

# THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

**Centre de Recherche :** Eau, Ressources Naturelles, Changement climatique, Matériaux, nanomatériaux, Environnement, Développement Durable

**Structure de Recherche :** Géosciences, Eau et Environnement

**Discipline :** Sciences de la Terre

**Spécialité :** Sciences de l'Eau, modélisation climatologique et hydrologique

Présentée et soutenue le 21/05/2022 par :

**Mohamed Abdellah EZZAOUINI**

Le titre de la thèse

**Evaluation de l'érosion hydrique et du transport solide par  
modélisation cartographique et intelligence artificielle au niveau du  
bassin versant du Bouregreg  
(Maroc)**

## JURY

|                              |                                                                     |                       |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Mohammed ACHAB               | PES, Université Mohammed V- Institut Scientifique, Rabat            | Président /Rapporteur |
| Tarik BAHAI                  | PH, Université Mohammed V- Faculté des Sciences, Rabat              | Rapporteur/Examineur  |
| Alain LARAQUE                | PES, IRD/UMR 234 GET, Montpellier, France                           | Rapporteur/Examineur  |
| Mohamed HILALI               | PES Université Moulay Ismail-Faculté des Sciences, , Meknès         | Rapporteur/Examineur  |
| Mohamed FAOUZI               | PES, Université Mohammed V - Ecole Mohammadia des Ingénieurs, Rabat | Examineur             |
| Jules Rémy NDAM<br>NGOUPAYOU | PES, University of Yaoundé I, Cameroun                              | Examineur             |
| Abdelaziz ZEROUALI           | Directeur de la Recherche et de la Planification de l'Eau, Rabat    | Invité                |
| Gil Mahé                     | PES, IRD/Hydrosiences, Montpellier, France                          | Co-Directeur          |
| Ilias KACIMI                 | PES, Université Mohammed V- Faculté des Sciences, Rabat             | Directeur de thèse    |

Année universitaire : 2021/2022

## ***Dédicaces***

Je dédie ce travail à mes défunts grands parents, particulièrement mon Grand-père, **Haj M'Hamed EZZAOUINI** qui m'a toujours encouragé et supporté lors de mes études et il a suscité en moi le goût de l'effort par sa rigueur.

La dédicace va aussi à la mémoire de mon père feu **Haj EL Mokhtar EZZAOUINI**, disparu trop tôt pour apprécier avec moi ces moments inoubliables de ma vie, et à ma mère **Khadija EL BORDO** qui est ma source de vie, d'amour et d'affection. Je les remercie pour leur soutien continu et sans faille, pour leur patience et leur disponibilité.

Je dédie ce travail à mes filles chères **Sara** et **Hajar EZZAOUINI**. J'espère qu'il soit pour elles une source d'inspiration et de fierté dans leur vie, et une motivation pour toujours aller de l'avant.



## **Avant-propos**

Au terme de ce travail, je tiens à remercier toutes personnes ayant contribué de loin ou de près à sa réalisation par leurs encadrements scientifiques et techniques, par la mise à dispositions des données, par leurs soutiens et leurs encouragements.

Mes vifs remerciements s'adressent à Monsieur **Ilias Kacimi** professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat pour avoir dirigé ce travail avec grand intérêt.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi à Monsieur **Gil Mahé** Directeur de recherche de l'IRD au Laboratoire HydroSciences, Université de Montpellier, France, pour sa Codirection et pour ses forts pour réaliser ce travail.

Je remercie infiniment, Monsieur **Mohammed ACHAB**, Professeur à l'Institut Scientifique de Rabat, d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance et d'examiner mon travail en sa qualité de rapporteur. Je le remercie surtout pour son esprit de partage, pour ces remarques pertinentes et pour ses efforts déployés afin de mener cette thèse dans le bon sens.

Mes profonds remerciements vont à Monsieur **Tarik BAHAI**, Professeur à la *Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat*, rapporteur et examinateur de ma thèse, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de l'avoir enrichi par ses remarques, conseil et commentaire qui ont permis de mettre en valeur ce travail.

De même, Ma profonde gratitude va à Monsieur **Alain LARAQUE** Directeur de Recherche à l'IRD/UMR 234 GET, Montpellier, France, rapporteur et examinateur de mon travail de thèse, pour avoir aussi accepté d'être membre de Jury et en me permettant de bénéficier de ses conseils et expériences scientifiques.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur **Mohammed HILALI**, Professeur à la *Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, Meknès*, rapporteur et examinateur de ma thèse, pour avoir accepté de faire partie des membres de Jury et pour ses observation et remarques qui ont contribué à l'amélioration de mon rapport.

Je remercie sincèrement Monsieur **Mohamed FAOUZI** Professeur de l'Ecole Mohammadia des Ingénieurs, Université Mohammed V, Rabat examinateur de ma thèse, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de l'avoir enrichi par ses remarques, conseils et commentaires, afin de mettre ce travail dans sa vraie valeur.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur **Jules Rémy NDAM NGOUPAYOU**, Professeur de l'University of Yaoundé I, Cameroun, examinateur externe, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et d'avoir accepté de faire partie des membres du jury et d'examiner le présent travail.

Je remercie également le Professeur **Mohammed REGRAGUI**, doyen de la Faculté des Sciences de Rabat, de m'avoir donné l'opportunité de poursuivre mes études au sein de cette honorable faculté.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **Abdelaziz ZEROUALI**, Directeur de la Recherche et de la Planification de l'Eau, Rabat, pour la mise à disposition des données nécessaires à la réalisation de ce travail, ses encouragements et l'intérêt qu'il porte pour la recherche et développement dans le domaine de la connaissance des ressources en eau.

Enfin, je remercie chaleureusement mes chers collègues de l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chouia pour leur collaboration dans la mise en place du protocole de mesure, de la collecte et du traitement des données.

## **Abstract**

The erosion is a natural phenomenon, amplified by the impact of human activities on the soil and climate change, reduces the capacity of dams worldwide. The models (USLE) and its revised version RUSLE often used in Morocco are known by their difficulty of calibration which amplifies the errors of evaluation. In this study, a monitoring of the concentrations of suspended matter at the downstream stations, at the entrance of the Sidi Mohamed Ben Abdellah dam, which aims at estimating the solid transport and the identification of the most productive sub-basins to orientate the developments and improve the forecasting has been realized. Also, the application of the modified universal soil loss model (MUSLE) and its calibrated version on the large basin of Bouregreg, recorded relatively small deviations from the measurement of solid transport, thus varying for the initial version between +5% for the dry year 2016/2017 and +102% for the wet year 2017/2018 and between -33% and +34% for its calibrated version. In addition, we also applied machine learning (ML) based modeling to predict suspended sediment load, using hydro-climatic data as input variables. Data from years 2016 to 2020 were used for the learning process, and validation was performed with 2021 data. The results showed the effectiveness of the ML models with Nash-Schiff (NSE) values ranging from 0.47 to 0.80 during the validation phase, indicating satisfactory performance in predicting suspended solids concentrations. The calculated solids transport volumes remain well below the rate of siltation of the dam after its raising, which raises the question of the origin of the sediments, to be sought in priority on the banks.

## **Résumé**

L'érosion phénomène naturel, amplifiée par l'impact des activités humaines sur le sol et les changements climatiques, réduit la capacité des retenues des barrages dans le monde entier. Les modèles (USLE) et sa version révisée RUSLE utilisés souvent au Maroc sont connus par leur difficulté de calage ce qui amplifie les erreurs d'évaluation. Dans cette étude, un suivi des concentrations de matière en suspension au niveau des stations aval, à l'entrée du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah, qui vise l'estimation du transport solide et l'identification des sous-bassins les plus productifs pour orienter les aménagements et améliorer la prévision a été réalisé. Egalement, l'application du modèle universel de perte en sol modifié (MUSLE) et sa version calibrée sur le grand bassin du Bouregreg, a enregistré des écarts relativement faibles par rapport à la mesure de transport solide, variant ainsi pour la version initiale entre +5% pour l'année sèche 2016/2017 et +102 % pour l'année humide 2017/2018 et entre -33% et +34% pour sa version calibrée. En outre, nous avons appliqué aussi une modélisation basée sur l'apprentissage automatique (ML) pour prédire la charge sédimentaire en suspension, en utilisant des données hydro-climatiques comme variables d'entrée. Les données des années 2016 à 2020 ont été utilisées pour le processus d'apprentissage, et la validation a été effectuée avec les données de 2021. Les résultats ont montré l'efficacité des modèles ML avec des valeurs de Nash-Schiff (NSE) allant de 0,47 à 0,80 pendant la phase de validation, ce qui indique des performances satisfaisantes pour prédire les concentrations de solides en suspension. Les volumes des transports solides calculés restent largement inférieurs au rythme d'envasement du barrage après sa surélévation, ce qui pose la question de l'origine des sédiments, à chercher en priorité sur les berges.

## **Sommaire**

|                                                                                          |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Dédicaces .....</b>                                                                   | <b>I</b>    |
| <b>Avant-propos.....</b>                                                                 | <b>II</b>   |
| <b>Abstract.....</b>                                                                     | <b>IV</b>   |
| <b>Résumé.....</b>                                                                       | <b>V</b>    |
| <b>Sommaire .....</b>                                                                    | <b>VI</b>   |
| <b>Liste des figures .....</b>                                                           | <b>IX</b>   |
| <b>Liste des Tableaux.....</b>                                                           | <b>XIII</b> |
| <b>Liste des abréviations .....</b>                                                      | <b>XV</b>   |
| <b>Introduction .....</b>                                                                | <b>1</b>    |
| <b>Chapitre 1 : Présentation du Bassin du Bouregreg .....</b>                            | <b>4</b>    |
| 1.1 Cadre administratif du bassin du Bouregreg .....                                     | 4           |
| 1.2. Population et démographie du bassin du Bouregreg .....                              | 6           |
| 1.3. Indicateurs socio-économiques .....                                                 | 8           |
| 1.4. Climat du bassin du Bouregreg .....                                                 | 15          |
| 1.5. Hydrologie du bassin du Bouregreg .....                                             | 18          |
| 1.6. Hydrogéologie du bassin du Bouregreg.....                                           | 21          |
| 1.6.1. Hydrogéologie des formations du socle .....                                       | 21          |
| 1.6.2. Les schistes primaires.....                                                       | 22          |
| 1.6.3. Les quartzites et schistes quartzitiques .....                                    | 22          |
| 1.6.4. Les massifs granitiques.....                                                      | 22          |
| 1.6.5. Les formations métamorphiques .....                                               | 23          |
| 1.6.6. Hydrogéologie des formations de couverture .....                                  | 25          |
| <b>Chapitre 2 : Etat de l’art dans la mesure et prédiction du transport solide .....</b> | <b>28</b>   |
| 2.1 Mesure directe du transport solide en charriage et en suspension .....               | 28          |
| 2.1.1. Mesure directe du transport solide en charriage.....                              | 28          |
| 2.1.2. Mesure directe du transport solide en suspension.....                             | 30          |
| 2.2. Quantification du transport solide par les équations universelles .....             | 30          |
| 2.1.1. Quantification du transport solide par le Modèle RUSLE .....                      | 30          |
| 2.1.2. Quantification du transport solide par le Modèle MUSLE .....                      | 31          |

|                                                                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.2 Chapitre 3 : Mesure du transport solide à l'entrée du barrage SMBA .....</b>                                                                   | <b>33</b> |
| 3.1. Mesure de la concentration des matières en suspension (cMES) .....                                                                               | 33        |
| 3.2. Analyse des concentrations en matières en suspension .....                                                                                       | 39        |
| 3.2.1. Analyse de la cMES, débit liquide et solide .....                                                                                              | 39        |
| 3.2.2. Analyse de la cMES, débit liquide et solide en crue et en décrue, et saisonnière .....                                                         | 42        |
| 3.3. Erreur de calcul dans les flux des transports solides entrant au barrage SMBA.....                                                               | 64        |
| 3.4. Calcul du flux des transports solides entrant au barrage SMBA .....                                                                              | 65        |
| 3.5. Les données bathymétriques .....                                                                                                                 | 71        |
| <b>Chapitre 4 : Application de l'Equation Universelle de Perte en Sol Modifiée .....</b>                                                              | <b>73</b> |
| 4.1. Modèle MUSLE utilisé .....                                                                                                                       | 73        |
| 4.2. Méthode adoptée .....                                                                                                                            | 74        |
| 4.3. Analyse de la pluviométrie et de l'hydrométrie .....                                                                                             | 74        |
| 4.4. Analyse des milieux biophysiques .....                                                                                                           | 75        |
| 4.4.1. Facteur d'érodibilité des sols (K) .....                                                                                                       | 76        |
| 4.4.2. Facteur topographique (LS) .....                                                                                                               | 80        |
| 4.4.3. Facteur de couverture végétale (C) .....                                                                                                       | 82        |
| 4.4.4. Facteur moyen des pratiques culturales et aménagements P .....                                                                                 | 84        |
| 4.5. Application et calibration du modèle MUSLE.....                                                                                                  | 85        |
| 4.5.1. Application du modèle de MUSLE .....                                                                                                           | 85        |
| 4.5.2. Calibration du modèle de MUSLE .....                                                                                                           | 85        |
| 4.5.3. Comparaison des observations aux résultats du modèle MUSLE à la station hydrologique Aguibat Zear sur l'oued Bouregreg .....                   | 87        |
| 4.5.4. Comparaison des observations aux résultats du modèle MUSLE à la station hydrologique Ras Fathia sur l'oued Grou .....                          | 88        |
| 4.5.5. Comparaison des observations aux résultats du modèle MUSLE à la station hydrologique Sidi Mohamed Cherif sur l'oued Machraa.....               | 89        |
| 4.5.6. Comparaison des observations aux résultats du modèle MUSLE à la station hydrologique d'Ain Loudah sur l'oued Korifla .....                     | 90        |
| 4.5.7. Comparaison des observations aux résultats du modèle MUSLE et de la bathymétrie aux 4 stations hydrologiques en amont du barrage .....         | 91        |
| <b>Chapitre 5 : Application de l'apprentissage automatique en utilisant des données hydro-climatiques pour la prévision du transport solide. ....</b> | <b>94</b> |
| <b>5.1. Apprentissage automatique en développant des modèles ML .....</b>                                                                             | <b>94</b> |
| <b>5.2. Description de la zone d'étude .....</b>                                                                                                      | <b>95</b> |
| <b>5.3. Données utilisées .....</b>                                                                                                                   | <b>97</b> |

|        |                                                                |     |
|--------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.1. | Concentration des matières en suspension .....                 | 97  |
| 5.3.2. | Débits et précipitations utilisés .....                        | 97  |
| 5.4.   | Méthode adoptée.....                                           | 98  |
| 5.4.1. | Modèles d'apprentissage automatique.....                       | 98  |
| 5.4.2. | Méthode d'entrée NARX .....                                    | 102 |
| 5.4.3. | Evaluation des performances des modèles .....                  | 103 |
| 5.5.   | Résultats .....                                                | 104 |
| 5.5.1. | Analyse exploratoire des données .....                         | 104 |
| 5.5.2. | Processus d'apprentissage des modèles de Machine Learning..... | 106 |
| 5.5.3. | Validation des modèles ML .....                                | 109 |
| 5.5.4. | Capacité de généralisation et incertitudes .....               | 112 |
| 5.5.5. | Discussions .....                                              | 114 |
|        | Conclusion Générale .....                                      | 117 |
|        | Références.....                                                | 121 |
|        | <i>Annexes</i> .....                                           | 133 |

## **Liste des figures**

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. Situation administrative du bassin du Bouregreg .....                                                                                                       | 5  |
| Figure 2. Accroissement de la population sur le bassin du Bouregreg entre 2004 et 2014 .....                                                                          | 7  |
| Figure 3. Activité agricole par commune dans le Bassin du Bouregreg .....                                                                                             | 9  |
| Figure 4. Activité commerciale par commune dans le Bassin du Bouregreg .....                                                                                          | 10 |
| Figure 5. Activité du bâtiment et du transport par commune dans le bassin du Bouregreg .....                                                                          | 11 |
| Figure 6. Activité industrielle par commune dans le bassin du Bouregreg .....                                                                                         | 12 |
| Figure 7. Activité de service et d'administration par commune dans le bassin du Bouregreg .....                                                                       | 13 |
| Figure 8 : Indice de pauvreté des communes du bassin du Bouregreg .....                                                                                               | 14 |
| Figure 9. Carte isohyète du bassin du Bouregreg .....                                                                                                                 | 16 |
| Figure 10. Pluie moyenne mensuelle au niveau des postes pluviométriques de SMBA, de Ras Fathia et de Tsalat .....                                                     | 17 |
| Figure 11 : Situation des bassins versant étudiés du Bouregreg .....                                                                                                  | 18 |
| Figure 12. Débits annuels des 4 stations hydrologiques étudiées .....                                                                                                 | 20 |
| Figure 13. Débits moyens mensuels interannuel au niveau des stations hydrologiques étudiées .....                                                                     | 20 |
| Figure 14. Carte des situations des eaux souterraines du bassin du Bouregreg. ....                                                                                    | 24 |
| Figure 15. Cartes de situation des nappes du bassin du Bouregreg. ....                                                                                                | 27 |
| Figure 16. Débits instantanés et concentration de la matière en suspension au droit de la station hydrologique d'Aguibat Zear .....                                   | 36 |
| Figure 17. Débits instantanés et concentration de matière en suspension au droit de la station hydrologique de Ras Fathi. ....                                        | 36 |
| Figure 18. Débits instantanés et concentration de matière en suspension au droit de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif. ....                             | 37 |
| Figure 19. Débits instantanés et concentration de matière en suspension au droit de la station hydrologique d'Ain Loudah. ....                                        | 37 |
| Figure 20. Relation entre le débit liquide, concentration en matière en suspension et débit solide au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear .....          | 40 |
| Figure 21. Relation entre le d liquide, concentration en matière en suspension et débit solide au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia .....               | 40 |
| Figure 22. Relation entre le débit liquide, concentration en matière en suspension et débit solide au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif ..... | 41 |
| Figure 23. Relation entre le débit liquide, concentration en matière en suspension et débit solide au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah .....            | 41 |
| Figure 24. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en décrues au niveau de station d'Aguibat Zear. ....                                           | 43 |
| Figure 25. Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en crue au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear. ....                                 | 43 |
| Figure 26. Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en décrue au niveau de la station Ras Fathia .....                                                | 44 |
| Figure 27. Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en crue au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia. ....                                  | 44 |
| Figure 28. Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en décrue au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif .....                      | 45 |



|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 29. Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en crue au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif .....         | 45 |
| Figure 30. Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en décrue au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah .....                  | 46 |
| Figure 31. Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en crue au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah. ....                    | 46 |
| Figure 32. Relation entre le débit liquide et la cMES en crue et en décrue au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear .....                   | 47 |
| Figure 33. Relation entre le débit liquide et la cMES en crue et en décrue au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia .....                    | 48 |
| Figure 34. Relation entre le débit liquide et cMES en crue et décrue au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif.....                 | 48 |
| Figure 35. Relation entre le débit liquide et la cMES en crue et en décrue au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah .....                     | 49 |
| Figure 36. Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en été au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear .....                   | 50 |
| Figure 37. Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en été au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia .....                    | 50 |
| Figure 38. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en été au niveau de la station de Sidi Mohammed Cherif.....                     | 51 |
| Figure 39. Relation entre le débit liquide, débit solide et la cMES en automne au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear .....               | 52 |
| Figure 40. Relation entre le débit liquide, débit solide et la cMES en automne au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia .....                | 52 |
| Figure 41. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en automne au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif .....   | 53 |
| Figure 42. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en automne au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah .....              | 53 |
| Figure 43. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en hiver au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear .....              | 54 |
| Figure 44. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en hiver au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia. ....               | 55 |
| Figure 45. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en hiver au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif. ....     | 55 |
| Figure 46. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah.....                          | 56 |
| Figure 47. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES au printemps au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear .....          | 57 |
| Figure 48. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES au printemps au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia. ....           | 57 |
| Figure 49. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES au printemps au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif ..... | 58 |
| Figure 50. Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES au printemps au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah. ....            | 58 |
| Figure 51. Relation entre le débit liquide et la cMES à Aguibat Zear sur l'oued Bouregreg. ....                                                        | 60 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 52. Relation entre le débit liquide et le débit solide à Aguibat Zear sur l'oued Bouregreg .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 61  |
| Figure 53. Relation entre le débit liquide et la cMES à Ras Fathia sur l'oued Grou .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 62  |
| Figure 54. Relation entre le débit liquide et le débit solide à Ras Fathia sur l'oued Grou .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 63  |
| Figure 55. Cumul du transport solide au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear sur l'oued Bouregreg au cours des deux années étudiées .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 67  |
| Figure 56. Cumul du transport solide au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia sur l'oued Grou au cours des deux années étudiées. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 68  |
| Figure 57. Cumul du transport solide au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif sur l'oued Machraa au cours des deux années étudiées. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 69  |
| Figure 58. Cumul du transport solide au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah sur l'oued Korifla au cours des deux années étudiées .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 70  |
| Figure 59. Evolution de la capacité normale de la retenue du barrage SMBA, en millions de m <sup>3</sup> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 72  |
| Figure 60. Méthode adoptée pour l'évaluation de l'érosion dans le bassin du Bouregreg .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 74  |
| Figure 61. Graphique triangulaire illustré (Jamagne, 1967) modifié pour déterminer la classification de la texture du sol .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 77  |
| Figure 62. Facteur K du bassin de l'oued Bouregreg aux 4 stations hydrologiques .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 79  |
| Figure 63 : Facteur LS du bassin de l'oued Bouregreg aux 4 stations hydrologiques .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 81  |
| Figure 64 : Facteur C du bassin de l'oued Bouregreg aux 4 stations hydrologiques .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 83  |
| Figure 65. Comparaison entre MUSLE et observations à Aguibat Zear sur le Bouregreg .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 87  |
| Figure 66. Comparaison entre MUSLE et observations à Ras Fathia sur le Grou .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 88  |
| Figure 67. Comparaison entre MUSLE et observations à Sidi Mohammed Cherif sur le Machraa .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 89  |
| Figure 68. Comparaison entre MUSLE et observations à Ain Loudah sur le korifla .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 90  |
| Figure 69. Stations hydro-climatologiques utilisées dans la modélisation en ML .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 96  |
| Figure 70. Analyse en composantes principales (ACP). (a) : ACP des données enregistrées dans le bassin du Bouregreg ; $\ln(SSL)$ est le logarithme népérien du solide en suspension ; Ras et Qas sont les précipitations et le débit à la station Aguibat Ziar ; Rlc et Qlc sont les précipitations et le débit à la station Lala Chafia ; Rts et Qts sont les précipitations et le débit à la station Tsalat ; Rsa et Qsa sont les précipitations et le débit à la station Sidi Amar. (b) : ACP de l'ensemble des données enregistrées au Groubasin. ....                                 | 104 |
| Figure 71. Matrice de corrélation des variables. (a) : Matrice de corrélation des variables à la station Aguibat Ziar (az) ; (b) : matrice de corrélation des variables à la station Sidi Mohammed Cherif (sm) ; (c) matrice de corrélation des variables à la station Ras Fathia (rf) ; (d) : matrice de corrélation des variables à la station Ain Loudah (al). Le logarithme népérien de la charge sédimentaire en suspension $\ln(SSL)$ est positivement corrélé avec les débits et les précipitations dans le bassin. Les pluies et les débits au (jour-i) sont plus importants ..... | 106 |
| Figure 72. Diagrammes de Taylor pour comparer les modèles d'apprentissage automatique formés, à savoir la forêt aléatoire (RF), le boosting adaptatif (AdaBoost), le réseau de neurones artificiels (ANN) et le k-nearest neighbor (kNN). (a) Comparaison des modèles ML pour la prédiction de la charge de sédiments en suspension à la station d'Aguibat Ziar ; (b) : comparaison des modèles ML pour la prédiction de SSL à la station de Ras Fathia ; (c) : comparaison des modèles ML à la station de SM Cherif ; (d) : comparaison des modèles ML à la station d'Ain Loudah .....    | 111 |
| Figure 73. Distribution des erreurs du modèle pendant la simulation de la charge de sédiments en suspension enregistrée en 2021, à savoir forêt aléatoire (RF), boosting adaptatif (AdaBoost), réseau neuronal artificiel (ANN) et k-plus proche voisin (kNN). Les lignes rouges représentent les distributions                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |

normales ajustées de l'erreur, et les points en dehors des diagrammes en boîte sont les valeurs aberrantes des erreurs..... 112

Figure 74. Graphiques superposés du  $\ln(\text{SSL})$  mesuré et simulé avec les limites supérieures et inférieures à 95 % en utilisant les modèles ML les mieux adaptés, à savoir (a) modèle de boosting adaptatif (Adaboost) pour simuler le SSL à Aguibat Ziar ; (b) modèle de réseau neuronal artificiel (ANN) pour simuler le SSL dans la station de Ras Fathia. .... 114

## **Liste des Tableaux**

|                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Données du barrage SMBA                                                                                                                                                                                  | 19 |
| Tableau 2 : Caractéristiques des 4 stations hydrologiques étudiées                                                                                                                                                   | 19 |
| Tableau 3: Evénements de crues par station hydrologique étudiée                                                                                                                                                      | 21 |
| Tableau 4 : Principales caractéristiques des formules de transport solide par charriage                                                                                                                              | 29 |
| Tableau 5 : Nombre de prélèvements d'échantillons au droit des stations hydrologiques                                                                                                                                | 35 |
| Tableau 6 : Nombre d'échantillons de mesure cMES et de crues par station                                                                                                                                             | 39 |
| Tableau 7 : Relations débits liquides et débits solides au droit des stations hydrologiques étudiées                                                                                                                 | 42 |
| Tableau 8: Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en crue et en décrue au niveau des 4 stations étudiées                                                                                        | 47 |
| Tableau 9 : Débits max et cMESmax enregistrés au niveau des 4 stations hydrologiques étudiées                                                                                                                        | 65 |
| Tableau 10 : Flux du transport solide en tonne et m <sup>3</sup> au droit des 4 stations hydrologiques étudiées                                                                                                      | 66 |
| Tableau 11: Synthèse des résultats de calcul de l'envasement du barrage SMBA, depuis sa mise en eau                                                                                                                  | 72 |
| Tableau 12 : pluviométrie des années hydrologiques 2016/2017 et 2017/2018                                                                                                                                            | 75 |
| Tableau 13 : Apport en eau aux 4 stations hydrologiques lors des deux années étudiées                                                                                                                                | 75 |
| Tableau 14 : Facteur d'érodibilité moyenne de chaque bassin versant                                                                                                                                                  | 78 |
| Tableau 15 : Pente moyenne et facteur topographique moyen (LS)                                                                                                                                                       | 80 |
| Tableau 16 : Facteur C moyen de couverture végétale pour chaque bassin versant                                                                                                                                       | 84 |
| Tableau 17 : Facteurs moyens de l'équation universelle de perte de sol modifiée par sous bassin                                                                                                                      | 85 |
| Tableau 18 : Résultats de la calibration du modèle aux 4 stations étudiées par PBIAS                                                                                                                                 | 86 |
| Tableau 19 : Résultats de la calibration du modèle aux 4 stations étudiées par KGE                                                                                                                                   | 86 |
| Tableau 20 : Résultats du modèle MUSLE à Aguibat Zear sur le Bouregreg et comparaison avec les observations.                                                                                                         | 87 |
| Tableau 21 : Résultats du modèle MUSLE à Ras Fathia sur le Grou et comparaison avec les observations                                                                                                                 | 88 |
| Tableau 22 : Résultats du modèle MUSLE à Sidi Mohammed Cherif sur le Machraa et comparaison avec les observations.                                                                                                   | 89 |
| Tableau 23 : Résultats du modèle MUSLE à Ain Loudah sur le Korifla et comparaison avec les observations.                                                                                                             | 90 |
| Tableau 24 : Indice de Nash-Sutcliffe (NSE) aux stations étudiées                                                                                                                                                    | 91 |
| Tableau 25: Tableau récapitulatif des résultats des observations, de l'application du modèle MUSLE, MUSLE_calé et la bathymétrie pour les 4 sous-bassins du Bouregreg                                                | 92 |
| Tableau 26 : Comparaison des résultats des observations, de l'application du modèle MUSLE, MUSLE_calé et de la bathymétrie pour les 4 sous-bassins du Bouregreg lors de l'année 2016/2017                            | 92 |
| Tableau 27 : Comparaison des résultats des observations, de l'application du modèle MUSLE, MUSLE_calé et de la bathymétrie pour les 4 sous-bassins du Bouregreg lors de l'année 2017/2018.                           | 92 |
| Tableau 28 : Caractères statistiques des échantillons de la CMEs journalière durant la période d'observation allant du 1 <sup>er</sup> Septembre au 31 Aout 2021 au droit des quatre stations hydrologiques étudiées | 97 |
| Tableau 29 : Caractères statistiques des précipitations durant la période d'observation allant du 1 <sup>er</sup> Septembre au 31 Aout 2021 au droit des postes pluviométriques du bassin du Bouregreg               | 98 |
| Tableau 30: Caractères statistiques des précipitations durant la période d'observation allant du 1 <sup>er</sup> Septembre au 31 Aout 2021 au droit des stations hydrologiques du bassin du Bouregreg                | 98 |

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 31: Hyper-paramètres adoptés et fonctions des modèles entraînés.                                        | 107 |
| Tableau 32: Performances du modèle pendant la phase d'apprentissage automatique.                                | 108 |
| Tableau 33: Performances du modèle pendant la phase de validation.                                              | 110 |
| Tableau 34: Capacité de généralisation, erreurs limites inférieures et erreurs limites supérieures des modèles. | 113 |

## **Liste des abréviations**

|                  |                                                                      |
|------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>HSM</b>       | HydroSciences Montpellier – UMR 5569 CNRS-IRD-Université Montpellier |
| <b>IRD</b>       | Institut de Recherche pour le Développement                          |
| <b>SMBA</b>      | Barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah                                    |
| <b>ABHBC</b>     | Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia           |
| <b>cMES</b>      | Concentration de la matière en suspension                            |
| <b>ML</b>        | Machine Learning                                                     |
| <b>RGPH</b>      | Recensement Général de la population et de l'habitat                 |
| <b>Ada-Boost</b> | Boosting adaptatif                                                   |
| <b>RF</b>        | Forêt aléatoire                                                      |
| <b>SVM</b>       | Machine à vecteurs de support                                        |
| <b>k-NN</b>      | K-Nouveau Voisin                                                     |
| <b>ANN</b>       | Réseau neuronal artificiel                                           |

## Introduction

L'érosion hydrique se présente sous plusieurs types : le splash, l'érosion diffuse, l'érosion concentrée qui se subdivise ensuite en deux formes différentes : les rigoles et les ravines. Ce phénomène est à l'origine du charriage en temps de crue d'importantes quantités de matière en suspension par les oueds du bassin du Bouregreg vers la retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA).

Le processus érosif naturel est aggravé par les activités anthropiques notamment l'activité pastorale (Mahé et al., 2012a), la déforestation (Laouina et al., 2010) et les changements climatiques (Khomsî et al., 2013) avec l'avènement des périodes de fortes pluies et des périodes sèches de plus en plus fréquentes. Ce phénomène constitue un défi majeur pour la gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin du Bouregreg (Mahe et al., 2012b ; Khomsî et al., 2016) dans le nord du Maroc.

La population du bassin est estimée à 2.02 millions habitants en 2014 soit 5.9% de la population nationale. 49% de la population vit dans le milieu urbain et 51% dans le milieu rural. Le taux de croissance dans le bassin est de l'ordre de 1.65 légèrement supérieur au taux national qui est de 1.25%. La population du bassin est jeune avec 53.2% âgée moins de 30 ans.

Sur le plan économique, le bassin du Bouregreg présente un indice de pauvreté moyenne de 24,9% supérieur à la moyenne nationale qui est de 4.8%. L'activité principale dans le bassin est l'agriculture, elle représente 46.2% tandis que le secteur industriel ne représente que 6.5%.

Sachant que peu d'études ont été réalisées au Maroc pour l'estimation du rythme d'envasement à partir de la mesure du transport solide, la présente étude traite cette problématique à travers un état des lieux de l'envasement de la retenue du barrage SMBA, l'un des plus grands du pays, sur la base de l'analyse des mesures réalisées au droit des stations hydrologiques situées à l'amont immédiat du barrage durant les années hydrologiques 2016/2017 et 2017/2018, des relevés bathymétriques exécutés au niveau de la retenue depuis sa mise en service ont été collectées et analysées, et la modélisation des pertes en sols dans le bassin.

En effet, l'évaluation et la quantification du transport solide au Maroc utilise souvent le modèle universel de perte de sol (USLE) et sa version révisée RUSLE. Ces modèles présentent une difficulté de calibrage qui amplifie les erreurs d'évaluation. C'est pourquoi le choix s'est porté sur le modèle MUSLE, qui peut être calibré par les mesures de concentrations de sédiments en suspension au droit des 4 stations de mesure à l'entrée immédiate du barrage. Ces mesures visent aussi à estimer le transport solide et à identifier les sous-bassins les plus productifs afin d'orienter les actions de développement et d'améliorer les prévisions.

Cependant, les applications des modèles basés sur le processus nécessitent plusieurs paramètres physiques et hydrologiques et les caractéristiques des bassins, ce qui peut être une source d'incertitudes, en particulier dans les zones mal surveillées. En outre, les caractéristiques hautement dynamiques des bassins conduisent à la capacité douteuse du modèle basé sur le processus d'évaluer la charge sédimentaire dans le temps.

Dans les zones peu surveillées, les modèles d'apprentissage automatique (ML) peuvent surmonter le manque et la variabilité des paramètres physiques en utilisant les ensembles de données archivées disponibles. En effet, leur construction repose sur l'équation statistique d'entrée-sortie plutôt que sur la description du mécanisme impliqué dans le processus. Récemment, plusieurs études ont montré que les modèles basés sur les données sont des outils puissants pour surmonter certaines limitations des modèles basés sur les concepts dans la prédiction de l'état des ressources en eau. Par exemple, Khouzai et al. (2018) ont démontré la précision de la méthode de la machine à vecteur de support pour estimer la contrainte de cisaillement dans un canal rectangulaire. Quant à la prédiction du transport des sédiments, ils ont appliqué la programmation génétique d'ensemble pour estimer les mouvements des sédiments naissants dans les canaux rectangulaires, et ont démontré la supériorité de l'approche appliquée avec un coefficient de corrélation  $r$  d'environ 0,92. De même, dans les études hydrologiques, (Al Dahoul et al., 2021) a appliqué un réseau neuronal à mémoire à long terme (LSMNN) pour prédire la concentration de sédiments en suspension dans la rivière Johor en Malaisie et a trouvé une prédiction de haute précision dans ces modèles. Dans (Nourani et al., 2021), trois modèles d'intelligence artificielle ont été utilisés pour estimer la charge sédimentaire en Ethiopie. Dans (Ampomah et al., 2020), un modèle de régression linéaire multiple a été appliqué pour prédire le rendement en sédiments en suspension dans la rivière Cuyahoga dans l'Ohio à l'aide d'images satellites et de données pluviométriques. Il est important de noter que toutes ces études ont démontré que les modèles basés sur la régression linéaire multiple présentaient une grande précision pour prédire la charge sédimentaire à diverses échelles de bassin.

Dans cette étude, nous appliquons aussi un modèle ML pour surmonter les inconvénients des modèles basés sur les processus et pour améliorer la précision de la prédiction de la charge sédimentaire en suspension quotidienne à quatre stations de mesure du ruissellement dans le bassin semi-aride du Bouregreg, au Maroc. Cet objectif peut être atteint (Gibson, et al., 2021) en développant des modèles ML avec des variables d'entrée hydro-climatiques NARX, (Pähtz et al., 2020) en évaluant la précision de prédiction des modèles, et (Van Kessel et al., 1998) en classant les modèles à des fins de simulation sur la base de la métrique de la capacité de généralisation (GA) et de l'analyse d'incertitude.

Le barrage SMBA est le seul grand ouvrage hydraulique dans le bassin du Bouregreg, mis en service en 1974 et surélevé en 2007, il a une capacité de 974 Mm<sup>3</sup>. Il est destiné uniquement à l'alimentation en eau potable de la zone côtière entre Rabat et Casablanca qui compte une population de près de 8 millions d'habitants. Il connaît un rythme d'envasement relativement



faible comparé aux autres barrages du royaume (Plan National d'Aménagement des Bassins Versants, 1996). Toutefois, les relevés bathymétriques ont montré que le barrage SMBA a perdu 132 Mm<sup>3</sup> depuis sa mise en service. Cette perte constitue une réduction très importante de sa capacité de stockage.

Les travaux de cette étude visent à atteindre les objectifs suivants :

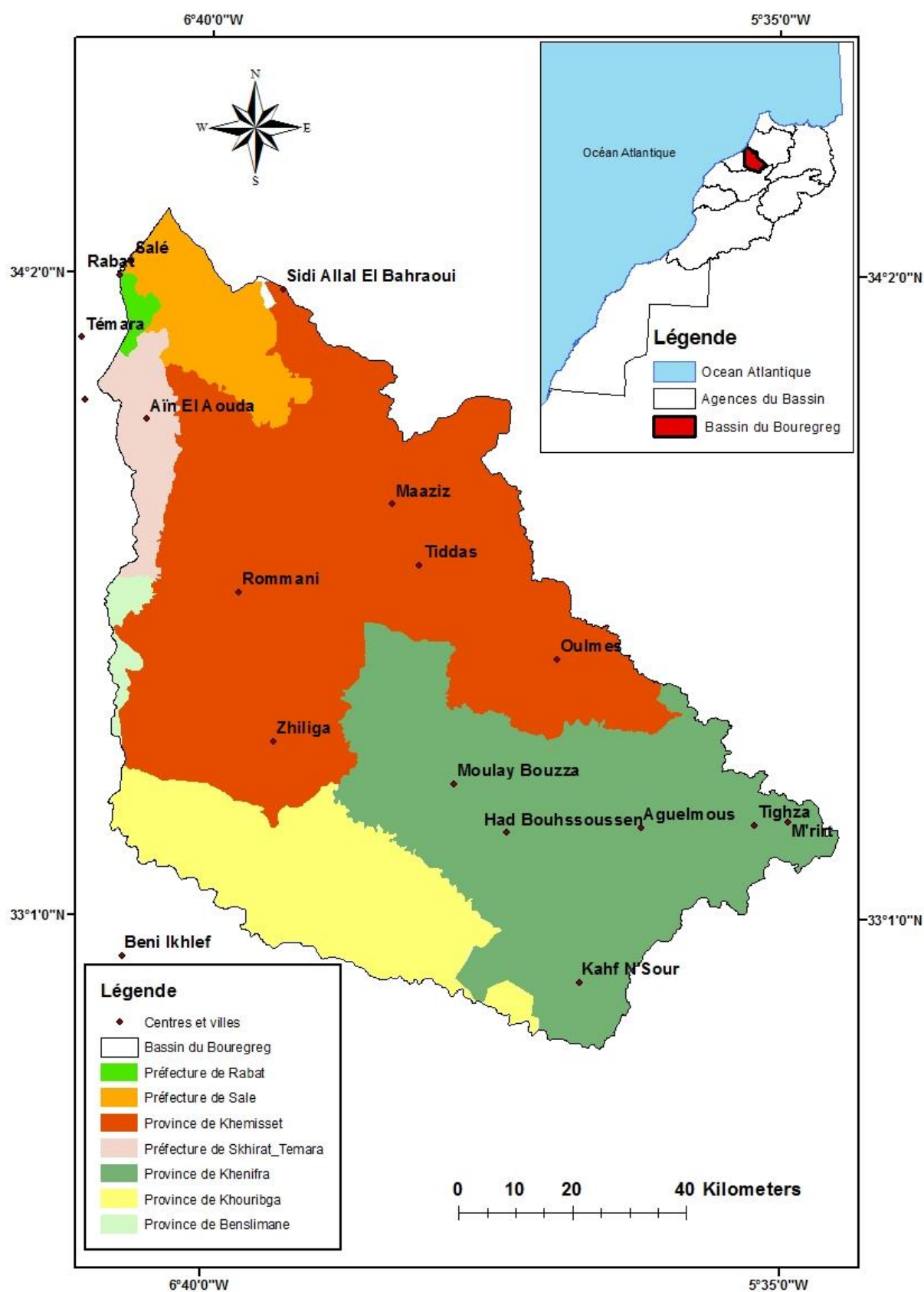
- analyser le milieu biophysique ;
- décrire et évaluer les processus érosifs affectant le Bassin du Bouregreg, et les transports solides par les principaux affluents au barrage SMBA ;
- identifier les zones prioritaires contribuant à l'envasement, et ce pour mieux orienter les actions d'aménagement de l'espace.

## **Chapitre 1 : Présentation du Bassin du Bouregreg**

### **1.1 Cadre administratif du bassin du Bouregreg**

Sur le plan administratif, le bassin du Bouregreg relève du territoire de trois régions à savoir Casablanca-Settat(1%) de la superficie totale du bassin, Beni Mellal-Khénifra (44.8%) et Rabat-Kénitra (54.2%).

En effet, il s'étale sur 7 provinces et préfectures soit 70 communes et municipalités (figure 1). La superficie du bassin est répartie par province comme suit : Rabat (52.9 km<sup>2</sup>), Salé (544.4 km<sup>2</sup>), Khémisset (4450.7km<sup>2</sup>), Skhirat-Temara (339.2 km<sup>2</sup>), Benslimane (100.6 km<sup>2</sup>), Khénifra (3080.6km<sup>2</sup>) et Khouribga (1375.5 km<sup>2</sup>).



**Figure 1.** Situation administrative du bassin du Bouregreg

## 1.2. Population et démographie du bassin du Bouregreg

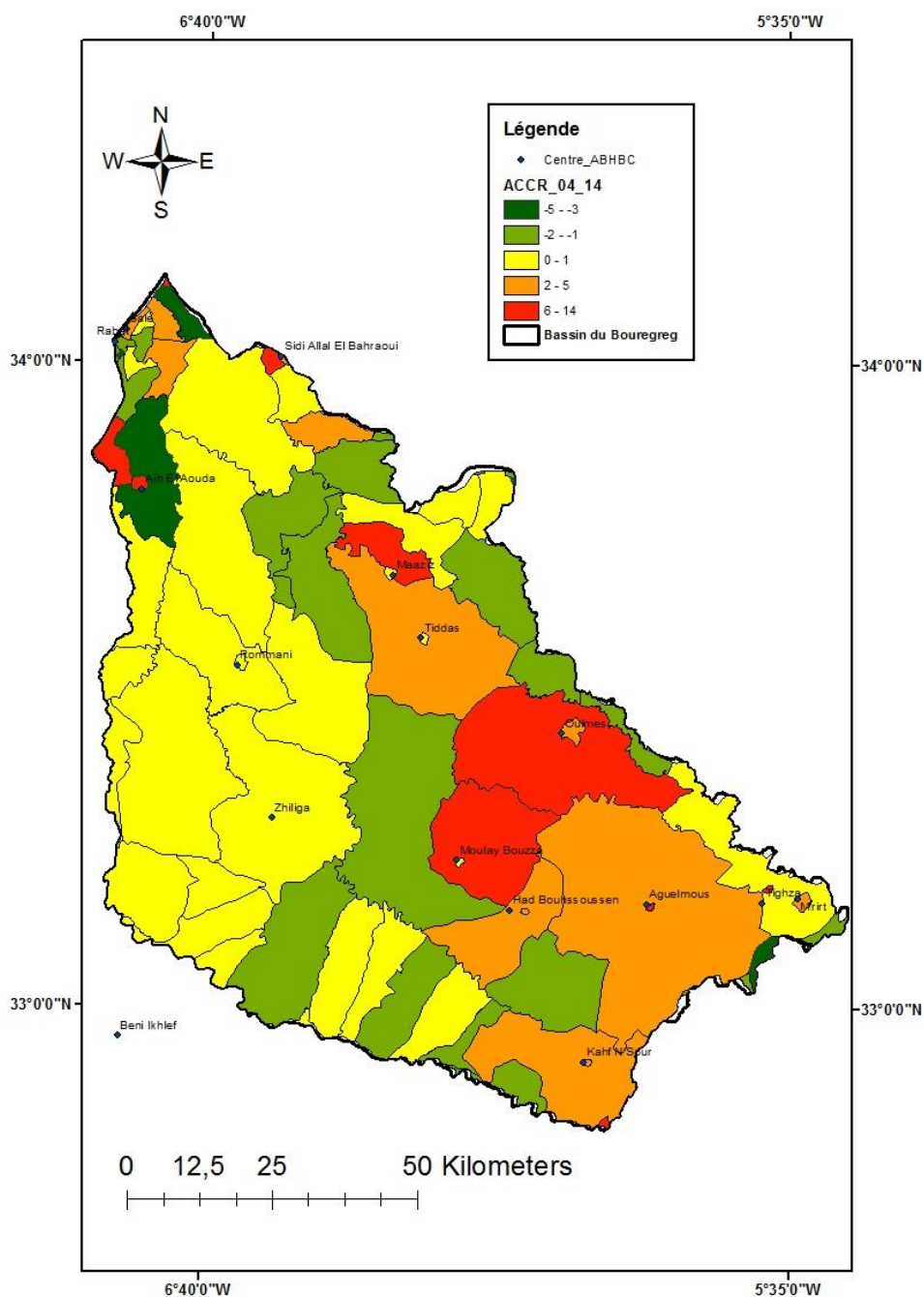
La population totale du bassin du Bouregreg est estimée selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2014 (RGPH, 2014) à environ 2.02 millions d'habitants avec 49% de la population totale vit dans le milieu urbain et 51% dans le milieu rural.

La moyenne de personnes par ménage est inférieure à la moyenne nationale, aussi bien en milieu urbain qu'en milieu rural avec respectivement 4.0 et 4.9 personnes par ménage contre 4.2 et 5.3 à l'échelle nationale.

De façon générale, la population de l'aire d'étude est jeune : les moins de 15 ans représentent 36.9%, et moins de 30 ans 53.2% en 2014. La forme de la pyramide des âges –notamment, sa base qui s'est rétrécie par rapport aux recensements précédents - confirme la tendance générale à la baisse des natalités.

L'aire d'étude a connu un taux d'accroissement interannuel moyen de 2004 à 2014 de 1,6% (figure 2), légèrement supérieur au taux national (1,25%) lors de la même période. Par milieu, ce taux est de 1.04% en milieu rural et 1.74% en milieu urbain. Comparés à la moyenne nationale, ce taux est plus élevé en milieu rural et plus bas en milieu urbain (-0.01% et +2,18%). On note aussi la différence relativement faible dans le rythme d'accroissement entre le milieu urbain et le milieu rural (0.70% seulement contre 2.19 à l'échelle nationale).

Au niveau communal, l'évolution démographique est extrêmement nuancée, selon le contexte socio-économique local. Les données des deux derniers recensements à savoir ceux de 2004 et de 2014, font apparaître des communes en pleine expansion, en cours de dépeuplement ou encore stagnantes : 26 communes ont stagné avec un taux d'accroissement annuel moyen de 0% à 1% ; 27 ont régressé avec un taux annuel moyen négatif ; et 17 sont en expansion avec un taux d'accroissement annuel moyen supérieur à 2%.



**Figure 2.** Accroissement en pourcentage de la population sur le bassin du Bouregreg entre 2004 et 2014 (RGPH 2014)

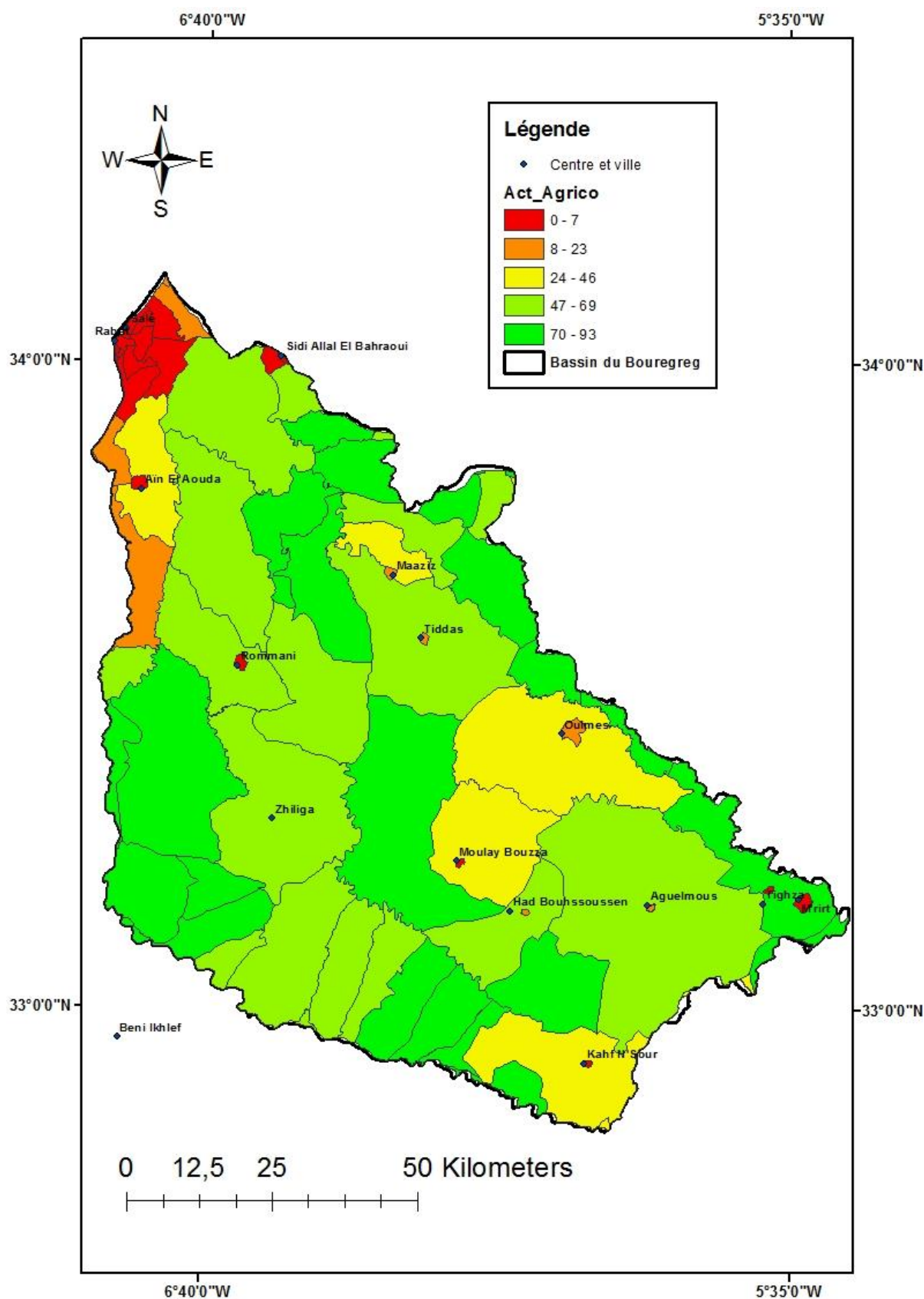
### 1.3. Indicateurs socio-économiques

Les résultats du dernier recensement général de 2014 ont servi à l'élaboration d'indicateurs synthétiques, combinant plusieurs paramètres. Ces indicateurs renseignent entre autres sur les niveaux de pauvreté et l'activité économique par commune en ce qui permet de connaître le niveau de vie et l'occupation des habitants du bassin du Bouregreg.

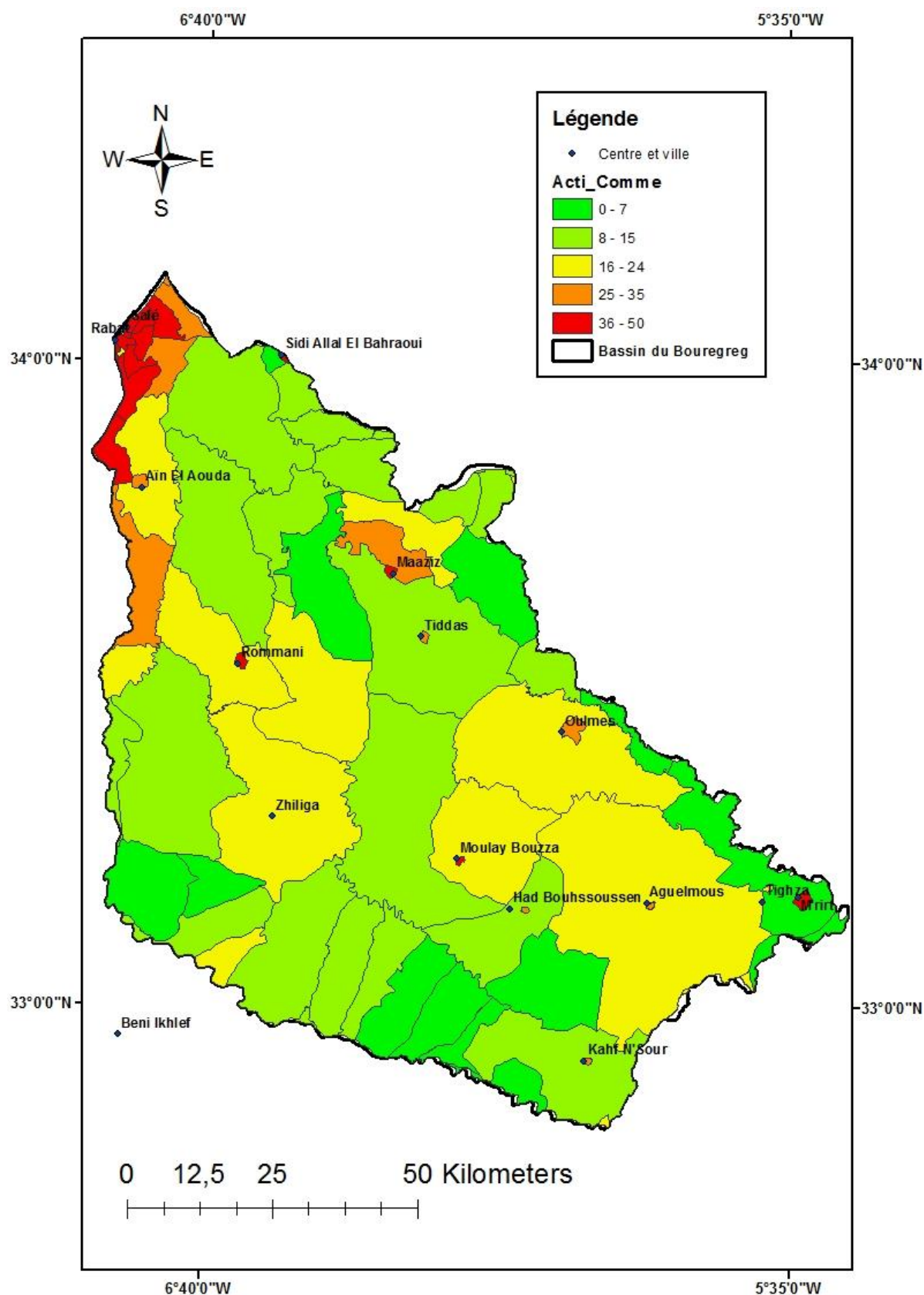
L'activité principale dans le bassin du Bouregreg est l'agriculture (production de céréale et pâturage), 46.2% de la population y travaille (figure 3), suivie par l'activité commerciale 20.1% (figure 4), les secteurs du bâtiment et du transport représentent 15.2% (figure 5), le secteur des services et de l'administration (principale au niveau des communes de la capitale Rabat) représentent 9.6% (figure 6), le secteur industriel, constitué principalement de l'extraction de minerais et de matériaux de construction, de l'artisanal et de l'industrie de transformation, est faible soit 6.5% de l'activité (figure 7), et l'activité non déclarée et extraterritoriale représente 2.3%.

L'activité principale du bassin à savoir l'agriculture non irriguée est fortement impactée par le cycle des sécheresses répétitives. Par conséquent, plus de 70% des communes du bassin du Bouregreg affichent des taux de pauvreté supérieurs à 16,6%. Les communes les plus pauvres sont concentrées sur le haut et le moyen Bouregreg. Tandis que les communes situées à proximité du pôle urbain Rabat-Salé enregistrent des taux faibles. Pour certaines communes, les taux de pauvreté sont assez élevés (les communes Moulay Bouazza et Aguelmous (province Khenifra, respectivement 53.2 et 53.3%), Ain Ikkouet Ait Ichou (province de Khemessit ; respectivement 44.9% et 48.3%), Birnnsar (province Benslimane, 41.8%) et Braksa (province Khouribga, 45.6%).

La figure 8 donne la répartition de l'indice de pauvreté par commune au niveau du bassin du Bouregreg, selon le RPGH 2014.

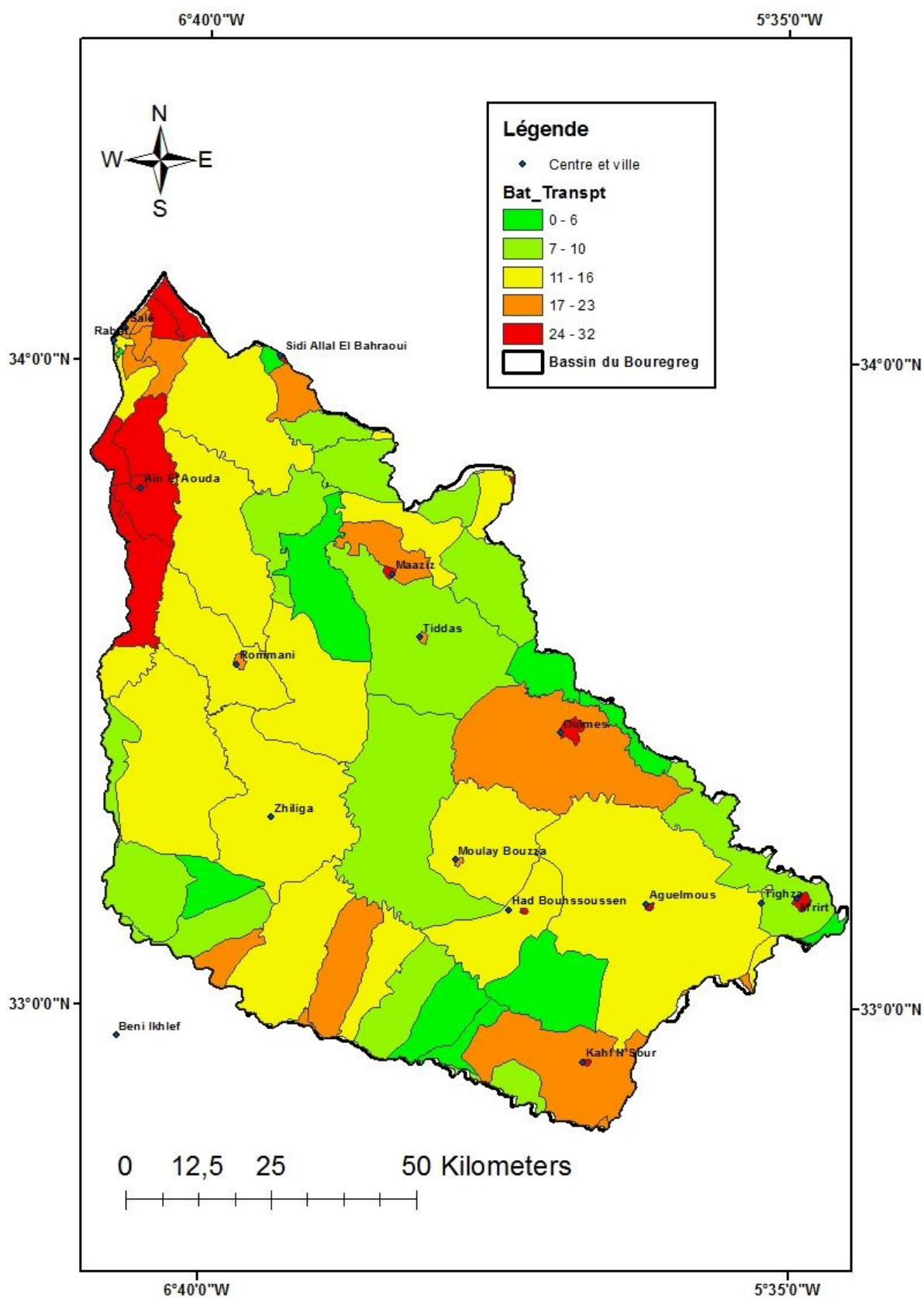


**Figure 3.** Activité agricole en pourcentage par commune dans le Bassin du Bouregreg (RGPH 2014)

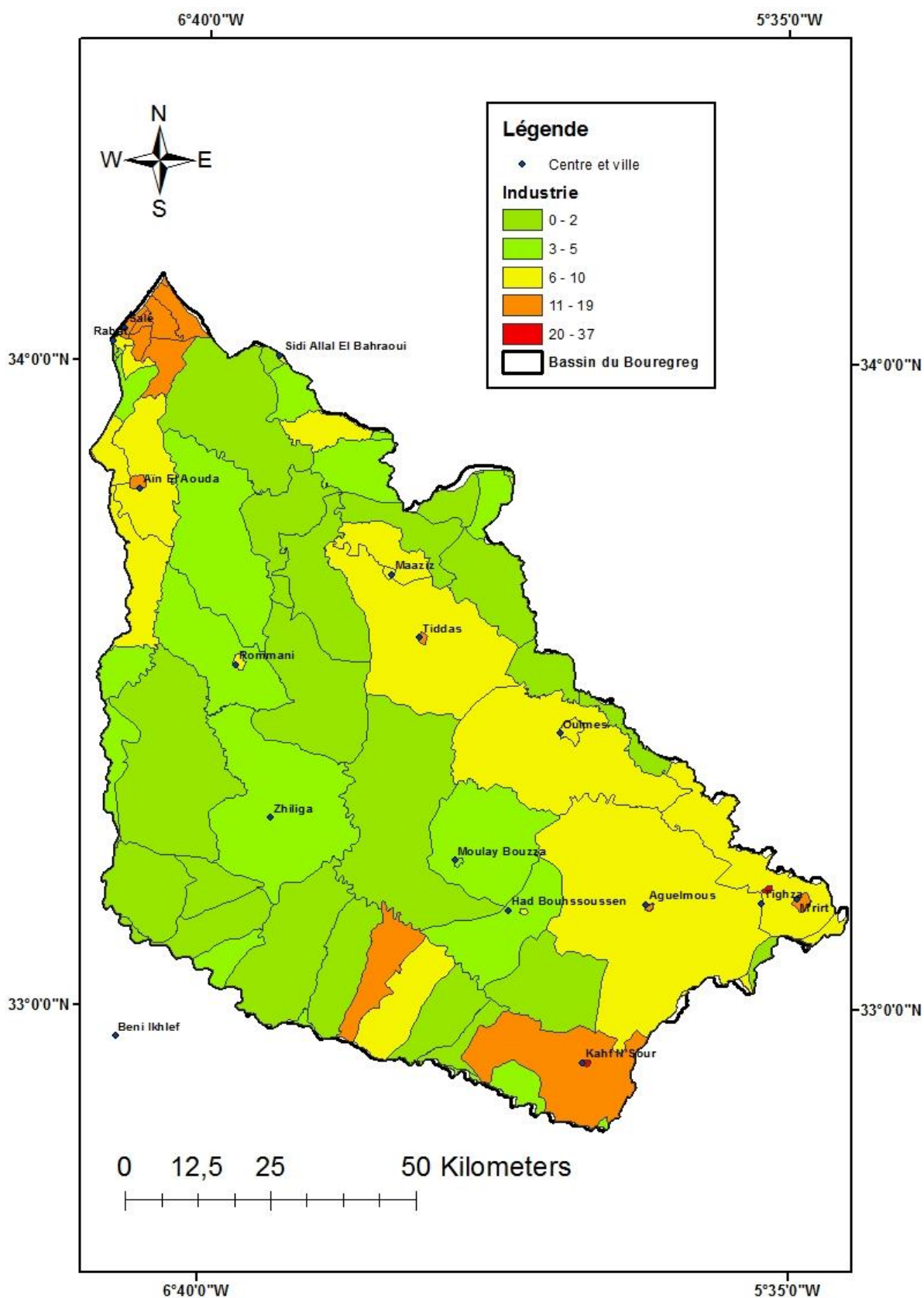


**Figure 4.**Activité commerciale en pourcentage par commune par commune dans le Bassin du Bouregreg (RGPH 2014)

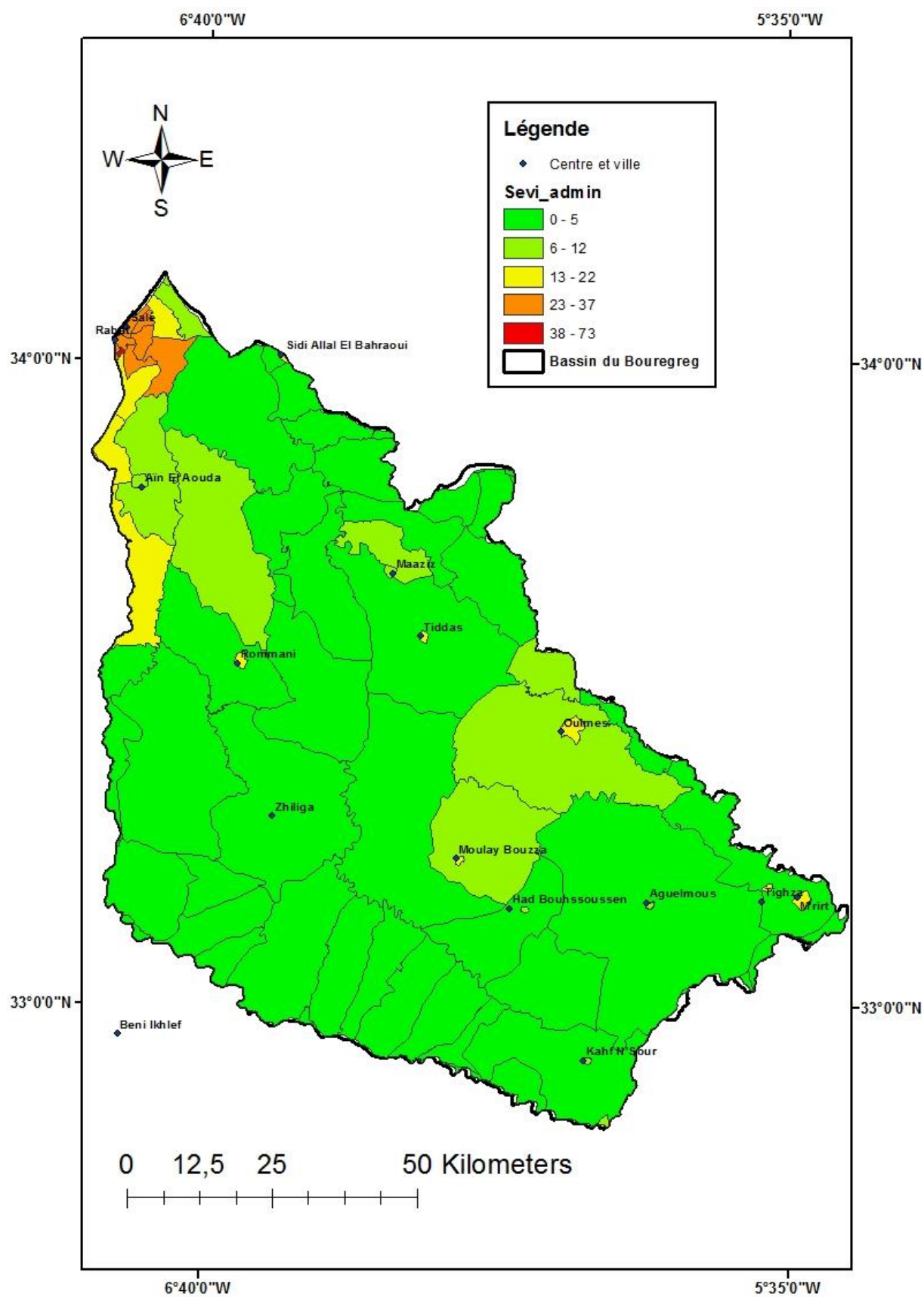




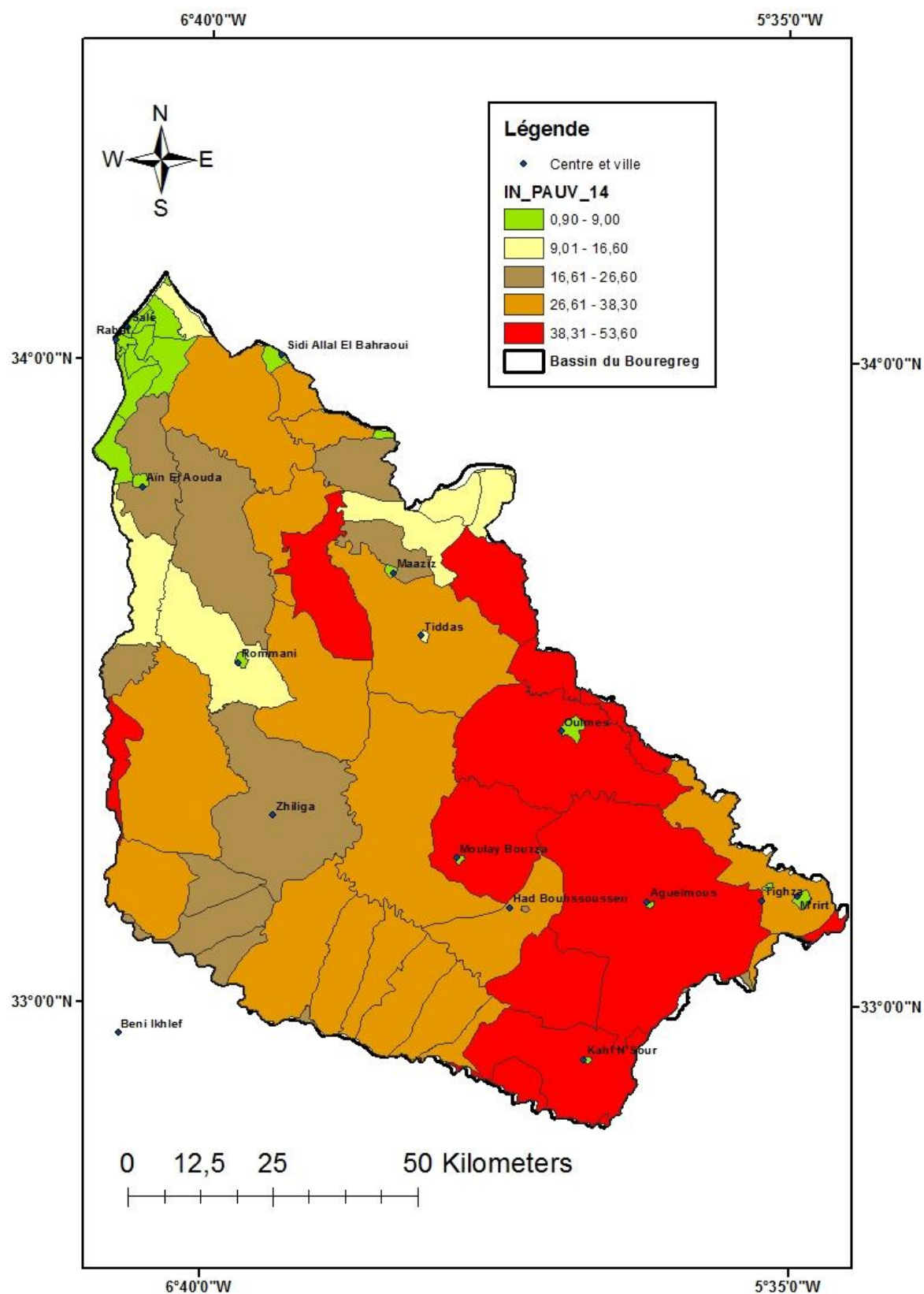
**Figure 5.** Activité du bâtiment et du transport en pourcentage par commune dans le bassin du Bouregreg (RGPH 2014)



**Figure 6.** Activité industrielle en pourcentage par commune dans le bassin du Bouregreg (RGPH 2014)



**Figure 7.** Activité de service et d'administration en pourcentage par commune dans le bassin du Bouregreg (RGPH 2014)



**Figure 8.** Indice de pauvreté des communes du bassin du Bouregreg (RGPH 2014)

## 1.4. Climat du bassin du Bouregreg

Le climat de la zone d'étude est de type méditerranéen à influence océanique. Cette influence diminue d'autant plus qu'on s'éloigne vers l'intérieur. La zone du bassin du Bouregreg Est, est influencée par la présence du relief et notamment vers la région d'Oulmès et de Moulay Bouazza.

Les pluies moyennes annuelles qui tombent dans le bassin varient de 450 mm au niveau de Rabat, au Nord-Ouest, pour atteindre près de 650 mm en zone de montagne au Sud-Est. Généralement, les pluies diminuent avec la latitude selon un gradient faible mais augmentent avec l'altitude instaurant un gradient positif en allant du Sud vers le Nord et de la côte vers les régions d'altitude à l'intérieur du pays (figure 9).

L'irrégularité interannuelle des précipitations est relativement faible par rapport aux autres régions du pays. Ainsi le coefficient de variation varie entre 0.28 au poste d'Oulmès (660 mm/an) à 0.32 au niveau de la ville de Rabat (521 mm/an).

L'été est la saison sèche et les pluies d'été, généralement orageuses, comptent ordinairement pour moins de 10% du total annuel des précipitations.

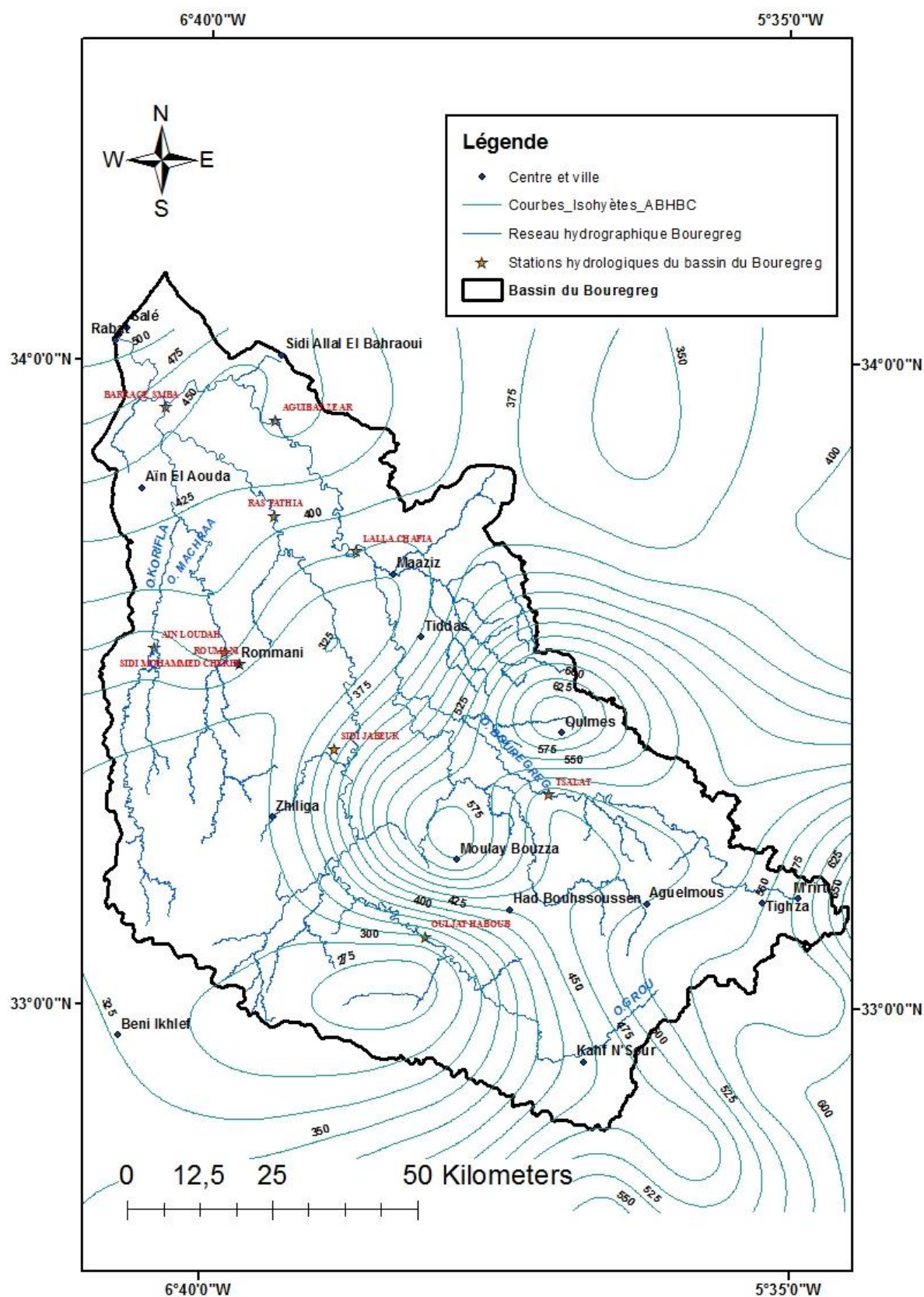
La saison humide coïncide avec la saison froide, elle s'étale habituellement entre Novembre et Mars avec deux maxima très marqués en décembre-janvier et en mars.

Les précipitations sont très irrégulières d'une année à l'autre, et sans périodicité rigoureuse, des séries d'années pluvieuses succèdent à des séries d'années sèches.

La répartition moyenne des précipitations mensuelles montre l'existence de deux saisons distinctes :

- une saison pluvieuse, allant du mois d'Octobre à Avril où sont concentrés les épisodes pluvieux de l'année : 86 à 92% de la pluviométrie annuelle ;
- une saison sèche, allant du mois de Mai au mois de Septembre.





**Figure 9.** Carte des isohyètes du bassin du Bouregreg (1975-2018), (Source ABHBC)

La figure 10 illustre la répartition de la pluviométrie à l'échelle mensuelle au niveau des stations pluviométriques du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah, de Ras Fathia et de Tsalat.

