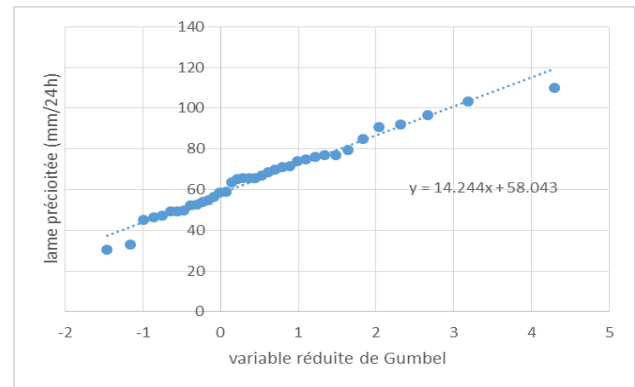
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	54.3	62.4
10	0.9000	2.3	82.4	94.8
20	0.9500	3.0	93.2	107.1
50	0.9800	3.9	107.1	123.2
100	0.9900	4.6	117.5	135.2
1000	0.9990	6.9	152.0	174.8
10000	0.9999	9.2	186.4	214.4

Jebel Outka



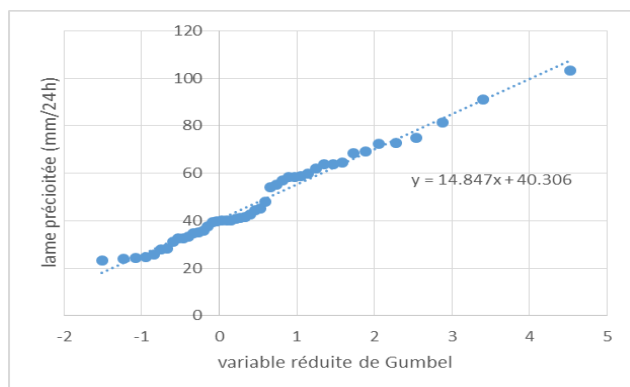
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	118.5	136.3
10	0.9000	2.3	201.8	232.1
20	0.9500	3.0	233.6	268.6
50	0.9800	3.9	274.8	316.0
100	0.9900	4.6	305.6	351.5
1000	0.9990	6.9	407.6	468.7
10000	0.9999	9.2	509.4	585.8

Kharrouba



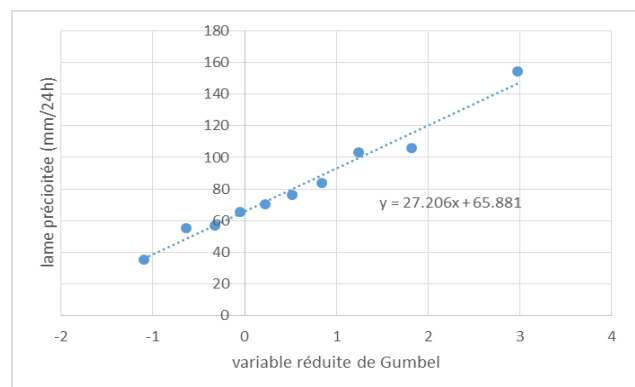
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	63.3	72.8
10	0.9000	2.3	90.1	103.6
20	0.9500	3.0	100.4	115.4
50	0.9800	3.9	113.6	130.7
100	0.9900	4.6	123.6	142.1
1000	0.9990	6.9	156.4	179.9
10000	0.9999	9.2	189.2	217.6

Khenichet



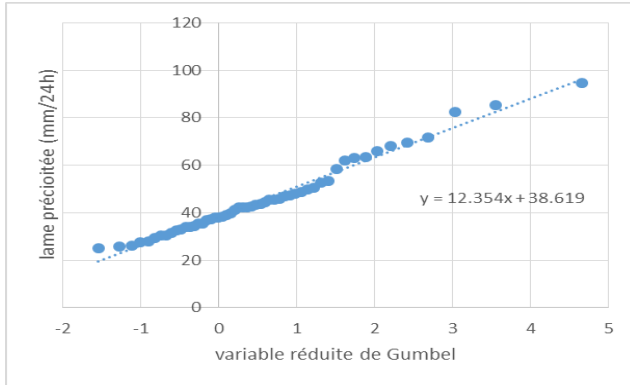
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	45.7	52.6
10	0.9000	2.3	73.7	84.8
20	0.9500	3.0	84.4	97.1
50	0.9800	3.9	98.2	113.0
100	0.9900	4.6	108.6	124.9
1000	0.9990	6.9	142.9	164.3
10000	0.9999	9.2	177.1	203.6

Bab Taza



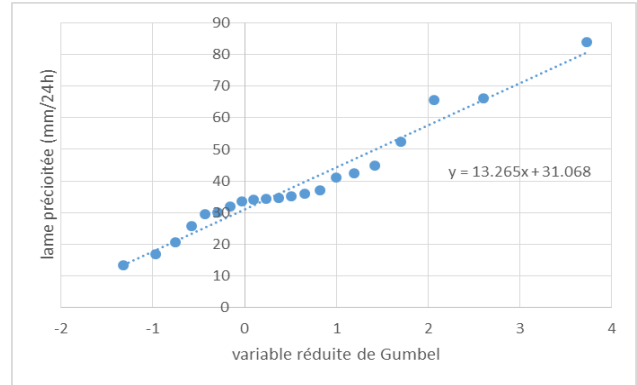
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	75.9	87.2
10	0.9000	2.3	127.1	146.2
20	0.9500	3.0	146.7	168.7
50	0.9800	3.9	172.0	197.8
100	0.9900	4.6	191.0	219.7
1000	0.9990	6.9	253.8	291.9
10000	0.9999	9.2	316.5	363.9

Tissa



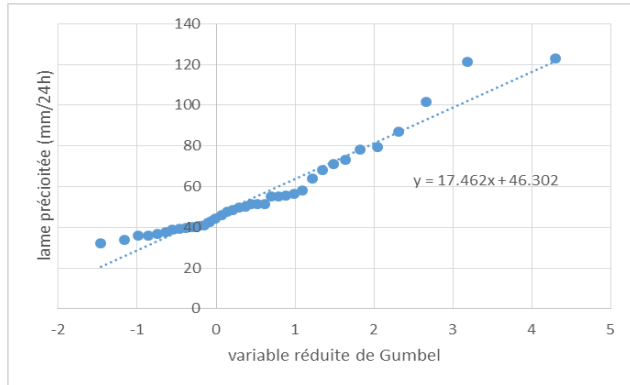
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	43.1	49.6
10	0.9000	2.3	66.4	76.4
20	0.9500	3.0	75.3	86.6
50	0.9800	3.9	86.8	99.8
100	0.9900	4.6	95.4	109.8
1000	0.9990	6.9	124.0	142.5
10000	0.9999	9.2	152.4	175.3

Sidi Chahed



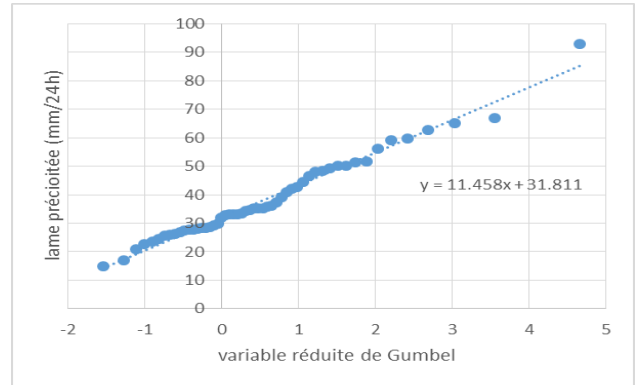
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	35.9	41.3
10	0.9000	2.3	60.9	70.1
20	0.9500	3.0	70.5	81.0
50	0.9800	3.9	82.8	95.3
100	0.9900	4.6	92.1	105.9
1000	0.9990	6.9	122.7	141.1
10000	0.9999	9.2	153.2	176.2

Tabouda



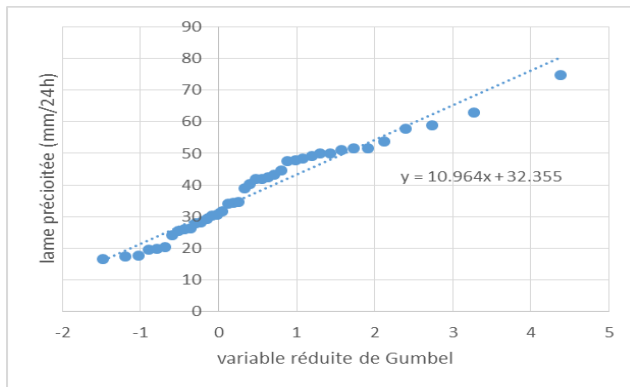
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	52.7	60.6
10	0.9000	2.3	85.6	98.4
20	0.9500	3.0	98.2	112.9
50	0.9800	3.9	114.4	131.6
100	0.9900	4.6	126.6	145.6
1000	0.9990	6.9	166.9	192.0
10000	0.9999	9.2	207.1	238.2

Souk El Had Rdom



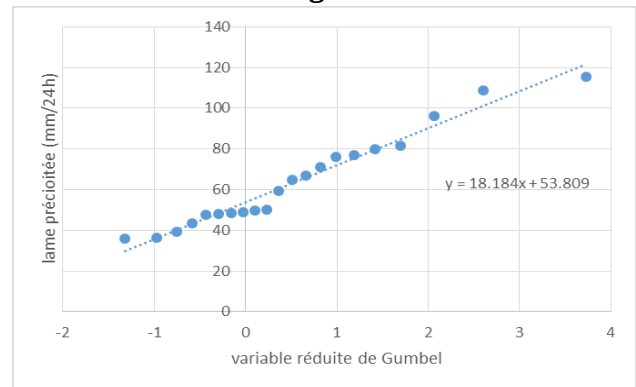
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	36.0	41.4
10	0.9000	2.3	57.6	66.2
20	0.9500	3.0	65.8	75.7
50	0.9800	3.9	76.5	88.0
100	0.9900	4.6	84.5	97.2
1000	0.9990	6.9	111.0	127.6
10000	0.9999	9.2	137.3	157.9

Sidi Mokhefi



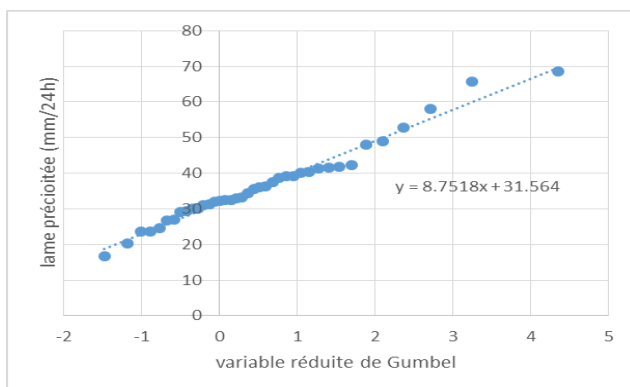
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	36.4	41.8
10	0.9000	2.3	57.0	65.6
20	0.9500	3.0	64.9	74.7
50	0.9800	3.9	75.1	86.4
100	0.9900	4.6	82.8	95.2
1000	0.9990	6.9	108.1	124.3
10000	0.9999	9.2	133.3	153.3

Barrage Sahla



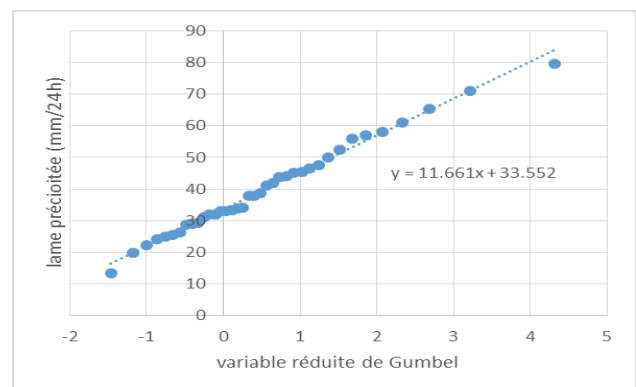
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	60.5	69.5
10	0.9000	2.3	94.7	108.9
20	0.9500	3.0	107.8	124.0
50	0.9800	3.9	124.8	143.5
100	0.9900	4.6	137.5	158.1
1000	0.9990	6.9	179.4	206.3
10000	0.9999	9.2	221.3	254.5

Idriss Ier



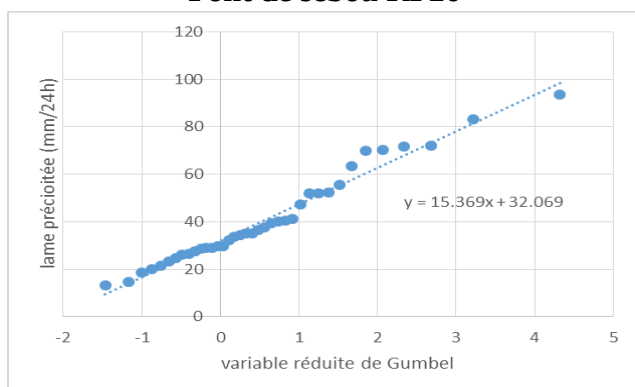
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	34.8	40.0
10	0.9000	2.3	51.3	58.9
20	0.9500	3.0	57.6	66.2
50	0.9800	3.9	65.7	75.6
100	0.9900	4.6	71.8	82.6
1000	0.9990	6.9	92.0	105.8
10000	0.9999	9.2	112.2	129.0

DGH Fès



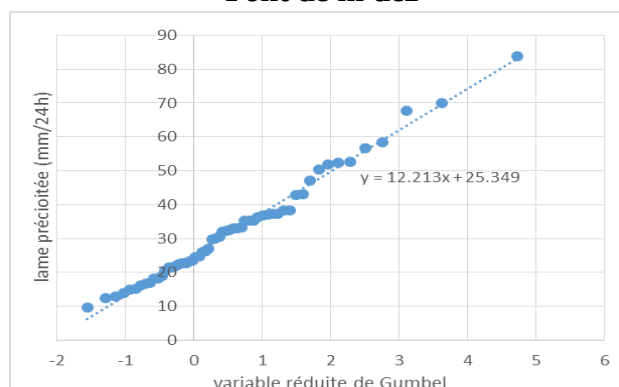
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	37.8	43.5
10	0.9000	2.3	59.8	68.8
20	0.9500	3.0	68.2	78.4
50	0.9800	3.9	79.1	90.9
100	0.9900	4.6	87.2	100.3
1000	0.9990	6.9	114.1	131.2
10000	0.9999	9.2	141.0	162.1

