

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N° Ref :.....

**Centre Universitaire Abd alhafid Boussouf  
Mila**

**Département de génie civil et Hydraulique**

**Domaine : Sciences et de Technologie**

**Filière : Hydraulique**

**Spécialité : Hydraulique Urbaine**

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme  
MASTER  
en Hydraulique Urbaine**

**Contribution à la modélisation de la relation  
pluie-débit par l'utilisation de logiciel HEC HMS  
et les réseaux de neurones**

**Préparé par :**

- **BENKOUTEN Messaoud**
- **KAHIA Oussama**
- **TEGHRI Lokmane**

**Soutenu devant le jury :**

**Mr KEMOUKH Sami  
Mr MOUSSOUNI Abderrazek  
Mr BERHAIL Sabri  
Mr ZEGHMAR Amer**

**Président  
Rapporteur  
Examinateur  
Co- Rapporteur**

**Année universitaire : 2022/2023**

# Remerciement

Au terme de la

Rédaction de ce mémoire ;

Nous ne manquons pas d'adresser nos sincères remerciements

à notre **Dieu**, qui a éclairé notre itinéraire du savoir.

Nous remercions également aussi toutes les personnes qui

ont contribué à son élaboration :

**Mr Moussouni Abderezek et Zeghmar Amer** du Centre universitaire de

Mila, de nous avoir encadré et suivi ce travail avec sa

Rigueur scientifique, ses conseils ainsi que sa gentillesse qui

nous a permis de mener à bien ce travail ; nous exprimons

aussi nos profonds remerciements et vives grâces

à nos enseignants du département d'Hydraulique du Centre

Universitaire de Mila .

# DIDICACE

*Je voudrais dédier ce modeste travail à ceux qui m'ont donné leur amour, le  
Gout de la victoire, et les bougies qui m'ont éclairé le bon chemin.*

*A vous ma seule raison de vivre mon père « **Abdelhamid** »*

*et ma mère « **Hafida** ».*

*Je vous dis merci.*

*A ma femme « **Ouafa** » et ma petite princesse « **Hidayet Errahmen** »*

*Mes frères : « **Zouhir** », « **Bilal** » et « **Walid** »*

*Mes sœurs : « **Moufida** » et « **Dounia** ».*

*A tous qui ont soutenu le nom **Benkouitende** près ou de loin.*

*Mes amis chacun par son nom. A tous ceux que j'aime et m'aiment. A tous mes  
collègues et ma promotion 2022/2023*

**B. Messaoud**

# DIDICACE

*Je voudrais dédier ce modeste travail à ceux qui m'ont donné leur amour, le*

*Gout de la victoire, et les bougies qui m'ont éclairé le bon chemin.*

*A vous ma seule raison de vivre mon père « **Mohamed Tayeb** »*

*et ma mère « **terkia** ».*

*Je vous dis merci.*

*Mon frère : « **Raouf** ».*

*Mes sœurs : « **Chahra** » et « **Selma** ».*

*A tous qui est soutenu le nom **Kahia** de près ou de loin.*

*A mes amis chacun par son nom. A tous ceux que j'aime et m'aiment. A tous*

*mes collègues et ma promotion 2022/2023.*

# K.OUSSAMA

# DIDICACE

*Je voudrais dédier ce modeste travail à ceux qui m'ont donné leur amour, le*

*Gout de la victoire, et les bougies qui m'ont éclairé le bon chemin.*

*A vous ma seule raison de vivre mon père « **abdelghani** »*

*et ma mère « **ghania** ».*

*Je vous dis merci.*

*Mes sœurs : « **amina** » et « **baya** » et « **romaysa** »*

*A tous qui ont soutenu le nom **Teghri** de près ou de loin.*

*A mes amis chacun par son nom. A tous ceux que j'aime et m'aiment. A tous*

*mes collègues et ma promotion 2022/2023.*

**T.Loukmane**

# Sommaire

Remerciement

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Résumé

Abstract

**Introduction Général .....1**

## CHAPITRE I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIE

**I.1. Introduction.....3**

I.2.Cycle hydrologique.....3

I.3. Bassin versant .....4

I.3.1. Précipitations.....4

I.3.2. Ruissellement.....5

I.3.3. Débit.....5

I.3.4. Débit solide .....5

I.3.5. Relations pluie-débit .....5

I.4. Modélisation hydrologique.....6

I.4.1. Modèle .....6

I.4.2. Objectifs de la modélisation.....7

I.4.3. Structure d'un modèle hydrologique .....8

I.4.4. Concept de modélisation.....9

I.5.Choix du modèle.....9

I.5.1. Calage du modèle.....10

I.5.1.1. Ca-lage manuel.....10

I.5.1.2. Calage automatique .....11

I.5.1.3. Calage mixte.....11

I.5.2. Validation du modèle .....	11
I.6. Typologie des modèles hydrologiques .....	11
I.7. Classification de modèles .....	12
I.7.1. Modèles déterministes .....	12
I.7.2. Modèles stochastiques .....	12
I.7.3. Modèles physiques.....	13
I.7.4. Modèles paramétriques .....	13
I.7.5. Modèles conceptuels.....	13
I.7.6. Modèles empiriques .....	13
I.7.7. Modèles spatialisés .....	13
I.7.8. Modèles globaux.....	14
I.8. Présentation de quelques modèles .....	14
I.8.1. MIKE SHE.....	14
I.8.2. CEQUEAU .....	15
I.8.3. TOP MODEL.....	15
I.8.4. WATER WARE.....	15
I.8.5. GIBSI .....	16
I.8.6. IHACRES .....	16
I.8.7. AIGA.....	16
I.8.8. Génie Rural GR.....	17
I.8.9. HEC-HMS.....	17
I.9. Critères d'évaluation des performances des modèles.....	17
I.9.1. Coefficient de corrélation .....	18
I.9.2. Erreur quadratique moyenne.....	18
I.9.3. Erreur absolue moyenne .....	18
I.9.4. Erreur moyenne absolue en pourcentage .....	18
I.9.5. Coefficient de Nash-Sutcliffe .....	19
I.10. Conclusion .....	19