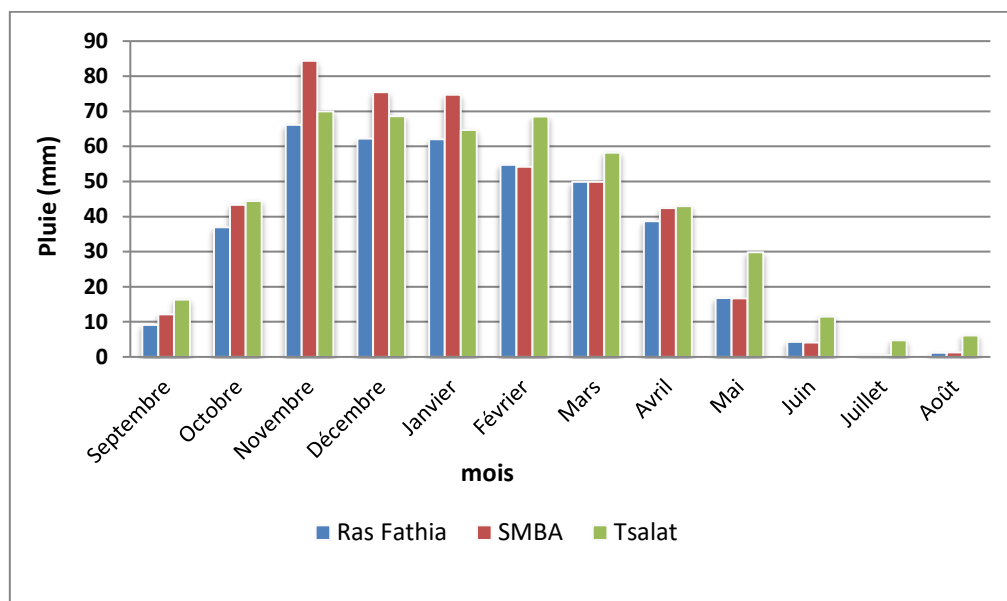


Figure 10. Pluie moyenne mensuelle au niveau des postes pluviométriques de SMBA, de Ras Fathia et de Tsalat, (Source ABHBC)

Les températures moyennes dans la zone sont clémentes près de l'atlantique et en zone de montagne et varient entre 15 à 25°C. Elles sont fortement influencées par les courants chauds en période sèches, notamment à l'intérieur de la zone où la température maximale peut atteindre 40°C pendant l'été (Juillet-Août).

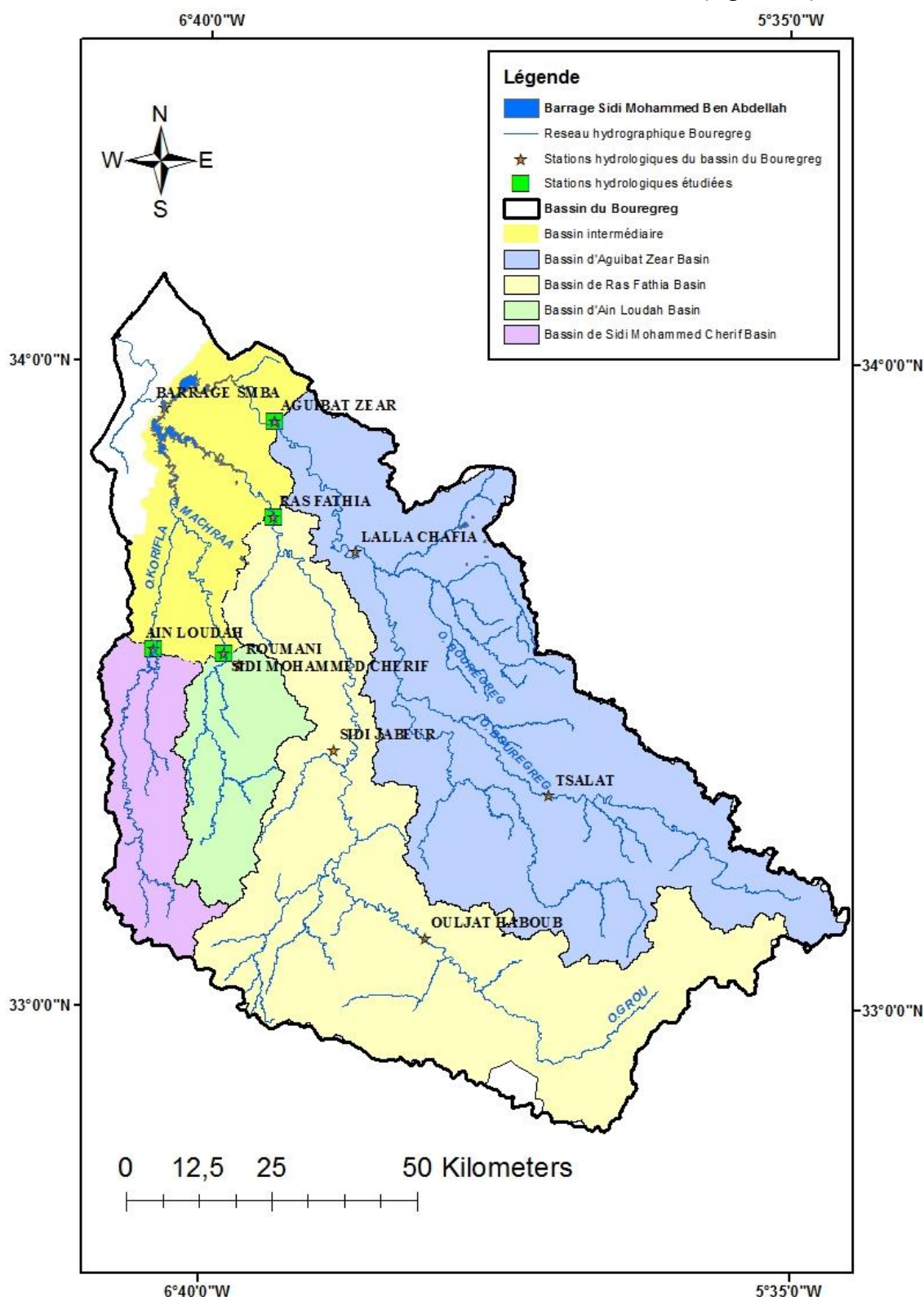
Les températures moyennes maximales au cours de ces deux mois varient entre 30 et 34°C dans le haut Bouregreg et entre 26 et 28 °C dans la zone côtière.

Les valeurs moyennes enregistrées de l'évaporation dans la zone oscillent entre 1 500 mm/an au niveau de la côte de Rabat et 1 600 mm/an au niveau du Haut Bouregreg.

El Aoula et al. (Sous-presse) indiquent que sur le bassin du Bouregreg, il y a une rupture dans les séries de pluies surtout visible en janvier et février dans les années 1977-1979, qui se traduisent par une rupture dans les débits principalement des mois de janvier à mars au cours de la période 1979-1980. Les séries de pluies présentent ensuite une rupture positive vers 2009, sans que cela provoque de rupture nette dans les séries de débits. Cependant les débits mensuels de décembre à mars sont significativement plus faibles après 1985 entre décembre et mars.

## 1.5. Hydrologie du bassin du Bouregreg

Le Bassin du Bouregreg, situé au centre Ouest du Maroc, s'étend sur une superficie totale de l'ordre de 10130 km<sup>2</sup> à son embouchure au Nord de la ville de Rabat (Figure 11).



**Figure 11.** Situation des bassins versants étudiés du Bouregreg



Le réseau hydrographique du bassin du Bouregreg à l'amont du barrage SMBA est composé de trois affluents majeurs : Bouregreg (230 km), Grou (270 km) et Korifla (135 Km) (inclus son affluent le Machraa (93 Km)). Quatre stations hydrologiques situées sur ces affluents à l'entrée de la retenue du barrage, ont été choisies pour réaliser les mesures des transports solides. Ces stations hydrologiques contrôlent un bassin de l'ordre de 8521 km<sup>2</sup> soit 87% du bassin versant du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah. Elles disposent aussi de moyens humains et matériels pour assurer la mesure des débits, de la pluviométrie et de la concentration des matières en suspension.

Les apports en eau dans le bassin s'élèvent à 680 Mm<sup>3</sup>/an soit un module annuel de 22 m<sup>3</sup>/s. Ils sont régularisés par le grand barrage SMBA. Le tableau 1 résume les caractéristiques du barrage.

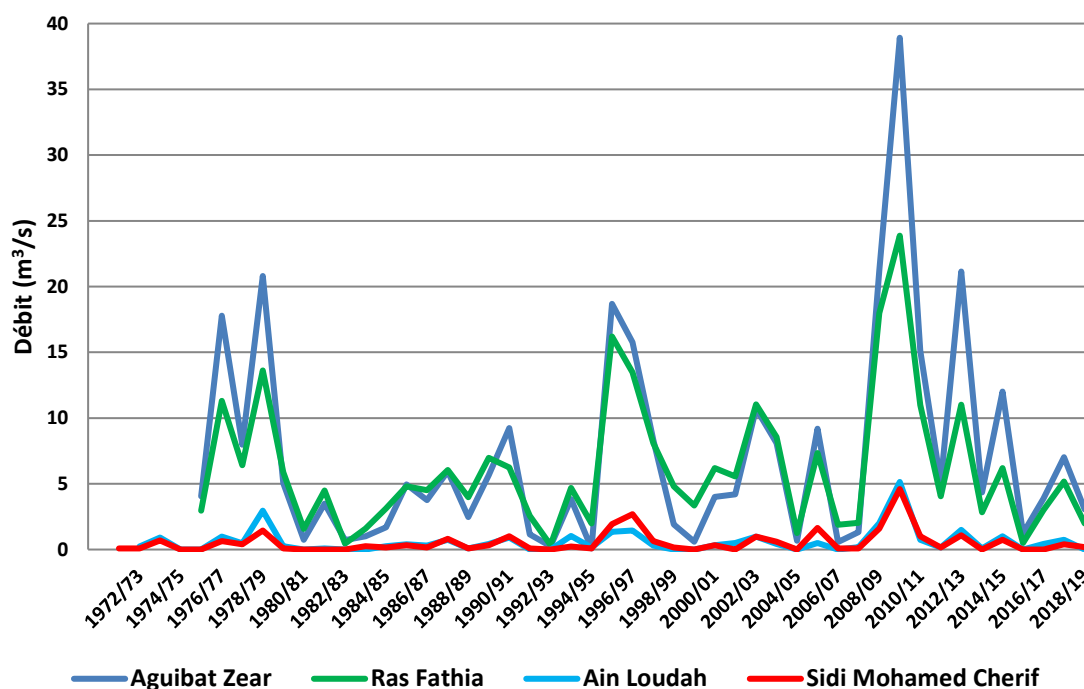
**Tableau 1 : Données du barrage SMBA**

|                                | Superficie<br>du bassin<br>versant<br>(km <sup>2</sup> ) | Capacité<br>initiale de la<br>retenue<br>(Mm <sup>3</sup> ) | Apport<br>moyen<br>interannuel<br>(Mm <sup>3</sup> ) | Date de<br>mise en eau | Nombre de<br>levés de<br>bathymétrie |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| <b>SMBA avant surélévation</b> | 9800                                                     | 508.6                                                       | 680                                                  | 1974                   | 5                                    |
| <b>SMBA après surélévation</b> |                                                          | 974.0                                                       |                                                      | 2007                   | 3                                    |

Le tableau 2 donne les caractéristiques des quatre stations hydrologiques.

**Tableau 2 : Caractéristiques des 4 stations hydrologiques étudiées**

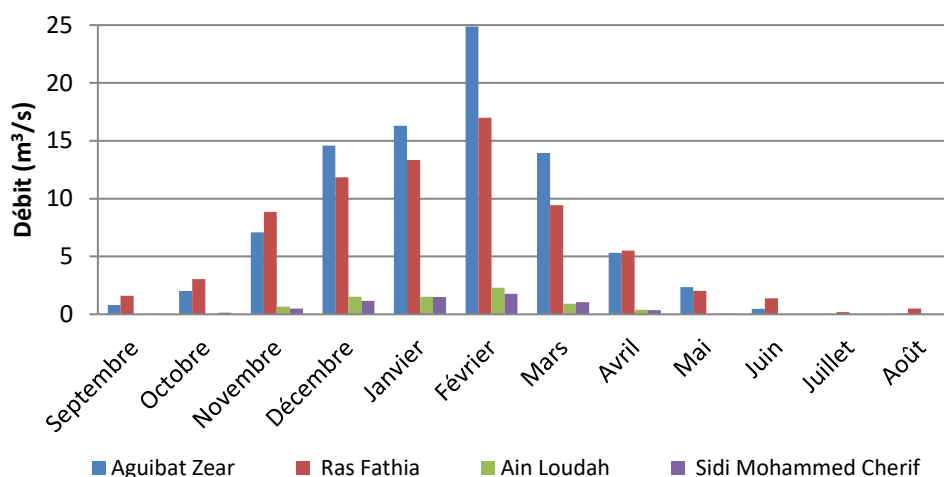
| Nom de la station<br>hydrologique | Oued      | Date de<br>mise en<br>service | Période<br>de calcul<br>de la<br>moyenne | N°IRE<br>Identifiant<br>ABHBC | Superficie<br>du Bassin<br>Versant en<br>(km <sup>2</sup> ) | Coordonnées Lambert |         |     |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|---------|-----|
|                                   |           |                               |                                          |                               |                                                             | X                   | Y       | Z   |
| Aguibat Zear                      | Bouregreg | 1975                          | 1975/2018                                | 3118/13                       | 3681                                                        | 394.500             | 368.150 | 90  |
| Ras Fathia                        | Grou      | 1975                          | 1975/2018                                | 989/20                        | 3485                                                        | 394.250             | 351.800 | 100 |
| Ain Loudah                        | Korifla   | 1971                          | 1971/2018                                | 2673/20                       | 699                                                         | 373.750             | 329.150 | 175 |
| Sidi Mohamed Cherif               | Machraa   | 1971                          | 1971/2018                                | 2674/21                       | 656                                                         | 385.850             | 328.200 | 270 |



**Figure 12.** Débits annuels des 4 stations hydrologiques étudiées, (Source ABHBC)

La figure 12 montre que les deux années étudiées 2016/2017 et 2017/2018 font partie des années sèches et qu'elles n'ont pas enregistré des apports en eau importants.

L'examen des longues séries historiques de mesure aux 4 stations montre que 80% des apports au barrage sont enregistrés entre les mois d'octobre et mai (figure 13). Les oueds Bouregreg et Grou contribuent à plus de 90% des apports générés dans le bassin.



**Figure 13.** Débits moyens mensuels interannuels au niveau des stations hydrologiques étudiées, (Source ABHBC)

Le tableau 3 donne les débits maximums, les volumes et le nombre d'événements de crues enregistrés lors des années hydrologiques 2016/2017 et 2017/2018 aux 4 stations hydrologiques étudiées. En effet, entre 6 et 14 événements ont été enregistrés selon les stations et les années.

**Tableau 3:** Evènements de crues par station hydrologique étudiée

| Station hydrologique | Année hydrologique | Débit maximum enregistré par an (m <sup>3</sup> /s) | Date de la crue    | Volume (Mm <sup>3</sup> ) | Nombre d'événements |
|----------------------|--------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|
| Aguibat Zear         | 2016/2017          | 263.4                                               | 24/02/2017 à 23h00 | 52                        | 13                  |
|                      | 2017/2018          | 265.9                                               | 07/03/2018 à 14h00 | 77                        | 14                  |
| Ras Fathia           | 2016/2017          | 256.4                                               | 25/02/2017 à 07h30 | 33                        | 11                  |
|                      | 2017/2018          | 423.8                                               | 07/03/2018 à 09h00 | 59                        | 10                  |
| Ain Loudah           | 2016/2017          | 24.5                                                | 13/10/2016 à 11h00 | 0.7                       | 10                  |
|                      | 2017/2018          | 198.7                                               | 24/04/2018 à 23h00 | 7.6                       | 17                  |
| Sidi Mohamed Cherif  | 2016/2017          | 62.6                                                | 13/10/2016 à 07h00 | 1.8                       | 6                   |
|                      | 2017/2018          | 48.0                                                | 11/12/2017 à 17h00 | 1.28                      | 6                   |

## 1.6. Hydrogéologie du bassin du Bouregreg

Le bassin du Bouregreg est caractérisé par la présence d'assises géologiques de faibles aptitudes à l'emménagement des eaux de pluie, en raison de leur texture et de leur structure qui ne favorisent pas l'infiltration et l'accumulation souterraine des eaux pluviales.

En effet, deux ensembles se distinguent à l'échelle du bassin. Le premier s'étend aux terrains du domaine des formations du socle de la Meseta centrale et côtière, et le second correspond aux terrains de couverture récents parsemés par endroits (figure 14).

### 1.6.1. Hydrogéologie des formations du socle

En dehors des zones d'effondrement au niveau desquelles existent des nappes plus au moins importantes, la grande partie du bassin du Bouregreg est constituée d'un milieu discontinu, formé essentiellement des formations schisteuses et quartzitiques et du massif granitique du Primaire, ainsi que des argiles rouges et basaltes du Trias.

Ces formations du socle qui se caractérisent par leur très faible aptitude à l'emménagement de l'eau de pluie, ne renferment pas de réservoirs d'eau potentiels susceptibles de jouer un rôle majeur dans le développement économique et social de la région. Toutefois, si les conditions hydrogéologiques le permettent et en cas de fortes fracturations ou d'altération, ces formations peuvent localement fournir des débits ponctuels faibles ne dépassant guère 1 à 2 l/s.

Ces débits, qui sont généralement de bonne qualité, peuvent desservir l'alimentation en eau potable de certaines localités rurales et contribuer parfois à la création de très petites parcelles irriguées.

Aussi, ces formations qui ne présentent pas d'intérêt hydrogéologique, renferment des gisements importants d'eaux minérales et thermales comme c'est le cas des eaux minérales de la société d'Oulmès et Sidi Ali.

La grande hétérogénéité de la lithologie et de la tectonique des terrains de la Meseta fait de cette région un milieu discontinu où il est difficile de parler d'unité hydrogéologique bien individualisée. Globalement, les investigations par sondages et puits réalisés dans la région, ont montré l'intérêt limité du rôle hydrogéologique de la Meseta dans le développement socio-économique de la région.

### **1.6.2. Les schistes primaires**

Les schistes primaires sont largement représentés à l'échelle de la région. Leur aptitude à l'emmagasinement des eaux est fortement liée au degré de l'altération et la fracturation qui les affectent. La puissance de la frange altérée reste souvent faible et dépasse rarement les 20 mètres. Dans la zone du haut Bouregreg, à topographie collineuse, l'altération des schistes est peu prononcée et leur rôle hydrogéologique est très limité. Par contre dans la zone de plateaux, la puissance de la zone d'altération est plus importante surtout au voisinage des zones de contact et de métamorphisme.

D'une façon générale, les schistes ne fournissent que de faibles débits unitaires dont la pérennité est souvent compromise. L'utilisation de ces débits se limite à l'alimentation en eau potable des populations rurales de faible densité. Pour l'AEP des centres ruraux à l'image de Roumani, Zhiligua et Tifelt et d'autres, on fait souvent appel aux eaux de surface et aux conduites régionales.

### **1.6.3. Les quartzites et schistes quartzitiques**

Moins développés que les schistes proprement dits, les quartzites et les schistes quartzitiques se présentent généralement sous forme de bandes intercalaires dans les schistes. Sur le plan hydrogéologique, ils peuvent renfermer des horizons aquifères liés surtout à l'importance de leurs fracturations. Localement, ils peuvent fournir des débits ponctuels pouvant dépasser les 2l/s, mais leur faible extension et leur vulnérabilité aux aléas climatique limitent la pérennité de la ressource.

### **1.6.4. Les massifs granitiques**

Les granites se localisent au Sud de Rommani dans la région de Laghoualem et à l'Ouest d'Oulmès. Ces roches altérées en surface sur une dizaine de mètres donnent lieu à une arène

granitique perméable. La présence de nombreuses dépressions dans ces massifs, fait de cet ensemble un milieu discontinu constitué d'une multitude d'unités non reliées entre elles. Les axes des dépressions jouent le rôle de drain où apparaissent de petites sources donnant de très faibles débits variants entre 0.2 et 0.5 l/s.

A l'image des schistes et des quartzites, les granites et leurs auréoles métamorphiques sont sensibles aux aléas climatiques, ce qui compromet la pérennité de la ressource en eau qu'ils recèlent et rend leur exploitation très contraignante.

#### **1.6.5. Les formations métamorphiques**

Les formations métamorphiques sont assez développées aux alentours des massifs granitiques. Ces formations correspondent aux zones de broyage, d'altération de métamorphisme et constituent par conséquent des zones de drainage aussi bien des schistes que des arènes granitiques. Cependant leurs faibles étendues apparentes limitent leur potentiel mobilisable en eau souterraine.

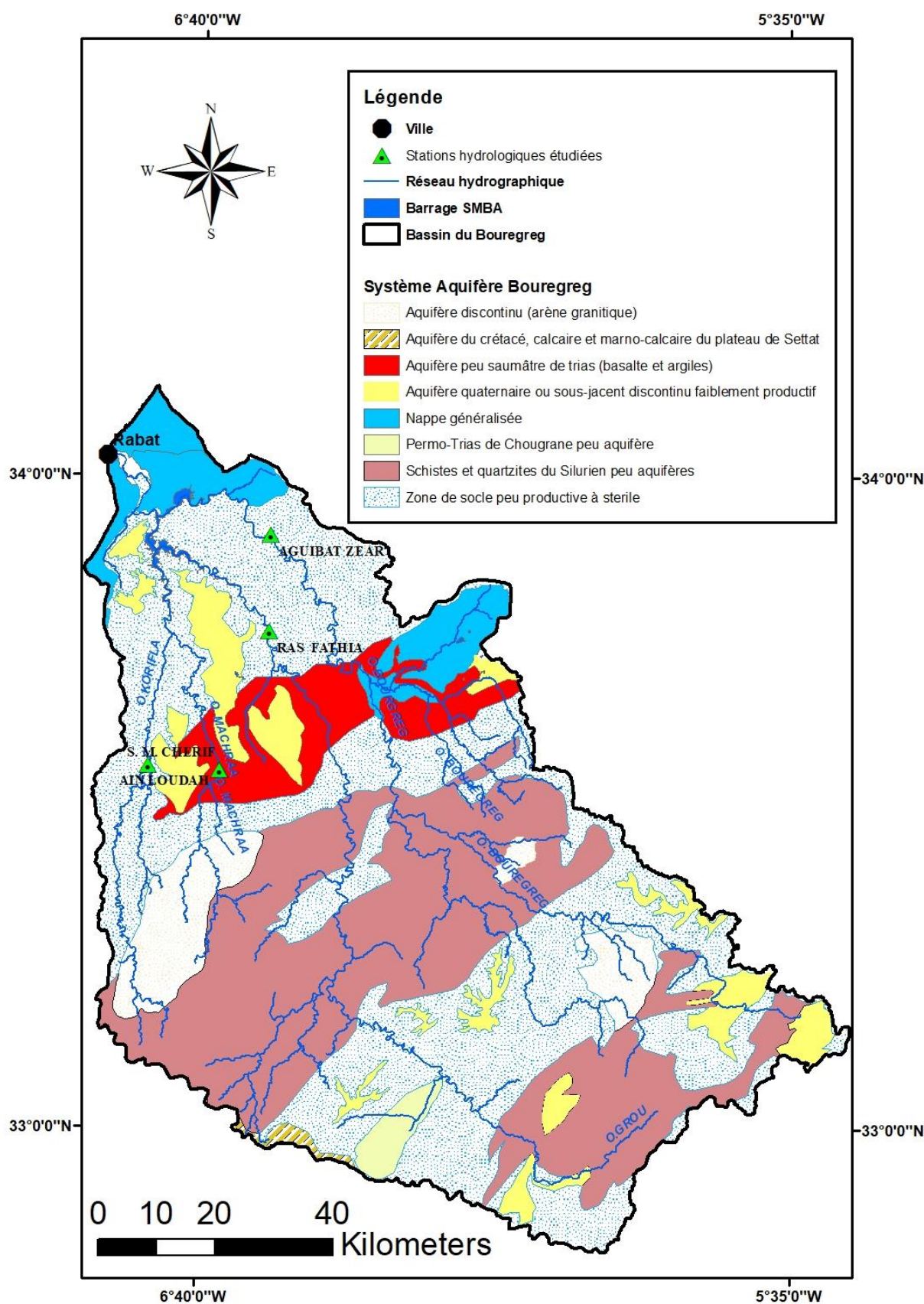


Figure 14. Carte de situation des eaux souterraines du bassin du Bouregreg.

### 1.6.6. Hydrogéologie des formations de couverture

Repose en discordance sur le primaire, certaines formations de couverture constituent les assises géologiques susceptibles de renfermer des nappes d'eau et des horizons aquifères, plus au moins importants. Celles-ci sont localisées au niveau de la bande côtière de Rabat-Salé-Temara, dans la région de Sehoul, dans le secteur de Dayet Er Roumi-Khemisset et au niveau de la vallée de l'Oued Tanoubert à Maaziz (figure 15).

#### a. Nappe de Temara

La nappe de Temara, d'une superficie de 350 km<sup>2</sup> environ, fait partie de la région de Rabat-Salé-Kénitra. Cette zone se présente sous forme d'un ensemble de bas plateaux inclinés vers le littoral. La région littorale, large de 10 à 30 km, se distingue par l'existence de cordons dunaires anciens ou récents, plus ou moins consolidés.

La moitié nord de l'aire de la nappe de Temara fait partie du bassin versant de l'Oued Bouregreg, où les circulations d'eau se font dans les grès, sables, calcaires et marnes sableuses du Plio-Quaternaire.

Bien que le Plio-quaternaire soit présent partout dans la région de Rabat-Temara, il n'est aquifère que par secteurs. Son épaisseur varie de moins de 5m au nord et à l'Ouest, à plus de 80m au Sud. Son épaisseur saturée est en général très faible. En moyenne, elle est de 6m, et s'échelonne entre 0m dans le secteur d'Ain-Atiq, Ain Ghboula, et 10m dans le secteur de Rabat.

La faible épaisseur saturée du Plio-Quaternaire explique en partie la faible valeur des productivités unitaires des sondages et des ouvrages réalisés dans ces formations à l'échelle de la nappe de Temara. Le potentiel mobilisable pour la nappe de Temara est estimé à 15 Mm<sup>3</sup>, selon le Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressource en Eau (PDAIRE, 2018).

#### b. Nappe de Sehoul

La nappe de Sehoul s'étend sur une superficie de 200 km<sup>2</sup> le long de l'axe Salé-Sidi Allal Bahraoui. La nappe de Sehoul constitue l'extension sud de la nappe de la Maâmora. Elle est limitée au Sud et au Sud-Ouest par l'Oued Bouregreg.

Le plateau de Sehoul présente une diversité lithologique avec une nette prédominance de formations paléozoïques (formations schisteuses, gréseuses et quartzitiques) avec une couverture néogène, Miocène et Pliocène marin) et quaternaire de la Meseta côtière (marnes, grès molassiques, calcaires lacustres, limons et alluvions).

La nappe de Sehoul est une nappe libre, développée dans des terrains constitués des calcaires gréseux et sables consolidés du Pliocène. Les marnes grises du Pliocène sont imperméables et

jouent un double rôle : elles constituent un écran à l'alimentation des schistes paléozoïques et forment le substratum de l'aquifère pliocène.

Les épaisseurs de cet aquifère varient de moins de 5m au niveau des bordures sud, à plus de 30m en s'approchant vers les bordures nord du plateau. Le potentiel mobilisable pour la nappe de Sehoul est estimé à 3 Mm<sup>3</sup> (PDAIRE, 2018).

### **c. Nappe de Tanoubert**

S'étendant sur 40 km<sup>2</sup>, la nappe de Tanoubert se situe dans la région de Maaziz. Cette nappe doit son existence à l'oued Bouregreg.

La nappe de Tanoubert se situe dans la Meseta centrale marocaine. Dans le secteur de Maaziz, trois formations géologiques sont observables :

- Les formations triasiques (basaltes et argiles) ;
- Les formations miocènes ;
- Les formations alluviales.

La nappe de Tanoubert est une nappe libre peu profonde circulant dans les dépôts alluviaux constitués de sables jaunâtres à intercalations de grès de conglomérats et de calcaires bioclastiques surmontant des basaltes et argiles du Trias. Les épaisseurs de la nappe varient entre 3 et 22 m.

Les productivités ponctuelles de cette nappe sont de l'ordre de 4 l/s et peuvent dépasser parfois 10 l/s. Le potentiel mobilisable pour la nappe de Tanoubert est estimé à 4 Mm<sup>3</sup>(PDAIRE, 2018).

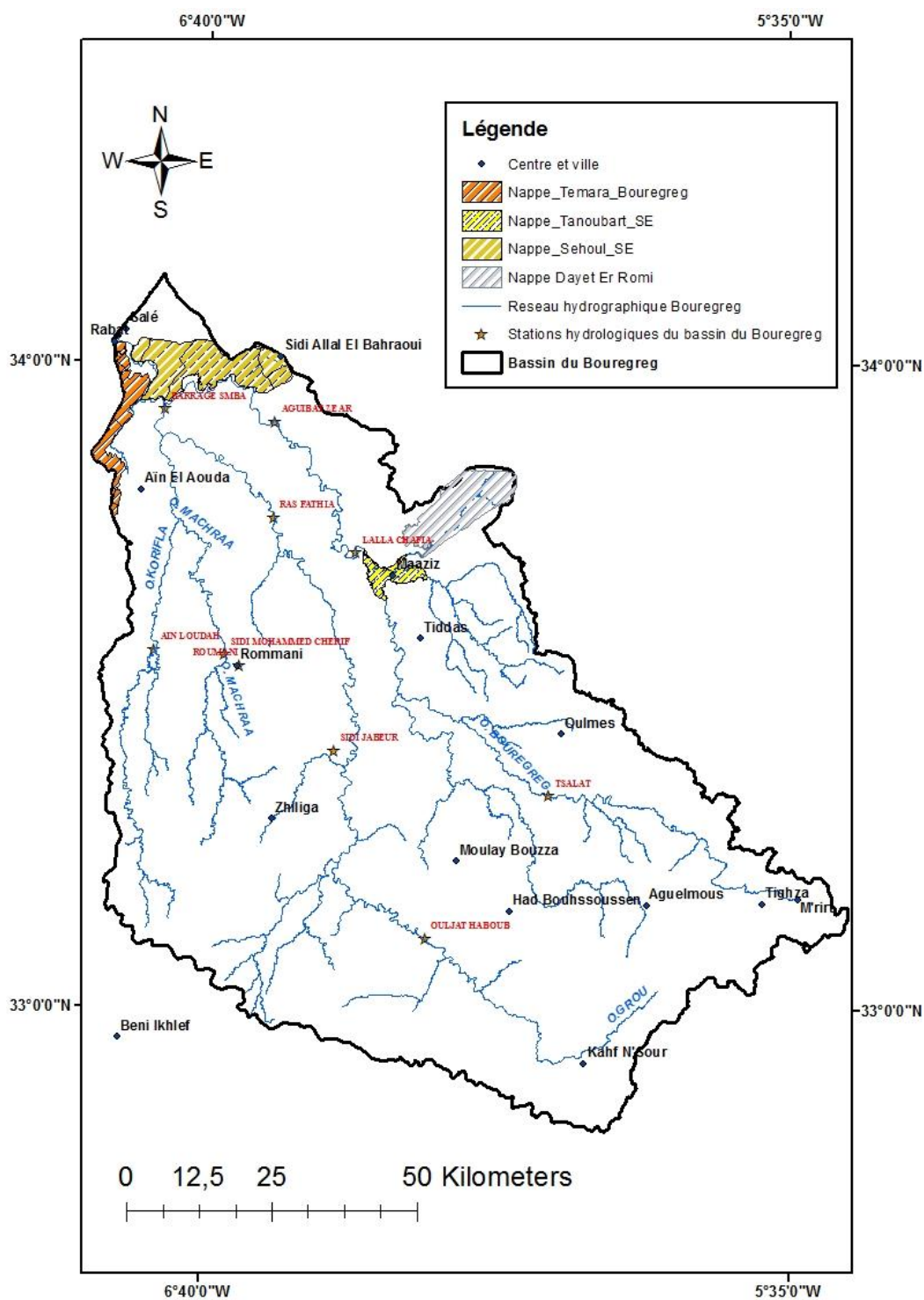
### **d. Secteur Dayet Er Roumi**

Située dans la province de Khémisset à environ 15 km au Sud-Ouest de cette ville, la nappe de Dayet Er Roumi s'étend sur une superficie de 130 km<sup>2</sup>. Du point de vue géologique, c'est une dépression sédimentaire, d'orientation NE-SW et comblée par des sédiments triasiques, néogènes et quaternaires.

L'aquifère de Dayet Er Roumi circule dans des formations du Mio-Plio-Quaternaire formées de calcaires et sables, faisant partie d'un bassin en horsts et grabens. Les argiles rouges salifères du Trias constituent le substratum de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire dans la grande partie de la zone et aux marnes grises du Miocène dans la partie Est.

La nappe du secteur Dayet Er Roumi offre des productivités variables mais qui restent généralement faibles, et elle est exploitée essentiellement au centre du bassin. Les débits des forages varient généralement de 0.1 à 10 l/s. Le potentiel mobilisable de l'aquifère est faible, il est estimé à 1,6 Mm<sup>3</sup>.





**Figure 15.** Carte de situation des principales nappes du bassin du Bouregreg.

## Chapitre 2 : Etat de l'art dans la mesure et prédiction du transport solide

L'érosion accélérée des sols a des effets néfastes sur la productivité, la répartition des revenus et l'environnement à l'échelle nationale et mondiale. L'érosion et le transport de sédiments dans les oueds sont les phénomènes les plus complexes dans un bassin versant. L'érosion et le transport solide en continu est non seulement la cause d'un déséquilibre des cours d'eau naturels, mais aussi la cause de l'envasement des barrages en réduisant leurs volumes de stockage.

Le taux d'érosion des sols a considérablement augmenté au cours des dernières décennies et a globalement été déclaré comme étant de 0.5, 0.75, 1 et  $2.2 \times 10^9$  tonne respectivement en 1951, 1961, 1971 et 1993, (Hosseini et Ghorbani, 2005).

Cependant, ces chiffres doivent être mis à jour fréquemment. Par conséquent, la quantification du transport solide s'opère de deux manières à savoir : les mesures directes ou les équations universelles. Ces dernières sont issues de méthodes empiriques qui exigent un grand nombre de paramètres physiques ou hydrologiques spécifiques du bassin d'étude et qui sont souvent sujet à des critiques qui limitent leur utilisation et leur interpolation à d'autres bassins versants.

### 2.1 Mesure directe du transport solide en charriage et en suspension

Pour expliquer les processus qui conditionnent le transfert des sédiments, plusieurs auteurs dans le monde ont utilisé la méthode directe d'estimation basée sur l'analyse de l'évolution de la charge solide en suspension en fonction des débits liquides (Ludwig et Probst, 1998; Walling et Fang; Hudson, 2003).

Nous détaillerons dans ce qui suit les méthodes directes d'évaluation du transport solide en suspension, en charriage et total.

#### 2.1.1. Mesure directe du transport solide en charriage

L'insuffisance de données de mesures pour évaluer surtout le transport en charriage a contraint plusieurs chercheurs ces cent dernières années à la mise au point de beaucoup de méthodes fondées à la fois sur des résultats expérimentaux et sur une explication théorique.

La plupart des formules en variables adimensionnelles utilisées pour le calcul du charriage ont été développées suivant trois approches différentes : soit basées sur les forces de frottement sur le lit du canal (Meyer-Peter et Mueller, 1948 ; Engelund et Hansen, 1967), soit en utilisant des relations débits liquide-débit solide (Sogreah, 1991), ou encore sur des considérations statistiques concernant les forces hydrodynamiques et les vitesses d'écoulement (Einstein, 1950).

Le tableau 4 ci-dessous résume les équations de calcul.

**Tableau 4 :**Principales caractéristiques des formules de transport solide par charriage (Recking, 2010).

| Formule                                                                                                                                                                                                                                                               | Calculs intermédiaires | Données nécessaires               | Conditions expérimentales et domaine de validité                                                                                                                  | Auteurs                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| $q_v = 8 \sqrt{g(s-1)D_{50}^3} \left[ \left( \frac{k}{k'} \right)^{\frac{3}{2}} \theta - 0.047 \right]^{3/2}$                                                                                                                                                         | $k, k', \theta$        | $U, R, D_{50}, D_{90}, S, L$      | Données de laboratoire<br>$0.4 < S < 2.4\%$<br>$0.4 < D < 29 \text{ mm}$                                                                                          | (Meyer-Peter et Mueller, 1948) |
| $q_v = \frac{0.1}{f} \sqrt{g(s-1)D_{50}^3} \theta^{5/2}$<br>Le facteur de rugosité $f$ étant défini par<br>$f = 2gRS/U^2$                                                                                                                                             | $\theta, f$            | $U, R, D_{50}, S, L$              | Transport total (Charriage+ suspension)<br>Laboratoire, lit à sable, transport important, lits plats et dunes,<br>$0.15 < D < 1.6 \text{ mm}$ ,<br>pentes faibles | (Endgelund et Hansen, 1967)    |
| $Q_{vapparent} = Q 4.45 \left( \frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} \frac{S^{1.5}}{dr} \left[ 1 - \left( \frac{Q_{cr}}{Q} \right)^{0.375} \right]$<br>$Q_{cr} = 0.0776 \sqrt{g D_m^5} \frac{(dr-1)^{\frac{8}{3}}}{S^{\frac{13}{6}}} (1.1.2S)^{\frac{8}{3}}$            | $Q_{cr}$               | $Q, D_{30}, D_{50}, D_{90}, S, L$ | Ajustement des données de laboratoire, à partir de la formule de Smart et Jaeggi avec l'hypothèse $L/H=18$ ,<br>$0.25 < S < 20\%$                                 | (Sogreah, 1991)                |
| $q_v = \sqrt{g(S-1)D^3} \left[ \sqrt{\frac{36v^2}{g(S-1)D^3}} - \sqrt{\left( \frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g(S-1)D^3} \right)} f(\theta) \right]$<br>$f(\theta) = 2.15e^{-0.391/\theta} \text{ si } \theta < 0.18$<br>$f(\theta) = 40\theta^3 \text{ si } \theta > 0.18$ | $\theta$               | $R, D_{50}, S$                    | Laboratoire, sables et graviers<br>$0.3 < D < 29 \text{ mm}$                                                                                                      | (Einstien, 1950)               |

Avec,

**g**: Pesanteur, **S** : Pente du lit, **dr** : Densité relatives  $= \rho_s / \rho$ , **K** : Coefficient de résistance de Strickler de l'écoulement, **K'** : Coefficient de résistance de Strickler pour les grains défini par  $K' = 26/D_{90}^{1/6}$ ,  **$\theta$** : Paramètre de Shields  $\theta = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)D}$ , **f** : Coefficient de frottement de Darcy Weisbach, **Q**: Débit,  $q_v$ : Débit solide volumique unitaire ( $= Q_s / [\rho_s W]$ ), **D<sub>m</sub>** : Diamètre moyen arithmétique  $= \Sigma(diPi)/P$  (di diamètre, Pi poids), **v** : la viscosité cinématique du fluide, **L**: Largeur du lit ou du canal, **R** : Rayon hydraulique, **U**: Vitesse moyenne.

Au Maroc sur le Bouregreg, seul le transport solide en suspension a déjà été mesuré, et le transport solide charrié a été pris égal à 10% du transport solide en suspension, lors d'une étude préliminaire à la construction du barrage SMBA (Lahlou, 1982).

### 2.1.2. Mesure directe du transport solide en suspension

Les mesures directes sont en effet basées sur le recueil des valeurs instantanées des débits liquides  $QL(m^3/s)$  et celles des concentrations des sédiments en suspension  $C (g/l)$  correspondantes. Ces mesures sont effectuées au niveau des stations hydrologiques qui contrôlent les bassins versants. Le débit liquide est calculé après lecture de la hauteur d'eau sur une échelle limnimétrique posée sur la rive de l'oued et à l'aide de la courbe de tarage adéquate (régulièrement contrôlée et actualisée). La charge solide en suspension obtenue à partir d'échantillons d'eau prélevés dans les rives des oueds au moyen d'un conteneur de 100 cl. La boue recueillie sur un papier filtre est pesée après séchage à l'étuve à  $105^{\circ}C$  pendant 24 heures.

On détermine ensuite la charge correspondante à un litre d'eau prélevé. Ce qui établit la concentration  $C_s$  donnée en  $(g/l)$ . La fréquence des prélèvements dépend de la variation de la hauteur d'eau. Cette fréquence s'effectue chaque heure en période de crue. Dans le cas où la crue est importante c'est-à-dire la variation de la hauteur d'eau est rapide, la fréquence de prélèvement augmente jusqu'à trente (30) minutes. En effet la règle adoptée est de procéder à un ou deux prélèvements par 24 heures en période normale et avec une fréquence plus grande (observation toutes les 15 ou 30 minutes par exemple) lors des crues (Fournier, 1960 ; Touat, 1989). Le débit solide en suspension est donné par la formule suivante :  $Q_s = C \cdot QL$ .

Toutefois, il est à noter le caractère approché de cette méthode dans le calcul de l'apport solide en suspension car la fiabilité des prélèvements d'échantillons à travers la section du cours d'eau est mise en cause.

En effet, la concentration des sédiments varie le long d'une section de mesure, du fond du cours d'eau vers la surface et d'un instant à l'autre (Molinier 1979 ; Olivry, 1989).

Il est dans ce cas recommandé, dans les situations où c'est possible, d'effectuer quelques jaugeages dits « solides », au cours desquels on effectue un prélèvement de matière en suspension au niveau de chaque prise de mesure de vitesse, et au moins en trois points surface, milieu et fond, et sur 5 verticales, pour intégrer les concentrations de MES sur la surface mouillée de la section (Liéno et al., 2005).

## 2.2. Quantification du transport solide par les équations universelles

Le modèle de rendement sédimentaire de l'équation universelle de perte de sol (USLE) et sa version modifiée (MUSLE) sont largement appliqués dans le monde, mais des performances différentes ont été signalées quant à leur succès par rapport aux données mesurées.

### 2.1.1. Quantification du transport solide par le Modèle MUSLE

L'équation universelle de la perte de sol (USLE ; Wischmeier et Smith, 1978) et sa version révisée (MUSLE ; Renard et al., 1997) ont été développées pour prévoir l'érosion annuelle

moyenne à long terme **A** des terrains à partir de six facteurs. Le modèle USLE/RUSLE est souvent représenté par l'équation :

$$A = R.K.L.S.C.P$$

avec,

R : le facteur d'érosivité annuel moyen des précipitations, K : le facteur de sol (érodibilité), L : le facteur de longueur de la pente, S : le facteur de gradient de pente, C : le facteur de culture et de gestion et P : le facteur de pratique de soutien à la conservation sol.

Il a été observé que l'USLE/RUSLE surestime la faible érosion moyenne annuelle et sous-estime la forte érosion moyenne (Risse et al., 1993 ; Rapp et al., 2001). Il ressort que le fait de ne pas tenir compte explicitement du ruissellement dans le modèle est un facteur de production des erreurs.

En effet, l'absence de prise en compte du ruissellement en tant que facteur principal dans le modèle USLE/RUSLE est à l'origine des erreurs systématiques dans la prévision de l'érosion des événements pluviométriques, qui à son tour conduit à des erreurs dans la prévision de la perte annuelle moyenne de sol.

### 2.1.2. Quantification du transport solide par le Modèle MUSLE

L'examen de plus de 49 articles (Sadeghi, 2014) a confirmé la précision extrêmement variable du modèle en fonction du mode de calcul et de la détermination des entrées et sorties, et des échelles temporelles et spatiales.

Les résultats de cet examen ont montré que :

- l'utilisation du SIG pouvait améliorer la performance des estimations du modèle ;
- les méthodes d'estimation du facteur d'érodibilité n'ont pas affecté la précision des estimations du modèle ;
- les mesures directes et sur le terrain des débits améliorent nettement la performance du modèle comparé à l'utilisation de méthodes indirectes.

Par ailleurs, l'examen a révélé aussi qu'en raison des différences entre les valeurs observées et estimées, des tentatives ont été faites pour calibrer MUSLE en ajustant la puissance ou le coefficient des modèles dans certaines études (Jackson et al. 1987, Epifanio et al. 1991, McConkey et al. 1997, Khajehie et al. 2002, Rezaiifard et al. 2002, Sadeghi et al. 2004, 2007b, Sarkhosh et al. 2004, Khaledi Darvishan et al. 2009, Noor et al. 2010).

Dans deux études (Chen et Mackay 2004, Varvani et al. 2006), seule la puissance du modèle a été calée, ce qui est logiquement plus acceptable. La nécessité de calibrer le modèle a également été soulignée dans les études dans lesquelles aucun ajustement du calibrage n'avait été effectué.

Enfin, une estimation précise de la production de sédiments nécessite un nombre suffisant d'échantillons ou une préparation de la courbe sédimentaire pour donner une base appropriée de comparaison et de calibrage du modèle (Cordova 1981, Smith et al. 1984, Jackson et al. 1987, Banasik et al. 1988, Epifanio et al. 1991, McConkey et al. 1997, Santos et Canino 1997, Erskine et al. 2002, Khajehie et al. 2002, Mahmoudzadeh et al. 2002, Rezaiifard et al. 2002, Cambazoglu et Gogos 2004, Chen et Mackay 2004, Sadeghi et Mahdavi 2004, Sarkhosh et al. 2004, Basson 2005, Kinnell 2005, Porabdullah 2005, Appel et al. 2006, Ma 2006, Varvani et al. 2006, Abdulla et Eshtawi 2007, Arekhi 2007, Jaramillo 2007, Sadeghi et al. 2007a, 2007b, 2008, Khaledi Darvishan et al. 2009, Kinnell 2010, Noor et al. 2010).

Les mesures réalisées par l'Agence du bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia au niveau des quatre stations hydrologiques concernés par l'étude au cours des années hydrologiques 2016/2017 et 2017/2018 sont insuffisantes pour établir des relations entre les CEMs et les débits liquides et pour avoir un calibrage fiable des modèles. Toutefois, l'Agence du Bassin Hydraulique continue de prendre des mesures au droit des stations hydrologique concernées, et ce afin de constituer un échantillon relativement long et suffisant pour établir les courbes sédimentaires.

## Chapitre 3 : Mesure du transport solide à l'entrée du barrage SMBA

### 3.1. Mesure de la concentration des matières en suspension (cMES)

L'érosion hydrique se présente sous plusieurs types : le Splash, l'érosion diffuse, l'érosion concentrée qui se subdivise ensuite en deux formes différentes: les rigoles et les ravines.

Cette érosion qui se produit sur des sols squelettiques, mal protégés par une végétation trop clairsemée constitue la source principale des matières en suspension. Dans les zones montagneuses, cette érosion est accentuée par les fortes pentes, la nature du sol et le couvert végétal, ceci conjugué aux activités de l'homme. Il suffit d'avoir observé une fois la couleur de l'eau des oueds en crue pour se rendre compte de l'ampleur du phénomène (Lahlou, 1982).

Les photos suivantes illustrent l'ampleur et les différents types d'érosion observées dans le bassin du Bouregreg.



**Photo 1** : Erosion Splash du bassin Machraa en amont de la station Sidi Mohammed Cherif Chafia (Ezzaouini, décembre 2019)





**Photo 2 :** Erosion par ravinement du bassin Korifla en amont de la station hydrologique d'Ain Loudah (Ezzaouini, décembre 2019)



**Photo 3 :** Erosion par rigole du bassin Grou en amont de la station hydrologique de Ras Fathia (Ezzaouini, décembre 2019)



L'envasement des barrages pose des problèmes sérieux aux gestionnaires des ressources en eau en matière de perte en capacité de stockage ce qui impacte la durée d'exploitation des ouvrages et la qualité des eaux des retenues.

Afin de déterminer la quantité de la vase entrant au barrage SMBA, l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia a mis en place un réseau de mesure de la concentration des matières en suspension au niveau des quatre stations hydrologiques situées à l'amont immédiat de la retenue du barrage.

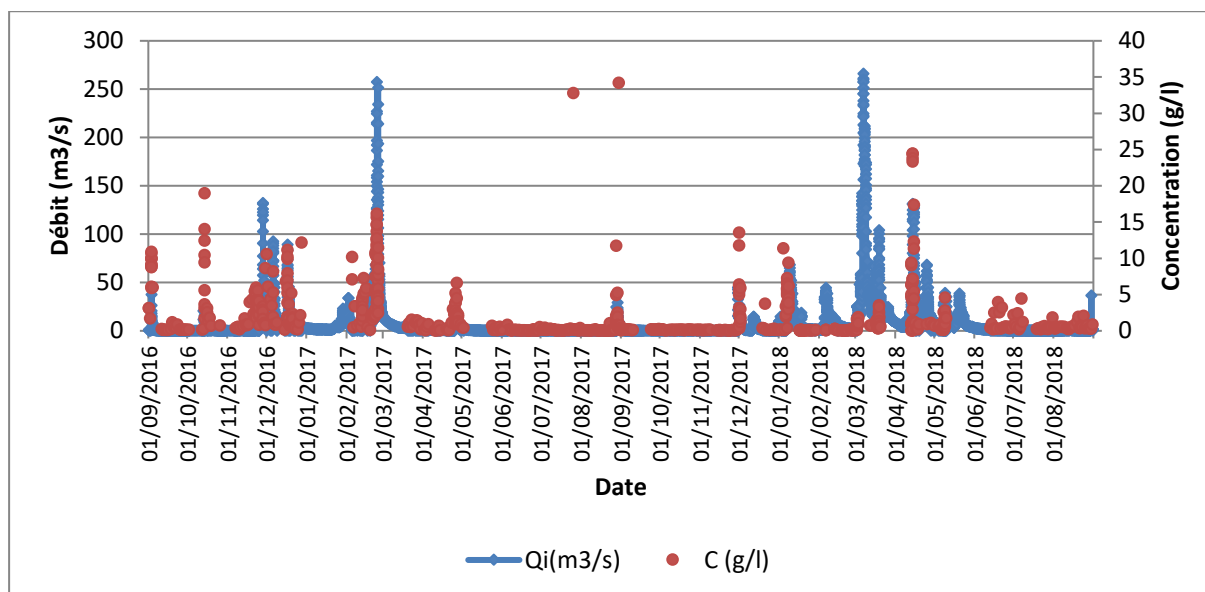
La mesure de la concentration de la matière en suspension au niveau de ces stations hydrologiques s'opère par les observateurs des quatre stations hydrologiques étudiées, qui sont contractuels de l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia. Ils exécutent un prélèvement tous les jours en période d'étiage et chaque heure au moment des crues. Les données disponibles de mesure de la concentration des matières en suspension, couvrent deux années hydrologiques, 2016/2017 et 2017/2018.

Le tableau 5 donne le nombre des prélèvements d'échantillons au droit des stations hydrologiques concernées par l'étude.

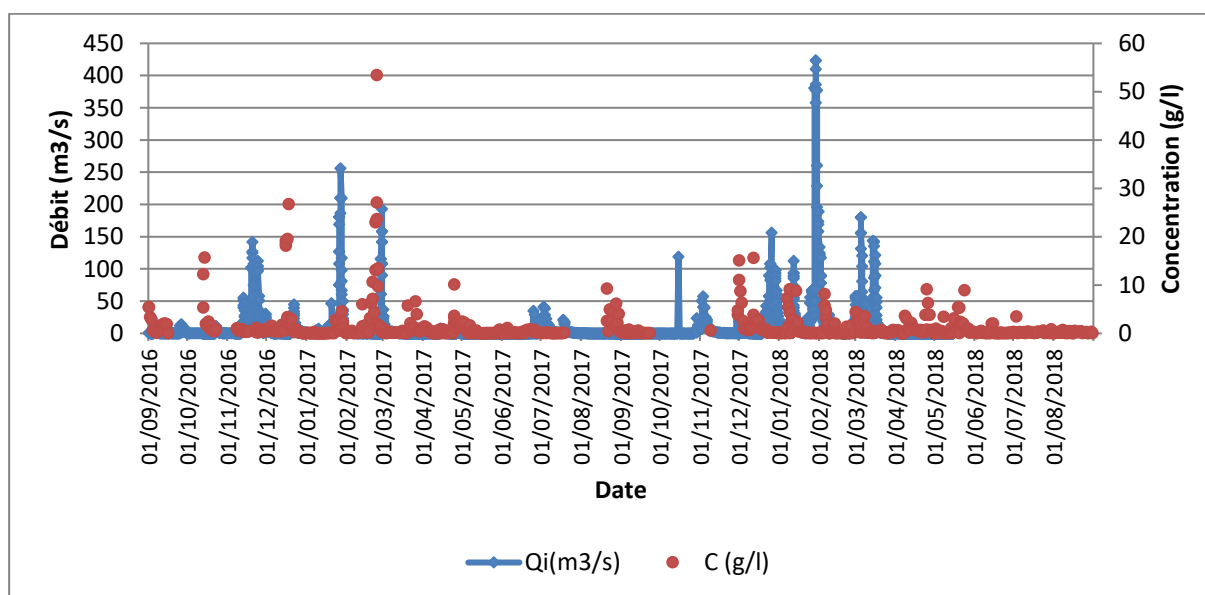
**Tableau 5 :** Nombre de prélèvements d'échantillons au droit des stations hydrologiques concernées par l'étude

| Nom de la station hydrologique | Oued      | N°IRE   | Superficie du Bassin Versant en (km <sup>2</sup> ) | Coordonnées Lambert |         |     | Nombre d'échantillons depuis 2016 |
|--------------------------------|-----------|---------|----------------------------------------------------|---------------------|---------|-----|-----------------------------------|
|                                |           |         |                                                    | X                   | Y       | Z   |                                   |
| Aguibat Zear                   | Bouregreg | 3118/13 | 3681                                               | 394.500             | 368.150 | 90  | 1080                              |
| Ras Fathia                     | Grou      | 989/20  | 3485                                               | 394.250             | 351.800 | 100 | 968                               |
| S.M. Cherif                    | Machraa   | 2674/21 | 656                                                | 385.850             | 328.200 | 270 | 919                               |
| Ain Loudah                     | Korifla   | 2673/20 | 699                                                | 373.750             | 329.150 | 175 | 374                               |

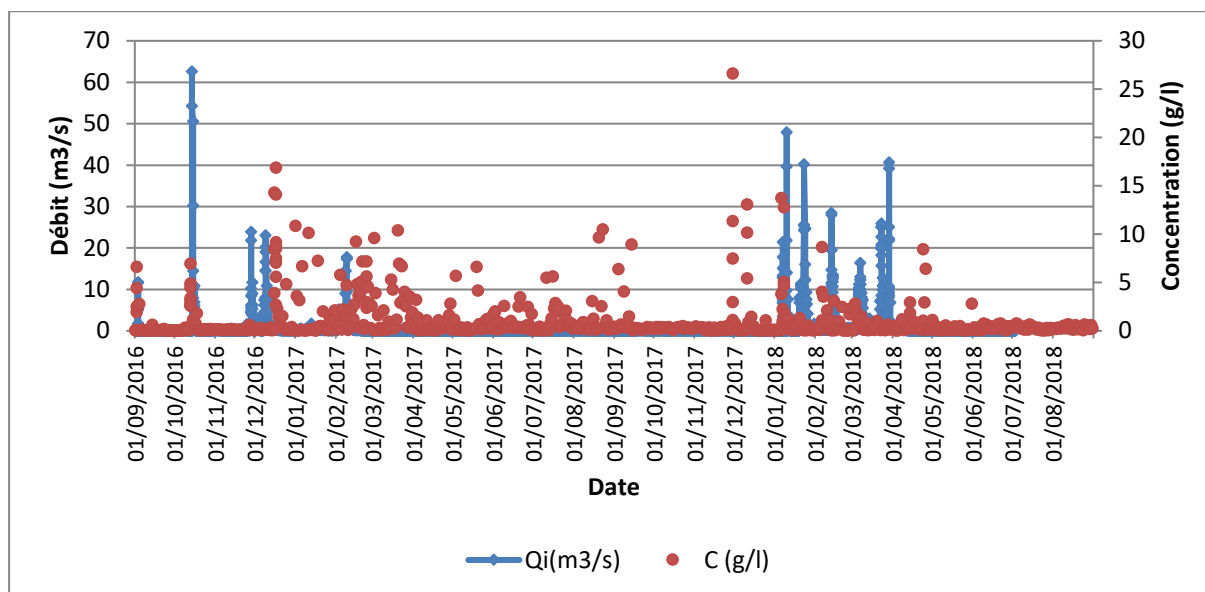
Ainsi, les figures 16 à 19 suivantes illustrent les débits liquides et leurs concentrations en matière en suspension.



**Figure 16.** Débits instantanés et concentration de la matière en suspension au droit de la station hydrologique d'Aguibat Zear.

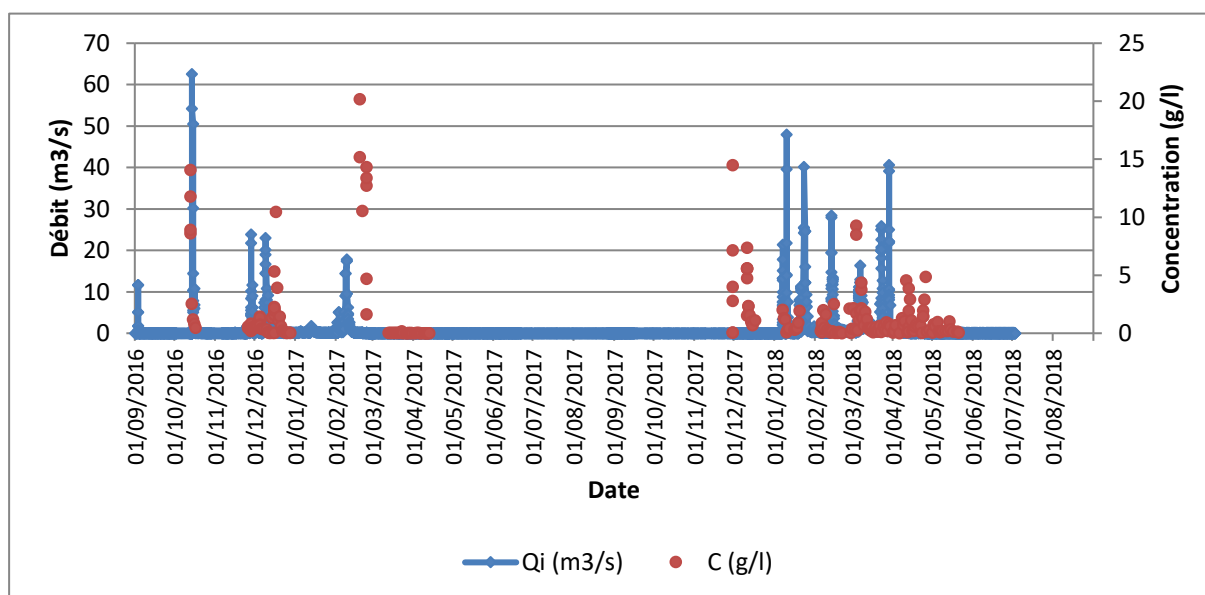


**Figure 17.** Débits instantanés et concentration de matière en suspension au droit de la station hydrologique de Ras Fathi.



**Figure 18.** Débits instantanés et concentration de matière en suspension au droit de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif.

En raison des travaux de réalisation de seuil hydrologique au droit de la station d'Ain Loudah sur l'oued Korifla les prélèvements ont été fortement perturbés ce qui a impacté le nombre de prélèvements ainsi que leurs qualités (figure 19).



**Figure 19.** Débits instantanés et concentration de matière en suspension au droit de la station hydrologique d'Ain Loudah.

L'analyse critique des échantillons a permis de constater l'existence des concentrations de matière en suspension nulles et des concentrations dont le débit correspondant n'a pas été noté. En effet, les concentrations qui ont été observées lors des périodes d'étiage sévère ne sont pas liées à un débit en raison des faibles hauteurs d'eau qui n'atteignent pas les éléments d'échelles des sections de mesure.

Pour la suite, ces concentrations qui, ont été éliminées, et les débits solides ont été calculés pour chaque concentration.

En absence d'études sur la mesure de la concentration de la matière en suspension dans le bassin du Bouregreg, qui pourrait déterminer les lieux de la section de mesure qui présentent la concentration la plus proche à la concentration moyenne de la section de mesure, les prélèvements des échantillons se font dans le lit de l'oued, par bouteille de 1 l à environ 2m des rives accessibles loin des berges et des fonds. L'idéal serait de pouvoir corrélérer les valeurs effectuées à ces points de prélèvement ponctuels à des valeurs de concentration moyennes sur la section de mesure lors de jaugeages « complets ».

En effet, l'étude du transport solide à la station hydrologique de Dar Soltan sur l'oued Bouregreg réalisée par la Direction de l'Hydraulique au Maroc 1971, stipule que les échantillons réalisés loin des berges et des fonds sont représentatifs avec une erreur qui n'excède pas les 10%.

Les observateurs des stations hydrologiques concernées exécutent un prélèvement toutes les heures au moment des crues et un prélèvement par jour en période d'étiage. A chaque prise instantanée d'échantillon la date, l'heure ainsi que la côte à l'échelle sont notées sur la bouteille (Lahlou, 1971).

Les échantillons sont ensuite analysés au laboratoire de la manière suivante :

- Les membranes filtrantes (0.45µm) sont numérotées, puis immergées dans l'eau distillé pour activer les pores ;
- Elles sont séchées à 105°C pendant 35 minutes puis pesées (masse initiale) ;
- La solution est agitée puis un volume précis est prélevé puis filtré sous vide ;
- Les membranes filtrantes sont séchées à 105°C pendant 35 minutes puis pesées (masse finale).

Le poids de la matière en suspension est donné en gramme par la formule suivante :

$$\text{Poids (g)} = (\text{Masse}_{\text{finale}} - \text{Masse}_{\text{initiale}})$$

Ainsi la concentration est déduite comme suit :

$$c_{\text{MES}} = (\text{Masse}_{\text{finale}} - \text{Masse}_{\text{initiale}}) / \text{Volume}$$

avec :

Volume en litre (l)

Le nombre d'échantillons de mesure est présenté dans le tableau 6.

**Tableau 6 : Nombre d'échantillons de mesure cMES et de crues par station**

| Nom de la station hydrologique | Oued      | Superficie des bassins versant km <sup>2</sup> | 2016/2017 et 2016/2018     |                                 |
|--------------------------------|-----------|------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
|                                |           |                                                | Nombre d'échantillons cMES | Nombre de crues échantillonnées |
| Aguibat Zear                   | Bouregreg | 3681                                           | <b>727</b>                 | <b>27</b>                       |
| Ras Fathia                     | Grou      | 3485                                           | <b>636</b>                 | <b>21</b>                       |
| Sidi Mohamed Cherif            | Machraa   | 656                                            | <b>789</b>                 | <b>12</b>                       |
| Ain Loudah                     | Korifla   | 699                                            | <b>233</b>                 | <b>27</b>                       |

### 3.2. Analyse des concentrations en matières en suspension

Nous avons procédé au calcul des débits solides à partir des débits liquides par la formule suivante :

$$Q_s = Q_l * cMES$$

avec,

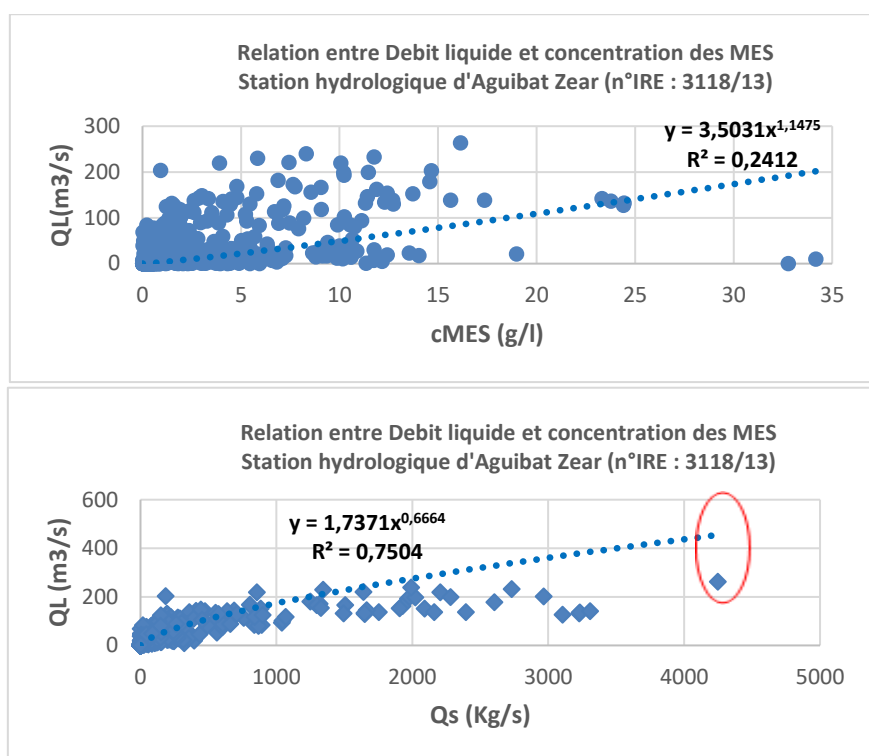
Q<sub>s</sub> :débit solide en (Kg/s)

Q<sub>l</sub>: débit liquide en (m<sup>3</sup>/s)

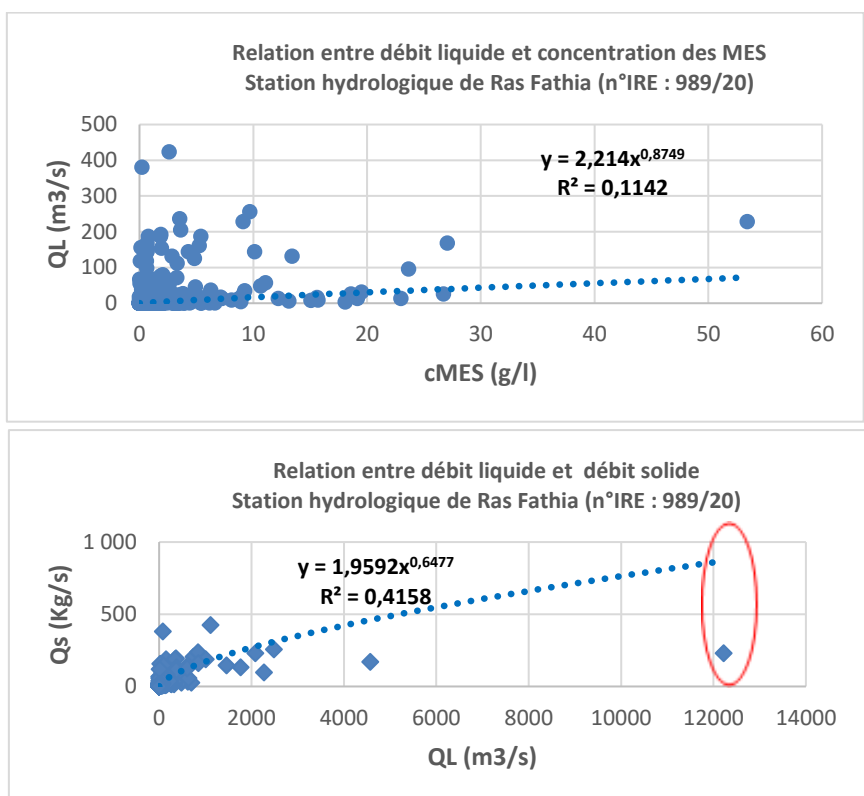
cMES : concentration de la matière en suspension en (g/l)

#### 3.2.1. Analyse de la cMES, débit liquide et solide

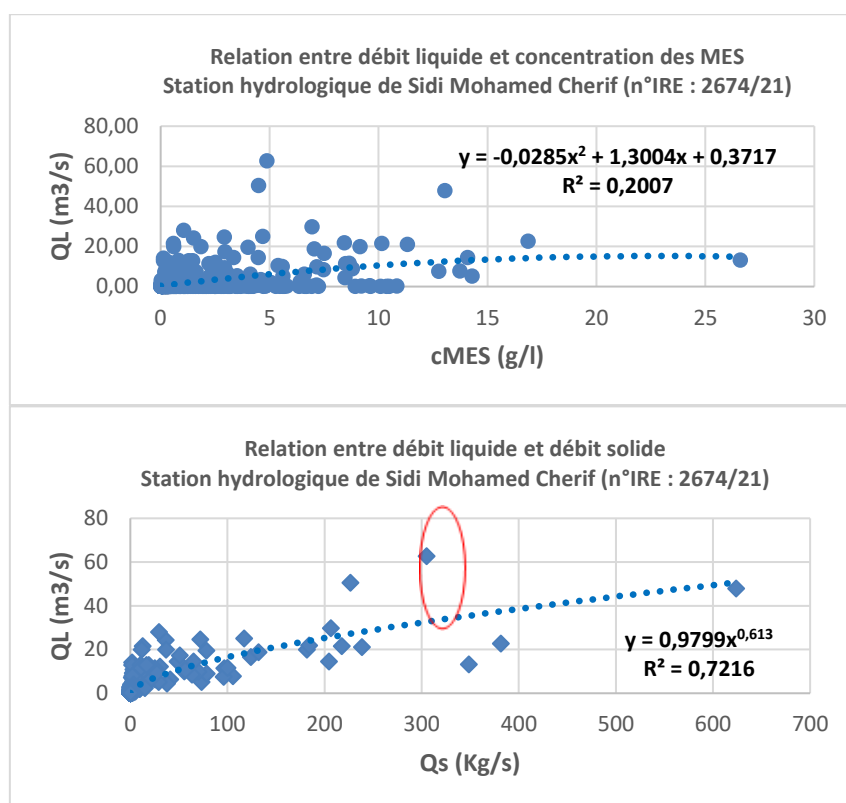
Une fois les séries des mesures corrigées, nous avons procédé à la recherche de corrélation linéaire entre les concentrations en matière en suspension et les débits liquides d'une part et les débits solides et les débits liquides d'autre part. L'analyse a porté sur les années hydrologiques 2016/2017 et 2017/2018. La recherche de relation entre les différentes séries à savoir les séries des débits solides (Q<sub>s</sub>) et des débits liquides (Q<sub>l</sub>) d'une part et des débits liquides (Q<sub>l</sub>) et des concentrations des matières en suspensions (cMES) d'autre part, nous avons utilisé la méthode des moindres carrés pour déterminer la droite de tendance qui s'ajuste le mieux avec les échantillons des données dont on dispose. Les résultats de l'analyse au droit des 4 stations étudiées sont présentées dans les figures20 à 23.



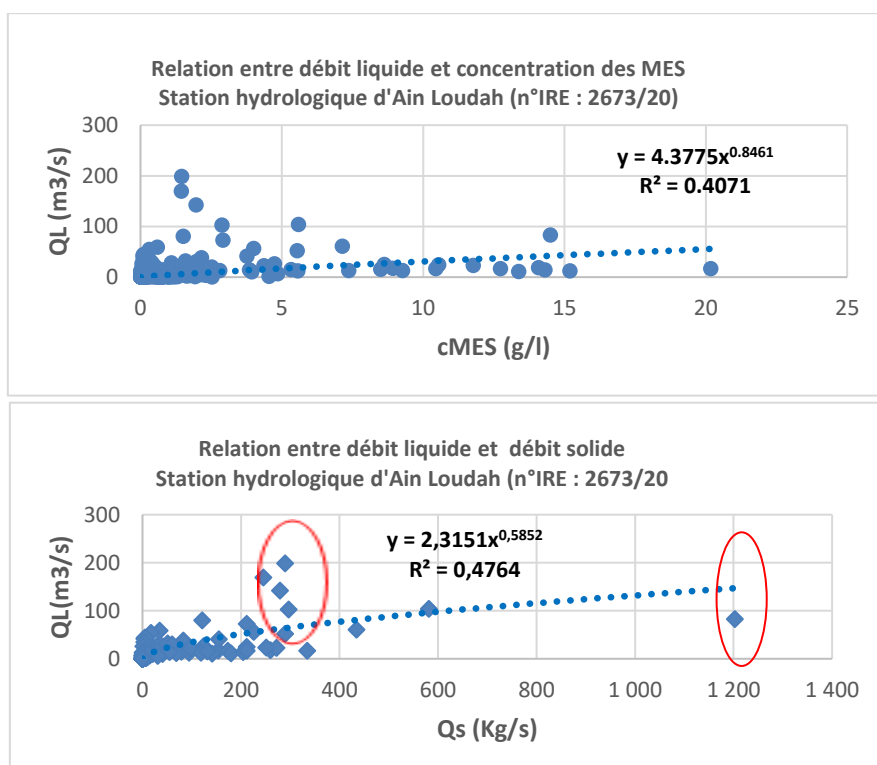
**Figure 20.** Relation entre le débit liquide, concentration en matière en suspension et débit solide au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear



**Figure 21.** Relation entre le d liquide, concentration en matière en suspension et débit solide au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia



**Figure 22.**Relation entre le débit liquide, concentration en matière en suspension et débit solide au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif.



**Figure 23.**Relation entre le débit liquide, concentration en matière en suspension et débit solide au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah

D'une manière générale, les débits liquides et les concentrations en matières en suspension présentent des corrélations faibles variant entre 0.20 et 0.42. Les relations présentent aussi une grande dispersion au niveau des valeurs de faibles débits.

Par contre, les débits solides et les débits liquides présentent des bons coefficients de corrélation qui varient entre 0.75 et 0.91, et ce en raison de présence du débit au niveau des deux paramètres.

Les relations qui lient les débits solides et les débits liquides au droit des différentes stations hydrologiques, sont résumées dans le tableau 7 suivant.

**Tableau 7 : Relations débits liquides et débits solides au droit des stations hydrologiques étudiées**

| Nom de la station hydrologique | Oued      | SBV (km <sup>2</sup> ) | Coefficient de corrélation R <sup>2</sup> | Equation QL=f(Qs)           |
|--------------------------------|-----------|------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|
| Aguibat Zear                   | Bouregreg | 3681                   | 0.91                                      | 3.5031 Qs <sup>1.1475</sup> |
| Ras Fathia                     | Grou      | 3485                   | 0.87                                      | 1.9592 Qs <sup>0.6477</sup> |
| Sidi Mohammed Cherif           | Machraa   | 656                    | 0.75                                      | 0.9799 Qs <sup>0.613</sup>  |
| Ain Loudah                     | Korifla   | 699                    | 0.87                                      | 2.3151 Qs <sup>0.5852</sup> |

Malgré les bonnes corrélations entre les débits liquides et solides, les équations trouvées donnent des écarts importants par rapport à l'observation principalement pour les forts débits. Ceci ne permet pas d'établir des modèles de prévision à partir des relations trouvées entre les différents paramètres.

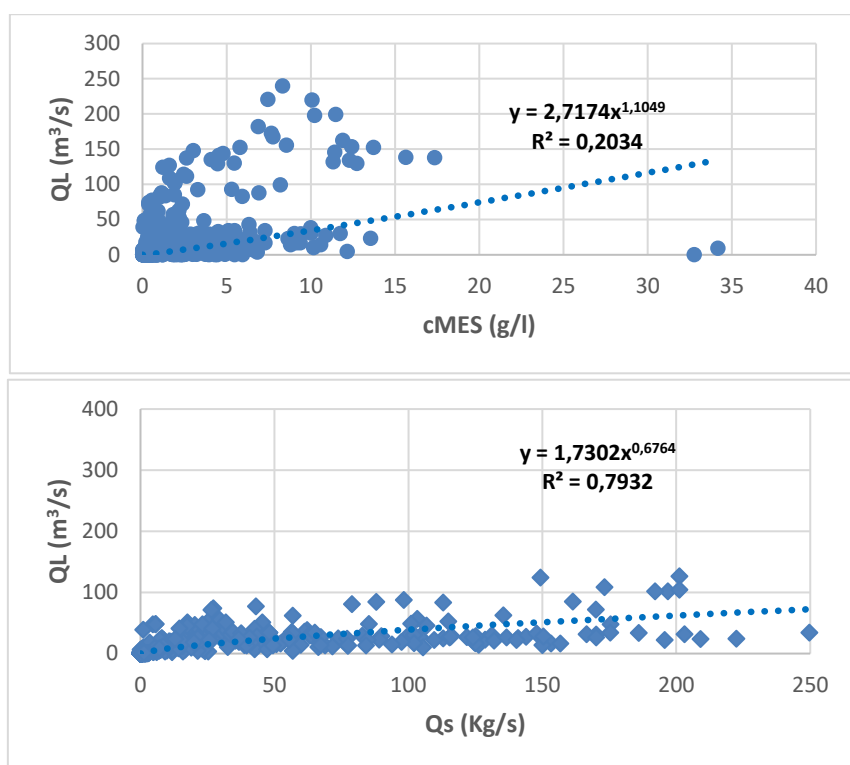
### 3.2.2. Analyse de la cMES, débit liquide et solide en crue et en décrue, et saisonnière

Pour affiner les coefficients de corrélation entre les débits liquides et les concentrations en matière en suspension d'une part, le débit liquide et solide d'autre part, nous allons dans un premier temps, tester les corrélations des mesures au cours des différentes saisons à savoir l'été, l'automne, l'hiver, le printemps et l'été, et au moment des crues et décrues.

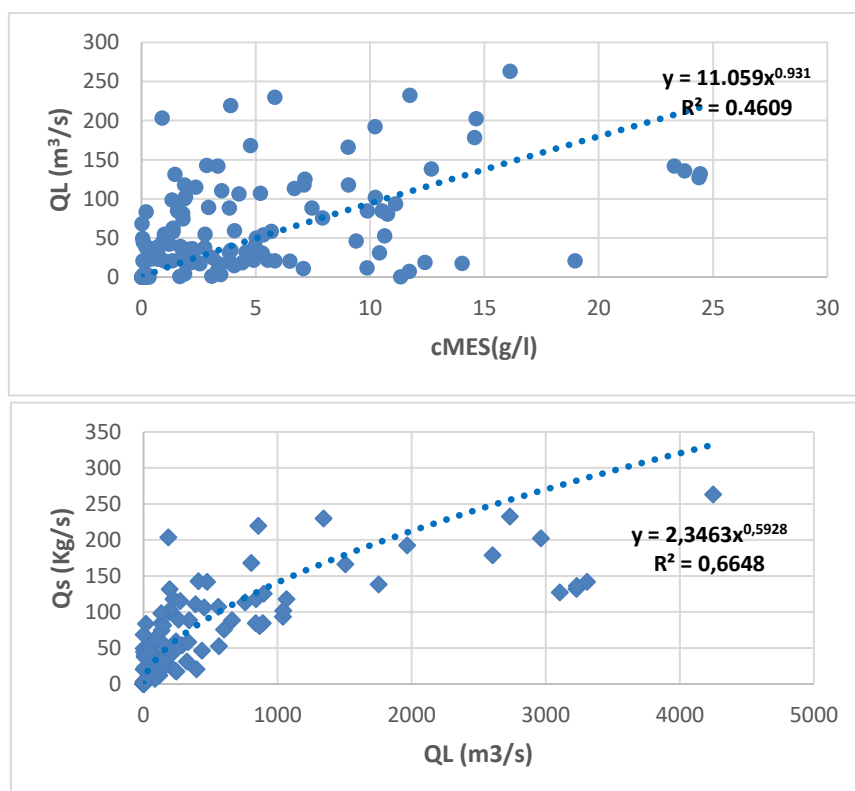
#### *Relation entre la cMES, débit liquide et solide en crue et en décrue*

Les coefficients de corrélation entre les débits liquides et les concentrations en matière en suspension sont légèrement améliorés en décrue variant ainsi entre 0.12 et 0.41 pour la corrélation QL et cMES et entre 0.70 et 0.90 pour la corrélation entre QL et Qs, tandis que les coefficients de corrélation en crue sont relativement faibles en général et varient entre 0.12 et 0.39 pour la corrélation QL et cMES et entre 0.54 et 0.90 pour la corrélation entre QL et Qs. Les figures 24 à 31 montrent les relations au niveau des stations hydrologiques étudiées.