Pont de sebou RP26



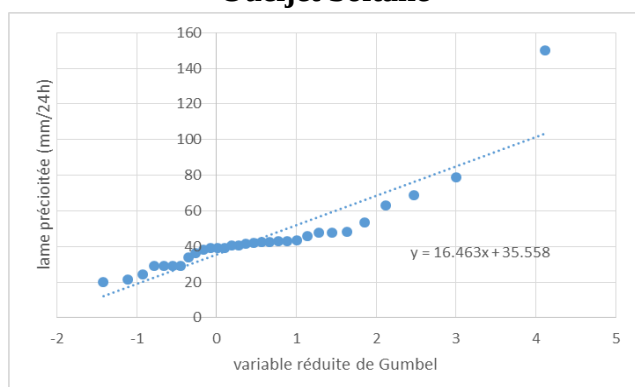
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	37.7	43.4
10	0.9000	2.3	66.7	76.7
20	0.9500	3.0	77.7	89.4
50	0.9800	3.9	92.0	105.8
100	0.9900	4.6	102.8	118.2
1000	0.9990	6.9	138.2	159.0
10000	0.9999	9.2	173.6	199.7

Pont de m'dez



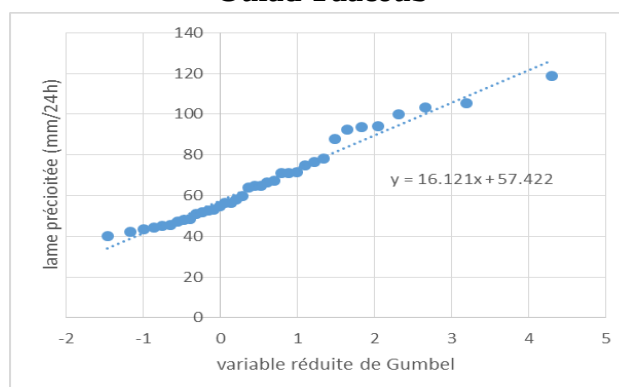
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	29.8	34.3
10	0.9000	2.3	52.8	60.8
20	0.9500	3.0	61.6	70.9
50	0.9800	3.9	73.0	84.0
100	0.9900	4.6	81.5	93.8
1000	0.9990	6.9	109.7	126.2
10000	0.9999	9.2	137.8	158.5

Oueljet Soltane



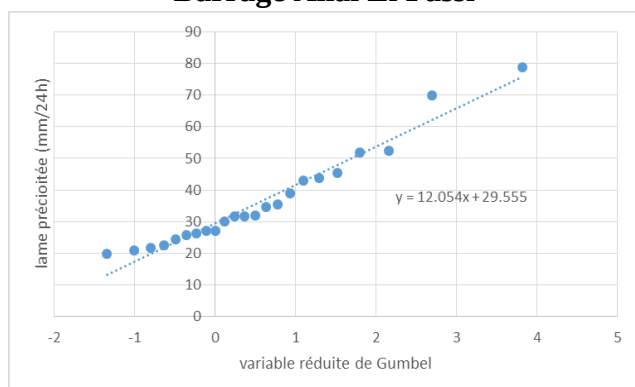
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	41.6	47.8
10	0.9000	2.3	72.6	83.5
20	0.9500	3.0	84.5	97.1
50	0.9800	3.9	99.8	114.8
100	0.9900	4.6	111.3	128.0
1000	0.9990	6.9	149.3	171.7
10000	0.9999	9.2	187.2	215.3

Oulad Yaacoub



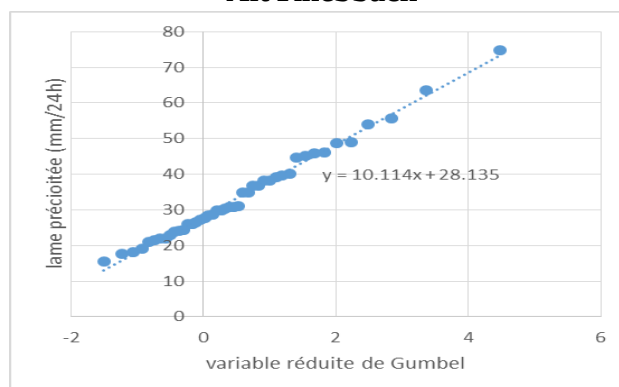
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	63.3	72.8
10	0.9000	2.3	93.7	107.8
20	0.9500	3.0	105.3	121.1
50	0.9800	3.9	120.3	138.4
100	0.9900	4.6	131.6	151.3
1000	0.9990	6.9	168.8	194.1
10000	0.9999	9.2	205.9	236.8

Barrage Allal El Fassi



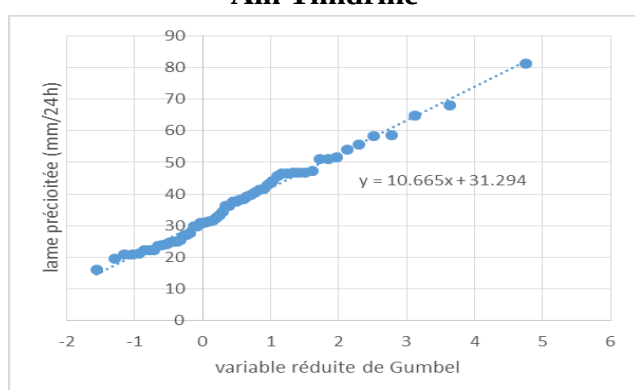
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	34.0	39.1
10	0.9000	2.3	56.7	65.2
20	0.9500	3.0	65.4	75.2
50	0.9800	3.9	76.6	88.1
100	0.9900	4.6	85.0	97.8
1000	0.9990	6.9	112.8	129.7
10000	0.9999	9.2	140.6	161.7

Ait Khebbach



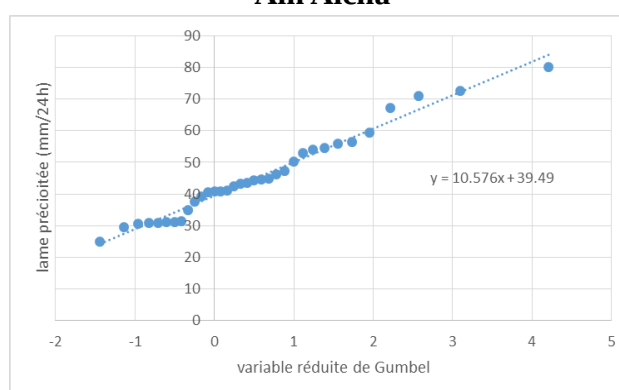
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	31.8	36.6
10	0.9000	2.3	50.9	58.5
20	0.9500	3.0	58.2	66.9
50	0.9800	3.9	67.6	77.7
100	0.9900	4.6	74.7	85.9
1000	0.9990	6.9	98.0	112.7
10000	0.9999	9.2	121.3	139.5

Ain Timdrine



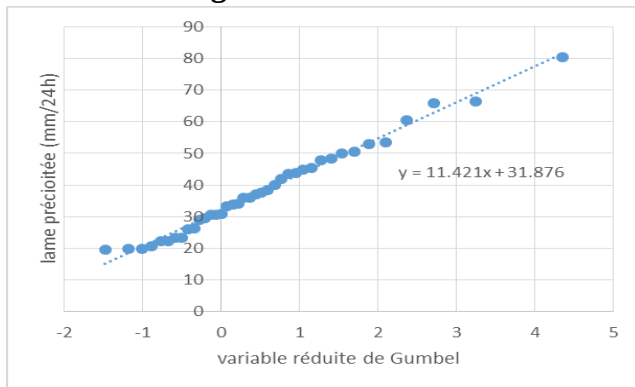
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	35.2	40.5
10	0.9000	2.3	55.3	63.6
20	0.9500	3.0	63.0	72.4
50	0.9800	3.9	72.9	83.8
100	0.9900	4.6	80.4	92.4
1000	0.9990	6.9	105.0	120.7
10000	0.9999	9.2	129.5	149.0

Ain Aicha



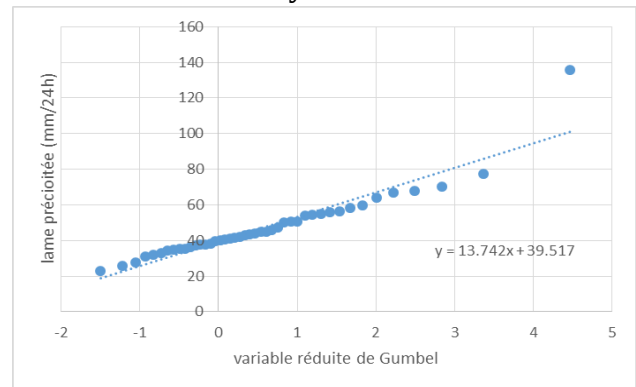
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	43.4	49.9
10	0.9000	2.3	63.3	72.8
20	0.9500	3.0	70.9	81.5
50	0.9800	3.9	80.8	92.9
100	0.9900	4.6	88.1	101.4
1000	0.9990	6.9	112.5	129.4
10000	0.9999	9.2	136.9	157.4

Aguelmame Sidi Ali



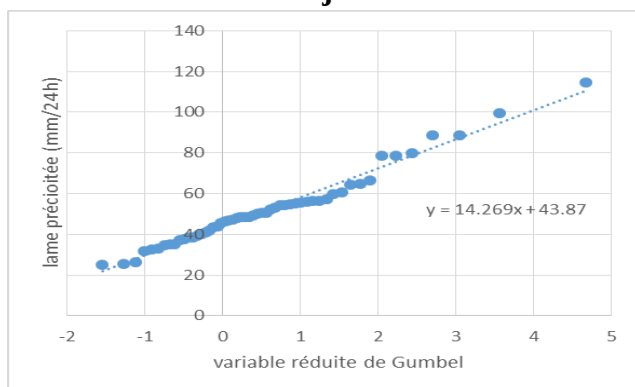
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	36.1	41.5
10	0.9000	2.3	57.6	66.2
20	0.9500	3.0	65.8	75.7
50	0.9800	3.9	76.4	87.9
100	0.9900	4.6	84.4	97.1
1000	0.9990	6.9	110.8	127.4
10000	0.9999	9.2	137.1	157.6

Moulay Ali Cherif



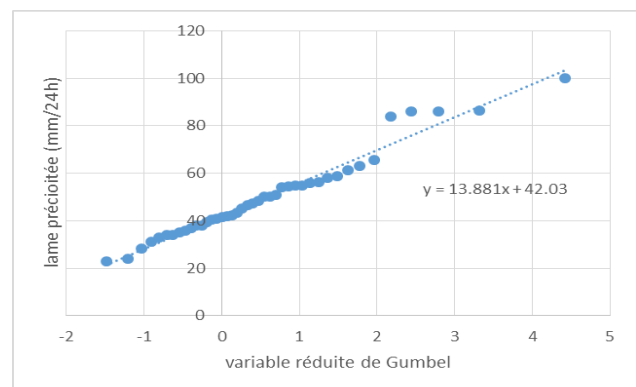
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	44.6	51.2
10	0.9000	2.3	70.4	81.0
20	0.9500	3.0	80.3	92.4
50	0.9800	3.9	93.1	107.1
100	0.9900	4.6	102.7	118.1
1000	0.9990	6.9	134.4	154.6
10000	0.9999	9.2	166.1	191.0

El Mjaara



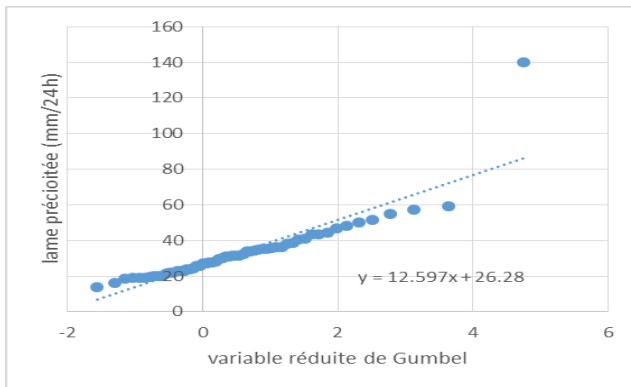
T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	49.1	56.5
10	0.9000	2.3	76.0	87.4
20	0.9500	3.0	86.3	99.2
50	0.9800	3.9	99.5	114.5
100	0.9900	4.6	109.5	125.9
1000	0.9990	6.9	142.4	163.8
10000	0.9999	9.2	175.3	201.6

Lalla Mimouna

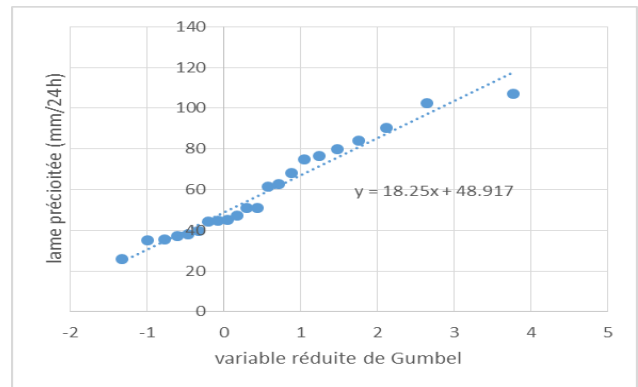


T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	47.1	54.2
10	0.9000	2.3	73.3	84.3
20	0.9500	3.0	83.3	95.7
50	0.9800	3.9	96.2	110.6
100	0.9900	4.6	105.9	121.8
1000	0.9990	6.9	137.9	158.6
10000	0.9999	9.2	169.9	195.4

Azzaba



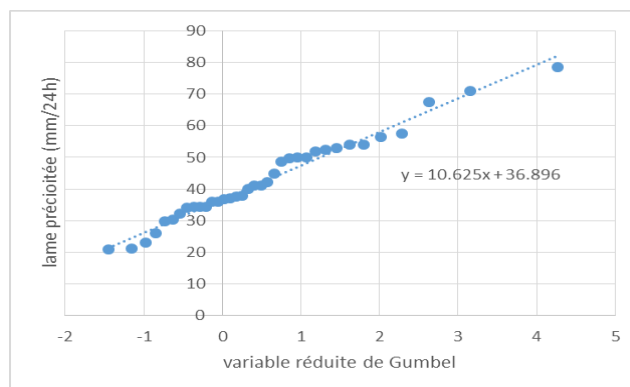
Kenitra



T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	30.9	35.5
10	0.9000	2.3	54.6	62.8
20	0.9500	3.0	63.7	73.2
50	0.9800	3.9	75.4	86.7
100	0.9900	4.6	84.2	96.9
1000	0.9990	6.9	113.3	130.3
10000	0.9999	9.2	142.3	163.6