## **CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2. Situation géographique.....</b>	<b>20</b>

---

<b>II.3. Données utilisées et méthodologie.....</b>	<b>21</b>
<b>II.4. Evaluation des paramètres morphométries .....</b>	<b>23</b>
II.4.5. Courbe hypsométrique.....	25
II.4.5.1. Altitudes maximales et minimales .....	27
II.4.5.2. Altitude moyenne.....	27
II.4.5.3. Altitude médiane.....	27
<b>II.5. Détermination de la pente du bassin versant .....</b>	<b>28</b>
II.5.3. Dénivelée spécifique (DS).....	30
<b>II.6. Temps de concentration (Tc) .....</b>	<b>30</b>
II.6.1. Formule de GIANDOTTI.....	31
II.6.3. Formule de SCS.....	31
<b>II.7. Occupation du sol.....</b>	<b>31</b>
<b>II.8. Conclusion.....</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE III : MODELISATION PLUIE-DEBIT A L'AIDE DE HEC-HMS</b>	
<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>34</b>
<b>III.2. Méthodologie .....</b>	<b>34</b>
<b>III.3. Assemblage et préparation des données.....</b>	<b>35</b>
III.3.1. Modèle numérique de terrain (MNT).....	35
III.3.2. Couvert végétal .....	36
III.3.3. Type de sol .....	37
<b>III.4. Descriptif du modèle.....</b>	<b>37</b>
III.4.1. HEC-HMS (hydrologic engineering center-hydrological modeling system) .....	37
III.4.2. Composants du modèle HEC-HMS .....	37
III.4.3. Fonction de production : SCS-CN .....	38
III.4.4. Fonction de transfert : hydrogramme unitaire.....	39
□ III.4.5. Préparation de la grille des numéros de courbe .....	40
<b>III.5. Évaluation et comparaison des modèles.....</b>	<b>42</b>

---



<b>III.6. Résultats et discussion .....</b>	<b>43</b>
III.6.1. Bassin versant Dehemcha.....	43
III.6.2. Bassin versant Boukerdane .....	45
III.6.3. Bassin versant Sidi Abdelli .....	47
III.7. Conclusions.....	49
<b>CHAPITRE IV : MODELISATION PLUIE-DEBIT A L'AIDE DE RNA</b>	
<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>50</b>
<b>IV.2. Méthodologie .....</b>	<b>50</b>
<b>IV.3. Perceptron multicouches (PMC).....</b>	<b>51</b>
IV.3.1. Méthode de construction des modèle RNA .....	51
IV.3.1.2. Partage de l'ensemble des données .....	51
IV.3.1.3. Fonction d'activation .....	51
IV.3.1.4. Paramètres d'évaluation des performances des modèles .....	52
<b>IV.4. Modèles de réseau de neurones artificiels .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.5. Prédiction de la relation pluie débit par modèle PMCNN ..</b>	<b>53</b>
IV.5.1. Bassin versant Sidi Abdelli .....	54
IV.5.1.1. Simulation mensuelle .....	54
IV.5.1.2. Simulation journalière .....	57
<b>IV.6. Simulation à l'échelle des crues.....</b>	<b>61</b>
IV.6.1. Bassin versant Dehemcha .....	61
IV.6.2. Bassin versant Boukerdane .....	63
IV.6.3. Bassin versant Sidi Abdelli .....	64
<b>IV.7. Comparaison entre les résultats de HEC-HMS et RNA à l'échelle de crue .....</b>	<b>66</b>
IV.7.1. Bassin versant Dehemcha .....	66
IV.7.2. Bassin versant Boukerdane .....	67
IV.7.3. Bassin versant Sidi Abdelli .....	69
IV.8. Conclusions.....	71

---

<b>Conclusion Général .....</b>	<b>72</b>
---------------------------------	-----------

## **Liste des figures**

### **CHAPITRE I**

Figure I.1. Schématisation du cycle d'eau (Musy, 2005) (a), .....	4
Figure I.2.Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique (Mathevet, 2005) ....	8
Figure I. 3. Composants d'un modèle hydrologique (Singh, 1995) .....	9
Figure. 1.4. Types de modèles utilisés en Hydrologie (Berthier, 2008) .....	12

### **CHAPITRE II**

<b>Figure II.1. Situation géographique et limites des bassins versants.</b> .....	<b>21</b>
<b>FigureII.2. Méthodologie de l'analyse morphométrique.....</b>	<b>22</b>
<b>Figure II.3. Quelques valeurs de KC pour différentes formes de bassin versant (Musy, 2001) .....</b>	<b>24</b>

---

<b>Figure II.4. Carte hypsométrique des bassins versants.....</b>	<b>25</b>
<b>Figure II.5. Courbe hypsométrique des trois bassins versant. ....</b>	<b>27</b>
<b>Figure II.6. Altitude médiane du bassin versant.....</b>	<b>28</b>
<b>Figure II.7. Pente moyenne des bassins versants .....</b>	<b>28</b>
<b>Figure II.8. Représentation des différentes altitudes (H5% et H95%).....</b>	<b>29</b>
<b>Figure II.9. Carte d'occupation du sol du bassin versant.....</b>	<b>32</b>

### CHAPITRE III

<b>Figure III.1. Sous bassins de la zone d'étude. ....</b>	<b>35</b>
<b>Figure III.2. Carte caractéristique d'élévation .....</b>	<b>36</b>
<b>Figure III.3. Carte caractéristique d'occupation du sol.....</b>	<b>36</b>
<b>Figure III.4. Carte caractéristique du type de sol.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure III.5. Curve Number .....</b>	<b>40</b>
<b>La figure III.6 représente le Curve Number des trois bassins varssants. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figure III.6. Cartes caractéristiques du Curve Number.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure III.7. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Dehemcha) .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure III.8. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Dehemcha).....</b>	<b>43</b>
<b>Figure III.9. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Dehemcha). ....</b>	<b>44</b>
<b>Figure III.10. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Boukerdane) .....</b>	<b>45</b>
<b>Figure III.11. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Boukerdane). ....</b>	<b>45</b>

---

<b>Figure III.12. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Boukerdane).</b> .....	<b>46</b>
<b>Figure III.13. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Sidi Abdelli)</b> .....	<b>47</b>
<b>Figure III.14. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli).</b> .....	<b>47</b>
<b>Figure III.15. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli).</b> .....	<b>48</b>

#### CHAPITRE IV

<b>Figure IV.1. Architecture de PMC.</b> .....	<b>51</b>
<b>Figure IV.2. Schéma du modèle PMCNN retenu pour la prévision mensuelle de la pluie débit.</b> .....	<b>54</b>
<b>Figure IV.3. Nuage de points de valeurs mensuelles prédites et observées de la phase calage</b> .....	<b>55</b>
<b>Figure IV.4. Nuage de points de valeurs mensuelles prédites et observées de la phase validation.</b> .....	<b>55</b>
<b>Figures IV.5. Modèle pluie débit des valeurs prédites versus valeurs observée par le PMC de la phase calage</b> .....	<b>56</b>
<b>Figures IV.6. Modèle pluie débit des valeurs prédites versus valeurs observée par le PMC de la phase validation.</b> .....	<b>56</b>
<b>Figure IV.7. Schéma du modèle PMCNN retenu pour la prévision journalière de la pluie débit.</b> .....	<b>58</b>
<b>Figure IV.8. Nuage de points de valeurs journalières prédites et observées de la phase calage</b> .....	<b>58</b>
<b>Figure IV.9. Nuage de points de valeurs journalières prédites et observées de la phase validation.</b> .....	<b>59</b>