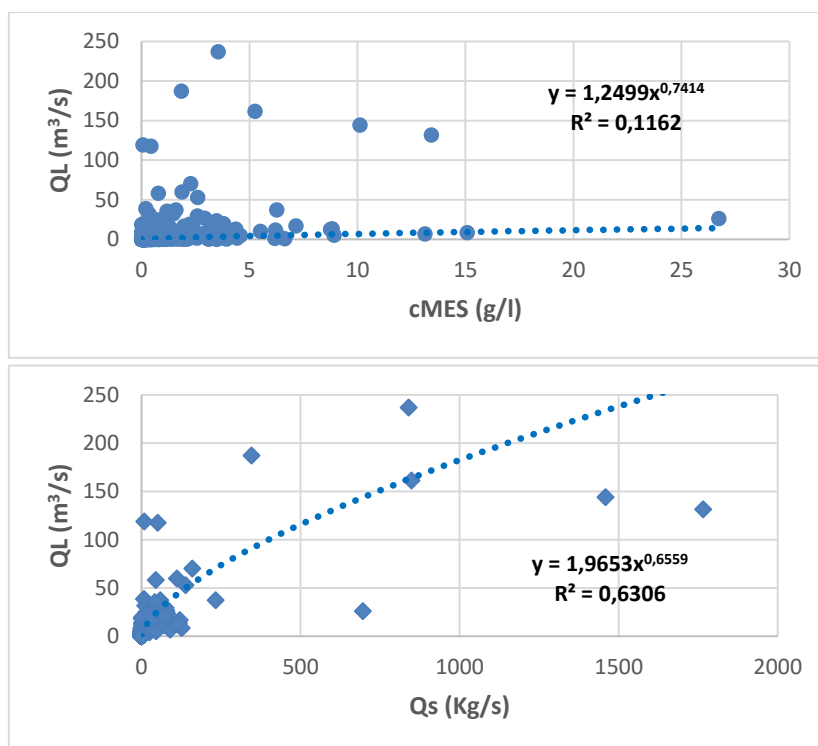




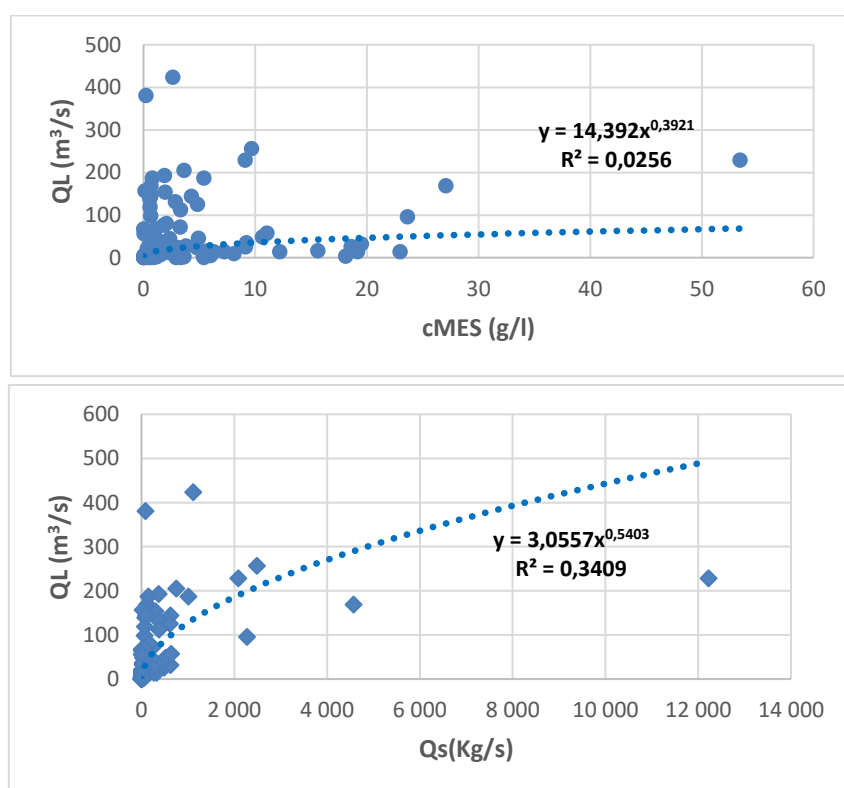
**Figure 24.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en décrues au niveau de station d'Aguibat Zear.



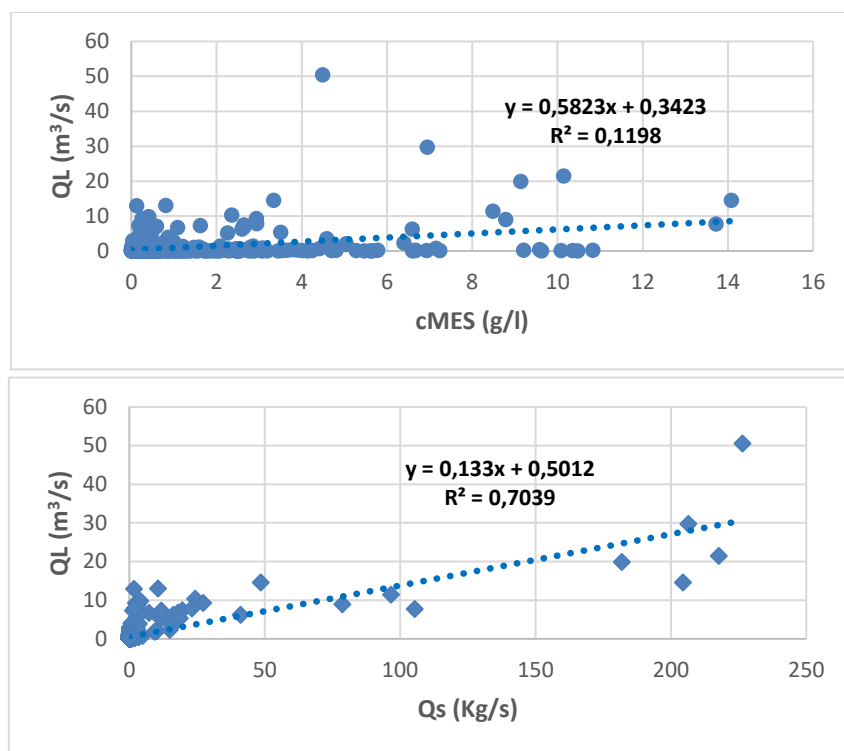
**Figure 25.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en crue au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear.



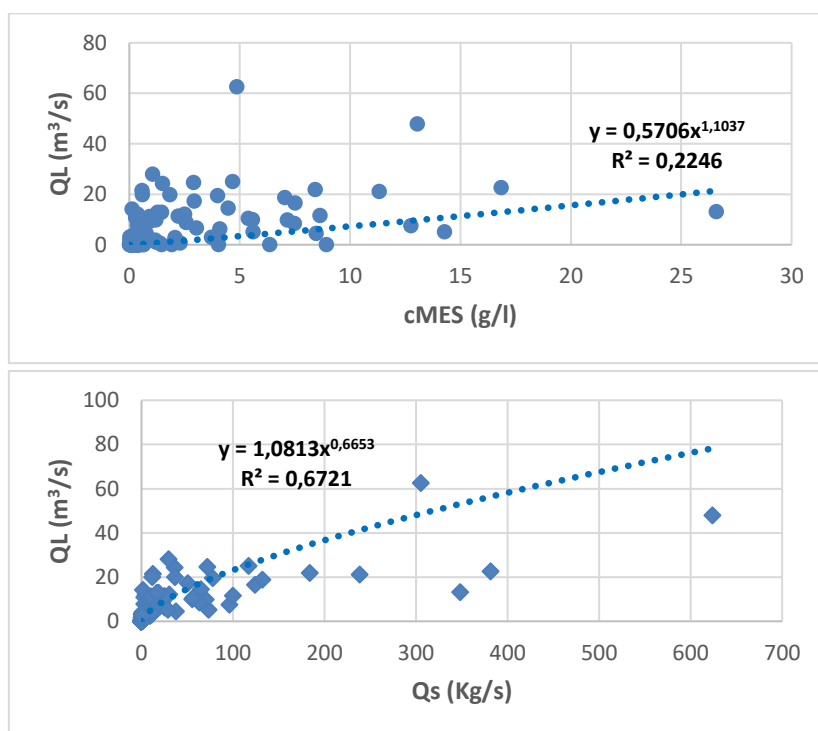
**Figure 26.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en décrue au niveau de la station Ras Fathia



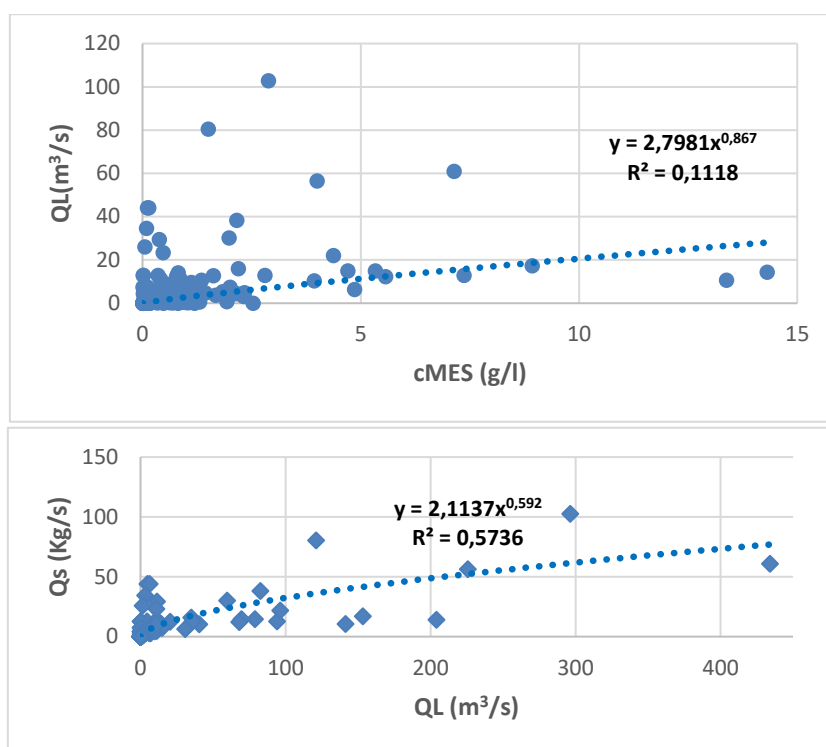
**Figure 27.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en crue au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia.



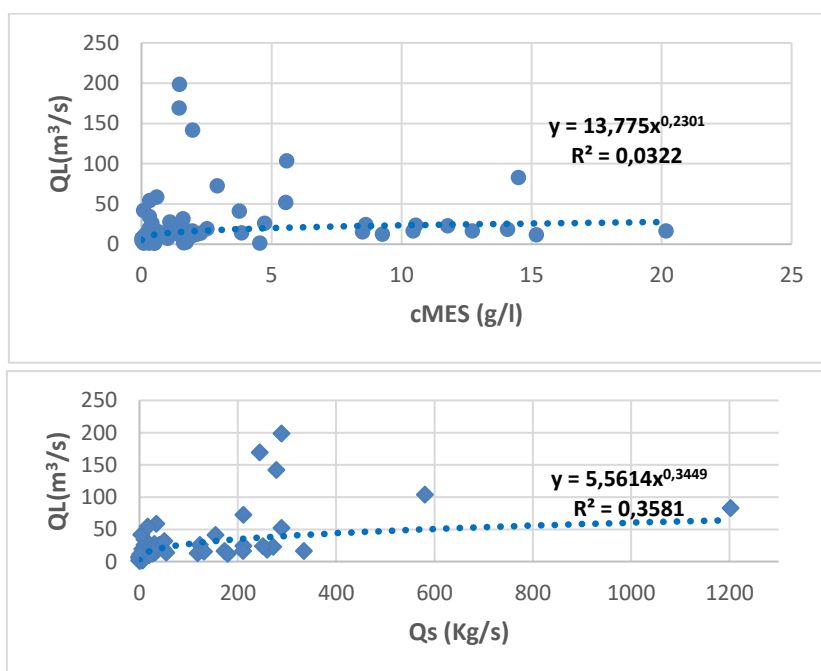
**Figure 28.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en décrue au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif



**Figure 29.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en crue au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif



**Figure 30.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en décrue au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah



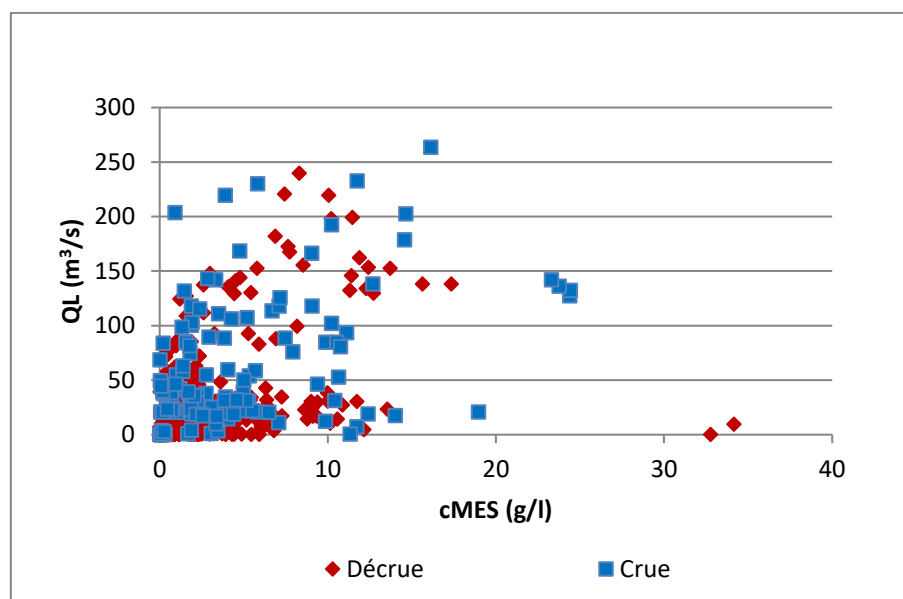
**Figure 31.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en crue au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah.

Au terme de cette analyse, le tableau 8 donne les différents coefficients de corrélation trouvés entre le débit solide et le débit liquide d'une part et le débit liquide et la concentration en matière en suspension, en crue et en décrue.

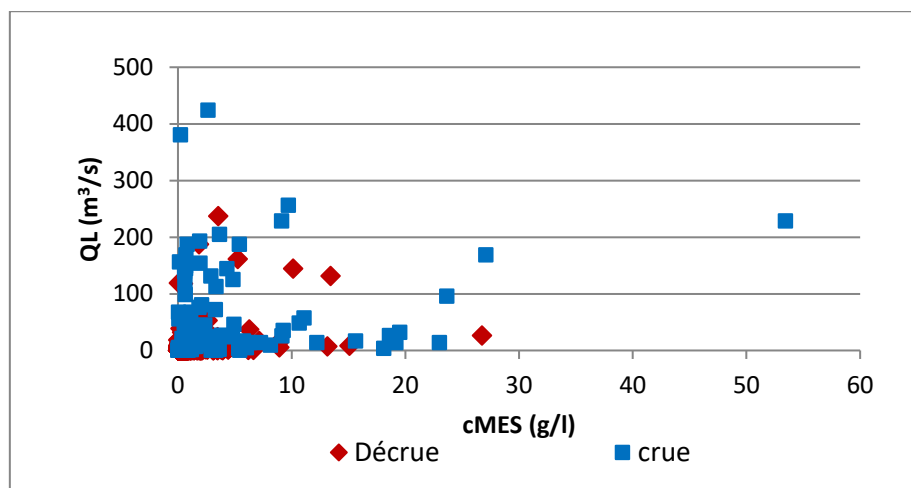
**Tableau 8:** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en crue et en décrue au niveau des 4 stations étudiées

| Nom de la station hydrologique | Oued      | Coefficient de corrélation à la montée en décrue ( $R^2$ ) |          | Coefficient de corrélation en crue ( $R^2$ ) |          |
|--------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------|----------|
|                                |           | QL et cMes                                                 | QL et Qs | QL et cMes                                   | QL et Qs |
| Aguibat Zear                   | Bouregreg | 0,37                                                       | 0,90     | 0,46                                         | 0,89     |
| Ras Fathia                     | Grou      | 0,21                                                       | 0,84     | 0,12                                         | 0,71     |
| Sidi Mohammed Cherif           | Machraa   | 0,12                                                       | 0,70     | 0,39                                         | 0,90     |
| Ain Loudah                     | Korifla   | 0,41                                                       | 0,87     | 0,13                                         | 0,53     |

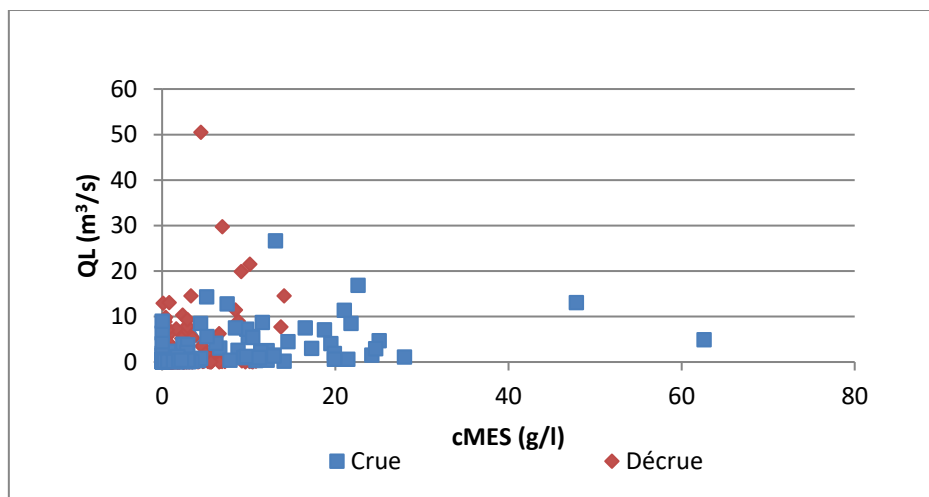
Dans un deuxième temps, nous allons examiner les débits et les concentrations en matière en suspension lors de la montée des crues et ceux de la décrue au niveau des quatre stations hydrologiques étudiées.



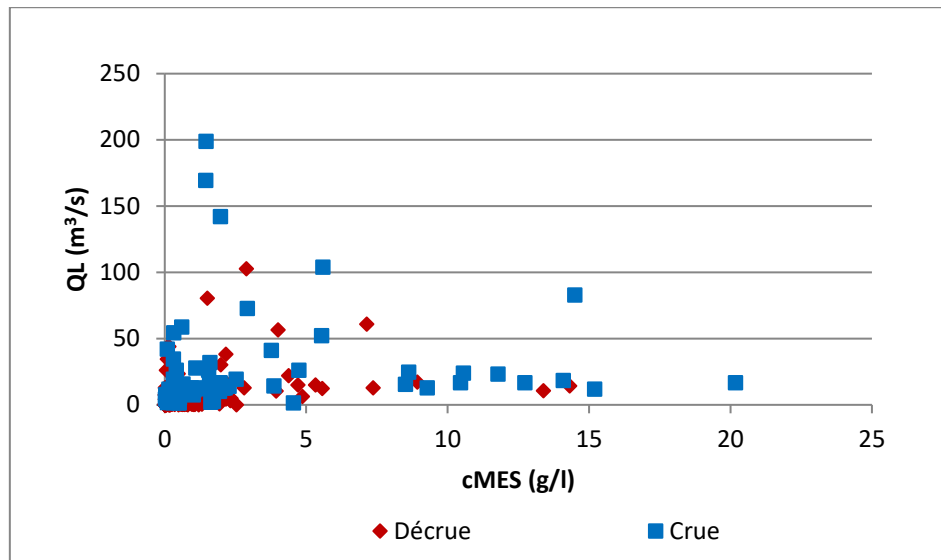
**Figure 32.** Relation entre le débit liquide et la cMES en crue et en décrue au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear



**Figure 33.** Relation entre le débit liquide et la cMES en crue et en décrue au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia



**Figure 34.** Relation entre le débit liquide et cMES en crue et décrue au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif.



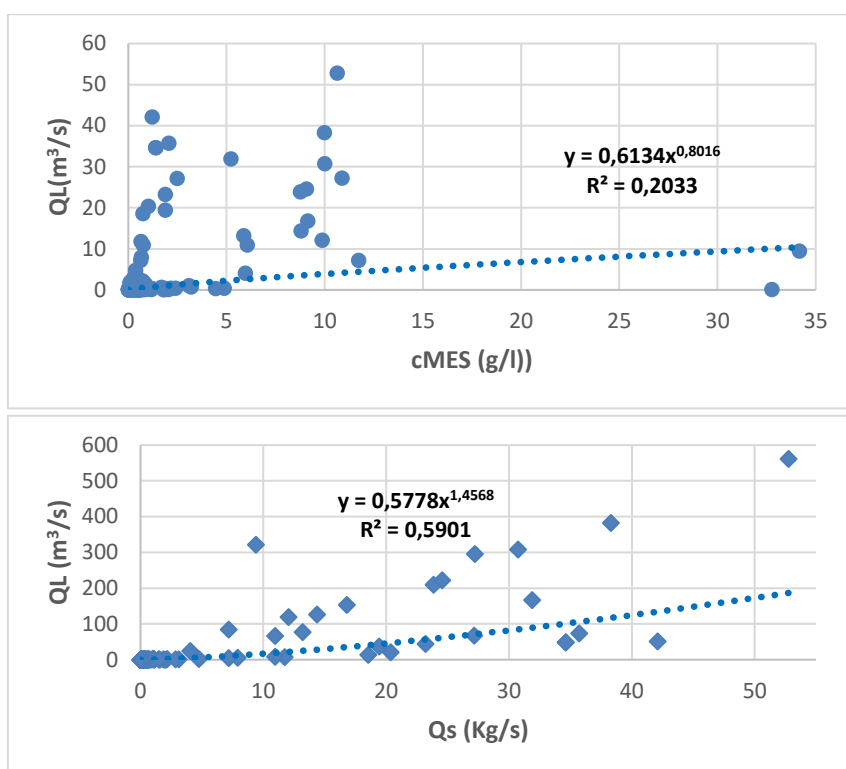
**Figure 35.** Relation entre le débit liquide et la cMES en crue et en décrue au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah

Les figures 32 à 35 montrent que d'une manière générale les concentrations en crue sont plus importantes que les concentrations en décrue. La matière en suspension est plus diluée après le passage du pic de la crue et le lessivage des bassins se fait en crue.

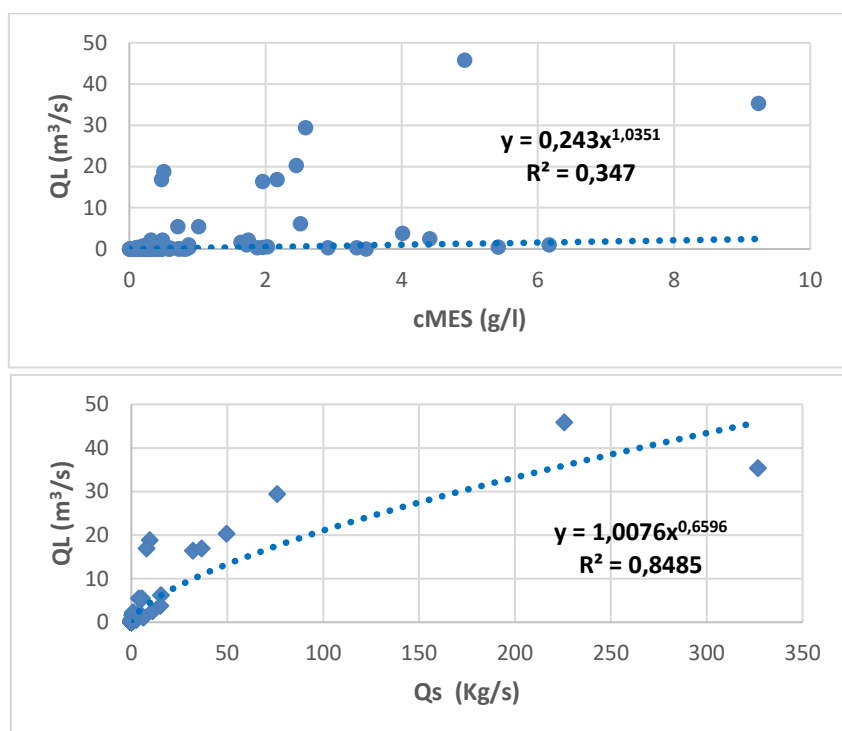
#### *Relation entre la cMES, débit liquide et solide par saison*

##### **A. Saison de l'été**

Les coefficients de corrélation entre les débits liquides et les concentrations en matière en suspension sont légèrement améliorés pendant l'été au niveau de la majorité des stations variant ainsi entre 0.063 et 0.69 pour la corrélation QL et cMES et entre 0.85 et 0.97 pour la corrélation entre QL et Qs (figures 36 à 38).

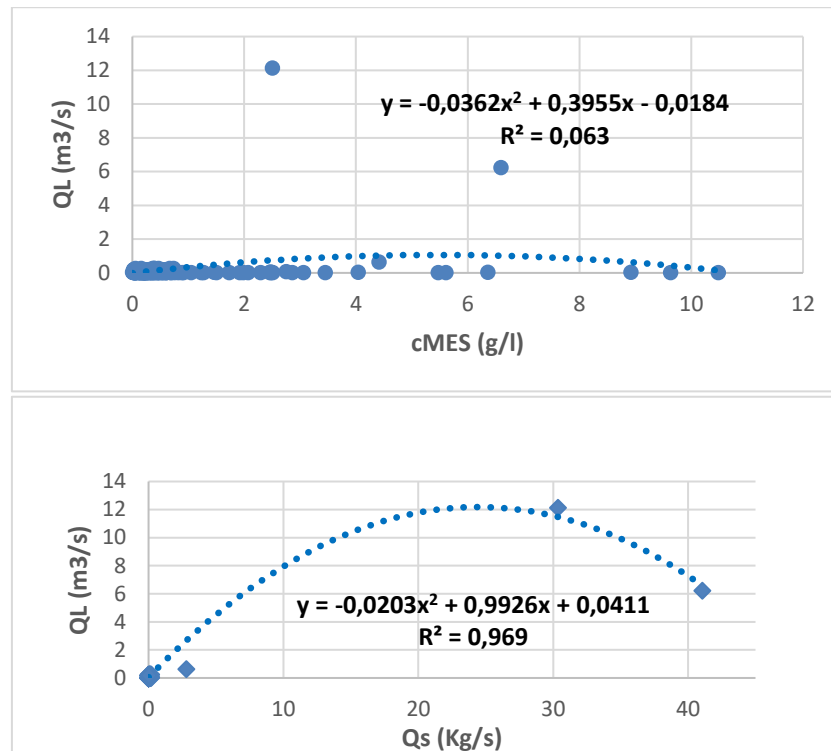


**Figure 36.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en été au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear



**Figure 37.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et cMES en été au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia

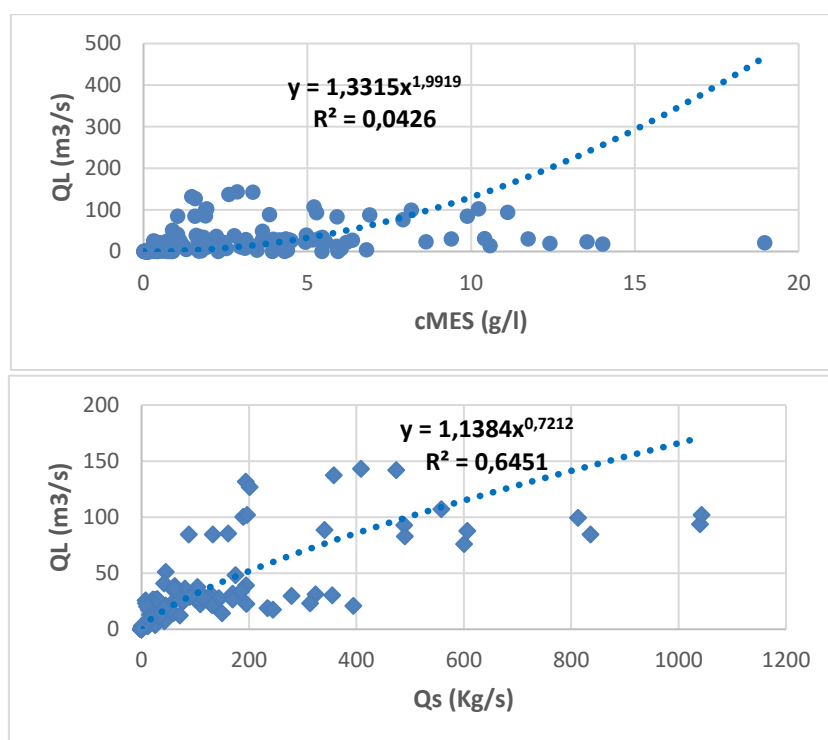




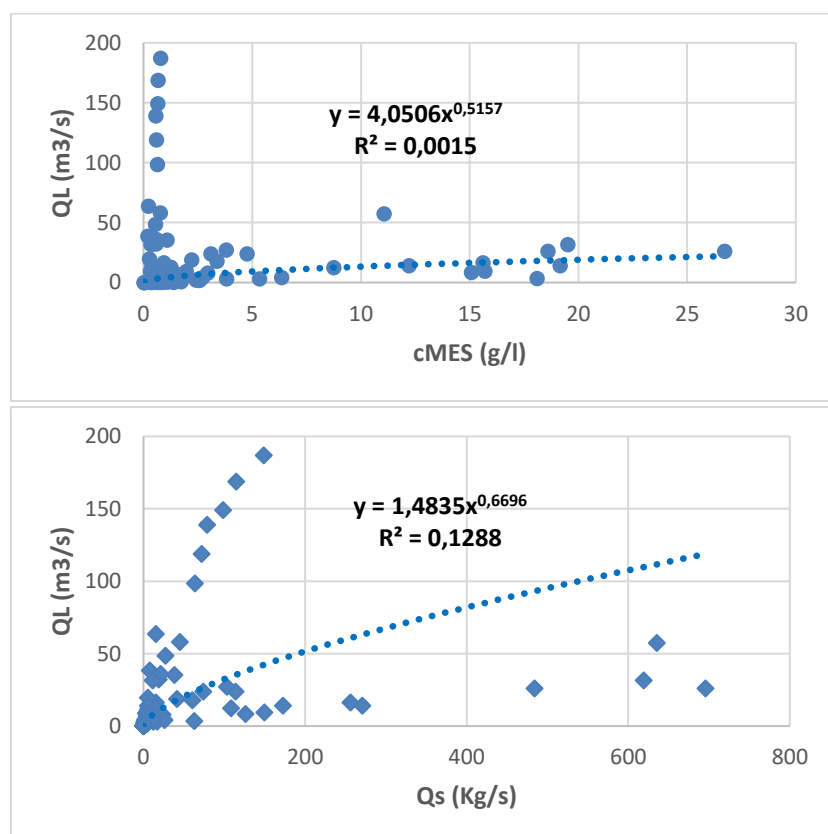
**Figure 38.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en été au niveau de la station de Sidi Mohammed Cherif

### B. Saison de l'automne

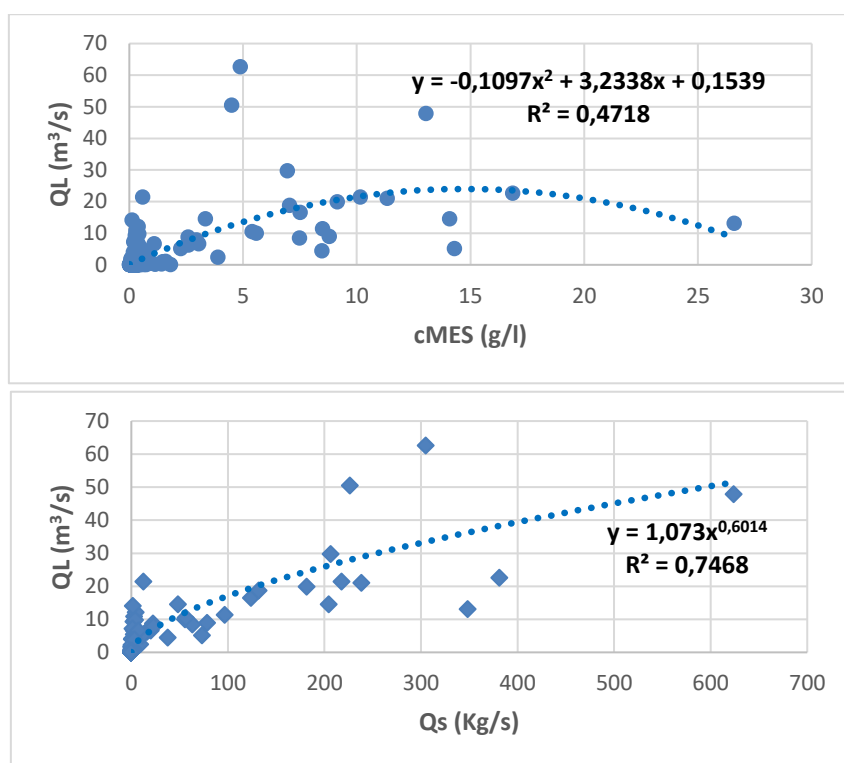
Les coefficients de corrélation entre les débits liquides et les concentrations en matière en suspension de l'automne sont légèrement inférieurs à l'été au niveau de la majorité des stations variant ainsi entre 0.10 et 0.69 pour la corrélation QL et cMES et entre 0.7 et 0.97 pour la corrélation entre QL et Qs (figures 39 à 41).



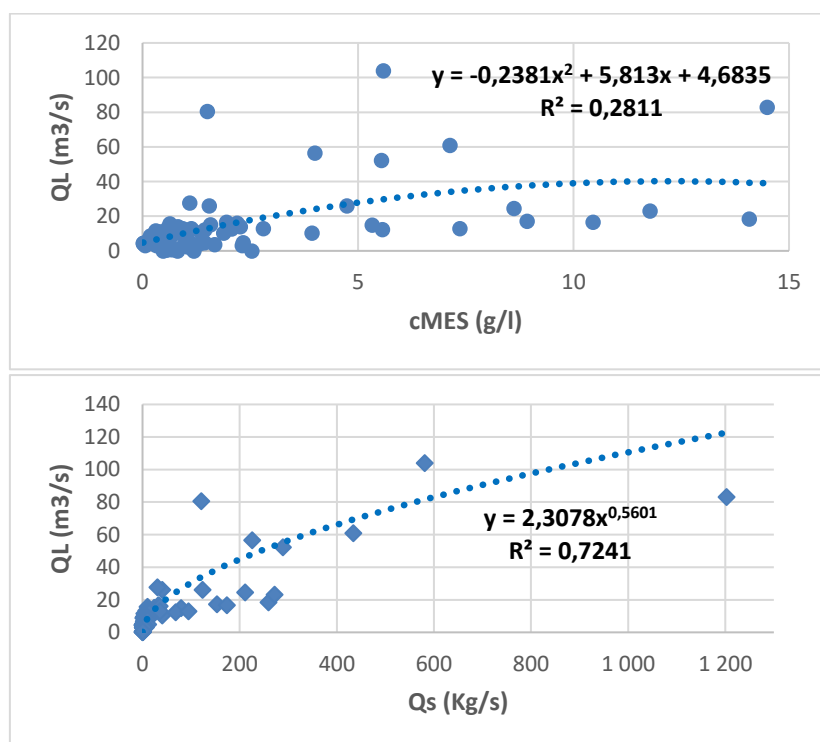
**Figure 39.** Relation entre le débit liquide, débit solide et la cMES en automne au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear



**Figure 40.** Relation entre le débit liquide, débit solide et la cMES en automne au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia



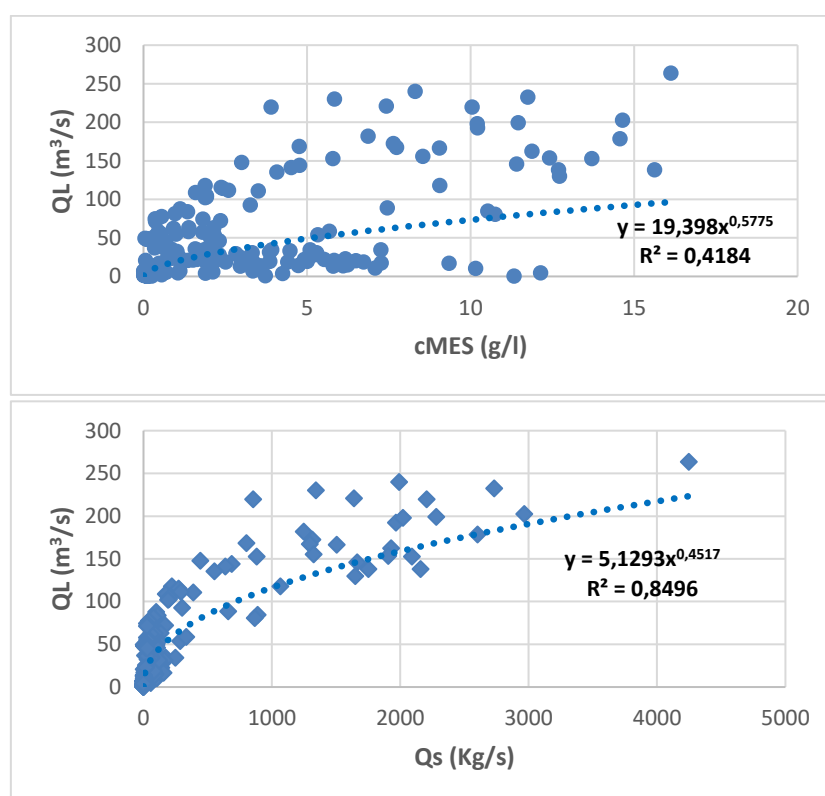
**Figure 41.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en automne au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif



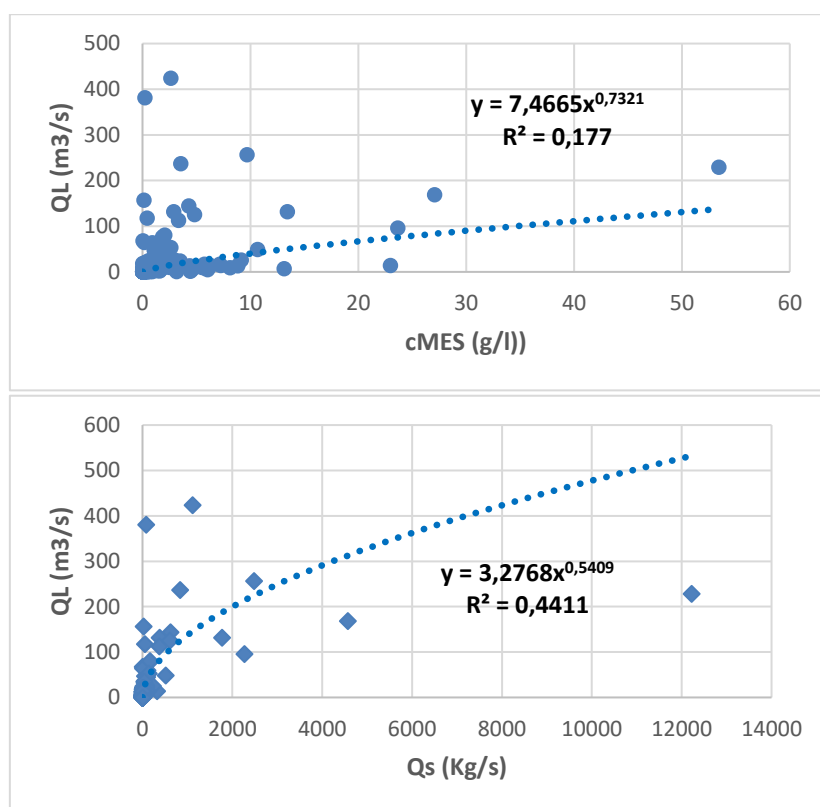
**Figure 42.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en automne au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah

### C. Saison d'hiver

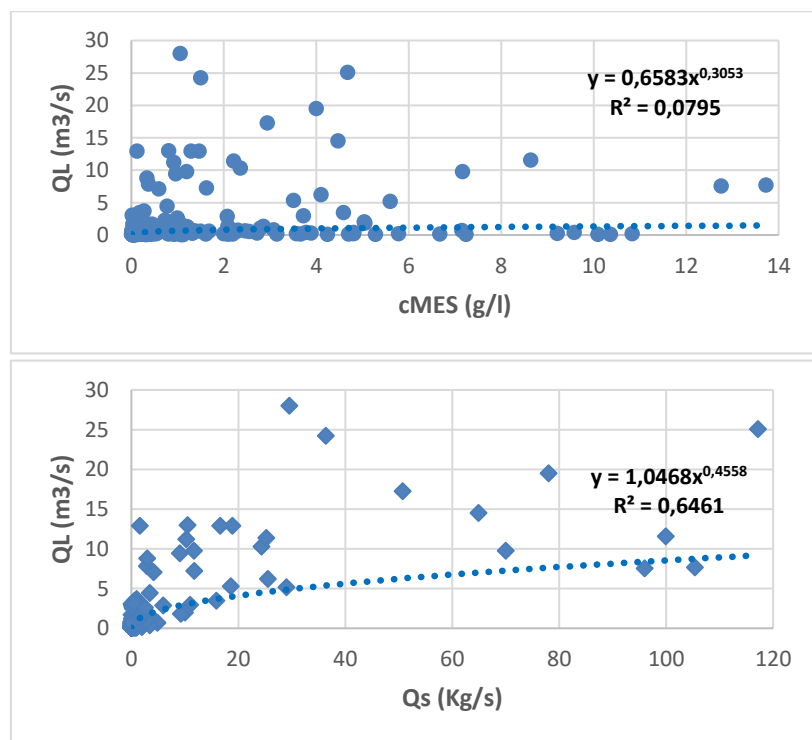
Les coefficients de corrélation entre les débits liquides et les concentrations en matière en suspension de l'hiver sont légèrement inférieurs aux saisons précédentes au niveau de la majorité des stations variant ainsi entre 0.11 et 0.46 pour la corrélation QL et cMES et entre 0.63 et 0.84 pour la corrélation entre QL et Qs (figures 43 à 46).



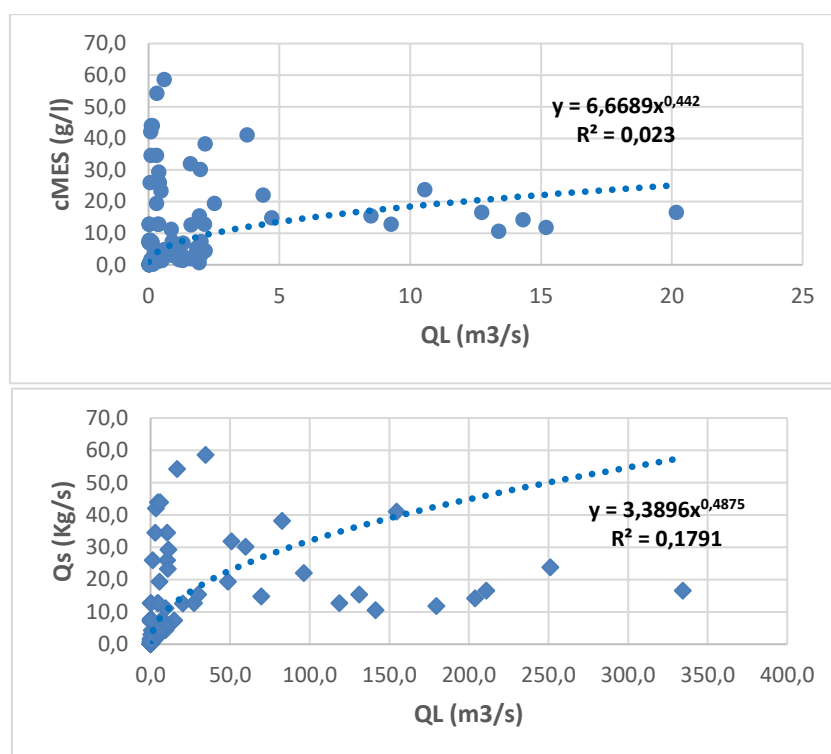
**Figure 43.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en hiver au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear



**Figure 44.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en hiver au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia.



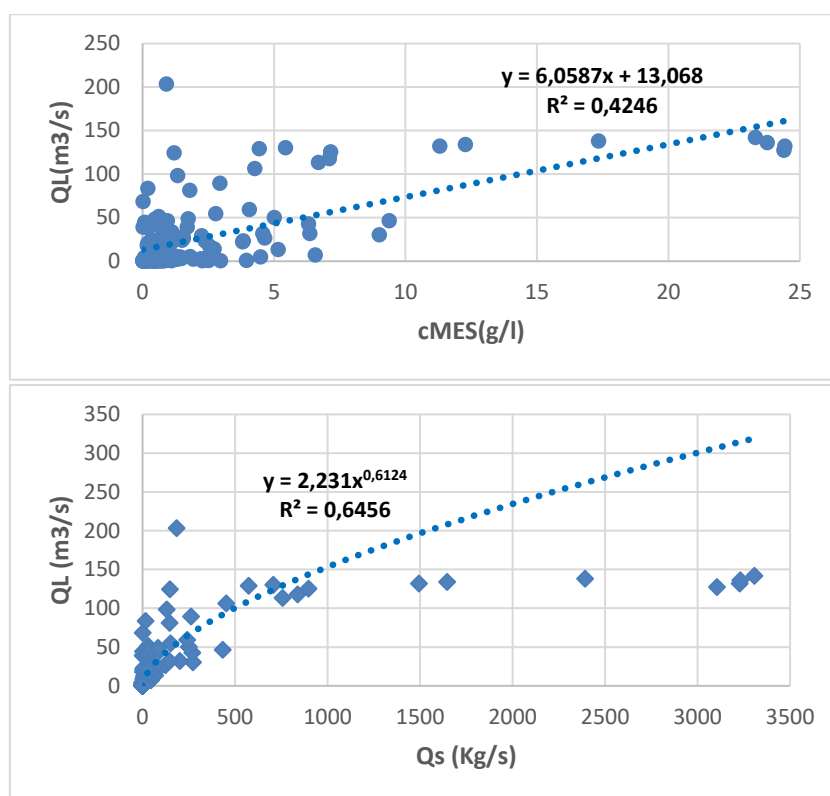
**Figure 45.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES en hiver au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif.



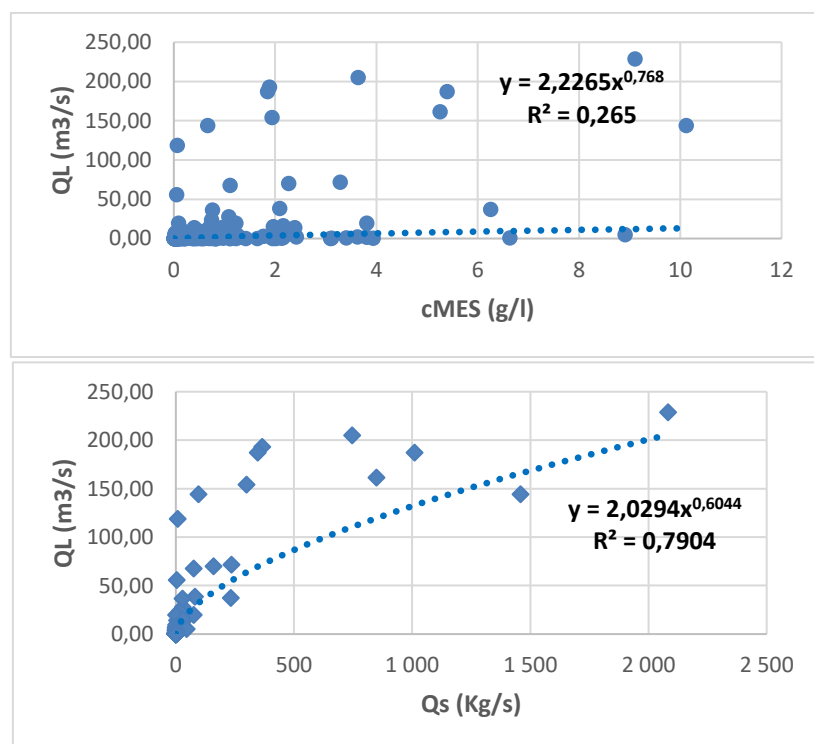
**Figure 46.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES au niveau de la station hydrologique d'AinLoudah.

#### D. Saison de printemps

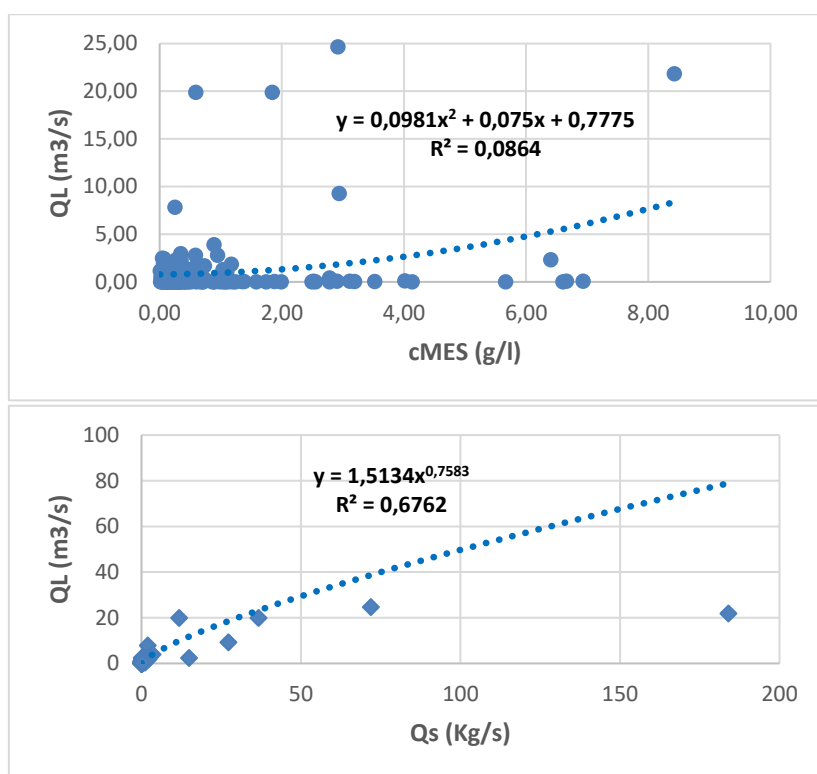
Les coefficients de corrélation entre les débits liquides et les concentrations en matière en suspension du printemps sont comparables aux saisons précédentes au niveau de la majorité des stations variant ainsi entre 0.08 et 0.67 pour la corrélation QL et cMES et légèrement inférieurs comparés aux autres saisons entre 0.72 et 0.94 pour la corrélation entre QL et Qs (figures 47 à 50).



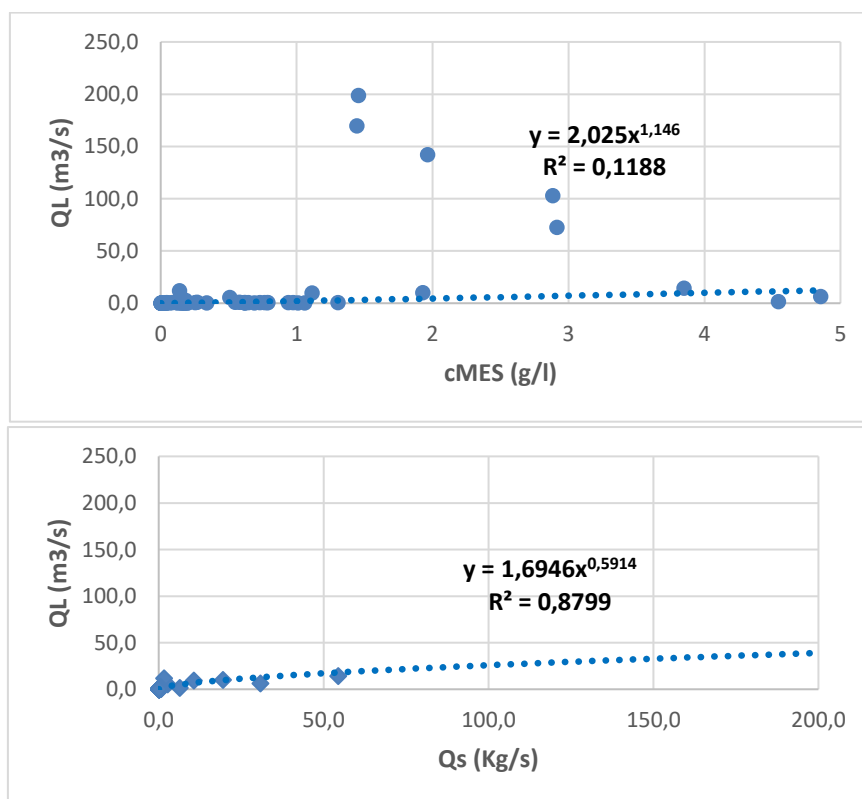
**Figure 47.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES au printemps au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear



**Figure 48.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES au printemps au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia.



**Figure 49.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES au printemps au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif



**Figure 50.** Relation entre le débit liquide, le débit solide et la cMES au printemps au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah.

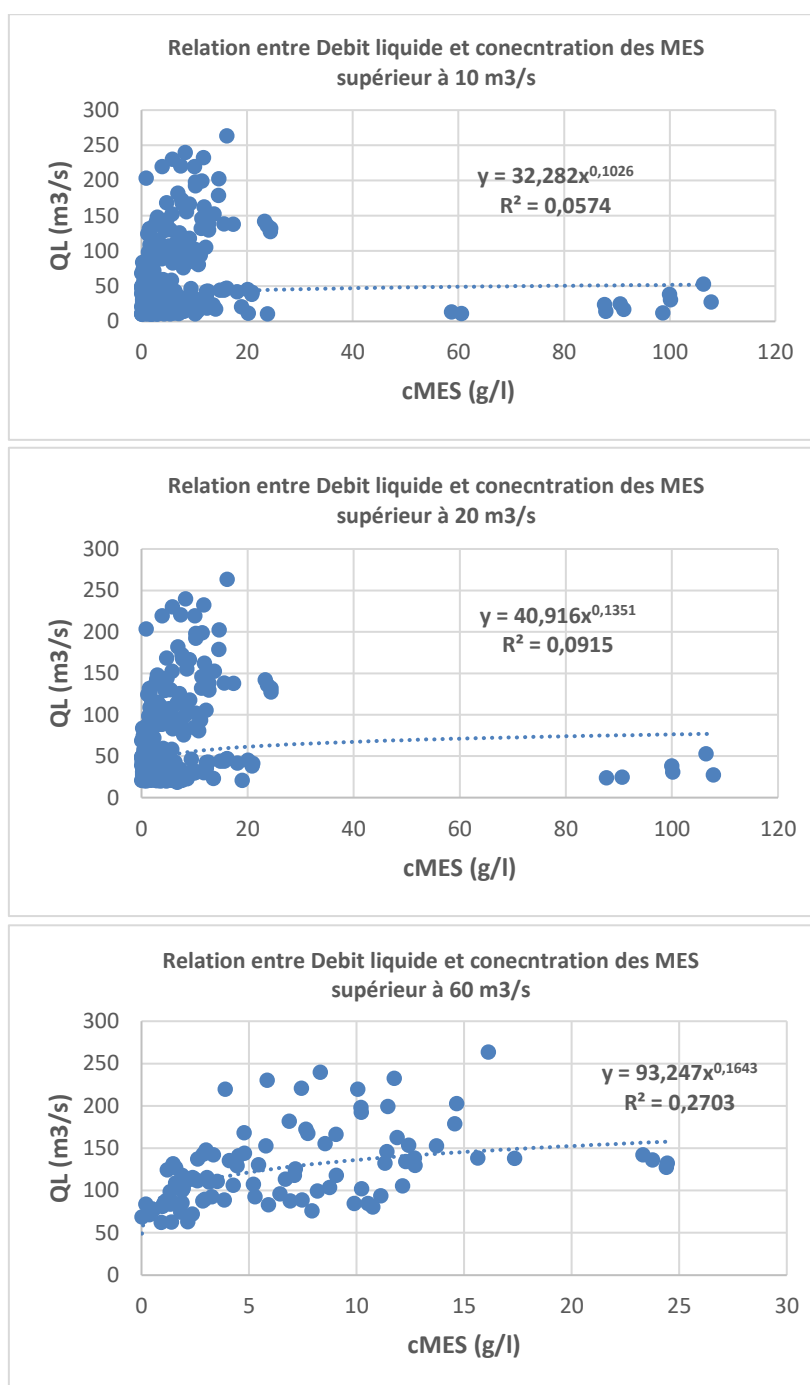


D'une manière générale, les corrélations entre les débits liquides et les cMES d'une part et les débits liquides et les débits solides présentent des coefficients de corrélations comparables lors des différentes saisons. Toutefois, les corrélations de l'été et de l'automne sont légèrement plus importantes que ceux de l'hiver et du printemps. Ceci peut être expliqué par le nombre important de valeurs enregistrées des concentrations de la matière en suspension et des débits liquides ainsi que leur variabilité au cours de la saison pluvieuse. Les saisons sèches enregistrent des concentrations et des débits plus faibles qui présentent moins de variabilité.

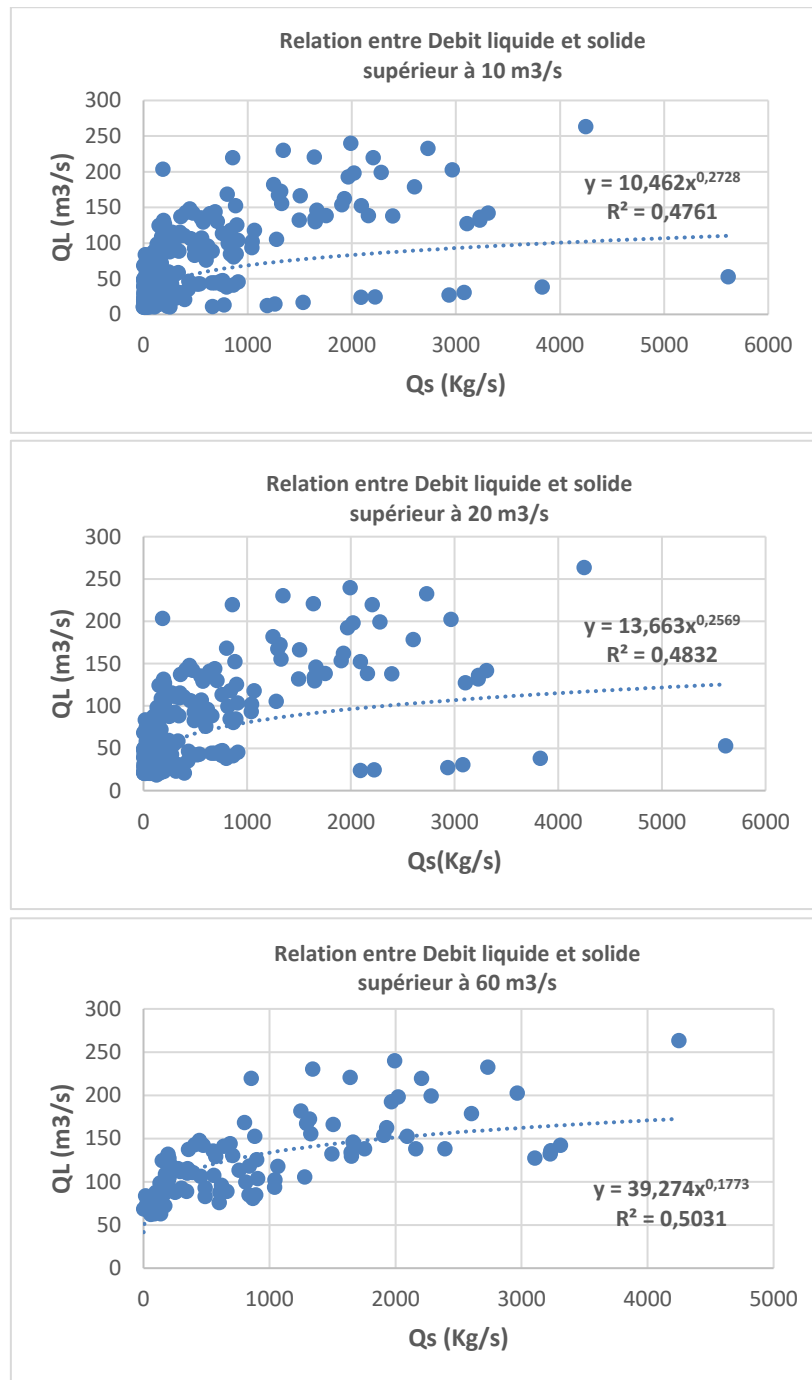
***Relation entre la cMES, débit liquide et solide en adoptant un seuil de débit***

L'analyse des relations entre la concentration de la matière en suspension, le débit liquide et le débit solide sera réalisée sur les deux des stations hydrologiques d'AguibatZear sur l'oued Bouregreg et de Ras Fathia sur l'oued Grou. Ces deux stations contrôlent plus de 80% du bassin du Bouregreg.

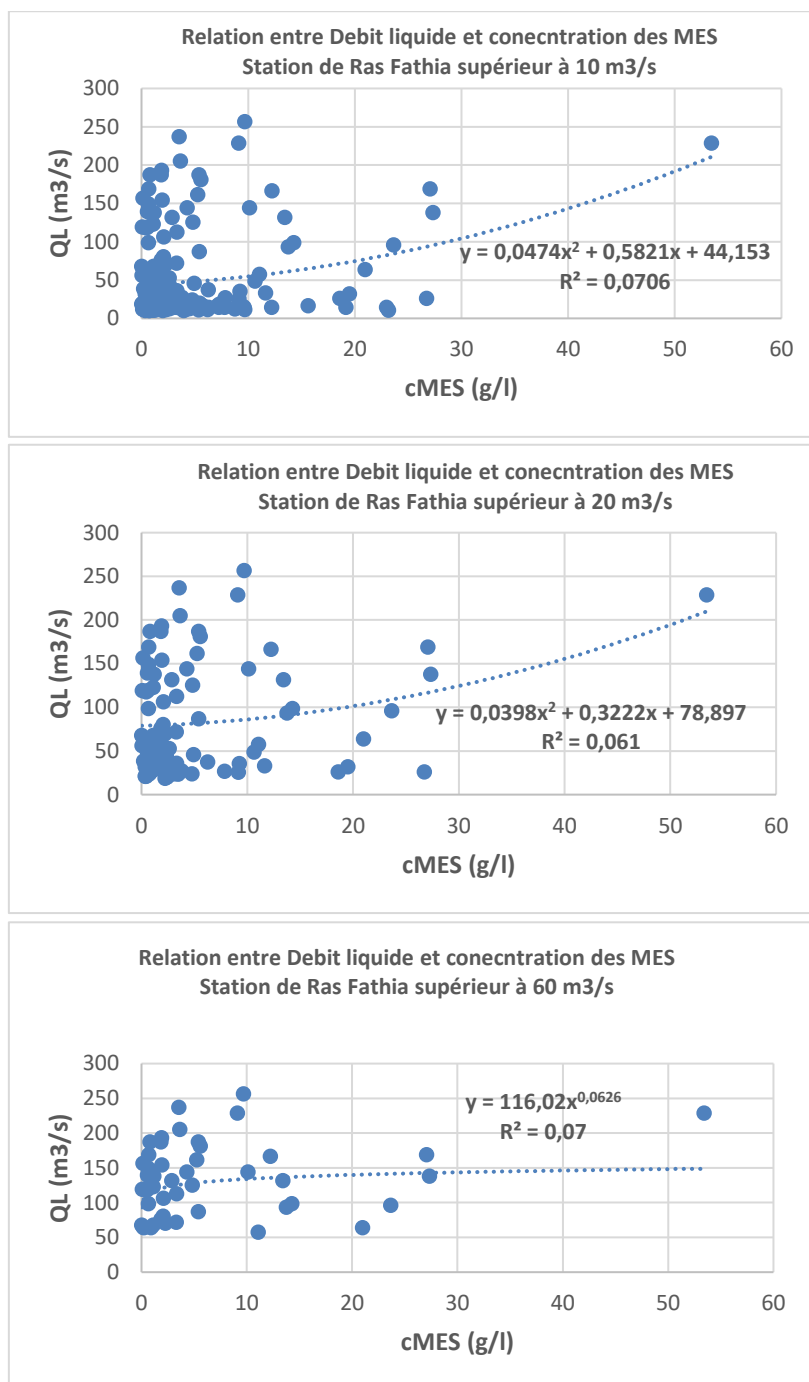
Les figures 51 à 54 suivantes montrent les relations entre les différents paramètres.



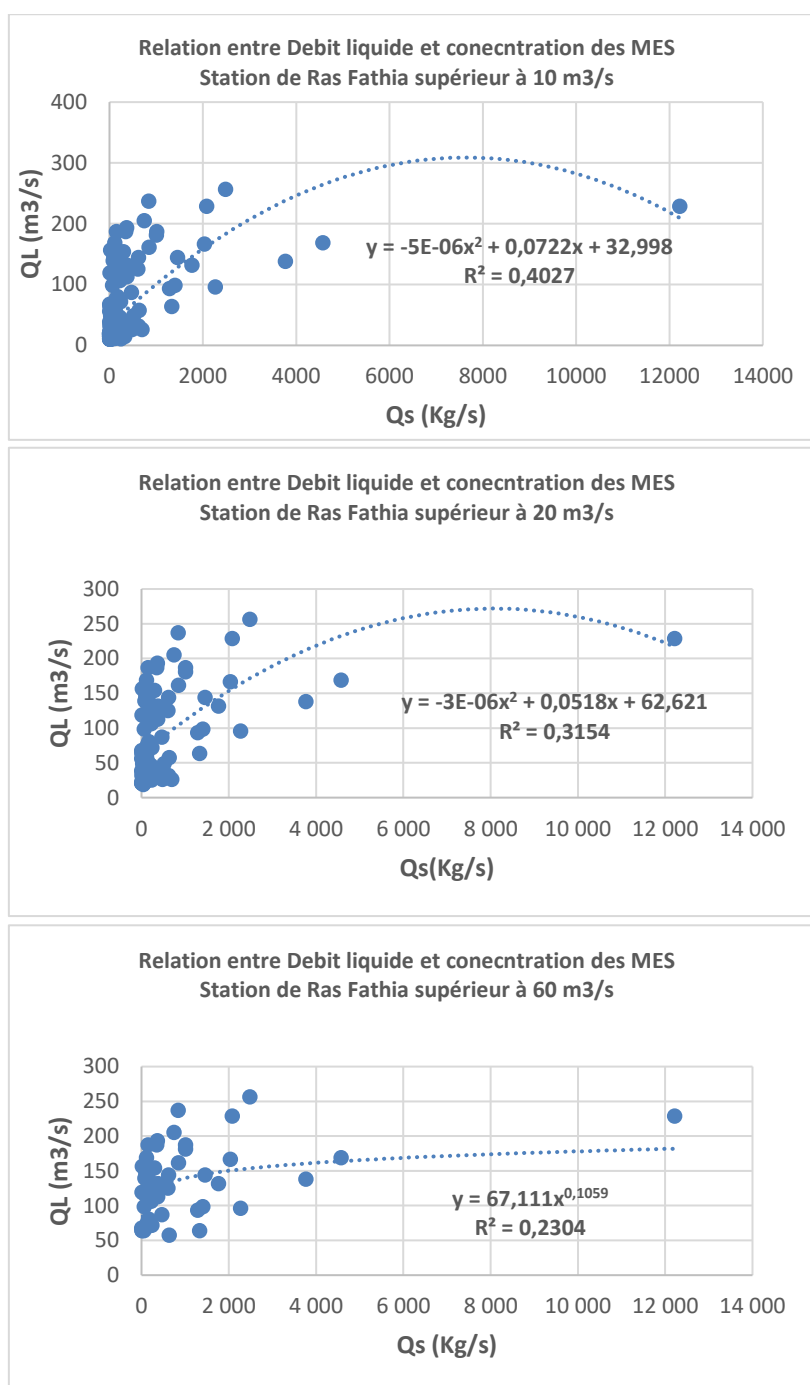
**Figure 51.** Relation entre le débit liquide et la cMES à Aguibat Zear sur l'oued Bouregreg.



**Figure 52.** Relation entre le débit liquide et le débit solide à Aguibat Zear sur l'oued Bouregreg



**Figure 53.** Relation entre le débit liquide et la cMES à Ras Fathia sur l'oued Grou



**Figure 54.**Relation entre le débit liquide et le débit solide à Ras Fathia sur l'oued Grou

Ainsi, l'adoption de seuil de débit liquide n'améliore pas les coefficients de corrélation entre les débits liquides et les concentrations en matière en suspension et les débits liquide et les débits solides. En effet, les coefficients ont enregistré des taux plus faibles. Ils ont varié entre 0,2 et 0,5 pour la corrélation entre débit liquide et débit solide d'une part et entre 0,03 et 0,3 pour la relation entre le débit liquide et la concentration en matière en suspension d'autre part.

La relation entre l'écoulement et le débit solide dépend en effet de plusieurs paramètres. Ainsi, la modélisation par régression simple à différentes échelles temporelles du transport solide par des relations reliant le débit solide ( $Q_s$ ) au débit liquide ( $Q_L$ ) vise la détermination des quantités des matières solides transportées par les cours d'eaux à partir des données mesurées en continu à savoir le débit liquide, et ce pour prévoir le taux de l'envasement du barrage SMBA. Les courbes de transport sédimentaire qui s'ajustent les mieux restent largement, les régressions de type puissance ( $Q_s = aQ_L^b$ ) (Campbell et Bauder, 1940 ; Crawford, 1991).

### 3.3. Erreur de calcul dans les flux des transports solides entrant au barrage SMBA

L'incertitude liée aux valeurs de concentrations en MES peut provenir de quatre sources principales :

- la méthode de mesure :

L'incertitude provenant de la méthode de mesure prendra deux valeurs différentes, en fonction de la méthode utilisée : prélèvement (automatique ou manuel) ou utilisation d'un turbidimètre. Gautheron (1994) a réalisé des tests de répétabilité pour estimer l'incertitude liée au cycle filtration-séchage-pesée. Sur la base de cette étude, et au regard des concentrations en MES mesurées, l'incertitude des prélèvements est considérée de l'ordre de 5%.

- l'hétérogénéité spatiale de la concentration dans la section en travers de la rivière (deux composantes horizontale et verticale) :

Pour estimer l'incertitude liée à l'hétérogénéité horizontale dans une section en travers, des mesures de surface le long d'une section en travers ont été réalisées par (Mano, 2008). La valeur de l'erreur issue de ces mesures est de l'ordre de 5%. Dans cette étude aucune mesure de prélèvement sur la verticale n'a été faite du fait des fortes vitesses de l'écoulement. Néanmoins, des mesures de vitesses des MES réalisées en 2011 (Antoine et al., 2012), couplées à des valeurs de vitesses de frottement de fond calculées par le modèle hydraulique nous permettent d'avoir une estimation du nombre de Schmidt-Rouse. Ce dernier donne la possibilité d'estimer un profil vertical théorique, et donc un écart type relatif à la valeur moyenne le long de ce profil vertical. Une valeur représentative calculée

par cette méthode sur l'ensemble des sites de mesure est de l'ordre de 3%. Lahlou (1971) avance un chiffre de 10% d'erreur pour le mode prélèvement ce qui conforte les résultats de (Antoine et al., 2012).

- l'interpolation temporelle.

Enfin, l'erreur liée à l'interpolation temporelle générales erreurs d'estimation les plus important. En effet, l'échantillonnage calculé par (Antoine, 2015) donne des erreurs qui varient de 0.004% à 24% en fonction de la fréquence d'échantillonnage.

Toute ces résultats sont interdépendants et peuvent agir en sens inverse (Lahlou, 1971). En effet, la variance de la valeur de concentration en MES peut donc s'exprimer comme la somme des quatre variances liées à ces sources d'incertitudes. Ainsi, Antoine (2015) a estimé la valeur moyenne des incertitudes du flux des MES à 12% ce qui n'est pas loin de la valeur adoptée par notre étude qui est de 10%.

### 3.4. Calcul du flux des transports solides entrant au barrage SMBA

Les débits et les concentrations en matière en suspension maximum enregistrées durant les années hydrologiques 2016/2017 et 2017/2018 au niveau des quatre stations hydrologiques situées à l'amont immédiat du barrage SMBA sont résumés dans le tableau 9 suivant.

**Tableau 9** : Débits max et cMESmax enregistrés au niveau des 4 stations hydrologiques étudiées

| Station hydrologique | Oued      | cMESmax<br>(g/l) | Date<br>cMESmax   | Qmax<br>(m³/s) | Date<br>Qmax      |
|----------------------|-----------|------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| Aguibat Zear         | Bouregreg | 34.2             | 30/08/2017 02 :00 | 265.9          | 07/03/2018 14 :00 |
| Ras Fathia           | Grou      | 53.4             | 24/02/2017 22 :00 | 423.8          | 07/03/2018 09 :00 |
| Ain Loudah           | Korifla   | 20.2             | 19/02/2017 18 :00 | 103.9          | 11/12/2017 18 :00 |
| S. Mohammed Cherif   | Machraa   | 26.6             | 30/11/2017 04 :00 | 62.6           | 13/10/2016 07 :00 |

Nous calculons le flux des matières en suspension en poids et en volume aux droits des stations hydrologiques étudiées. Pour ce faire, nous extrapolons d'abord linéairement les concentrations en matières en suspension sur l'ensemble des séries des débits instantanées observés, puis nous calculons les volumes liquides et solides enregistrées durant les deux années hydrologiques étudiées à l'aide de la formule suivante :

$$V_{Total} = \sum_{i=1}^n (Q_t + Q_{t+1}) * \frac{\Delta t}{2}$$

avec,

Qt : débit solide ou liquide à l'instant t

$\Delta t$  : variation de temps en seconde

Le transport de fond de la section sera pris égal à 10% des transports totaux de la matière en suspension (Lahlou, 1971). Cette valeur est empirique mais largement utilisée. Enfin, la densité du sol, de l'ordre de  $1.5 \text{ tonne/m}^3$ , est utilisée (Lahlou, 1982) pour calculer les volumes de matière en suspension entrant au barrage durant la période d'observation. Le tableau 10 présente le calcul des flux de transports solides durant les deux années hydrologiques étudiées.