T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	55.6	63.9
10	0.9000	2.3	90.0	103.5
20	0.9500	3.0	103.1	118.6
50	0.9800	3.9	120.1	138.1
100	0.9900	4.6	132.9	152.8
1000	0.9990	6.9	175.0	201.2
10000	0.9999	9.2	217.0	249.6

Ain Bittit

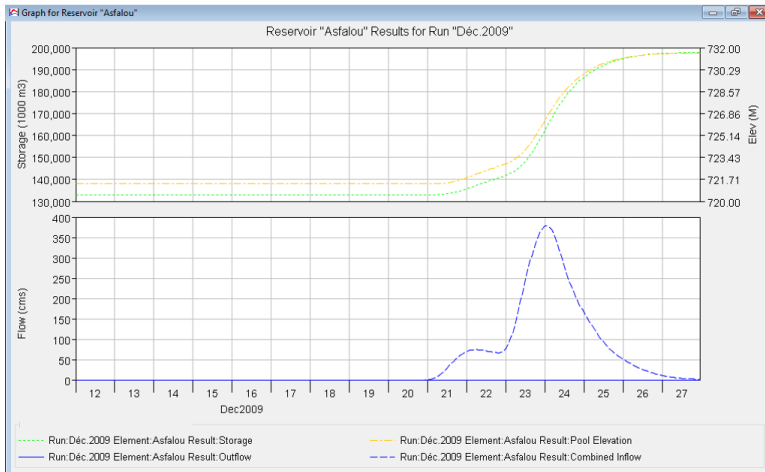


T	F	V.G	P(T)	P(T)24
2	0.5000	0.4	40.8	46.9
10	0.9000	2.3	60.8	69.9
20	0.9500	3.0	68.5	78.7
50	0.9800	3.9	78.4	90.1
100	0.9900	4.6	85.8	98.6
1000	0.9990	6.9	110.3	126.8
10000	0.9999	9.2	134.8	155.0

Annexe 7 : Résultats de la simulation de l'événement décembre 2009 au niveau des grands barrages

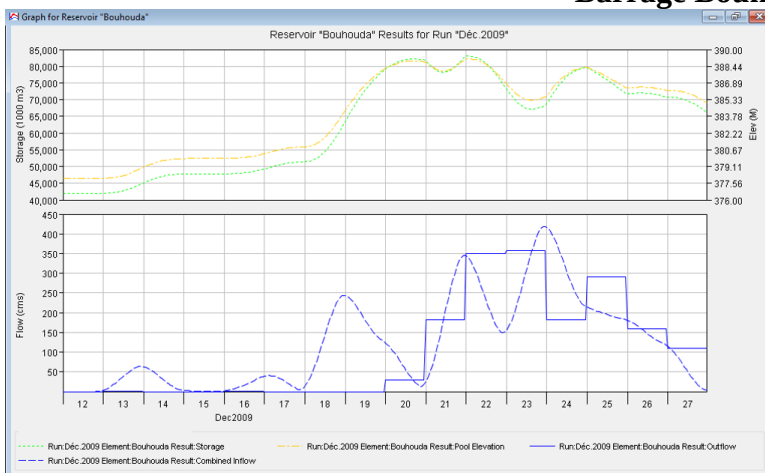
1. Branche Ourgha

Barrage Asfalou



Summary Results for Reservoir "Asfalou"			
Project: DEC2009		Simulation Run: Déc. 2009	
Reservoir: Asfalou			
Start of Run:	12déc. 2009, 00:01	Basin Model:	Sebou
End of Run:	27déc. 2009, 23:01	Meteorologic Model:	Sebou
		Control Specifications: Run_control	
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow:	378,8 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	24déc. 2009, 01:01
Peak Discharge:	0,0 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	12déc. 2009, 00:01
Inflow Volume:	64711,4 (1000 M3)	Peak Storage:	197728,5 (1000 M3)
Discharge Volume:	0,0 (1000 M3)	Peak Elevation:	731,6 (M)

Barrage Bouhouda



Summary Results for Reservoir "Bouhouda"

Project: DEC2009 Simulation Run: Déc. 2009
Reservoir: Bouhouda

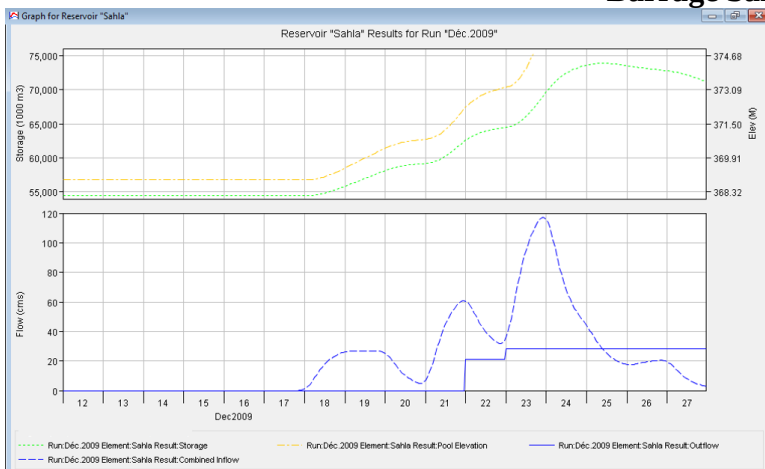
Start of Run: 12déc. 2009, 00:01 Basin Model: Sebou
End of Run: 27déc. 2009, 23:01 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: Run_control

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Inflow: 418,8 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow: 23déc. 2009, 22:01
Peak Discharge: 357,0 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge: 23déc. 2009, 00:01
Inflow Volume: 167465,9 (1000 M3)	Peak Storage: 83081,5 (1000 M3)
Discharge Volume: 143228,2 (1000 M3)	Peak Elevation: 389,1 (M)

Barrage Sahla



Project: DEC2009

Simulation Run: Déc. 2009

Reservoir: Sahla

Start of Run: 12déc. 2009, 00:01

End of Run: 27déc. 2009, 23:01

Basin Model: Sebou

Meteorologic Model: Sebou

Control Specifications: Run_control

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Inflow: 117,3 (M3/S)

Peak Discharge: 28,0 (M3/S)

Inflow Volume: 30599,1 (1000 M3)

Discharge Volume: 13860,0 (1000 M3)

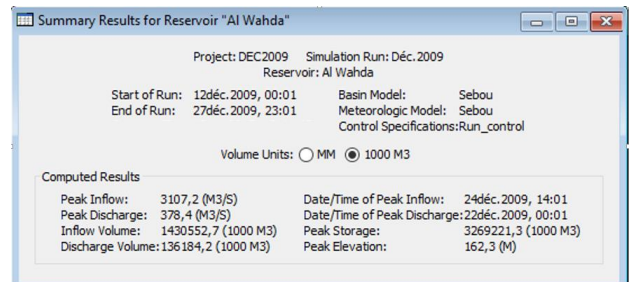
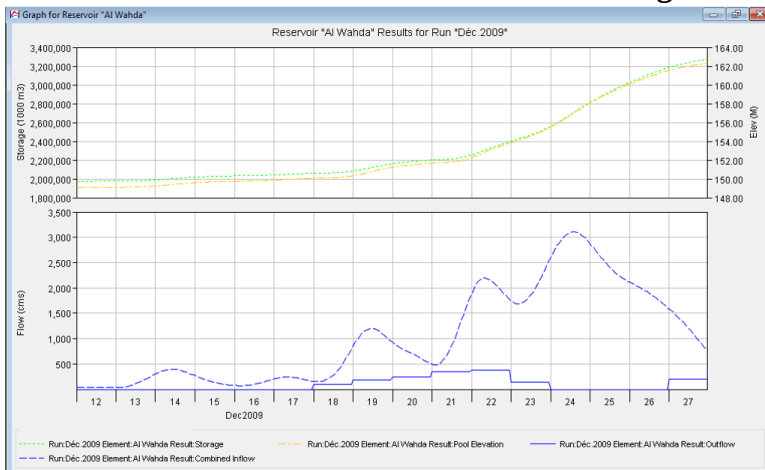
Date/Time of Peak Inflow: 23déc. 2009, 22:01

Date/Time of Peak Discharge: 23déc. 2009, 00:01

Peak Storage: 73835,9 (1000 M3)

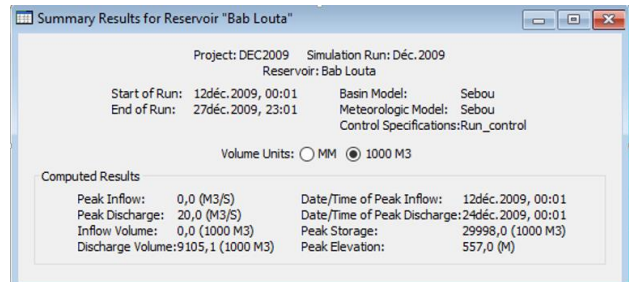
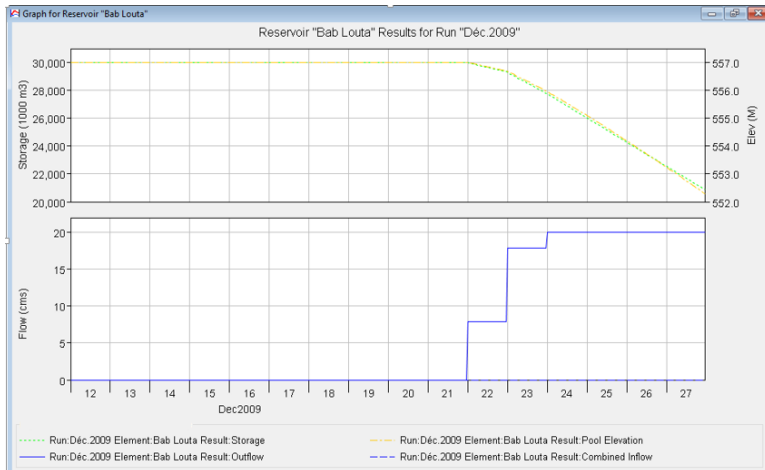
Peak Elevation: 374,7 (M)

Barrage Al Wahda

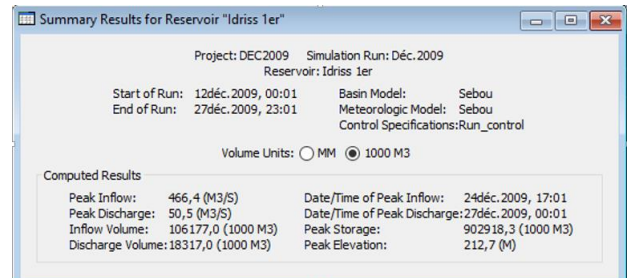
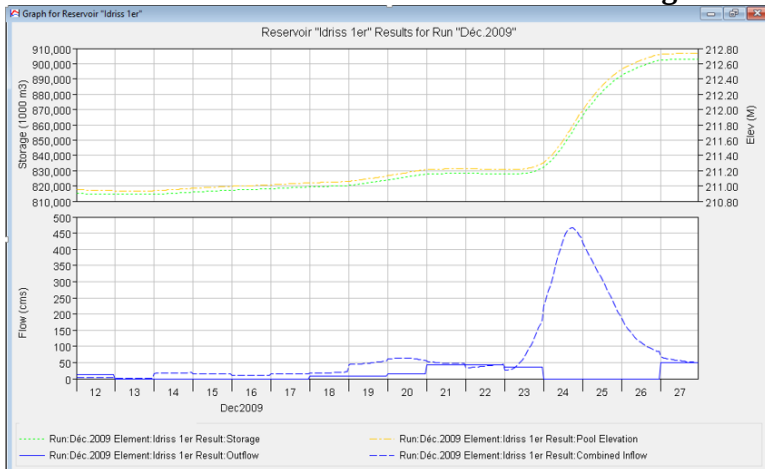


2. Branche Sebou

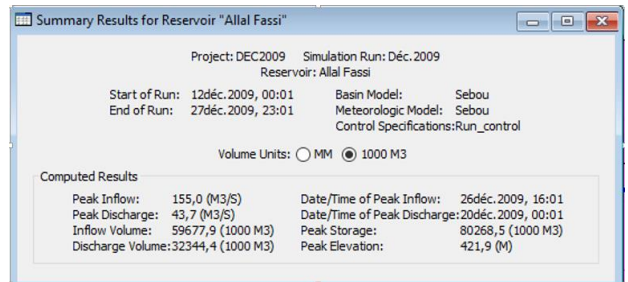
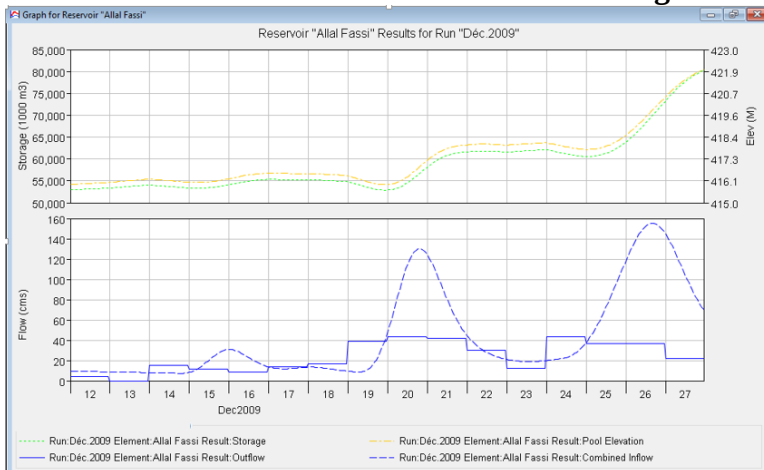
Barrage Bab Louta