---

<b>Figures IV.10. Modèle pluie débit des valeurs prédites versus valeurs observée par le PMC de la phase calage.....</b>	<b>59</b>
<b>Figures IV.11. Modèle pluie débit des valeurs prédites versus valeurs observée par le PMC de la phase validation. ....</b>	<b>60</b>
<b>Figure IV.12. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Dehemcha) .....</b>	<b>61</b>
<b>Figure IV.13. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Dehemcha). ....</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV.14. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Dehemcha). ....</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV.15. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Boukerdane) .....</b>	<b>63</b>
<b>Figure IV.16. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Boukerdane). ....</b>	<b>63</b>
<b>Figure IV.18. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Sidi Abdelli) .....</b>	<b>64</b>
<b>Figure IV.19. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli). ....</b>	<b>65</b>
<b>Figure IV.20. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli). ....</b>	<b>65</b>
<b>Figure IV.20. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Dehemcha) .....</b>	<b>66</b>
<b>Figure IV.21. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Dehemcha). ....</b>	<b>66</b>
<b>Figure IV.22. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Dehemcha). ....</b>	<b>67</b>

---

<b>Figure IV.23. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Boukerdane) .....</b>	<b>68</b>
<b>Figure IV.24. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Boukerdane). .....</b>	<b>68</b>
<b>Figure IV.25. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Boukerdane). .....</b>	<b>68</b>
<b>Figure IV.26. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Sidi Abdelli) .....</b>	<b>70</b>
<b>Figure IV.27. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli). .....</b>	<b>70</b>
<b>Figure IV.28. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli). .....</b>	<b>70</b>

## **Liste des tableaux**

### **CHAPITRE II**

<b>Tableau II.1.Types, descriptions, sources et informations des couches de données utilisées. ....</b>	<b>22</b>
<b>Tableau II.2. Paramètres de surface/de forme du bassin versant</b>	<b>25</b>
<b>Tableau II.3. Répartition de la surface partielle en fonction de l'altitude des bassins versants .....</b>	<b>26</b>
<b>Tableau II.4.Classification d'ORSTOM selon la pente globale ...</b>	<b>29</b>
<b>Tableau II.5.Classification d'ORSTOM selon la dénivelée spécifique .....</b>	<b>30</b>

---

<b>Tableau II.6. Paramètres de reliefs du bassin versant .....</b>	<b>30</b>
<b>Tableau II.7.Détail des différentes catégories d'occupation du sol. .....</b>	<b>32</b>
<b>Tableau II.8. Récapitulatif des paramètres morphométrique des trois bassins versant. ....</b>	<b>33</b>

### CHAPITRE III

<b>Tableau III.1. Types d'occupation du sol, groupes hydrologiques .....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau III.2. Hauteurs minimal et maximal pour des trois bassins versants.....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau III.3. Temps de concentration, log time et le Curve Number) dans la zone d'étude. ....</b>	<b>42</b>
<b>Tableau III.4. Paramètres d'évaluation des performances du bassin Dehemcha par HEC HMS. ....</b>	<b>44</b>
<b>Tableau III.5. Paramètres d'évaluation des performances du bassin Boukerdane par HEC HMS. ....</b>	<b>46</b>
<b>Tableau III.6. Paramètres d'évaluation des performances du bassin Sidi Abdelli par HEC HMS. ....</b>	<b>48</b>

### CHAPITRE IV

<b>Tableau IV. 1. Données entrées-sortie (Boukerdane).....</b>	<b>52</b>
<b>Tableau IV.2.Données entrées-sortie (Dehamcha-Kébir) .....</b>	<b>52</b>
<b>Tableau IV.3. Données entrées-sortie (Sidi Abdelli).....</b>	<b>52</b>
<b>Tableau IV.4. Récapitulatif des paramètres d'évaluation des performances. ....</b>	<b>57</b>
<b>Tableau IV.5. Récapitulatif des paramètres d'évaluation des performances. ....</b>	<b>60</b>

---

<b>Tableau IV.6. Récapitulatif des paramètres d'évaluation des performances. ....</b>	<b>67</b>
<b>Tableau IV.7. Récapitulatif des paramètres d'évaluation des performances. ....</b>	<b>69</b>
<b>Tableau IV.8. Récapitulatif des paramètres d'évaluation des performances. ....</b>	<b>71</b>





## Liste des abréviations

**BV** : bassin versant.

**CN** : Curve Number.

**Ct** : Coefficient de torrencialité.

**D** : Dénivelé en m.

**Dd** : Densité de drainage en km/km<sup>2</sup>.

**DEM** : Digital Élévation Modele.

**Ds** : Dénivelé spécifique en m.

**DSS** : Data Storage System.

**GIS** : Geographical Information System.

**H5%** : Altitude correspondant à 5% de la surface en m.

**H50%** : Altitude médiane en m.

**H95%** : Altitude correspondant à 95% de la surface en m.

**HEC-HMS**: Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System.

**Hmax** : Altitude maximale en m.

**Hmin** : Altitude minimale en m.

**Hmoy** : Altitude moyenne en m.

**HU** : hydrogramme unitaire.

**IDF** : Intensité-durée-fréquence.

**IDF** : Intensity-Duration-Frequency.

**Ig** : Indice de pente global en %.

**Imoy** : Indice de pente moyenne en %.

**Ip** : Indice de pente moyen en %.

**Kc** : Indice de compacité.

**L'O.R.S.T.O.M** : L'office de la recherche scientifique et technique outre-mer.

**Lag time** : Le grand du bassin, lié au temps de concentration ( $t_c$ ) par :  $t_{lag}=0.6t_c$ .

**Lcp** : Longueur totale du cours d'eau principal en km.

**LR** : Longueur du rectangle équivalent en km.

**MNT** : Modèle numérique de terrain.

**Pjmax** : Pluie journalière maximale en mm.

**Pt** : Pluie correspondante à un pas de temps en mm.

**Q** : débit en m<sup>3</sup>/s.

**Q** : Débit total d'une coupe en m<sup>3</sup>/s..

**S** : Surface du bassin versant en km<sup>2</sup>.

**SCS** : Soumman Computer System.

**SCS-CN** : Soil Conversation Service - Curve Number.

**Si** : Surface partielle en km<sup>2</sup>.

**SRTM**: Shuttle Radar Topography Mission.

**T** : Période de retour en an.

**T°** : Température moyenne mensuelle.

**Tc** : Temps de concentration en heures.

**V** : vitesse moyenne de l'eau en m/s.

.