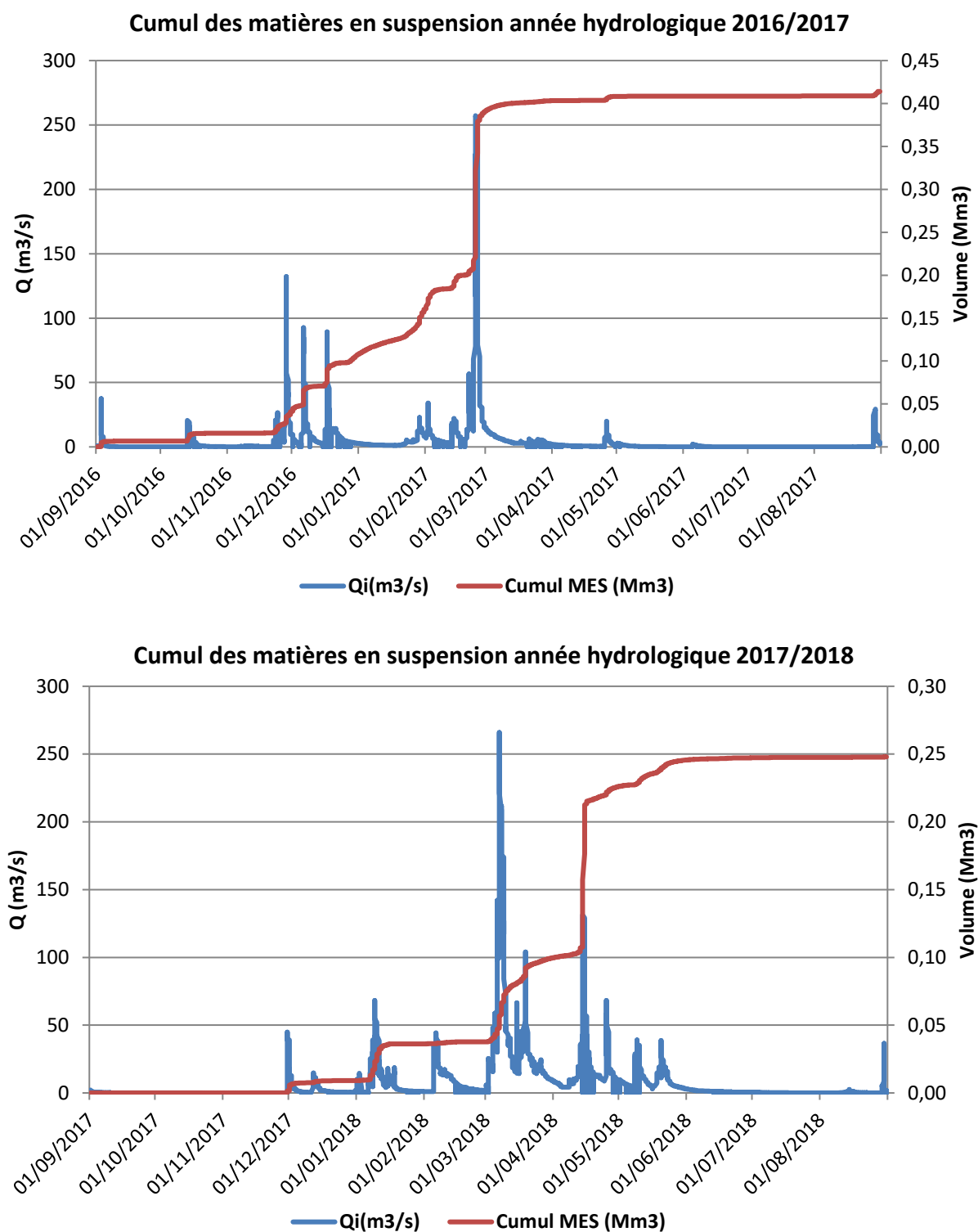
**Tableau 10** : Flux du transport solide en tonne et  $\text{m}^3$  au droit des 4 stations hydrologiques étudiées

| Station hydrologique | Oued      | Flux<br>(tonne)  |                  | Flux<br>( $\text{m}^3$ ) |                |
|----------------------|-----------|------------------|------------------|--------------------------|----------------|
|                      |           | 2016/2017        | 2017/2018        | 2016/2017                | 2017/2018      |
| Aguibat Zear         | Bouregreg | 742 334          | 439 735          | 494 889                  | 293 157        |
| Ras Fathia           | Grou      | 673 551          | 740 083          | 449 034                  | 493 389        |
| Ain Loudah           | Korifla   | 288 155          | 48 422           | 18 770                   | 32 281         |
| S. Mohammed Cherif   | Machraa   | 68 759           | 92 324           | 45 839                   | 61 549         |
| <b>Total</b>         |           | <b>1 512 799</b> | <b>1 320 564</b> | <b>1 008 533</b>         | <b>880 376</b> |

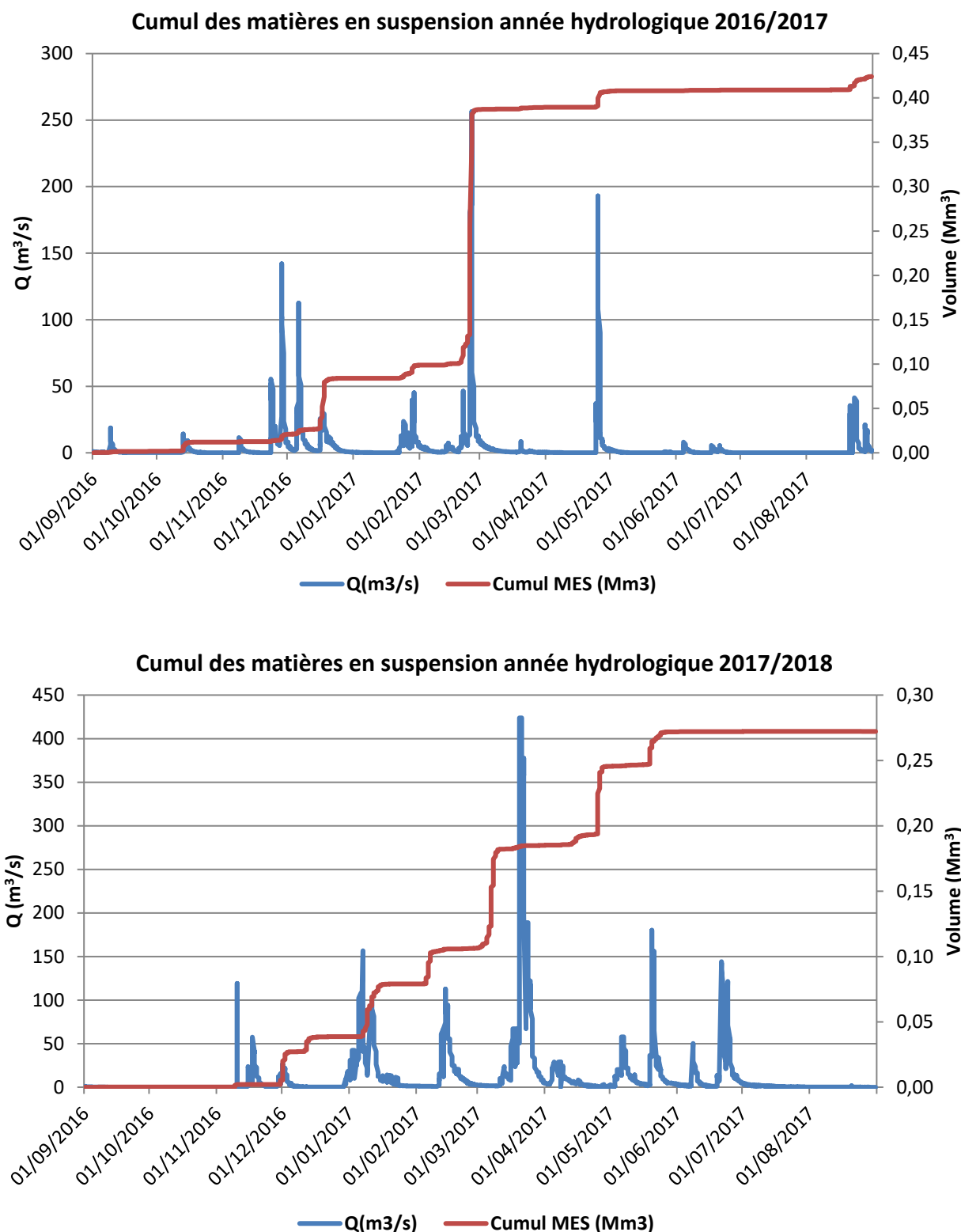
Le calcul du flux de transport solide aux droit des stations hydrologiques étudiées a montré que l'année sèche 2016/2017 a généré un total de  $1,01 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  supérieur à  $0,88 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  généré lors de l'année humide 2017/2018. Ce résultat peut être expliqué par la faiblesse du couvert végétal lors de l'année sèche conjugué à l'intensification des pratiques agro-sylvo-pastorales (Mahé et al., 2012a). Il peut aussi être en partie dû à l'incertitude sur les mesures, compte-tenu de la faible différence entre les deux valeurs. Cette incertitude pourrait être liée par exemple à un défaut d'échantillonnage pendant une crue, ou à une mauvaise représentativité de certains échantillons par rapport à la concentration moyenne, entre autres. Cependant, il est assez difficile de donner une valeur moyenne à l'incertitude qui pourrait être associée au protocole de mesures. Si l'on considère une valeur de 10% comme erreur possible, on voit que cela réduit la différence entre les valeurs des deux années à très peu de choses.

Les figures 55 à 58 suivantes montrent le cumul des transports solides au niveau des stations hydrologiques étudiées.

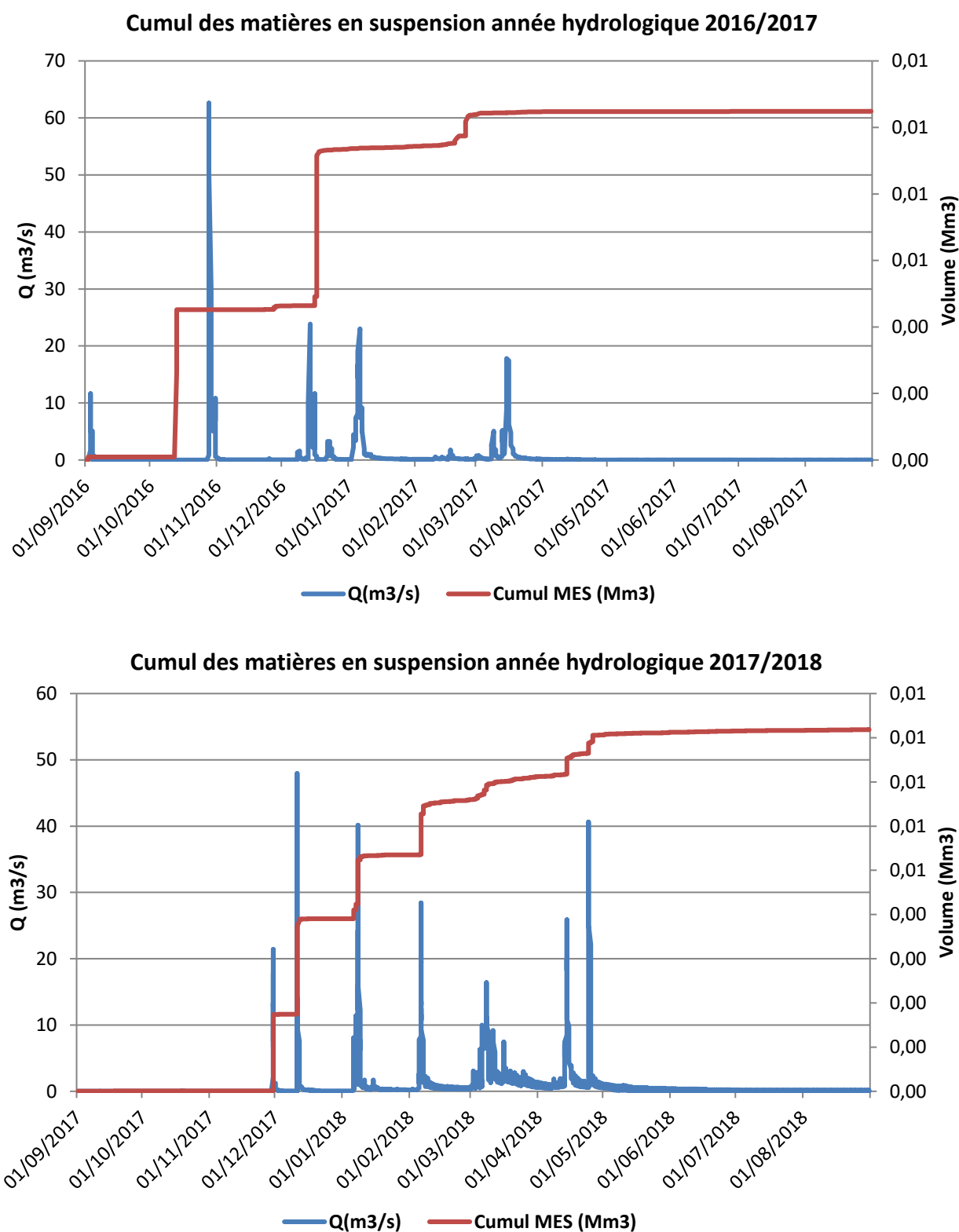




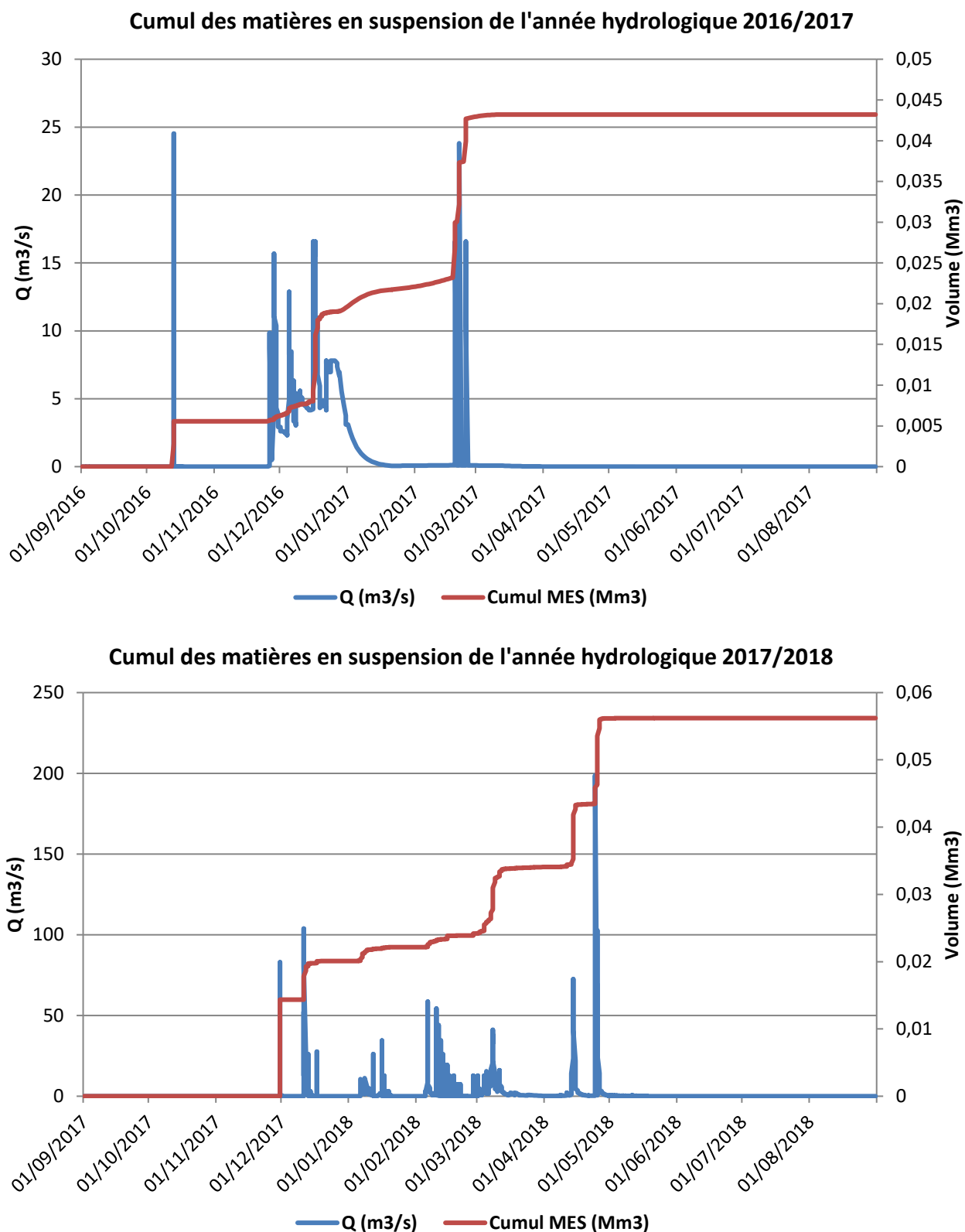
**Figure 55.** Cumul du transport solide au niveau de la station hydrologique d'Aguibat Zear sur l'oued Bouregreg au cours des deux années étudiées.



**Figure 56.** Cumul du transport solide au niveau de la station hydrologique de Ras Fathia sur l'oued Grou au cours des deux années étudiées.



**Figure 57.** Cumul du transport solide au niveau de la station hydrologique de Sidi Mohammed Cherif sur l'oued Machraa au cours des deux années étudiées.



**Figure 58.** Cumul du transport solide au niveau de la station hydrologique d'Ain Loudah sur l'oued Korifla au cours des deux années étudiées.

Le calcul du flux des transports solides au niveau des 4 stations hydrologiques étudiées lors des années hydrologiques 2016/2017 et 2017/2018, montre qu'un seul événement peut contribuer à plus de 50% des transports solides enregistrés lors de toute l'année hydrologique. D'où la complexité du phénomène qui dépend entre autres de la répartition spatiale et temporaire de la pluviométrie.

Plus de 80% du transport solide a été observé durant les saisons de l'hiver et du printemps. Tandis que les autres saisons produisent moins de MES. Ce phénomène a été enregistré sur l'ensemble des stations de mesure étudiées. Cette période connaît plus de précipitations et par la suite d'écoulement dans les oueds.

### **3.5. Les données bathymétriques**

Le barrage SMBA est mis en service en 1974 et il a été surélevé en 2007. Il est destiné uniquement à l'alimentation en eau potable de la zone côtière entre Rabat et Casablanca qui compte près de 8 millions d'habitants.

Afin de dresser l'état des lieux de l'envasement de la retenue du barrage SMBA, il a été procédé à la collecte et à l'analyse des levés bathymétriques réalisés par la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau du Maroc. Au total 7 levés bathymétriques ont été collectés, le plus ancien datant de 1974 alors que les plus récents ont été réalisés en 2013.

L'analyse de ces données bathymétriques montre que l'envasement de la retenue du barrage SMBA a été de l'ordre de  $2.65 \text{ Mm}^3/\text{an}$  soit une dégradation spécifique de  $270.4 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$  avant surélévation. Après surélévation, l'envasement est passé à  $9.49 \text{ Mm}^3/\text{an}$  soit une dégradation spécifique de  $968.37 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$  ce qui a accentué le rythme d'envasement de 400% (Mahe et al., 2013a). Ces données sont cependant sujettes à caution pour les valeurs du début des années 2000 (Mahé et al., 2014), mais la différence entre le début et la fin de la chronique est de bonne qualité.

Ainsi l'envasement total du barrage SMBA a atteint  $132 \text{ Mm}^3$  soit un rythme moyen d'envasement depuis sa mise en service de  $3.7 \text{ Mm}^3/\text{an}$ . Par la suite, le barrage a dépassé sa tranche morte qui est dimensionnée pour  $100 \text{ Mm}^3$  et a perdu  $32 \text{ Mm}^3$  de sa réserve utile depuis sa mise en service. Le tableau 11 résume l'état d'envasement du barrage.

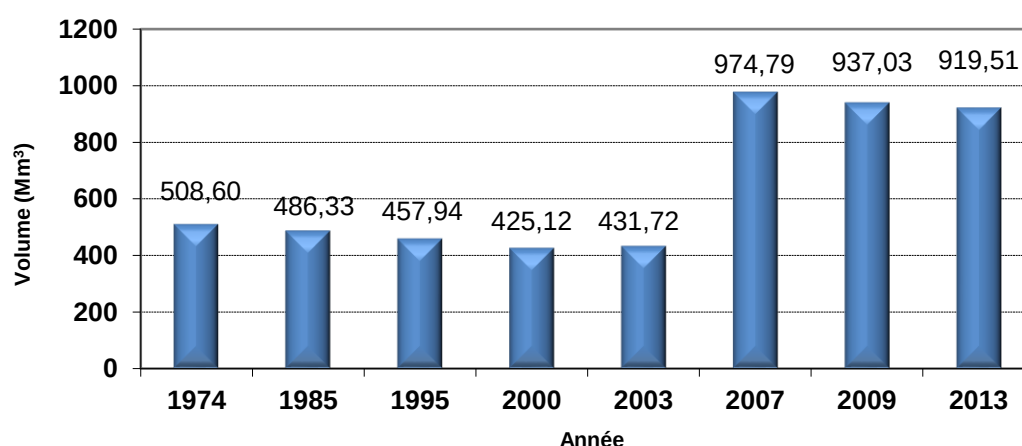
**Tableau 11:** Synthèse des résultats de calcul de l'envasement du barrage SMBA, depuis sa mise en eau

| Nom du barrage          | Capacité initiale de la retenue (Mm <sup>3</sup> ) | Envasement total (Mm <sup>3</sup> ) | Nombre d'années | Rythme d'envasement (Mm <sup>3</sup> /an) | Volume de la tranche morte à la construction du barrage (Mm <sup>3</sup> ) | Volume perdu (%) | Capacité actuelle (Mm <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------|
| SMBA avant surélévation | 508.60                                             | 76.88                               | 29              | 2.65                                      | 100.00                                                                     | 15               | 431.72                               |
| SMBA surélevé           | 974.79                                             | 55.28                               | 6               | 9.49                                      |                                                                            | 6                | 919.51                               |

L'envasement de la retenue du barrage représente une réelle menace pour la pérennité de la mobilisation des ressources en eau superficielles du bassin du Bouregreg et la satisfaction des besoins des usagers. La régularisation du barrage SMBA, avant surélévation, se faisait de manière saisonnière (capacité inférieure aux apports annuels). En d'autres termes, le barrage a été amené à évacuer le surplus des apports le plus souvent à partir des ouvrages de restitution (évacuateur des crues, vidange de fond). Cette gestion favorisait l'élimination des dépôts solides et donc la diminution du taux d'envasement du barrage.

Après sa surélévation et par conséquent l'augmentation de la capacité en eau de sa retenue, le barrage SMBA est passé à une régularisation pluriannuelle (capacité supérieure aux apports annuels). Ce mode de régularisation favorise le stockage au détriment de l'évacuation par l'utilisation des organes de restitution du barrage ce qui accentue le taux d'envasement.

La figure 59 illustre l'évolution dans le temps de la capacité normale du barrage SMBA.

**Figure 59.** Evolution de la capacité normale de la retenue du barrage SMBA, en millions de m<sup>3</sup>

## Chapitre 4 : Application de l'Equation Universelle de Perte en Sol Modifiée

### 4.1. Modèle MUSLE utilisé

Malgré les difficultés rencontrées dans la calibration et l'adaptation du modèle universel de perte en terre (USLE) aux conditions du Maroc (El Bahi et al., 2005), la plupart des études d'aménagement des bassins versants continuent à l'utiliser (Yassin, 2013). Comme le modèle USLE (Wischmeier & Smith, 1965) et sa version révisée RUSLE (Renard, 1997) ont été développés pour l'évaluation brute de la perte en terre annuelle à l'échelle de petites parcelles, leur application à de grandes surfaces mène à des erreurs assez importantes ;Haan et al., 1994). Toutefois, leur précision augmente lorsqu'ils sont couplés à des modèles hydrologiques (Novotny, 1994). Ainsi (Williams, 1975) a développé une version modifiée de l'USLE, MUSLE, qui tient compte de la charge de l'écoulement à l'exutoire en prenant en compte les caractéristiques biophysiques du bassin versant. Ce modèle a été déjà appliqué à un micro bassin dans le bassin d'El Mellah est a donné de très bons résultats, comparé à la mesure avec un écart de -4% en sous-estimant les apports solides (Yassin, 2013).

Dans cette étude, nous allons appliquer le modèle de Williams (1975) qui repose sur l'équation universelle des pertes en terre modifiée (Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE), intégrée dans le Système d'Information Géographique ArcGIS pour la détermination du potentiel du perte en sol au niveau du bassin versant du Bouregreg aux 4 stations hydrologiques situées à l'amont immédiat du barrage SMBA.

Ce modèle permet d'évaluer le taux annuel moyen d'érosion à l'exutoire du bassin. Il fait intervenir des paramètres hydrologiques, mesurés aux 4 stations hydrologiques, en tenant compte des caractéristiques biophysiques. Ainsi, l'équation du modèle se présente comme suit :

$$A = a(Q_{max} * V_t)^b K * LS * C * P$$

avec,

A : quantité de sédiments produite à l'exutoire en tonne,

a et b : facteur d'échelle (a=11,8 et b = 0,56),

$Q_{max}$  : débit maximum en m<sup>3</sup>/s,

$V_t$  : volume total d'eau ruisselé en m<sup>3</sup>,

K : érodibilité moyenne des sols (mg MJ<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>),

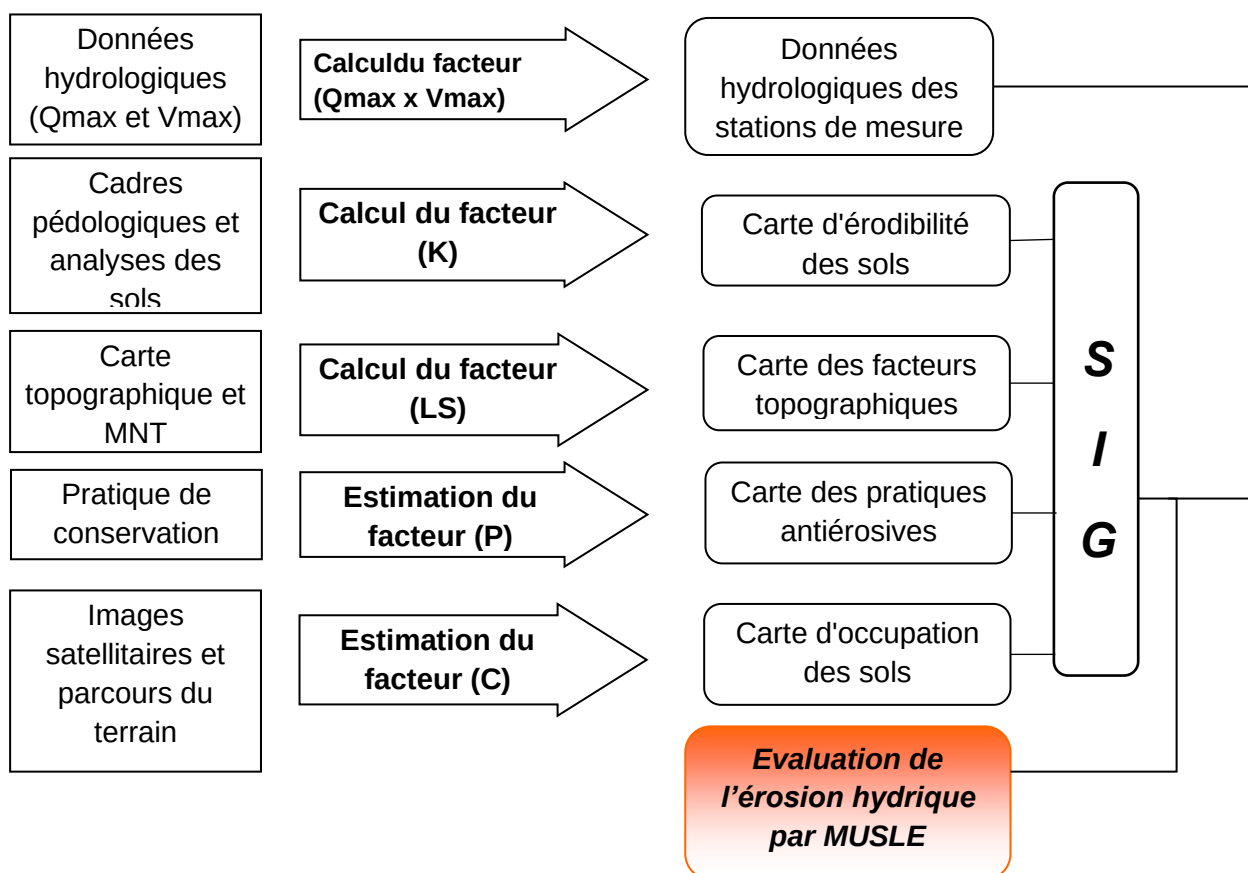
LS : facteur topographique moyen,

C : facteur du couvert végétal moyen,

P : facteur moyen des pratiques culturales et aménagements.

## 4.2. Méthode adoptée

La figure 60 donne l'organigramme de l'approche qui est suivie pour l'évaluation des taux d'envasement au niveau des stations hydrologiques à l'amont du barrage SMBA.



**Figure 60.** Méthode adoptée pour l'évaluation de l'érosion dans le bassin du Bouregreg

## 4.3. Analyse de la pluviométrie et de l'hydrométrie

Les transports solides sont calculés aux 4 stations hydrologiques concernées au cours des années hydrologiques 2016/2017 et 2017/2018. Ces deux années ont été respectivement sèche et humide sur le plan pluviométrique. La pluie moyenne enregistrée sur l'ensemble des postes pluviométriques du bassin a atteint 354 mm lors de l'année 2016/2017 et 496 mm en 2017/2018.

Ainsi, les écarts pluviométriques enregistrés par rapport à la moyenne arithmétique des données des stations pluviométriques situés dans le bassin de Bouregreg. Les périodes de calcul des moyennes arithmétiques sont données dans le tableau 12, et ce selon les données mises à disposition de l'étude par l'Agence du Bassin du Bouregreg et de la Chaouia, ont varié respectivement de -10% et +26%.



Le tableau 12 résume les écarts pluviométriques enregistrés par rapport à la moyenne pluviométrique des stations du bassin du Bouregreg.

**Tableau 12 :** Pluviométrie des années hydrologiques 2016/2017 et 2017/2018

| Station Pluviométrique | Bassin    | Cumul pluviométrique (mm) |            | Période de calcul de la moyenne | Année moyenne (mm) | Ecart par rapport à la moyenne (%) |           |
|------------------------|-----------|---------------------------|------------|---------------------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|
|                        |           | 2016/2017                 | 2017/2018  |                                 |                    | 2016/2017                          | 2017/2018 |
| Lalla Chafia           | Bouregreg | 409                       | 569        | 1972/2019                       | 486                | -16                                | 17        |
| Aguibat Zear           | Bouregreg | 482                       | 578        | 1975/2019                       | 429                | 12                                 | 35        |
| Sidi Jabeur            | Grou      | 260                       | 432        | 1971/2019                       | 317                | -18                                | 36        |
| Tsalat                 | Bouregreg | 454                       | 622        | 1977/2019                       | 469                | -3                                 | 33        |
| Roumani                | Machraa   | 261                       | 431        | 1933/2019                       | 342                | -24                                | 26        |
| Ras Fathia             | Grou      | 290                       | 505        | 1975/2019                       | 387                | -25                                | 30        |
| S. M- Cherif           | Machraa   | 290                       | 495        | 1971/2019                       | 367                | -21                                | 35        |
| Barrage SMBA           | Bouregreg | 518                       | 479        | 1984/2019                       | 469                | 10                                 | 2         |
| Ouljat Haboub          | Grou      | 321                       | 350        | 1972/2019                       | 311                | 3                                  | 12        |
| Ain Loudah             | Krofla    | 258                       | 498        | 1971/2019                       | 347                | -26                                | 43        |
| <b>Total</b>           |           | <b>354</b>                | <b>496</b> |                                 | <b>392</b>         | <b>-10</b>                         | <b>26</b> |

A l'exception du sous-bassin du Korifla au droit de la station d'Ain Loudah qui a enregistré un excédent de près de 24% au cours de l'année 2017/2018, les apports ont été déficitaires sur le reste des sous-bassins durant les deux années hydrologiques avec des déficits plus prononcés au cours de l'année sèche 2016/2017, et ce malgré l'excédent pluviométrique enregistré lors de l'année hydrologique 2017/2018.

Le tableau 13 résume les apports enregistrés au niveau des 4 stations de l'étude.

**Tableau 13 :** Apport en eau aux 4 stations hydrologiques lors des deux années étudiées

| Nom de la station hydrologique | Oued      | Apport en (Mm <sup>3</sup> ) |           |                                 |               | Ecart à la moyenne (%) |           |
|--------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|---------------------------------|---------------|------------------------|-----------|
|                                |           | 2016/2017                    | 2017/2018 | Période de calcul de la moyenne | Année moyenne | 2016/2017              | 2017/2018 |
| Aguibat Zear                   | Bouregreg | 122.2                        | 221.5     | 1975/2019                       | 227.6         | -46                    | -3        |
| Ras Fathia                     | Grou      | 95.0                         | 162.8     | 1975/2019                       | 194.2         | -51                    | -16       |
| Ain Loudah                     | Korifla   | 13.3                         | 23.5      | 1971/2019                       | 18.9          | -29                    | +24       |
| Sidi Mohammed Cherif           | Machraa   | 3.7                          | 12.9      | 1971/2019                       | 16.7          | -77                    | -23       |

#### 4.4. Analyse des milieux biophysiques

L'analyse des milieux biophysiques consiste en la détermination des facteurs moyens utilisés par le modèle pour chaque sous-bassin. Ces facteurs qui affectent l'érosion du sol sont : le type de sol, la topographie, l'occupation du sol et les pratiques culturales et les aménagements de lutte contre l'érosion (Sabri, 2016).

#### 4.4.1. Facteur d'érodibilité des sols (K)

L'érodibilité est définie comme le degré de résistance des sols à l'érosion. Les facteurs ayant une grande influence sur la réaction des sols à l'érosion, en l'occurrence le détachement et le transport des particules par la pluie et le ruissellement, sont la texture, la structure, la matière organique et la perméabilité. La méthodologie d'estimation de K du RUSLE a été appliquée, elle s'écrit de la manière suivante :

$$K=[2,1*10^{-4}(12-MO) M^{1.14} +3,25(S-2) +2,5(P-3)]/10$$

avec,

**K** : érodibilité du sol exprimée en t.ha.h/ha.MJ.mm (tonne. hectare. heure/hectare. méga joule. millimètre) ;

**MO** : pourcentage de la matière organique ;

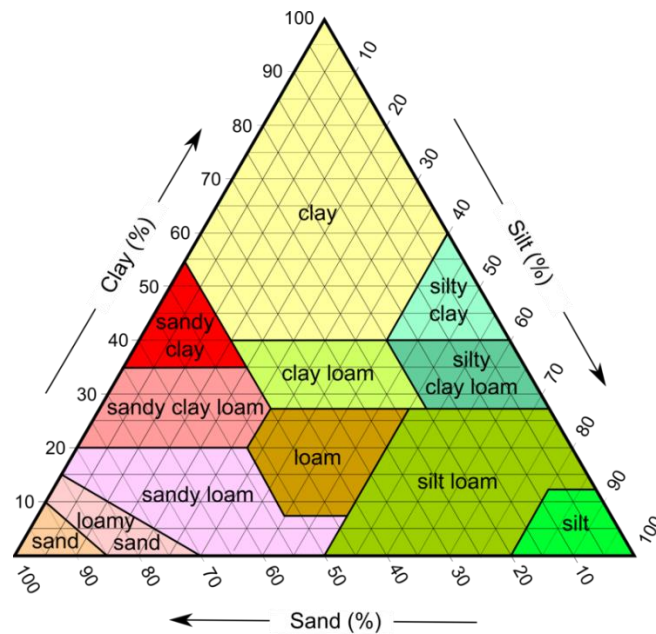
**M** : terme textural % de sable fin + % de limon ;

**S** : code de la classe de structure 1 à 4, avec 1 structure fragmentée et 4 : structure grossière, la structure du sol affecte tant la susceptibilité au glissement de terrain que l'infiltration, les profils décrits sur le Bouregreg ont une structure polyhédrique sub angulaire et relèvent de la classe (3) ;

**P** : le code de la perméabilité (1 à 6), sa valeur peut être déduite indirectement à partir du contenu en matière organique en calculant l'infiltration donnée par l'équation donnée par (Aboulabbes, 1984):  $Y=3.53*X+2.08$ , avec : Y = infiltration en cm/h, X = matière organique en %.

Pour la suite, le facteur d'érodibilité du sol K sera calculé en utilisant la base de données mondiale harmonisée sur les sols (HWSD), développée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (<http://www.fao.org/soils-portal/fr/>). Cette base de données donne la répartition par type de sol des compositions des sols en limon, sable et argile (El Gaatib et al., 2014).

En effet, le sol est composé de matière organique et minérale. Sa texture est déterminée par la taille des particules de sol et leur quantité respective. Il existe trois catégories de particules qui déterminent la texture du sol : sable, limon et argile. On les distingue par le diamètre des particules : sable 0,05 mm à 2 mm, limon 0,002 mm à 0,05 mm, argile 0,002 mm et moins. En utilisant la figure 61, on peut déterminer la classification de la texture du sol. La texture des sols est classée selon les pourcentages de limon, de sable et d'argile.



**Figure 61.** Graphique triangulaire illustré modifié pour déterminer la classification de la texture du sol (Jamagne, 1967)

Une fois les textures déterminées, il est possible d'établir la correspondance entre la texture standard et le facteur K (Stone & Hilborn, 2001). Ces valeurs sont données en tonne/ha et en tonne/acres (Système US). Bien que cette méthodologie apporte une approximation dans le calcul du facteur K, elle a cependant pour avantage de se prêter aux contraintes imposées par la zone d'étude. Le taux de la matière organique au niveau de chaque bassin versant pour chaque valeur de texture est calculé par la conversion du carbone organique en matière organique. Pour passer de la teneur en carbone organique d'un échantillon de sol à celle en matières organiques, on utilise très couramment le facteur de conversion de 1,724. Celui-ci est ancien et a survécu à l'épreuve du temps et aux méthodes modernes d'analyse. Selon les auteurs notamment (Pribyl, 2010), ce facteur conventionnel serait attribué à des auteurs du 19<sup>ème</sup> siècle (van Bemmelen en (1890), ou Emil von Wolff (1864), voire à Carl Sprengel (1826). Il est basé sur des études très anciennes montrant que la matière organique du sol contient 58% de carbone. Puisque le rapport C/MO serait égal à 0,58, le rapport MO/C serait égal à 1,724.

Ainsi, le calcul de la matière organique est effectué par la formule suivante qui utilise la valeur 1.724 largement utilisée au Maroc **MO = CO \* 1.724**. Le facteur moyen K d'érodibilité par bassin est calculé par la formule suivante :

$$K_{moyenne} = \frac{\sum(K \cdot \text{nombre})}{\sum \text{nombre}},$$

avec,

K : facteur K par valeur,

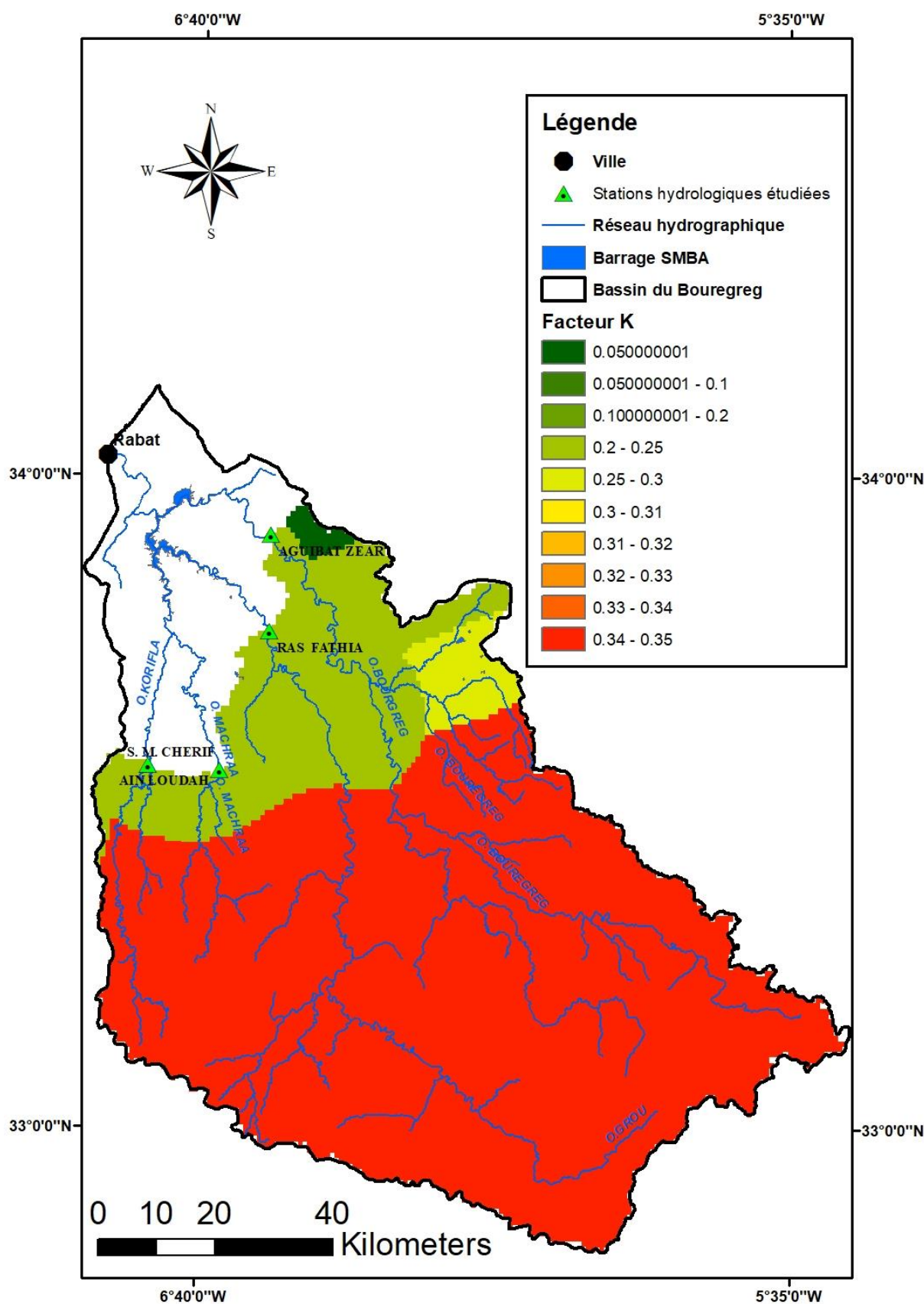
Nombre : comptage des pixels ayant les mêmes valeurs de K dans le tableau d'attribution Arcmap.

Les résultats du calcul obtenu du facteur K moyen pour chaque bassin versant sont présentés dans le tableau 14.

**Tableau 14** : Facteur d'érodibilité moyenne de chaque bassin versant

| Nom Bassin versant  | Facteur d'érodibilité Kmoy |
|---------------------|----------------------------|
| Bouregreg           | 0.352                      |
| Grou                | 0.350                      |
| Ain Loudah          | 0.348                      |
| Sidi Mohamed Cherif | 0.348                      |

Le facteur Kmoy retenu est de 0.35. Cette valeur correspond au limon, ce dernier est une formation sédimentaire dont les grains sont de taille intermédiaire entre les argiles et les sables. La perte de limon entraîne une baisse de la capacité de rétention en eau du sol. Il en résulte une érodibilité accrue et une aggravation du risque d'érosion. Les limons étant souvent en suspension dans l'eau, ils sont facilement transportables par les crues et ils peuvent contribuer à l'envasement des retenues de barrages. La figure 62 donne la répartition du facteur K sur le bassin du Bouregreg pour les 4 stations hydrologiques situées à l'amont immédiat du barrage SMBA.



**Figure 62.** Facteur K du bassin de l'oued Bouregreg aux 4 stations hydrologiques

#### 4.4.2. Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique LS est un paramètre essentiel du modèle. Il exprime le résultat de l'érosion liée à l'effet combiné du degré de la pente et de sa longueur. La plupart des études récentes pour la détermination du potentiel de perte en sol au niveau des bassins versants par le modèle MUSLE, utilisent l'équation de Wischmeier & Smith (1978).

Elle s'exprime sous la forme :

$$LS = (\lambda/22,13)^m * 65,4 \sin^2\beta + 4,56 \sin \beta + 0,0654,$$

avec,

$\lambda$  : Longueur de la pente en m,

$\beta$  : Pente en degré,

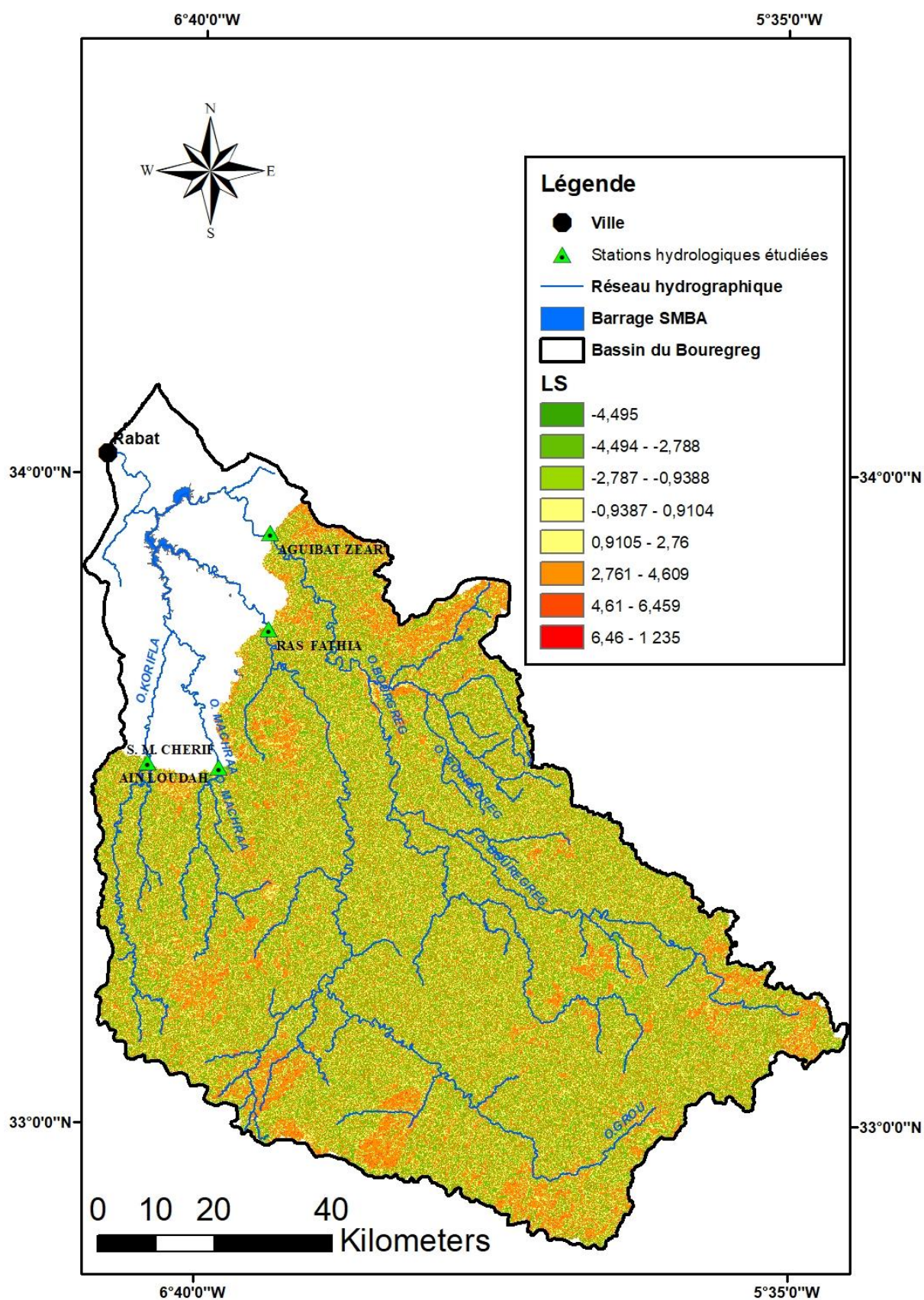
$m=0.5$  si  $\beta \geq 5\%$ ,  $m=0,3$  si  $1 < \beta < 5\%$ ,  $m=0.2$  si  $\beta \leq 1$ .

Dans un premier temps, la carte des pentes a été établie par l'outil Spatial Analyst du logiciel ArcGis à partir d'un MNT 90 m de résolution. Ensuite, la carte LS, figure 63, par bassin a été générée en application de la formule Wischmeier & Smith. Les pentes moyennes et les valeurs moyennes de LS sont données dans le tableau 15.

**Tableau 15** : Pente moyenne et facteur topographique moyen (LS)

| Nom du bassin                 | Pente moyenne en % | Facteur topographique moyen(Ls) |
|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|
| Bouregreg à Lala Chafia       | 16.6               | 0.48                            |
| Grou à Ras Fathia             | 14.6               | 0.49                            |
| Korifla à Ain Loudah          | 9.8                | 0.27                            |
| Machraa à Sidi Mohamed Cherif | 12.2               | 0.58                            |





**Figure 63.** Facteur LS du bassin de l'oued Bouregreg aux 4 stations hydrologiques

#### 4.4.3. Facteur de couverture végétale (C)

Le facteur de protection du sol par la couverture végétale (C) renseigne sur le degré de protection du sol par le couvert végétal. Ce facteur a subi plusieurs changements depuis l'établissement de l'équation universelle de perte en terre. Le couvert végétal est - après la topographie – le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols. La valeur de C dépend principalement du pourcentage de couverture végétale et de la phase de croissance. La carte du facteur C pour le bassin versant du Bouregreg a été déduite des cartes d'occupation du sol. Ces dernières ont été déterminées à partir de l'exploitation de données de télédétection et d'observations de terrain. La carte d'occupation du sol a été extraite à partir des images satellitaires SPOT à 20 m de résolution combinées aux images Landsat ETM+ récentes (2011/2012) suivant la méthode de classification supervisée (El Gaatib et al., 2014). Une autre approche pourrait dériver le facteur C des cartes de NDVI comme pratiqué sur l'Oued Mina en Algérie par Toumi et al. (2013).

La répartition des surfaces selon la nature de la couverture végétale est réalisée par l'outil ArcGis qui subdivise le bassin versant en plusieurs polygones. Chaque polygone correspond à un type de couverture végétale spécifique. Chaque couvert végétal correspond à un facteur donné par Wischmeir&Smith selon le thème (Sadiki et al., 2004). Une couleur est affectée à chaque polygone qui représente un type de couvert végétal. Pour le calcul du facteur C, il est nécessaire d'effectuer un calcul indépendant pour chaque sous-bassin. En effet, la sensibilité à l'érosion des différentes classes est déterminée à partir des principaux thèmes d'occupation du sol à savoir les formations forestières, parcours, terrains agricoles, arboriculture, eau et sol nu, dont les valeurs varient entre 0 et 1. Le calcul du facteur de couverture végétale moyen dépend du facteur donné pour chaque occupation du sol et de surface par la formule suivante :

$$C_{moyenne} = \frac{\sum S_i.C_i}{\sum S_i},$$

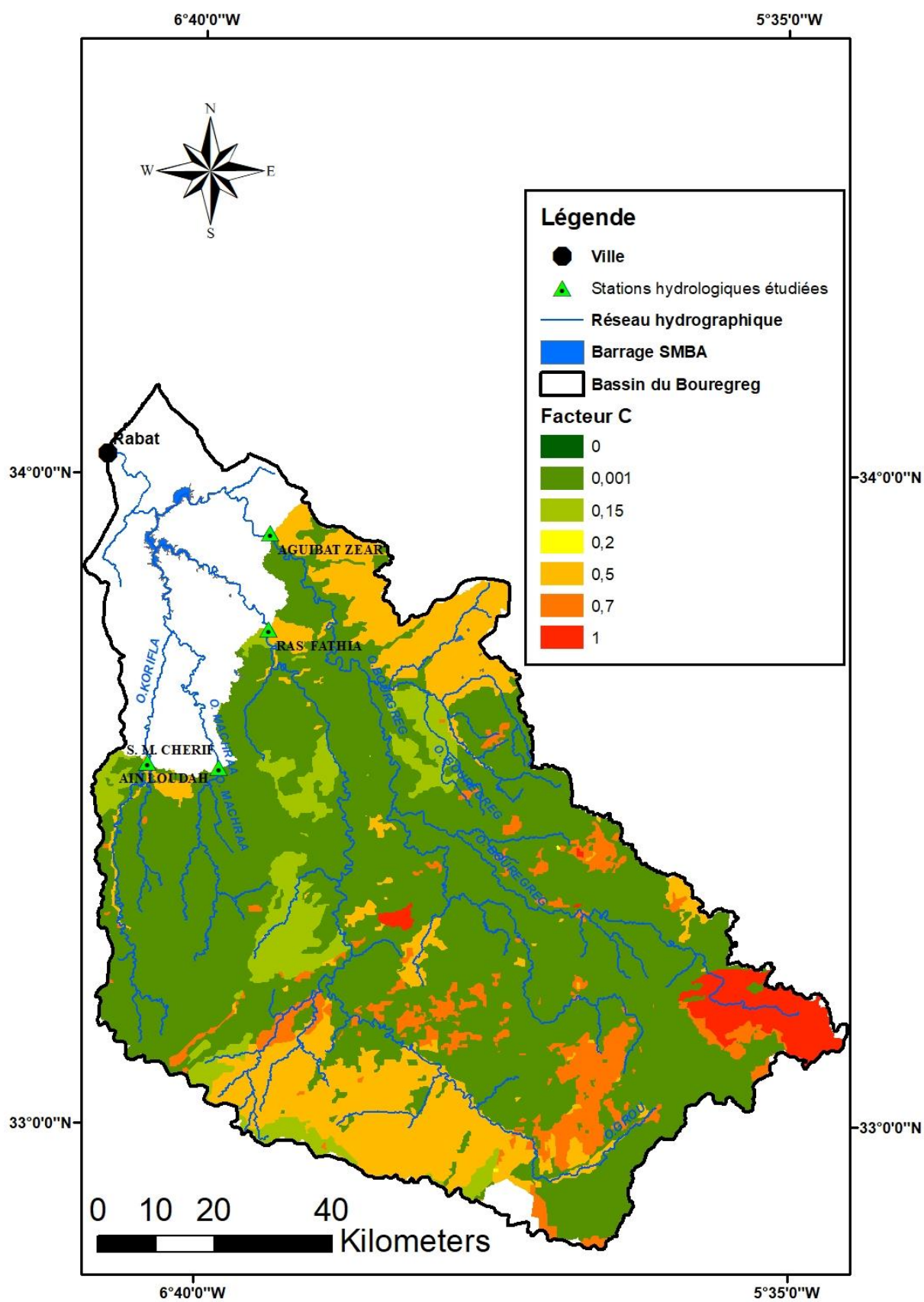
avec,

$S_i$  : Superficie partielle du polygone,

$C_i$  : Valeur du facteur C selon le thème.

La Figure 64 présente les facteurs C pour chaque sous-bassin de l'Oued Bouregreg.





**Figure 64.** Facteur C du bassin de l'oued Bouregreg aux 4 stations hydrologiques

L'application de la formule conduit aux résultats présentés dans le tableau 16.

**Tableau 16** : Facteur C moyen de couverture végétale pour chaque bassin versant

| Bassin versant | Facteur du couvert végétal<br>Cmoy |
|----------------|------------------------------------|
| Bouregreg      | 0.26                               |
| Grou           | 0.45                               |
| Korifla        | 0.41                               |
| Machraa        | 0.33                               |

Le facteur du couvert végétal (C) peut varier de près de 0 pour les sols bien protégés à 1 pour les surfaces striées très sensibles à l'érosion en rigoles. La détermination de ce facteur pour le bassin versant du Bouregreg et les sous-bassins repose sur la densité de la végétation et sur la hauteur des strates végétales. Ces données ont été déduites de la mise à jour sur le terrain de la carte d'occupation du sol par le Centre Royal de Télédétection Spatiale du Maroc (CRTS) disponible à l'Agence du Bassin du Bouregreg et de la Chaouia (El Gaatib, 2014). Les valeurs affectées aux différents modes d'utilisation des sols se basent sur les tableaux de Wischmeier et Smith pour les forêts, les matorrals et les pâturages. Les résultats montrent que les valeurs du facteur C se situent entre 0,26 pour le sous-bassin situé dans la région nord-est, le Bouregreg, le plus humide, et il est le plus élevé, 0,45, pour le sous-bassin qui s'étend le plus vers le sud, plus aride (Goussot et al., 2014 ; Tra Bi et al., 2013, 2014). La répartition spatiale de l'indice du couvert végétal par classe pour le bassin-versant du Bouregreg montre, sur 50,45% de la surface totale, soit près de 181556 ha, un indice inférieur ou égal à 0,2, indiquant une bonne protection, tandis que 49,5% de la surface présente une protection très faible contre l'érosion soit environ 177986 ha. On peut noter également que le haut bassin nord-est, qui est à la fois le plus humide et le moins couvert de végétation, n'est cependant pas sujet à une forte érodibilité (El Hadraoui, 2013).

#### 4.4.4. Facteur moyen des pratiques culturales et aménagements P

Le facteur P est un facteur sans dimension exprimant la protection du sol par les pratiques agricoles (P), ce facteur tient compte des pratiques purement antiérosives. Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols. Ces pratiques affectent proportionnellement l'érosion en modifiant le schéma d'écoulement ou la direction de l'écoulement de surface et en réduisant la quantité et la vitesse de ruissellement. Les valeurs de P sont inférieures ou égales à 1. La valeur 1 est attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée. Les valeurs de P varient entre 0 et 1 selon la pratique adoptée et aussi selon la pente. Dans le bassin versant du Bouregreg, il y a peu d'aménagements antiérosifs, et les agriculteurs n'utilisent pas de pratiques culturales

antiérosives. Ces actions sont à petite échelle et n'ont pas d'impact majeur sur la réduction de l'érosion du fait de la superficie du bassin. De ce fait, la valeur P égale à 1 a été attribuée à toute la superficie du bassin.

## 4.5. Application et calibration du modèle MUSLE

### 4.5.1. Application du modèle de MUSLE

Les paramètres nécessaires à l'application du modèle MUSLE pour l'évaluation des apports solides par le modèle de MUSLE sont résumés dans le tableau 17.

**Tableau 17 :** Facteurs moyens de l'équation universelle de perte de sol modifiée par sous bassin

| Nom du bassin | Facteur topographique moyen (LS) | Facteur d'érodibilité moyen (K) | Facteur du couvert végétal moyen (C) | Facteur moyen d'aménagement (P) |
|---------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Bouregreg     | 0.48                             | 0.32                            | 0.26                                 | 1                               |
| Grou          | 0.49                             | 0.32                            | 0.45                                 | 1                               |
| Korifla       | 0.27                             | 0.34                            | 0.33                                 | 1                               |
| Machraa       | 0.58                             | 0.31                            | 0.41                                 | 1                               |

En introduisant les différents facteurs du modèle MUSLE, la quantité des apports solides produits à l'exutoire de chaque bassin versant est calculée à l'aide des données de mesure de débit et de volume pour chaque crue, en application de l'équation du modèle. On procède ensuite au calcul des transports solides par l'utilisation des concentrations mesurées des matières en suspension pour les mêmes crues. Les concentrations sont ainsi interpolées linéairement sur l'ensemble des débits de chaque hydrogramme.

Le transport solide de fond est pris égal à 10% du volume total de la matière en suspension (Lahlou, 1996), ce qui reste une valeur empirique mais largement utilisée.

### 4.5.2. Calibration du modèle de MUSLE

La calibration du modèle à chaque station hydrologique est réalisée en application de la méthode du pourcentage de biais (PBIAS) qui consiste à minimiser l'écart entre la moyenne observée et la moyenne prévue par le modèle en agissant sur les paramètres d'échelle du modèle a et b :

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right],$$

avec,

$Y_i^{obs}$ : transport solide observé,

$Y_i^{sim}$ : transport solide simulé par MUSLE,

n : nombre d'observations.

Dans notre cas a et b sont respectivement égaux à 11.80 et 0.56. La période du calage s'étale sur les deux années d'observations disponibles. La valeur optimale du PBIAS est 0 (Gupta et al., 1999). Le PBIAS a la capacité d'indiquer clairement les mauvaises performances du modèle (Gupta et al., 1999). Pour s'assurer de la fiabilité du modèle, on procède aussi au calage du modèle par la méthode KGE (Kling–Gupta Efficiency) (Gupta et al., 2009) :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{Obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{Obs}} - 1\right)^2}$$

avec,

r : coefficient de corrélation simple entre les valeurs observées et simulées,

$\sigma_{Obs}$ : écart type des valeurs de transport solide observées,

$\sigma_{sim}$ : écart type des valeurs de transport solide simulées,

$\mu_{Obs}$ : moyenne des valeurs de transport solide observées,

$\mu_{sim}$ : moyenne des valeurs de transports solide simulées.

La valeur optimale du facteur KGE est 1.

Le calage par la méthode PBIAS du modèle montre que le facteur d'échelle (**a**) ne varie pas alors que (**b**) est plus sensible mais reste proche de la valeur initiale. Le tableau 18 donne les résultats du calage du modèle par la méthode de PBIAS.

**Tableau 18** : Résultats de la calibration du modèle aux 4 stations étudiées par PBIAS

| Nom du Bassin | Paramètres d'échelle<br>après calage |       | Critères de calage |      |      |
|---------------|--------------------------------------|-------|--------------------|------|------|
|               | a                                    | b     | Bais               | KGE  | r    |
| Bouregreg     | 11.799                               | 0.548 | 0.00               | 0.48 | 0.58 |
| Grou          | 11.799                               | 0.535 | 0.00               | 0.11 | 0.26 |
| Korifla       | 11.800                               | 0.541 | 0.00               | 0.49 | 0.57 |
| Machraa       | 11.799                               | 0.502 | 0.00               | 0.65 | 0.70 |

Le calage du modèle par la méthode KGE montre que les facteurs d'échelle a et b sont très sensibles, ils sont très loin des valeurs initiales et ils sont très différents d'un bassin à l'autre. Le tableau 19 donne les résultats du calage du modèle par la méthode de KGE.

**Tableau 19** : Résultats de la calibration du modèle aux 4 stations étudiées par KGE

| Nom du Bassin | Paramètres d'échelle<br>après calage |       | Critères de calage |       |       |
|---------------|--------------------------------------|-------|--------------------|-------|-------|
|               | a                                    | b     | Bais               | KGE   | r     |
| Bouregreg     | 0.039                                | 0.807 | 0.024              | 0.601 | 0.603 |
| Grou          | 11.799                               | 0.546 | -0.236             | 0.149 | 0.272 |
| Korifla       | 1.727                                | 0.643 | -0.055             | 0.537 | 0.545 |
| Machraaf      | 1.421                                | 0.620 | -0.017             | 0.689 | 0.690 |

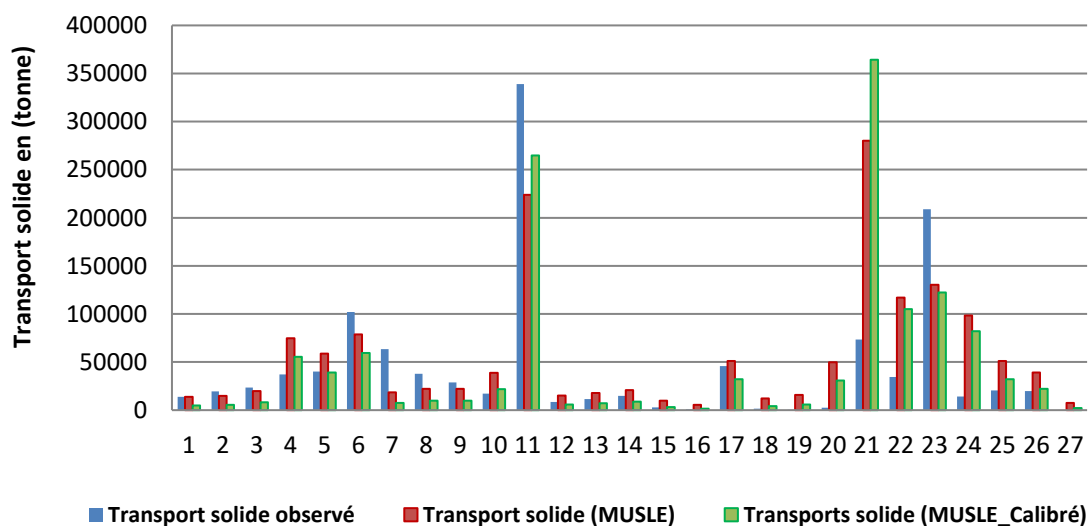
#### 4.5.3. Comparaison des observations aux résultats du modèle MUSLE à la station hydrologique Aguibat Zear sur l'oued Bouregreg

Lors des deux années hydrologiques étudiées, 27 crues ont été enregistrées. Les volumes totaux solides observés s'élèvent à 742 334 tonnes en 2016/2017 et à 439 735 tonnes en 2017/2018. Le tableau 20 résume les résultats de l'application du modèle au droit de la station hydrologique d'Aguibat Zear.

**Tableau 20** : Résultats du modèle MUSLE à Aguibat Zear sur le Bouregreg et comparaison avec les observations.

| Année hydrologique | Transport solide observé (tonne) | Transport solide (MUSLE) (tonne) |              |            | Ecart Observation-MUSLE (%) |              |            |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|------------|-----------------------------|--------------|------------|
|                    |                                  | Sans calage                      | Calage PBIAS | Calage KGE | Sans calage                 | Calage PBIAS | Calage KGE |
| 2016/2017          | 742 334                          | 619 023                          | 487 494      | 436 922    | -17                         | -34          | -41        |
| 2017/2018          | 439 735                          | 888 011                          | 694 575      | 716 809    | +102                        | +58          | +63        |

L'examen des résultats du modèle MUSLE calé par les deux approches PBIAS et KGE, montre que le calage par la méthode de PBIAS simule mieux les transports solides. La figure 65 donne la comparaison des transports solides simulés et observés. Les derniers événements sont moins bien simulés par MUSLE que les premiers.



**Figure 65.** Comparaison entre MUSLE et observations à Aguibat Zear sur le Bouregreg

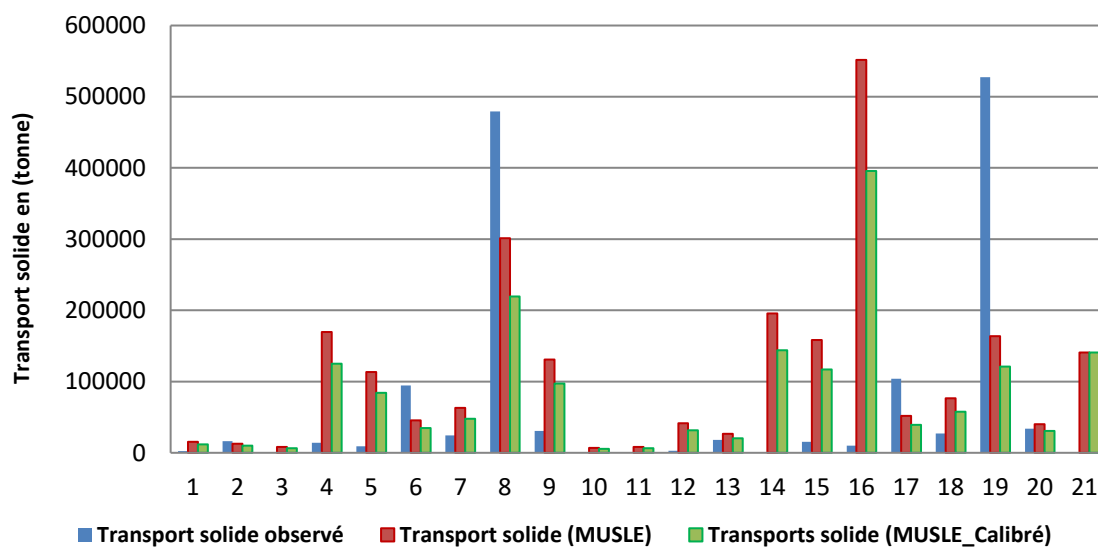
#### 4.5.4. Comparaison des observations aux résultats du modèle MUSLE à la station hydrologique Ras Fathia sur l'oued Grou

Lors des deux années hydrologiques étudiées, 21 crues ont été enregistrées. Les volumes totaux solides observés s'élèvent à 517194 tonnes en 2016/2017 et à 896438 tonnes en 2017/2018. Le tableau 21 résume les résultats de l'application du modèle au droit de la station hydrologique de Ras Fathia pour les deux versions du calage du modèle.

**Tableau 21** : Résultats du modèle MUSLE à Ras Fathia sur le Grou et comparaison avec les observations

| Année hydrologique | Transport solide observé (tonne) | Transport solide (MUSLE) (tonne) |              |            | Ecart Observation MUSLE (%) |              |            |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|------------|-----------------------------|--------------|------------|
|                    |                                  | Sans calage                      | Calage PBIAS | Calage KGE | Sans calage                 | Calage PBIAS | Calage KGE |
| 2016/2017          | 673 551                          | 875 366                          | 517 194      | 649 389    | +30                         | -23          | -4         |
| 2017/2018          | 740 083                          | 1 446 831                        | 896 438      | 1 098 213  | +95                         | +21          | +48        |

L'examen des résultats du modèle MUSLE calé par les deux approches PBIAS et KGE, montre que le calage par la méthode de PBIAS simule mieux les transports solides. La figure 66 donne la comparaison des transports solides simulés et observés. Comme pour le Bouregreg les événements de la deuxième année qui présentent plus d'écart par rapport à l'observation sont moins bien représentés par MUSLE.



**Figure 66.** Comparaison entre MUSLE et observations à Ras Fathia sur le Grou

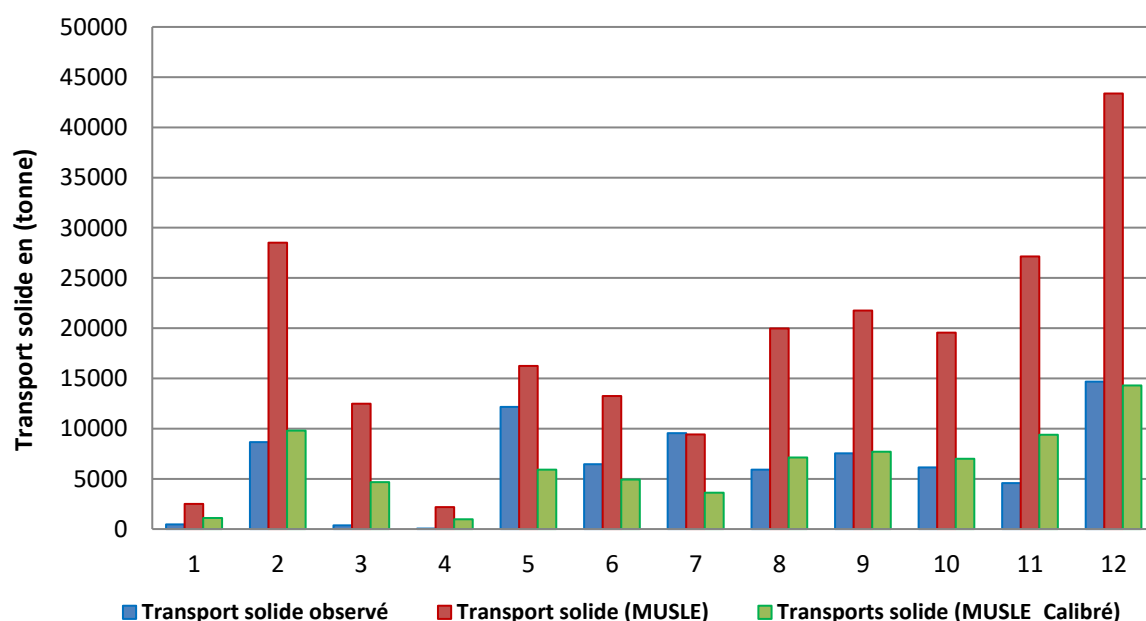
#### 4.5.5. Comparaison des observations aux résultats du modèle MUSLE à la station hydrologique Sidi Mohamed Cherif sur l'oued Machraa

Lors des deux années hydrologiques étudiées, 12 crues ont été enregistrées. Les volumes totaux solides observés s'élèvent à 28155 tonnes en 2016/2017 et à 48 422 tonnes en 2017/2018. Le tableau 22 résume les résultats de l'application du modèle à la station hydrologique Sidi Mohamed Cherif.

**Tableau 22** : Résultats du modèle MUSLE à Sidi Mohammed Cherif sur le Machraa et comparaison avec les observations.

| Année hydrologique | Transport solide observé (tonne) | Transport solide (MUSLE) (tonne) |              |            | Ecart Observation MUSLE (%) |              |            |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|------------|-----------------------------|--------------|------------|
|                    |                                  | Sans calage                      | Calage PBIAS | Calage KGE | Sans calage                 | Calage PBIAS | Calage KGE |
| 2016/2017          | 28 155                           | 75 194                           | 27 431       | 26 225     | +167                        | -3           | -7         |
| 2017/2018          | 48 422                           | 141 249                          | 49 146       | 51 657     | +192                        | +1           | +7         |

L'examen des résultats du modèle MUSLE calé par les deux approches PBIAS et KGE, montre que le calage par la méthode de PBIAS simule mieux les transports solides. La figure 67 donne la comparaison des transports solides simulés et observés. Là encore les simulations par MUSLE sont significativement trop élevées.



**Figure 67.** Comparaison entre MUSLE et observations à Sidi Mohammed Cherif sur le Machraa

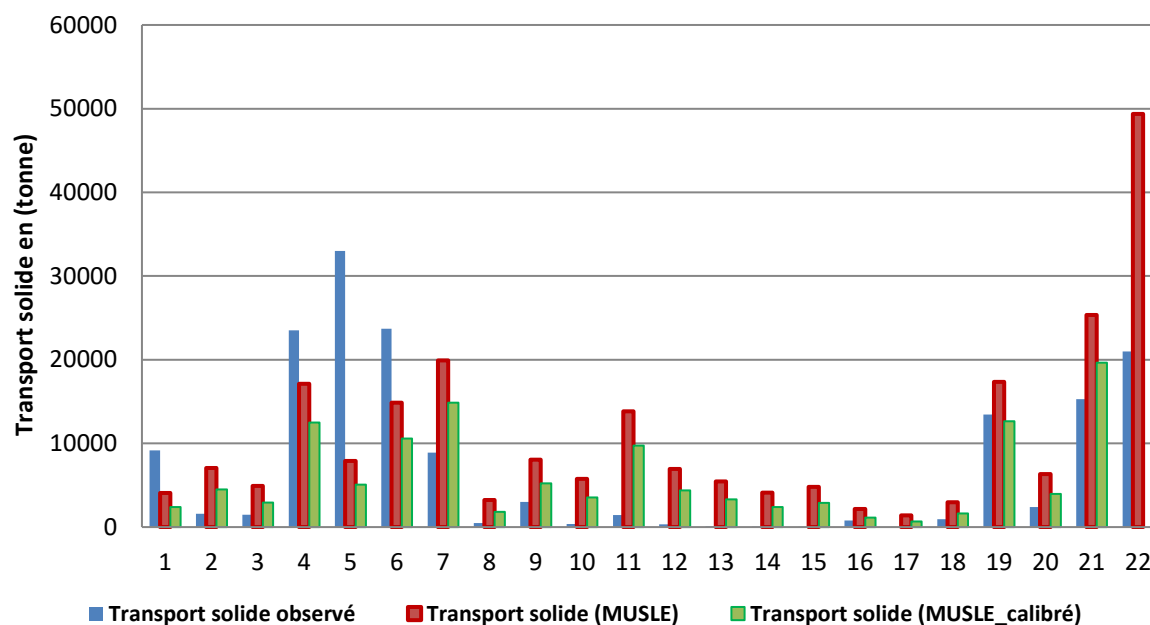
#### 4.5.6. Comparaison des observations aux résultats du modèle MUSLE à la station hydrologique d'Ain Loudah sur l'oued Korifla

Lors des deux années hydrologiques étudiées, 27 crues ont été enregistrées. Les volumes totaux solides observés s'élèvent à 68 759 tonnes en 2016/2017 et à 92 324 tonnes en 2017/2018. Le tableau 23 résume les résultats de l'application du modèle au droit de la station hydrologique d'Ain Loudah.

**Tableau 23** : Résultats du modèle MUSLE à Ain Loudah sur le Korifla et comparaison avec les observations.

| Année hydrologique | Transport solide observé (tonne) | Transport solide (MUSLE) (tonne) |              |            | Ecart Observation MUSLE (%) |              |            |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|------------|-----------------------------|--------------|------------|
|                    |                                  | Sans calage                      | Calage PBIAS | Calage KGE | Sans calage                 | Calage PBIAS | Calage KGE |
| 2016/2017          | 68 759                           | 41 083                           | 28 881       | 27 739     | -40                         | -58          | -60        |
| 2017/2018          | 92 324                           | 191 859                          | 132 202      | 142 138    | +108                        | +43          | +54        |

L'examen des résultats du modèle MUSLE calé par les deux approches PBIAS et KGE, montre que le calage par la méthode de PBIAS simule mieux les transports solides. La figure 68 donne la comparaison des transports solides simulés et observés. Sur les 4 stations étudiées, c'est sur le Korifla à Ain Loudah que les simulations semblent les plus performantes.



**Figure 68.** Comparaison entre MUSLE et observations à Ain Loudah sur le korifla



On déduit des écarts enregistrés par rapport à l'observation au niveau des quatre stations hydrologiques que d'une manière générale, le modèle calé par la méthode PBIAS donne de meilleurs résultats que le modèle calé et que le modèle calé par la méthode KGE. Ainsi, Ces écart ont varié entre -58% et + 58% pour le modèle calé par PBIAS, , entre -60% et +63% pour le modèle calé par la méthode KGE et entre -40% et +192% pour le modèle no calé.

#### 4.5.7. Comparaison des observations aux résultats du modèle MUSLE et de la bathymétrie aux 4 stations hydrologiques en amont du barrage

Pour valider la méthode de calage, l'indice de Nash et Sutcliffe NSE a été utilisé pour mesurer la performance du modèle. Selon Nash-Sutcliffe(Nash & Sutcliffe, 1970) NSE est défini comme suit :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \mu_{obs})^2},$$

avec,

NSE: coefficient de NashSutcliffe,

$Y_i^{obs}$ : transport solide observé,

$Y_i^{sim}$ : transport solide simulé par MUSLE,

$\mu_{obs}$ : moyenne des valeurs de transport solide observées.

Le coefficient NSE varie entre  $-\infty$  à 1. Ainsi si  $NSE=1$  les valeurs modélisées correspondent parfaitement aux observations, une valeur au-dessus de 0 montre une relation entre la simulation et la réalité, et une valeur inférieure à 0 montre qu'il n'y a aucun lien entre les deux. En d'autres termes, plus l'efficacité est proche de 1 plus le modèle est précis.

Le tableau 24 donne les différentes valeurs calculées de l'indice de Nash-Sutcliffe qui compare d'une part les observations aux valeurs calculées par le modèle MUSLE non calé et les observations aux valeurs du modèle MUSLE calé.

| Nom du Bassin                  | Paramètres d'échelle après calage |       | Indice de Nash-Sutcliffe (NSE) |            |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------|--------------------------------|------------|
|                                | a                                 | b     | MUSLE                          | MUSLE_Calé |
| Bouregreg à Aguibat Zear       | 11.799                            | 0.548 | 0.38                           | 0.46       |
| Grou à Ras Fathia              | 11.799                            | 0.535 | -0.07                          | 0.02       |
| Korifla à Ain Loudah           | 11.800                            | 0.541 | -0.35                          | 0.30       |
| Machraa à Sidi Mohammed Cherif | 11.799                            | 0.502 | -9.8                           | 0.47       |

**Tableau 24 :** Indice de Nash-Sutcliffe (NSE) aux stations étudiées

D'une manière générale, le modèle MUSLE non calé présente des valeurs de NSE négatives à l'exception du bassin du Bouregreg ce qui montre que les valeurs du modèle sont loin de la réalité. Alors que les valeurs de NSE du modèle calé sont positives variant entre 0.02 et 0.47 ce qui montrent que le modèle calé est meilleur et représente correctement la réalité.

Cependant, pour la continuité de l'expérience, nous poursuivons les calculs sur les 4 bassins, afin de compléter les comparaisons avec les volumes de sédiments déduits des mesures bathymétriques effectuées dans la retenue du barrage SMBA.

Pour le calcul du volume de la matière en suspension on adopte une masse volumique terreuse de 1,5 t/m<sup>3</sup>(Lahlou, 1971). L'envasement du barrage est considéré égal à 9.49Mm<sup>3</sup>/an.

Letableau25résume les résultats des calculs pour l'ensemble des stations hydrologiques.