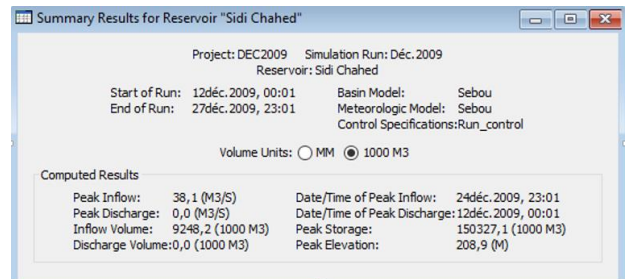
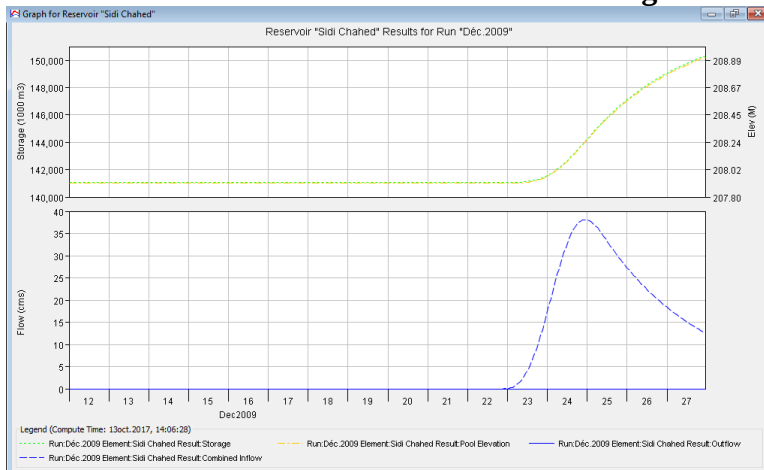
Barrage Idriss 1er



Barrage Allal Fassi

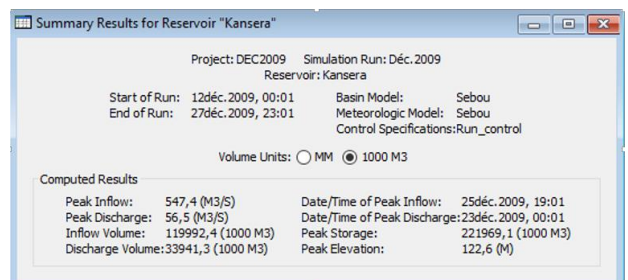
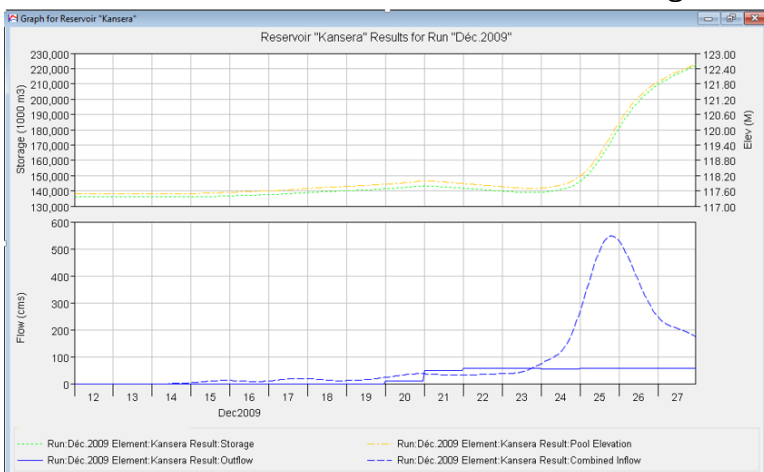


Barrage Sidi Chahed



3. Branche Beht

Barrage Kansera

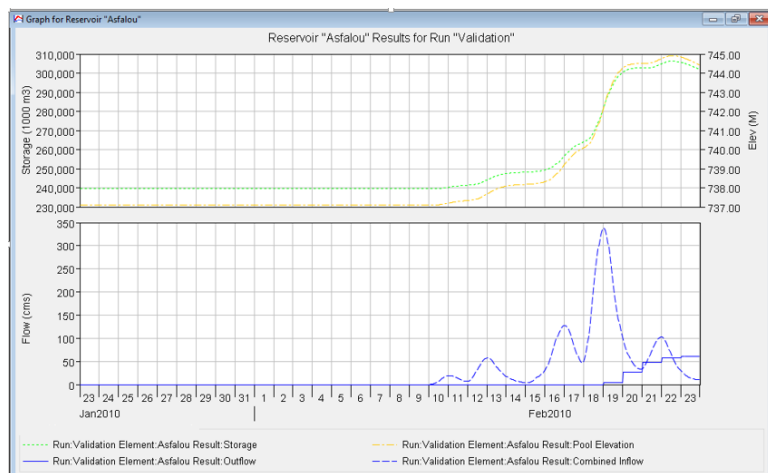


Annexe 8: Résultats détaillés de la simulation de l'événement Janvier-Février 2010

1. Branche Ourgha

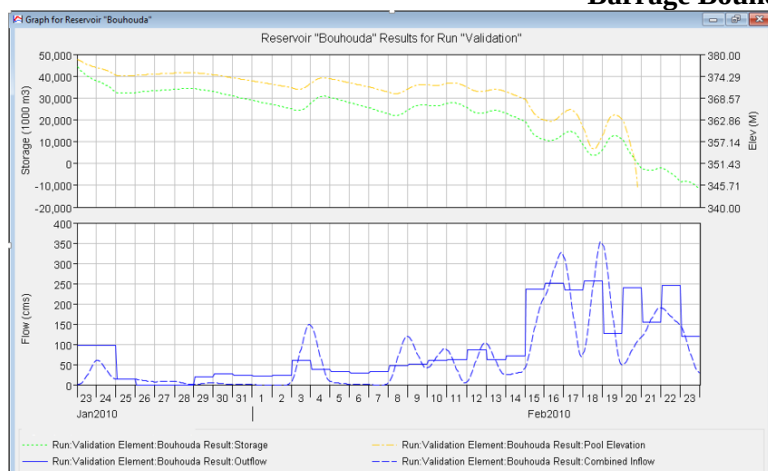
- Barrages

Barrage Asfalou



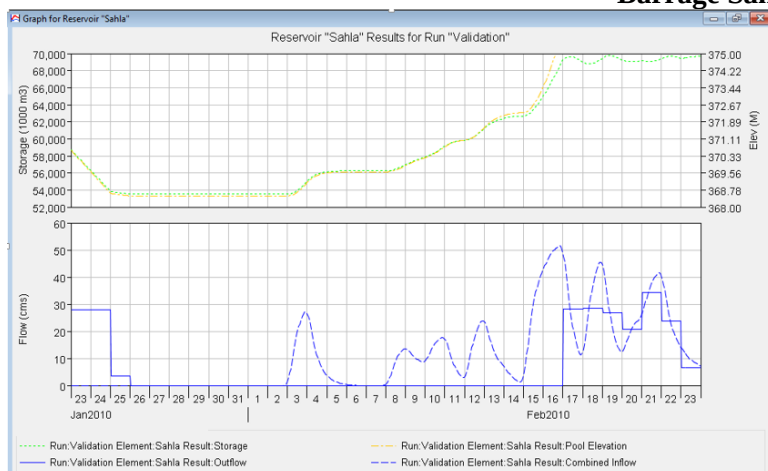
Project: JF2010		Simulation Run: Validation	
Reservoir: Asfalou			
Start of Run: 23janv.2010, 00:00	Basin Model: Sebou		
End of Run: 24févr.2010, 00:00	Meteorologic Model: Sebou		
Control Specifications:janv. fev. 2010			
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow: 338,5 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow: 19févr.2010, 01:00		
Peak Discharge: 60,9 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:23févr.2010, 01:00		
Inflow Volume: 79313,1 (1000 M3)	Peak Storage: 306255,5 (1000 M3)		
Discharge Volume:16963,0 (1000 M3)	Peak Elevation: 744,9 (M)		

Barrage Bouhoda



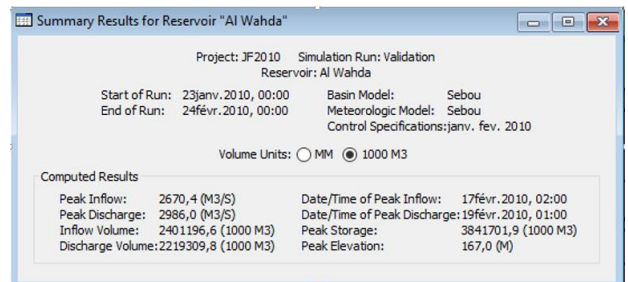
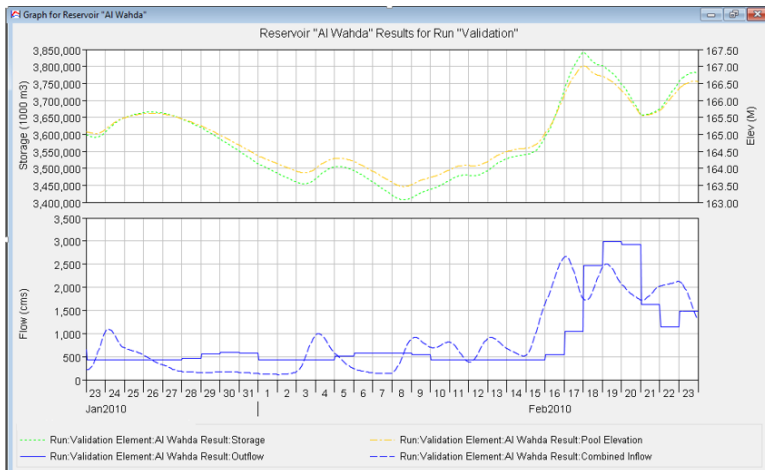
Project: JF2010		Simulation Run: Validation	
Reservoir: Bouhoda			
Start of Run: 23janv.2010, 00:00	Basin Model: Sebou		
End of Run: 24févr.2010, 00:00	Meteorologic Model: Sebou		
Control Specifications:janv. fev. 2010			
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow: 353,5 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow: 18févr.2010, 22:00		
Peak Discharge: 257,4 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:18févr.2010, 01:00		
Inflow Volume: 187359,0 (1000 M3)	Peak Storage: 44195,0 (1000 M3)		
Discharge Volume:243280,4 (1000 M3)	Peak Elevation: 378,7 (M)		

Barrage Sahla



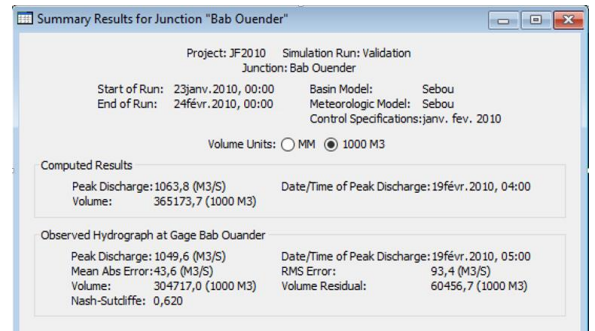
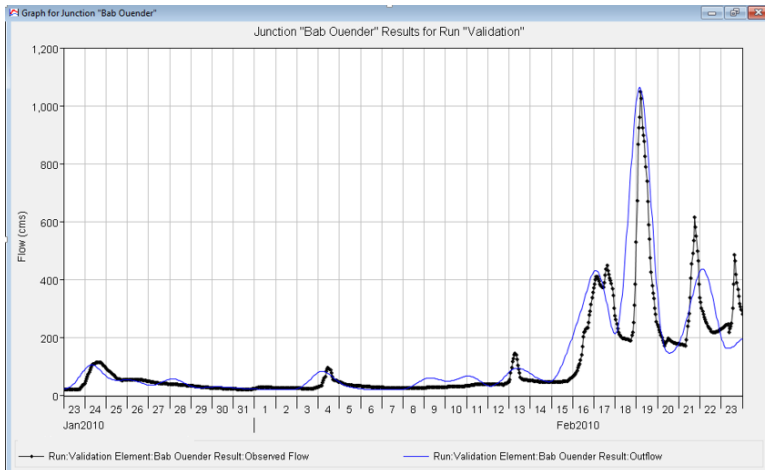
Project: JF2010		Simulation Run: Validation	
Reservoir: Sahla			
Start of Run: 23janv.2010, 00:00	Basin Model: Sebou		
End of Run: 24févr.2010, 00:00	Meteorologic Model: Sebou		
Control Specifications:janv. fev. 2010			
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Inflow: 51,6 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow: 16févr.2010, 20:00		
Peak Discharge: 34,4 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:21févr.2010, 01:00		
Inflow Volume: 30719,0 (1000 M3)	Peak Storage: 69747,3 (1000 M3)		
Discharge Volume:19746,4 (1000 M3)	Peak Elevation: 374,9 (M)		

Barrage Al Wahda

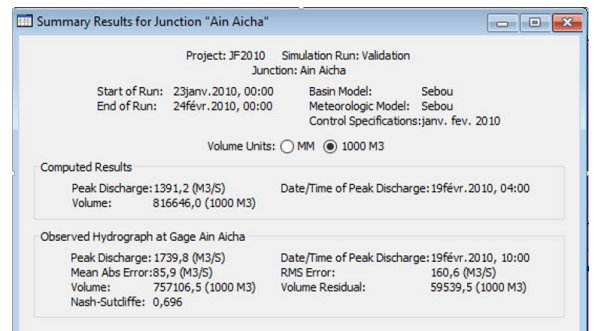
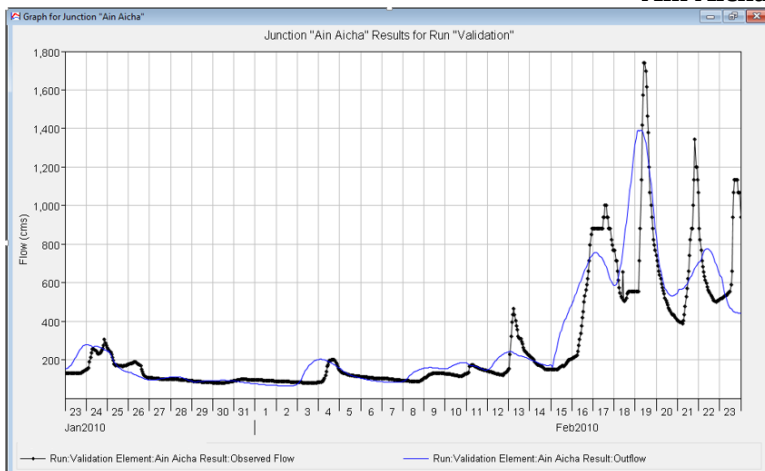