**Résumé**

Le but de cette étude est de simuler le processus pluie-débit pour trois bassins versant (Dehemcha, Boukerdane, Sidi Abdelli) à l'aide du modèle HEC-HMS (Hydrological Engineering Center Hydrological Modeling System). La relation pluie-débit est examinée selon la méthode SCS-CN et SCS unit hydrograph basée sur le model numérique de terrain (MNT), type des sol, l'occupation du sol, les précipitations et les débits journalier pour les événements des crues, afin de simuler l'écoulement dans le bassin versant à l'exutoire.

Après cela, une modélisation de pluie-débit par une approche de réseau de neurone artificiel (RNA) pour la prévision pluie-débit à l'échelle de crue dans les trois bassins versant. Les performances des modèles ont été évaluées à l'aide de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), de l'efficacité de Nash – Sutcliffe (NSE), du coefficient de corrélation (R).

Les résultats obtenus montrent que les performances du modèle HEC-HMS été satisfaisantes pour simuler les débits de pointe. Le débit de pointe simulé très proche de débit observé dans les trois bassins versant. Alors que les résultats du modèle FFBP étaient meilleurs que les résultats de HEC-HMS. Donc on peut dire que les deux modèles peut être utilisé en Algérie pour le calcul des débits de pointe de projet (barrage, protection contre les inondations...).

**Mots clés** : Dehemcha, Boukerdane, Sidi Abdelli, HEC-HMS, SCS-CN, MNT, RNA, SCS, pluie-débit.

## **Abstract**

The aim of this study is to simulate the Rainfall-Runoff process for three watersheds (Dehemcha, Boukerdane, Sidi Abdelli) using the HEC-HMS (Hydrological Engineering Center Hydrological Modeling System) model. The rainfall-runoff relationship is examined using the SCS-CN and SCS unit hydrograph method based on the digital terrain model (DTM), soil type, land cover, precipitation and daily flow rates for flood events, to simulate the flow in the watershed at the outlet.

After that, rainfall-runoff modeling by an artificial neural network (ANN) approach for flood-scale rainfall-runoff forecasting in the three watersheds. Model performance was evaluated using root mean square error (RMSE), Nash–Sutcliffe efficiency (NSE), correlation coefficient (R).

The results obtained show that the performance of the HEC-HMS model was satisfactory for simulating peak flows. The simulated peak flow very close to observed flow in the three watersheds. While the results of the FFBP model were better than the results of HEC-HMS. Therefore, we can say that the two models can be used in Algeria for the calculation of project peak flows (dam, flood protection...).

**Keywords:** Dehemcha, Boukerdane, Sidi Abdelli, HEC-HMS, SCS-CN, DEM, RNA, Rainfall-Runoff.

## ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو محاكاة عملية جريان الأمطار لثلاثة مستجمعات مائية (دهامشة ، بوكردان ، سيدي عبدلي) باستخدام نموذج HEC-HMS (نظام النمذجة الهيدرولوجية لمركز الهندسة الهيدرولوجية). يتم فحص علاقة جريان الأمطار باستخدام طريقة الهيدروغراف لوحدة SCS-CN و SCS بناءً على نموذج التضاريس الرقمية (MNT) ، ونوع التربة ، والغطاء الأرضي ، ومعدلات التدفق اليومية لأحداث الفيضانات ، لمحاكاة التدفق في مستجمعات المياه عند المنفذ.

بعد ذلك ، نمذجة جريان هطول الأمطار من خلال نهج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) للتنبؤ بجريان الأمطار على نطاق الفيضانات في مستجمعات المياه الثلاثة. تم تقييم أداء النموذج باستخدام جذر متوسط الخطأ التربيعي (RMSE) ، كفاءة Nash – Sutcliffe (NSE) ، معامل الارتباط (R).

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن أداء نموذج HEC-HMS كان مرضياً لمحاكاة تدفقات الذروة. تدفق الذروة المحاكي قريب جداً من التدفق المرصود في مستجمعات المياه الثلاثة. بينما كانت نتائج نموذج FFBP أفضل من نتائج HEC-HMS. لذلك ، يمكننا القول أنه يمكن استخدام النموذجين في الجزائر لحساب تدفقات ذروة المشروع (السدود ، الحماية من الفيضانات...).

الكلمات المفتاحية: دهامشة ، بوكردان ، سيدي عبدلي ، HEC-HMS ، SCS-CN ، DEM ، RNA ، هطول الأمطار ، الجريان السطحي.

# **Introduction Général**

### Introduction Général

La notion du bassin versant est très familière aux hydrologues, mais demeure très difficile de maîtriser ou de bien comprendre. C'est pour ça que la maîtrise de la notion du bassin versant est devenue une obsession pour les chercheurs, et en particulier les hydrologues. Les dernières décennies ont vu une réduction considérable des capacités nationales du pays d'assurer le suivi hydrologique des cours d'eau et de produire une information de qualité adaptée aux besoins des utilisateurs. Ainsi la connaissance de la ressource en eau et de ses variations saisonnières au niveau d'un bassin versant, présente des faiblesses à cause des séries de données hydrologiques tronquées ou manquantes. Les chroniques de débit sont souvent lacunaires, discontinues, de courtes durées et en conséquence, sont difficilement exploitables pour une analyse hydrologique fiable. Face au défi, on comprend alors aisément la nécessité de mettre au point des outils d'aide à la gestion et à la décision qui permettent de mieux cerner le fonctionnement des hydrosystèmes naturels et le devenir de l'eau dans son environnement. L'utilisateur de ces instruments peut bénéficier ainsi d'une meilleure connaissance de la répartition spatiale et temporelle des flux d'eau et des matières et composés qu'elle véhicule à l'échelle du bassin.

Le développement de l'informatique et des études sur les systèmes complexes naturels, à l'image des bassins versants, ont provoqué ces dernières décennies, une prolifération de modèles mathématiques en hydrologie, qui aident à comprendre, gérer et réduire la complexité des différents phénomènes hydrologiques. La transformation des pluies en débits à l'exutoire d'un bassin, représente le processus le plus complexe à modéliser.