**Tableau 25:**Tableau récapitulatif des résultats des observations, de l'application du modèle MUSLE, MUSLE\_calé et la bathymétrie pour les 4 sous-bassins du Bouregreg

| Nom du Bassin                 | Transport solide 2016/2017 |                  |                  | Transport solide 2017/2018 |                  |                  |
|-------------------------------|----------------------------|------------------|------------------|----------------------------|------------------|------------------|
|                               | Observation                | MUSLE            | MUSLE calé       | Observation                | MUSLE            | MUSLE calé       |
| Bouregreg                     | 742 334                    | 619 023          | 487 494          | 439 735                    | 888 011          | 694 575          |
| Grou                          | 673 551                    | 875 366          | 517 194          | 740 083                    | 1 446 831        | 896 438          |
| Korifla                       | 68 759                     | 41 083           | 28 881           | 92 324                     | 191 859          | 132 202          |
| Machraa                       | 28 155                     | 75 194           | 27 431           | 48 422                     | 141 249          | 49 146           |
| <b>Total (tonne)</b>          | <b>1 512 799</b>           | <b>1 610 666</b> | <b>1 061 000</b> | <b>1 320 564</b>           | <b>2 667 950</b> | <b>1 772 361</b> |
| <b>Total (Mm<sup>3</sup>)</b> | <b>1.01</b>                | <b>1.07</b>      | <b>0.71</b>      | <b>0.88</b>                | <b>1.78</b>      | <b>1.18</b>      |

**Tableau 26 :** Comparaison des résultats des observations, de l'application du modèle MUSLE, MUSLE\_calé et de la bathymétrie pour les 4 sous-bassins du Bouregreg lors de l'année 2016/2017

| Transport solide 2016/2017 (Mm <sup>3</sup> ) |       | Bathymétrie (Mm <sup>3</sup> ) | Ecart MUSLE/ Observation | Ecart MUSLE-calé/ Observation | Ecart Observation/ Bathymétrie | Ecart MUSLE/ Bathymétrie | Ecart MUSLE_calé/ Bathymétrie |
|-----------------------------------------------|-------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Observation                                   | MUSLE | MUSLE calé                     |                          |                               |                                |                          |                               |
| 1.01                                          | 1.07  | 0.71                           | +5%                      | -30%                          | -89%                           | -89%                     | -93%                          |

**Tableau 27 :** Comparaison des résultats des observations, de l'application du modèle MUSLE, MUSLE\_calé et de la bathymétrie pour les 4 sous-bassins du Bouregreg lors de l'année 2017/2018.

| Transport solide 2017/2018 (Mm <sup>3</sup> ) |       | Bathymétrie (Mm <sup>3</sup> ) | Ecart MUSLE/ Observation | Ecart MUSLE-calé/ Observation | Ecart Observation/ Bathymétrie | Ecart MUSLE/ Bathymétrie | Ecart MUSLE_calé/ Bathymétrie |
|-----------------------------------------------|-------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Observation                                   | MUSLE | MUSLE calé                     |                          |                               |                                |                          |                               |
| 0.88                                          | 1.78  | 1.18                           | +102%                    | +34%                          | -91%                           | -81%                     | -88%                          |

Ainsi, les résultats des tableaux 26 et 27 montrent que le modèle calé approche plus la mesure que le modèle non calé, et que les valeurs observées de transport sédimentaire aux 4 stations qui varient entre  $1.01 \text{ Mm}^3$  et  $0.88 \text{ Mm}^3$  pour les deux années hydrologiques respectives 2016/2017 et 2017/2018, restent largement inférieures à la quantité des sédiments obtenues par les mesures bathymétriques dans le barrage SMBA qui est de l'ordre de  $9.49 \text{ Mm}^3$ .

## Chapitre 5 : Application de l'apprentissage automatique en utilisant des données hydro-climatiques pour la prévision du transport solide.

### 5.1. Apprentissage automatique en développant des modèles ML

Dans cette étude, nous appliquons des modèles Machine Learning (ML) pour surmonter les inconvénients des modèles basés sur les processus et pour améliorer la précision de la prédiction de la concentration journalière des matières en suspension au droit des quatre stations hydrologiques situées à l'entrée immédiate du barrage SMBA au niveau du bassin du Bouregreg. Cet objectif peut être atteint en :

- développant des modèles ML avec des variables d'entrée hydro-climatiques NARX ;
- évaluant la précision de prédiction des modèles ;
- classant les modèles à des fins de simulation sur la base de la métrique de la capacité de généralisation (GA) et de l'analyse d'incertitude.

En effet, dans les zones pauvres en données, les modèles d'apprentissage automatique (ML) peuvent surmonter le manque et la variabilité des paramètres physiques en utilisant les ensembles de données archivées disponibles. Ainsi, leur construction repose sur l'équation statistique d'entrée-sortie plutôt que sur la description du mécanisme impliqué dans le processus. Récemment, plusieurs études ont montré que les modèles basés sur les données sont des outils puissants pour surmonter certaines limitations des modèles basés sur le concept dans la prédiction de l'état des ressources en eau (El Bilali et al., 2021 ; El Bilali et al., 2020 ; El Bilali, 2020 ; Chen et al., 2020 ; Monhanty, 2015).

Quant à la prédiction du transport des sédiments, (Khozani et al., 2020) a appliqué la programmation génétique d'ensemble pour estimer les mouvements de sédiments naissants dans les canaux rectangulaires, et a démontré la supériorité de l'approche appliquée avec un coefficient de corrélation  $r$  d'environ 0,92. De même, dans les études hydrologiques, (Al Dahoul et al., 2021) a appliqué un réseau neuronal à mémoire à long terme (LSMNN) pour prédire la concentration de sédiments en suspension dans la rivière Johor en Malaisie et a trouvé une prédiction de haute précision dans ces modèles. Dans l'étude de (Nourani et al., 2021), trois modèles d'intelligence artificielle ont été utilisés pour estimer la charge sédimentaire en Ethiopie. Dans celle de (Amomah et al., 2020), un modèle de régression linéaire multiple a été appliqué pour prédire le rendement en sédiments en suspension (SSY) dans la rivière Cuyahoga dans l'Ohio à l'aide d'images satellites et de données pluviométriques. Il est important de noter que toutes ces études ont démontré que les modèles basés sur la régression linéaire multiple présentaient une grande précision pour prédire la charge sédimentaire à diverses échelles de bassin.

## 5.2. Description de la zone d'étude

Ce travail concerne le bassin du Bouregreg, qui est situé dans les régions de Rabat-Sale-Kenitra et Beni Mellal-Khenifra (Figure 69). Ce bassin s'étend sur 9970 km<sup>2</sup> et se compose de 4 bassins ; trois rivières principales forment le réseau hydrographique, à savoir : Le fleuve Bouregreg (264 km de long), le fleuve Grou (249 km de long), et le fleuve Mecha-ra (132 km de long). Il est suivi par 9 stations hydroclimatologiques de ruissellement, comme le montre la figure ci-dessous.

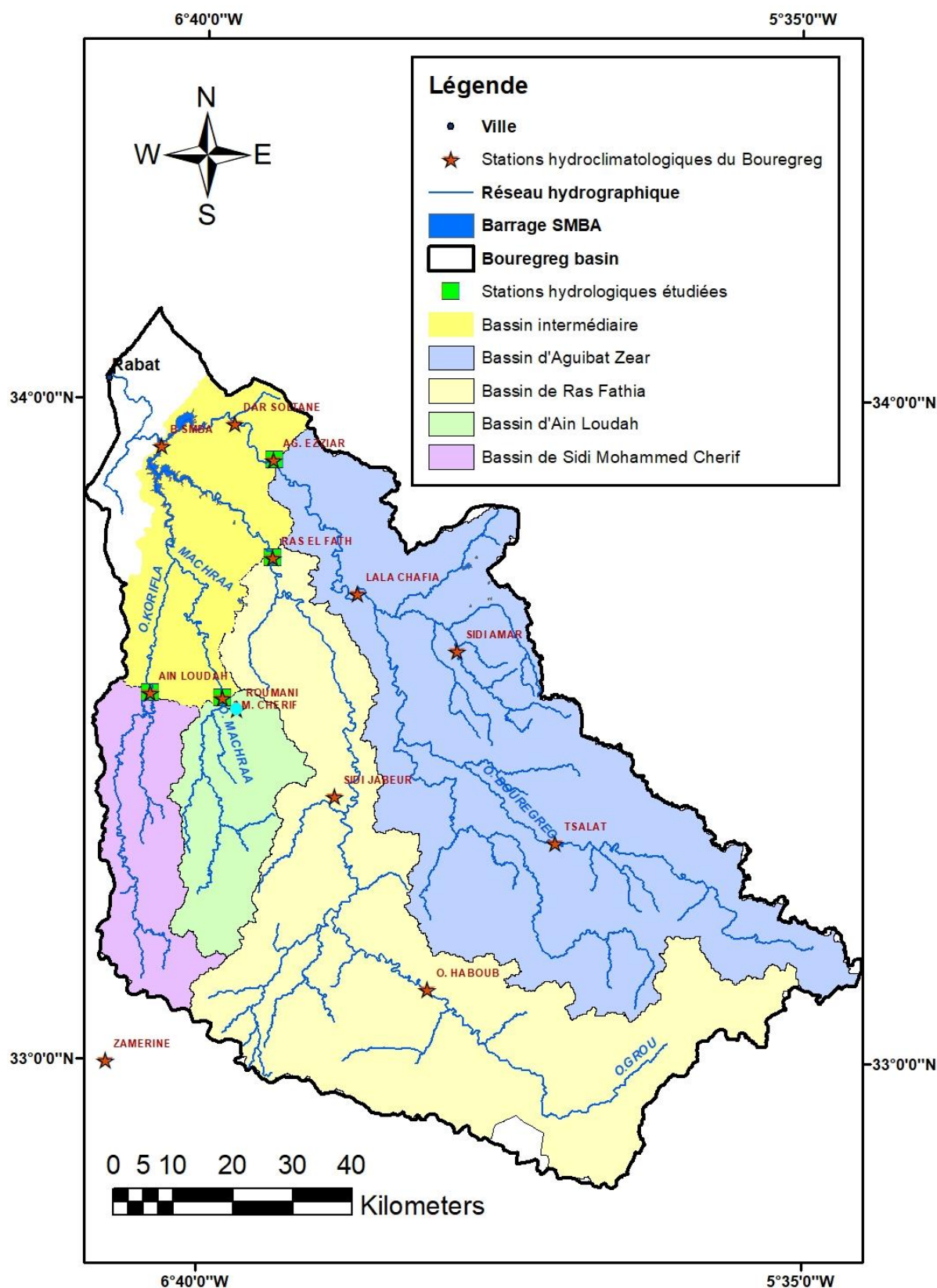


Figure 69. Stations hydro-climatologiques utilisées dans la modélisation en ML

### 5.3. Données utilisées

#### 5.3.1. Concentration des matières en suspension

Pour la modélisation des concentrations des matières en suspension journalière, nous avons choisi quatre stations hydrologiques situées à l'entrée de la retenue du barrage SMBA. Ces stations hydrologiques sont Aguibat Ziar sur la rivière Bouregreg, Ras Fatia sur la rivière Grou, Sidi Mohammed Cherif sur la rivière Mechara et Ain Loudah sur la rivière Korifla. Dans toutes les stations concernées, nous avons effectué un suivi quotidien de la CMEs. Ces stations contrôlent un bassin d'environ 87% de la surface totale du bassin versant. En outre, des échantillons ont été prélevés quotidiennement pendant les périodes de basses eaux et toutes les heures pendant les périodes de hautes eaux. Pour chaque échantillon, la date, l'heure et les valeurs de l'échelle ont été notées sur le flacon. Les échantillons ont ensuite été analysés en laboratoire, filtrés sous vide à l'aide de membranes filtrantes (0,45µm), et pesés. Le tableau 28 résume le nombre d'échantillons de données quotidiens utilisés dans les quatre stations hydrologiques.

**Tableau 28 :** Caractères statistiques des échantillons de la CMEs journalière durant la période d'observation allant du 1<sup>er</sup> Septembre 2016 au 31 Aout 2021 au droit des quatre stations hydrologiques étudiées

| Station hydrologique | Oued      | SBV (km <sup>2</sup> ) | Nombre d'échantillon | Moyen (g/l) | Maxi (g/l) | Min (g/l) | Ecart-type |
|----------------------|-----------|------------------------|----------------------|-------------|------------|-----------|------------|
| Aguibat Ziar         | Bouregreg | 3681                   | 1253                 | 0.83        | 32.72      | 0.00      | 1.08       |
| Ras Fathia           | Grou      | 3485                   | 1634                 | 1.20        | 86.9       | 0.00      | 1.70       |
| S.M. Cherif          | Mechara   | 656                    | 1662                 | 0.63        | 16.89      | 0.00      | 0.76       |
| Ain Loudah           | Korifla   | 699                    | 470                  | 1.05        | 24.7       | 0.00      | 1.47       |

#### 5.3.2. Débits et précipitations utilisés

Pour la prédiction de la charge sédimentaire en suspension au niveau de chacune des 4 stations situées en amont immédiat du barrage de SMBA, nous avons utilisé les données journalières de la pluviométrie et des débits des oueds mesurées au niveau des stations hydrologiques situées au niveau de chaque sous-bassin contrôlé par une des 4 stations étudiées. Ces paramètres ont été choisis car ils sont les principaux facteurs d'influence du processus d'érosion (Wischmeier et al., 1965 ; Williams et al., 1977). Les tableaux suivants donnent la répartition et les caractéristiques des données par sous-bassin de ces stations.

**Tableau 29 :** Caractères statistiques des précipitations durant la période d'observation allant du 1<sup>er</sup> Septembre 2016 au 31 Aout 2021 au droit des postes pluviométriques du bassin du Bouregreg

| Nom du Sous-bassin       | Station hydrologique | N°IRE   | Moyen (mm) | Maxi (mm) | Min (mm) | Ecart-type |
|--------------------------|----------------------|---------|------------|-----------|----------|------------|
| Bouregreg à Aguibat Ziar | Aguibat Ziar         | 3118/13 | 1.3        | 122.5     | 0.0      | 2.23       |
|                          | Lalla Chafia         |         | 0.9        | 42.9      | 0.0      | 1.64       |
|                          | Sidi Amar            |         | 1.1        | 50.0      | 0.0      | 1.94       |
|                          | Tslat                |         | 1.3        | 60.0      | 0.0      | 2.11       |
| Grou à Ras Fathia        | Ras Fathia           | 989/20  | 1.0        | 41.2      | 0.0      | 1.81       |
|                          | Sidi Jabeur          |         | 0.8        | 44.5      | 0.0      | 1.50       |
|                          | O.Haboub             |         | 0.8        | 39.8      | 0.0      | 1.38       |
| Mecharaa à S.M. Cherif   | Mechara              | 2674/21 | 0.9        | 59.6      | 0.0      | 1.57       |
| Korifla à Ain Loudah     | Korifla              | 2673/20 | 0.9        | 54.7      | 0.0      | 1.56       |

**Tableau 30:**Caractères statistiques des débits durant la période d'observation allant du 1<sup>er</sup> Septembre 2016 au 31 Août 2021 au droit des stations hydrologiques du bassin du Bouregreg

| Nom du Sous-bassin       | Station hydrologique | N°IRE   | Moyen (m³/s) | Maxi (m3/s) | Min (m3/s) | Ecart-type |
|--------------------------|----------------------|---------|--------------|-------------|------------|------------|
| Bouregreg à Aguibat Ziar | Aguibat Ziar         | 3118/13 | 4.16         | 199.04      | 0.00       | 5.64       |
|                          | Lalla Chafia         |         | 3.06         | 196.70      | 0.00       | 4.85       |
|                          | Sidi Amar            |         | 0.48         | 24.04       | 0.00       | 0.61       |
|                          | Tslat                |         | 0.81         | 23.50       | 0.00       | 1.04       |
| Grou à Ras Fathia        | Ras Fathia           | 989/20  | 4.58         | 349.21      | 0.00       | 6.59       |
|                          | Sidi Jabeur          |         | 3.74         | 326.54      | 0.00       | 5.29       |
|                          | O.Haboub             |         | 3.52         | 262.37      | 0.00       | 5.43       |
| Mecharaa à S.M. Cherif   | Mechara              | 2674/21 | 0.52         | 48.83       | 0.00       | 0.88       |
| Korifla à Ain Loudah     | Korifla              | 2673/20 | 0.42         | 38.58       | 0.00       | 0.62       |

## 5.4. Méthode adoptée

### 5.4.1. Modèles d'apprentissage automatique

Dans la présente étude, nous avons appliqué les modèles ML basés sur la régression, à savoir: la forêt aléatoire (RF), le boosting adaptatif (AdaBoost), la machine à vecteurs de support pour la régression (SVR), le k-plus proche voisin (k-NN) et le réseau neuronal artificiel (ANN). De plus amples détails sur les modèles basés sur le ML peuvent être trouvés dans les articles de (Aggarwal et al., 2015 ; Bishop et al., 2006 ; Bonnacorso et al., 2018 ;freund et al., 1997 ; Hastie et al., 2009 ; Kubat et al., 2017), mais les sous-sections suivantes fournissent une brève description de ces modèles.



- **Forêt aléatoire**

La forêt aléatoire (RF) est un modèle ML basé sur les arbres (Breiman et al., 2001). La régression et la classification sont effectuées en agrégeant une technique qui fonctionne en construisant un ensemble d'arbres de décision dans l'apprentissage en échangeant et en changeant les covariables pour améliorer la performance de prédiction. La sortie finale (cible) est calculée par la moyenne pondérée des sorties des arbres. L'exécution de ce modèle nécessite un nombre d'arbres formés et une quantité de variable utilisée dans chaque arbre (Liaw et al., 2002). En effet, ces paramètres jouent un rôle important dans la stabilité du modèle et, par conséquent, dans sa précision de prédiction (Oshiro et al., 2012).

- **AdaBoost**

Adaboost est un modèle ML d'ensemble développé par (Freund et al., 1997). Il peut être appliqué à des fins de classification ou de régression. Le boosting adaptatif (Ada-Boost) est un modèle ML d'ensemble basé sur les arbres (Schapire et al., 1999). Récemment, cette approche est apparue comme un modèle de régression efficace dans les sciences de l'environnement, notamment pour les techniques de régression et d'augmentation à base de data (El Bilali et al., 2020 et 2021, Chen et al., 2020 ; Monhanty et al., 2015 ; Khozami et al., 2018 ; Khozami et al., 2020 ; Alabjah et al., 2018 ).

Pour les données,  $S=\{(x_i, y_i), i=1,2,3,...,N\}$ , où chaque  $x_i$  est dans une certaine instance  $X$  et chaque  $y_i$  est dans une certaine cible (sortie)  $Y$ , et, pour une série de tours ( $M$ ), l'algorithme initialise la distribution ( $D$ ) (ou poids) comme suit :

$$D_i^1 = \frac{1}{N} \quad \text{for } i = \{1, \dots, N\}$$

Ensuite, pour  $j=1$  à  $M$ , l'algorithme Adaboost construit des modèles faibles  $h_j$  à partir de l'ensemble de données d'apprentissage en utilisant  $D$ , qui minimise  $\epsilon_j$  et satisfait aux conditions  $\epsilon_j < 0,5$ .  $\epsilon_j$  est une erreur pondérée du  $j$ ème modèle et est donnée par l'équation (2).

$$\epsilon_j = \sum_{i: h_j(x_i) \neq y_i} D_i^j$$

Le poids "confiance"  $\alpha_j$  du  $j$ ème modèle est calculé par l'équation (3).

$$\alpha_j = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 - \epsilon_j}{\epsilon_j} \right)$$

Les distributions pour l'itération suivante ont été mises à jour comme suit :

$$D_i^{j+1} = e^{-y_i h_j(x_i) \alpha_j} D_i^j$$

$$D_i^{j+1} = \frac{D_i^{j+1}}{\sum_{i=1}^N D_i^{j+1}}$$

La prédiction pour le nouvel ensemble de données a été effectuée en combinant le vote majoritaire pondéré des modèles  $h_j$ .

$$H(x') = \text{sign}[\sum_j^M \alpha_j h_j(x')]$$

- **Machine à vecteurs de support (SVM)**

La machine à vecteurs de support (SVM) est une technique discriminante qui a été introduite pour la première fois par (Vapnik, 2000). Elle est basée sur un hyperplan afin de minimiser l'erreur et la fonction noyau, telle que la fonction de base radiale (Gosh, 2010), sigmoïde, noyau linéaire et fonction polynomiale. Cette méthode a démontré une prédiction de haute précision pour plusieurs applications de régression (El Bilali et al., 2021).

Pour la modélisation du système (S) avec l'ensemble de données d'observation ( $D_s$ ),  $D_s = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ , où  $x_i$  représente les entrées et  $y_i$  les sorties, avec une fonction linéaire, comme le montre l'équation suivante.

$$f(x) = \langle \omega \times \phi(x) + b \rangle$$

La fonction optimale est la minimisation de la fonction (a) (soumise à l'équation (9)). Par conséquent, les fonctions de perte, telles que les méthodes  $\epsilon$ -insensible, quadratique et Hubber, peuvent être utilisées.

$$\min(\omega, b, \xi^-, \xi^+) = \frac{1}{2} \times \|\omega^2\| + C \times \sum_{i=1}^n (\xi i^- + \xi i^+) \quad (a)$$

$$\text{Subject to } \left\{ \begin{array}{l} y_i - \omega^T \times \phi(x) - b \leq \epsilon + \xi i^- \\ -y_i + \omega^T \times \phi(x) + b \leq \epsilon + \xi i^+ \\ \xi i^-, \xi i^+ \geq 0 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} \quad (b)$$

Où  $\phi(x)$  est une fonction de noyau ( $k$ ), telle que les fonctions polynomiales, à base radiale et linéaires ;  $\omega$  et  $b$  représentent les vecteurs de poids et de base;  $C$  est une valeur spécifiée pour pénaliser l'erreur d'apprentissage ; et  $\xi_i^-$  and  $\xi_i^+$  sont les contraintes inférieures et supérieures sur la sortie.

Cette étude a adopté la fonction de base radiale (RBF) donnée par l'équation de RMSE citée plus loin comme fonction noyau (Ghosh, 2010).

$$k(x_i, x_j) = \exp(-\gamma |x_i - x_j|^2)$$

- **Réseau neuronal artificiel (ANN)**

Les modèles ANN sont construits par trois types de couches, à savoir : la couche d'entrée, les couches cachées (HL) et la couche de sortie (Dawson et al., 1998). Elles sont interconnectées par des neurones, qui sont caractérisés par un poids et un biais. Les variables d'entrée pondérées additionnées au biais de la couche sont transformées de la  $j$ ème couche à la  $j+1$ ème couche par la fonction de transfert ( $f$ ), et ainsi de suite, jusqu'à la sortie.

La phase d'apprentissage est répétée en modifiant les poids et les biais des couches jusqu'à ce qu'une bonne précision de prédiction (erreur quadratique moyenne) soit atteinte. Pour simplifier cette méthode, prenons un modèle simple avec un seul HL. Les sorties ( $Y_k$ ) sont données par l'équation suivante (Schalkoff, 1997) :

$$Y_k = f_k\left(\sum_{i=1}^m W_{jk} \times f_j\left(\sum_{i=1}^n X_i W_{ij}\right)\right) + W_0$$

Où  $n$  est le nombre de variables d'entrée,  $m$  est les neurones de la HL,  $p$  est les neurones de la couche de sortie,  $W_0$  est le biais, et  $W_{jk}$  et  $W_{ij}$  sont les poids entre le  $j$ ème neurone et le  $k$ ème neurone de sortie et entre le  $i$ ème neurone et le  $j$ ème neurone, respectivement, tandis que  $f_k$  et  $f_j$  sont les fonctions de transfert des neurones  $k$  et  $j$  des couches de sortie et cachée, respectivement.

- **K-Nouveau Voisin (k-NN)**

L'algorithme k-NN est une méthode basée sur la mémoire (méthode non paramétrique) ; les valeurs prédites sont estimées à partir des informations sur les valeurs observées voisines. Les valeurs estimées sont obtenues par la moyenne des  $k$  valeurs observées les plus proches et donnent plus de poids aux plus proches, comme le montrent les équations suivantes.

$$\bar{f}(\vec{x}_0) = \sum_{i=1}^k \lambda_{i0} f(\vec{x}_i)$$

$\bar{f}(\vec{x}_0)$  est la réponse prédite,  $\vec{x}_0$  est le vecteur des entrées indépendantes,  $f(\vec{x}_i)$  est la réponse observée,  $\vec{x}_i$  est le vecteur des k valeurs observées les plus proches, et  $\lambda_{i0}$  est le poids entre les  $\vec{x}_0$  et  $\vec{x}_i$ , et est donné par l'équation suivante.

$$\lambda_{i0} = \frac{\sum_{i=1}^k |\vec{x}_i - \vec{x}_0|}{|\vec{x}_i - \vec{x}_0|}$$

Comme le montre cette équation, le nombre k est important pour les performances du modèle. Il faut noter qu'il existe d'autres fonctions de distance telles que l'Euclidienne, la Shebyshev et la Mahalanobis.

#### 5.4.2. Méthode d'entrée NARX

Dans cette étude, nous avons proposé une modélisation basée sur NARX pour incorporer la réponse retardée de la charge de sédiments en suspension aux événements hydrologiques. En considérant N ensembles de données liés au système (S) à modéliser à l'aide d'algorithmes ML,  $S = \{(X_i, y_i), i=1, 2, \dots, N\}$ , où  $X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3}, \dots, x_{i,p}]^T$  est la matrice d'entrée (p est le nombre d'entrées),  $y_i = [y_{i,1}, y_{i,2}, y_{i,3}, \dots, y_{i,q}]^T$  est le vecteur de sortie, et i est l'instant. Par conséquent, les algorithmes ML basés sur NARX pour prédire le CMes ont des variables d'entrée NARX comme suit :

$$y_i = MLf_m(\varphi(i), \theta)$$

où  $\varphi(i) = (x_i, x_{i-1}, x_{i-2}, \dots, x_{i-l_x})$  est le vecteur de régression,  $\theta$  est le vecteur de paramètres,  $MLf_m$  est une fonction de modèle ML inconnue, et  $l_x$  et  $l_y$  désignent les numéros de retard de l'entrée x et de la sortie y, respectivement. Par conséquent, les matrices d'entrée finales  $X_i^T$  et le vecteur de sortie  $y_i^T$  pour la formation des modèles ML sont les suivants :

$$\begin{cases} \mathbf{X}^T = [\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{i-1}, \mathbf{x}_{i-2}, \dots, \mathbf{x}_{i-l_x}] \\ \mathbf{y}^T = \mathbf{y}_i \\ \mathbf{max}(l_x) < i \leq N \end{cases}$$

La fonction inconnue  $MLf_m$  des modèles comprend, à titre d'exemple, l'hyperparamètre, les fonctions de perte, et les structures du modèle selon le modèle. Par exemple, le nombre de couches cachées et le transfert de fonction pour le modèle ANN, et la fonction noyau et le paramètre de pénalité (C) pour le modèle SVR. Cependant, les nombres de  $MLf_m$  et de lag sont identifiés pendant le processus de réglage en utilisant des procédures d'essai-erreur.

Dans cette étude, nous avons utilisé le langage Python intégré à la plateforme Anaconda. Les bibliothèques Pandas, Matplotlib et Scikit-learn ont été importées et utilisées. Pandas et Matplotlib sont les bibliothèques utilisées pour le chargement des données et les processus de visualisation, respectivement. La bibliothèque Scikit-learn a été utilisée pour la mise en œuvre des modèles ML à régresseur.

#### 5.4.3. Evaluation des performances des modèles

Pour évaluer les performances des modèles de prédiction, plusieurs indices et métriques peuvent être utilisés, tels que le coefficient de corrélation, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'efficacité de Nash-Sutcliffe.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Pi - Oi)^2}{n}}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Pi - \bar{O})^2}$$

$$r = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})(Pi - \bar{P})}{[\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (Pi - \bar{P})^2]^{0.5}} \right)$$

$O_i$  et  $P_i$  sont les valeurs observées et simulées par le modèle, respectivement ;  $\bar{O}$  représente la moyenne des valeurs observées ; et  $n$ =nombre d'observations utilisées.

Cependant, dans cette étude, nous avons utilisé la capacité de généralisation comme une métrique supplémentaire pour évaluer les modèles. Cette métrique a été définie par (Yoon et al., 2011) à travers l'équation suivante :

$$GA = \frac{RMSE (validation)}{RMSE (training)}$$

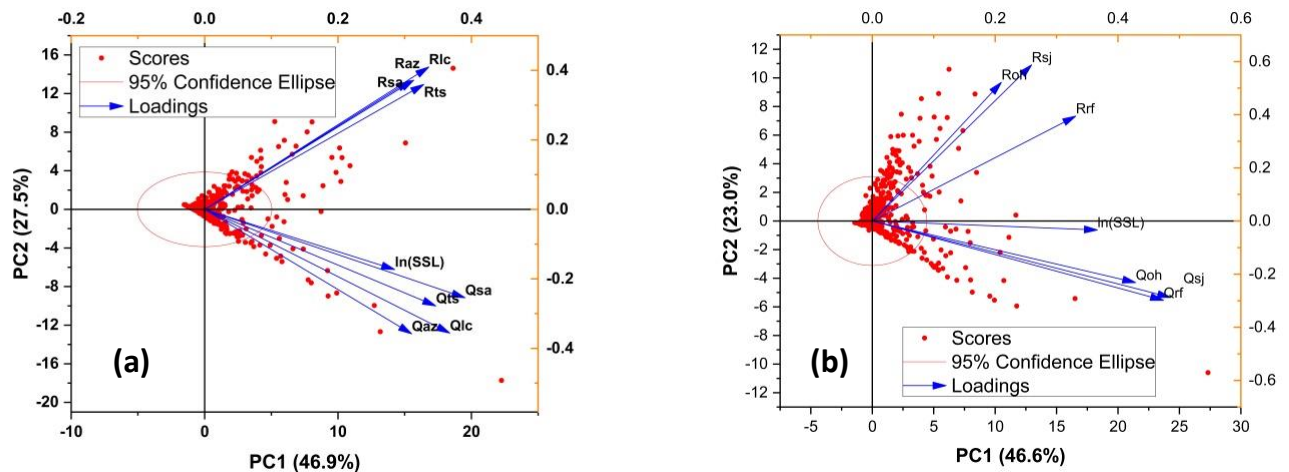
Pour classer les modèles à des fins de simulation, (EL Bilali et al, 2022) ont suggéré la classification des modèles d'apprentissage automatique selon les catégories suivantes: modèles parfaits, excellents, bons et médiocres en termes de GA :

- Si  $GA=1$ , le modèle est parfait ;
- Si  $0,75 \leq GA < 1$  ou  $1 < GA \leq 1,35$ , le modèle est excellent ;
- Si  $1,35 < GA \leq 2$  ou  $0,5 \leq GA < 0,75$ , le modèle est bon ;
- Si  $GA > 2$  ou  $GA < 0,5$  ; le modèle est mauvais et considéré comme inadapté à des fins de simulation.

## 5.5. Résultats

### 5.5.1. Analyse exploratoire des données

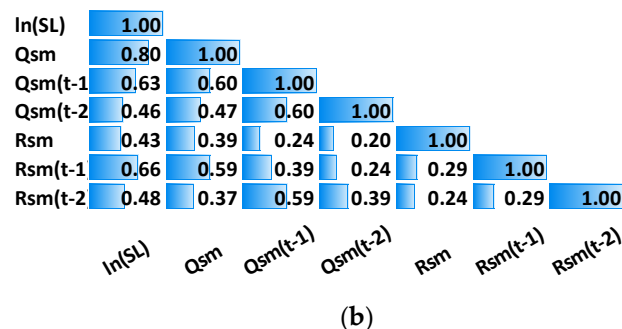
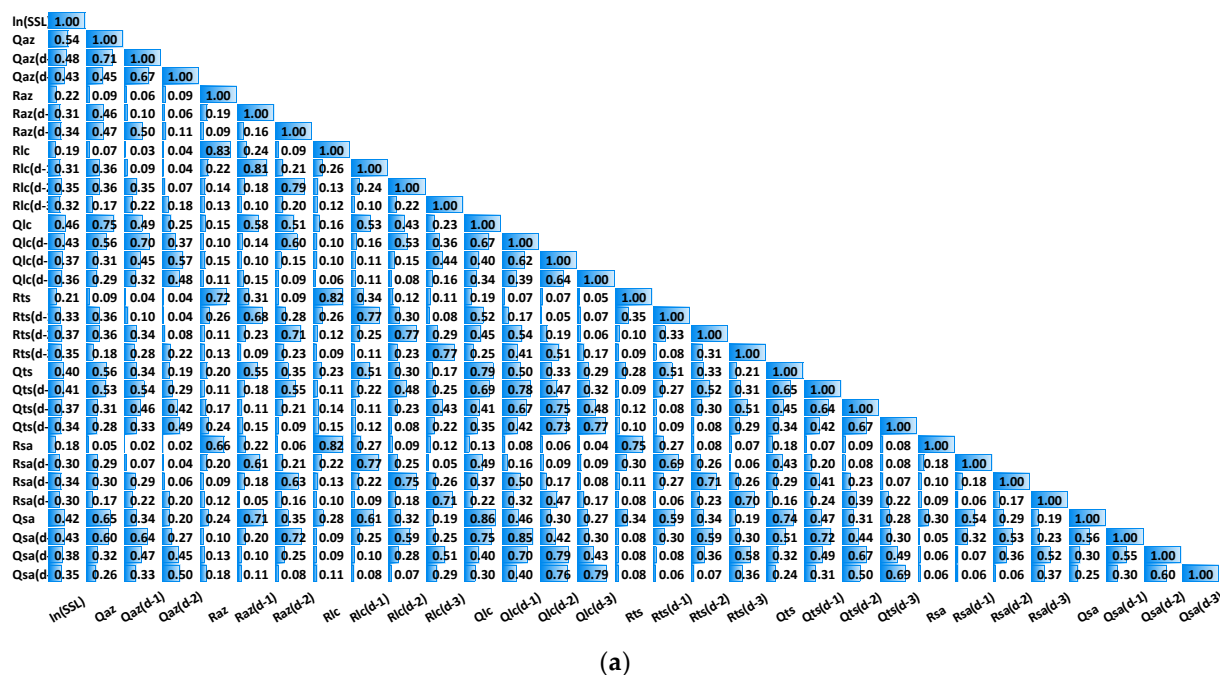
Dans le développement des modèles Machine Learning (ML), la sélection des variables caractéristiques est un processus clé dans l'amélioration de la précision de prédiction et de la capacité de généralisation des modèles. Bien qu'il s'agisse de modèles de type boîte noire qui n'expliquent pas le mécanisme impliqué dans le processus à modéliser, la sélection des variables d'entrée impliquées pour la formation des modèles ML est nécessaire. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur les variables hydro-climatiques afin de prédire la charge sédimentaire en suspension, à savoir: les précipitations dans les bassins et les rejets en amont et en aval. L'analyse en composantes principales a été réalisée pour démontrer l'importance des variables sélectionnées, notamment pour le bassin suivi par plusieurs stations hydrologiques. La figure 70 illustre l'ACP des jeux de données du bassin du Bouregreg (Aguibat Ziar) et du bassin du Grou (station de Ras Fathia). L'ACP des jeux de données du Bouregreg (Aguibat Ziar) a révélé qu'il y a 74,4% d'information concernant la variance totale, dont 46,9% est expliquée par PC1 et 27,5% par PC2 (Figure 70a). Comme pour le bassin du Grou, l'ACP a montré que 69,4% de l'information sur la variance totale est expliquée par la PC1 (46,6%) et la PC2 (23,0%). Ces résultats démontrent l'importance des variables d'entrée. Cependant, les valeurs antécédentes de ces variables peuvent avoir un impact sur la charge en sédiments en suspension, car l'érosion du sol ne dépend pas seulement des conditions actuelles mais aussi des conditions initiales. Pour cette raison, l'utilisation des variables d'entrée NARX est suggérée pour améliorer la précision de prédiction des modèles.

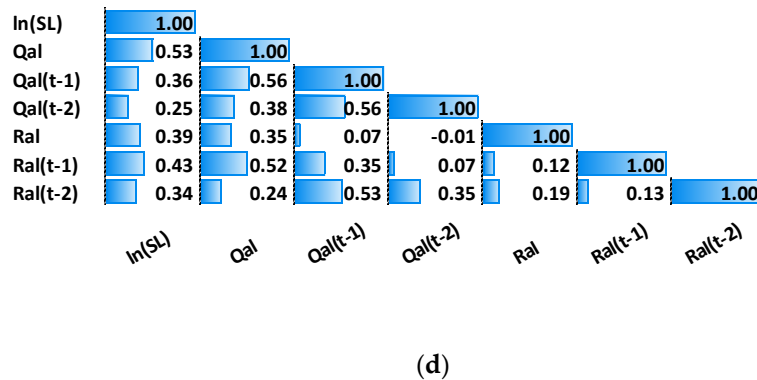
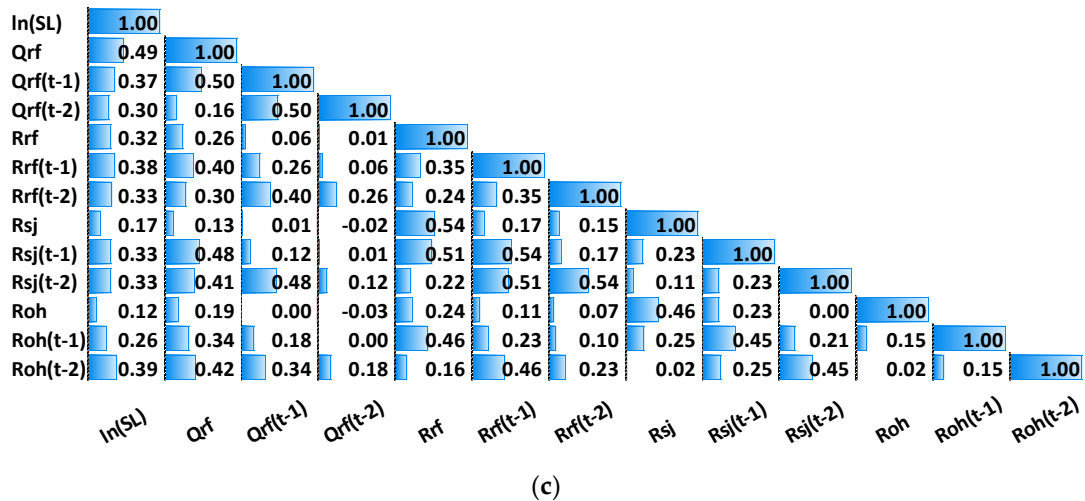


**Figure 70.** Analyse en composantes principales (ACP). (a) : ACP des données enregistrées dans le bassin du Bouregreg ; In(SSL) est le logarithme népérien du solide en suspension ; Ras et Qas sont les précipitations et le débit à la station Aguibat Ziar ; Rlc et Qlc sont les précipitations et le débit à la station Lala Chafia ; Rts et Qts sont les précipitations et le débit à la station Tsalat ; Rsa et Qsa sont

les précipitations et le débit à la station Sidi Amar. (b) : ACP de l'ensemble des données enregistrées au Groubasin.

Une analyse de l'ensemble des données basée sur la corrélation de Pearson a été réalisée pour explorer la relation potentielle entre les variables, y compris les valeurs antécédentes. La figure 71 présente la matrice de corrélation des variables dans les bassins étudiés. Il a été observé que, à l'exception du débit aux stations de Ras Fathia et de Sidi Jabeur, toutes les autres variables ne sont pas fortement intercorrélées. De tels résultats démontrent que les variables sélectionnées ne sont pas redondantes dans la prédiction du cMES. Il est intéressant de noter qu'à l'exception de certains cas, les variables antécédentes de la pluviométrie et du débit à (jour-1) et (jour-2) sont plus corrélées que la variable réelle. Par exemple, les variables réelles aux sorties du bassin sont plus importantes que celles des jours antécédents. Ceci est dû à la réponse retardée de cMES aux événements hydrologiques du bassin. Par conséquent, il est suggéré d'intégrer les conditions hydroclimatiques antécédentes en tant que variables d'entrée afin d'améliorer la précision de prédiction des modèles.





**Figure 71.** Matrice de corrélation des variables. (a) : Matrice de corrélation des variables à la station Aguibat Ziar (az) ; (b) : matrice de corrélation des variables à la station Sidi Mohammed Cherif (sm) ; (c) matrice de corrélation des variables à la station Ras Fathia (rf) ; (d) : matrice de corrélation des variables à la station Ain Loudah (al). Le logarithme népérien de la charge sédimentaire en suspension  $\ln(\text{SSL})$  est positivement corrélé avec les débits et les précipitations dans le bassin. Les pluies et les débits au (jour-i) sont plus importants.

### 5.5.2. Processus d'apprentissage des modèles de Machine Learning

Dans cette étape, cinq modèles ML avec des variables d'entrée NARX, à savoir la forêt aléatoire, AdaBoost, la machine à vecteur de support (SVM), k-nearestneighbor (kNN) et le réseau neuronal artificiel (ANN), ont été formés, réglés et évalués par validation croisée avec un certain nombre de plis ( $k = 10$ ) pour améliorer la précision de la prédiction. Le processus de réglage comprend la modification de l'hyperparamètre et des fonctions de transfert des modèles. Le tableau 31 présente les paramètres adoptés dans cette étude.



**Tableau 31:**Hyper-paramètres adoptés et fonctions des modèles entraînés.

| Modèle          | Parametres/Fonctions/Algorithme                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>RF</b>       | <b>50 Arbres</b>                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>AdaBoost</b> | Fonction de perte : exponentielle<br>taux d'apprentissage : 0.5<br>Nombre d'estimateurs : 250<br>C=350                                                                                                                                            |
| <b>SVR</b>      | Fonction kernel : RBF ( $\gamma=1.3$ )<br>$\epsilon$ – fonction de perte, $\epsilon=0.002$                                                                                                                                                        |
| <b>k-NN</b>     | k =5<br>Fonction de distance:Euclidian                                                                                                                                                                                                            |
| <b>ANN</b>      | 3 couches<br>12 neurones dans la couche cachée<br>Algorithme : Levenberg<br>Activation de la fonction : Sigmoidé<br>Identité dans la couche de sortie<br>Nombre d'époques : 1000<br>Taux d'apprentissage : 0.01<br>Coefficient de momentum : 0,85 |

RF: random forest; **AdaBoost**: adaptive boosting; **SVR**: support vector regression; **k-NN**: k-nearest neighbor; **ANN**: artificial neural network.

Le tableau 32 présente la performance du ML pendant la phase d'apprentissage. Ce tableau montre clairement que tous les modèles ont une précision potentielle élevée dans la prédiction des concentrations journalière de la matière en suspension (CMES) dans quatre bassins principaux du Grand Bassin du Bouregreg, justifiée par le fait que le NSE varie de 0,57 à 0,84 dans la station d'Aguibat Ziar, de 0,61 à 0,8 dans la station de Ras Fathia, de 0,41 à 0,62 pour la station de SM Cherif, et de 0,66 à 0,76 dans la station d'Ain Loudah. Il a été observé que les modèles de forêt aléatoire et AdaBoost ont été plus performants que les autres modèles pendant la phase d'apprentissage.

**Tableau 32:** Performances du modèle pendant la phase d'apprentissage automatique.

| <i>Modèle</i>              | <i>r</i> | <i>RMSE</i> | <i>NSE</i> |               |
|----------------------------|----------|-------------|------------|---------------|
|                            |          |             | <i>ML</i>  | Musle_Calibré |
| <i><u>Aquibat Ziar</u></i> |          |             |            |               |
| Random Forest              | 0.92     | 1.18        | 0.84       | 0.46          |
| AdaBoost                   | 0.92     | 1.20        | 0.84       |               |
| SVM                        | 0.76     | 1.95        | 0.57       |               |
| kNN                        | 0.88     | 1.49        | 0.75       |               |
| Neural Network             | 0.79     | 1.83        | 0.62       |               |
| Ras Fathia                 |          |             |            |               |
| Random Forest              | 0.89     | 1.50        | 0.80       | 0.02          |
| AdaBoost                   | 0.89     | 1.54        | 0.78       |               |
| SVM                        | 0.78     | 2.08        | 0.61       |               |
| kNN                        | 0.85     | 1.83        | 0.70       |               |
| Neural Network             | 0.82     | 1.90        | 0.67       |               |
| <i><u>SM Cherif</u></i>    |          |             |            |               |
| Random Forest              | 0.79     | 1.62        | 0.62       | 0.47          |
| AdaBoost                   | 0.76     | 1.74        | 0.56       |               |
| SVM                        | 0.73     | 1.79        | 0.54       |               |
| kNN                        | 0.68     | 2.01        | 0.41       |               |
| Neural Network             | 0.76     | 1.70        | 0.58       |               |
| <i><u>Ain Loudah</u></i>   |          |             |            |               |
| Random Forest              | 0.87     | 1.91        | 0.76       | 0.30          |
| AdaBoost                   | 0.84     | 2.13        | 0.70       |               |
| SVM                        | 0.81     | 2.26        | 0.66       |               |
| kNN                        | 0.83     | 2.26        | 0.66       |               |
| Neural Network             | 0.84     | 2.12        | 0.70       |               |

### 5.5.3. Validation des modèles ML

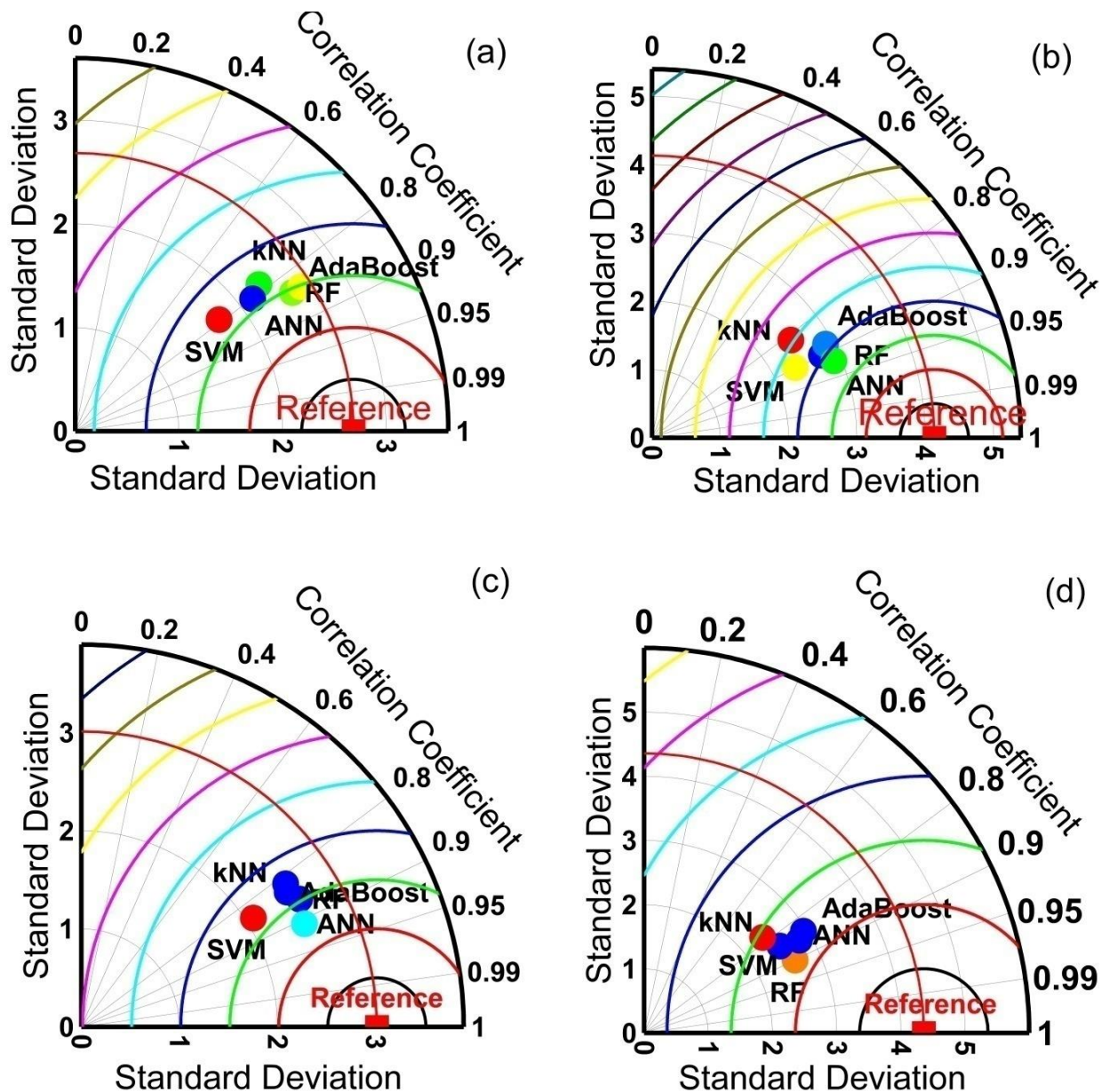
Cette étape a été réalisée afin d'évaluer si les modèles ML formés sont généralisables afin de prédire la charge en sédiments en suspension pour le jeu de données non vu pendant la phase de formation. A cette fin, nous avons simulé le CMES enregistrée pendant l'année 2021 et évaluée les performances du modèle. Le tableau 32 présente les performances du modèle pendant la phase de validation. Il a été observé que, à l'exception du modèle Kenn pour la prédiction de la charge sédimentaire en suspension dans la station d'Ain Loudah, la plupart des modèles ont présenté une bonne précision pendant la phase de validation, avec un NSE allant de 0,77 à 0,55, un  $r$  allant de 0,82 à 0,92, et un RMSE allant de 1,34 à 2,96  $\ln(t.d-1)$ .

**Tableau 33:** Performances du modèle pendant la phase de validation.

| <i>Modèle</i>              | <i>r</i> | <i>RMSE <math>\ln(t.d^{-1})</math></i> | <i>NSE</i> |
|----------------------------|----------|----------------------------------------|------------|
| <b><u>Aguibat Ziar</u></b> |          |                                        |            |
| RF                         | 0.84     | 1.52                                   | 0.68       |
| AdaBoost                   | 0.84     | 1.51                                   | 0.68       |
| SVM                        | 0.79     | 1.68                                   | 0.61       |
| kNN                        | 0.78     | 1.81                                   | 0.55       |
| ANN                        | 0.80     | 1.61                                   | 0.64       |
| <b><u>Ras Fathia</u></b>   |          |                                        |            |
| RF                         | 0.90     | 2.27                                   | 0.70       |
| AdaBoost                   | 0.88     | 2.38                                   | 0.67       |
| SVM                        | 0.90     | 2.35                                   | 0.68       |
| kNN                        | 0.82     | 2.56                                   | 0.62       |
| ANN                        | 0.92     | 1.99                                   | 0.77       |
| <b><u>SM Cherif</u></b>    |          |                                        |            |
| RF                         | 0.86     | 1.53                                   | 0.74       |
| AdaBoost                   | 0.84     | 1.66                                   | 0.69       |
| SVM                        | 0.85     | 1.69                                   | 0.69       |
| kNN                        | 0.82     | 1.75                                   | 0.66       |
| ANN                        | 0.91     | 1.34                                   | 0.80       |
| <b><u>Ain Loudah</u></b>   |          |                                        |            |
| RF                         | 0.90     | 2.60                                   | 0.64       |
| AdaBoost                   | 0.84     | 2.76                                   | 0.61       |
| SVM                        | 0.84     | 2.96                                   | 0.55       |
| kNN                        | 0.78     | 3.19                                   | 0.47       |
| ANN                        | 0.86     | 2.72                                   | 0.61       |

Afin de comparer les modèles formés pour simuler le CMES enregistrée pendant l'année 2021, des diagrammes de Taylor ont été tracés, et sont présentés dans la Figure 72. Ils montrent que

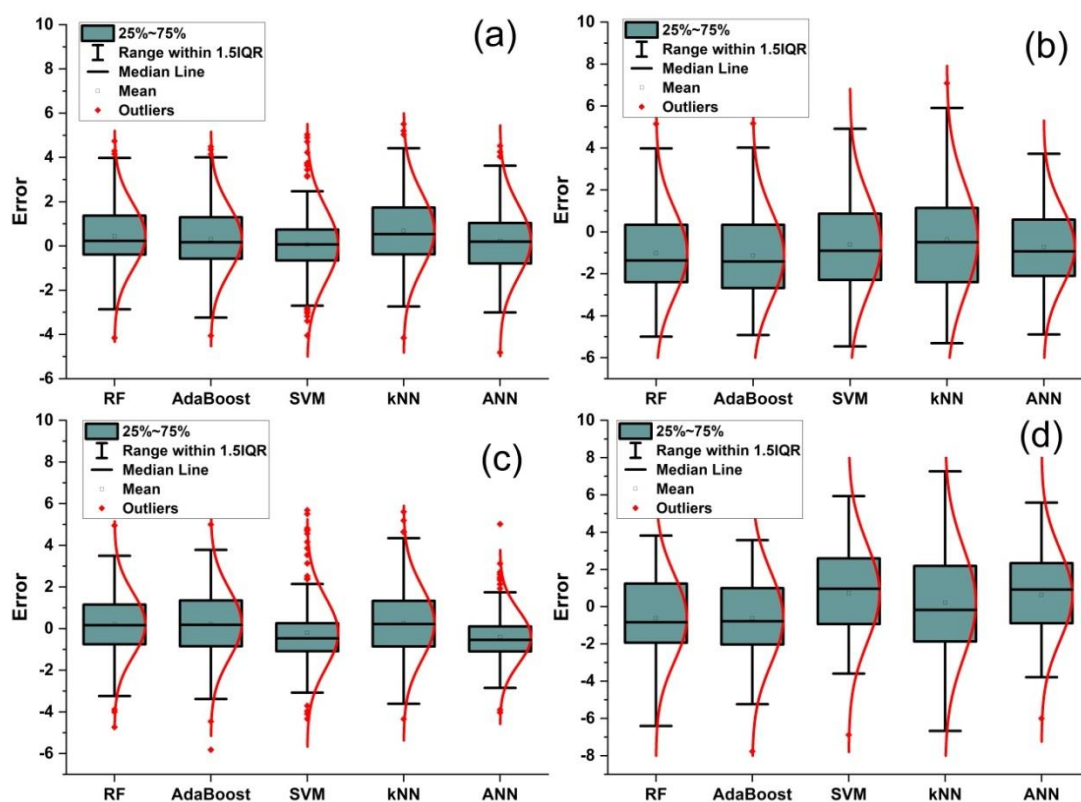
les modèles AdaBoost et RF sont plus performants que les autres modèles pour prédire le CMES à Aguibat Ziar. Le modèle ANN est plus précis que les autres pour simuler le SSL dans les stations Ras Fathia et SM Cherif. Quant à la station Ain Loudah, le modèle RF est plus précis, suivi par les modèles ANN, RF et SVM. Cependant, le modèle kNN a la plus faible précision dans la prédiction du SSL dans toutes les stations par rapport aux autres modèles. Cependant, selon les suggestions de [48], il a des performances assez acceptables ( $NSE > 0.5$ ) pour les stations SM Cherif, Ras Fathia, et Aguibat Ziar.



**Figure 72.** Diagrammes de Taylor pour comparer les modèles d'apprentissage automatique formés, à savoir la forêt aléatoire (RF), le boosting adaptatif (AdaBoost), le réseau de neurones artificiels (ANN) et le k-nearestneighbor (kNN). (a) Comparaison des modèles ML pour la prédiction de la charge de sédiments en suspension à la station d'Aguibat Ziar ; (b) : comparaison des modèles ML pour la prédiction de SSL à la station de Ras Fathia ; (c) :

comparaison des modèles ML à la station de SM Cherif ; (d) : comparaison des modèles ML à la station d'Ain Loudah.

En outre, la figure 73 illustre le boxplot et la distribution normale ajustée des erreurs du modèle dans la simulation du CMES recodée en 2021. Cette figure montre que les erreurs du modèle obéissent à une distribution gaussienne, car elles sont uniformément réparties sur de petites valeurs. La figure 73a montre que le modèle SVM a une boîte étroite par rapport aux autres modèles dans la simulation du CMES à Aguibat Ziar, et même son NSE est inférieur à ceux des modèles Adaboost, RF et ANN. Ce résultat est justifié par le fait que le NSE est sensible aux valeurs aberrantes (figure 73a). Un résultat similaire a été observé pour les modèles kNN et SVM dans la prédiction du CMES à la station SM Cherif (Figure 73c). La distribution normale des erreurs des modèles démontre leur stabilité dans la simulation du CMES pour l'ensemble des données non vues pendant le processus d'apprentissage.



**Figure 73.** Distribution des erreurs du modèle pendant la simulation de la charge de sédiments en suspension enregistrée en 2021, à savoir forêt aléatoire (RF), boosting adaptatif (AdaBoost), réseau neuronal artificiel (ANN) et k-plus proche voisin (kNN). Les lignes rouges représentent les distributions normales ajustées de l'erreur, et les points en dehors des diagrammes en boîte sont les valeurs aberrantes des erreurs.

#### 5.5.4. Capacité de généralisation et incertitudes

Les résultats de l'analyse d'incertitude et de la classification des modèles développés sont présentées dans le tableau suivant. En effet, les résultats de l'analyse ont montré que la plupart des modèles ont une AG qui est bonne à excellente, ce qui démontre le bon

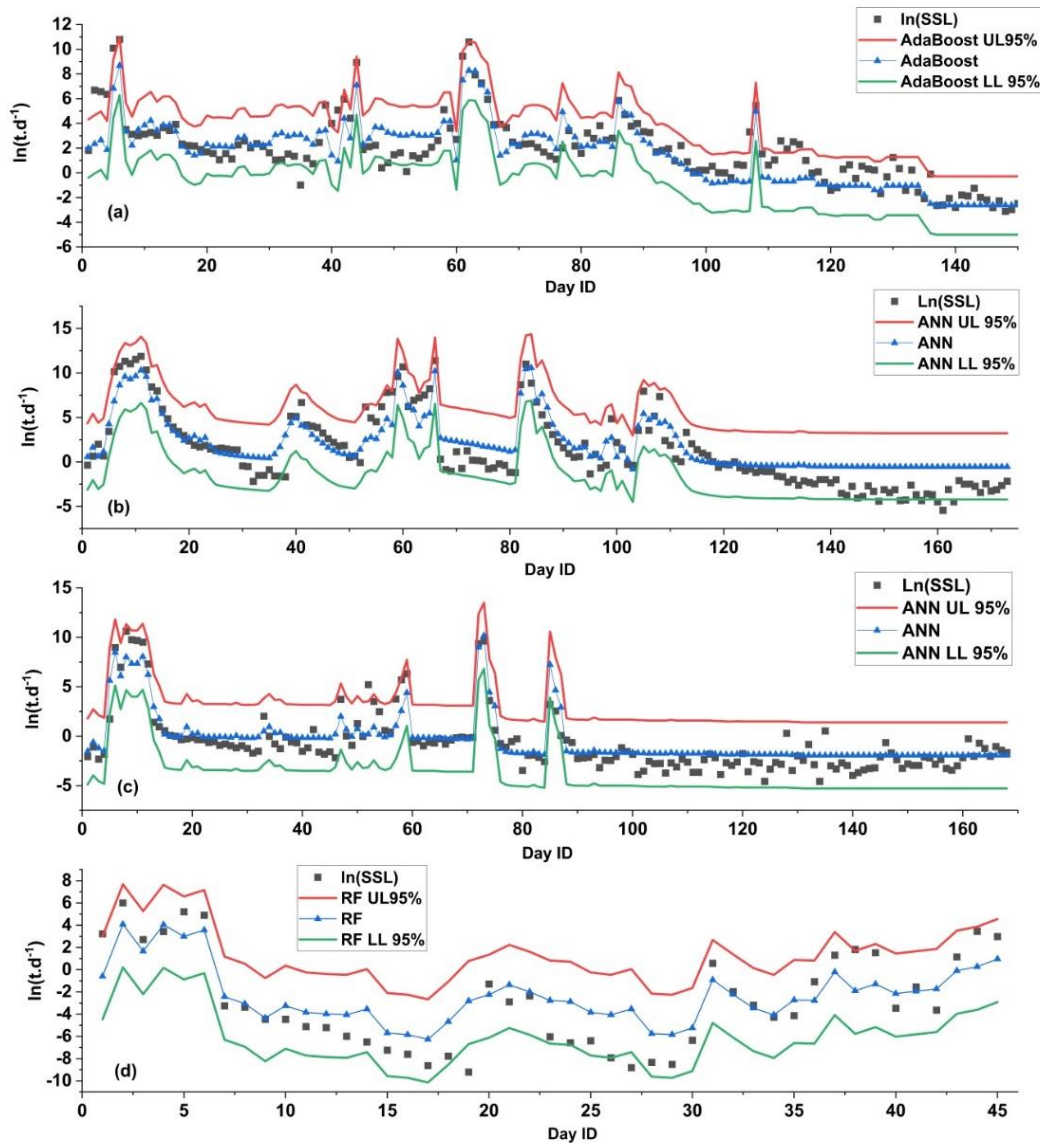
apprentissage de ces modèles et, par conséquent, leur utilité pour simuler le CMEs dans le bassin étudié. De plus, les intervalles de confiance avec un niveau de signification de 95% (z-score=1.96) des modèles ont été calculés, et sont présentés dans le Tableau 34.

**Tableau 34:** Capacité de généralisation, erreurs limites inférieures et erreurs limites supérieures des modèles.

| <i>Bassin</i> |        | <i>RF</i> | <i>AdaBoost</i> | <i>SVM</i> | <i>kNN</i> | <i>ANN</i> |
|---------------|--------|-----------|-----------------|------------|------------|------------|
| Aguibat Ziar  | GA     | 1.29      | 1.26            | 0.86       | 1.21       | 0.88       |
|               | LL 95% | -2.88     | -2.93           | -3.71      | -3.88      | -3.50      |
|               | UL 95% | 2.73      | 2.80            | 3.78       | 2.87       | 3.71       |
| Ras Fathia    | GA     | 1.52      | 1.54            | 1.13       | 1.40       | 1.04       |
|               | LL 95% | -3.02     | -3.05           | -4.11      | -3.92      | -3.68      |
|               | UL 95% | 2.85      | 3.00            | 4.03       | 3.02       | 3.78       |
| SM Cherif     | GA     | 0.94      | 0.96            | 0.94       | 0.87       | 0.79       |
|               | LL 95% | -3.22     | -3.20           | -3.55      | -4.35      | -3.35      |
|               | UL 95% | 3.14      | 3.57            | 3.45       | 3.26       | 3.33       |
| Ain Loudah    | GA     | 1.36      | 1.30            | 1.31       | 1.41       | 1.28       |
|               | LL 95% | -3.88     | -4.26           | -4.47      | -4.89      | -4.18      |
|               | UL 95% | 3.59      | 4.08            | 4.41       | 3.65       | 4.16       |

GA : capacité de généralisation ; LL 95 % : limite inférieure avec un niveau de confiance de 95 % ; UL 95 % : limite supérieure avec un niveau de confiance de 95 % ; SVM : machine à vecteurs de support ; kNN : k-nearestneighbor ; Adaboost : boosting adaptatif.

D'après le tableau 34 et la figure 4, les meilleurs modèles pour prédire le SSL dans les stations Aguibat Ziar, Ras Fathia, SM Cherif et Ain Loudah sont respectivement Adaboost, ANN et la forêt aléatoire. La figure 74 présente une comparaison graphique du  $\ln(\text{CMES})$  observé et simulé par rapport aux erreurs UL et LL fournies par ces modèles. Cette figure montre que, à l'exception de cas isolés, la plupart des valeurs  $\ln(\text{CMES})$  simulées sont incluses dans l'intervalle de confiance avec un niveau de 95%. Plus important encore, les modèles sont capables de prédire les pics CMES, comme le montre la figure 74.



**Figure 74.** Graphiques superposés du  $\ln(SSL)$  mesuré et simulé avec les limites supérieures et inférieures à 95 % en utilisant les modèles ML les mieux adaptés, à savoir (a) modèle de boosting adaptatif (Adaboost) pour simuler le SSL à AguibatZiar ; (b) modèle de réseau neuronal artificiel (ANN) pour simuler le SSL dans la station de Ras Fathia.

### 5.5.5. Discussions

Le transport de sédiments à l'échelle du bassin est un phénomène hautement dynamique et dépend d'une multitude de variables combinées qui font de son estimation une tâche difficile. En effet, plusieurs modèles basés sur les processus se sont avérés être des outils précieux pour prédire la charge sédimentaire à l'échelle du bassin. Cependant, cette approche nécessite la surveillance de plusieurs paramètres physiques pour les processus de calibration et de validation qui affectent la précision du modèle développé, en particulier dans les zones mal surveillées. Par exemple, dans le bassin du Bouregreg, le modèle MUSLE avait un NSE inférieur à 0,5 dans la prédiction du rendement sédimentaire dans les stations d'Aguibat Ziar, Ras



Fathia, SM Cherif, et Ain Loudah (Ezzaouini et al., 2020). De manière intéressante, (Morias et al., 2007) a suggéré que, pour être acceptable pour la simulation de la charge sédimentaire, il devrait avoir un  $NSE > 0,5$ . Par conséquent, pour surmonter ce défi, cette étude a proposé une modélisation basée sur ML pour améliorer la précision de la prédiction de la charge sédimentaire en suspension dans le bassin du Bourereg.

L'évaluation de la performance du modèle lors de la simulation du SSL enregistré en 2021 a montré que la plupart des modèles ML (à l'exception du kNN dans la station Ain Loudah) ont présenté un  $NSE$  supérieur à 0,5, indiquant leur adéquation à des fins de simulation. Les modèles kNN et SVM ont eu une performance inférieure pour la simulation du SSL dans toutes les stations étudiées. Ceci est en accord avec les études publiées précédemment, telles que (Wang et al., 2020) et (El Bilali et al., 2021), où leurs résultats ont démontré que les modèles basés sur les arbres et ANN sont plus précis que les modèles SVM et k-NN. En ce qui concerne la prédiction du CMES, (Adnan et al., 2019) a trouvé que les techniques orientées données peuvent prédire efficacement le CMES, avec un  $NSE$  de 0,90, en Chine. En effet, les auteurs ont utilisé plusieurs variables d'entrée, dont le SSL antécédent. Cependant, l'inclusion du CMES antérieur comme variable d'entrée pour prédire la CMES réel peut réduire l'implication pratique des modèles, puisque cette variable doit être mesurée. En revanche, l'utilisation des seules variables hydro-climatiques comme caractéristiques d'entrée dans cette étude a été suffisante pour prédire avec précision la CMES. Plus important encore, la capacité de généralisation (GA) des modèles ML à prédire le SSL est cruciale pour la sélection du modèle approprié. Cette étude a évalué les modèles en fonction de leurs performances, en plus de l'AG, afin de déterminer si les modèles conservent leur précision pendant le processus de validation, et la variation de cette précision, en particulier lorsque les modèles sont sur-ajustés ou sous-entraînés.

La méthodologie appliquée était un outil précis pour prédire le CMES quotidien dans les stations en amont immédiat du réservoir de SMBA, qui pourrait être intégré comme un module puissant dans un système d'aide à la décision (DSS) de planification et de gestion des ressources en eau dans la zone étudiée afin d'évaluer la sédimentation du réservoir avec une fréquence élevée. En effet, la charge sédimentaire en suspension du bassin intermédiaire et l'érosion des berges du réservoir SMBA n'ont pas été prises en compte dans la présente étude, ce qui peut constituer une de ses limites.

Parallèlement, le couplage des modèles ML proposés avec un modèle basé sur les cours d'eau pour évaluer l'apport de sédiments dans le réservoir de SMBA est suggéré pour améliorer la précision, puisque les stations étudiées sont en amont du réservoir (Tadesse et al., 2019). Puisque les modèles basés sur les cours d'eau requièrent trop de données physiques relatives au tronçon fluvial, telles que le modèle numérique d'élévation (MNE), le coefficient de Manning-Strickler, les relevés topographiques des ponts et des ponceaux, et d'autres, la disponibilité d'un ensemble de données de relevés bathymétriques pourrait être utile pour

établir un lien statistique entre la cMES cumulatif et la sédimentation cumulative du réservoir. Il s'agit donc d'une alternative fiable à la suggestion précédente. De plus, l'évaluation de l'érosion des berges du réservoir du SMBA à l'aide de modèles ML nécessite des ensembles de données bathymétriques suffisamment fréquents, et peut être suggérée pour améliorer le suivi de la sédimentation du réservoir du SMBA.

En outre, la sédimentation peut être gérée à la fois à l'échelle du réservoir et à l'échelle du bassin. À l'échelle du réservoir, le processus de rinçage par le biais du débit de sortie d'eau et les techniques de dragage sont les principales opérations utilisées pour gérer/réduire la sédimentation du réservoir (Kondolf et al., 2014), tandis qu'à l'échelle du bassin, les meilleures pratiques de gestion (BPM) sont des méthodes exceptionnelles pour atténuer l'érosion du sol. Bien qu'il s'agisse d'une approche précise pour estimer la CMES en amont du réservoir SMBA, les modèles ML proposés ne sont pas capables de simuler la BPM à l'échelle du bassin, parce que les caractéristiques d'entrée n'incluent pas les paramètres physiques liés au bassin, tels que la couverture du sol, le type de sol et les activités anthropiques liées au bassin à étudier. Il est intéressant de noter que les modèles spatiaux d'apprentissage automatique intégrés aux outils SIG pourraient être une approche fructueuse pour simuler les MPB afin de réduire l'érosion des sols dans les bassins.

Enfin, il faut rappeler que tous les résultats du processus de modélisation sont basés sur des mesures quotidiennes des charges de sédiments en suspension dans les cours d'eau de tous les affluents du barrage de SMBA, effectuées par l'Agence de bassin. Les observations au sol sont indispensables, avant tout processus de modélisation pour des prédictions futures, afin d'améliorer la gestion de la rivière et du barrage.

## Conclusion Générale

Les relations entre homme, environnement et transports solides s'appréhendent bien à l'échelle spatiale des bassins-versants, et les outils de modélisation utilisant des données satellite sont particulièrement adaptés (Mahe et al., 2013b). Les résultats obtenus de l'application du modèle (MUSLE), montrent que les sols du bassin versant du Bouregreg subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant l'érosion à savoir l'importance des pentes, le faible couvert végétal et l'érodibilité des sols. Ainsi, le traitement des images de télédétection spatiale pour la détermination des caractères biophysiques du bassin a permis la délimitation des zones de forte érodibilité, de faible couvert végétal et de grande pente, qui peuvent servir à des fins d'aménagements éventuels.

L'analyse des transports solides observés pendant 2 ans aux 4 stations hydrologiques qui contrôlent les principaux affluents à la retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah, a montré que le Bouregreg et le Grou ont généré 1 415 885 tonnes de MES soit 94% et 956 929 tonnes de MES soit 73% de l'ensemble des MES générées par les quatre bassins au cours des années hydrologiques 2016/2017 et 2017/2018.

Les mesures des concentrations de matière en suspension au droit des stations hydrologiques en amont de la retenue du barrage SMBA ont montré, d'une manière générale, que les débits liquides et les concentrations en matières en suspension présentent des corrélations faibles variant entre 0.03 et 0.47, ce qui traduit la complexité du phénomène d'érosion qui dépend de plusieurs paramètres, entre autres la répartition spatiale et temporaire de la pluviométrie. Par contre, les débits solides et les débits liquides présentent des bons coefficients de corrélation qui varient entre 0.66 et 0.82. La relation qui lie le débit liquide et le débit solide, est du type exponentiel.

Ainsi, l'adoption de seuil de débit liquide n'améliore pas les coefficients de corrélation entre les débits liquide et les débits solides et les débits liquides et les concentrations en matière en suspension. Tandis que les relations entre ces paramètres sont légèrement améliorées en crue ou en décrue et selon les saisons. Ainsi les corrélations selon les saisons ont varié respectivement entre 0,63 et 0.97 pour la relation débits solide et débits liquides, et entre 0,08 et 0,69 pour la relation en les cMES et les débits liquides. Pour les corrélations en crue et en décrue, ont varié en crue entre 0,53 et 0,90, et entre 0,12 et 0,39. En décrue, elles ont varié entre 0,7 et 0,9, et entre 0,12 et 0,41.

En comparaison à la bathymétrie les quatre sous-bassins ne génèrent que 12% du transport solide au barrage dans le meilleur des cas. Cette valeur est exceptionnellement faible. Malevli (2005) notait cependant en France un comblement de lac à hauteur de 72% par des sédiments autochtones, ce qui tend à valider nos résultats. Cependant, il se pourrait que les apports de berge varient moins dans le temps que les apports fluviaux. Ainsi pour des années de meilleure hydraulité il se pourrait que les apports fluviaux soient significativement plus élevés, et que

le rapport avec les apports de berge diminue sensiblement. Le seul moyen de le savoir est de poursuivre les mesures sur un plus grand nombre d'années.

Il apparaît donc pertinent de concentrer les actions antiérosives sur les berges du barrage et le bassin intermédiaire qui contribuent à plus de 88% des transports solides. Ces actions devront être exécutées au niveau des zones de forte érodibilité et de pente afin de garantir l'efficacité de l'intervention.

Par ailleurs, l'examen des figures des valeurs de MUSLE et MUSLE calé montre que le modèle dans ses deux versions ne prévoit pas bien les pics des transports solides. Il surestime les valeurs faibles et sous-estime les valeurs élevées de transport solide la plupart du temps. En effet, les écarts par rapport aux observations varient entre +5% pour l'année sèche et +102% pour l'année humide pour le modèle non calé. Les écarts enregistrés pour le modèle calé sont nettement améliorés. Ils varient respectivement entre -30% et +34%. En effet, La version du modèle donne de meilleurs résultats inférieurs à +55% d'erreur dans la prévision des sédiments (Moriassi et al., 2007). Ces résultats sont intéressants en moyenne interannuelle, mais ne permettent pas de prédire des quantités transportées aux stations lors des crues unitaires du fait de la très forte dispersion de la relation entre observation et modélisation, qui se traduit par des valeurs d'indice de Nash moyens à faibles. Les écarts positifs importants sont dus à la sous-estimation des pics de transport solide par le modèle. En effet, le modèle fait participer l'ensemble du bassin sans se soucier de la répartition spatiale et temporelle de la pluviométrie.

Bien que le modèle surestime les valeurs par rapport aux observations, la comparaison du modèle aux données bathymétriques montre que les écarts entre l'envasement moyen et les résultats de modèle varient entre -89% et -81% pour la version non calée du modèle et de -93% et -88% pour la version calée. Cette sous-estimation des apports entrant au barrage par rapport à l'envasement moyen trouve son explication dans le fait que les bassins amonts ne contrôlent pas l'ensemble du bassin du barrage SMBA et que les bassins qui entourent immédiatement les berges de la retenue du barrage apportent des quantités importantes de sédiments à cette dernière, comme le supposent les premiers résultats de Maleval (2014) sur la retenue du barrage SMBA, et ce, principalement après sa surélévation, pour des raisons qui ne sont peut-être pas que liées à la physique de l'environnement, mais aussi peut-être à l'évolution des pratiques agro-sylvo-pastorales dans un environnement en rapide mutation socio-économique du fait de la proximité de la capitale, des aménagements du « Grand Rabat » et des nouvelles voies de circulation (Laouina et al., 2014 ; Chaker et al., 2014). Les écarts entre les transports solides observés et le rythme d'envasement, qui sont respectivement de -89% et -91% , confirment ce constat, qui est également la situation observée par Hallouz et al.(2018) sur le bassin de l'Oued Mina et le barrage Sidi Mohamed Ben Aouda, d'une taille comparable au Bouregreg dans l'ouest algérien.

Afin d'améliorer les sorties du modèle, il y a lieu de revoir ses paramètres d'échelle et de tester sa sensibilité par rapport aux différents facteurs physiques. Cette approche nécessite une longue série d'observations dont on ne dispose pas actuellement, mais qui est en cours d'acquisition puisque l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia, qui gère la ressource en eau sur le bassin-versant du Bouregreg et le barrage SMBA, a mis en place de façon permanente l'observation des cMES sur les stations du bassin, et bientôt une longue série temporelle sera disponible pour affiner ces premiers résultats. Ces mesures vont permettre de suivre la contribution de chaque sous-bassin afin de mieux orienter les mesures d'intervention vers les zones les plus productives d'une part et d'améliorer la modélisation et par la suite la prévision des transports solide. Il sera intéressant également d'investiguer à partir des différences de cMES entre les stations en amont du bassin, de possibles zones de sédimentation le long des cours d'eau à l'intérieur du bassin, comme on peut le supposer par exemple en amont de l'entrée des gorges du Bouregreg à la station de Lalla Chafia (photo 5).



**Photo 4 :** La plaine du lit majeur du Bouregreg en amont de la station Lalla Chafia (G. Mahé, juin 2014)

Enfin, les résultats du modèle MUSLE confirment la pertinence de son application dans les études d'aménagement des bassins versants une fois calé car il intègre toutes les formes d'érosion observées à l'échelle du bassin versant, couplé aux données hydrologiques, ce qui améliore largement la précision comparée à celle de RUSLE. En effet, la moyenne de la dégradation spécifique au niveau du seul bassin du Bouregreg à la station Aguiabat Zear est de l'ordre de 13.81 t/Ha/an d'après Moussebbih et al. (2019), calculée par la méthode RUSLE

alors que celles de MUSLE-calé et l'observation sont de l'ordre de 1.6 t/Ha/an. Les études réalisées sur la bassin de l'oued Mina en Algérie, assez similaire au bassin du Bouregreg (Hallouz et al., 2018), confirment ce constat avec des écarts des résultats de modèle RUSLE par rapport à la mesure de concentrations des matières en suspension, qui peuvent atteindre 79%.

Une autre approche a été utilisée pour l'estimation de la concentration des sédiments en suspension dans les bassins à savoir l'utilisation de l'intelligence artificielle. En effet, cinq modèles d'apprentissage automatique avec la méthode d'entrée NARX ont été appliqués et évalués. Les principales conclusions de la présente étude sont les suivantes :

- La réponse de la charge sédimentaire en suspension dans les bassins est non linéaire et hautement dynamique, en particulier dans les régions semi-arides ;
- Le renforcement de l'apprentissage automatique par l'adoption de la méthode de variable d'entrée hydro-climatique NARX est utile pour la prédiction de la concentration quotidienne de sédiments en suspension ;
- Le réseau neuronal artificiel est précis dans la simulation du cMES dans deux bassins sur quatre, suivi par les modèles AdaBoost et la forêt aléatoire ;
- La métrique de la capacité de généralisation a démontré la stabilité des modèles appliqués dans la prédiction du cMES.

En résumé, les méthodes proposées sont des outils puissants pour surmonter la rareté des données physiques requises par le modèle basé sur les processus pour prédire la cMES. Cependant, la surveillance continue de la cMES dans le bassin étudié augmentera la quantité de données et, par conséquent, l'exploration du DNN est suggérée pour les travaux futurs.

Aussi, les mesures bathymétriques ont permis de mettre en évidence que plus des  $\frac{3}{4}$  des apports en sédiments proviennent des berges du barrage, ce qui va permettre d'orienter plus efficacement les travaux de conservation et restauration des sols qui pourront être menés à l'avenir en priorité sur l'environnement proche du barrage, afin de préserver la capacité en eau du réservoir du barrage SMBA tout en optimisant les ressources financières mobilisées. D'où l'intérêt de réaliser les campagnes bathymétriques de façon périodique pour suivre l'état d'envasement du barrage.