- Stations hydrologiques

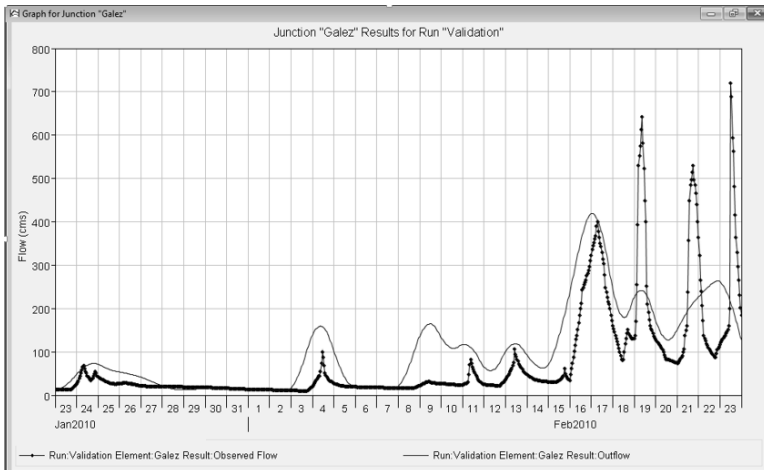
Bab Ouender



Ain Aicha



Galez



Summary Results for Junction "Galez"

Project: JF 2010

Simulation Run: Validation

Junction: Galez

Start of Run: 23janv. 2010, 00:00

End of Run: 24févr. 2010, 00:00

Basin Model: Sebou

Meteorologic Model: Sebou

Control Specifications: janv. fév. 2010

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 419,5 (M3/S)

Volume: 289958,5 (1000 M3)

Date/Time of Peak Discharge: 17févr. 2010, 01:00

Observed Hydrograph at Gage Galez

Peak Discharge: 720,0 (M3/S)

Mean Abs Error: 56,3 (M3/S)

Volume: 202505,8 (1000 M3)

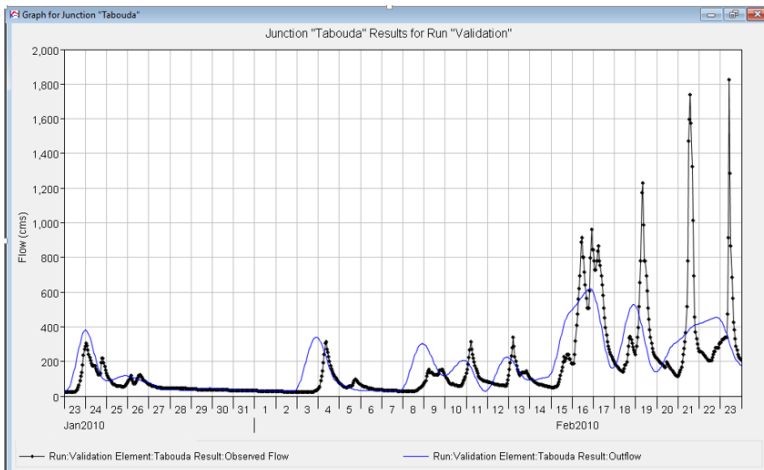
Nash-Sutcliffe: 0,385

Date/Time of Peak Discharge: 23févr. 2010, 12:00

RMS Error: 87,6 (M3/S)

Volume Residual: 87452,7 (1000 M3)

Tabouda



Summary Results for Junction "Tabouda"

Project: JF 2010 Simulation Run: Validation
Junction: Tabouda

Start of Run: 23janv. 2010, 00:00 Basin Model: Sebou
End of Run: 24févr. 2010, 00:00 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: janv. fév. 2010

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

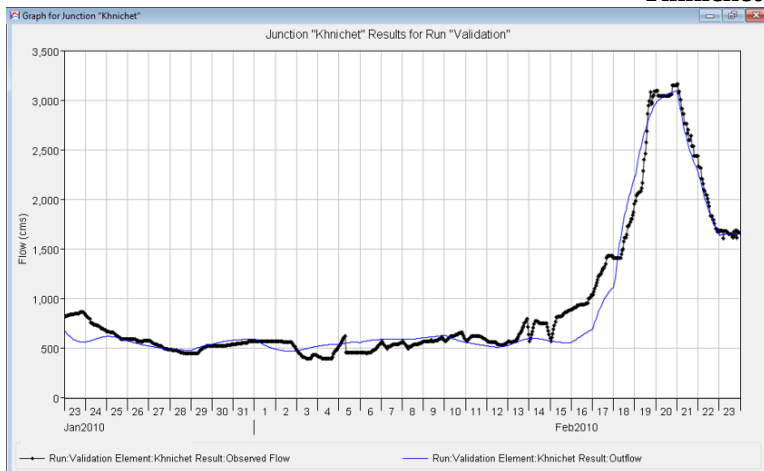
Computed Results

Peak Discharge: 619,1 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 16févr. 2010, 20:00
Volume: 493042,9 (1000 M3)

Observed Hydrograph at Gage Tabouda

Peak Discharge: 1826,2 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 23févr. 2010, 10:00
Mean Abs Error: 94,8 (M3/S) RMS Error: 176,6 (M3/S)
Volume: 450414,5 (1000 M3) Volume Residual: 42628,4 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 0,393

Khnichet



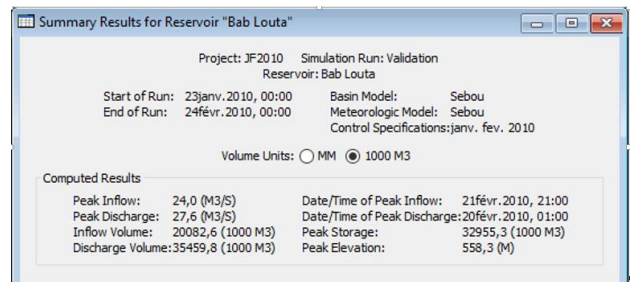
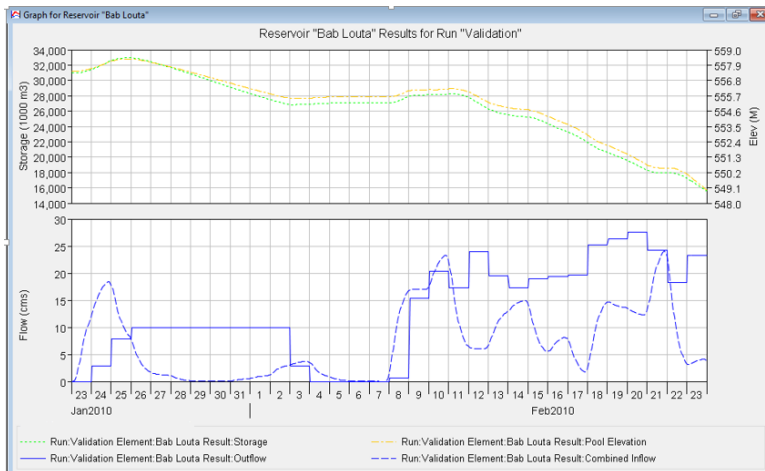
Summary Results for Junction 'Khnichet'

Project: JF 2010		Simulation Run: Validation	
Junction: Khnichet			
Start of Run: 23janv. 2010, 00:00	Basin Model: Sebou		
End of Run: 24févr. 2010, 00:00	Meteorologic Model: Sebou		
		Control Specifications: janv. fév. 2010	
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Computed Results			
Peak Discharge: 3096,2 (M3/S)		Date/Time of Peak Discharge: 21févr. 2010, 00:00	
Volume: 2470759,9 (1000 M3)			
Observed Hydrograph at Gage Khnichet			
Peak Discharge: 3160,1 (M3/S)		Date/Time of Peak Discharge: 21févr. 2010, 01:00	
Mean Abs Error: 99,0 (M3/S)		RMS Error: 139,7 (M3/S)	
Volume: 2564566,0 (1000 M3)		Volume Residual: -93806,1 (1000 M3)	
Nash-Sutcliffe: 0,961			

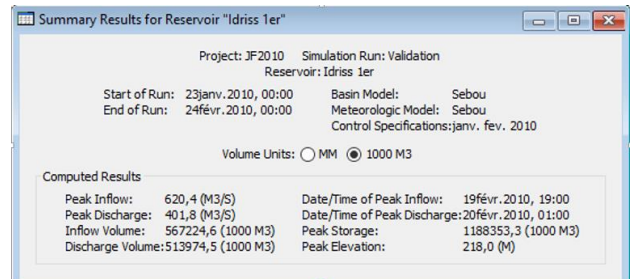
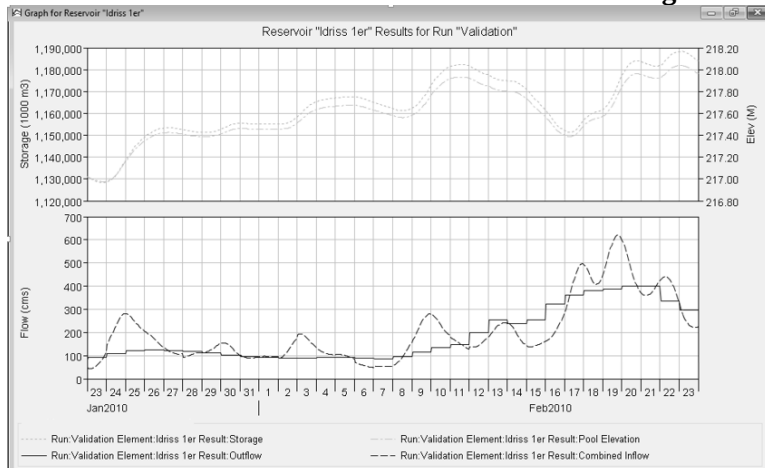
2. Branche Sebou

- Barrages

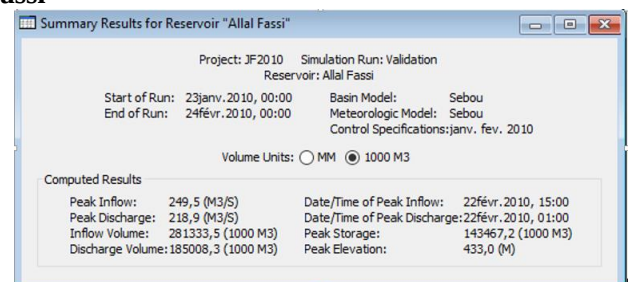
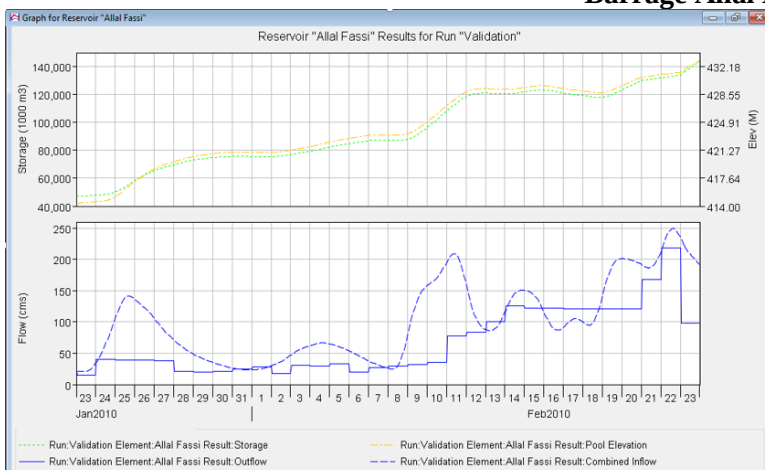
Barrage Bab louta



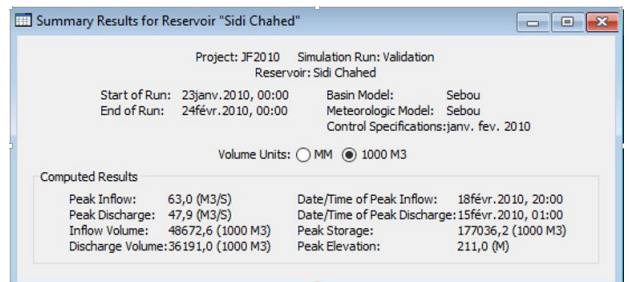
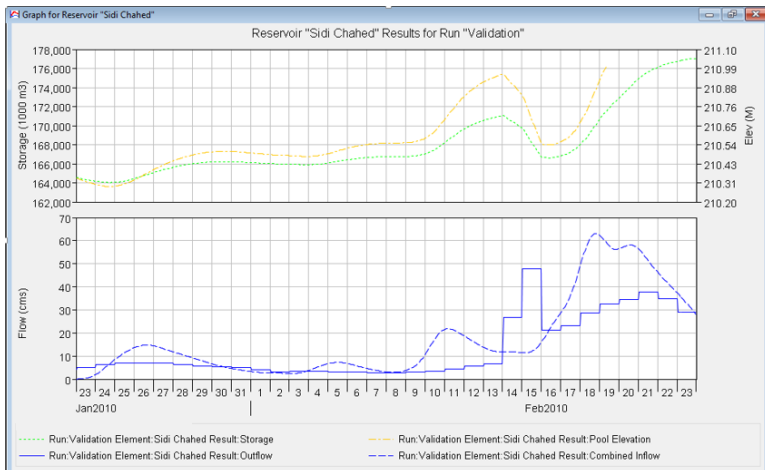
Barrage Idriss 1er



Barrage Allal Fassi

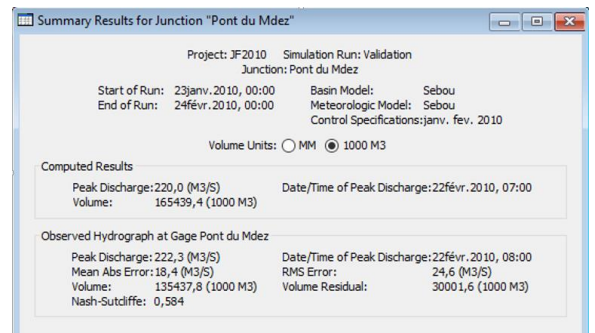
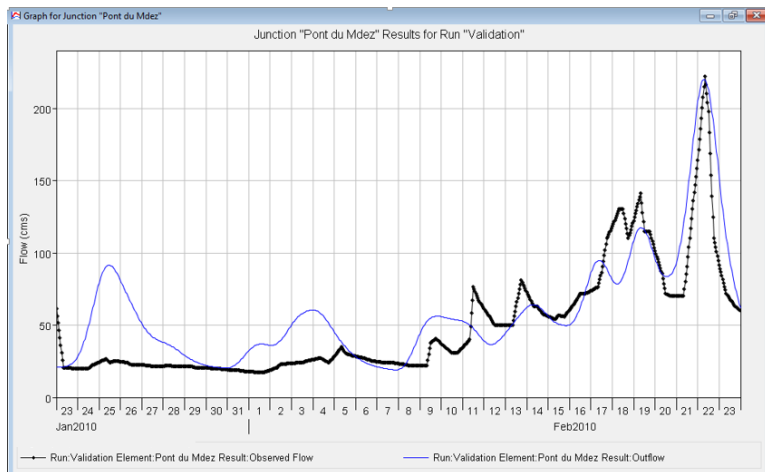