Les modèles pluie-débit, représentent l'ensemble des équations représentant le bilan hydrique, et les équations de transfert des flux hydriques, mis en jeu au cours du cycle hydrologique à l'échelle d'un bassin versant. Ce sont des modèles prédictifs des écoulements dans les cours d'eau. Ces modèles apparaissent essentiels dans l'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eaux, et en particulier l'analyse du risque hydrologique et la prévision des crues. La transformation pluie- débit nous permet de maîtriser la prévision des débits pour deux objectifs distincts:

- La bonne exploitation des aménagements hydrauliques. En effet, l'utilisation régulière de la prévision de débit permet d'optimiser la régulation des aménagements disposant d'une certaine accumulation, de procéder à des vidanges préventives lors des crues, d'éviter des déversements et d'augmenter les performances au sens large d'un aménagement.
- Assurer la sécurité des populations et des biens. Elle est utilisée comme une aide efficace à la décision lors de situations de crise.

A cet effet, l'objectif de ce travail est d'appliquer deux types de modèles sur trois bassins versant, Dehamcha-Kébir, Boukerdene, et Sidi Abdelli, pour conceptualiser cette relation pluiedébit : le modèle physique (HEC HMS) et les modèles "boîtes noires". Le but est de proposer un modèle de simulation des débits pour apprécier les forces et les faiblesses de différentes représentations mathématiques existantes de la transformation pluie-débit.

Le manuscrit présenté est composé de quatre chapitres :

- Le Chapitre 1 : consacré à une synthèse bibliographique. Dans ce chapitre, nous allons définir la modélisation hydrologique et ses objectifs puis nous allons présenter et classer quelques modèles hydrologiques.
- Chapitre 2 : a pour objectif de présenter et décrire la zone d'étude.
- Chapitre 3 : aborde l'étude de la relation pluie débit des trois bassins versants par une modélisation avec HEC HMS.
- Chapitre 4 : sert à la modélisation de la relation pluie débit par les réseaux de neurones, où nous essayerons de présenter les résultats de son application.



# **CHAPITRE I**

## **Recherches bibliographie**

## **I.1. Introduction**

Très souvent, il y a insuffisance de données de débits alors que les données pluviométriques sont généralement abondantes. Il apparaît donc nécessaire, en vue d'une meilleure gestion des ressources en eau par une connaissance plus précise des quantités d'eau disponible, de transformer les données pluviométriques en données hydrométriques. D'où l'intérêt de la modélisation pluie-débit basée sur l'utilisation de modèles simulant la réalité.

L'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse « satisfaisante » aux questions que l'on se pose à propos de l'objet modélisé, ce qui nous renvoie à l'objet assigné au modèle qui doit bien entendu précéder et orienter la conception et la construction du modèle. Généralement les modèles sont utilisés pour la prévision, la prédétermination (évaluation de données d'un projet), la reconstitution ou l'extrapolation de données, etc.

Dans ce chapitre, avant d'entamer les présentons des modèles les plus utilisés dans le domaine de la modélisation hydrologique ainsi que les logiciels les plus utilisés dans le domaine public, il est utile de donner un rappel sur le cycle hydrologique qui est la base de toute modélisation hydrologique.

## **I.2.Cycle hydrologique**

Le cycle hydrologique, appelé aussi cycle de l'eau, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol.

L'ensemble des processus de transformation de l'eau forme le cycle hydrologique. La figure I.1 montre de façon simplifiée les différentes étapes du cycle et les phénomènes naturels composés par les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'infiltration, la percolation et le stockage dans les dépressions.

Une partie de la pluie qui tombe peut être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère. La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol. Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes. Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine. Un

écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle (Musy, 2005).

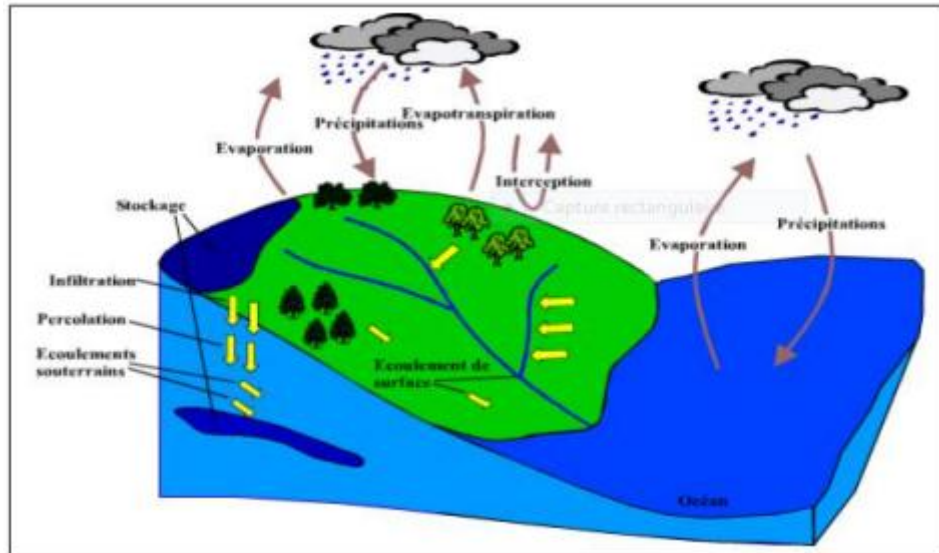


Figure I.1. Schématisation du cycle d'eau (Musy, 2005) (a),

### I.3. Bassin versant

Le bassin versant représente l'unité spatiale de référence pour l'hydrologie. Il est défini comme l'étendue drainée par un cours d'eau et ses affluents et limitée par une ligne de partage des eaux. La notion de bassin versant est nettement plus complexe qu'il n'y paraît au premier abord. Complexe, car le bassin versant en tant qu'unité géographique de référence pour l'analyse du cycle hydrologique, requiert une définition sans équivoque. Complexe encore, car le bassin versant, au-delà de sa définition sensu stricto, peut-être compris de diverses manières. (Musy & Hich, 2004).

#### I.3.1. Précipitations

Sont dénommées précipitations toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. (Musy & Hich, 2004).

**I.3.2. Ruissellement**

L'eau précipitée sur les continents est en partie évaporée localement (recyclage des précipitations), en partie drainée vers les océans par le ruissellement de surface et les nappes d'eau souterraines. Il désigne en hydrologie le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols.

**I.3.3. Débit**

Le débit du cours d'eau, noté  $Q$  et exprimé en  $m^3/s$  ou  $l/s$ , représente le volume total d'eau qui s'écoule à travers une section droite du cours d'eau pendant l'unité de temps considérée. Le débit reflète physiquement le comportement du bassin versant, et peut être interprété dans le temps et dans l'espace. A la station hydrométrique, on ne dispose pas d'une mesure directe et continue des débits, mais seulement d'un enregistrement des hauteurs d'eau en une section donnée. Le passage de la courbe des hauteurs d'eau en fonction du temps  $H=f(t)$  appelée

« Luminogramme » à celle des débits  $Q=f(t)$  appelée « hydrogramme » se fait par l'établissement d'une courbe de tarage  $Q=f(H)$  à l'aide d'un jaugeage (Habchi, 2019).