Enfin, dans un contexte de changement climatique, qui prédit au Maroc dans son ensemble une augmentation des températures et une baisse des pluies (Driouech et al., 2010 ; Filahi et al., 2017 ; Trambly et al., 2018), les projections d'évolution d'érosion et de transport sédimentaire qui sont possibles à partir des sorties de modèles de climat, et qui se basent sur des modèles d'approximation de type USLE ou SWAT (Raclot et al., 2020), vont avoir besoin de données observées pour calibrer et valider leurs résultats.

## **Références**

Abdulla, F.A. and Eshtawi, T. (2007). Application of automated geospatial watershed assessment (AGWA) tool to evaluate the sediment yield in a semi-arid region: case study, Kufranja Basin—Jordan. *Journal of Civil Engineering*, 1 (3), 234–244.

Aboulabbes, O. (1984). Infiltration characteristics on a small watershed. Utah State University. Department of Forest Resources.

ABV (1996). Plan National d'Aménagement des Bassins Versant. Haut-commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification, Rabat, Maroc.

Adnan, R.M.; Liang, Z.; El-Shafie, A.; Zounemat-Kermani, M.; Kisi, O. Prediction of Suspended Sediment Load Using Data-Driven Models. *Water*2019, 11, 2060. <https://doi.org/10.3390/w11102060>.

Aggarwal, C.C. *Data Mining*; Springer: Cham, Switzerland, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14142-8>.

Appel, K., Muzller, E.N., Francke, T., and Opp, C. (2006). Soil-erosion modelling along badland hillslopes in a dryland environment of NE Spain. *Geophysical Research Abstracts*, 8, 02874.

Antoine G., Jodeau M., Camenen B. & Esteves M. (2012) — A settling velocity parameterization for sand/mud mixture in a 1D flow during a flushing event. In *River Flow*, San Jose, Costa Rica. 1343 p  
Antoine, G., Jodeau, M., Camenen, B., Esteves, M., Nemery, J., Lauters F. 2015, *La Houille Blanche*, n° 4, 2013, p. 43-49

Arekhi, S. (2007). Estimating erosion and sediment yield using KW-GIUH and MUSLE models in GIS environment. In: 3rd Watershed and soil and water resources management of Iran. Kerman: Shahid Bahonar University, 711–716. 10–12 January 2008

Alabjah, B.; Amraoui, F.; Chibout, M.M.; Slimani, M. Assessment of saltwater contamination extent in the coastal aquifers of Chaouia (Morocco) using the electric recognition. *J. Hydrol.*2018, 566, 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.003>.

Al Dahoul, N.; Essam, Y.; Kumar, P.; Ahmed, A.N.; Sherif, M.; Sefelnasr, A.; Elshafie, A. Suspended sediment load prediction using long short-term memory neural network. *Sci. Rep.*2021, 11, 7826. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87415-4>.

Ampomah, R.; Hosseiny, H.; Zhang, L.; Smith, V.; Sample-Lord, K. A Regression-Based Prediction Model of Suspended Sediment Yield in the Cuyahoga River in Ohio Using Historical Satellite Images and Precipitation Data. *Water*2020, 12, 881. <https://doi.org/10.3390/w12030881>.

Banasik, K., Madeyski, M., and Wiezik, B. (1988). Estimation of deforestation effect on flood flow and sediment yield from a small Carpathian watershed. In: International Symposium Interpraevent. Tagungspublikation, Band 1. Austria: Seite, 175–184, 1988–Graz.

Bishop, C.M. Pattern Recognition and Machine Learning; Springer: New York, NY, USA, 2006.

Bonaccorso, G. Machine Learning Algorithms: Popular Algorithms for Data Science and Machine Learning; Packt Publishing Ltd: Birmingham, UK, 2018.

Bouguerra, H.; Bouanani, A.; Khanchoul, K.; Derdous, O.; Tachi, S.E. Mapping erosion prone areas in the Bouhamdane watershed (Algeria) using the Revised Universal Soil Loss Equation through GIS. *J. Water Land Dev.* 2017, 32, 13–23.

Bouguerra, S.; Jebari, S.; Tarhouni, J. An analysis of sediment production and control in Rmel river basin using InVEST sediment retention model. *J. New Sci.* 2019, 66, 4170–4181.

Breiman, L. Random forests. *Mach. Learn.* 2001, 45, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.

Chaker, M., Laouina, A. and El Marbough, M. (2014). Changement agropastoral et dégradation des terres dans le plateau Sehoul. In : Laouina A. and Mahe G. (Eds.), *Gestion durable des terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg*. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013. Edité par ARGDT, Rabat, Maroc, ISBN 978-9954-33-482-9, 85-102.

Česonienė, L.; Šileikienė, D.; Dapkienė, M. Relationship between the Water Quality Elements of Water Bodies and the Hydrometric Parameters: Case Study in Lithuania. *Water* 2020, 12, 500. <https://doi.org/10.3390/w12020500>.

Chen, C.; He, W.; Zhou, H.; Xue, Y.; Zhu, M. A comparative study among machine learning and numerical models for simulating groundwater dynamics in the Heihe River Basin, northwestern China. *Sci. Rep.* 2020, 10, 3904. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60698-9>.

Chen, J.; Zhou, W.; Han, S.; Sun, G. Influences of retrogressive erosion of reservoir on sedimentation of its downstream river channel—A case study on Sanmenxia Reservoir and the Lower Yellow River. *Int. J. Sediment Res.* 2017, 32, 373–383. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.02.007>.

Cambazoglu, M.K. and Gogos, M. (2004). Sediment yields of basins in the Western Black Sea region of Turkey. *Turk Journal of Engineering Environmental Science*, 28, 355–367.

Chen, E. and Mackay, D.S. (2004). Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology*, 295, 211–224.

Cordova, A.J., (1981). The effectiveness of a sediment and erosion control ordinance. Thesis (MSc), Columbia University, Richland County, South Carolina.



Dawson, C.; Wilby, R. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modelling. *Hydrol. Sci. J.* 1998, 43, 47–66. <https://doi.org/10.1080/02626669809492102>.

Driouech, F., Mahé, G., Déqué, M., Dieulin, C., El Heirech, T., Milano, M., Benabdelfadel, H. and Rouché, N. (2010). Evaluation d'impacts potentiels de changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya au Maroc. In: *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010)*, IAHS Publ. 340, 561-567.

Einstein, H.A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. Washington D-C., U.S. Dept. Agr. Soil conservation Service, Tech. bull. 1026

El Aoula, R., Mahe, G., Mhammdi, N., Ezzahouani, A., Kacimi, I. and Khomsi, K. (Under Press). Evolution of the hydrological regime in relation with climate change: case of the Bouregreg River basin, Morocco. *Geographia Polonica*.

El Bahi, S., El Wartiti, M., Yassin, M., Calle, A. and Casanova J.L. (2005). Applying revised universal loss equation model to forestlands in Central Plateau of Morocco. *Rev. Teledetección*, 23, 89–97.

El Bilali, A.; Taleb, A.; Brouziyne, Y. Comparing four machine learning model performances in forecasting the alluvial aquifer level in a semi-arid region. *J. Afr. Earth Sci.* 2021, 181, 104244. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104244>.

El Bilali, A.; Taleb, A. Prediction of irrigation water quality parameters using machine learning models in a semi-arid environment. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 2020, 19, 439–451. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.08.001>.

El Bilali, A.; Abdeslam, T.; Mazigh, N.; Moukhliiss, M. Prediction of chemical water quality used for drinking purposes based on artificial neural networks. *Moroc. J. Chem.* 2020, 3, 665–672.

El Bilali, A.; Taleb, A.; Nafii, A.; Alabjah, B.; Mazigh, N. Prediction of sodium adsorption ratio and chloride concentration in a coastal aquifer under seawater intrusion using machine learning models. *Environ. Technol. Innov.* 2021, 23, 101641. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101641>.

El Bilali, A.; Taghi, Y.; Briouel, O.; Taleb, A.; Brouziyne, Y. A framework based on high-resolution imagery datasets and MCS for forecasting evaporation loss from small reservoirs in groundwater-based agriculture. *Agric. Water Manag.* 2021, 262, 107434. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107434>.

EL Bilali, A.; Taleb, A.; Bahlaoui, M.A.; Brouziyne, Y. An integrated approach based on Gaussian noises-based data augmentation method and Ada, Boost model to predict faecal coliforms in rivers with small dataset. *J. Hydrol.* 2021, 599, 126510. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126510>.

El Bilali, A.; Moukhliiss, M.; Taleb, A.; Nafii, A.; Alabjah, B.; Brouziyne, Y.; Mazigh, N.; Teznine, K.; Mhamed, M. Predicting daily pore water pressure in embankment dam: Empowering Machine Learning-based modeling. Environ. Sci. Pollut. Res.2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18559-7>.

El Gaatib, R., Erraji, A. and Larabi, A. (2014).Impact des processus érosifs sur les ressources naturelles des bassins hydrographiques et sur l'état d'envasement des retenues de barrages : Application au Bassin Versant de l'Oued Beht en amont du barrage El Kansra, (Maroc). Géo Observateur, 21, 4.

El Hadraoui, Y. (2013). Étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'observation de la terre. Mémoire d'ingénieur du CNAM, spécialité Géomètre et Topographe, CNAM-ESGT, Le Mans, France. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00920465>

Engelund, F. and Hansen, E. (1967).A monograph on sediment transport in alluvial streams.Copenhagen, TekniskVorlag, Copenhagen, Denmark, 62p.

Epifanio, C.R., Singer, M.J and Huang, X. 1991. Hydrologic impacts of oak harvesting and evaluation of the modified universal soil loss equation. In: R.B. Standiford, ed. Proceedings of the symposium on Oak Woodlands and Hardwood rangeland management, US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-126, 221–224.

Ezzouini, M.A.; Mahé, G.; Kacimi, I.; Zerouali, A. Comparison of the MUSLE Model and two years of Solid Transport Measurement, in the Bouregreg Basin, and Impact on the sedimentation in the Sidi Mohamed Ben Abdellah Reservoir, Morocco, Water 2020, 388, 539–547.

Filahi, S., Trambly, Y., Mouhir, L. and Diaconescu, E.P. (2107).Projected changes in temperature and precipitation indices in Morocco from high-resolution regional climate models.International Journal of Climatology, 37, 14, 4846-4863.

Fournier F. (1960). Climat et érosion: la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. P.U.F, Paris, 201p.

Freund, Y.; Schapire, R.E. A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting. J. Comput. Syst. Sci.1997, 55, 119–139.

Freund, Y.; Schapire, R.E. Experiments with a New Boosting Algorithm. In Proceedings of the ICML '96 13th International Conference on Machine Learning, Bari, Italy, 3–6 July 1996; pp. 148–156.

Gautheron A. (1994) — Incertitudes sur les mesures des matières en suspension en Basse Durance. Rapport interne, EDF DTG

Gibson, S.; Floyd, I.; Sánchez, A.; Heath, R. Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flow in HEC-RAS. *Earth Surf. Process. Landf.* 2021, 46, 540–553. <https://doi.org/10.1002/esp.5044>.

Ghosh, S. SVM-PGSL coupled approach for statistical downscaling to predict rainfall from GCM output. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2010, 115, D22. <https://doi.org/10.1029/2009jd013548>.

Goussot, E., Brou, Y.T., Laouina, A., Chaker, M., Emran, A., Machouri, N., Mahe, G., Sfa, M. and Tra Bi, A. (2014). Land covers dynamic and agricultural statistics on the Bouregreg watershed in Morocco. *European Journal of Scientific Research.* 126, 2, 191-205.

Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K. and Martinez, G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology.* Elsevier, 377, 1–2, 80–91.

Gupta, H.V., Sorooshian, S. and Yapo, P.O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering.* American Society of Civil Engineers, 4, 2, 135–143.

Haan, C.T., Barfield, B.J. and Hayes, J.C. (1994). *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments.* Journal of Hydrology-Amsterdam. Amsterdam: North-Holland Pub. Co., 1963-, 176, 1, 296–297. Academic Press, San Diego, CA, 1994, XIV + 588 pp., ISBN 0-12-312340-2.

Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction;* Springer Science & Business Media: New York, NY, USA, 2009.

Hallouz, F., Mahé, G., Toumi, S. and Rahmani, S.E.A. (2018). Erosion, suspended sediment transport and sedimentation on the Wadi Mina at the Sidi M'Hamed Ben Aouda Dam, Algeria. *Water*, 10, 7, 1–31. doi: 10.3390/w10070895.

Hudson P.F. (2003). Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco Basin, Mexico. *Catena*, 52: 57–76

Hosseini, S.S. and Ghorbani, M. (2005). *Economic of soil erosion.* Mashhad: Mashhad University.

Jackson, W.L., GEBARDT, K. and VAN HAVEREN, B.P (1987). Use of the Modified Universal Soil Loss Equation for average annual sediment yield estimates on small rangeland drainage basins. *IAHS Publication*, 159, 413–422. Jamagne, M. (1967). *Bases et techniques d'une cartographie des sols*. Institut national de la recherche agronomique. France.

Khajehie, A., (2002). Study of application capabilities of MUSLE model for storm-wise and annual sediment yield prediction in Shahrchai watershed. Arak: Soil Conservation and Watershed Management Research Centre/Jihad-e-Agriculture Organization of Markazi Province/Natural Resources and Livestock Research Centre of Markazi Province, 436–446, 22–24 January.

KhalediDarvishan, A.V.(2009). Comparison of efficacy and calibration of MUSLE-E and MUSLE-S models in storm-wise sediment estimation. In: The 5th national conference on watershed management. Gorgan, Iran, 22–23 April 2009.

Khoms, K., Mahe, G., Sinan, M. and Snoussi, M. (2013). Hydro-climatic variability in two Moroccan watersheds: A comparative analysis of temperature, rain and flow regimes. In: Climate and land surface changes in hydrology (E. Boegh, E. Blyth, D.M. Hannah, H. Hisdal, H. Kunstmann, B. Su, K.K. Yilmaz, Eds.), IAHS Publ. 359, 183-190.

Khoms, K., Mahe, G., Trambly, Y., Sinan, M. and Snoussi, M. (2016). Regional impacts of global change: Seasonal trends in extreme rainfall, runoff and temperature in two contrasted regions of Morocco. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 5, 1079-1090, doi:10.5194/nhess-16-1079-2016.

Khozani, Z.S.; Bonakdari, H.; Zaji, A.H. Estimating shear stress in a rectangular channel with rough boundaries using an optimized SVM method. Neural Comput. Appl.2018, 30, 2555–2567. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2792-8>.

Khozani, Z.S.; Safari, M.J.S.; Mehr, A.D.; Mohtar, W.H.M.W. An ensemble genetic programming approach to develop incipient sediment motion models in rectangular channels. J. Hydrol.2020, 584, 124753. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124753>.

Kinnell, P.I.A. (2005). Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. Hydrological Processes: An International Journal. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, UK, 19, 3, 851–854.

Kinnell, P.I.A. (2010). Event soil loss, runoff and the universal soil loss equation family of models. Journal of Hydrology, 385, 345–397.

Kondolf, G.M.; Gao, Y.; Annandale, G.W.; Morris, G.L.; Jiang, E.; Zhang, J.; Cao, Y.; Carling, P.; Fu, K.; Guo, Q.; et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. Earths Future2014, 2, 256–280. <https://doi.org/10.1002/2013ef000184>

Kubat, M. An Introduction to Machine Learning; Springer: Cham, Switzerland, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-63913-0>.

Lahlou, A. (1971). Etude du transport solide à la station Dar Es Soltane sur l’oued Bouregreg. Rapport de travaux du service GDE : gestion des eaux, Ministère des travaux publics et des communications, Direction de l’hydraulique, Rabat, Maroc.Lahlou, A. (1971). Etude du transport solide à la station de Dar Es Soltane, sur l’Oued Bouregreg.

Lahlou, A. (1982). La dégradation spécifique des bassins versants et son impact sur l’envasement des barrages. IAHS-AISH Publication, 137, 163–169.

Lahlou, A. (1988). The silting of Moroccan dams. IAHS Publication, 174, 12, 71–78.

Laouina, A., Aderghal, M., Al Karkouri, J., Antari, M., Chaker, M., Laghazi, Y., Machmachi, I., Machouri, N., Nafaa, R., and Naïmi, K. (2010). The efforts for cork oak forest management and their effects on soil conservation. *Forest Systems*, 19, 2, 263–277.

Laouina, A., Chaker, A., Aderghal, M., Machouri, N., and Al Karkouri, J. (2014). Echelles d'évaluation de la dynamique des terres et de leur gestion, du territoire social au bassin-versant expérimental. In : Laouina A. and Mahe G. (Eds.), *Gestion durable des terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg*. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013. Edité par ARGDT, Rabat, Maroc, ISBN 978-9954-33-482-9, 119-146.

Liaw, A.; Wiener, M. Classification and regression by randomForest. *R News* 2002, 2, 18–22.

Liéno, G., Mahé, G., Olivry, J.C., Naah, E., Servat, E., Sigha Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Ndam Ngoupayou, J., Ecodeck, G.E. and Paturel, J.E. (2005). Régime des flux de matières solides en suspension au Cameroun : revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes ; diversité climatique et actions anthropiques. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 1, 111-124.

Ludwig W. and Probst J.L. (1998). River sediment discharge to the oceans: Present-day controls and global budgets. *American Journal of Science*, 298, 265–295.

Mahe, G., Aderghal, M., Al Karkouri, J., Benabdelfadel, H., Bensafia, D., Brou, T., Chaker, M., Chikhaoui, M., Coupleux, S., Crouzevialle, R., Dieulin, C., Emran, A., Ezzaouini, M., Goussot, E., Hallouz, F., Khomsi, K., Laouina, A., Machouri, N., Maleval, V., Meddi, M., Nging, M., Planchon, O., Remini, B., Rouche, N., Saadi, H., Sfa, M., Sinan, M., Snoussi, M., Taibi, S., Toumi, S., Tra Bi, A., Yahiaoui, S. and Zerouali, A., (2013a). Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In: *Considering hydrological change in reservoir planning and management*, (A. Schumann, V.B. Belyaev, E. Gargouri, G. Kucera and G. Mahe, Eds), IAHS Publ. 362, 115-124.

Mahe, G., Aksoy, H., Brou, Y.T, Meddi, M. and Roose, E. (2013b). Relationships among man, environment and sediment transport: a spatial approach. *Revue des Sciences de l'Eau*, 26, 3, 235-244.

Mahe, G., Benabdelfadel, H., Dieulin, C., Elbaraka, M., Ezzaouini, M., Khomsi, K., Rouche, N., Sinan, M., Snoussi, M., Tra Bi, A. and Zerouali, A. (2014). Evolution des débits liquides et solides du Bouregreg. In : Laouina A. and Mahe G. (Eds.), *Gestion durable des terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg*. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013. Edité par ARGDT, Rabat, Maroc, ISBN 978-9954-33-482-9, 21-36.

Mahe, G., Emran, A., Brou, Y.T. and Tra Bi, A.Z. (2012a). Analyse statistique de l'évolution de la couverture végétale à partir d'images MODIS et NOAA sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). *Géo Observateur*, 20, 33–44.

Mahe, G., Emran, A., Brou, Y.T. and Tra Bi, A.Z. (2012b). Impact de la variabilité climatique sur l'état de surface du bassin versant du Bouregreg (Maroc). *European Journal of Scientific Research*, 84, 3, 417-425.

Mahmoudzadeh, A., Erskine, W.D. and Myers, C. (2002). Sediment yields and soil loss rates from native forest, pasture and cultivated land in the Bathurst area, New South Wales. *Australian Forestry Journal*, 65 (2), 73–80. Mano V. (2008) — Processus conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues - optimisation des méthodes de mesure et modélisation. Thèse Institut National Polytechnique de Grenoble. 341 p

Maleval, V. (2005). L'apport d'un bilan sédimentaire en milieu lacustre. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50, 4, 465-477. Maleval, V. (2014). Premiers résultats des mesures d'érosion ravinatoire sur les versants lacustres du barrage Sidi Mohamed ben Abdellah (Maroc) et perspectives de recherche. In : Laouina A. and Mahe G. (Eds.), *Gestion durable des terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg*. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013. Edité par ARGDT, Rabat, Maroc, ISBN 978-9954-33-482-9, 53-62.

Mazigh, N.; Taleb, A.; El Bilali, A.; Ballah, A. The Effect of Erosion Control Practices on the Vulnerability of Soil Degradation in Oued EL Malleh Catchment using the USLE Model Integrated into GIS, Morocco. *Trends Sci.* 2022, 19, 2059. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.2059>.

Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1948). Formulas for Bed-Load transport. IAHR Publ. IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2. *Hydraulic Engineering Reports*. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7>

Mohanty, S.; Jha, M.K.; Raul, S.K.; Panda, R.K.; Sudheer, K.P. Using Artificial Neural Network Approach for Simultaneous Forecasting of Weekly Groundwater Levels at Multiple Sites. *Water Resour. Manag.* 2015, 29, 5521–5532. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1132-6>.

Molinier M. (1979). Note sur les débits et la qualité des eaux du Congo à Brazzaville. *Cah. ORSTOM. Se. Hydrol.* Vol. 16, n°1, 55–66

Moriasi, D., N. Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE. American society of agricultural and biological engineers*, 50, 3, 885–900.

Moussebbih, A., Souissi, M., Larabi, A. and Faouzi, M. (2019). Modeling and mapping of the water erosion risk using Gis/Rusle approach in the Bouregreg river watershed. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9, 3, 1605–1618. <https://doi.org/10.24247/ijmperdjun2019169>

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 3, 282–290.

Noor, H., KhalaghMirnia, S., Fazli, S., Raisi, M.B, and Vafakha, M. 2010. Application of MUSLE for the prediction of phosphorus losses. *Water Science and Technology*, 62 (4), 809–815. Novotny, V. (1994). *Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution*. New York, Van Nostrand-Reinhold Publishers. ISBN 978-0442005597

Nourani, V.; Gokcekus, H.; Gelete, G. Estimation of Suspended Sediment Load Using Artificial Intelligence-Based Ensemble Model. *Complex*.2021, 2021, 6633760. <https://doi.org/10.1155/2021/6633760>.

Olivry J.C., Bricquet J.P. and Thiébaux J.P. (1989). Bilan annuel et variations saisonnières des flux particulaires du Congo à Brazzaville et de l'Oubangui à Bangui. *La Houille blanche*, n°3/4, 311–315.

Oshiro, T.M.; Perez, P.S.; Baranauskas, J.A. How Many Trees in a Random Forest? In *International Workshop on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012; pp. 154–168. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-31537-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31537-4_13).

Pähtz, T.; Clark, A.H.; Valyrakis, M.; Durán, O. The Physics of Sediment Transport Initiation, Cessation, and Entrainment Across Aeolian and Fluvial Environments. *Rev. Geophys.*2020, 58, e2019RG000679. <https://doi.org/10.1029/2019rg000679>.

Pribyl, D.W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*. Elsevier, 156, 3–4, 75–83.

Raclot, D., Naimi, M., Chikhaoui, M., Nunez, J.P., Huard, F., Herivaux, C., Sabir, M. and Pepin, Y. (2020). Distinct and combined impacts of climate and land use scenarios on water availability and sediment loads for a water supply reservoir in northern Morocco. *International Journal of Soil Conservation*, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.03.003>

Rapp J.F., Lopes V.L. and Renard K.G.(2001). Comparing soil erosion estimates from RUSLE and USLE on natural runoff plots. In *Proceedings of International Symposium Soil Erosion Research for the 21st Century*, Jan. 3–5, Honolulu, HI, Aschough II JC, Flanagan DC (eds). American Society Agricultural Engineers: St Joseph, MI; 24–27.

Risse LM, Nearing MA, Nicks AD, Laflen JM, 1993. Error assessment in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal* 57: 825– 833.

Recking, A. (2010). A comparison between flume and field bedload transport data and consequence for surface based bedload transport prediction, *Water Resources Research*.46, 18p;

Renard, K.G. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Government Printing.

Renard, K.G.; Foster, G.R.; Weesies, G.A.; Porter, J.P. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 1991, 46, 30–33.

Rezaiifard, M., Telvari, A.R. and Arzabkhedri, M. 2002. Study of MUSLE model application in storm-wise sediment prediction in Afchehs watershed. Arak: Soil Conservation and Watershed Management Research Centre/Jihad-e-Agriculture Organization of Markazi Province/Natural Resources and Livestock Research Centre of Markazi Province, 534–542, 22–24 January. Sabri, E. (2016). Impact des processus érosifs sur les ressources naturelles des bassins hydrographiques et sur l'état d'envasement des retenues des barrages: application au bassin versant de l'oued ELABID en amont du barrage de BIN ELOUIDANE-MAROC.'

Sadeghi, S.H.R. and Mahdavi, M. (2004). Applicability of SEDIMOT II model in flood and sediment yield estimation. *Journal of Agricultural Sciences and Technology*, 6, 147–154.

Sadeghi, S.H.R. (2007b). Is MUSLE apt to small steeply reforested watershed? *Journal of Forest Research*, 12, 270–277.

Sadeghi, S. H. R., Gholami, L., KhalediDarvishan, A. and Saeidi, P. (2014). Revue de l'application du modèle MUSLE à travers monde. *Hydrological Sciences Journal*, 59(2), 365–375. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866239>.

Sadiki, A., Bouhlassa, S. and Auajjar, J. (2004). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'équation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de La Terre*, 26, (December 2015), 69–79.

Schapire, R.E. A brief introduction to boosting. *Int. Jt. Conf. Artif. Intell.* 1999, 2, 1401–1406.

Schalkoff, R.J. *Artificial Neural Networks*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1997.

Santos, J.R. and Canino, G. (1997). Erosion and sediment transport in a proposed regional sanitary landfill. In: AIDIS; Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico. *Preservación del Ambiente y el Control de la Contaminación: Eslabones Indispensables para el Futuro de las Américas* [online], June. San Juan: AIDIS, 1–8. Available from: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/puertorico/lviii.pdf>.

Sarkhosh, A., et al. (2004). Comparison and evaluation of MUSLE and MPSIAC models for sediment yield prediction in Darakeh watershed in Northern Tehran. *Journal of Agricultural Sciences and Industries*, 34 (3), 733–747.

Stone, R.P. and Hilborn, D. (2001). *Universal Soil Loss Equation, USLE*. Ministry of Agriculture, Food & Rural Affairs, Agriculture & Rural.



Tadesse, A.; Dai, W. Prediction of sedimentation in reservoirs by combining catchment based model and stream based model with limited data. *Int. J. Sediment Res.* 2019, 34, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.08.001>.

Toumi, S., Meddi, M., Mahe, G. and Brou, Y.T. (2013). Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological Sciences Journal*, 58, 7, 1-17.

Tra Bi A.Z., Brou, T., Emran, A. and Mahe, G. (2013). Remote sensing and GIS analysis of the dynamic of vegetation in climate variability context on the Bouregreg watershed. In: *Climate and land surface changes in hydrology* (E. Boegh, E. Blyth, D.M. Hannah, H. Hisdal, H. Kunstmann, B. Su, K.K. Yilmaz, Eds.), IAHS Publ. 359, 403-410.

Tra Bi, Z. A., Emran, A., Brou, Y. T. and Mahé, G. (2014). Cartographie par arbre de décision de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Bouregreg, en région semi-aride au centre Nord-Ouest du Maroc. *RESIGEO - Revue Scientifique Internationale de Géomatique, CURAT-CNTIG*, Abidjan, Côte d'Ivoire, 1, 1, 43-54.

Tramblay, Y., Jarlan, L., Hanich, L. and Somot, S. (2018). Future scenarios of surface water resources availability in North African dams. *Water Resources Management*, 2018, 32 (4), p. 1291-1306.

Touaibia B., Aidaoui A., Gomer D. and Achite, M. (2001). Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi-aride de l'Algérie du Nord. *Hydrol. Sci*, 46(1), 41-53.

Van Kessel, T.; Blom, C. Rheology of cohesive sediments: Comparison between a natural and an artificial mud. *J. Hydraul. Res.* 1998, 36, 591–612. <https://doi.org/10.1080/00221689809498611>.

Vapnik, V.N. *The Nature of Statistical Learning Theory*, 2nd ed.; Springer: New York, NY, USA, 2000.

Varvani, J., et al., 2006. Assessment of the experimental models performance in watersheds sediment in time to single flood and provide modification coefficients. *Journal of Natural Resources*, 60 (4), 1125–1239. (In Persian.)

Wang, H.; Zentar, R.; Wang, D. Rheological Characterization of Fine-Grained Sediments under Steady and Dynamic Conditions. *Int. J. Geomech.* 2022, 22, 4021260.

Wang, L.; Long, F.; Liao, W.; Liu, H. Prediction of anaerobic digestion performance and identification of critical operational parameters using machine learning algorithms. *Bioresour. Technol.* 2020, 298, 122495. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122495>.

Walling D.E. and Fang D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39: 111–126

Williams, J.R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. ARS-S. Southern Region, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 40, p. 244.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1965). Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. US Department of Agriculture.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Department of Agriculture, Science and Education Administration.

Yahiaoui, S. and Zerouali, A. (2013). Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In: Considering hydrological change in reservoir planning and management, (A. Schumann, V.B. Belyaev, E. Gargouri, G. Kucera and G. Mahe, Eds), IAHS Publ. 362, 115-124, 2013.

Yassin, M., Pépin, Y., El Bahi, S. and Zante P. (2013). Evaluation de l'érosion au micro-bassin de Sidi Sbaa : application du modèle MUSLE. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, Tome 42, 171-181.

Yoon, H.; Jun, S.-C.; Hyun, Y.; Bae, G.-O.; Lee, K.-K. A comparative study of artificial neural networks and support vector machines for predicting groundwater levels in a coastal aquifer. *J. Hydrol.* 2011, 396, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.002>.

Ustaoglu, F.; Tepe, B. Water quality and sediment contamination assessment of Pazarsuyu Stream, Turkey using multivariate statistical methods and pollution indicators. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2019, 7, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.09.001>.

## **Annexes**

## Article

# Comparison of the MUSLE Model and Two Years of Solid Transport Measurement, in the Bouregreg Basin, and Impact on the Sedimentation in the Sidi Mohamed Ben Abdellah Reservoir, Morocco

Mohamed Abdellah Ezzaouini <sup>1,2,\*</sup>, Gil Mahé <sup>3</sup>, Ilias Kacimi <sup>1</sup> and Abdelaziz Zerouali <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geoscience, Water and Environment Laboratory, Faculty of Sciences, Mohammed V University, Avenue Ibn Batouta, Rabat 10100, Morocco; iliaskacimi@yahoo.fr

<sup>2</sup> Basin of the Bouregreg and Chaouia Agency, Benslimane BP 262, Morocco; azlso@yahoo.fr

<sup>3</sup> Laboratoire HydroSciences, Université Montpellier, IRD, 34090 Montpellier, France; gilmahe@hotmail.com

\* Correspondence: ezzaouini70@yahoo.fr; Tel.: +212-661-110-897

Received: 18 May 2020; Accepted: 15 June 2020; Published: 1 July 2020

**Abstract:** The evaluation and quantification of solids transport in Morocco often uses the Universal Soil Loss Model (USLE) and the revised version RUSLE, which presents a calibration difficulty. In this study, we apply the MUSLE model to predict solid transport, for the first time on a large river basin in the Kingdom, calibrated by two years of solid transport measurements on four main gauging stations at the entrance of the Sidi Mohamed Ben Abdellah dam. The application of the MUSLE on the basin demonstrated relatively small differences between the measured values and those expected for the calibrated version, these differences are, for the non-calibrated version, +5% and +102% for the years 2016/2017 and 2017/2018 respectively, and between −33% and +34% for the calibrated version. Besides, the measured and modeled volumes that do not exceed  $1.78 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year remain well below the dam's siltation rate of  $9.49 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year, which means that only 18% of the dam's sediment comes from upstream. This seems very low because it is calculated from only two years. The main hypothesis that we can formulate is that the sediments of the dam most probably comes from the erosion of its banks.

**Keywords:** modeling; MUSLE; erosion; solid transport; dam; Bouregreg; Morocco

## 1. Introduction

Erosion is a natural phenomenon that reduces the capacity of dam reservoirs around the world. The natural erosive process is aggravated by anthropogenic activities including pastoral activity [1], deforestation [2–4], and climate change [5] with the advent of periods of heavy rainfall and increasingly frequent dry periods. This phenomenon constitutes a major challenge for water resource management at the scale of the Bouregreg basin [6,7] in northern Morocco.

The Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA) dam, commissioned in 1974 and raised in 2007, is intended solely to supply drinking water to the coastal area between Rabat and Casablanca, which represents nearly eight million inhabitants. It has a relatively low silting rate compared to other dams in the Kingdom [8]. However, it has lost 132 Mm<sup>3</sup> since its commissioning of which 58% of this volume was lost before rising the dam height, with this loss constituting a very significant reduction in its storage capacity. Given the magnitude of this situation, the modeling of soil losses in the basin aims at achieving the following objectives:

- analyzing the biophysical environment;
- describing and evaluating the erosive processes affecting the Bouregreg Basin, and the solid transport by the main tributaries to the SMBA dam;

- and identifying the priority areas contributing to siltation, in order to better guide spatial planning actions.

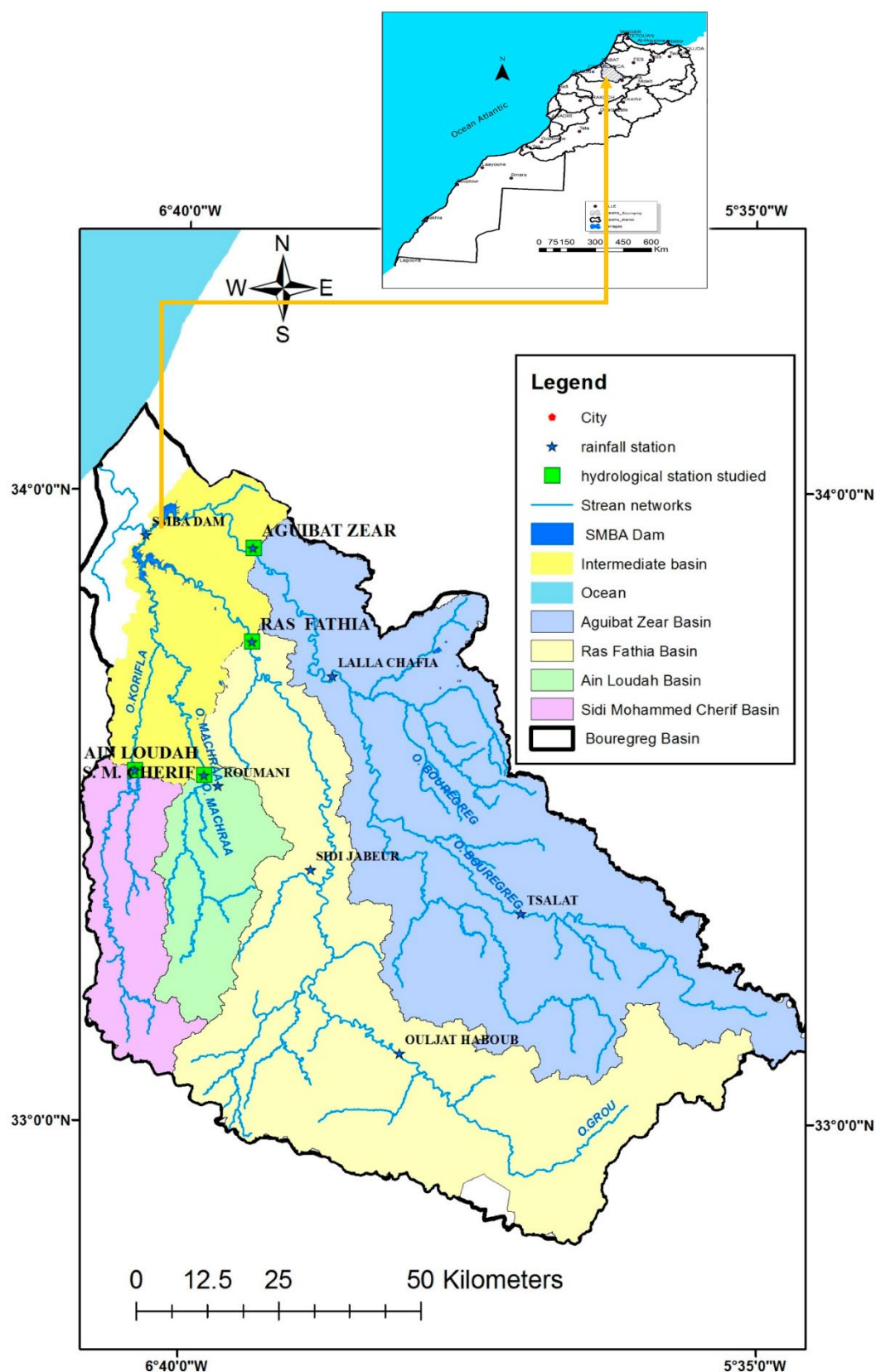
Universal Soil Loss Equation (USLE) was first established in USA to model erosion in small agricultural catchment [9]. It is based on several parameters linked to climate, soil cover and properties, topography, and human activities. This equation has been modified and adapted several times. The MUSLE model includes the use of water flow rates [10]. Despite the difficulties encountered in calibrating and adapting the Universal Land Loss Model (USLE) to conditions in Morocco [11], most studies on watershed management in Morocco [12–15] and bordering Mediterranean regions, in particular in Algeria and Tunisia [15–17], continue to use USLE, and the revised version RUSLE [18–21], or an event normalized plot soil loss estimated by a modified USLE model—USLE-MM—as in Italy [22], most often for small basins of much less than 5000 km<sup>2</sup>. As USLE [23] and RUSLE [24] were developed for the rough assessment of annual land loss at the scale of small plots, their application to large areas leads to rather large errors [25,26]. However, their accuracy increases when coupled with hydrological models [27]. To overcome the difficulties in assessing the accuracy of using a simple erosion equation like USLE, Alewell et al. [28] recommend to strengthen and extend measurement and monitoring programs to build up validation data sets.

Thus, Williams [10] developed a modified version of the USLE (MUSLE) that takes into account the flow load at the outlet by taking into account the biophysical characteristics of the watershed. This model has already been applied to micro-watersheds [29,30] and gave very reliable results compared to measurements. Indeed, in the Sidi Sbaa basin in Morocco, the deviation of the results compared to the MUSLE model was −4% by underestimating the solid inputs [31]. Samaras and Koutitas et al.[32] use MUSLE with SWAT to simulate the potential impact of land cover change on sediment yields to the sea in Greece, but with no observed validation data; while other authors like Fang [33] use the WaTEM/SEDEM model, which includes the RUSLE formula, to estimate erosion, but always without observations to compare. Only a few studies compare the erosion rates with the three USLE formulas. In Maghreb, only one study by Djoukbala et al.[34] compared them on the small basin of 384 km<sup>2</sup> in the north of Algeria, with erosion rates quite similar between the three methods, but they were slightly superior in the case MUSLE. Unfortunately, they could not compare their results with observation data, which does not allow an assessment of the validity of the erosion rates produced in regard to real natural processes.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Study Area

The Bouregreg Basin, located in central western Morocco, covers a total area of approximately 10,130 km<sup>2</sup> at its mouth in the north of the city of Rabat (Figure 1). The main rivers of the basin are the Bouregreg, the Grou, and the Korifla and its tributary, the Machraa.



**Figure 1.** Situation of the Bouregreg Basin on the north Morocco Atlantic coast.

The climate in the study area is Mediterranean with oceanic influence, with an average annual rainfall over the basin varying from 450 mm in Rabat in the north-west, to nearly 750 mm in the mountainous area in the south-east.

Rain events generate water volume of  $680 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ , i.e., an annual mean of  $22 \text{ m}^3/\text{s}$ . It is regulated by the capacity of the SMBA dam, located downstream of the confluence between the Bouregreg, Korifla/Machraa, and Grou rivers. Table 1 summarizes the characteristics of the SMBA dam.

**Table 1.** Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA) dam data.

|                             | Watershed Area (km <sup>2</sup> ) | Initial Dam Capacity (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Inter-Annual Water Resources (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Opening Date | Number of Bathymetric Measurements |
|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------|
| SMBA at its construction    | 9800                              | 508.6                                                  | 680                                                            | 1974         | 5                                  |
| SMBA after raising its dike |                                   | 974.0                                                  |                                                                | 2007         | 3                                  |

## 2.2. Basic Data

### 2.2.1. Discharges Measurements

The hydrometric network of the Bouregreg basin upstream of the SMBA dam is composed of three major tributaries: Bouregreg, Grou, and Korifla (including its tributary the Machraa). Four hydrological stations located on these tributaries at the entrance of the dam's reservoir were chosen to carry out the measurements of solid transport. These hydrological stations control a basin of about 8521 km<sup>2</sup>, i.e., 87% of the catchment area of the SMBA dam. They also have human and material means to ensure the measurement of flows, rainfall, and the concentration of suspended solids. Table 2 gives the characteristics of the four hydrological stations.

**Table 2.** Characteristics of the four hydrological stations studied.

| Hydrologic Station  | Name of River | Date of Commissioning | Averaging Period | N°IRE ABHB C Code | Watershed Area (km <sup>2</sup> ) | Lambert Coordinates |         |     |
|---------------------|---------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------|---------|-----|
|                     |               |                       |                  |                   |                                   | X                   | Y       | Z   |
| Aguibat Zear        | Bouregreg     | 1975                  | 1975/2018        | 3118/13           | 3681                              | 394.500             | 368.150 | 90  |
| Ras Fathia          | Grou          | 1975                  | 1975/2018        | 989/20            | 3485                              | 394.250             | 351.800 | 100 |
| Ain Loudah          | Korifla       | 1971                  | 1971/2018        | 2673/20           | 699                               | 373.750             | 329.150 | 175 |
| Sidi Mohamed Cherif | Machraa       | 1971                  | 1971/2018        | 2674/21           | 656                               | 385.850             | 328.200 | 270 |

Figure 2 shows that the two years, 2016/2017 and 2017/2018, are dry years which did not record significant water inflows.

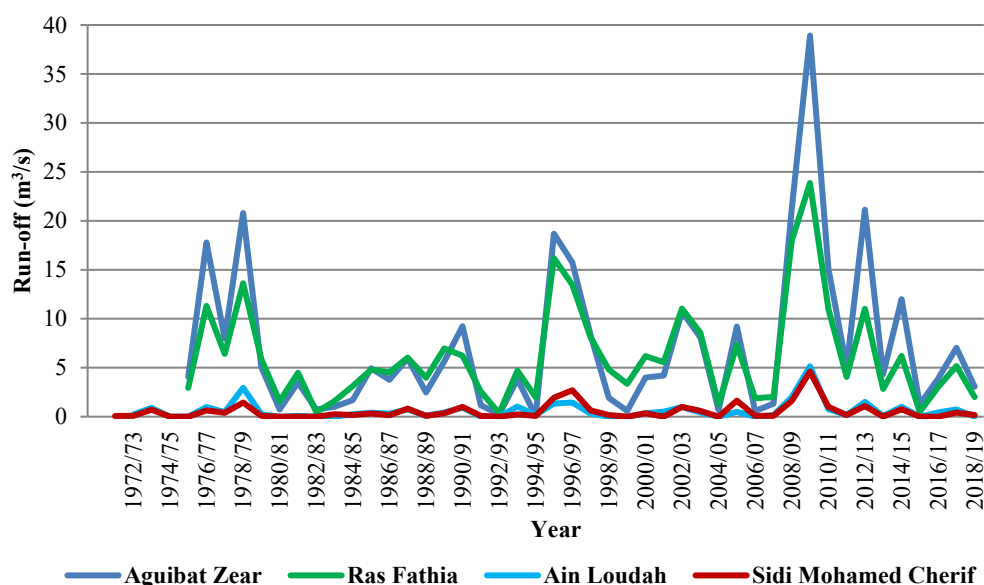


Figure 2. Annual discharges at the 4 hydrological stations studied.

Examination of the historical measurement data from the four observation stations shows that 80% of the inflows to the dam are recorded between October and May (Figure 3). The Bouregreg and Grou rivers contribute more than 90% of the inflows generated in the basin.

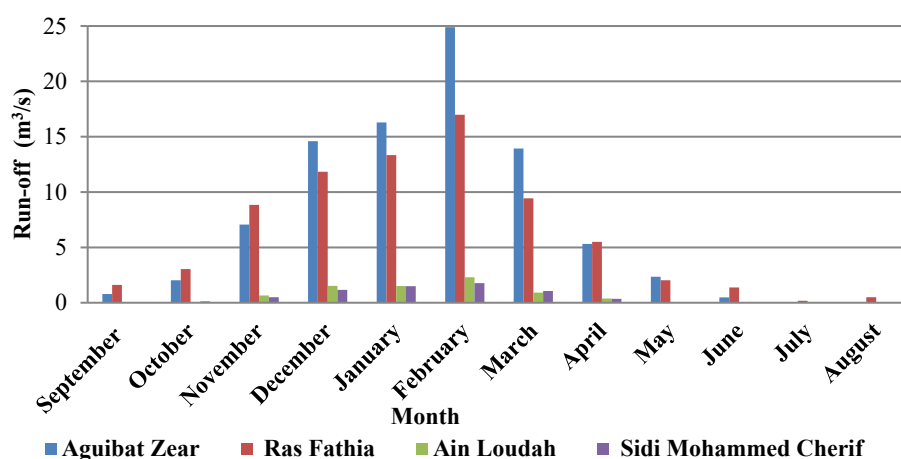


Figure 3. Mean monthly discharges at the hydrological stations studied.

Table 3 shows the maximum flows, volumes, and number of flood events recorded during the 2016/2017 and 2017/2018 hydrological years at the four hydrological stations studied. The number of recorded events is between six and seventeen, depending on the observation station and the year.



**Table 3.** Flood events for the four hydrological stations studied.

| Hydrological Station | Hydrological Year | Maximum Discharge Recorded Per Year (m <sup>3</sup> /s) | Date of Flood Event | Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Number of Flood Events |
|----------------------|-------------------|---------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------|------------------------|
| Aguibat Zear         | 2016/2017         | 263.4                                                   | 24/02/2017 at 23h00 | 52                                       | 13                     |
|                      | 2017/2018         | 265.9                                                   | 07/03/2018 at 14h00 | 77                                       | 14                     |
| Ras Fathia           | 2016/2017         | 256.4                                                   | 25/02/2017 at 07h30 | 33                                       | 11                     |
|                      | 2017/2018         | 423.8                                                   | 07/03/2018 at 09h00 | 59                                       | 10                     |
| Ain Loudah           | 2016/2017         | 24.5                                                    | 13/10/2016 at 11h00 | 0.7                                      | 10                     |
|                      | 2017/2018         | 198.7                                                   | 24/04/2018 at 23h00 | 7.6                                      | 17                     |
| Sidi Mohamed Cherif  | 2016/2017         | 62.6                                                    | 13/10/2016 at 07h00 | 1.8                                      | 6                      |
|                      | 2017/2018         | 48.0                                                    | 11/12/2017 at 17h00 | 1.28                                     | 6                      |

### 2.2.2. Concentration of Suspended Solids (CSS)

Observers at the four hydrological stations studied, who are contracted by the Hydraulic Basin of the Bouregreg and Chaouia Agency (ABHBC), carry out daily sampling during low-flow periods and hourly sampling during periods of flooding. At each instantaneous sampling, the date, time, and scale rating are noted on the specimen bottles catalogued. The samples are then analyzed in the laboratory and filtered under a vacuum using filtering membranes (0.45µm). The available data for measuring the concentration of suspended solids cover two hydrological years, 2016/2017 and 2017/2018. The number of measurement samples is presented in Table 4.

**Table 4.** Number of concentration of suspended solids (CSS)samples and floods events per station.

| Name of Hydrological Station | River     | Watershed Area (km <sup>2</sup> ) | 2016/2017 and 2016/2018 |                        |
|------------------------------|-----------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|
|                              |           |                                   | Number of CSS Samples   | Number of Flood Events |
| AguibatZear                  | Bouregreg | 3681                              | 727                     | 27                     |
| Ras Fathia                   | Grou      | 3485                              | 636                     | 21                     |
| Ain Loudah                   | Korifla   | 699                               | 233                     | 27                     |
| Sidi Mohamed Cherif          | Machraa   | 656                               | 789                     | 12                     |

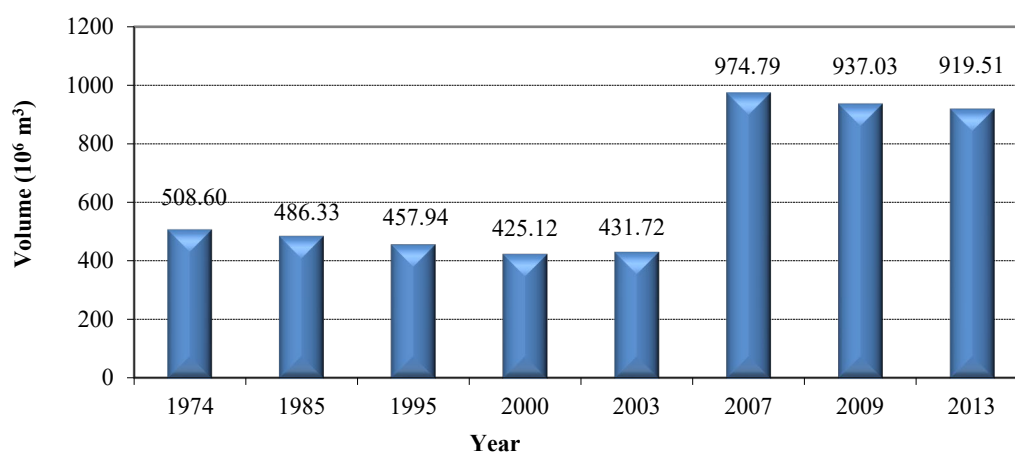
### 2.2.3. Bathymetric Data

In order to draw up an inventory of the silting of the SMBA dam reservoir, the bathymetric surveys carried out by the Moroccan Directorate of Water Research and Planning were collected and analyzed. A total of seven bathymetric surveys were collected, the oldest dating back to 1974, while the most recent were carried out in 2013. Analysis of the bathymetric data shows that the silting up of the SMBA dam reservoir was of the order of  $2.65 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year, i.e., a specific degradation of 270.4 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/year before raising. After raising, the silting increased to  $9.49 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year, i.e. a specific degradation of 968.37 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/year, which increased the silting rate by 400% [4]. However, the data is subject to doubt for values in the early 2000s [35]. The difference between the beginning and the end of the chronicle is of reliable quality. Therefore, the total silting of the SMBA dam reached  $132 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, i.e., an average silting rate of  $3.7 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year since its commissioning. Subsequently, the dam has exceeded its dead unit, which is sized for  $100 \times 10^6$  m<sup>3</sup> and has lost  $32 \times 10^6$  m<sup>3</sup> of its useful reserve since its commissioning. Table 5 summarizes the silting status of the dam.

**Table 5.** Summary of SMBA dam siltation calculation results since its impoundment.

| Name of the Dam     | Initial Dam Capacity (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Total Siltation (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Number of Years | Rate of Siltation (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Dead-unit Volume at Dam Building (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Lost Volume (%) | Current Capacity (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) |
|---------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------|
| SMBA before raising | 508.60                                                 | 76.88                                             | 29              | 2.65                                                | 100.00                                                             | 15              | 431.72                                             |
| SMBA after raising  | 974.79                                                 | 55.28                                             | 6               | 9.49                                                |                                                                    | 6               | 919.51                                             |

The silting of the dam reservoir represents a real threat to the sustainability of the mobilization of surface water resources in the Bouregreg basin to satisfy required needs. The regulation of the SMBA dam, prior to its raising, was done on a seasonal basis (capacity lower than the annual inflow). In other words, the dam had to discharge the surplus inflows most often from flood spillway or bottom discharge. This technique of management favored the elimination of solid deposits and thus a reduction in the siltation rate of the dam. After the dam was raised and consequently the water capacity of the reservoir increased, the SMBA dam moved to multi-year regulation (capacity greater than annual inflows). By using the restitution devices of the dam, this method of regulation favors storage to the detriment of evacuation, which accentuates the silting rate. Figure 4 illustrates the evolution over time of the normal capacity of the SMBA dam.

**Figure 4.** Evolution of the normal capacity of the SMBA dam reservoir, in millions of m<sup>3</sup>.

## 2.3. Methods

### 2.3.1. Model Selection

In this study we apply the Williams [10] model based on the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE), integrated in the ArcGIS Geographic Information System for the determination of the soil loss potential at the level of the Bouregreg watershed to the four hydrological stations located immediately upstream of the SMBA dam, as previously done by Khali Issa et al.[36] in another region of Morocco in the North of the country, over a very small basin of 38 km<sup>2</sup>.

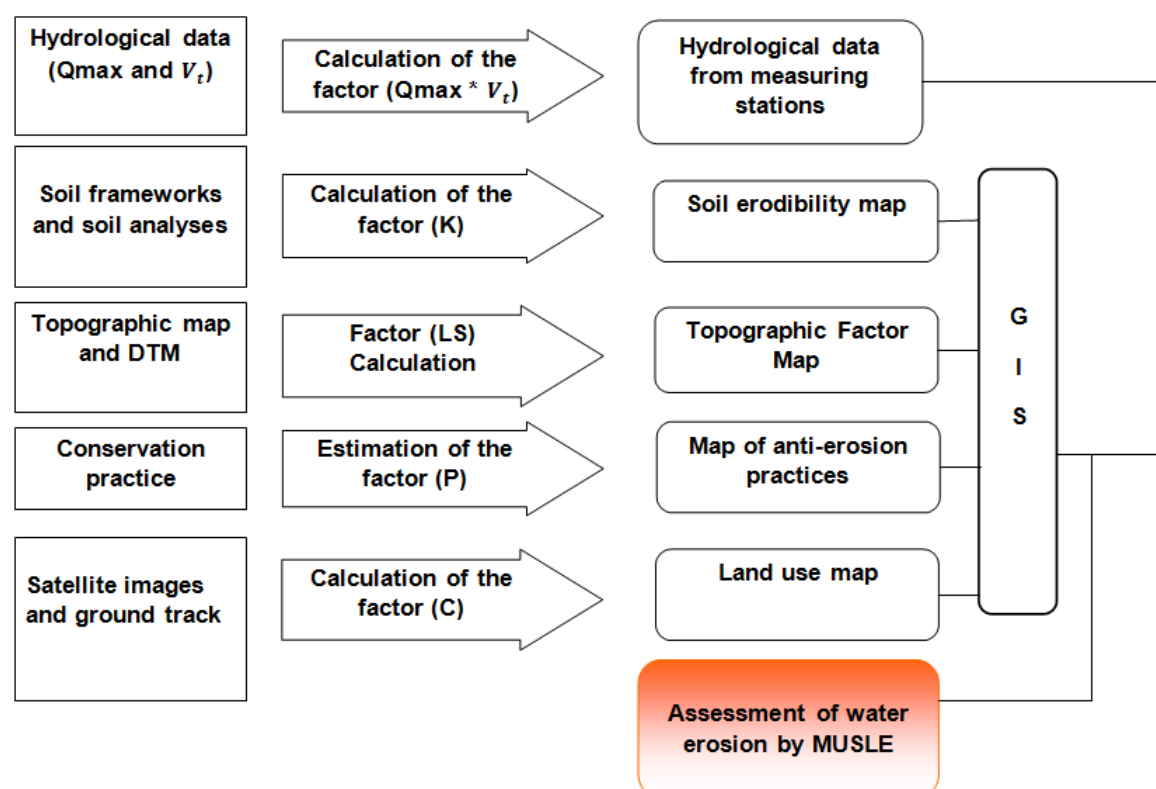
This model evaluates the average annual rate of erosion at the outlet of the basin. It uses hydrological parameters, measured at the four hydrological stations, taking into account biophysical characteristics. Thus, the model equation is as follows:

$$A = a(Q_{max} \times V_t)^b K \times LS \times C \times P, \quad (1)$$

where  $A$ : amount of sediment produced at the outlet in tons,  $a$  and  $b$ : in this study, we used the scale factor values of the Sidi Sbaa micro-basin [30] ( $a=11.8$  and  $b = 0.56$ ),  $Q_{max}$ : maximum flow rate in  $m^3/s$ ,  $V_t$ : total volume of runoff water in  $m^3$ ,  $K$ : average soil erodibility ( $mg\ MJ^{-1}mm^{-1}$ ),  $LS$ : average topographic factor,  $C$ : average vegetation cover factor,  $P$ : average cultural practices and amenities factor.

### 2.3.2. Methods Selection

We adopted the suite of methods and operations explained in the flowchart (Figure 5) below to assess siltation rates at hydrological stations upstream of the SMBA dam [37].



**Figure 5.** Methodology adopted for the assessment of erosion in the Bouregreg basin.

## 3. Results

### 3.1. Rainfall and Hydrometric Analysis

Solid transports are calculated at the four hydrological stations concerned in the hydrological years 2016/2017 and 2017/2018. These two years were respectively dry and wet in terms of rainfall. The average rainfall recorded at all the rainfall stations in the basin reached 354 mm in 2016/2017 and 496 mm in 2017/2018. Thus, the rainfall differences recorded in relation to the arithmetic mean of the data from the rainfall stations located in the Bouregreg basin varied respectively by  $-10\%$  and  $+26\%$  since the commissioning dates of the stations, based on data available to study from the ABHBC.

Table 6 summarizes the rainfall variations recorded in relation to the average rainfall of the stations in the Bouregreg basin.

**Table 6.** Rainfall for the 2016/2017 and 2017/2018 water years.

| Rain Gauge Station | Basin     | Cumulative Rainfall (mm) |           | Averaging Period | Mean Year (mm) | Deviation from the Mean (%) |           |
|--------------------|-----------|--------------------------|-----------|------------------|----------------|-----------------------------|-----------|
|                    |           | 2016/2017                | 2017/2018 |                  |                | 2016/2017                   | 2017/2018 |
| LallaChafia        | Bouregreg | 409                      | 569       | 1972/2019        | 486            | −16                         | 17        |
| AguibatZear        | Bouregreg | 482                      | 578       | 1975/2019        | 429            | 12                          | 35        |
| Sidi Jabeur        | Grou      | 260                      | 432       | 1971/2019        | 317            | −18                         | 36        |
| Tsalat             | Bouregreg | 454                      | 622       | 1977/2019        | 469            | −3                          | 33        |
| Roumani            | Machraa   | 261                      | 431       | 1933/2019        | 342            | −24                         | 26        |
| Ras Fathia         | Grou      | 290                      | 505       | 1975/2019        | 387            | −25                         | 30        |
| S. M Cherif        | Machraa   | 290                      | 495       | 1971/2019        | 367            | −21                         | 35        |
| Barrage            |           |                          |           | 1984/2019        |                |                             |           |
| SMBA               | Bouregreg | 518                      | 479       |                  | 469            | 10                          | 2         |
| OuljatHaboub       | Grou      | 321                      | 350       | 1972/2019        | 311            | 3                           | 12        |
| Ain Loudah         | Krofla    | 258                      | 498       | 1971/2019        | 347            | −26                         | 43        |
| Total              |           | 354                      | 496       |                  | 392            | −10                         | 26        |

With the exception of the Korifla sub-basin at the right of the Ain Loudah station which recorded a surplus of nearly 24% during 2017/2018, the contributions were in deficit on the rest of the sub-basins during the two hydrological years with more pronounced deficits during the dry year 2016/2017. Table 7 summarizes the inflows recorded at the four stations of the study.

**Table 7.** Water supplies to the four hydrological stations studied.

| Hydrological Station | River     | Water Supply (Mm <sup>3</sup> ) |           |                  |                     | Deviation from the Mean (%) |           |
|----------------------|-----------|---------------------------------|-----------|------------------|---------------------|-----------------------------|-----------|
|                      |           | 2016/2017                       | 2017/2018 | Averaging Period | Annual Average (mm) | 2016/2017                   | 2017/2018 |
| AguibatZear          | Bouregreg | 122.2                           | 221.5     | 1975/2019        | 227.6               | −46                         | −3        |
| Ras Fathia           | Grou      | 95.0                            | 162.8     | 1975/2019        | 194.2               | −51                         | −16       |
| Ain Loudah           | Korifla   | 13.3                            | 23.5      | 1971/2019        | 18.9                | −29                         | +24       |
| Sidi Mohammed Cherif | Machraa   | 3.7                             | 12.9      | 1971/2019        | 16.7                | −77                         | −23       |

### 3.2. Analysis of the Biophysical Environment

The analysis of the biophysical environment consists of determining the average factors used by the model for each sub-basin. These factors, that affect soil erosion, are: soil type, topography, land use and cropping practices, and erosion control facilities [38].

#### 3.2.1. Soil Erodibility Factor (K)

Erodibility is defined as the degree to which soils are resistant to erosion. The factors that have a major influence on the response of soils to erosion, namely the detachment and transport of particles

by rain and runoff, are texture, structure, organic matter, and permeability. The methodology for estimating RUSLE K has been applied, and is written as follows [39]:

$$K = [2.1 \times 10^{-4}(12 - MO)M^{1.14} + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)]/10, \quad (2)$$

with K: soil erodibility expressed in t.ha.h/ha.MJ.mm (tonne. hectare. hour/hectare. mega joule. millimeter); MO: percentage of organic matter; M: textural term % fine sand + % silt; S: structure class code 1 to 4, with 1 fragmented structure and 4 coarse structure, soil structure affects both landslide susceptibility and infiltration, the profiles described on the Bouregreg have a subangular polyhedral structure and fall under class (3); and P: the permeability code (1 to 6), its value can be inferred indirectly from the organic matter content by calculating the infiltration given by the Equation[40]:

$$Y = 3.53 \times X + 2.08, \quad (3)$$

with: Y = infiltration in cm/h, X = organic matter in %.

Thereafter, the soil erodibility factor K will be calculated using the Harmonized World Soil Database (HWSD), developed by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (<http://www.fao.org/soils-portal/fr/>). This database gives the distribution of silt, sand, and clay soil compositions by soil type [41].

Soil is composed of organic and mineral matter. Its texture is determined by the size of the soil particles and their respective quantities. There are three categories of particles that determine soil texture: sand, silt, and clay. They are distinguished by particle diameter: sand 0.05 mm to 2 mm, silt 0.002 mm to 0.05 mm, clay 0.002 mm and less. The modified illustrated triangular graph [42] was used to determine soil texture classification. Soil texture is classified according to the percentage of silt, sand, and clay.

Once the textures have been determined, it is possible to establish the correspondence between the standard texture and the K-factor [43]. These values are given in tons/ha and ton/acre (US system). Although this methodology provides an approximation in the calculation of the K-factor, it has the advantage of lending itself to the constraints imposed by the study area. The rate of organic matter at the level of each watershed for each texture value is calculated by converting organic carbon into organic matter. The conversion factor of 1.724 is commonly used to convert the organic carbon content of a soil sample to organic matter. The conversion factor is old and has survived the test of time and modern analytical methods. According to authors [44], this conventional factor is attributed to the 19th century authors Van Bemmelen [45], Wolff [46], or even Sprengel [47]. It is based on well-established and very old studies showing that soil organic matter contains 58% carbon. Since the C/MO ratio would be equal to 0.58, the MO/C ratio would be equal to 1.724.

Thus, the calculation of the organic matter is carried out by the following formula, which uses the value 1.724 and is widely used in Morocco:

$$MO = CO \times 1.724, \quad (4)$$

the average erodibility factor K per basin is calculated by the formula:

$$K_{average} = \frac{\sum(K \times number)}{\sum number}, \quad (4)$$

with K: K-factor per value, number: counting of pixels with the same K-value in the Arcmap allocation table.

The results of the calculation of the average K-factor for each watershed are in Table 8.

**Table 8.** Average erodibility factor for each watershed.

| Name Watershed      | Erodibility factor $K_{average}$ |
|---------------------|----------------------------------|
| Bouregreg           | 0.352                            |
| Grou                | 0.350                            |
| Ain Loudah          | 0.348                            |
| Sidi Mohamed Cherif | 0.348                            |

The Kmoy factor used is 0.35. This value corresponds to the silt, with the latter being a sedimentary formation whose grains are of intermediate size between clays and sands. The loss of silt leads to a decrease in the water retention capacity of the soil. The result is an increased erodibility and an increased risk of erosion. Because silt is often suspended in water, it is easily transported by floods and can contribute to the siltation of dam reservoirs. Figure 6 shows the distribution of the K factor over the Bouregreg basin for the four hydrological stations located immediately upstream of the SMBA dam.

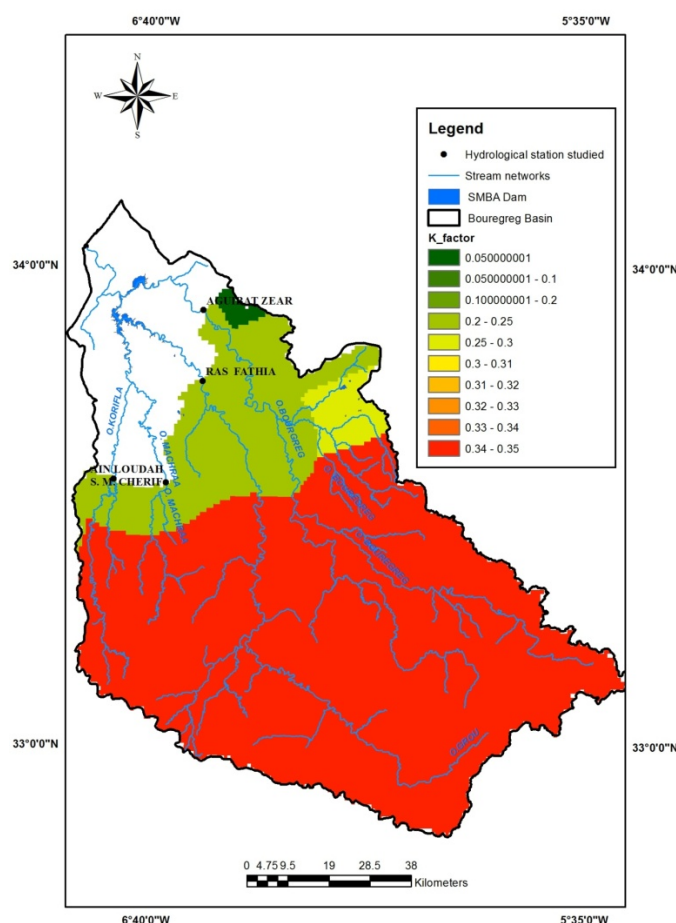


Figure 6. K-factor of the Bouregreg basin at the four hydrological stations.

### 3.2.2. Topographic Factor (LS)

The topographic factor LS is an essential parameter of the model. It expresses the result of erosion due to the combined effect of the degree of slope and its length. Most recent studies for the determination of the soil loss potential at the watershed level by the MUSLE model utilize the equation established by Wischmeier and Smith [23,9], which is expressed as:

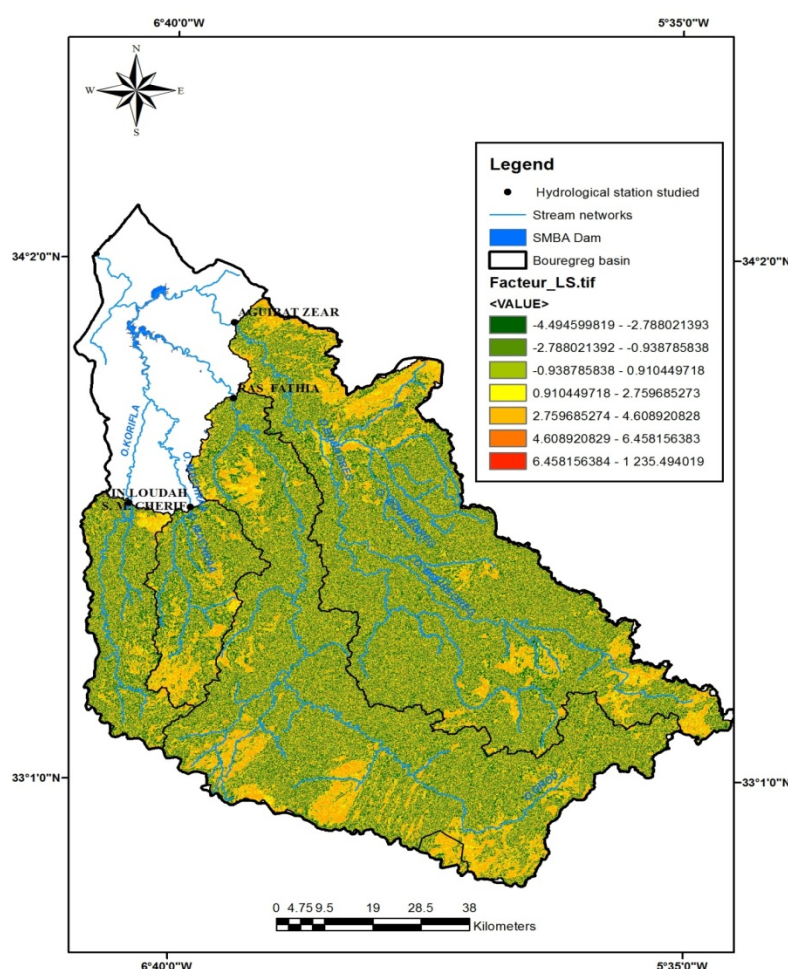
$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \times 65.4 \sin^2 \beta + 4.56 \sin \beta + 0.0654, \quad (6)$$

with:  $\lambda$ : length of the slope in m,  $\beta$ : slope in degrees,  $m=0.5$  if  $\beta \geq 5\%$ ,  $m=0.3$  if  $1 < \beta < 5\%$ ,  $m=0.2$  if  $\beta \leq 1$ .

First, the slope map was established by the spatial analyst tool of the ArcGis software using a 90 m resolution DTM. Then, the LS map (Figure 7) by basin was generated using the Wischmeier and Smith formula [23,9]. The mean slopes and mean LS values are given in Table 9.

**Table 9.** Mean slope and mean topographic factor (LS).

|                               | Mean Slope<br>(%) | Mean Topographic Factor (Ls) |
|-------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Bouregreg à Lala Chafia       | 16.6              | 0.48                         |
| Grou à Ras Fathia             | 14.6              | 0.49                         |
| Korifla à Ain Loudah          | 9.8               | 0.27                         |
| Machraa à Sidi Mohamed Cherif | 12.2              | 0.58                         |

**Figure 7.** LS factor of the Bouregreg basin at the four hydrological stations.

### 3.2.3. Land Cover Factor (C)

The soil protection factor (C) indicates the degree of soil protection by vegetation cover. This factor has undergone several changes since the establishment of the universal soil loss equation. The vegetation cover is—after topography—the second most important factor controlling the risk of soil erosion. The value of C depends mainly on the percentage of vegetation cover and the growth phase. The Cfactor map for the Bouregreg catchment area was derived from the land use maps. These were determined from the use of remote sensing data and field observations [48]. The land cover map was extracted from SPOT satellite images at 20 m resolution combined with recent Landsat ETM+ images (2011/2012) using the supervised classification method [41]. Another approach could be to derive the C factor from NDVI maps as practiced on the Wadi Mina in Algeria by Toumi et al.[16]

The distribution of surfaces according to the nature of the vegetation cover is carried out by the ArcGis tool, which subdivides the catchment area into several polygons. Each polygon corresponds to a specific type of vegetation cover. Each vegetation cover corresponds to a factor given by



Wischmeier and Smith according to the theme [49]. A color is assigned to each polygon that represents a land cover type. For the calculation of the Cfactor, an independent calculation is required for each sub-basin. Indeed, the sensitivity to erosion of the different classes is determined from the main land use themes, i.e., forest formations, rangelands, agricultural land, arboriculture, water, and bare soil, whose values vary between 0 and 1. The calculation of the average vegetation cover factor depends on the factor given for each land use and surface area by the following formula:

$$C_{average} = \frac{\sum S_i \cdot C_i}{\sum S_i}, \quad (7)$$

with  $S_i$ : partial polygon area,  $C_i$ : value of the C factor according to the theme. Figure 8 shows the C factors for each sub-basin of the Bouregreg River.

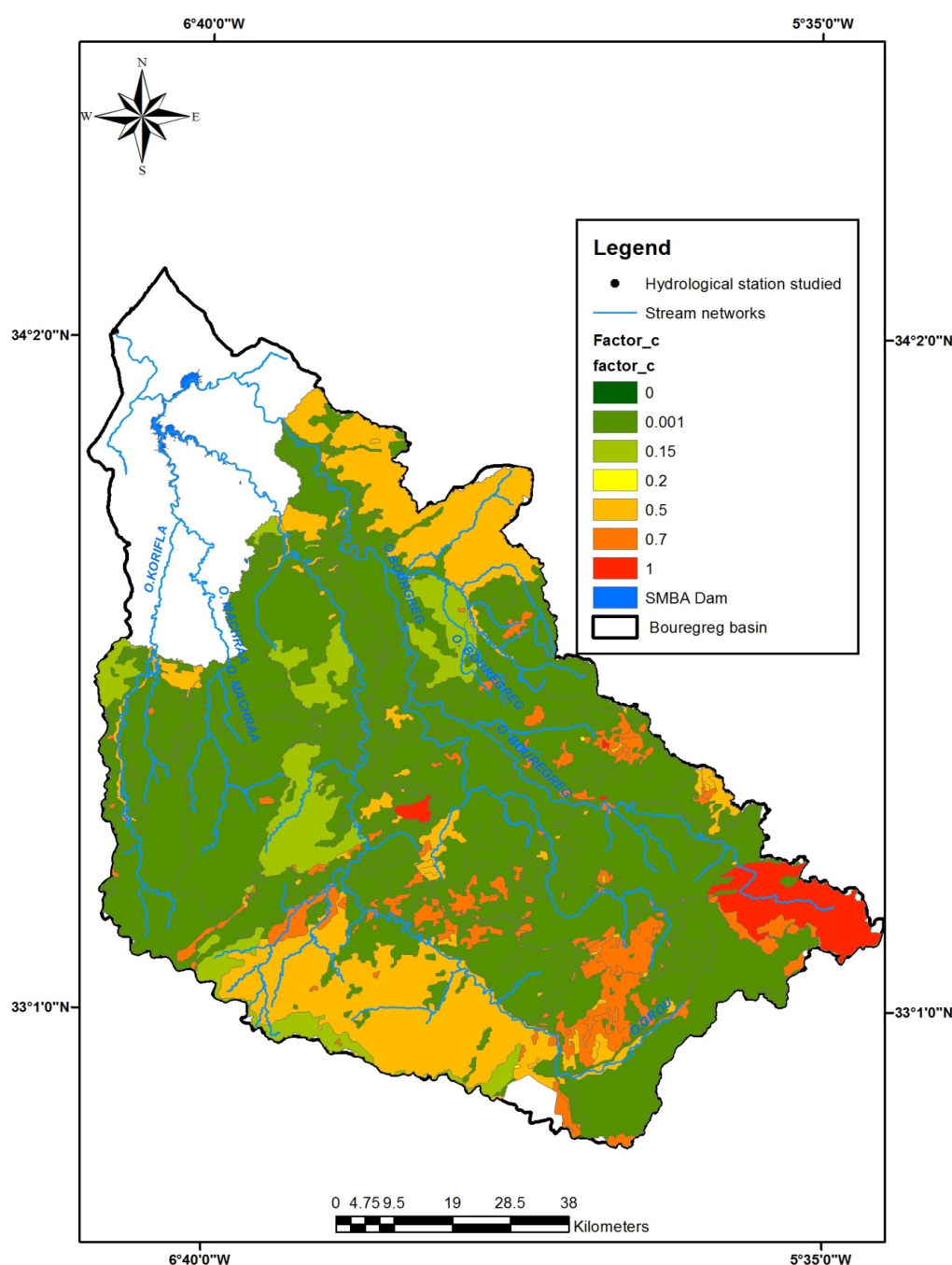


Figure 8. Factor C of the Bouregreg basin at the four hydrological stations.



The application of the formula leads to the results presented in Table 10.

**Table 10.** Average vegetation cover factor C for each watershed.

| Watershed | Land Cover Factor (C) |
|-----------|-----------------------|
|           | C <sub>average</sub>  |
| Bouregreg | 0.26                  |
| Grou      | 0.45                  |
| Korifla   | 0.41                  |
| Machraa   | 0.33                  |

The vegetation cover factor (C) can vary from close to 0 for well-protected soils, to 1 for striated surfaces that are very sensitive to gully erosion. The determination of this factor for the Bouregreg watershed and sub-basins is based on the density of vegetation and the height of the vegetation strata. These data were deduced from the field updating of the land use map by the Royal Centre for Remote Sensing in Space of Morocco (CRTS) available at the ABHBC. The values assigned to the different land use patterns are based on Wischmeier and Smith's tables for forests, matorrals, and pastures. The results show that the values of the C factor range from 0.26 for the sub-basin located in the northeast region, the Bouregreg, the wettest, to 0.45 for the sub-basin that extends furthest south, which is more arid [50,51]. The spatial distribution of the vegetation cover index by class for the Bouregreg watershed shows on 50.45% of the total surface area, i.e., nearly 181,556 ha, an index lower than or equal to 0.2, indicating good protection, while 49.5% of the surface area shows very low protection against erosion, i.e., about 177,986 ha. It can also be noted that the upper northeastern basin, which is both the most humid and the least covered with vegetation, is not, however, subject to high erodibility [52].

### 3.2.4. Average Cultivation Practices and Amenities Factor P

The P factor is a dimensionless factor expressing soil protection through agricultural practices (P). This factor takes into account purely anti-erosion practices. Contour, strip or terrace cultivation, bench planting, and ridging are the most effective soil conservation practices. These practices proportionally affect erosion by altering the flow pattern or direction of surface runoff and by reducing the amount and speed of runoff. P values are less than or equal to 1. A value of 1 is assigned to lands where none of the practices listed are used. P values vary between 0 and 1 depending on the practice adopted and also on the slope. In the Bouregreg watershed, there are few anti-erosion facilities and farmers do not use anti-erosion cultivation practices. These actions are small-scale and do not have a major impact on reducing erosion due to the size of the basin. As a result, a P value equal to 1 has been assigned to the entire area of the basin.

## 3.3. Application and Calibration of the MUSLE Model

### 3.3.1. Application of the MUSLE Model

The parameters required for the application of the MUSLE model for the evaluation of solid inputs by the MUSLE model are summarized in Table 11.