Barrage Sidi Chahed

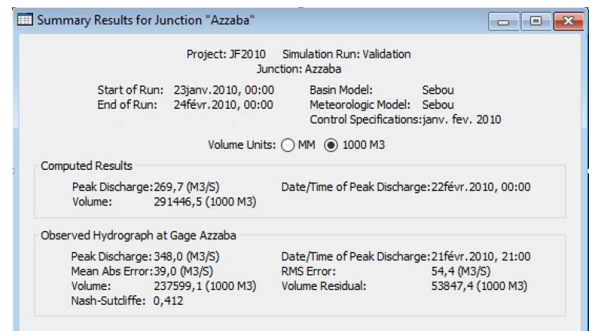
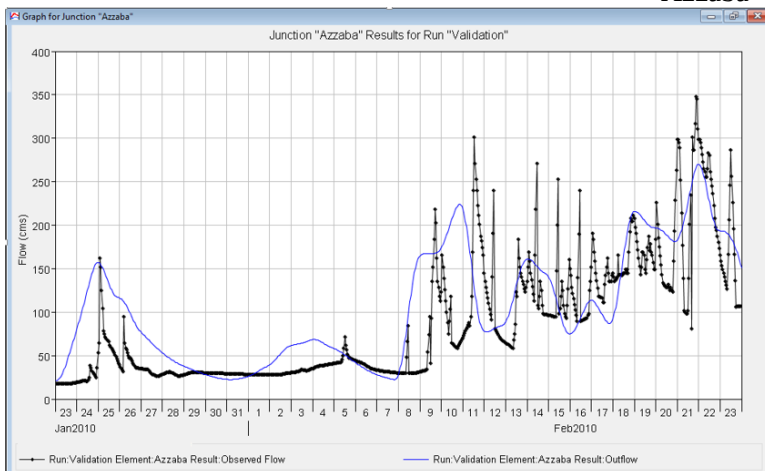


- Stations hydrologiques

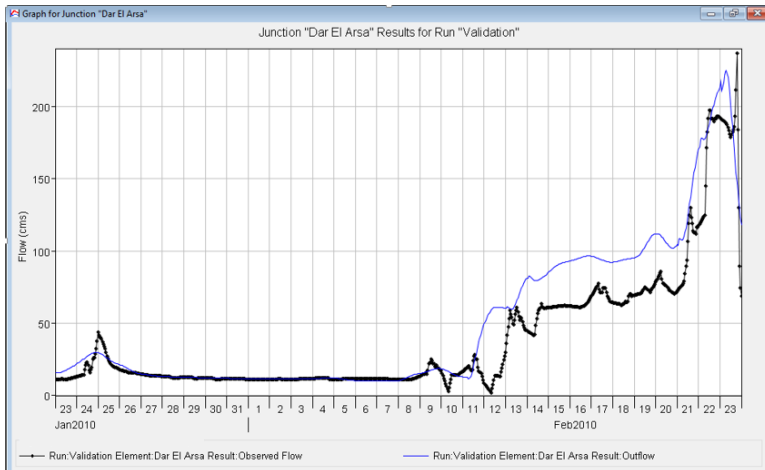
Pont du Mdez



Azzaba



Dar El Arsa



Summary Results for Junction "Dar El Arsa"

Project: JF2010 Simulation Run: Validation
Junction: Dar El Arsa

Start of Run: 23janv. 2010, 00:00 Basin Model: Sebou
End of Run: 24fevr. 2010, 00:00 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: janv. fevr. 2010

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

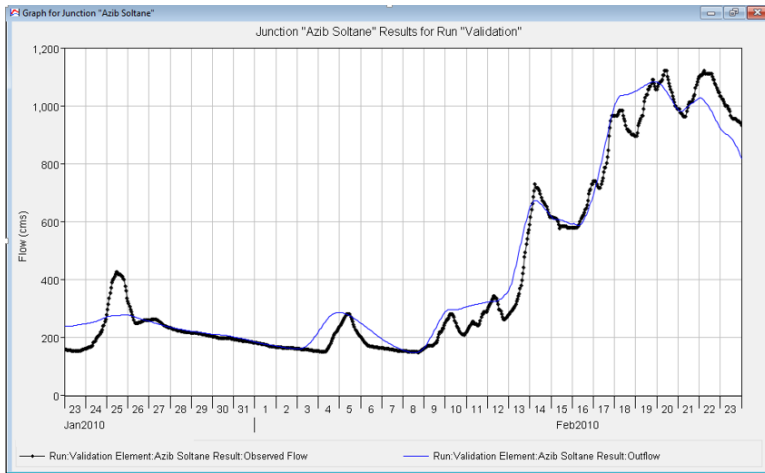
Computed Results

Peak Discharge: 224,6 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 23fevr. 2010, 07:00
Volume: 137933,6 (1000 M3)

Observed Hydrograph at Gage Dar El Arsa

Peak Discharge: 236,7 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 23fevr. 2010, 19:00
Mean Abs Error: 12,5 (M3/S) RMS Error: 19,8 (M3/S)
Volume: 107614,4 (1000 M3) Volume Residual: 30319,2 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 0,794

Azib Soltane

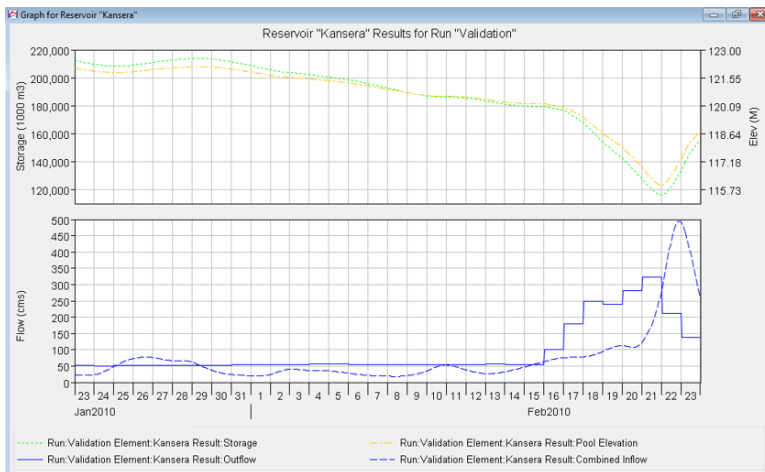


Summary Results for Junction "Azib Soltane"		  	
Project: JF2010		Simulation Run: Validation	
Junction: Azib Soltane			
Start of Run:	23janv. 2010, 00:00	Basin Model:	Sebou
End of Run:	24févr. 2010, 00:00	Meteorologic Model:	Sebou
		Control Specifications:	janv. fév. 2010
Volume Units:		☐ MM ☒ 1000 M3	
Computed Results			
Peak Discharge: 1082,3 (M3/S)		Date/Time of Peak Discharge: 19févr. 2010, 21:00	
Volume: 1223230,2 (1000 M3)			
Observed Hydrograph at Gage Azib Soltane			
Peak Discharge: 1121,3 (M3/S)		Date/Time of Peak Discharge: 20févr. 2010, 09:00	
Mean Abs Error: 41,0 (M3/S)		RMS Error: 57,8 (M3/S)	
Volume: 1182094,0 (1000 M3)		Volume Residual: 41136,1 (1000 M3)	
Nash-Sutcliffe: 0,969			

3. Branche Beht

- Barrages

Barrage Kansera



Summary Results for Reservoir "Kansera"

Project: JF2010 Simulation Run: Validation
Reservoir: Kansera

Start of Run: 23janv.2010, 00:00 Basin Model: Sebou
End of Run: 24févr.2010, 00:00 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: janv. fév. 2010

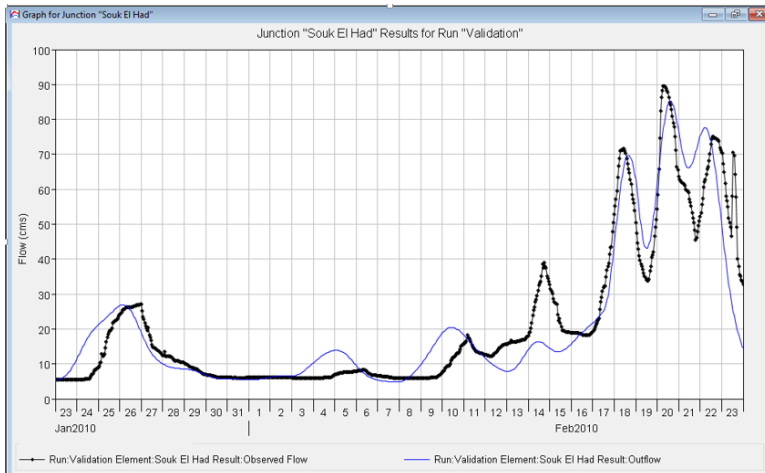
Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Inflow:	494,1 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow:	22févr.2010, 22:00
Peak Discharge:	323,4 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	21févr.2010, 01:00
Inflow Volume:	204120,6 (1000 M3)	Peak Storage:	213938,4 (1000 M3)
Discharge Volume:	261550,4 (1000 M3)	Peak Elevation:	122,1 (M)

- Stations hydrologiques

Souk El Had



Summary Results for Junction "Souk El Had"

Project: JF2010 Simulation Run: Validation
Junction: Souk El Had

Start of Run: 23janv.2010, 00:00 Basin Model: Sebou
End of Run: 24févr.2010, 00:00 Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: janv. fev. 2010

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

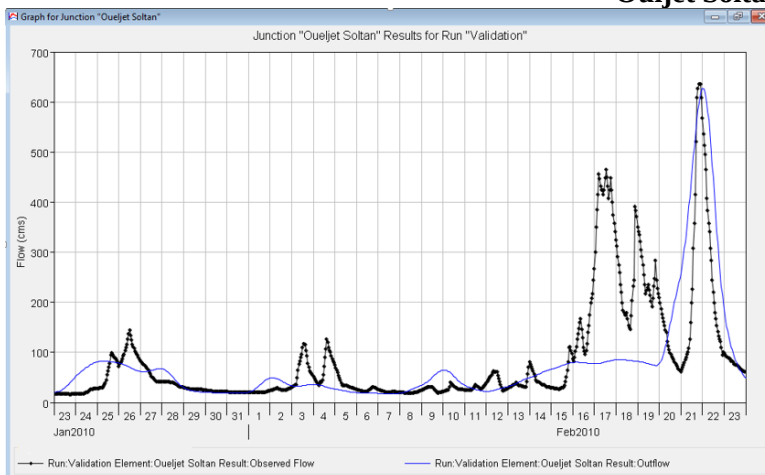
Computed Results

Peak Discharge: 85,3 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 20févr.2010, 15:00
Volume: 58977,2 (1000 M3)

Observed Hydrograph at Gage Souk El Had

Peak Discharge: 89,6 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 20févr.2010, 07:00
Mean Abs Error: 5,6 (M3/S) RMS Error: 8,4 (M3/S)
Volume: 59144,4 (1000 M3) Volume Residual: -167,2 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 0,841

Ouljet Soltane



Summary Results for Junction "Oueljet Soltane"

Project: JF2010 Simulation Run: Validation
Junction: Oueljet Soltane

Start of Run: 23janv.2010, 00:00
End of Run: 24févr.2010, 00:00

Basin Model: Sebou
Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications:janv. fev. 2010

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge:627,0 (M3/S)
Volume: 211159,2 (1000 M3)

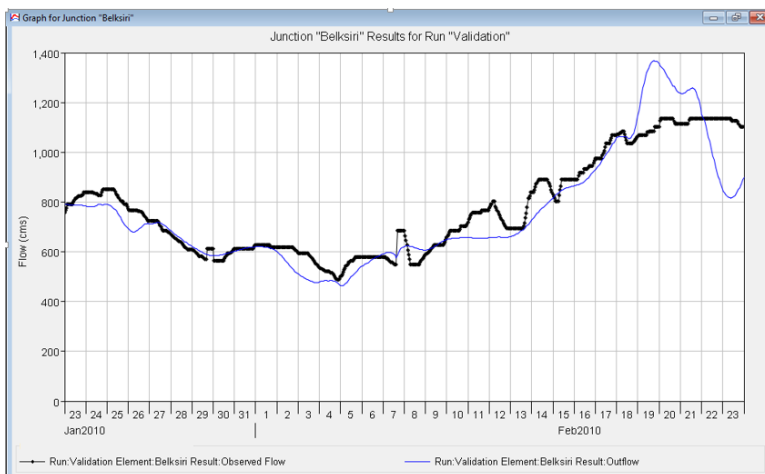
Date/Time of Peak Discharge:22févr.2010, 00:00

Observed Hydrograph at Gage Oueljet Soltane

Peak Discharge:636,0 (M3/S)
Mean Abs Error:50,0 (M3/S)
Volume: 234390,4 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 0,309

Date/Time of Peak Discharge:21févr.2010, 20:00
RMS Error: 91,9 (M3/S)
Volume Residual: -23231,2 (1000 M3)

4. Station Belksiri



Summary Results for Junction "Belksiri"

Project: JF2010 Simulation Run: Validation
Junction: Belksiri

Start of Run: 23janv.2010, 00:00
End of Run: 24févr.2010, 00:00

Basin Model: Sebou
Meteorologic Model: Sebou
Control Specifications: janv. fev. 2010

Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 1367,2 (M3/S)
Volume: 2084959,9 (1000 M3)