**I.3.4. Débit solide**

Il est la masse des matières solides traversant une section donnée d'un cours d'eau par unité de temps noté  $Q_s$ . Il s'exprime en  $Kg/s$ . Le débit solide comprend les matières en solution, les matières en suspension et les matériaux de fond. Ces matériaux sont déplacés dans le lit du cours d'eau selon différentes lois de transport : charriage, suspension, saltation.

Les débits solides en suspension sont calculés à partir des données des concentrations en MES mesurées selon l'équation suivante (Tarik& Nouredine, 2005) :

$$Q_s = Q_l \cdot C$$

Avec

$Q_s$  est le débit solide ( $kg/s$ ),

$Q_l$  est le débit liquide observé ( $m^3 /s$ ),

$C$  est la concentration des matières en suspension ( $g/L$ ).

**I.3.5. Relations pluie-débit**

Les relations entre les précipitations et les écoulements qui en résultent, constituent une partie essentielle du cycle hydrologique et par conséquent leur étude est nécessaire

- Pour bien comprendre les processus qui interviennent dans la genèse des débits.
- Pour combler les lacunes des relevés des stations de jaugeages et reconstituer par extrapolation ces relevés dans le passé.
- Pour estimer les caractéristiques hydrologiques de bassins versant non pourvus de stations de jaugeages.
- Pour prévoir le comportement des bassins versants perturbés par l'homme.
- Pour prédéterminer les débits de fréquences exceptionnelles.
- Pour prévoir en temps réel les hauteurs d'eau ou les débits.

Ces relations peuvent être établies pour des pas de temps très divers, depuis 10 minute jusqu'à une année, elles peuvent prendre des formes très diverses, depuis une régression très simple liant les lames d'eau écoulées annuelles aux hauteurs annuelles de précipitations (utilisable seulement dans un certain nombre de cas particuliers), jusqu'aux modèles les plus sophistiqués ce qui est particulièrement délicat.

#### **I.4. Modélisation hydrologique**

Chaque point d'un cours d'eau permet de définir un bassin versant et les débits observés en ce point sont directement liés aux précipitations tombées sur ce bassin. A partir des observations faites en quantifiant la pluie tombée, on peut arriver à reproduire la réponse en débit du bassin. La simulation hydrologique du bassin versant, décrite comme la transformation de la pluie en débit passe par l'utilisation d'un modèle hydrologique.

##### **I.4.1. Modèle**

Musy et al. (1998) définit le modèle comme étant une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir, ou bien c'est un Système physique, mathématique ou logique représentant les structures essentielles d'une réalité et capable à son niveau d'en expliquer ou d'en reproduire dynamiquement le fonctionnement. Hydrologiquement parlant, un modèle est un outil numérique de représentation d'un processus hydrologique à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique). Le choix du type de modèle à utiliser dépend généralement de l'objectif de modélisation ainsi que des données d'entrées disponibles.

L'élaboration d'un modèle hydrologique comporte certaines étapes à savoir :

- ✓ Identification du modèle, pour pouvoir définir et caractériser le système, ses frontières et sa structure, définir l'événement, les variables et les paramètres et émettre les hypothèses et le choix des échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de base.
- ✓ Elaboration de l'algorithme à incorporer dans un outil informatique capable de procéder aux instructions. Cet algorithme doit être suivi de la vérification du logiciel lui-même.
- ✓ Calage du modèle, par estimation des paramètres du modèle, non mesurables, selon des critères déductifs ou des observations des entrées et des sorties. observations ou groupe d'observations.
- ✓ Evaluation du modèle, en comparant la réponse simulée par le modèle à une sollicitation expérimentale et la réponse réelle, à partir de données différentes de celles utilisées pour le calage (Ambroise, 1998).

#### **I.4.2. Objectifs de la modélisation**

L'objectif de la modélisation est d'appréhender le cycle hydrologique associé au développement de l'informatique afin d'élaborer des modèles mathématiques. On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie (Gaume, 2002) :

- La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées à différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent confrontés aux mesures.
- Elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.
- Dans certain cas comme la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un plan de prévision des risques, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou

éventuellement d'étiage, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié.

**I.4.3. Structure d'un modèle hydrologique**

Un modèle pluie-débit introduit généralement les facteurs qui lui semblent pertinents pour minimiser l'inexactitude liée aux hypothèses simplificatrices de la modélisation. On distingue généralement quatre types de variables (figure I.2) qui défini un modèle hydrologique pluie-débit:

- Variables d'entrée : (variables indépendantes ou fonctions de forçage) : le modèle fait appel à ces variables qui dépendent du temps et/ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques et hydrodynamiques du milieu, ...).
- Variables de sortie : (variables dépendantes) : le modèle répond par un ensemble de variables (débits, flux ou concentration en polluants, ...).
- Variables d'état : elles permettent de caractériser l'état du système modélisé et peuvent évoluer en fonction du temps (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, profondeurs des sols, pentes, ...).
- Paramètres du modèle : les paramètres des modèles hydrologiques, qu'ils aient une pseudo-signification physique ou qu'ils soient calés, servent à adapter la par a métrisation des lois régissant le fonctionnement du modèle, au bassin versant étudié,
- performances : il s'agit d'estimer l'amplitude des erreurs de modélisation, calculées généralement sur la base d'une mesure de l'écart entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées.

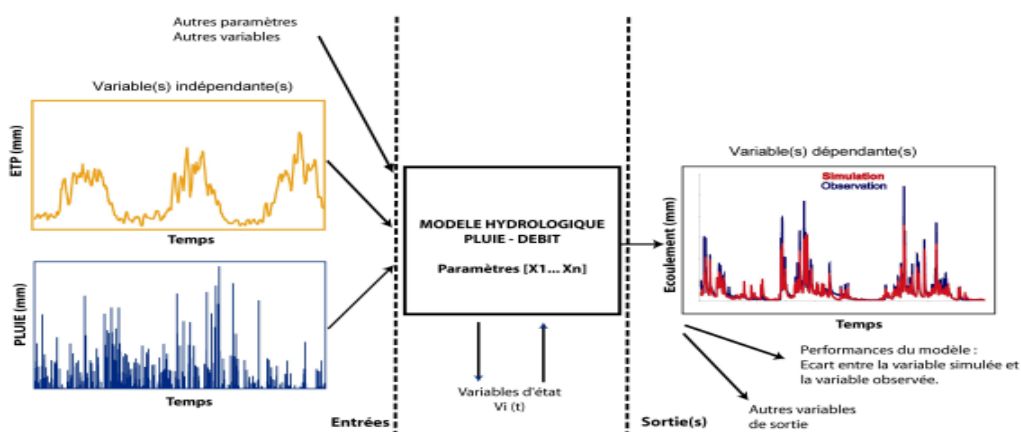


Figure I.2.Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique (Mathevet, 2005)

#### I.4.4. Concept de modélisation

Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débit (sortie du modèle hydrologique). Un modèle hydrologique est caractérisé par cinq éléments qui le constitue (figure I.3) la géométrie du bassin versant (le système), les entrées du système, les lois de formalisation des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système et les sorties du modèle. (Singh, 1995).