**Table 11.** Averaging factors for the universal soil loss equation modified per sub-basin.

|           | Mean Topographic<br>Factor<br>(LS) | Mean Erodibility<br>Factor<br>(K) | Mean Vegetation<br>Cover Factor<br>(C) | Mean<br>Development<br>Factor (P) |
|-----------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| Bouregreg | 0.48                               | 0.32                              | 0.26                                   | 1                                 |
| Grou      | 0.49                               | 0.32                              | 0.45                                   | 1                                 |
| Korifla   | 0.27                               | 0.34                              | 0.33                                   | 1                                 |
| Machraa   | 0.58                               | 0.31                              | 0.41                                   | 1                                 |

By introducing the various factors of the MUSLE model, the amount of solid inputs produced at the outlet of each watershed is calculated using the flow and volume measurement data for each flood, according to the model equation. The solids transport is then calculated using the measured suspended solids concentrations for the same floods. The concentrations are linearly interpolated over the range of flows in each hydrograph. The bottom solid transport is taken as 10% of the total volume of suspended solids [53], which remains an empirical but widely used value.

### 3.3.2. Calibration of the MUSLE Model

Calibration of the model at each hydrological station is carried out using the percentage bias method (PBIAS), which consists of minimizing the difference between the observed mean and the mean predicted by the model by acting on the model's scaling parameters a and b:

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \times (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right], \quad (8)$$

with  $Y_i^{obs}$ : observed solid transport,  $Y_i^{sim}$ : solid transport simulated by MUSLE, n: number of observations.

In our case, a and b are respectively equal to 11.80 and 0.56. The calibration period is spread over two years of observations available. The optimal value of PBIAS is 0, where PBIAS has the ability to clearly indicate poor model performance [54]. To ensure model reliability, the model is also calibrated using the KGE (Kling-Gupta Efficiency) Method [55]:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left( \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1 \right)^2}, \quad (9)$$

with  $r$ : simple correlation coefficient between observed and simulated values,  $\sigma_{obs}$ : standard deviation of observed solid transport values,  $\sigma_{sim}$ : standard deviation of simulated solid transport values,  $\mu_{obs}$ : mean of observed solid transport values,  $\mu_{sim}$ : mean of simulated solid transport values. The optimal value of the KGE factor is 1.

The PBAIS calibration of the model shows that the scaling factor (a) does not change while (b) is more sensitive, but remains close to the initial value. Table 12 shows the results of the PBIAS model calibration.

**Table 12.** Model calibration results at the four stations studied by percentage bias method (PBIAS).

| Name of Basin | Scaling Parameters<br>after Calibration |       | Calibration Criteria |      |      |
|---------------|-----------------------------------------|-------|----------------------|------|------|
|               | A                                       | B     | Bias                 | KGE  | r    |
| Bouregreg     | 11.799                                  | 0.548 | 0.00                 | 0.48 | 0.58 |
| Grou          | 11.799                                  | 0.535 | 0.00                 | 0.11 | 0.26 |
| Korifla       | 11.800                                  | 0.541 | 0.00                 | 0.49 | 0.57 |
| Machraa       | 11.799                                  | 0.502 | 0.00                 | 0.65 | 0.70 |

Calibration of the model by the KGE method shows that the scaling factors a and b are very sensitive, with the terms being very far from the initial values, and are quite or widely and varyingly different from one basin to another. Table 13 shows the results of model calibration using the KGE method.

**Table 13.** Model calibration results for the four stations studied by KGE.

| Name of Basin | Scaling Parameters<br>after Calibration |       | Calibration Criteria |       |       |
|---------------|-----------------------------------------|-------|----------------------|-------|-------|
|               | A                                       | b     | Bias                 | KGE   | r     |
| Bouregreg     | 0.039                                   | 0.807 | 0.024                | 0.601 | 0.603 |
| Grou          | 11.799                                  | 0.546 | −0.236               | 0.149 | 0.272 |
| Korifla       | 1.727                                   | 0.643 | −0.055               | 0.537 | 0.545 |
| Machraaf      | 1.421                                   | 0.620 | −0.017               | 0.689 | 0.690 |

### 3.4. Comparison of Observations with MUSLE Model Results

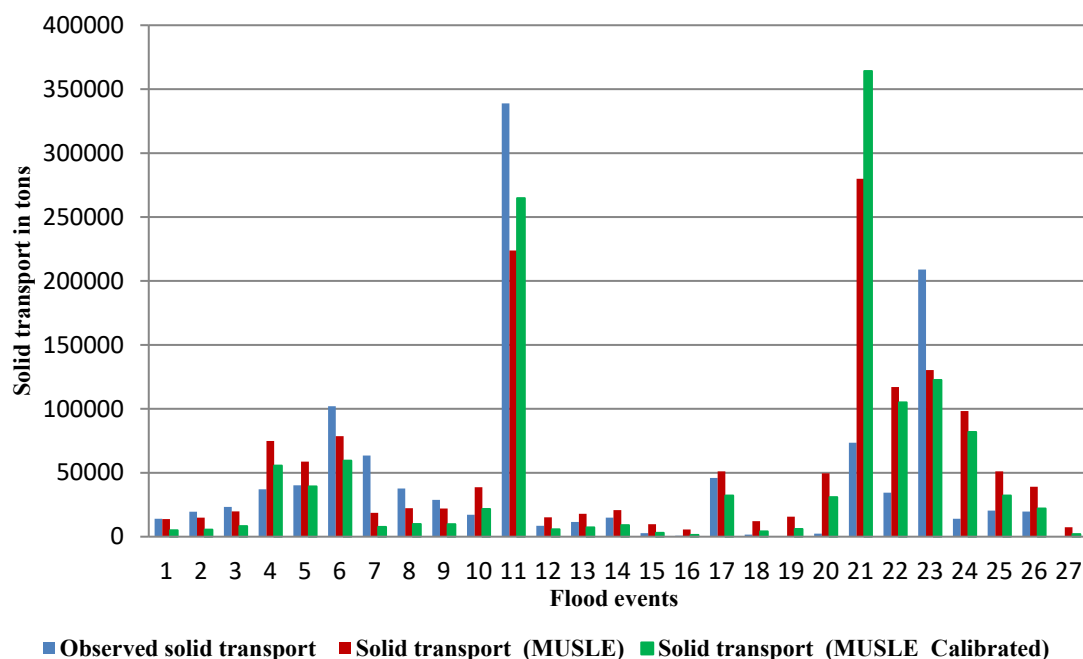
#### 3.4.1. Aguibat Zear Hydrological Station on the Bouregreg River

During the two hydrological years studied, twenty-seven floods were recorded. The total solid volumes observed were 742,334 tons in 2016/2017 and 439,735 tons in 2017/2018. Table 14 summarizes the results from applying the model to the Aguibat Zear hydrological station.

**Table 14.** Results of the MUSLE model at Aguibat Zear on the Bouregreg and a comparison with observations.

| Hydrologic Year | Observed Solid Transport (tons) | Solid Transport (MUSLE) (tons) |                   |                 | Difference Observation-MUSLE (%) |                   |                 |
|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|
|                 |                                 | Uncalibrated                   | Calibration PBAIS | Calibration KGE | Uncalibrated                     | Calibration PBAIS | Calibration KGE |
| 2016/2017       | 742 334                         | 619 023                        | 487 494           | 436 922         | −17                              | −34               | −41             |
| 2017/2018       | 439 735                         | 888 011                        | 694 575           | 716 809         | +102                             | +58               | +63             |

Examination of the results of the MUSLE model calibrated by the two approaches—PBAIS and KGE—shows that calibration by the PBAIS method better simulates solid transport. Figure 9 compares the simulated and observed solid transport. The latter events are less well simulated by MUSLE than the former.



**Figure 9.** Comparison between MUSLE and observations at Aguibat Zear on the Bouregreg.

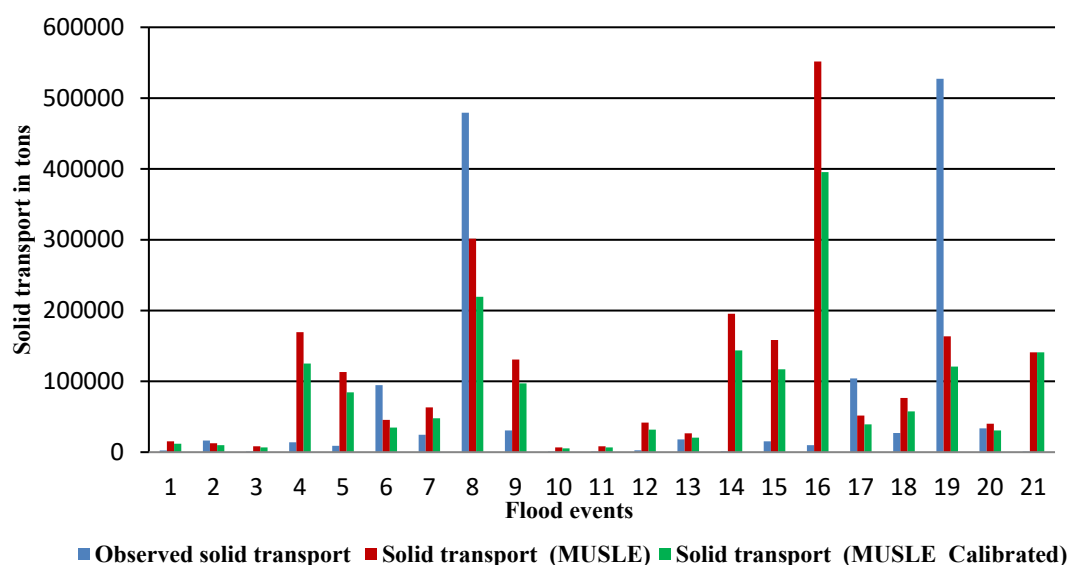
### 3.4.2. Ras Fathia hydrological station on the Grou River

During the two hydrological years studied, twenty-one floods were recorded. The total observed solid volumes amount to 517,194 tons in 2016/2017 and 896,438 tons in 2017/2018. Table 15 summarizes the results of applying the model to the Ras Fathia hydrological station for the two versions of the model calibration.

**Table 15.** Results of the MUSLE model at Ras Fathia on the Grou and comparison with observations.

| Hydrolog<br>ic Year | Observe<br>d Solid<br>Transpo<br>rt<br>(tons) | Solid Transport<br>(MUSLE)<br>(tons) |                          |                        | Difference<br>Observation-MUSLE<br>(%) |                          |                        |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------------------|------------------------|
|                     |                                               | Uncalibrat<br>ed                     | Calibrati<br>on<br>PBAIS | Calibrati<br>on<br>KGE | Uncalibrat<br>ed                       | Calibrati<br>on<br>PBAIS | Calibrati<br>on<br>KGE |
| 2016/2017           | 673 551                                       | 875 366                              | 517 194                  | 649 389                | +30                                    | −23                      | −4                     |
| 2017/2018           | 740 083                                       | 1 446 831                            | 896 438                  | 1 098 213              | +95                                    | +21                      | +48                    |

Examination of the results of the MUSLE model calibrated by the two approaches PBAIS and KGE, shows that calibration by the PBAIS method better simulates solid transport. Figure 10 shows the comparison of simulated and observed solid transport. As for the Bouregreg, the events of the second year are less well represented by MUSLE.



**Figure 10.** Comparison between MUSLE and observations at Ras Fathia on the Grou.

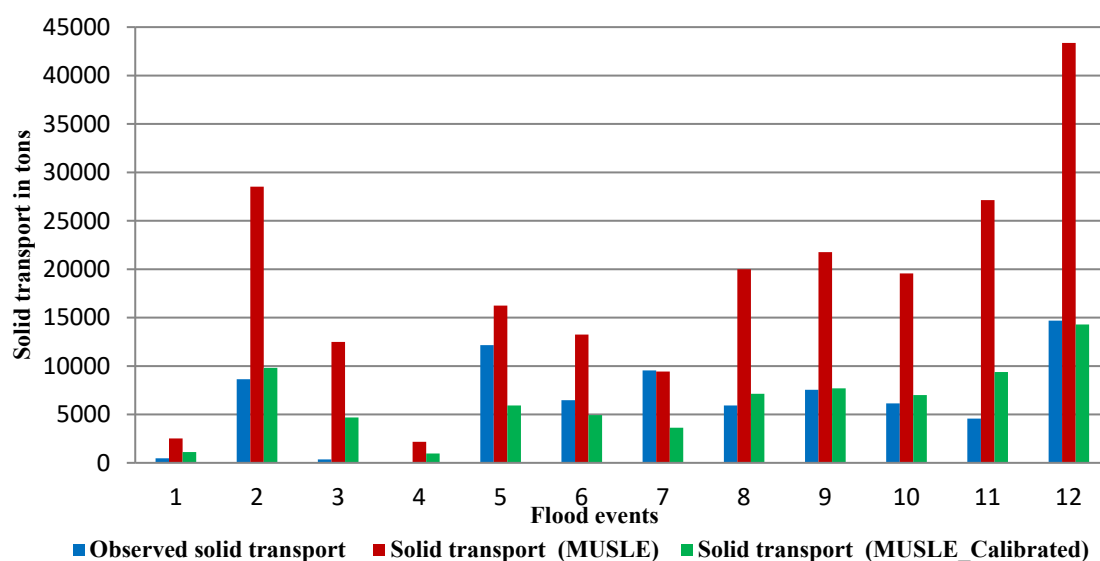
### 3.4.3. Sidi Mohamed Cherif Hydrological Station on the Machraa River

During the two hydrological years studied, twelve floods were recorded. The total solid volumes observed were 28,155 tons in 2016/2017 and 48,422 tons in 2017/2018. Table 16 summarizes the results of the application of the model to the hydrological station Sidi Mohamed Cherif.

**Table 16.** Results of the MUSLE model at Sidi Mohamed Cherif on the Machraa and comparison with observations.

| Hydrologic Year | Observed Solid Transport (tons) | Solid Transport (MUSLE) (tons) |                   |                 | Difference Observation-MUSLE (%) |                   |                 |
|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|
|                 |                                 | Uncalibrated                   | Calibration PBAIS | Calibration KGE | Uncalibrated                     | Calibration PBAIS | Calibration KGE |
| 2016/2017       | 28,155                          | 75,194                         | 27,431            | 26,225          | +167                             | −3                | −7              |
| 2017/2018       | 48,422                          | 141,249                        | 49,146            | 51,657          | +192                             | +1                | +7              |

Examination of the results of the MUSLE model calibrated by the two approaches—PBAIS and KGE—shows that calibration by the PBAIS method better simulates solid transport. Figure 11 shows the comparison of simulated and observed solid transport. Again, the MUSLE simulations are significantly too high for the events in the recording portion.



**Figure 11.** Comparison between MUSLE and observations at Sidi Mohamed Cherif on the Machraa.

#### 3.4.4. Ain Loudah Hydrological Station on the Korifla River

During the two hydrological years studied, twenty-seven floods were recorded. The total solid volumes observed were 68,759 tons in 2016/2017 and 92,324 tons in 2017/2018. Table 17 summarizes the results of the application of the model to the Ain Loudah hydrological station.

**Table 17.** Results of the MUSLE model at Ain Loudah on the Korifla and comparison with observations.

| Hydrolog<br>ic Year | Observe<br>d Solid<br>Transpo<br>rt<br>(tons) | Solid Transport<br>(MUSLE)<br>(tons) |                          |                        | Difference<br>Observation-MUSLE<br>(%) |                          |                        |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------------------|------------------------|
|                     |                                               | Uncalibrat<br>ed                     | Calibrati<br>on<br>PBAIS | Calibrati<br>on<br>KGE | Uncalibrat<br>ed                       | Calibrati<br>on<br>PBAIS | Calibrati<br>on<br>KGE |
| 2016/2017           | 68,759                                        | 41,083                               | 28,881                   | 27,739                 | −40                                    | −58                      | −60                    |
| 2017/2018           | 92,324                                        | 191,859                              | 132,202                  | 142,138                | +108                                   | +43                      | +54                    |

Examination of the results of the MUSLE model calibrated by the two approaches PBAIS and KGE, shows that calibration by the PBAIS method better simulates solid transports. Figure 12 shows the comparison of simulated and observed solid transports. Out of the four stations studied, it is on the Korifla at Ain Loudah that the simulations seem to be the most efficient.

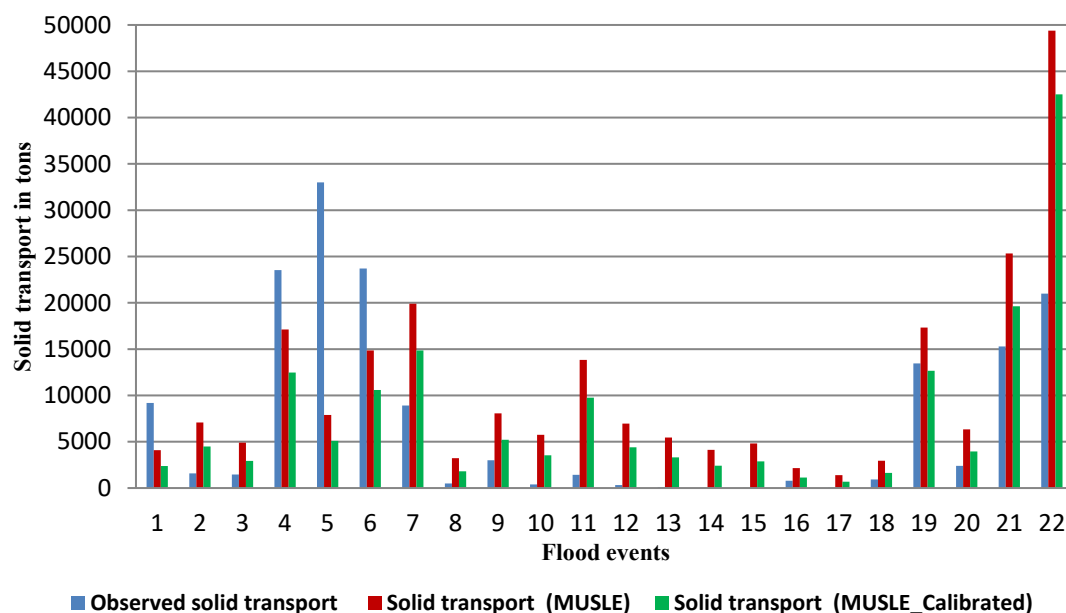


Figure 12. Comparison between MUSLE and observations at Ain Loudah on the Korifla.

From the deviations from observations at the four hydrological stations, it can be deduced that in general, the model calibrated by the PBAIS method gives better results than the model calibrated by the KGE method. Thus, from the observation we note that the differences varied between  $-58\%$  and  $+58\%$  for the model calibrated by PBAIS, between  $-60\%$  and  $+63\%$  for the model calibrated by the KGE method, and between  $-40\%$  and  $+192\%$  for the model not calibrated.

### 3.5. Comparison of Observations and Results of the MUSLE Model at the four Hydrological Stations Upstream from the SMBA Dam, with Bathymetric Data

To validate the calibration method, the Nash and Sutcliffe NSE index was used to measure the performance of the model. According to Nash–Sutcliffe [56], NSE is defined as:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \mu_{Obs})^2} \quad (10)$$

With NSE: Nash coefficient,  $Y_i^{obs}$ : observed solid transport,  $Y_i^{sim}$ : solid transport simulated by MUSLE,  $\mu_{Obs}$ : average of the observed solid transport values.

The NSE index varies from  $-\infty$  to 1, such that if  $NSE=1$ , then the modeled values match the observations perfectly, while a value above 0 shows a relationship between simulation and reality, and a value below 0 shows that there is no relationship between the two. In other words, the closer the efficiency is to 1, the more the model is observed to be accurate.

Table 18 shows the different calculated values of the Nash–Sutcliffe index, which compares observations to the values calculated by the uncalibrated MUSLE model and observations to the values of the calibrated MUSLE model.

Table 18. Nash–Sutcliffe index (NSE) at study stations.

| Name of Basin                  | Scaling Parameters after Calibration |       | Nash–Sutcliffe Index (NSE) |                  |
|--------------------------------|--------------------------------------|-------|----------------------------|------------------|
|                                | a                                    | B     | MUSLE                      | MUSLE calibrated |
| Bouregreg à Aguibat Zear       | 11.799                               | 0.548 | 0.38                       | 0.46             |
| Grou à Ras Fathia              | 11.799                               | 0.535 | −0.07                      | 0.02             |
| Korifla à Ain Loudah           | 11.800                               | 0.541 | −0.35                      | 0.30             |
| Machraa à Sidi Mohammed Cherif | 11.799                               | 0.502 | −9.8                       | 0.47             |

In general, the uncalibrated MUSLE model has negative NSE values except for those in the Bouregreg basin, which shows that the model values are far from reality, whereas the NSE values of the calibrated model are positive, varying between 0.02 and 0.47, which shows that the calibrated model is superior in reliably representing reality.

Though, for the continuity of the experiment we are continuing the calculation on the four basins in order to complete the comparisons with the volumes of sediment deduced from the bathymetric measurements carried out in the SMBA dam reservoir. For the calculation of the volume of suspended matter, an earthy density of 1.5 t/m<sup>3</sup> is adopted [57]. The siltation of the dam is considered to be equal to  $9.49 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year. Table 19 summarizes the results of the calculations for all the hydrological stations.

**Table 19.** Summary table of observation results, application of the MUSLE, calibrated MUSLE<sub>model</sub> and bathymetry for the four sub-basins of the Bouregreg.

| Name of Basin                           | Solid Transport 2016/2017 |           |                  | Solid Transport 2017/2018 |           |                  |
|-----------------------------------------|---------------------------|-----------|------------------|---------------------------|-----------|------------------|
|                                         | Observation               | MUSLE     | MUSLE calibrated | Observation               | MUSLE     | MUSLE calibrated |
| Bouregreg                               | 742,334                   | 619,023   | 487,494          | 439,735                   | 888,011   | 694,575          |
| Grou                                    | 673,551                   | 875,366   | 517,194          | 740,083                   | 1,446,831 | 896,438          |
| Korifla                                 | 68,759                    | 41,083    | 28,881           | 92,324                    | 191,859   | 132,202          |
| Machraa                                 | 28,155                    | 75,194    | 27,431           | 48,422                    | 141,249   | 49,146           |
| Total (tons)                            | 1,512,799                 | 1,610,666 | 1,061,000        | 1,320,564                 | 2,667,950 | 1,772,361        |
| Total (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | 1.01                      | 1.07      | 0.71             | 0.88                      | 1.78      | 1.18             |

**Table 20.** Comparison of observation results, application of the calibrated MUSLE, MUSLE<sub>model</sub> and bathymetry for the four sub-basins of the Bouregreg during 2016/2017 and 2017/2018.

| Hydrologic Year | Bathymetry (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Difference MUSLE/Observation | Difference MUSLE Calibrated/Observation | Difference Observation/Bathymetry | Difference MUSLE/Bathymetry | Difference MUSLE Calibrated/Bathymetry |
|-----------------|----------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| 2016/2017       | 9.25                                         | +5%                          | −30%                                    | −89%                              | −89%                        | −93%                                   |
| 2016/2018       |                                              | +102%                        | +34%                                    | −91%                              | −81%                        | −88%                                   |

Thus, the results listed in Tables 19 and 20 show that the calibrated model is closer to the measurement than the non-calibrated model, and that the observed values of sediment transport at the four stations, which vary between  $1.01 \times 10^6$  m<sup>3</sup> and  $0.88 \times 10^6$  m<sup>3</sup> for the two hydrological years 2016/2017 and 2017/2018 respectively, and remain largely lower than the quantity of sediments obtained by bathymetric measurements in the SMBA dam, which is approximately  $9.49 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.

#### 4. Discussion and Conclusions

The relationships between man, environment, and solid transport are well understood at the spatial scale of catchment areas, and modeling tools using satellite data are particularly suitable [58]. The results obtained from the application of the model (MUSLE), show that the soils of the Bouregreg catchment area are affected by several factors engendering erosion, i.e., steep slopes, low vegetation cover and soil erodibility. Thus, the processing of spatial remote sensing images to determine the biophysical characteristics of the watershed has made it possible to identify areas of high erodibility, low vegetation cover, and steep slopes, which can be used for potential development purposes.

The analysis of solid transports observed during two years at the four hydrological stations that control the main tributaries of the SMBA dam reservoir showed that the Bouregreg and the Grou generated 1,415,885 tons of suspended matter, i.e., 94% and 956,929 tons of suspended matter, i.e.,



73% of the total suspended matter generated by the four basins during the 2016/2017 and 2017/2018 hydrological years. Compared to bathymetry, the four sub-basins generate only 12% of the solid transport to the dam in the best case. Hence the relevance of concentrating anti-erosion actions on the dam banks and the intermediate basin which contribute to more than 88% of the solid transport. These actions will have to be carried out in areas of high erodibility and slope to ensure the effectiveness of the intervention.

On the other hand, examination of the figures for MUSLE and calibrated MUSLE values shows that the model in these two versions does not predict peaks in solid transport well. It overestimates low values and underestimates high solid transport values most of the time. Indeed, the deviations from observations range from +5% for the dry year, to +102% for the wet year for the non-calibrated model. These results are similar to several applications of the model in different areas around the world [40]. The deviations recorded for the calibrated model are significantly improved. They vary respectively between −30% and +34% [59]. Thus, the calibrated version of the model gives better results with less than +55% error in sediment prediction [60]. These results are interesting on an interannual average, but do not allow the prediction of quantities transported to the stations during unit floods due to the very high dispersion of the relationship between observation and modeling, which results in average-to-low Nash index values. The large positive differences are due to the underestimation of solid transport peaks by the model. Indeed, the model involves the entire basin without concern for the spatial and temporal distribution of rainfall.

Although the model overestimates values relative to observations, comparison of the model to bathymetric data shows that the differences between mean siltation and model results range from −89% to −81% for the non-calibrated version of the model, and from −93% to −88% for the calibrated version. This underestimation of the inflows to the dam in relation to the mean silting is explained by the fact that the upstream basins do not control the whole SMBA dam basin and that the basins immediately surrounding the banks of the dam reservoir bring significant quantities of sediment to the dam, as assumed by the first results of Maleval [61] on the SMBA dam reservoir, and this is mainly after its elevation, for reasons that are perhaps not only related to the physics of the environment, but also perhaps to the evolution of agro-sylvo-pastoral practices in an environment undergoing rapid socio-economic change due to the proximity of the capital and the development of the "Grand Rabat" and new traffic routes [62,63]. The gaps between the observed solid transport and the silting rate, which are respectively −89% and −91%, confirm this observation, which is also the situation observed by Hallouz et al.[64] on the Wadi Mina basin and the Sidi Mohamed Ben Aouda dam, of a size comparable to the Bouregreg in Western Algeria.

In order to improve the model's output, its scaling parameters should be reviewed and its sensitivity to different physical factors including basin size by adopting a distributed form of sub-basin modeling should be tested [65]. This approach requires a long series of observations that are currently unavailable, but which are being acquired since the ABHBC, which manages the water resource on the Bouregreg catchment area and the SMBA dam, has set up permanent concentration of suspended solids observation on the stations of the basin, and soon a long time series will be available to refine these first results. Michalec et al.[66] have pointed out the necessity to calibrate the MUSLE model with long time series of observations in order to reduce the uncertainty of simulated erosion provided, even if in some cases very good correlations have been obtained from a calibration with only 10 events like in Nigeria [30]. These measurements will allow a monitoring of the contribution of each sub-basin in order to better direct intervention measurements towards the most productive areas on the one hand, thus reducing the overall cost of the measures to reduce erosion, and to improve modeling and subsequent solid transport forecasting on the other hand.

Eventually, the results of the MUSLE model confirm the relevance of its application in watershed management studies once calibrated, since it integrates all forms of erosion observed at the watershed scale, coupled with hydrological data, which greatly improves accuracy compared to USLE [67] and to RUSLE [68]. Indeed, the average specific degradation at the level of the Bouregreg basin alone at the Aguibat Zear station is of the order of 13.81 t/ha/year according to Moussebbih et al.[69] when calculated by the RUSLE method, whereas those of calibrated MUSLE and observation are of the

order of 1.6 t/ha/year. The studies carried out on the wadi Mina basin in Algeria, a basin similar to the Bouregreg basin [64], confirm this finding with deviations of the RUSLE model results from the measurement of suspended solids concentrations, which can reach 79%. In Spain, Ramos-Diez et al. [70] have used the USLE formula to assess the amount of sediment inputs to 25 very small check dams used in an important restoration project over a 9 km<sup>2</sup> area in the north of Spain, showing interesting but still mitigated results and concluding that the size and shape of the dams had an impact on the quality of the USLE assessment.

Kronvang et al. [71] showed that bank erosion was the dominant sediment source (90–94%) in the River Odense catchment in Denmark during three study years. They add that in-channel and overbank sediment sinks and storage dominated the sediment budget, as 79–94% of the sediment input from all sources was not exported from the catchment during the three study years. This is in accordance with our results, as the regular bathymetric survey to monitor the silting up rate of the dam have shown that half of the sediment input to the reservoir comes from the dam banks. Our results are very important for the forthcoming works for erosion mitigation on the Bouregreg catchment; they will enable more efficient orientation of the soil conservation and restoration works that may be carried out in the future, with priority being given to the environment close to the dam, in order to preserve the water capacity of the SMBA dam reservoir while optimizing the financial resources mobilized. Palazon and Navas [72] have shown the same interest to monitor the sediment sources draining to a large reservoir in the Esera River, Ebro basin in Spain. The small basin size (1500 km<sup>2</sup>) allowed them to use the SWAT model as an alternative to MUSLE with two gauging stations, each one being covered by different types of soil. This might make it possible to implement the SWAT model on the Bouregreg basin, when the ABHBC will have started the monitoring of sediment transport at all the stations of the basin.

To conclude, it should be pointed out that in the context of climate change, which predicts, in Morocco, an increase in temperatures and a drop in rainfall [73–75], the projections of erosion and sediment transport evolution that are possible from climate model outputs, and which are based on USLE or SWAT type approximation models [76], will need observed data to calibrate and validate their results.

**Author Contributions:** Conceptualization, M.A.E. and G.M.; methodology, M.A.E.; software, M.A.E.; validation, G.M., I.K. and A.Z.; formal analysis, M.A.E.; investigation, M.A.E.; resources, A.Z.; data curation, A.Z.; writing—original draft preparation, M.A.E. and G.M.; writing—review and editing, M.A.E.; visualization, M.A.E.; supervision, G.M., I.K. and A.Z.; project administration, G.M., I.K. and A.Z. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Acknowledgments:** Thanks to ABHBC for the hydrological and rainfall data.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Mahe, G.; Emran, A.; Brou, Y.T.; Tra Bi, A.Z. Analyse statistique de l'évolution de la couverture végétale à partir d'images MODIS et NOAA sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). *Géo Obs.* **2012**, *20*, 33–44.
2. Laouina, A.; Aderghal, M.; Al Karkouri, J.; Antari, M.; Chaker, M.; Laghazi, Y.; Machmachi, I.; Machouri, N.; Nafaa, R.; Naïmi, K. The efforts for cork oak forest management and their effects on soil conservation. *For. Syst.* **2010**, *19*, 263–277.
3. Schmidt, S.; Alewell, C.; Meusburger, K. Monthly RUSLE soil erosion risk of Swiss grasslands. *J. Maps* **2019**, *15*, 247–256.
4. Yahiaoui, S.; Zerouali, A. Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In *Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management*; IAHS Publ 362; Schumann, A., Belyaev, V.B., Gargouri, E., Kucera, G., Mahe, G. Eds.; IAHS Press: Wallingford, UK, 2013; pp. 115–124.
5. Khomsi, K.; Mahe, G.; Sinan, M.; Snoussi, M. Hydro-climatic variability in two Moroccan watersheds: A comparative analysis of temperature, rain and flow regimes. In *Climate and Land Surface Changes in*

- Hydrology*; IAHS Publ. 359; Boegh, E., Blyth, E., Hannah, D.M., Hisdal, H., Kunstmann, H., Su, B., Yilmaz, K.K., Eds.; IAHS Press: Wallingford, UK, 2013; pp. 183–190.
6. Khomsi, K.; Mahe, G.; Trambly, Y.; Sinan, M.; Snoussi, M. Regional impacts of global change: Seasonal trends in extreme rainfall, runoff and temperature in two contrasted regions of Morocco. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2016**, *16*, 1079–1090, doi:10.5194/nhess-16-1079-2016.
  7. Mahe, G.; Emran, A.; Brou, Y.T.; Tra Bi, A.Z. Impact de la variabilité climatique sur l'état de surface du bassin versant du Bouregreg (Maroc). *Eur. J. Sci. Res.* **2012**, *84*, 417–425.
  8. ABV. *Plan National d'Aménagement des Bassins Versant*; Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification: Rabat, Morocco, 1996.
  9. Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. *Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation*; US Department of Agriculture: Washington DC, USA, 1965.
  10. Williams, J.R. *Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor*; ARS-S. Southern Region, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture: Washington DC, USA, 1975; Volume 40, p. 244.
  11. El Bahi, S.; El Wartiti, M.; Yassin, M.; Calle, A.; Casanova, J.L. Applying revised universal loss equation model to forest lands in Central Plateau of Morocco. *Rev. Teledetección* **2005**, *23*, 89–97.
  12. Chadli, K. Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco). *Model. Earth Syst. Environ.* **2016**, *2*, 51.
  13. Elaloui, A.; Marrakchi, C.; Fekri, A.; Maimouni, S.; Aradi, M. USLE-based assessment of soil erosion by water in the watershed upstream Tessaoute (Central High Atlas, Morocco). *Modeling Earth Syst. Environ.* **2017**, *3*, 873–885.
  14. Hara, F.; Achab, M.; Emran, A.; Mahe, G.; Fhel, B.E. Estimate the Risk of Soil Erosion Using USLE through the Development of an Open Source Desktop Application: DUSLE (Desktop Universal Soil Loss Equation). In Proceedings of the 3rd International Conference on African Large River Basin Hydrology, Alger, Algeria, May 2018. Available online: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02397686/> (accessed on 17 June 2020).
  15. Boufala, M.; El Hmaidf, A.; Chadli, K.; Essahlaoui, A.; El Ouali, A.; Lahjouj, A. Assessment of the Risk of Soil Erosion Using RUSLE Method and SWAT Model at the M'dez Watershed, Middle Atlas, Morocco. In Proceedings of the E3S Web Conf., The Seventh International Congress "Water, Waste and Environment" (EDE7-2019), Salé, Morocco, 20–22 November 2019; Volume 150, doi:10.1051/e3sconf/202015003014.
  16. Toumi, S.; Meddi, M.; Mahe, G.; Brou, Y.T. Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrol. Sci. J.* **2013**, *58*, 1–17.
  17. Mihi, A.; Benarfa, N.; Arar, A. Assessing and mapping water erosion-prone areas in northeastern Algeria using analytic hierarchy process, USLE/RUSLE equation, GIS, and remote sensing. *Appl. Geomat.* **2019**, doi:10.1007/s12518-019-00289-0.
  18. Gaubi, I.; Chaabani, A.; Ben Mammou, A.; Hamza, M.H. A GIS-based soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia). *Nat. Hazards* **2017**, *86*, 219–239.
  19. Toubal, A.K.; Achite, M.; Ouillon, S.; Dehni, A. Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the Wadi Sahouat basin. North-West Alger. *Environ. Monit. Assess.* **2018**, *190*, 4.
  20. El Aroussi, O.; Mesrar, L.; El Garouani, A.; Lahrach, A.; Beaabidaate, L.; Akdi, B.; Jabrane, R. Predicting the potential annual soil loss using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in the oued El Malleh catchment (Prerif, Morocco). *Present. Environ. Sustain. Dev.* **2011**, *5*, 5–16.
  21. Lamyaa, K.; M'bark, A.; Brahim, I.; Hicham, A.; Soraya, M. Mapping Soil Erosion Risk Using RUSLE, GIS, Remote Sensing Methods: A Case of Mountainous Sub-watershed, Ifni Lake and High Valley of Tifnoute (High Moroccan Atlas). *J. Geogr. Environ. Earth Sci. Int.* **2018**, *14*, 1–11.
  22. Bagarello, V.; Ferro, V.; Giordano, G.; Mannocchi, F.; Todisco, F.; Vergni, L. Statistical check of USLE-M and USLE-MM to predict bare plot soil loss in two Italian environments. *Land Degrad. Dev.* **2018**, *29*, 2614–2628.
  23. Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*; Department of Agriculture, Science and Education Administration: Washington, DC, USA, 1978.
  24. Renard, K.G. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*; United States Government Printing: Washington, DC, USA, 1997.

25. Kinnell, P.I.A. Why the Universal Soil Loss Equation and the Revised Version of It Do Not Predict Event Erosion Well. *Hydrol. Process.* **2005**, *19*, 851–854, doi:10.1002/hyp.5816,
26. Haan, C.T.; Barfield, B.J.; Hayes, J.C. Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments. *J. Hydrol. -Amst.* **1963**, *176*, 296–297.
27. Novotny, V. *Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution*; Van Nostrand-Reinhold Publishers: New York, NY, USA, 1994; ISBN 978-0442005597.
28. Alewell, C.; Borrelli, P.; Meusbürger, K.; Panagos, P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *Int. Soil Water Conserv. Res.* **2019**, *7*, 203–225.
29. Odongo, V.O.; Onyando, J.O.; Mutua, B.M.; van Oel, P.R.; Becht, R. Sensitivity analysis and calibration of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) for the upper Malewa Catchment, Kenya. *Int. J. Sediment Res.* **2013**, *28*, 368–383.
30. Adegede, A.P.; Mbajiorgu, C.C. Event-based sediment yield modeling for small watersheds using MUSLE in north-central Nigeria. *Agric. Eng. Int.: CIGR J.* **2019**, *21*, 7–17.
31. Yassin, M.; Pépin, Y.; El Bahi, S.; Zante, P. Evaluation de l'érosion au micro-bassin de Sidi Sbaa: Application du modèle MUSLE. *Ann. Rech. For. Maroc* **2013**, *42*, 171–181.
32. Samaras, A.G.; Koutitas, C.G. Modeling the impact of climate change on sediment transport and morphology in coupled watershed-coast systems: A case study using an integrated approach. *Int. J. Sediment Res.* **2014**, *29*, 304–315.
33. Fang, H. Impact of land use changes on catchment soil erosion and sediment yield in the northeastern China: A panel data model application. *Int. J. Sediment Res.* **2020**; doi:10.1016/j.ijsrc.2020.03.017.
34. Djoukbal, O.; Hasbaia, M.; Benselama, O.; Mazour, M. Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). *Modeling Earth Syst. Environ.* **2018**, doi:10.1007/s40808-018-0562-6.
35. Mahe, G.; Benabdelfadel, H.; Dieulin, C.; Elbaraka, M.; Ezzaouini, M.; Khomsi, K.; Rouche, N.; Sinan, M.; Snoussi, M.; Tra Bi, A.; et al. Evolution des débits liquides et solides du Bouregreg. In *Gestion Durable des Terres. Proceedings de la Réunion Multi-Acteurs Sur le Bassin du Bouregreg. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013*; Laouina, A., Mahe, G., Eds.; Edité par ARGDT: Rabat, Morocco, 2014; pp. 21–36, ISBN 978-9954-33-482-9.
36. Khali Issa, L.; Ben Hamman Lech-Hab, K.; Raissouni, A.; El Arrim, A. Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par approche SIG/USLE au niveau du bassin versant Kalaya (Maroc Nord Occidental). *J. Mater. Environ. Sci.* **2016**, *7*, 2778–2795.
37. El Jazouli, A.; Barakat, A.; Ghafiri, A.; El Moutaki, S.; Ettaqy, A.; Khellouk, R. Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: A case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco). *Geoscience Lett.* **2017**, *4*, 1, doi:10.1186/s40562-017-0091-6.
38. Sabri, E. Impact des Processus Erosifs sur les Ressources Naturelles des Bassins Hydrographiques et sur L'état D'envasement des Retenues des Barrages: Application au Bassin Versant de L'oued El Abid en Amont du Barrage de Bin El Ouidane- Maroc. Ph.D. Thesis, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, Morocco, 2018.
39. Sadeghi, S.H.R.; Gholami, L.; Khaledi Darvishan, A.; Saeidi, P. A review of the application of the MUSLE model worldwide. *Hydrol. Sci. J.* **2014**, *59*, 365–375.
40. Aboulabbes, O. Infiltration Characteristics on a Small Watershed. Master's Thesis, Utah State University, Logan Utah, USA, 1984.
41. El Gaatib, R.; Erraji, A.; Larabi, A. Impact des processus érosifs sur les ressources naturelles des bassins hydrographiques et sur l'état d'envasement des retenues de barrages: Application au Bassin Versant de l'Oued Beht en amont du barrage El Kansra, (Maroc). *Géo Obs.* **2014**, *21*, 4.
42. Jamagne, M. *Bases et Techniques d'une Cartographie des Sols*; Institut National de la Recherche Agronomique: Paris, France, 1967.
43. Stone, R.P.; Hilborn, D. Universal Soil Loss Equation, USLE; Factsheet; Government of Ontario, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs: Canada, 2000. Available online: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-051.htm> (accessed on 17 June 2020).
44. Pribyl, D.W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* **2010**, *156*, 75–83.
45. Van Bemmelen, J.M. "Über die Bestimmung des Wassers, des Humus, des Schwefels, der in den colloïdalen Silikaten gebundenen Kieselsäure, des Mangans usw. im Ackerboden". *Die Landwirthschaftlichen Vers.-Stn.* **1890**, *37*, 279–290.

46. Wolff, E. Entwurf zur boden analyse. *Z. Anal. Chem.* **1864**, *3*, 85–115.
47. Sprengel, C. Ueber Pflanzenhumus, Humussaure und humussaure Salze. *Arch. für die Gesammte* **1826**, *8*, 145–220.
48. Tra Bi, Z.A.; Emran, A.; Brou, Y.T.; Mahé, G. Cartographie par arbre de décision de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Bouregreg, en région semi-aride au centre Nord-Ouest du Maroc, Abidjan, Côte d'Ivoire. *Rev. Sci. Int. Géomatique* **2014**, *1*, 43–54.
49. Sadiki, A.; Bouhlassa, S.; Auajjar, J. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'équation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc). *Bull. de l'Inst. Sci.* **2004**, *26*, 69–79.
50. Goussot, E.; Brou, Y.T.; Laouina, A.; Chaker, M.; Emran, A.; Machouri, N.; Mahe, G.; Sfa, M.; Tra Bi, A. Land covers dynamic and agricultural statistics on the Bouregreg watershed in Morocco. *Eur. J. Sci. Res.* **2014**, *126*, 191–205.
51. Tra Bi, A.Z.; Brou, T.; Emran, A.; Mahe, G. Remote sensing and GIS analysis of the dynamic of vegetation in climate variability context on the Bouregreg watershed. In *Climate and Land Surface Changes in Hydrology*; IAHS Publ. 359; Boegh, E., Blyth, D.M., Hannah, H., Hisdal, H., Kunstmann, B., Su, K.K., Yilmaz, Eds.; IAHS Press: Wallingford, UK, 2013; pp. 403–410.
52. El Hadraoui, Y. *Étude Diachronique de L'occupation du sol et de Modélisation des Processus Erosifs du Bassin Versant du Bouregreg (Maroc) à Partir des Données de L'observation de la Terre*; Mémoire d'ingénieur du CNAM, Spécialité Géomètre et Topographe: Le Mans, France, 2013. Available online: <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00920465> (accessed on 17 June 2020).
53. Lahlou, A. *La Dégradation Spécifique des Bassins Versants et son Impact sur L'envasement des Barrages*; IAHS Publ. 137; IAHS Press: Wallingford, UK, 1982; pp. 163–169. Available online: <https://pdfs.semanticscholar.org/cddc/4f4b21f52e34043e1b0547d00d0e9dd389b9.pdf> (accessed on 17 June 2020).
54. Gupta, H.V.; Sorooshian, S.; Yapo, P.O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrol. Eng.* **1999**, *4*, 135–143.
55. Gupta, H.V.; Kling, H.; Yilmaz, K.K.; Martinez, G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* **2009**, *377*, 80–91.
56. Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *J. Hydrol.* **1970**, *10*, 282–290.
57. Lahlou, A. *Etude du transport solide à la station Dar Es Soltane sur l'oued Bouregreg*; Rapport de travaux du service GDE; Gestion des eaux, Ministère des travaux publics et des communications, Direction de l'hydraulique: Rabat, Morocco, 1971.
58. Mahe, G.; Aksoy, H.; Brou, Y.T.; Meddi, M.; Roose, E. Relationships among man, environment and sediment transport: A spatial approach. *Rev. Sci. Eau* **2013**, *26*, 235–244.
59. De Vente, J.; Verduyn, R.; Verstraeten, G.; Vanmaercke, M.; Poesen, J. Factors controlling sediment yield at the catchment scale in NW Mediterranean geoeosystems. *J. Soils Sediments* **2011**, *11*, 690–707.
60. Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* **2007**, *50*, 885–900.
61. Maleval, V. Premiers résultats des mesures d'érosion ravinatoire sur les versants lacustres du barrage Sidi Mohamed ben Abdellah (Maroc) et perspectives de recherche. In *Gestion Durable des Terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013*; Laouina, A., Mahe, G., Eds.; Edité par ARGDT: Rabat, Morocco, 2014; pp. 53–62; ISBN 978-9954-33-482-9.
62. Laouina, A.; Chaker, A.; Aderghal, M.; Machouri, N.; Al Karkouri, J. Echelles d'évaluation de la dynamique des terres et de leur gestion, du territoire social au bassin-versant expérimental. In *Gestion Durable des Terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013*; Laouina, A., Mahe, G. Eds.; Edité par ARGDT: Rabat, Morocco, 2014; pp. 119–146. ISBN 978-9954-33-482-9.
63. Chaker, M.; Laouina, A.; El Marbough, M. Changement agropastoral et dégradation des terres dans le plateau Sehoul. In *Gestion Durable des Terres. Proceedings de la Réunion Multi-Acteurs sur le Bassin du Bouregreg. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013*; Laouina, A., Mahe, G., Eds.; Edité par ARGDT: Rabat, Morocco, 2014; pp. 85–102, ISBN 978-9954-33-482-9,

64. Hallouz, F.; Mahé, G.; Toumi, S.; Rahmani, S.E.A. Erosion, suspended sediment transport and sedimentation on the Wadi Mina at the Sidi M'Hamed Ben Aouda Dam, Algeria. *Water* **2018**, *10*, 895, doi:10.3390/w10070895.
65. Gwapedza, D.; Hughes, D.A.; Slaughter, A.R. Spatial scale dependency issues in the application of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE). *Hydrol. Sci. J.* **2018**, *63*, 1890–1900.
66. Michalec, B.; Walega, A.; Cupak, A.; Strutyński, M. Verification of the musle to determine the amount of suspended sediment. *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* **2017**, *12*, 235–244.
67. Iroumé, A.; Carey, P.; Bronstert, A.; Huber, A.; Palacios, H. GIS application of USLE and MUSLE to estimate erosion and suspended sediment load in experimental catchments, Valdivia, Chile. *Aplicación SIG de USLE y MUSLE para Estimar la Erosión y el Transporte de Sedimentos en Suspensión en Cuencas experimentales* **2011**, *34*, 119–128.
68. Arekhi, S.; Shabani, A.; Alavipanah, S.K. Evaluation of integrated KW-GIUH and MUSLE models to predict sediment yield using geographic information system (GIS) (Case study: Kengir watershed, Iran). *Afr. J. Agric. Res.* **2011**, *6*, 4185–4198.
69. Moussebbih, A.; Souissi, M.; Larabi, A.; Faouzi, M. Modeling and mapping of the water erosion risk using Gis/Rusle approach in the Bouregreg river watershed. *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.* **2019**, *9*, 1605–1618, doi:10.1016/j.iswcr.2020.03.003.
70. Ramos-Diez, I.; Navarro-Hevia, J.; San Martín, R.; Díaz-Gutiérrez, V.; Mongil-Manso, J. Evaluating methods to quantify sediment volumes trapped behind check dams, Saldaña badlands (Spain). *Int. J. Sediment Res.* **2016**, *28*, 2446–2456.
71. Kronvang, B.; Andersen, H.E.; Larsen, S.E.; Audet, J. Importance of bank erosion for sediment input, storage and export at the catchment scale. *J. Soils Sediments* **2013**, *13*, 230–241, doi:10.1007/s11368-012-0597-7.
72. Palazón, L.; Navas, A. Modeling sediment sources and yields in a Pyrenean catchment draining to a large reservoir (Ésera River, Ebro Basin). *J. Soils Sediments* **2014**, *14*, 1612–1625, doi:10.1007/s11368-014-0911-7.
73. Driouech, F.; Mahé, G.; Déqué, M.; Dieulin, C.; El Heirech, T.; Milano, M.; Benabdelfadel, H.; Rouché, N. Evaluation d'impacts potentiels de changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya au Maroc. In *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources. Proceedings of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010*; IAHS Publ. 340; IAHS Press: Wallingford, UK, 2010; pp. 561–567. Available online at [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers15-08/010055009.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-08/010055009.pdf), accessed on June 2020
74. Filahi, S.; Tramblay, Y.; Mouhir, L.; Diaconescu, E.P. Projected changes in temperature and precipitation indices in Morocco from high-resolution regional climate models. *Int. J. Climatol.* **2017**, *37*, 4846–4863.
75. Tramblay, Y.; Jarlan, L.; Hanich, L.; Somot, S. Future scenarios of surface water resources availability in North African dams. *Water Resour. Manag.* **2018**, *32*, 1291–1306.
76. Raclot, D.; Naimi, M.; Chikhaoui, M.; Nunez, J.P.; Huard, F.; Herivaux, C.; Sabir, M.; Pepin, Y. Distinct and combined impacts of climate and land use scenarios on water availability and sediment loads for a water supply reservoir in northern Morocco. *Int. J. Soil Conserv.* **2020**, doi:10.1016/j.iswcr.2020.03.003.



# Analysis Of Two Years Of Suspended Solids Transport Upstream Of Sidi Mohamed Ben Abdellah Reservoir, Morocco

Mohamed Abdellah Ezzaouini, Gil Mahé, Ilias Kacimi, Abdelaziz Zerouali

**Abstract :** A limited number of studies have been conducted in Morocco to estimate dams siltation rate based on suspended solids concentration (SSC) field measurements. The present article provides an evaluation of the siltation rate through an inventory of field measurements data which has been collected upstream of Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA) Dam reservoir. The analysis was based on measurements performed according to a predefined protocol at four hydrological stations located immediately upstream of the dam during the hydrological years of 2016/2017 and 2017/2018. The analysis was also based on several bathymetric field surveys performed throughout the reservoir area since the construction of the dam. Field measurements show that recorded sedimentation depth at the four stations during the first year was 14% higher than the second year although it had an excess of rainfall and runoff compared to the first year. Estimated correlation coefficients between flow rates and suspended solids concentration was ranging from 0.20 to 0.42. Those between solids and liquids flow rates have higher correlation coefficients ranging from 0.75 to 0.91. Seasonal analysis and the adoption of the threshold did not improve significantly the relationships between these parameters. Moreover, only 18% of the dam siltation originates from upstream sources. The main hypothesis that we can formulate is that the dam's sediments most likely come from the erosion of its banks.

**Keywords :** Sediment transport, Suspended solids concentration, Dam, Bouregreg, Morocco.

## 1. INTRODUCTION

Water erosion is at the origin of large quantities of sediments carried along by rivers during flooding events in the Bouregreg basin towards the reservoir of the SMBA dam; the extent of the phenomenon can be observed through the color of the water in the flooded rivers [1]. These suspended solids are produced on skeletal soils, poorly protected by sparse vegetation [[2],[3],[4],[5]]. In mountainous areas, these quantities increase on steep slopes, depending on the nature of the soil and the vegetation cover combined with human activities. Indeed, the situation of the dam (SMBA), which has already lost  $132 \times 10^6 \text{ m}^3$  of its capacity since its commissioning in 1974, poses serious problems for water resource managers in terms of loss of storage capacity, which has an impact on the life span of the structure and the quality of the water in the reservoir [[6],[7],[8]]. To study this phenomenon, the Basin Agency has set up a network to measure the concentration of suspended solids at the four hydrological stations located immediately upstream of the SMBA dam to study the transport of solid matter. As few studies have been carried out in Morocco to estimate the silting rate based on the measurement of solid transport, this article deals with this issue through an inventory of the silting of the SMBA dam reservoir based on the analysis performed measurements according to a predefined protocol at four hydrological stations located immediately upstream of the dam during the hydrological years of 2016/2017 and 2017/2018, and

bathymetric surveys conducted at the reservoir area since its commissioning.

## 2 DATA AND METHODS

### 2.1 Study area

The Bouregreg Basin, located within the North-West region of Morocco, covers an area total of approximately 10210 km<sup>2</sup> at with a downstream exit point located at Bouregreg River mouth, North of Rabat City. Figure 1 show the location of bouregreg basin.

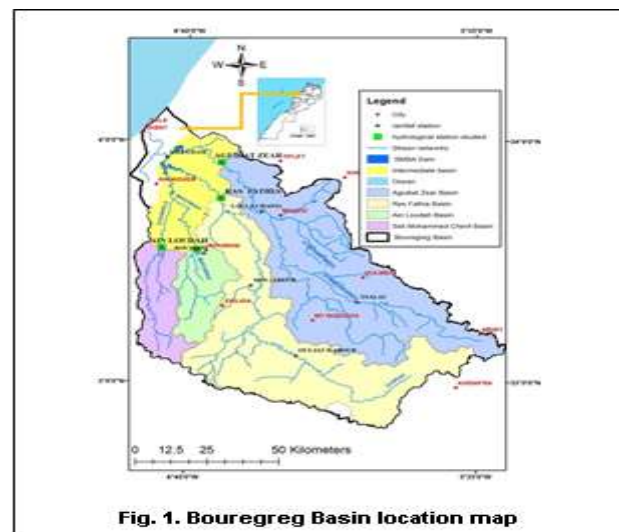


Fig. 1. Bouregreg Basin location map

- Mohamed Abdellah Ezzaouini, Geoscience, Water and Environment Laboratory, Faculty of Sciences, Mohammed V University, Avenue Ibn Batouta, 10100 Rabat, Morocco, E-mail: ezzaouini70@yahoo.fr
- Gil Mahé Laboratoire HydoSciences, Université Montpellier, IRD, France. E-mail: gilmahe@hotmail.com
- Ilias Kacimi Water and Environment Laboratory, Faculty of Sciences, Mohammed V University, Avenue Ibn Batouta, 10100 Rabat, Morocco. E-mail: iliaskacimi@yahoo.fr
- Abdelaziz Zerouali Basin of the Bouregreg and Chaouia Agency, BP 262, Benslimane, Morocco. E-mail: azlso@yahoo.fr



The area is characterized by a highly varying geographic and geomorphologic framework, composed of two natural areas: The Middle Atlas Mountains with high undulating topography extending over the high Bouregreg area, and the Zaïers plateaus in the form of plains crisscrossed by deep valleys in the north-west.

## 2.2 Hydro-Pluviometric Context of the Study Period

Rainfall analysis at Bouregreg watershed gauging stations during the two years' timeframe showed that the year 2016/2017 was in deficit by 10% and the year 2017/2018 was in surplus by 26% from the average over the entire basin. Figure 2 summarizes the annual rainfall deviations recorded from the average of each gauging stations calculated since it became operational.

TABLE 1  
Water inflows during the study period at the selected stations

| Hydrological station                    | River     | Inflows (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) |           |           | Deviation from average (%) |           |
|-----------------------------------------|-----------|-------------------------------------------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|
|                                         |           | 2016/2017                                 | 2017/2018 | Mean year | 2016/2017                  | 2017/2018 |
| AguibatZear                             | Bouregreg | 122.26                                    | 221.53    | 227.69    | -46                        | -3        |
| Ras Fathia                              | Grou      | 95.04                                     | 162.86    | 194.26    | -51                        | -16       |
| Ain Loudah                              | Korifla   | 13.39                                     | 23.50     | 18.92     | -29                        | +24       |
| Sidi Mohamed Cherif                     | Machraa   | 3.78                                      | 12.93     | 16.71     | -77                        | -23       |
| Total (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) |           | 234.47                                    | 420.82    | 457.58    | -49                        | -8        |

TABLE 2  
Characteristics of the hydrological stations concerned by the study

| Hydrological station | River     | Start year | ID number | Watershed Area (Km <sup>2</sup> ) | Lambert Coordinates |         |     | Number of samples since 2016 |
|----------------------|-----------|------------|-----------|-----------------------------------|---------------------|---------|-----|------------------------------|
|                      |           |            |           |                                   | X                   | Y       | Z   |                              |
| Aguibat Zear         | Bouregreg | 1977       | 3118/13   | 3881                              | 394.500             | 368.150 | 90  | 1080                         |
| Ras Fathia           | Grou      | 1975       | 989/20    | 3485                              | 394.250             | 351.800 | 100 | 968                          |
| Ain Loudah           | Korifla   | 1971       | 2673/20   | 699                               | 373.750             | 329.150 | 175 | 374                          |
| Sidi Mohamed Cherif  | Machraa   | 1971       | 2674/21   | 656                               | 385.850             | 328.200 | 270 | 919                          |

TABLE 3  
CSSmax and Qmax recorded at the hydrological stations under study

| Hydrological station | River     | SSC max (g/l) | Date SSCmax      | Qmax (m <sup>3</sup> /s) | Date Qmax        |
|----------------------|-----------|---------------|------------------|--------------------------|------------------|
| Aguibat Zear         | Bouregreg | 34.2          | 30/06/2017 02:00 | 265.9                    | 07/03/2018 14:00 |
| Ras Fathia           | Grou      | 55.4          | 24/02/2017 22:00 | 423.8                    | 07/03/2018 09:00 |
| Ain Loudah           | Korifla   | 20.2          | 19/02/2017 18:00 | 103.9                    | 11/12/2017 18:00 |
| S. Mohamed Cherif    | Machraa   | 26.6          | 30/11/2017 04:00 | 62.6                     | 13/10/2016 07:00 |

TABLE 4  
Solid transport flows at the studied stations

| Hydrologic Station | River     | Flows in tons |           | Flows in m <sup>3</sup> |           |
|--------------------|-----------|---------------|-----------|-------------------------|-----------|
|                    |           | 2016/2017     | 2017/2018 | 2016/2017               | 2017/2018 |
| AguibatZear        | Bouregreg | 742 334       | 439 735   | 494 889                 | 293 157   |
| Ras Fathia         | Grou      | 673 551       | 740 083   | 449 034                 | 493 389   |
| Ain Loudah         | Korifla   | 28 155        | 48 422    | 18 770                  | 32 281    |
| S. Mohamed Cherif  | Machraa   | 68 759        | 92 324    | 45 839                  | 61 549    |
| Total              |           | 1 512 799     | 1 320 564 | 1 008 533               | 880 376   |

TABLE 5  
Relationship between liquid and solid flow rates at the hydrological stations under study

| hydrological station | River     | Correlation coefficient R <sup>2</sup> | Equation QL=f(Qs)         |
|----------------------|-----------|----------------------------------------|---------------------------|
| AguibatZear          | Bouregreg | 0.91                                   | 3.50 Qs <sup>1.1475</sup> |
| Ras Fathia           | Grou      | 0.87                                   | 1.96 Qs <sup>0.6477</sup> |
| Ain Loudah           | Korifla   | 0.87                                   | 2.32 Qs <sup>0.5852</sup> |
| Sidi Mohamed Cherif  | Machraa   | 0.75                                   | 0.98 Qs <sup>0.613</sup>  |

Water inflows at the hydrological stations concerned were below average during the two hydrological years covered by the study. The deficits varied between 29% during 2016/2017 and 8% during 2017/2018 despite the excess rainfall during this year. Table 1 summarizes the inflows recorded at the 4 hydrological stations covered by the study.

## 2.3 Protocol for the measurement of solid transport

The determination of solid transport flows will be calculated during the hydrological years 2016/2017 and 2017/2018 at the hydrological stations of Aguibat Zear on the Bouregreg river, Ras Fathia on the Grou river, Ain Loudah on the Korifla river of Sidi Mohamed Cherif on the Machraa river, and using the measured concentrations of suspended solids located immediately upstream of the SMBA dam reservoir to determine the quantity of silt entering the dam. The characteristics of the hydrological stations concerned by the sampling are presented in the table 2. The study of solid transport at the Dar Soltan hydrological station on the Bouregreg river realized by the Hydraulic Directorate in Morocco in 1971, stipulates that the samples carried out far from dead zones and bottoms of the river are representative of the average concentration of the measurement section with a margin of error that does not exceed 10% [9]. For this reason, samples are taken from the bed of the river in a 1-liter bottle about 2 m from the banks accessible far from dead zones and bottoms of the river.

Observers from the hydrological stations concerned take one sample every hour at the time of floods and one sample per day during low water periods. At each instantaneous sampling, the date, time, and the height of the water to scale are noted on the bottle. The samples



### are then analyzed in the laboratory as follows:

- the filter membranes (0.45µm) are numbered, then emerged in distilled water to activate the pores;
- they are dried at 105°C for 35 minutes and then weighed (initial mass);
- the solution is stirred then a precise volume is taken and filtered under vacuum;
- the filter membranes are dried at 105°C for 35 minutes and then weighed (final mass).

The weight of suspended matter is given as follows: Weight (g) = (Final mass - Initial mass). The concentration is therefore deduced: SSC(g/l) = (Final Mass - Initial Mass)/V, where V: Volume in liter.

## 3 RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.1 Assessment of the silting of the SMBA dam

The SMBA dam was commissioned in 1974 with an initial capacity of  $508.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  and was raised in 2007 to a capacity of  $974 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . It is intended solely for the supply of drinking water to the coastal zone between Rabat and Casablanca, which has a population of nearly 8 million inhabitants. The analysis of the 7 bathymetric surveys carried out between 1974 and 2013 by the Water Research and Planning Department, allowed to draw up an inventory of the silting of the SMBA dam reservoir. Indeed, SMBA reservoir siltation rate was estimated at  $2.65 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ , i.e. a specific degradation of  $270.4 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{year}$  before raising. After the Dam crest was raised, siltation rate increased to  $9.49 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ , i.e. a specific degradation of  $968.37 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{year}$ , which increased siltation rate by 400% [15]. Thus, the total siltation of the SMBA dam reached  $132 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Subsequently, the dam exceeded its dead section and lost  $32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  of its effective capacity since its commissioning. These results show that the silting rate of the dam reservoir is equal to  $9.49 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ . This is explained by the management method, which has changed from seasonal management favoring evacuation by the restitution bodies before raising the water level, to multi-year management favoring storage after raising the water level. This siltation rate represents a real threat to sustaining surface water resources in the Bouregreg basin and meeting drinking water demand [[10], [11]].

### 3.2 Calculation of the solid transport flow

During the hydrological years 2016/2018 and 2017/2018, the maximum flows ( $Q_{\max}$ ) and maximum concentrations of suspended solids ( $SSC_{\max}$ ) recorded at the four stations involved in the study are summarized in Table 3. We calculated the flow in weight and volume at the selected hydrological stations. To achieve this, we first linearly extrapolated the concentrations of suspended solids overall instantaneous flows rates and then calculated the solids flows from the liquid flows for the hydrological years 2016/2017 and 2017/2018 using the following formula :

$$Q_s = Q_l \cdot SSC$$

$Q_s$ : Solid flow rate in (Kg/s)

$Q_l$ : Liquid flow rate in ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

SSC : Suspended solids Concentration in (g/l)

The liquid and solid volumes of the two hydrological years

are in turn calculated as follows :

$$V_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n (Q_t + Q_{t+1}) \cdot \Delta t / 2 \quad (2)$$

$Q_t$ : Solid or liquid flow rate at time t

$\Delta t$  : time variation in seconds

The transport of bottom solids is taken equal to 10% of the total volume of suspended solids [9], which remains an empirical but widely used value. Finally, the soil density, which is of the order of  $1.5 \text{ t/m}^3$ , is used [10] to calculate the volumes of suspended solids entering the dam over the observation period. Table 4 summarizes the calculation of solids transport flows over the two hydrological years studied. The calculation of the solid transport flow rate at the hydrological stations shows that the dry hydrological year 2016/2017 generated a total of  $1.01 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  against  $0.88 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . This result is explained by the vegetation cover which is less important in the dry year combined with agro-sylvo-pastoral practices[12]. Figure 5 shows the cumulative solid transport at the Aiguibat Zear hydrological station. We observe that a single event can contribute more than 50% of the annual solid transport flow.

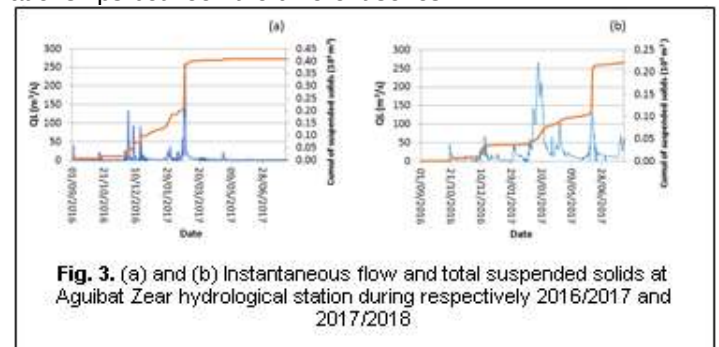
### 3.3 Analysis of SSC, liquid and solid flow rate

Analysis of the relationship between solid flows ( $Q_s$ ) and liquid flow rates ( $Q_l$ ) on the one hand, and concentrations of suspended solids (SSC) and liquid flows rates ( $Q_l$ ) on the other, will be done using the method of least squares to determine the trend line that best fits the available sample data [13].

#### 3.3.1 Analysis of SSC, liquid and solid flow over the entire sample

In general, liquid flow rates and concentrations of suspended solids show weak correlations ranging from 0.20 to 0.42. There is also a wide dispersion in the relationships at low flow rates. ON THE OTHER HAND, SOLID AND LIQUID FLOW RATES HAVE GOOD CORRELATION COEFFICIENTS RANGING FROM 0.75 TO 0.91, DUE TO THE PRESENCE OF FLOW AT BOTH PARAMETERS. THE RELATIONSHIPS BETWEEN SOLID AND LIQUID FLOW AT THE FOUR HYDROLOGICAL STATIONS IS A POWER FUNCTION [14]. THE RESULTS ARE SUMMARIZED IN TABLE 5.

Figure 3 shows some of the results of the analysis of the relationships between the different series.



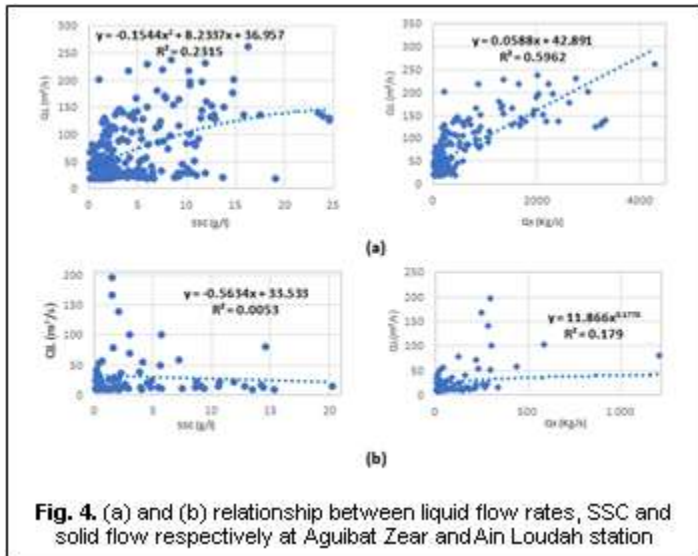
**Fig. 3.** (a) and (b) Instantaneous flow and total suspended solids at Aiguibat Zear hydrological station during respectively 2016/2017 and 2017/2018

#### 3.3.2 Analysis of CSS, liquid and solid flow beyond a liquid flow threshold

To refine the correlation coefficients between liquid flow rates

and SSC and to avoid the low water dispersion zone, we will first test the relationships between the different parameters above a certain liquid flow threshold at the hydrological stations studied. The selected flow thresholds are 10 m<sup>3</sup>/s for the hydrological stations that control the small basins, namely Ain Loudah and Sidi Mohamed Chérif, and 20 m<sup>3</sup>/s for the Aguiabat Zear and Ras Fathia stations that control the big basins. Indeed, the adoption of liquid threshold did not improve the correlation coefficients between liquid flow rates and SSC between liquid and solid flows. On the contrary, there has been a marked decrease in these coefficients. They thus vary between 0.005 and 0.27 for the best correlation between liquid flow and SSC and between 0.029 and 0.59 for the correlation between liquid flow and solid flow.

Figure 4 presents the results which respectively shows the best and the bad correlation rates between the different series.

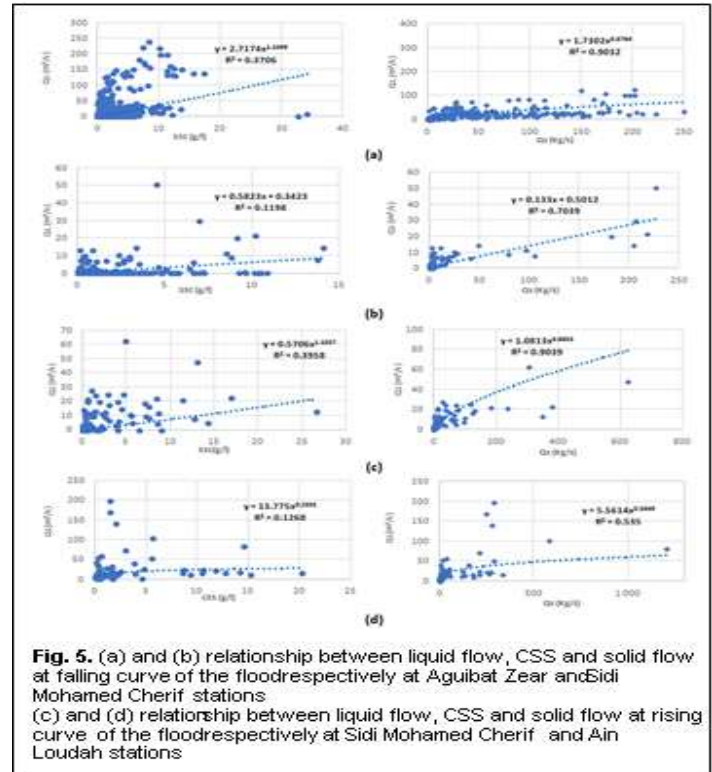


**Fig. 4.** (a) and (b) relationship between liquid flow rates, SSC and solid flow respectively at Aguiabat Zear and Ain Loudah station

### 3.3.3 Analysis of SSC, liquid and solid flow at rising curve and falling curve of flood

The analysis of the correlation coefficients between liquid flow rates and SSC is slightly improved in falling curve of the flood, thus varying between 0.12 and 0.41 for the correlation between QL and SSC, and between 0.70 and 0.90 for the correlation between QL and Qs. while in the rising curve of the flood correlation coefficients are relatively weak in general and vary between 0.12 and 0.39 for the correlation between QL and SSC and between 0.54 and 0.90 for the correlation between QL and Qs.

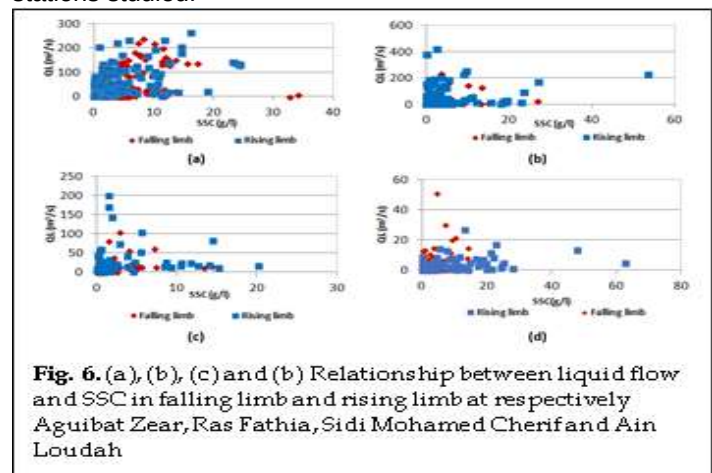
Figure 5 presents the results which respectively shows the best and the bad correlation rates between the different series.



**Fig. 5.** (a) and (b) relationship between liquid flow, CSS and solid flow at falling curve of the flood respectively at Aguiabat Zear and Sidi Mohamed Cherif stations (c) and (d) relationship between liquid flow, CSS and solid flow at rising curve of the flood respectively at Sidi Mohamed Cherif and Ain Loudah stations

Examination of flood rise and flood recession flows representations with SSC showed that, in general, the concentrations of suspended solids at rising limbs are higher than at falling limbs of the flood. Suspended solids are more diluted after the flood peak has passed and the leaching of the basins occurs during flooding.

Figure 6 summarizes the results at the four hydrological stations studied.



**Fig. 6.** (a), (b), (c) and (d) Relationship between liquid flow and SSC in falling limb and rising limb at respectively Aguiabat Zear, Ras Fathia, Sidi Mohamed Cherif and Ain Loudah

### 3.3.1 Analysis of SSC, liquid and solid flow by season

In this part, we will test the correlations of the measurements by season, i.e. summer, autumn, winter, and spring.

#### a. Summer

Correlation coefficients between liquid flow rates and SSC are slightly improved during the summer at the majority of stations [5] hallouz, ranging from 0.063 to 0.69 for the correlation between QL and SSC and from 0.85 to 0.97 for the correlation

between QL and Qs.

#### b. Autumn

Correlation coefficients between liquid flow rates and suspended solids concentrations in the fall are of the same order of magnitude as those in the summer at the majority of stations, ranging from 0.10 to 0.69 for the correlation between QL and SSC and from 0.7 to 0.97 for the correlation between QL and Qs.

#### c. Winter

Correlation coefficients between liquid flow rates and suspended solids concentrations in the fall are slightly lower than in previous seasons at the majority of stations, ranging from 0.11 to 0.46 for the correlation between QL and SSC and from 0.63 to 0.84 for the correlation between QL and Qs.

#### c. Spring

Correlation coefficients between liquid flow rates and suspended solids concentrations in spring are comparable to previous seasons at most stations, ranging from 0.08 to 0.64 for the correlation between QL and SSC and slightly lower compared to other seasons between 0.72 and 0.93 for the correlation between QL and Qs. At the end of this analysis, the relationships between solid/liquid flow rates and liquid flow rates/SSC, by season, slightly improved the correlation coefficients during the summer and fall. They remained generally in the same order of magnitude.

## 4 CONCLUSION

The study showed that the phenomenon of erosion is extremely complex in the Mediterranean region [15]. On one hand, a single event can contribute to more than 50% of the cumulative transport of solid matter, the dry year 2016/2017 recorded a 14% more accumulation of solid on suspension than the wet year 2017/2018. Therefore, this phenomenon depends on several parameters such as the nature of the soil and its previous moisture content, slopes, rainfall intensity, vegetation cover, and runoff water level [[5],[16],[17]]. Thus, the analysis of suspended solids concentrations at hydrological stations located upstream of the SMBA dam reservoir during the two years of observation generally showed that liquid flow rates and suspended solids concentrations exhibit weak correlations. The treatment of these measurements by season, at rising and falling limb of the flood, and with flow threshold, did not significantly improve the correlation coefficients, which remain in same order of magnitude. Those between liquid and solid flow rates show acceptable correlations. Adopted equations predicted significant deviations from the observed values mainly for large flows. This does not allow reliable forecasting models to be established from the relationships found between the different parameters. The frequent bathymetric field surveys have also shown that the measured volumes remain well below the siltation rate of the dam, which is  $9.49 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ , which means that only 18% of the dam's sediments come from upstream. This rate seems very low, and as it is only calculated over two years, the measurements will continue regularly to increase the time series and obtain a more accurate average. The main hypothesis we can formulate is that sediments in the reservoir area are most probably coming from the erosion of its overbanks [18]. The Bouregreg Basin

Agency will continue the field measurements and it will extend them to the cover the entire basin. The agency is also planning to develop granulometric and geochemical studies on the sediments to correlate them with the hypothesis of its origin.

## REFERENCES

- [1] A. Lahlou, "La Dégradation Spécifique Des Bassins Versants Et Son Impact Sur L'Envasement Des Barrages.," IAHS-AISH Publ., no. 137, pp. 163–169, 1982.
- [2] E. Goussot, Y. T. Brou, A. Laouina, M. Chaker, A. Emran, and N. Machouri, "Dynamique de L'occupation du sol et Statistiques Agricoles sur le bassin Versant du Bouregreg au Maroc Land Covers Dynamic and Agricultural Statistics on the Bouregreg Watershed in Morocco," 2014.
- [3] M. Gil, E. Anas, B. Y. Télesphore, and T. R. A. B. I. Z. Armand, "ANALYSE STATISTIQUE DE L'EVOLUTION DE LA COUVERTURE VEGETALE A PARTIR D'IMAGES MODIS ET NOAA SUR LE BASSIN VERSANT DU BOUREGREG (MAROC)," Géo Obs., no. 20, pp. 33–44, 2012.
- [4] A. Laouina, M. Aderghal, J. Al Karkouri, M. Antari, M. Chaker, Y. Laghaz, I. Machmachi, N. Machouri, R. Nafaa, K. Naïmi, "The efforts for cork oak forest management and their effects on soil conservation," For. Syst., vol. 19, no. 2, pp. 263–277, 2010. DOI: 10.5424/fs/2010192-01320
- [5] G. Mahé, M. Aderghal, J. AlKarkouri, H. Benabdefadel, D. Bensafia, T. Brou, M. Chaker, M. Chikhaoui, S. Coupleux, R. Crouzevialle, C. Dieulin, A. Emran, M. Ezzaouini, E. Goussot, F. Hallouz, K. Khomsi, A. Laouina, N. Machouri, V. Maleval, M. Meddi, M. Nging, O. Planchon, B. Remini, N. Rouche, H. Saadi, M. Sfa, M. Sinan, M. Snoussi, S. Taïbi, S. Toumi, A. Tra Bi, S. Yahiaoui, A. Zerouali, "Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In: Considering hydrological change in reservoir planning and management, (A. Schumann, V.B. Belyaev, E. Gargouri, G. Kucera and G. Mahe, Eds)," IAHS Publ.; 362, 115-124, 2013.
- [6] A. Lahlou, "Environmental and socio-economic impacts of erosion and sedimentation in north Africa," IAHS-AISH Publ., vol. 236, no. 236, pp. 491–511, 1996.
- [7] F. Choukri Choukri, D. Raclot, M. Naimi, M. Chikhaoui, J.P. Nunes, F. Huard, C. Hérivaux, M. Sabir, Y. Pépin, "Distinct and combined impacts of climate and land use scenarios on water availability and sediment loads for a water supply reservoir in northern Morocco," Int. Soil Water Conserv. Res., 2020.
- [8] Y. Trambalay, L. Jarlan, L. Hanich, and S. Somot, "Future scenarios of surface water resources availability in North African dams," Water Resour. Manag., vol. 32, no. 4, pp. 1291–1306, 2018.
- [9] A. Lahlou, "Etude de transport solide à la station Dar Soltane, sur l'oued Bouregreg", Rapport de travaux du service GDE : gestion des eaux, Ministère des travaux publics et des communications, Direction de l'hydraulique, Rabat, Maroc, 1971.
- [10] G. Mahé, A. Emran, T. Brou Yao, and A. Tra Bi Zablé, "Impact de la variabilité climatique sur l'état de surface du bassin versant de Bouregreg (Maroc)," Eur. J. Sci. Res., vol. 84, no. 3, pp. 417–425, 2012.