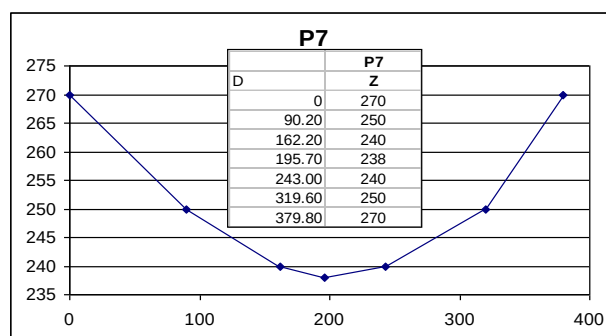
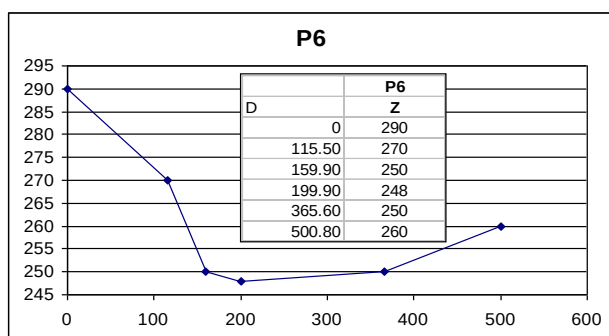
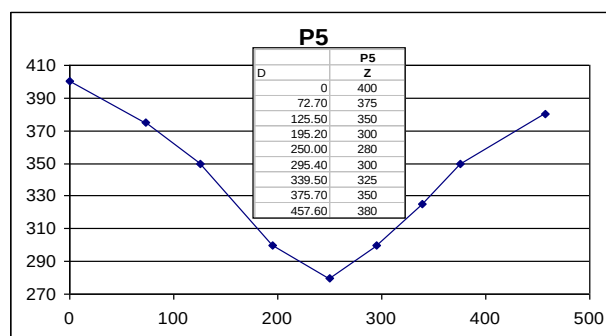
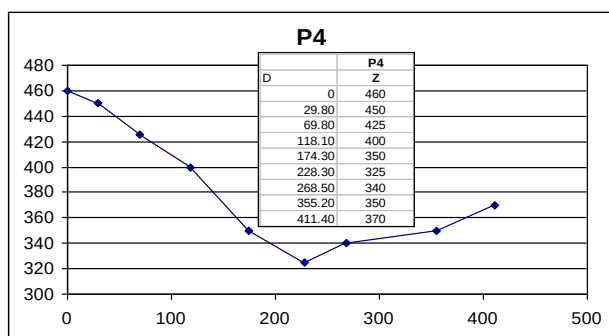
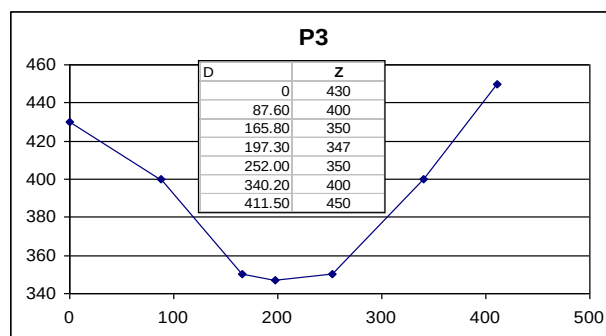
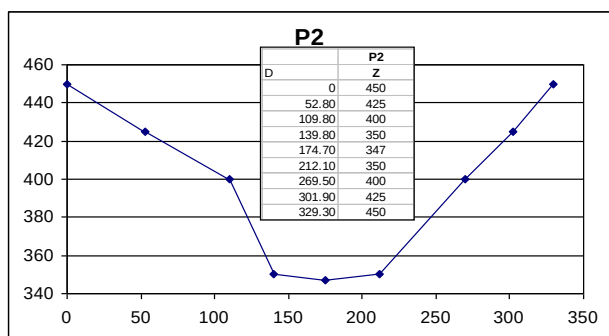
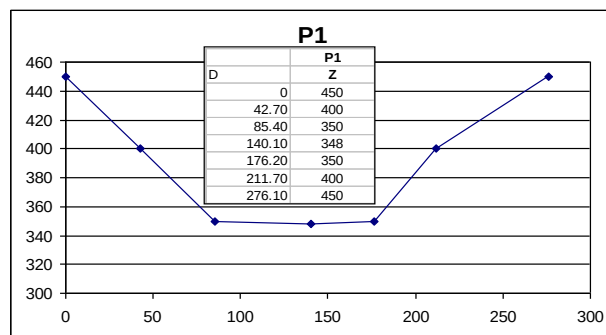
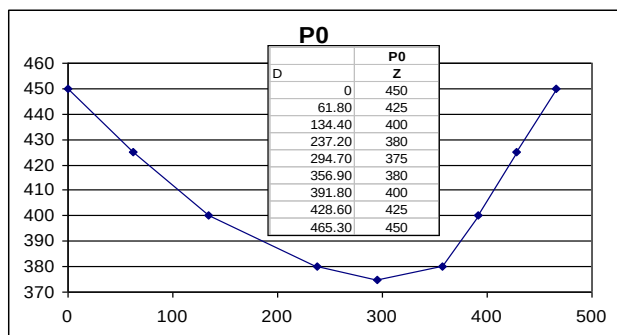
Date/Time of Peak Discharge: 19févr.2010, 18:00

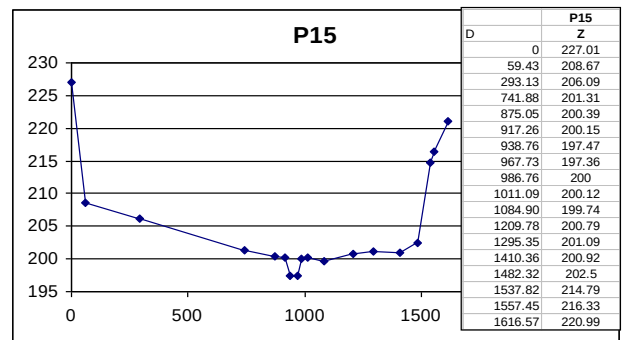
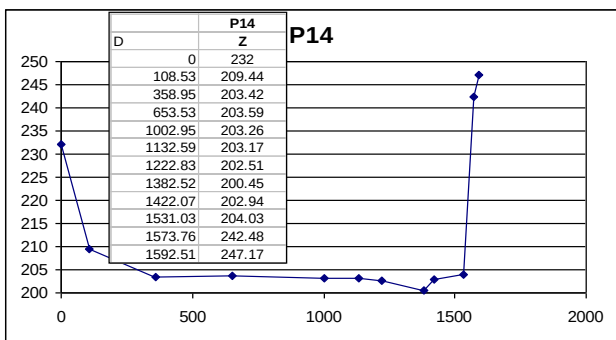
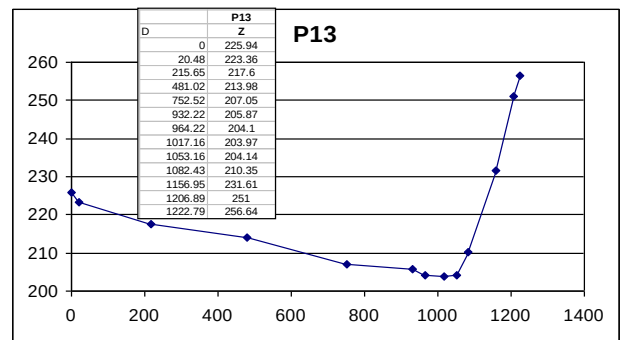
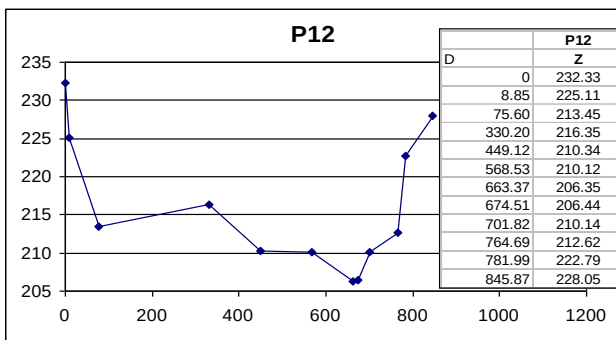
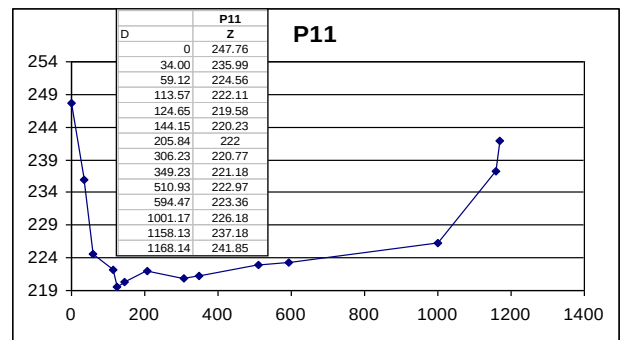
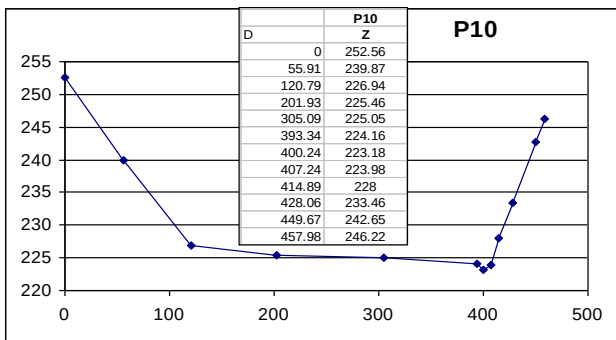
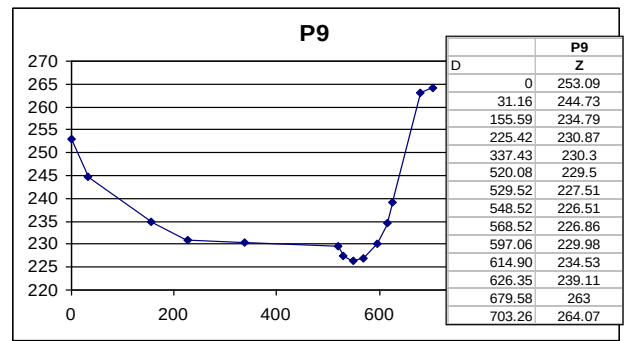
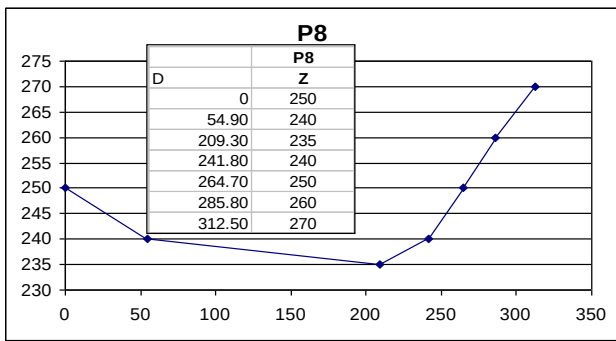
Observed Hydrograph at Gage Belksiri

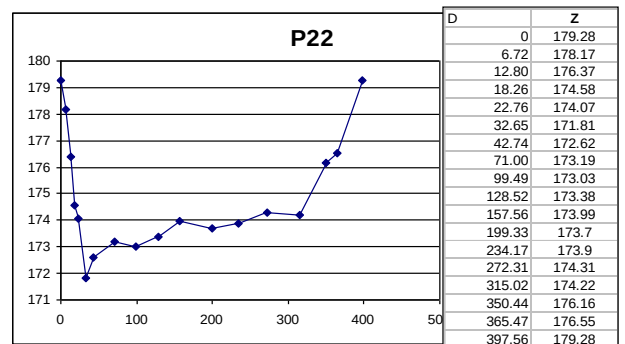
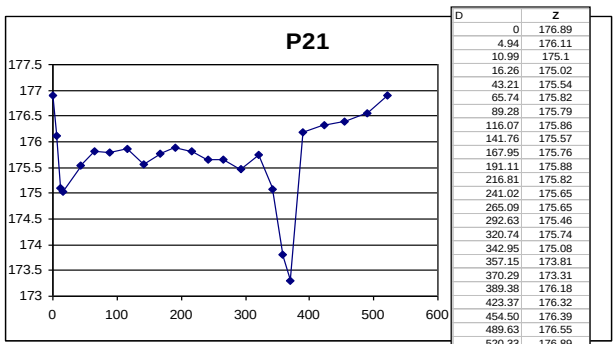
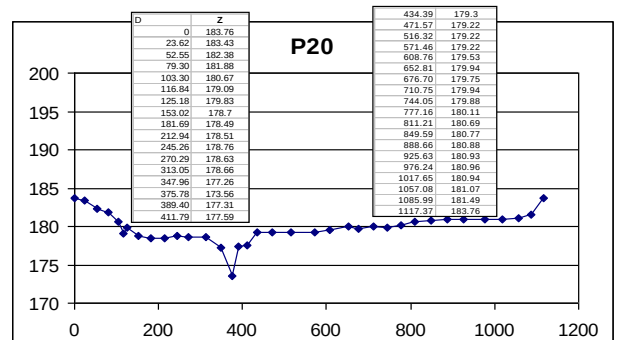
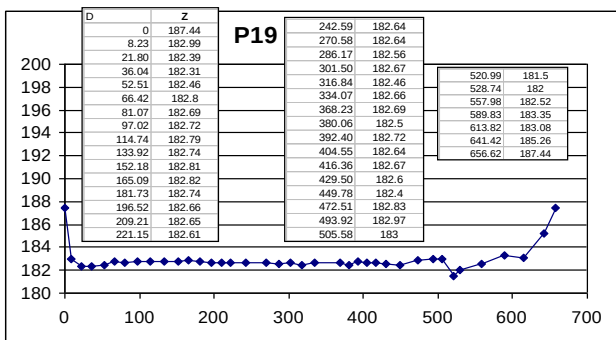
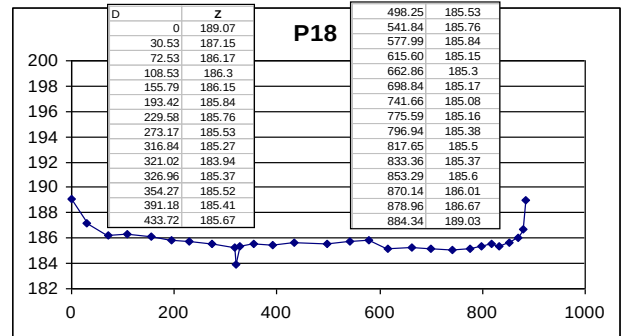
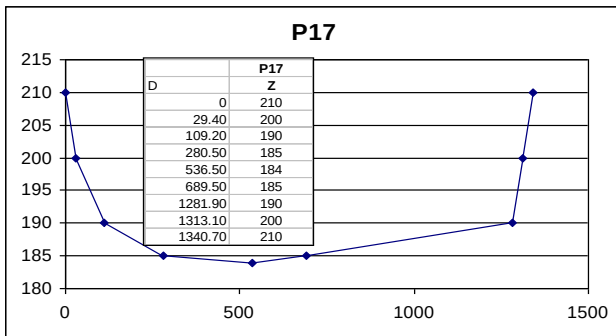
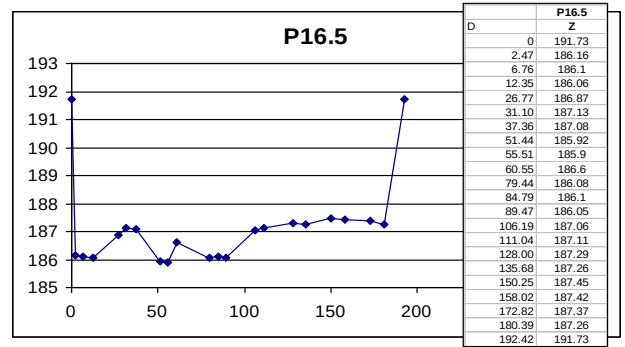
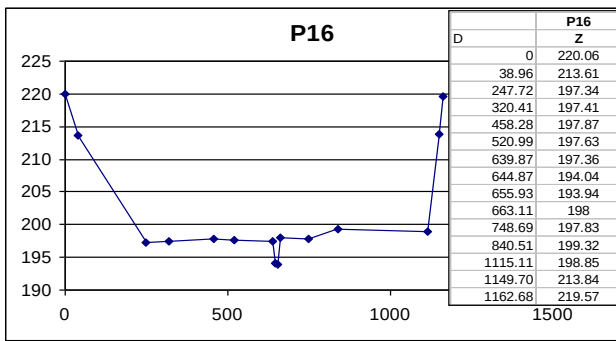
Peak Discharge: 1135,6 (M3/S)
Mean Abs Error: 64,0 (M3/S)
Volume: 2149215,5 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 0,778