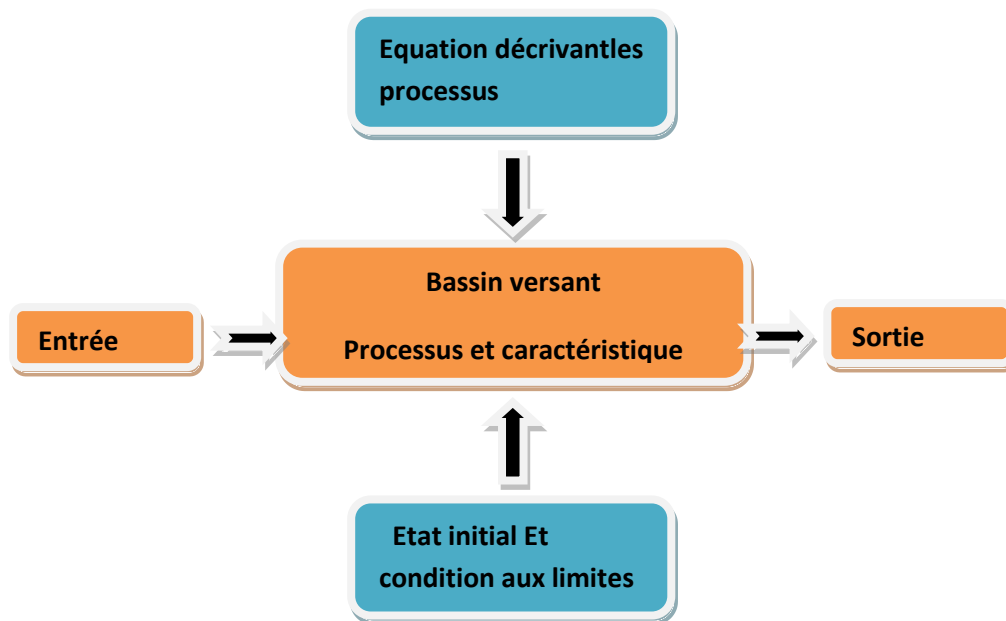


Figure I. 3. Composants d'un modèle hydrologique (Singh, 1995)

#### I.5.Choix du modèle

Il existe plusieurs modèles en hydrologie et souvent on a des difficultés à choisir un modèle pour une étude donnée. Le choix d'un modèle se fait en générale en fonction de l'objectif de l'étude hydrologique qu'on aura à effectuer et en fonction des composantes hydrologiques du bassin versant qu'on cherche à représenter. Il est important de choisir un modèle qui est adéquat à la problématique posée. Le choix du modèle doit vérifier ces critères.



**A. Finalité du modèle**

Va commander le choix de la ou des variables d'étude, puis le niveau de détail attendu, et par la suite le pas de temps et d'espace, et enfin les niveaux d'incertitudes acceptables.

**B. Données disponibles**

Les données hydrométéorologiques et la taille du bassin versant sont les deux aspects qui expliquent cette contrainte de possibilité à déterminer les paramètres. Par exemple pour les modèles conceptuels on a besoin d'une longue série des données pluie-débit pour assurer un bon calage. Elles conditionnent la complexité maximale d'un modèle : spatialisé ou global, physique, conceptuel ou empirique, déterministe et ou stochastique.

**C. Réalité physique de terrain**

Conditionne à la fois les hypothèses acceptables et la complexité minimale (trop simple c'est être faux) et maximale (on est souvent limité par les données disponibles : trop compliqué c'est être incapable et incontrôlable, donc inconsistant).

Ces critères permettent de réduire considérablement le choix du modèle. Il existe, par contre, de nombreux critères secondaires peuvent intervenir : moyen d'étude, capacité d'acquérir de l'information supplémentaire, contrainte éventuelle de temps réel, etc.

**I.5.1. Calage du modèle**

Le calage est donc une des étapes fondamentales dans la démarche de modélisation hydrologique. Elle consiste à rechercher les valeurs optimales des paramètres des différentes équations (régissant l'écoulement) utilisées dans le modèle hydrologique (Anderson et Woessner, 2006).

Le calage a pour but :

- De compenser les erreurs de mesures de données fournies aux modèles.
- Forcer les paramètres vers de valeurs dont l'interprétation ne correspond pas à la physique du modèle.

On distingue trois méthodes de calage :

**I.5.1.1. Calage manuel**

Cette méthode consiste à donner des valeurs aux paramètres du modèle et évaluer manuellement l'erreur entre les valeurs de sortie et les valeurs observées et l'échantillon de référence pour faciliter cette opération on a une représentation graphique.

#### **I.5.1.2. Calage automatique**

Ce calage optimise automatiquement les paramètres de modèle par l'utilisation d'un algorithme numérique pour trouver un extremum d'un critère numérique donné afin de déterminer l'ensemble des paramètres qui satisferont un critère donné de précision à travers différentes combinaisons possibles (Kingumbi, 2006).

#### **I.5.1.3. Calage mixte**

Le calage mixte consiste à combiner les deux méthodes précédentes. On détermine manuellement l'intervalle de variation des paramètres, puis on utilise la méthode automatique pour trouver les valeurs de paramètres optimales.

#### **I.5.2. Validation du modèle**

La validation du modèle se fait par l'évaluation de la performance du modèle sur un ensemble de données non utilisées dans la phase du calage. L'une des techniques les plus utilisées pour évaluer la robustesse d'un modèle dans des situations les plus proches possibles est la technique du double échantillon. La procédure consiste à rassembler toutes les données disponibles pour le calage et les diviser en deux périodes de mêmes longueurs, le modèle est donc calé sur une période et contrôlé en utilisant la deuxième période.