- [11] K. Khomsi, G. Mahe, Y. Trambly, M. Sinan, and M. Snoussi, "Regional impacts of global change: seasonal trends in extreme rainfall, run-off and temperature in two contrasting regions of Morocco.," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 16, no. 5, 2016.
- [12] M. Chaker, A. Laouina, and M. El Marbough, "Changement agropastoral et dégradation des terres dans le plateau Sehoul," Abdellah Laouina Gil Mahé. *Proc. la Réunion Multi-Acteurs, sur le Bassin Bouregreg*, CERGéo, pp. 85–102, 2013.
- [13] J. Bayart, "Quelques applications du principe des moindres carrés à la prévision commerciale «dynamique»,," *Rev. Stat. Appliquée*, vol. 7, no. 4, pp. 17–40, 1959.
- [14] F. Hallouz, M. Meddi, G. Mahé, S. Toumi, and S. E. A. Rahmani, "Erosion, suspended sediment transport and sedimentation on the Wadi Mina at the Sidi M'Hamed Ben Aouda Dam, Algeria," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 7, pp. 1–31, 2018, doi: 10.3390/w10070895.
- [15] J. Albergel, Y. Pepin, S. Nasri, and M. Boufaroua, "Erosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens," *IAHS Publ.*, pp. 373–379, 2003.
- [16] G. Mahé, H. Aksoy, Y. Brou, M. Meddi, and E. Roose, "Relationships among man, environment and sediment transport: A spatial approach," *Rev. des Sci. l'eau/Journal Water Sci.*, vol. 26, no. 3, pp. 235–244, 2013.
- [17] G. Mahé, H. Benabdelfadel, C. Dieulin, M. Elbaraka, M. Ezzaouini, K. Khomsi, N. Rouche, M. Sinan, M. Snoussi, A. Tra Bi, A. Zerouali, "Evolution des débits liquides et solides du Bouregreg. In : Laouina A. and Mahe G. (Eds.), *Gestion durable des terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg*," CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, Edité par ARGDT, Rabat, Maroc,; ISBN 978-9954-33-482-9, 21-36, 2014.
- [18] V. Maleval, "L'évolution des rivages des lacs de barrages artificiels. L'exemple du lac de Saint-Pardoux en Limousin," *Norais*, vol. 183, no. 3, pp. 453–464, 1999.

## Article

# Predicting Daily Suspended Sediment Load Using Machine Learning and NARX Hydro-Climatic Inputs in Semi-Arid Environment

Mohamed Abdellah Ezzaouini <sup>1,2,\*</sup> , Gil Mahé <sup>3</sup> , Ilias Kacimi <sup>1</sup>, Ali El Bilali <sup>2</sup> , Abdelaziz Zerouali <sup>2</sup> and Ayoub Nafii <sup>2</sup> 

- <sup>1</sup> Geoscience, Water and Environment Laboratory, Faculty of Sciences, Mohammed V University, Avenue Ibn Batouta, Rabat 10100, Morocco; iliaskacimi@yahoo.fr
  - <sup>2</sup> River Basin Agency of Bouregreg and Chaouia, Benslimane 13000, Morocco; ali1gpee@gmail.com (A.E.B.); azlso@yahoo.fr (A.Z.); ayoubnafii@gmail.com (A.N.)
  - <sup>3</sup> Hydrosience Montpellier (HSM), Université Montpellier, CNRS, IRD, IMT, 34398 Montpellier, France; gil.mahé@ird.fr
- \* Correspondence: ezzaouini70@yahoo.fr; Tel.: +212-661-110-897

**Abstract:** Sediment transport in basins disturbs the ecological systems of the water bodies and leads to reservoir siltation. Its evaluation is crucial for managing water resources. The practical application of the process-based model can confront some limitations noticed in the lower accuracy during the validation process due to the lack of reliable physical datasets. In this study, we attempt to apply machine-learning-based modeling (ML) to predict the suspended sediment load, using hydro-climatic data as input variables in the semi-arid Bouregreg basin, Morocco. To that end, data for the years 2016 to 2020 were used for the training process, and the validation was performed with 2021 data. The results showed that most ML models have good accuracy, with a Nash–Schiff efficiency (NSE) ranging from 0.47 to 0.80 during the validation phase, which indicates satisfactory performances in predicting the SSL. Furthermore, the models were ranked against their generalization ability (GA), which revealed that the developed models are good to excellent in terms of GA. Overall, the present study provides new insight into predicting the SSL in a semi-arid environment, such as the Bouregreg basin.

**Keywords:** suspended sediment load; generalization ability; uncertainty; Bouregreg; Morocco



**Citation:** Ezzaouini, M.A.; Mahé, G.; Kacimi, I.; El Bilali, A.; Zerouali, A.; Nafii, A. Predicting Daily Suspended Sediment Load Using Machine Learning and NARX Hydro-Climatic Inputs in Semi-Arid Environment. *Water* **2022**, *14*, 862. <https://doi.org/10.3390/w14060862>

Academic Editor: Renato Morbidelli

Received: 4 February 2022

Accepted: 7 March 2022

Published: 10 March 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Sediment transport in hydrodynamic systems is still not a well-understood phenomenon and, therefore, it is a crucial topic in hydrological studies. Its exceedance existence in streams can significantly impact the river flows by changing the rheological proprieties of the water, which can impact the design capacity of the channel culverts and increase the damages associated with flash floods [1–4]. The siltation of sediments in dam reservoirs also reduces their storage capacity, leading to freshwater scarcity, especially in arid and semi-arid regions [5]. Moreover, sediments can pose a threat to the water bodies' quality and lead to ecological damages by disturbing aquatic systems [6,7]. Consequently, the understanding of the sediment transport mechanism and its quantification at the basin scale are challenging problems in water resources planning and management, particularly in dynamic basins under high climatic variability.

For decades, many soil erosion models have been developed and evaluated to assess the soil erosion phenomenon, such as the most known empirical-based models: the universal soil loss equation (USLE) [8]; its derivatives, modified USLE, named MUSLE [9]; and the revised one, which is called RUSLE [10]. Indeed, these models embedded in geographic information system (GIS) tools are considered as an outstanding approach to assess water erosion at the basin scale [11–13]. However, the applications of the process-based models

require several physical and hydrological parameters and characteristics of basins, which can be a source of uncertainties, especially in poorly monitored areas. Additionally, the highly dynamic basin characteristics leads to the questionable ability of the process-based model to evaluate the sediment load over time.

In poorly monitored areas, the machine learning (ML) models can overcome the shortage and variability of the physical parameters using available archived datasets. Indeed, their construction relies on the statistical input–output equation rather than explaining the mechanism involved in the process. Recently, several studies showed that the data-based models are powerful tools to overcome some limitations of the conceptual-based models in predicting the water resources status [14–18]. For instance, ref. [19] demonstrated the accuracy of the support vector machine method to estimate the shear stress in the rectangular channel. As for the prediction of the sediment transport, ref. [20] applied ensemble genetic programming to estimate the incipient sediment motions in rectangular channels, and demonstrated the superiority of the applied approach with a coefficient of correlation  $r$  of approximately 0.92. Similarly, in hydrologic studies, ref. [21] applied a long short-term memory neural network (LSMNN) to predict the suspended sediment concentration (SSC) in the Johor River in Malaysia and found a high accuracy prediction in these models. In [22], three artificial intelligence models were used to estimate the sediment load in Ethiopia. In [23], a multiple linear regression model was applied to predict the suspended sediment yield (SSY) in the Cuyahoga River in Ohio through satellite images and rainfall datasets. Importantly, all of these studies demonstrated that the ML-based models presented a high accuracy for predicting the sediment load at various basin scales.

In Morocco, water resource planning and management processes are facing several issues, such as reservoir sedimentation, the continuous decline of groundwater level in most aquifers, seawater intrusion into the coastal aquifers, inappropriate practices applied to groundwater-based agriculture, and flood risk [24–26]. Importantly, according to the Water Department of Morocco, reservoir silting causes a global decrease in the reservoir capacity of approximately  $70 \text{ mm}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$ , which means 0.4% each year, with large regional variability, and much higher values in some regions, such as the north of the country. Indeed, this loss is generally assessed through topo-bathymetric surveys at the reservoir's scale. Despite being an efficient approach to directly evaluate the sediment in reservoirs, this method does not allow for making decisions to reduce the soil erosion at the scale of basins. Meanwhile, the evaluation of the suspended sediment load (SSL) at basin scales could be valuable in classifying basin vulnerabilities to the soil erosion and, therefore, in prioritizing mitigation measures. The models of USLE and its derived versions are commonly applied approaches in Northern African countries to evaluate the soil erosion, including Morocco [27]. Recently, in our study [28], the comparison of two years of the sediment measurement with MUSLE-based simulation results demonstrated a low prediction accuracy, with a Nash–Sutcliffe efficiency index (NSE) lower than 0.5 [29]. Consequently, it is highly needed to test new procedures, such as ML-based modeling, to predict the daily suspended sediment load (SSL) and to improve the prediction accuracy using hydro-climatic input variables.

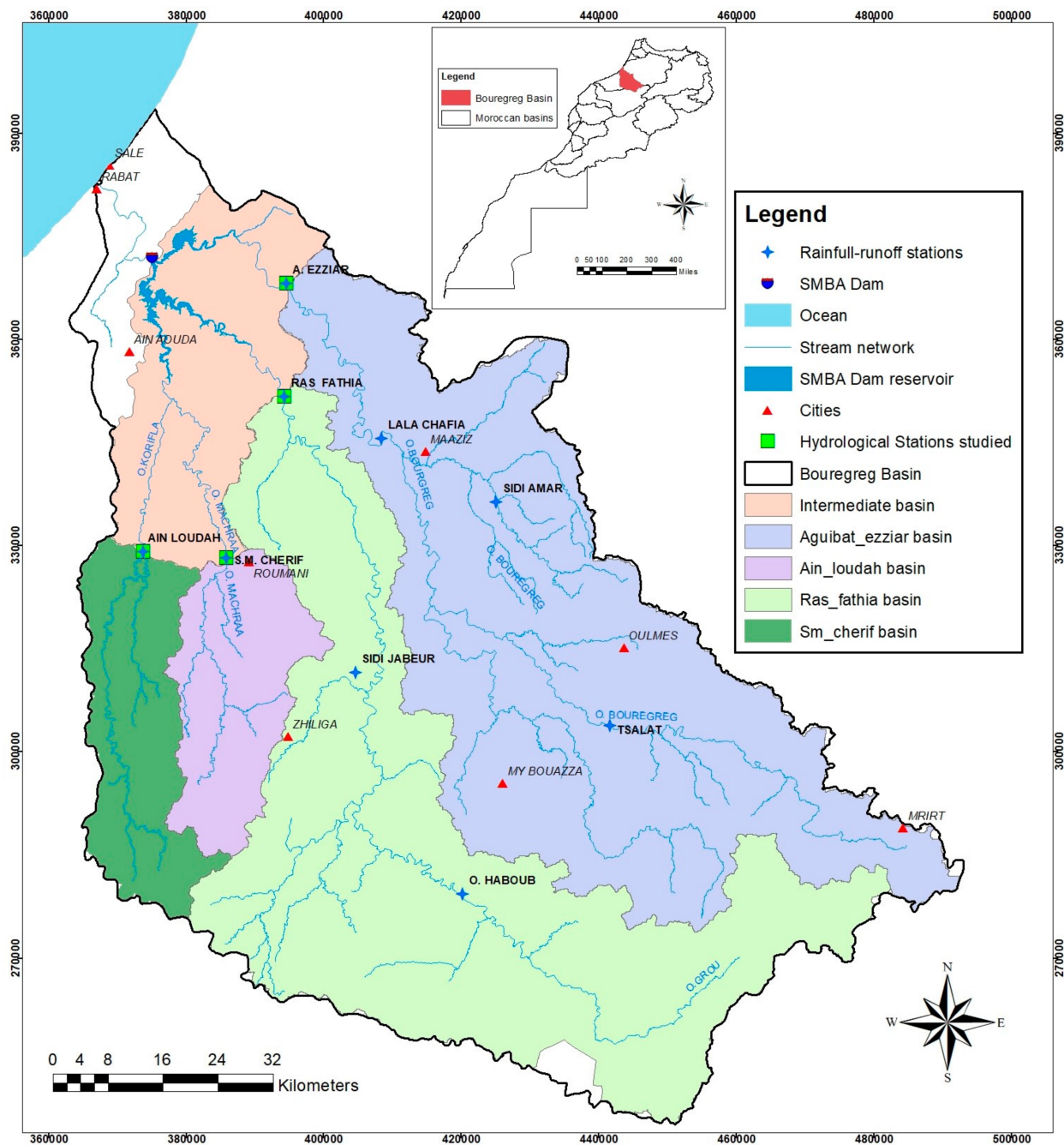
In this study, we apply a ML model to overcome the drawbacks of the process-based models and to improve the prediction accuracy of the daily SSL at four runoff gauging stations in the Bouregreg semi-arid basin, Morocco. This goal can be achieved by (1) developing ML models with NARX hydro-climatic input variables, (2) evaluating the prediction accuracy of the models, and (3) ranking the models for simulation purposes based on the generalization ability (GA) metric and uncertainty analysis.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Study Area Description

This work focuses on the Bouregreg basin, which is located in the Rabat-Sale-Kenitra and Beni Mellal-Khenifra provinces in the Mediterranean area (Figure 1). This basin covers  $9970 \text{ km}^2$  and consists of 4 basins; three main rivers form the hydrographic network,

namely: Bouregreg River (264 km long), Grou River (249 km long), and Mechraa River (132 km long). It is monitored by 9 rainfall runoff stations, as presented in Figure 1.



**Figure 1.** Study area location in Morocco.

However, according to the River Basin Agency of Bouregreg and Chaouia, the annual precipitation in the basin is  $400 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$  in the northwest part and  $760 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$  in the mountainous part, whereas the mean inflow volume of SMBA's dam reservoir is approximately  $680 \text{ mm}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$  (1975–2021). This reservoir has a normal capacity of  $975 \text{ mm}^3$  and supplies drinking water to the coastal area between Rabat and Casablanca cities for 8 million habitants. Geologically, the Bouregreg basin is located in the Moroccan Central Massif, which mainly consists of Paleozoic formations that were subjected to the Hercynian orogeny.

## 2.2. Datasets

### 2.2.1. Concentration of Suspended Solid Measurements

For the modeling of the concentrations of suspended solids (CSS), we chose four hydrological stations located at the entrance of the SMBA dam reservoir. These hydrological stations are Aguibat Ziar on the Bouregreg River, Ras Fatia on the Grou river, Sidi Mohammed Cherif on the Mechraa River and Ain Loudah on the Korifla River. At all of the stations involved, we carried out daily monitoring of the CSS. These stations control a basin of approximately 87% of the total catchment area of the SMBA dam. In addition, samples were taken daily during low water periods and hourly during high water periods. For each sample, the date, time, and scale values were noted on the bottle. The samples were then analyzed in the laboratory, filtered under vacuum using filtering membranes (0.45  $\mu\text{m}$ ), and weighed. Table 1 summarizes the number of daily data samples used at the four hydrologic stations.

**Table 1.** Statistical characteristics of CSS samples at 4 hydrological stations studied.

| Name of Hydrological Station | River     | Basin Area (km <sup>2</sup> ) | N°IRE ABHBC Code | Period of Observation Considered | Number of CSS Sample | Mean Period (g/L) | Max Period (g/L) | Min Period (g/L) | Standard Deviation |
|------------------------------|-----------|-------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|
| Aguibat Ziar                 | Bouregreg | 3681                          | 3118/13          | 1 September                      | 1253                 | 0.83              | 32.72            | 0.00             | 1.08               |
| Ras Fathia                   | Grou      | 3485                          | 989/20           | 2016 to 31                       | 1634                 | 1.20              | 86.9             | 0.00             | 1.70               |
| S.M. Cherif                  | Mechraa   | 656                           | 2673/20          | August 2021                      | 1662                 | 0.63              | 16.89            | 0.00             | 0.76               |
| Ain Loudah                   | Korifla   | 699                           | 2674/21          |                                  | 470                  | 1.05              | 24.7             | 0.00             | 1.47               |

### 2.2.2. Rainfall and Runoff Measurements

For the prediction of the suspended sediment load at each of the four stations located immediately upstream of the SMBA dam, we used the daily data of the rainfall and the runoff of the rivers measured at the hydrological stations located at the level of each sub-basin controlled by one of the 4 stations studied (Tables 2 and 3). These parameters were selected as they are the main influencing factors in erosion process [8,9]. The following tables give the distribution and characteristics of the data by sub-basin of these stations.

**Table 2.** Statistical characteristics of rainfall data by sub-basin during the period from 1 September 2016 to 31 August 2021.

| Name of Sub-Basin               | Rainfall Station | N°IRE Code | Mean (mm) | Max (mm) | Min (mm) | Standard Deviation |
|---------------------------------|------------------|------------|-----------|----------|----------|--------------------|
| Bouregreg basin at Aguibat Ziar | Aguibat Ziar     | 3118/13    | 1.3       | 122.5    | 0.0      | 2.23               |
|                                 | Lalla Chafia     |            | 0.9       | 42.9     | 0.0      | 1.64               |
|                                 | Sidi Amar        |            | 1.1       | 50.0     | 0.0      | 1.94               |
|                                 | Tslat            |            | 1.3       | 60.0     | 0.0      | 2.11               |
| Grou at Ras Fathia              | Ras Fathia       | 989/20     | 1.0       | 41.2     | 0.0      | 1.81               |
|                                 | Sidi Jabeur      |            | 0.8       | 44.5     | 0.0      | 1.50               |
|                                 | Ouljat Haboub    |            | 0.8       | 39.8     | 0.0      | 1.38               |
| Korefla basin at Ain Loudah     | Ain Loudah       | 2674/21    | 0.9       | 59.6     | 0.0      | 1.57               |
| Korefla basin at S.M. Cherif    | S.M. Cherif      | 2673/20    | 0.9       | 54.7     | 0.0      | 1.56               |

**Table 3.** Statistical characteristics of runoff data by sub-basin for the period from 1 September 2016 to 31 August 2021.

| Name of Sub-Basin               | Rainfall Station | N°IRE Code | Mean (m <sup>3</sup> /s) | Max (m <sup>3</sup> /s) | Min (m <sup>3</sup> /s) | Standard Deviation |
|---------------------------------|------------------|------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| Bouregreg basin at Aguibat Ziar | Aguibat Ziar     | 3118/13    | 4.16                     | 199.04                  | 0.00                    | 5.64               |
|                                 | Lalla Chafia     |            | 3.06                     | 196.70                  | 0.00                    | 4.85               |
|                                 | Sidi Amar        |            | 0.48                     | 24.04                   | 0.00                    | 0.61               |
|                                 | Tslat            |            | 0.81                     | 23.50                   | 0.00                    | 1.04               |
| Grou at Ras Fathia              | Ras Fathia       | 989/20     | 4.58                     | 349.21                  | 0.00                    | 6.59               |
|                                 | Sidi Jabeur      |            | 3.74                     | 326.54                  | 0.00                    | 5.29               |
|                                 | Ouljat Haboub    |            | 3.52                     | 262.37                  | 0.00                    | 5.43               |
| Korefla basin at Ain Loudah     | Ain Loudah       | 2674/21    | 0.52                     | 48.83                   | 0.00                    | 0.88               |
| Korefla basin at S.M. Cherif    | S.M. Cherif      | 2673/20    | 0.42                     | 38.58                   | 0.00                    | 0.62               |



## 2.3. Methodology

### 2.3.1. Machine Learning Models

In the present study, we applied the regression-based ML models, namely: random forest (RF), adaptive boosting (AdaBoost), support vector machine for regression (SVR), k-nearest neighbor (k-NN), and artificial neural network (ANN) models. Further details on the ML-based models can be found in [30–35]. However, the following subsections provide a short description of these models.

#### Random Forest

Random forest (RF) is a tree-based ML model [36]. Regression and classification are conducted by aggregating a technique that operates by constructing an ensemble of decision trees in training by swapping and changing the covariates to improve the prediction performance. The final output (target) is calculated through the weighted average of tree outputs. Executing this model requires a number of trained trees and an amount of the variable used in each tree [37]. Indeed, these parameters have an important role in the model stability and, therefore, in its prediction accuracy [38].

#### AdaBoost

Adaboost is an ensemble ML model developed by Freund and Schapire (1997) [33]. It can be applied either for classification or regression purpose. Adaptive boosting (AdaBoost) is a tree-based ensemble ML model [39,40]. Recently, this approach appeared to be an efficient regression model in environmental sciences, namely, for regression and data-based augmentation techniques [15,41].

For the data,  $S = \{(x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, N\}$ , where each  $x_i$  is in some instance  $X$  and each  $y_i$  is in some target (output)  $Y$ , and, for a series of rounds ( $M$ ), the algorithm initializes the distribution ( $D$ ) (or weight) as follows:

$$D_i^1 = \frac{1}{N} \quad \text{for } i = \{1, \dots, N\} \quad (1)$$

Then, for  $j = 1$  to  $M$ , Adaboost algorithm builds weak models  $h_j$  from the training dataset using  $D$ , which minimizes  $\varepsilon_j$  and satisfies  $\varepsilon_j < 0.5$  conditions.

$\varepsilon_j$  is a weighted error of the  $j$ th model and is given by Equation (2).

$$\varepsilon_j = \sum_{i: h_j(x_i) \neq y_i} D_i^j \quad (2)$$

The weight “confidence”  $\alpha_j$  of the  $j$ th model is calculated by Equation (3).

$$\alpha_j = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \right) \quad (3)$$

The distributions for next iteration were updated as follows:

$$D_i^{j+1} = e^{-y_i h_j(x_i) \alpha_j} D_i^j \quad (4)$$

$$D_i^{j+1} = \frac{D_i^{j+1}}{\sum_{i=1}^N D_i^{j+1}} \quad (5)$$

The prediction for new dataset was conducted by combining weighted majority vote of the models  $h_j$ .

$$H(x') = \text{sign}[\sum_j^M \alpha_j h_j(x')] \quad (\text{whithout sign for the regression}) \quad (6)$$

### Support Vector Machine (SVM)

Support vector machine (SVM) is a discriminative technique that was introduced for the first time by Vapnik (1995) [42]. It is based on a hyper-plane in order to minimize the error and the kernel function, such as radial basis function [43], sigmoid, linear kernel, and polynomial function. This method has demonstrated a high accuracy prediction for several regression applications [24].

For modeling system (S) with observation dataset ( $D_s$ ),  $D_s = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ , where  $x_i$  represents the inputs and  $y_i$  the outputs, with a linear function, as shown in Equation (7).

$$f(x) = \langle \omega \times \phi(x) + b \rangle \quad (7)$$

The optimal function is the minimization of Function (8) (subject to Equation (9)). Hence, the loss functions, such as  $\epsilon$ -insensitive, quadratic, and Hubber methods, can be used.

$$\min(\omega, b, \xi^-, \xi^+) = \frac{1}{2} \times \|\omega^2\| + C \times \sum_{i=1}^n (\xi_i^- + \xi_i^+) \quad (8)$$

$$\text{Subject to } \left\{ \begin{array}{l} y_i - \omega^T \times \phi(x) - b \leq \epsilon + \xi_i^- \\ -y_i + \omega^T \times \phi(x) + b \leq \epsilon + \xi_i^+ \\ \xi_i^-, \xi_i^+ \geq 0 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} \quad (9)$$

where  $\phi(x)$  is a Kernel function ( $k$ ), such as polynomial, radial basis, and linear functions;  $\omega$  and  $b$  represent weigh and basis vectors;  $C$  is a pre-specified value to penalize the training error; and  $\xi_i^-$  and  $\xi_i^+$  are the lower and upper constraints on the output.

This study adopted the radial basis function (RBF) given by Equation (16) as kernel function [43].

$$k(x_i, x_j) = \exp(-\gamma |x_i - x_j|^2) \quad (10)$$

### Artificial Neural Network (ANN)

ANN models are constructed by three layer types, namely: input layer, hidden layers (HL), and the output layer [44]. They are interconnected through neurons, which are characterized by weight and bias. The weighted input variables summed with the bias of the layer are transformed from the  $j$ th layer to the  $(j + 1)$ th layer by transfer function ( $f$ ), and so on, until the output [44]. The training phase is repeated by changing the weights and the biases of the layers until good prediction accuracy (root mean square error) is achieved. To simplify this method, let us take a simple model with one HL. The outputs ( $Y_k$ ) are given by the following equation [45]:

$$Y_k = f_k\left(\sum_{i=1}^m W_{jk} \times f_j\left(\sum_{i=1}^n X_i W_{ij}\right)\right) + W_0 \quad (11)$$

where  $n$  is the input variable numbers,  $m$  is the neurons in the HL,  $p$  is the neurons of the output layer,  $W_0$  is the bias, and  $W_{jk}$  and  $W_{ij}$  are the weights between the  $j$ th neuron and the  $k$ th output neuron and between the  $i$ th neuron and  $j$ th neuron, respectively, whereas  $f_k$  and  $f_j$  are the transfer functions of the neurons  $k$  and  $j$  of the output and hidden layers, respectively.

### k-Nearest Neighbor (k-NN)

The k-NN algorithm is a memory-based method (non-parametric method); the predicted values are estimated based on the information on the neighboring observed ones.

The estimated values are obtained by the average of the nearest  $k$  observed values and give more weight to the nearer ones, as shown in Equations (12) and (13).

$$\bar{f}(\vec{x}_0) = \sum_{i=1}^k \mathfrak{I}_{i0} f(\vec{x}_i) \quad (12)$$

$\bar{f}(\vec{x}_0)$  is the predicted response,  $\vec{x}_0$  is the vector of independent inputs,  $f(\vec{x}_i)$  is the observed response,  $\vec{x}_i$  is the vector of the nearest  $k$  observed values, and  $\mathfrak{I}_{i0}$  is the weight between the  $\vec{x}_0$  and  $\vec{x}_i$ , and is given by Equation (13).

$$\mathfrak{I}_{i0} = \frac{\sum_{i=1}^k |\vec{x}_i - \vec{x}_0|}{|\vec{x}_i - \vec{x}_0|} \quad (13)$$

As shown in this equation, the number  $k$  is important for the model performances. It should be noted that there are others distance functions such as Euclidian, Shebyshev, and Mahalanobis.

### 2.3.2. NARX Input Method

In this study, we proposed NARX-based modeling to incorporate the delay response of the suspended sediment load to the hydrological events. Considering  $N$  of datasets related to the system ( $S$ ) to be modeled using ML algorithms,  $S = \{(X_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N\}$ , where  $X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3} \dots x_{i,p}]^T$  is the input matrixes ( $p$  is the input numbers),  $y_i = [y_{i,1}, y_{i,2}, y_{i,3} \dots y_{i,q}]^T$  is the output vector, and  $i$  is the time instant. Hence, the NARX-based ML algorithms for predicting the SSL have NARX input variables as follows:

$$y_i = MLf_m(\varphi(i), \theta) \quad (14)$$

where  $\varphi(i) = (x_i, x_{i-1}, x_{i-2}, \dots, x_{i-lx})$  is the regression vector,  $\theta$  is the parameter vector,  $MLf_m$  is a unknown ML model function, and  $lx$  and  $ly$  denote the lag numbers of the input  $x$  and output  $y$ , respectively. Therefore, the final input matrixes  $X_i^T$  and the output vector  $y_i^T$  for training of the ML models are as follows:

$$\begin{cases} X^T = [x_i, x_{i-1}, x_{i-2}, \dots, x_{i-lx}] \\ y^T = y_i \\ \max(lx) < i \leq N \end{cases} \quad (15)$$

The unknown function  $MLf_m$  of the models includes, as examples, the hyper-parameter, loss functions, and model structures depending on the model. For instance, number of the hidden layers and function transfer for ANN model, and kernel function and penalty parameter ( $C$ ) for SVR model. However, the  $MLf_m$  and lag numbers are identified during the tuning process using trial-error procedures.

In this study, we used Python language embedded in Anaconda platform. Pandas, Matplotlib, and Scikit-learn libraries were imported and used. Pandas and Matplotlib are the libraries that were used for dataset loading and visualization processes, respectively. Meanwhile, Scikit-learn library was used for implementing regressor ML models.

### 2.3.3. Model Evaluation Metrics

To evaluate prediction model performances, several indices and metrics can be used, such as coefficient of correlation, root mean square error ( $RMSE$ ), and Nash–Sutcliffe-efficiency.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Pi - Oi)^2}{n}} \quad (16)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Pi - \bar{O})^2} \quad (17)$$

$$r = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})(Pi - \bar{P})}{[\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (Pi - \bar{P})^2]^{0.5}} \right) \quad (18)$$

$O_i$  and  $P_i$  are observed and model-simulated values, respectively;  $\bar{O}$  represents the mean of observed values; and  $n$  = number of the observations used.

However, in this study, we used the generalization ability as an additional metric to evaluate the models. This metric was defined by [46] through the following equation:

$$GA = \frac{RMSE \text{ (validation)}}{RMSE \text{ (training)}} \quad (19)$$

However, to rank the models for simulation purposes, EL Bilali et al. [47] suggested the classification of the machine learning models according to categories of perfect, excellent, good, and poor models in terms of GA as follows:

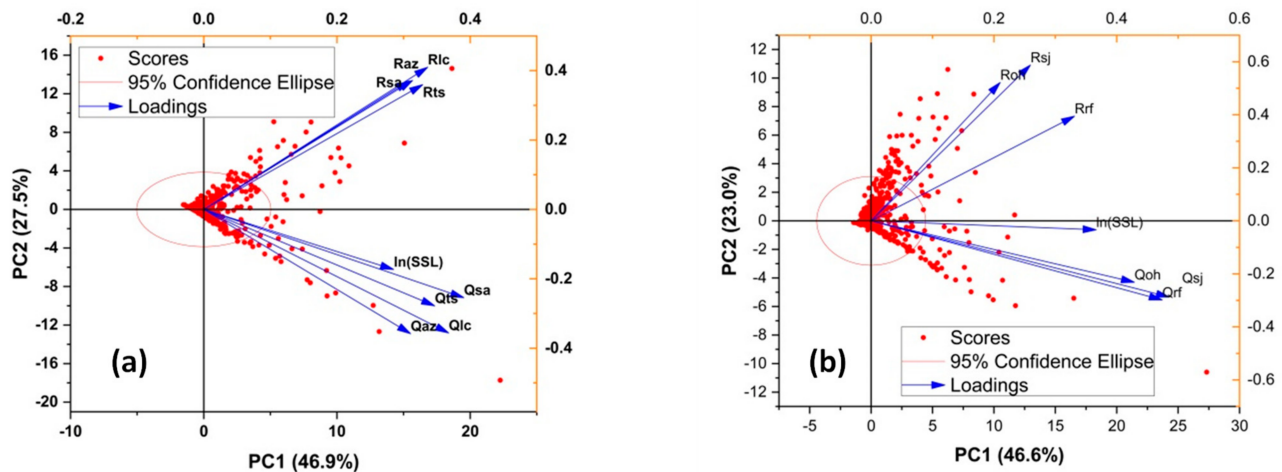
- If  $GA = 1$ , model is perfect;
- If  $0.75 \leq GA < 1$  or  $1 < GA \leq 1.35$ , the model is excellent;
- If  $1.35 < GA \leq 2$  or  $0.5 \leq GA < 0.75$ , the model is good;
- If  $GA > 2$  or  $GA < 0.5$ , the model is poor and considered unsuitable for simulation purposes.

### 3. Results

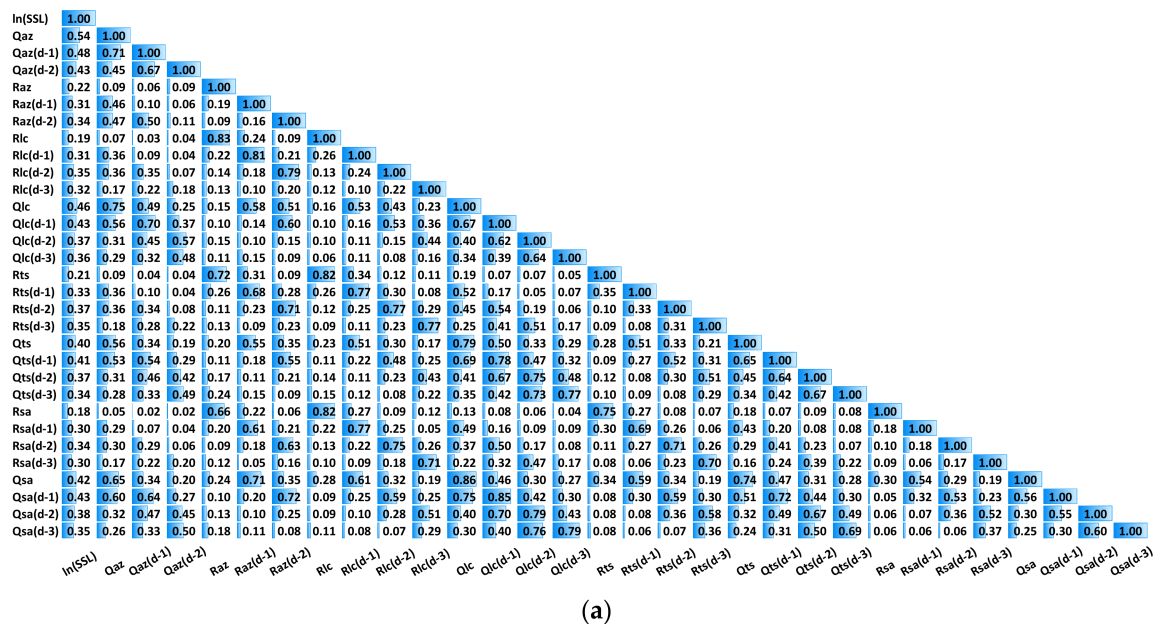
#### 3.1. Exploratory Data Analysis (EDA)

In developing ML models, the selection of the feature variables is a keystone process in the improvement of the prediction accuracy and the generalization ability of the models. Despite being black box models that do not explain the mechanism involved in the process to be modeled, selecting the causal input variables for training ML models is required. In this study, we focused on the hydro-climatic variables in order to predict the suspended sediment load (SSL), namely: rainfall in the basins and discharges both upstream and downstream. The principal component analysis was conducted to demonstrate the importance of the selected variables, especially for the basin monitored by several hydrological stations. Figure 2 illustrates the PCA of the datasets at the Bouregreg basin (Aguibat Ziar) and Grou basin (Ras Fathia Station). The PCA of Bouregreg datasets (Aguibat Ziar) revealed that there is 74.4% of information regarding the total variance, of which, 46.9% is explained by PC1 and 27.5% by PC2 (Figure 2a). As for the Grou basin, the PCA showed that 69.4% of information on the total variance is explained by the PC1 (46.6%) and PC2 (23.0%). These results demonstrate the importance of the input variables. However, the antecedent values of these variables can impact the suspended sediment load, as the soil erosion does not only depend on the current conditions but also on the initial conditions. For this reason, using NARX input variables is suggested to improve the prediction accuracy of the models.

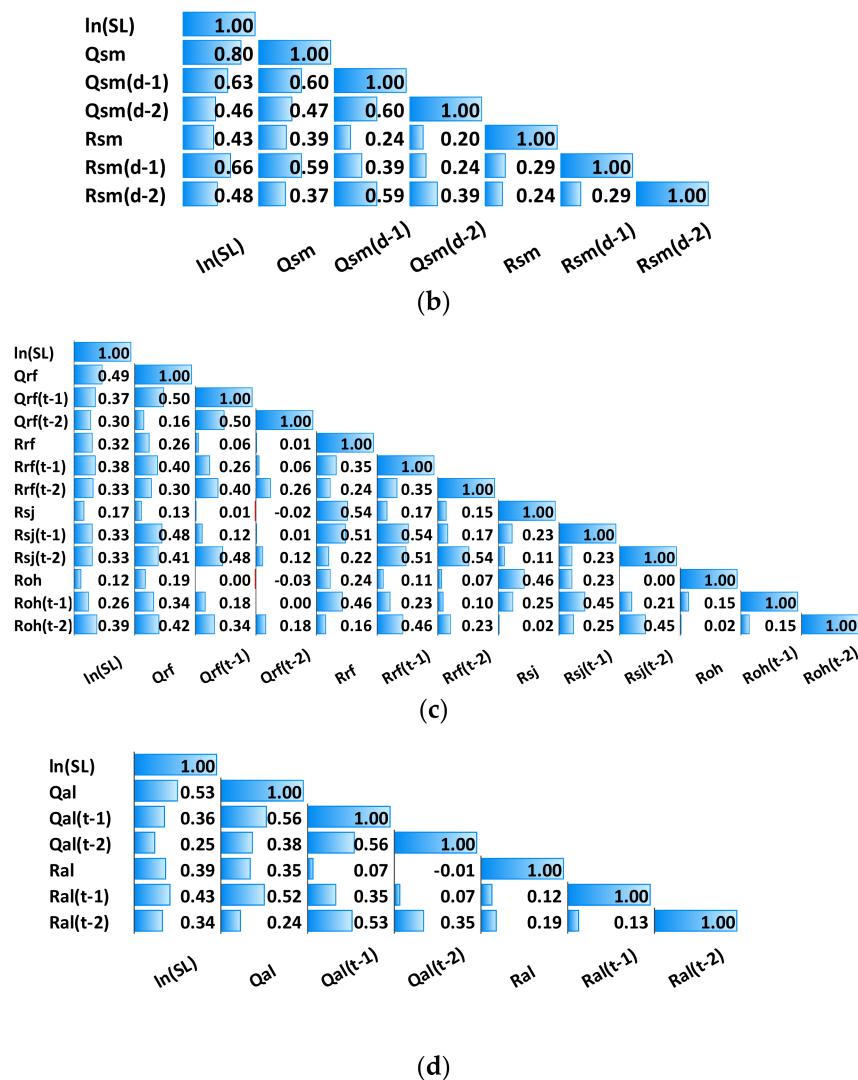
A Pearson correlation-based analysis of the dataset was carried out to explore the potential relationship between the variables, including antecedent values. Figure 3 presents the matrix correlation of the variables in the studied basins. It was observed that, except for the discharge at Ras Fathia stations and Sidi Jabeur stations, all other variables are not highly inter-correlated. Such results demonstrate that the selected variables are not redundant in the prediction of the SSL. Interestingly, except for some cases, the antecedent variables of rainfall and discharge at (day-1) and (day-2) are more correlated than the actual variable. For instance, the actual variables at the basin outlets are more important than those of antecedent days. This is due to the delayed SSL response to the hydrological events of the basin. Consequently, embedding the antecedent hydroclimatic conditions as input variables is suggested to improve the prediction accuracy of the models.



**Figure 2.** Principal component analysis (PCA). (a): PCA of data recorded at Bouregreg basin;  $\ln(SSL)$  is the Napierian logarithm of the suspended solid; Ras and Qas are rainfall and discharge at Aguibat Ziar station; Rlc and Qlc are rainfall and discharge at Lala Chafia station; Rts and Qts are the rainfall and discharge at Tsalat station; Rsa and Qsa are the rainfall and discharge at Sidi Amar station. (b): PCA of dataset recorded at Grou basin.



**Figure 3.** Cont.



**Figure 3.** Correlation matrix of the variables. (a): Correlation matrix of the variables at Aguibat Ziar (az) station; (b): correlation matrix of the variables at Sidi Mohammed Cherif (sm) station; (c) correlation matrix of the variables at Ras Fathia (rf) station (sm); (d): correlation matrix of the variables at Ain Loudah (al) station. The Napierian logarithm of the suspended sediment load  $\ln(SSL)$  is positively correlated with discharges and rainfalls in the basin. The rainfalls and flow discharge at (day-i) are more important.

### 3.2. Training Process of the Machine Learning Models

In this step, five ML models with NARX input variables, namely random forest, AdaBoost, support vector machine (SVM), k-nearest neighbor (kNN), and artificial neural network (ANN), were trained, tuned, and evaluated using cross-validation with a number of folds ( $k = 10$ ) to improve the prediction accuracy. The tuning process includes changing the hyper-parameter and transfer functions of the models. However, Table 4 presents the adopted parameters in this study.

Table 5 presents the ML performance during the training phase. This table clearly shows that all models have a high potential accuracy in predicting the daily suspended solid (SSL) in four main basins in the Great Bouregreg basin (BW), justified by the fact that the NSE ranges from 0.57 to 0.84 in the Aguibat Ziar station, from 0.61 to 0.8 in the Ras Fathia station, from 0.41 to 0.62 for the SM Cherif station, and from 0.66 to 0.76 in the Ain Loudah station. It was observed that the random forest and AdaBoost models outperformed the other models during the training phase.

**Table 4.** Adopted hyper-parameter and functions of the trained models.

| Model    | Parameters/Functions/Algorithm                                                                                                                                                                        |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RF       | 50 Trees                                                                                                                                                                                              |
| AdaBoost | Loss function: exponential<br>learning rate: 0.5<br>Estimator number: 250                                                                                                                             |
| SVR      | $C = 350$<br>Kernel function: RBF ( $\gamma = 1.3$ )<br>$\epsilon$ -function loss, $\epsilon = 0.002$                                                                                                 |
| k-NN     | $k = 5$<br>Distance function: Euclidian                                                                                                                                                               |
| ANN      | 3 layers<br>12 neurons in hidden layer<br>Algorithm: Levenberg<br>Function activation: Sigmoid<br>Identity in output layer<br>Epoch number: 1000<br>Learning rate: 0.01<br>Momentum coefficient: 0.85 |

Notes: RF: random forest; AdaBoost: adaptive boosting; SVR: support vector regression; k-NN: k-nearest neighbor; ANN: artificial neural network.

**Table 5.** Machine learning model performances during the training phase.

| Models         | $r$  | RMSE | ML   | NSE | Musle_Calibrated |
|----------------|------|------|------|-----|------------------|
| Aguibat Ziar   |      |      |      |     |                  |
| Random Forest  | 0.92 | 1.18 | 0.84 |     |                  |
| AdaBoost       | 0.92 | 1.20 | 0.84 |     |                  |
| SVM            | 0.76 | 1.95 | 0.57 |     | 0.46             |
| kNN            | 0.88 | 1.49 | 0.75 |     |                  |
| Neural Network | 0.79 | 1.83 | 0.62 |     |                  |
| Ras Fathia     |      |      |      |     |                  |
| Random Forest  | 0.89 | 1.50 | 0.80 |     |                  |
| AdaBoost       | 0.89 | 1.54 | 0.78 |     |                  |
| SVM            | 0.78 | 2.08 | 0.61 |     | 0.02             |
| kNN            | 0.85 | 1.83 | 0.70 |     |                  |
| Neural Network | 0.82 | 1.90 | 0.67 |     |                  |
| SM Cherif      |      |      |      |     |                  |
| Random Forest  | 0.79 | 1.62 | 0.62 |     |                  |
| AdaBoost       | 0.76 | 1.74 | 0.56 |     |                  |
| SVM            | 0.73 | 1.79 | 0.54 |     | 0.47             |
| kNN            | 0.68 | 2.01 | 0.41 |     |                  |
| Neural Network | 0.76 | 1.70 | 0.58 |     |                  |
| Ain Loudah     |      |      |      |     |                  |
| Random Forest  | 0.87 | 1.91 | 0.76 |     |                  |
| AdaBoost       | 0.84 | 2.13 | 0.70 |     |                  |
| SVM            | 0.81 | 2.26 | 0.66 |     | 0.30             |
| kNN            | 0.83 | 2.26 | 0.66 |     |                  |
| Neural Network | 0.84 | 2.12 | 0.70 |     |                  |

### 3.3. Validation of the ML Models

This step was carried out to evaluate whether the trained ML models are generalizable in order to predict the suspended sediment load for the dataset unseen during the training phase. To that end, we simulated the SSL recorded during the year 2021 and evaluated the model performances. Table 6 presents the model performances during the validation phase. It was observed that, except for the kNN model in predicting the SSL in the Ain Loudah station, most of the models presented good accuracy during the validation phase, with a



NSE ranging from 0.77 to 0.55, an  $r$  ranging from 0.82 to 0.92, and a RMSE ranging from 1.34 to 2.96  $\ln(t \cdot d^{-1})$ .

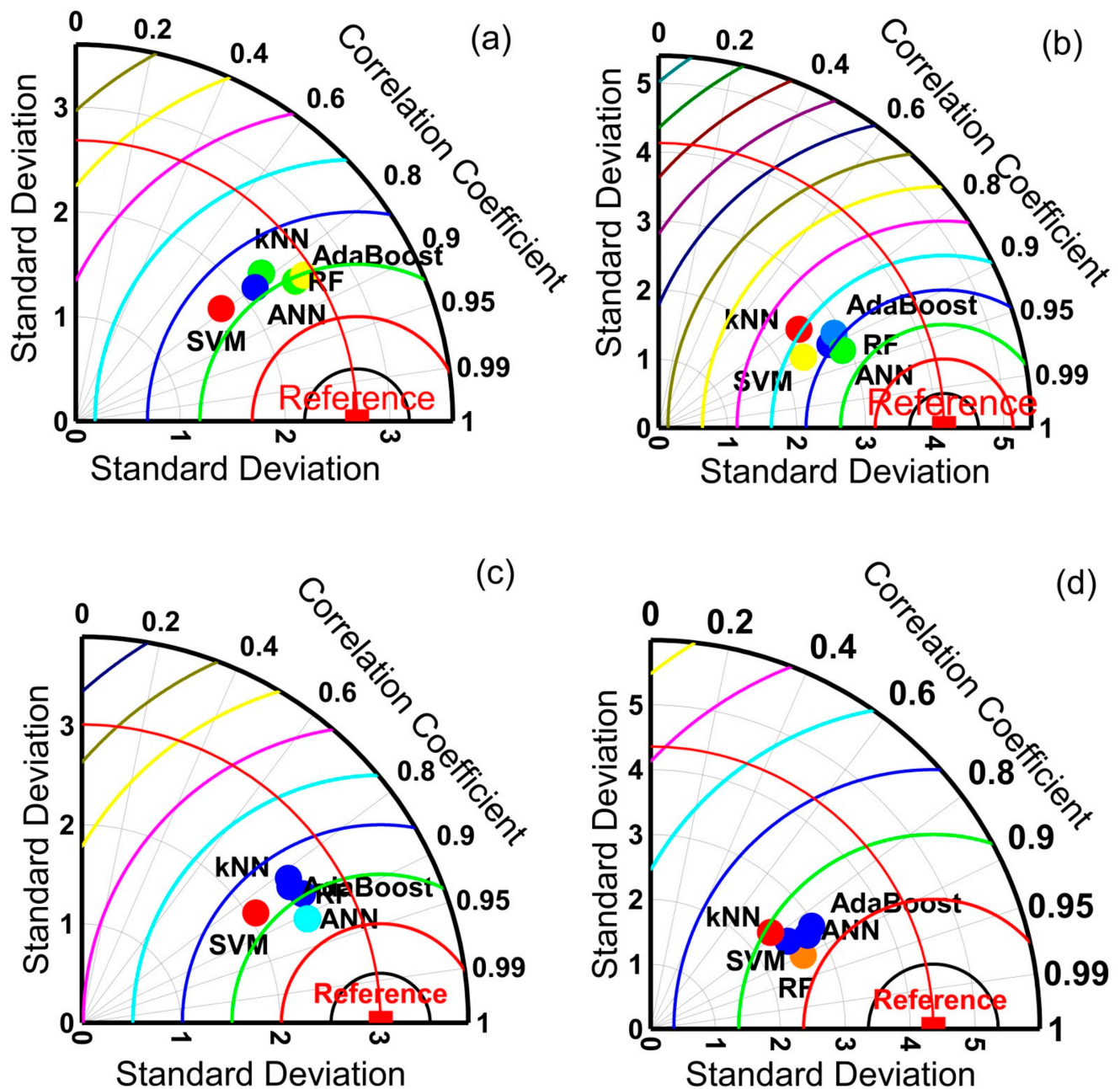
**Table 6.** Machine learning model performances during the validation phase.

| Models              | $r$  | $RMSE \ln(t \cdot d^{-1})$ | NSE  |
|---------------------|------|----------------------------|------|
| <b>Aguibat Ziar</b> |      |                            |      |
| RF                  | 0.84 | 1.52                       | 0.68 |
| AdaBoost            | 0.84 | 1.51                       | 0.68 |
| SVM                 | 0.79 | 1.68                       | 0.61 |
| kNN                 | 0.78 | 1.81                       | 0.55 |
| ANN                 | 0.80 | 1.61                       | 0.64 |
| <b>Ras Fathia</b>   |      |                            |      |
| RF                  | 0.90 | 2.27                       | 0.70 |
| AdaBoost            | 0.88 | 2.38                       | 0.67 |
| SVM                 | 0.90 | 2.35                       | 0.68 |
| kNN                 | 0.82 | 2.56                       | 0.62 |
| ANN                 | 0.92 | 1.99                       | 0.77 |
| <b>SM Cherif</b>    |      |                            |      |
| RF                  | 0.86 | 1.53                       | 0.74 |
| AdaBoost            | 0.84 | 1.66                       | 0.69 |
| SVM                 | 0.85 | 1.69                       | 0.69 |
| kNN                 | 0.82 | 1.75                       | 0.66 |
| ANN                 | 0.91 | 1.34                       | 0.80 |
| <b>Ain Loudah</b>   |      |                            |      |
| RF                  | 0.90 | 2.60                       | 0.64 |
| AdaBoost            | 0.84 | 2.76                       | 0.61 |
| SVM                 | 0.84 | 2.96                       | 0.55 |
| kNN                 | 0.78 | 3.19                       | 0.47 |
| ANN                 | 0.86 | 2.72                       | 0.61 |

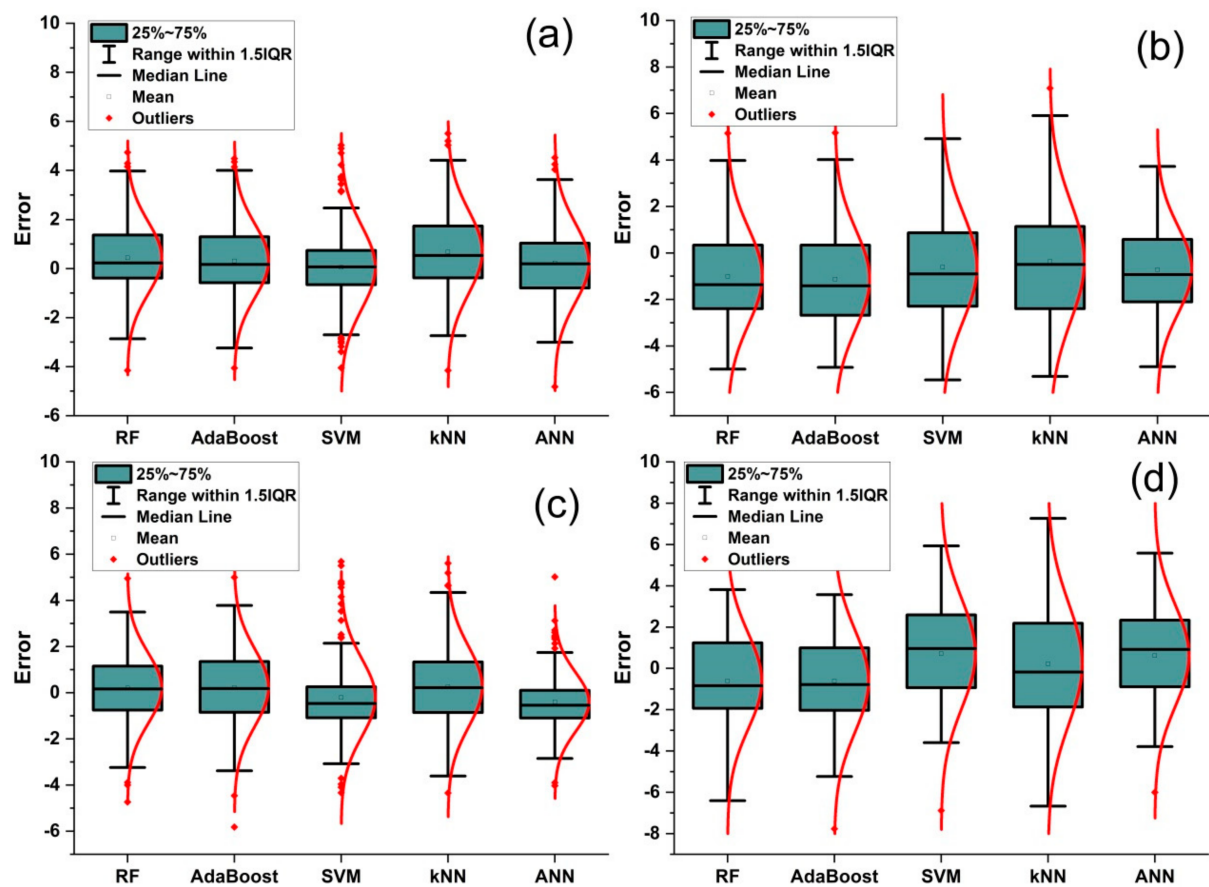
To compare the trained models for simulating the SSL recorded during the 2021 year, Taylor diagrams were plotted, and are presented in Figure 4. It shows that the AdaBoost and RF models outperform the other models in predicting the SSL in Aguibat Ziar. The ANN model is more accurate than the other ones for simulating the SSL in the Ras Fathia and SM Cherif stations. As for the Ain Loudah station, the RF model is more accurate, followed by the ANN, RF, and SVM models. However, the kNN model has the lowest accuracy in predicting the SSL in all stations in comparison to the other models. However, according to the suggestions in [48], it has fairly acceptable performances ( $NSE > 0.5$ ) for the SM Cherif, Ras Fathia, and Aguibat Ziar stations (Table 6).

Besides, Figure 5 illustrates the boxplot and the fitted normal distribution of the model errors in simulating the SSL recoded during 2021. This figure demonstrates that the model errors obey a Gaussian distribution, as they are evenly distributed over small values. Figure 5a shows that the SVM model has a narrow box in comparison to the other models in simulating the SSL in Aguibat Ziar, and even its NSE is lower than those of the Adaboost, RF, and ANN models. This is justified by the fact that the NSE is sensitive to the outlier values (Figure 5a). A similar result was observed for the kNN and SVM models in predicting the SSL at the SM Cherif station (Figure 5c). The normal distribution of the model errors demonstrates their stability in simulating the SSL for the dataset unseen during the training process.





**Figure 4.** Taylor diagrams for comparing trained machine learning models, namely random forest (RF), adaptive boosting (AdaBoost), artificial neural network (ANN), and k-nearest neighbor (kNN). (a): Comparison of the ML models for predicting suspended sediment load at Aguibat Ziar station; (b): comparison of the ML models for predicting SSL at Ras Fathia station; (c): comparison of the ML models at SM Cherif station; (d): comparison of the ML models at Ain Loudah station.



**Figure 5.** Distribution of the model errors during the simulation of the suspended sediment load recorded in 2021, namely random forest (RF), adaptive boosting (AdaBoost), artificial neural network (ANN), and k-nearest neighbor (kNN). Red lines represent the fitted normal distributions of the error, and points outside the box plots are the outlier values of the errors. (a): at Aguibat Ziar station; (b): at Ras Fathia station; (c): at SM Cherif station; (d): at Ain Loudah station.

### 3.4. Generalization Ability and Uncertainties

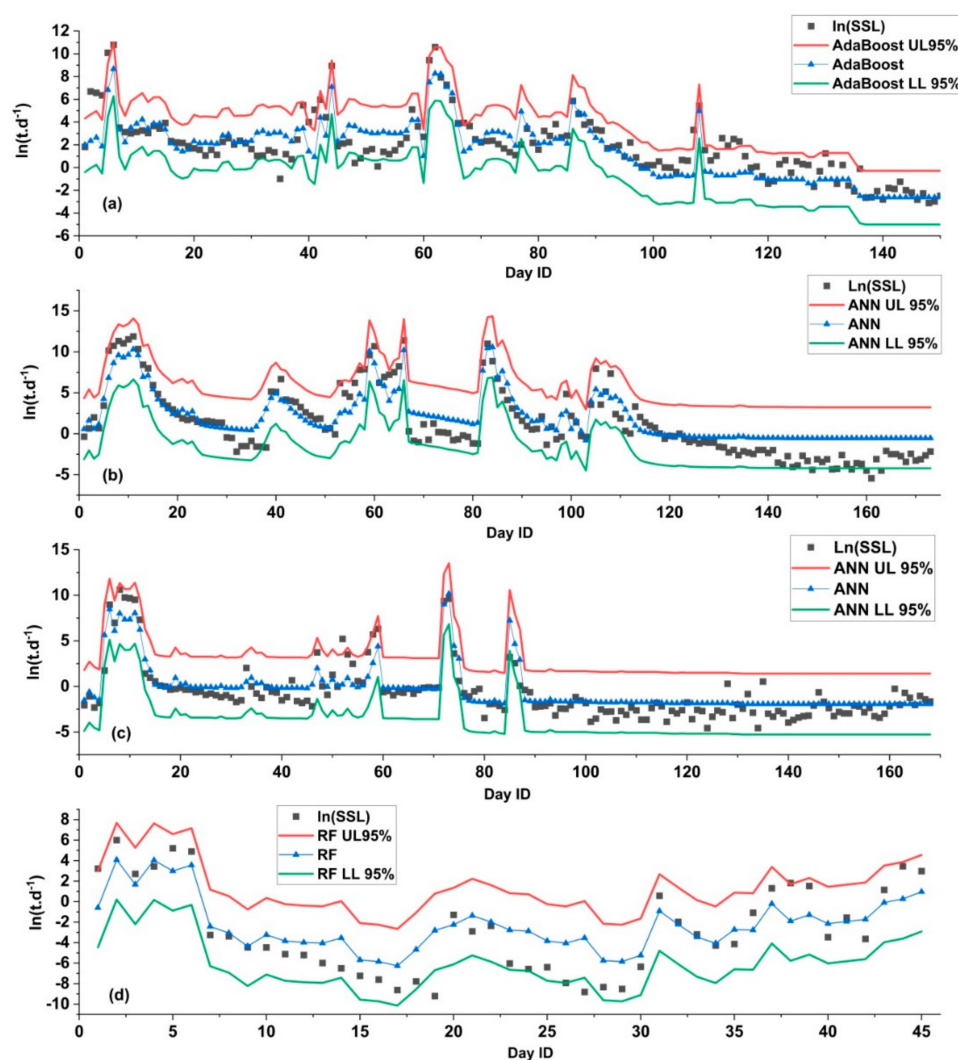
In this study, the uncertainty analysis and classification of the developed models were conducted, and are presented in Table 7. From this table, it was observed that most of the models have a GA that is good to excellent, demonstrating the good training of these models and, therefore, their utility for simulating the SSL at the studied basin. Besides, the confidence intervals with a significance level of 95% ( $z$ -score = 1.96) of the models were computed, and are presented in Table 7.

**Table 7.** Generalization ability, lower limit errors, and upper limit errors of the models.

| Basin        |        | RF    | AdaBoost | SVM   | kNN   | ANN   |
|--------------|--------|-------|----------|-------|-------|-------|
| Aguibat Ziar | GA     | 1.29  | 1.26     | 0.86  | 1.21  | 0.88  |
|              | LL 95% | −2.88 | −2.93    | −3.71 | −3.88 | −3.50 |
|              | UL 95% | 2.73  | 2.80     | 3.78  | 2.87  | 3.71  |
| Ras Fathia   | GA     | 1.52  | 1.54     | 1.13  | 1.40  | 1.04  |
|              | LL 95% | −3.02 | −3.05    | −4.11 | −3.92 | −3.68 |
|              | UL 95% | 2.85  | 3.00     | 4.03  | 3.02  | 3.78  |
| SM Cherif    | GA     | 0.94  | 0.96     | 0.94  | 0.87  | 0.79  |
|              | LL 95% | −3.22 | −3.20    | −3.55 | −4.35 | −3.35 |
|              | UL 95% | 3.14  | 3.57     | 3.45  | 3.26  | 3.33  |
| Ain Loudah   | GA     | 1.36  | 1.30     | 1.31  | 1.41  | 1.28  |
|              | LL 95% | −3.88 | −4.26    | −4.47 | −4.89 | −4.18 |
|              | UL 95% | 3.59  | 4.08     | 4.41  | 3.65  | 4.16  |

Notes: GA: generalization ability; LL 95%: lower limit with 95% level confidence; UL 95%: upper limit with 95% level confidence; SVM: support vector machine; kNN: k-nearest neighbor; Adaboost: adaptive boosting.

Based on Table 6 and Figure 4, the best models for predicting the SSL in the Aguibat Ziar, Ras Fathia, SM Cherif, and Ain Loudah stations are Adaboost, ANN, and random forest, respectively. Figure 6 presents a graphical comparison of the observed and simulated  $\ln(\text{SSL})$  with regard to the UL and LL errors provided by these models. This figure shows that, except for isolated cases, most of the simulated  $\ln(\text{SSL})$  values are included in the confidence interval with a level of 95%. More importantly, the models are capable of predicting the SSL peaks, as shown in Figure 6.



**Figure 6.** Superimposed plots of the measured and simulated  $\ln(\text{SSL})$  with 95% upper and lower limits using the best fitted ML models, namely: (a) adaptive boosting (Adaboost) model for simulating the SSL in Aguibat Ziar; (b) artificial neural network (ANN) model for simulating the SSL in Ras Fathia station; (c) artificial neural network (ANN) model for simulating the SSL in SM Cherif station; (d) random forest (RF) model for simulating the SSL in Ain Loudah station.

#### 4. Discussion

Sediment transport at the basin's scale is a highly dynamic phenomenon and depends on a multitude of combination variables that make its estimation a difficult task. Indeed, several process-based models appeared to be valuable tools to predict the sediment load at the basin's scale. Meanwhile, this approach requires the monitoring of several physical parameters for calibration and validation processes that affect the accuracy of the developed model, especially in poorly monitored areas. For instance, in the Bouregreg basin, the MUSLE model had a NSE less than 0.5 in the prediction of the sediment yield in the Aguibat Ziar, Ras Fathia, SM Cherif, and Ain Loudah stations [28]. Interestingly, ref. [48] suggested

that, in order to be acceptable for simulating the sediment load, it should have a  $NSE > 0.5$ . Therefore, to overcome this challenge, this study proposed ML-based modeling to improve the prediction accuracy in predicting the suspended sediment load in the Bourereg basin.

The evaluation of the model performance during the simulation of the SSL recorded in 2021 showed that most ML models (except for kNN in the Ain Loudah station) presented a  $NSE$  over 0.5, indicating their suitability for simulation purposes. kNN and SVM models had a lower performance for simulating the SSL in all studied stations. This is in agreement with previous published studies, such as Wang et al. [49] and El Bilali et al. [14], where their findings demonstrated that the tree-based and ANN models are more accurate than SVM and k-NN ones. Regarding the SSL prediction, ref. [50] found that the data-driven techniques can efficiently predict the SSL, with a  $NSE$  of 0.90, in China. Indeed, the authors used several inputs variables, including the antecedent SSL. Meanwhile, including the antecedent SSL as an input variable to predict the actual SSL can reduce the practical implication of the models, since this variable needs measurement. In contrast, using only hydro-climatic variables as input features in this study was enough to accurately predict the SSL. More importantly, the generalization ability (GA) of the ML models in predicting the SSL is crucial for the selection of the suitable model. This study evaluated the models according to the performances, in addition to the GA, to assess whether the models keep the accuracy during the validation process, and the variation of this accuracy, especially when the models were over-fitted or under-trained. The results showed that the models were ranked.

The applied methodology was an accurate tool to predict the daily SSL in immediate upstream stations of the SMBA reservoir, which could be integrated as a powerful module in a decision support system (DSS) of water resource planning and management in the studied area in order to evaluate the reservoir sedimentation with a high frequency. Indeed, the suspended sediment load from the intermediate basin and the erosion of the banks of the SMBA reservoir were not considered in the present study, which can be among its limitations.

Meanwhile, coupling the proposed ML models with a stream-based model to evaluate the sediment inflow into the SMBA reservoir is suggested to improve the accuracy, since the studied stations are upstream of the reservoir [51]. Since the stream-based models require too many physical datasets pertaining to the river reach, such as the digital elevation model (DEM), Manning–Strickler coefficient, topographical surveys of the bridges and culverts, and others, the availability of the bathymetric survey dataset could be valuable for statistically linking the cumulative SSL and the cumulative reservoir sedimentation. Hence, it will be a reliable alternative to the previous suggestion. Additionally, the evaluation of the erosion of the SMBA reservoir banks using ML models requires bathymetric measurement datasets with enough frequency, and can be suggested to improve the SMBA reservoir sedimentation monitoring.

Besides, the sedimentation can be managed both at the reservoir scale and at the basin scale. At the reservoir scale, the flushing process through the water outflow rate and the dredging techniques are the main operations used to manage/reduce the reservoir sedimentation [52], whereas, at the basin scale, the best practice management (BPM) are outstanding methods to mitigate the soil erosion. Despite being an accurate approach to estimate the SSL upstream of the SMBA reservoir, the proposed ML models are not capable of simulating the BPM at the basin scale, because the input features do not include the physical parameters related to the basin, such as the land cover, soil type, and anthropogenic activities related to the basin to be studied. However, this limitation could be overcome by coupling ML models and process-based models (the soil water assessment tool model, for instance); therefore, it can be suggested for future works. Interestingly, spatial machine learning models embedded in GIS tools could be a fruitful approach to simulate the BPMs in order to reduce the soil erosion over basins.

Eventually, it must be reminded that all of the results of the modelling process are based on daily measurements of suspended sediment loads in the streams of all of the



tributaries of the SMBA dam, performed by the River Basin Agency. Ground observations are indispensable, prior to any modeling process for future predictions, in order to improve the river and dam management.

## 5. Conclusions

An accurate estimation of the suspended sediment load (SSL) in the basins is considered to be a crucial challenge in water resource planning and management. The response of the SSL in basins is nonlinear and highly dynamic, especially in semi-arid regions. In this study, five machine learning models with the NARX input method were applied and evaluated. The main conclusions of the present study are as follows:

1. Empowering machine learning by adopting the NARX hydro-climatic input variable method is valuable in the prediction of the daily suspended sediment load;
2. The artificial neural network is accurate in simulating the SSL in two basins out of four, followed by AdaBoost and random forest models;
3. The generalization ability metric demonstrated the stability of the applied models in predicting the SSL.

In summary, the proposed methods are powerful tools to overcome the scarce physical dataset required by the process-based model to predict the SSL. However, the continuous monitoring of the SSL in the studied basin will increase the amount of the datasets and, therefore, exploration of the DNN is suggested for future work.

**Author Contributions:** Conceptualization, M.A.E. and A.E.B.; methodology, M.A.E. and A.E.B.; software, M.A.E. and A.E.B.; validation, G.M. and I.K.; formal analysis, M.A.E. and A.E.B.; investigation, M.A.E. and A.E.B.; resources, A.Z.; data curation, M.A.E. and A.N.; writing—original draft preparation, M.A.E. and A.E.B.; writing—review and editing, G.M. and I.K.; visualization, M.A.E. and A.E.B.; supervision, G.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Data Availability Statement:** All data used are available upon reasonable request.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Gibson, S.; Floyd, I.; Sánchez, A.; Heath, R. Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flow in HEC-RAS. *Earth Surf. Process. Landf.* **2021**, *46*, 540–553. [\[CrossRef\]](#)
2. Pätz, T.; Clark, A.H.; Valyrakis, M.; Durán, O. The Physics of Sediment Transport Initiation, Cessation, and Entrainment Across Aeolian and Fluvial Environments. *Rev. Geophys.* **2020**, *58*, e2019RG000679. [\[CrossRef\]](#)
3. Van Kessel, T.; Blom, C. Rheology of cohesive sediments: Comparison between a natural and an artificial mud. *J. Hydraul. Res.* **1998**, *36*, 591–612. [\[CrossRef\]](#)
4. Wang, H.; Zentar, R.; Wang, D. Rheological Characterization of Fine-Grained Sediments under Steady and Dynamic Conditions. *Int. J. Geomech.* **2022**, *22*, 4021260. [\[CrossRef\]](#)
5. Chen, J.; Zhou, W.; Han, S.; Sun, G. Influences of retrogressive erosion of reservoir on sedimentation of its downstream river channel—A case study on Sanmenxia Reservoir and the Lower Yellow River. *Int. J. Sediment Res.* **2017**, *32*, 373–383. [\[CrossRef\]](#)
6. Česonienė, L.; Šileikienė, D.; Dapkienė, M. Relationship between the Water Quality Elements of Water Bodies and the Hydrometric Parameters: Case Study in Lithuania. *Water* **2020**, *12*, 500. [\[CrossRef\]](#)
7. Ustaoglu, F.; Tepe, B. Water quality and sediment contamination assessment of Pazarsuyu Stream, Turkey using multivariate statistical methods and pollution indicators. *Int. Soil Water Conserv. Res.* **2019**, *7*, 47–56. [\[CrossRef\]](#)
8. Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. *Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation*; US Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1965.
9. Williams, J.R.; Berndt, H.D. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. *Trans. ASAE* **1977**, *20*, 1100–1104. [\[CrossRef\]](#)
10. Renard, K.G.; Foster, G.R.; Weesies, G.A.; Porter, J.P. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* **1991**, *46*, 30–33.
11. Sadeghi, S.; Gholami, L.; Darvishan, A.K.; Saeidi, P. A review of the application of the MUSLE model worldwide. *Hydrol. Sci. J.* **2014**, *59*, 365–375. [\[CrossRef\]](#)
12. Bouguerra, H.; Bouanani, A.; Khanchoul, K.; Derdous, O.; Tachi, S.E. Mapping erosion prone areas in the Bouhamdane watershed (Algeria) using the Revised Universal Soil Loss Equation through GIS. *J. Water Land Dev.* **2017**, *32*, 13–23. [\[CrossRef\]](#)

13. Bouguerra, S.; Jebari, S.; Tarhouni, J. An analysis of sediment production and control in Rmel river basin using InVEST sediment retention model. *J. New Sci.* **2019**, *66*, 4170–4181.
14. El Bilali, A.; Taleb, A.; Brouziyne, Y. Comparing four machine learning model performances in forecasting the alluvial aquifer level in a semi-arid region. *J. Afr. Earth Sci.* **2021**, *181*, 104244. [\[CrossRef\]](#)
15. El Bilali, A.; Taleb, A. Prediction of irrigation water quality parameters using machine learning models in a semi-arid environment. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* **2020**, *19*, 439–451. [\[CrossRef\]](#)
16. el Bilali, A.; Abdeslam, T.; Mazigh, N.; Moukhliiss, M. Prediction of chemical water quality used for drinking purposes based on artificial neural networks. *Moroc. J. Chem.* **2020**, *3*, 665–672.
17. Chen, C.; He, W.; Zhou, H.; Xue, Y.; Zhu, M. A comparative study among machine learning and numerical models for simulating groundwater dynamics in the Heihe River Basin, northwestern China. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 3904. [\[CrossRef\]](#)
18. Mohanty, S.; Jha, M.K.; Raul, S.K.; Panda, R.K.; Sudheer, K.P. Using Artificial Neural Network Approach for Simultaneous Forecasting of Weekly Groundwater Levels at Multiple Sites. *Water Resour. Manag.* **2015**, *29*, 5521–5532. [\[CrossRef\]](#)
19. Khozani, Z.S.; Bonakdari, H.; Zaji, A.H. Estimating shear stress in a rectangular channel with rough boundaries using an optimized SVM method. *Neural Comput. Appl.* **2018**, *30*, 2555–2567. [\[CrossRef\]](#)
20. Khozani, Z.S.; Safari, M.J.S.; Mehr, A.D.; Mohtar, W.H.M.W. An ensemble genetic programming approach to develop incipient sediment motion models in rectangular channels. *J. Hydrol.* **2020**, *584*, 124753. [\[CrossRef\]](#)
21. Al Dahoul, N.; Essam, Y.; Kumar, P.; Ahmed, A.N.; Sherif, M.; Sefelnasr, A.; Elshafie, A. Suspended sediment load prediction using long short-term memory neural network. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 7826. [\[CrossRef\]](#)
22. Nourani, V.; Gokcekus, H.; Gelete, G. Estimation of Suspended Sediment Load Using Artificial Intelligence-Based Ensemble Model. *Complex* **2021**, *2021*, 6633760. [\[CrossRef\]](#)
23. Ampomah, R.; Hosseiny, H.; Zhang, L.; Smith, V.; Sample-Lord, K. A Regression-Based Prediction Model of Suspended Sediment Yield in the Cuyahoga River in Ohio Using Historical Satellite Images and Precipitation Data. *Water* **2020**, *12*, 881. [\[CrossRef\]](#)
24. El Bilali, A.; Taleb, A.; Nafii, A.; Alabjah, B.; Mazigh, N. Prediction of sodium adsorption ratio and chloride concentration in a coastal aquifer under seawater intrusion using machine learning models. *Environ. Technol. Innov.* **2021**, *23*, 101641. [\[CrossRef\]](#)
25. Alabjah, B.; Amraoui, F.; Chibout, M.M.; Slimani, M. Assessment of saltwater contamination extent in the coastal aquifers of Chaouia (Morocco) using the electric recognition. *J. Hydrol.* **2018**, *566*, 363–376. [\[CrossRef\]](#)
26. El Bilali, A.; Taghi, Y.; Briouel, O.; Taleb, A.; Brouziyne, Y. A framework based on high-resolution imagery datasets and MCS for forecasting evaporation loss from small reservoirs in groundwater-based agriculture. *Agric. Water Manag.* **2021**, *262*, 107434. [\[CrossRef\]](#)
27. Mazigh, N.; Taleb, A.; El Bilali, A.; Ballah, A. The Effect of Erosion Control Practices on the Vulnerability of Soil Degradation in Oued EL Malleh Catchment using the USLE Model Integrated into GIS, Morocco. *Trends Sci.* **2022**, *19*, 2059. [\[CrossRef\]](#)
28. Ezzaouini, M.A.; Mahé, G.; Kacimi, I.; Zerouali, A. Comparison of the MUSLE Model and two years of Solid Transport Measurement, in the Bouregreg Basin, and Impact on the sedimentation in the Sidi Mohamed Ben Abdellah Reservoir, Morocco. *Water* **2020**, *12*, 1882. [\[CrossRef\]](#)
29. Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *J. Hydrol.* **1970**, *10*, 282–290. [\[CrossRef\]](#)
30. Aggarwal, C.C. *Data Mining*; Springer: Cham, Switzerland, 2015. [\[CrossRef\]](#)
31. Bishop, C.M. *Pattern Recognition and Machine Learning*; Springer: New York, NY, USA, 2006.
32. Bonaccorso, G. *Machine Learning Algorithms: Popular Algorithms for Data Science and Machine Learning*; Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2018.
33. Freund, Y.; Schapire, R.E. A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting. *J. Comput. Syst. Sci.* **1997**, *55*, 119–139. [\[CrossRef\]](#)
34. Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*; Springer Science & Business Media: New York, NY, USA, 2009.
35. Kubat, M. *An Introduction to Machine Learning*; Springer: Cham, Switzerland, 2017. [\[CrossRef\]](#)
36. Breiman, L. Random forests. *Mach. Learn.* **2001**, *45*, 5–32. [\[CrossRef\]](#)
37. Liaw, A.; Wiener, M. Classification and regression by randomForest. *R News* **2002**, *2*, 18–22.
38. Oshiro, T.M.; Perez, P.S.; Baranauskas, J.A. How Many Trees in a Random Forest? In *International Workshop on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012; pp. 154–168. [\[CrossRef\]](#)
39. Schapire, R.E. A brief introduction to boosting. *Int. Jt. Conf. Artif. Intell.* **1999**, *2*, 1401–1406.
40. Freund, Y.; Schapire, R.E. Experiments with a New Boosting Algorithm. In *Proceedings of the ICML '96 13th International Conference on Machine Learning*, Bari, Italy, 3–6 July 1996; pp. 148–156.
41. EL Bilali, A.; Taleb, A.; Bahlaoui, M.A.; Brouziyne, Y. An integrated approach based on Gaussian noises-based data augmentation method and Ada, Boost model to predict faecal coliforms in rivers with small dataset. *J. Hydrol.* **2021**, *599*, 126510. [\[CrossRef\]](#)
42. Vapnik, V.N. *The Nature of Statistical Learning Theory*, 2nd ed.; Springer: New York, NY, USA, 2000.
43. Ghosh, S. SVM-PGSL coupled approach for statistical downscaling to predict rainfall from GCM output. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* **2010**, *115*, D22. [\[CrossRef\]](#)
44. Dawson, C.; Wilby, R. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modelling. *Hydrol. Sci. J.* **1998**, *43*, 47–66. [\[CrossRef\]](#)
45. Schalkoff, R.J. *Artificial Neural Networks*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1997.

- 
46. Yoon, H.; Jun, S.-C.; Hyun, Y.; Bae, G.-O.; Lee, K.-K. A comparative study of artificial neural networks and support vector machines for predicting groundwater levels in a coastal aquifer. *J. Hydrol.* **2011**, *396*, 128–138. [[CrossRef](#)]
  47. El Bilali, A.; Moukhliiss, M.; Taleb, A.; Nafii, A.; Alabjah, B.; Brouziyne, Y.; Mazigh, N.; Teznine, K.; Mhamed, M. Predicting daily pore water pressure in embankment dam: Empowering Machine Learning-based modeling. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2022**. [[CrossRef](#)]
  48. Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* **2007**, *50*, 885–900. [[CrossRef](#)]
  49. Wang, L.; Long, F.; Liao, W.; Liu, H. Prediction of anaerobic digestion performance and identification of critical operational parameters using machine learning algorithms. *Bioresour. Technol.* **2020**, *298*, 122495. [[CrossRef](#)]
  50. Adnan, R.M.; Liang, Z.; El-Shafie, A.; Zounemat-Kermani, M.; Kisi, O. Prediction of Suspended Sediment Load Using Data-Driven Models. *Water* **2019**, *11*, 2060. [[CrossRef](#)]
  51. Tadesse, A.; Dai, W. Prediction of sedimentation in reservoirs by combining catchment based model and stream based model with limited data. *Int. J. Sediment Res.* **2019**, *34*, 27–37. [[CrossRef](#)]
  52. Kondolf, G.M.; Gao, Y.; Annandale, G.W.; Morris, G.L.; Jiang, E.; Zhang, J.; Cao, Y.; Carling, P.; Fu, K.; Guo, Q.; et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earths Future* **2014**, *2*, 256–280. [[CrossRef](#)]