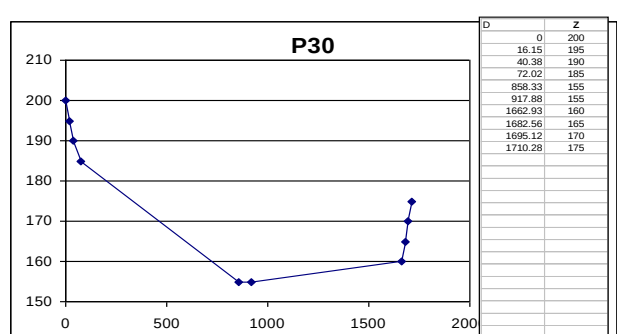
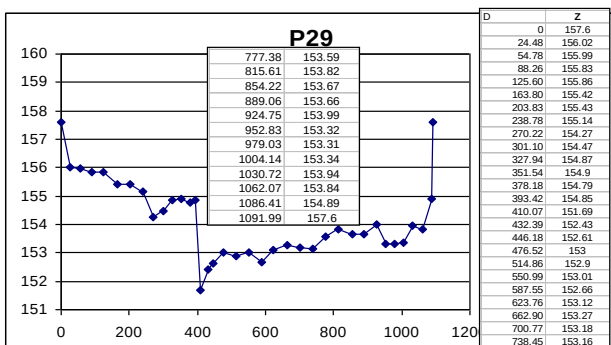
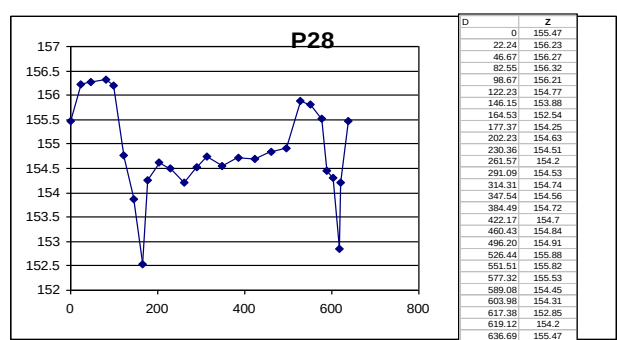
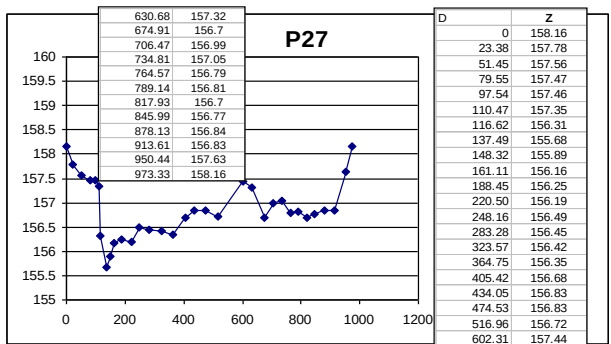
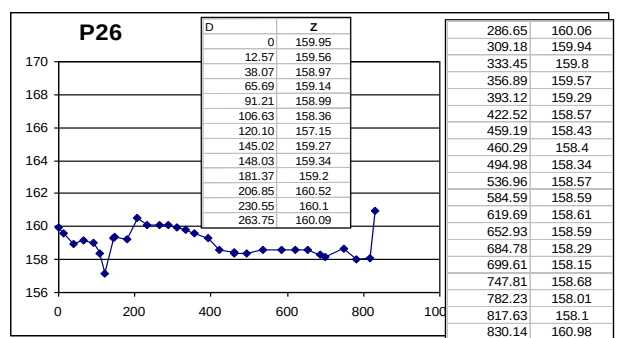
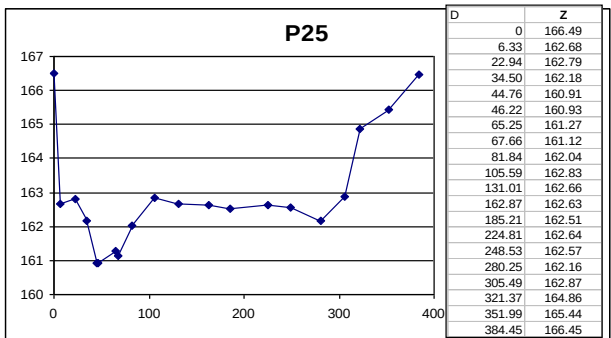
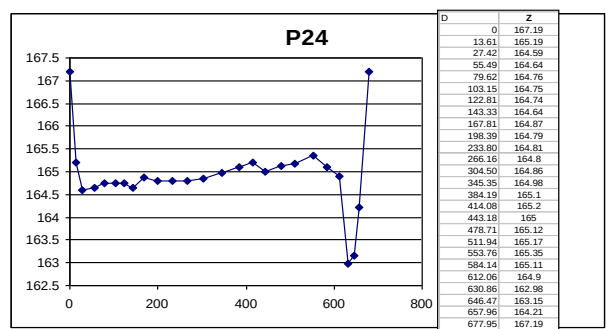
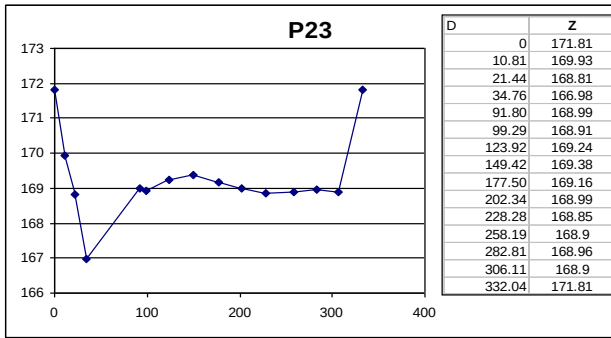
Date/Time of Peak Discharge: 20févr.2010, 02:00
RMS Error: 93,7 (M3/S)
Volume Residual: -64255,6 (1000 M3)

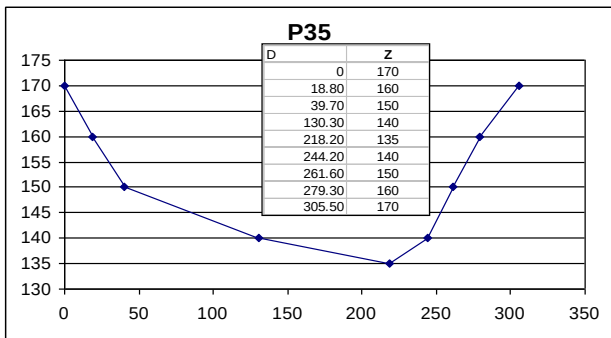
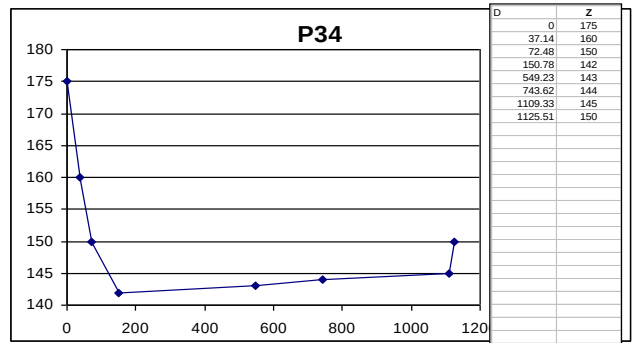
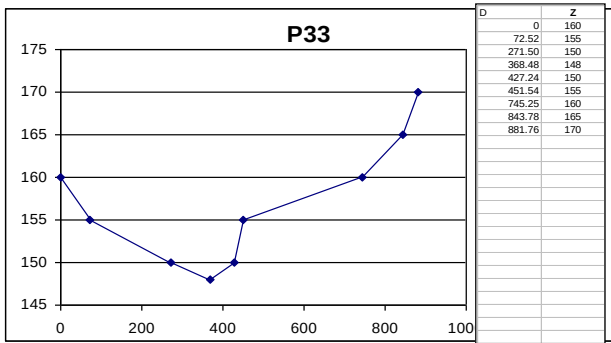
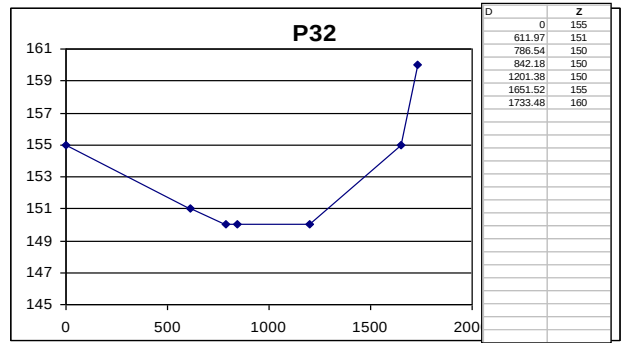
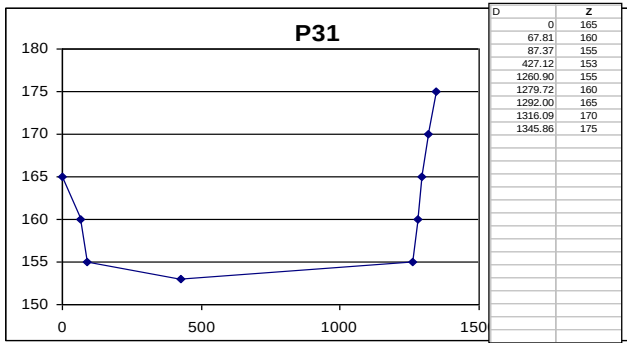
Annexe 9: Levés topographiques utilisés dans la modélisation hydraulique











Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

Résumé de la thèse

Le bassin de Sebou, situé au nord du Maroc, renferme presque le tiers des ressources en eau de surface du pays. Il se caractérise par un contraste marqué sous les deux plans physique et hydroclimatique, vu son vaste étendue et sa situation géographique à cheval entre des domaines nettement différents géomorphologiquement et géologiquement.

D'autre part, il s'agit d'un bassin très peuplé, abritant 6,8 millions d'habitants (RGPH 2014) répartis sur des agglomérations concentrées le long des principaux cours d'eau, d'où leur exposition au risque de crues et d'inondation. Cette situation, conjuguée aux effets des changements climatiques, rend de plus en plus compliqué, la tâche de la prévision et la gestion des crues dans le bassin.

L'objectif de ce travail de recherche est l'élaboration d'un modèle de prévision des crues, qui servira comme outil de gestion et d'aide à la décision. L'idée s'inscrit dans le cadre d'un essai d'amélioration et de modernisation des moyens actuels de suivi et de prévision hydrologique. On essaie de profiter de la révolution actuelle en matière d'acquisition des données hydroclimatiques et topographiques, et des automatismes de traitement offerts par les outils informatiques en perpétuel développement.

La méthodologie suivie lors de ce travail est basée essentiellement sur la modélisation hydrologique pluie-débit, la modélisation hydraulique et les SIG.

Le travail consistait dans un premier temps, à concevoir un modèle hydrologique pluie-débit à l'aide de l'outil HEC-HMS, ayant pour objet d'analyser le comportement hydrologique du bassin en crue. Les simulations effectuées ont permis de quantifier les apports des principaux sous bassins. Ainsi, les résultats ont montré que le bassin de l'Ouergha était à l'origine de la belle partie des apports de la plaine du Gharb. Sa contribution était de 47% et 62% durant les deux événements déc. 2009 et janv.-févr. 2010 respectivement.

Dans un deuxième temps, un modèle hydraulique a été élaboré en utilisant l'outil HEC-RAS. Il a permis de simuler la propagation de l'onde de crue dans le Sebou en aval du barrage Allal El Fassi, et d'en déterminer les paramètres nécessaires à la prévision et la gestion des crues. La simulation a révélé que la crue du 10-11 Octobre 2008 a parcouru les 60 km entre le barrage et la station dar Arsa en 8 heures. La vitesse d'écoulement a atteint plus de 5 m/s, alors que la profondeur maximale a dépassé 10m.

Les résultats de la modélisation hydraulique ont été exploités par la suite dans la délimitation des zones inondables au niveau du tronçon étudié. Ce qui nous a permis de mettre en évidence l'exposition de plusieurs infrastructures, douars et terrains agricoles au risque d'inondation.

Mots clés : bassin de Sebou, crues, prévision, modélisation hydrologique et hydraulique, SIG, HEC-HMS, HEC-RAS.