### **I.6. Typologie des modèles hydrologiques**

Dans la littérature, il existe de nombreux modèles hydrologiques ayant chacun leurs spécificités et leur domaine d'application. Une fois le modèle choisi, il faut évaluer sa capacité à représenter la réalité. Ceci se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèle avec les observations. C'est une étape très délicate. Berthier (2008) a signalé que les classifications de modèles que l'on trouve dans la littérature sont nombreuses et peuvent être fonction de plusieurs caractéristiques. Perrin (2002) disait qu'il y a presque autant de classifications que d'hydrologues. La classification des modèles hydrologiques est représentée sur la figure I.4.

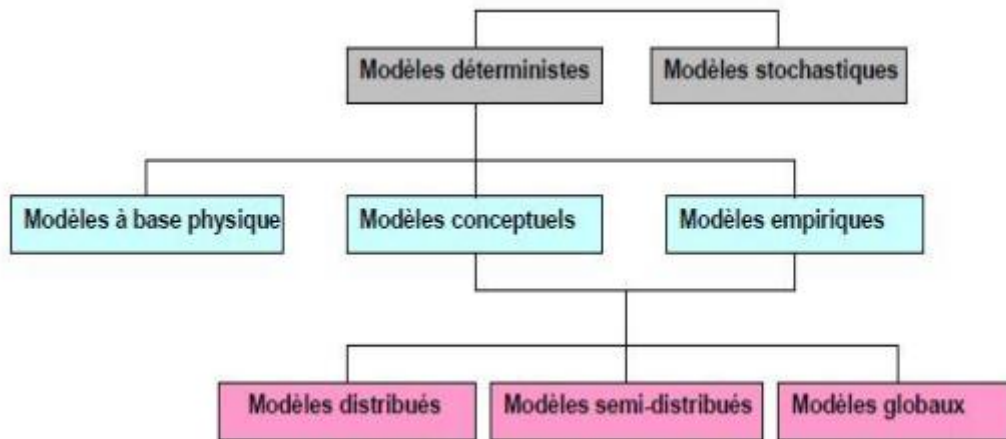


Figure. 1.4. Types de modèles utilisés en Hydrologie (Berthier, 2008)

## I.7. Classification de modèles

### I.7.1. Modèles déterministes

Un modèle est dit déterministe (par opposition à stochastique) si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire, c'est à dire résultant soit de l'observation soit de grandeurs reconstituées. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage, de variables d'état et de paramètres, une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant).

### I.7.2. Modèles stochastiques

La modélisation stochastique est une forme de modèle financier qui est utilisée pour aider à prendre des décisions d'investissement. Ce type de modélisation prévoit la probabilité de divers résultats dans différentes conditions, en utilisant des variables aléatoires.

Les modèles stochastique présente des données et prédit des résultats qui tiennent compte de certains niveaux d'imprévisibilité ou d'aléatoire. Les entreprises de nombreux secteurs peuvent utiliser la modélisation stochastique pour améliorer leurs pratiques commerciales et augmenter leur rentabilité. Dans le secteur des services financiers, les planificateurs, les analystes et les gestionnaires de portefeuille utilisent la modélisation stochastique pour gérer leurs actifs et leurs passifs et optimiser leurs portefeuilles.

**I.7.3. Modèles physiques**

Un modèle à base physique représente les processus de la relation pluie-débit en utilisant les lois physiques régissant ces processus. Les modèles de surface continentale sont également des modèles à base physique qui représentent la relation pluie-débit. Ce type de modèle permet, de plus, de calculer les différents termes du bilan d'eau du bassin versant étudié.

**I.7.4. Modèles paramétriques**

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

**I.7.5. Modèles conceptuels**

Les modèles conceptuels considèrent en générale le bassin versant, après quelques simplifications du cycle de l'eau, comme un ensemble de réservoirs interconnectés. Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement. Le modèle CEQUEAU est un parfait exemple de modèle conceptuel que nous présenterons dans la section suivante.

**I.7.6. Modèles empiriques**

Un modèle empirique est construit autour de relations mathématiques directes établies entre les entrées et les sorties observées sur le bassin versant considéré. Ce type de modèle ne cherche pas à décrire les processus impliqués dans la relation pluie-débit et est donc souvent caractérisé comme des modèles

**I.7.7. Modèles spatialisés**

Est un processus cognitif qui a pour effet d'appliquer une étiquette particulière à un objet dans le champ d'attention qui ressemble à d'autres objets mais qui présente une ou plusieurs caractéristiques qui le différencient des autres objets, qui le rendent spécial. L'inverse de la spécialisation est la généralisation. La spécialisation peut s'appliquer à tout objet mais elle est souvent appliquée à un individu, un groupe, une entreprise ou un pays. Se spécialiser signifie acquérir des connaissances particulières ou d'affecter une machine à une tâche spécifique dans un domaine déterminé. Elle peut être autant individuelle que régionale ou nationale. Mais la spécialisation suppose que l'on se procure les biens que l'on ne produit pas. La spécialisation est un phénomène visible à toutes les échelles : de l'individu au monde. À toutes échelles confondues, elle transforme l'espace. Mais selon l'échelle, la spécialisation n'a pas les mêmes modalités : elle peut être forte ou faible, génératrice d'hétérogénéité ou d'homogénéité.

Certains pays, comme les pays du golfe sont spécialisés dans le pétrole mais ils commencent à se spécialiser dans le tourisme car le pétrole se raréfie. Il est donc important qu'un pays prépare une autre spécialisation en cas de problèmes sur celle qui est en cours.

### **I.7.8. Modèles globaux**

Dans un modèle global le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

## **I.8. Présentation de quelques modèles**

### **I.8.1. MIKE SHE**

Le logiciel MIKE SHE (Système Hydrologique Européen) a pour objet la modélisation de la partie continentale du cycle de l'eau et peut être, en théorie appliqué à des surfaces allant de la parcelle à la totalité du bassin versant (Abbott et al., 1986). Parmi les domaines d'application de MIKE SHE, nous retrouvons l'étude classique de la dynamique du bassin versant, ainsi que le suivi des pollutions, mais également, dans un contexte plus tourné vers la prévision, les études d'impacts relatives aux modifications du bassin (occupation des sols, aménagement, ...) ou de scénarios climatiques (sécheresse, fortes pluies, ...).

Le logiciel est distribué en mailles de calcul carrées. Le cœur du logiciel se nomme MIKE SHE WM (Water Movement). Il est constitué de 6 modules interconnectés qui représentent chacun un compartiment hydrologique :

- la fonte des neiges ;
- l'évapotranspiration et l'interception de la pluie par le feuillage ;
- les écoulements de surface (ruissellement et écoulement en rivière) ;
- les écoulements de la zone saturée ;
- l'irrigation.

**I.8.2. CEQUEAU**

CEQUEAU est un modèle hydrologique conceptuel spatialisé ou, comme le décrivent ses concepteurs, un modèle paramétrique matriciel à bilan développé depuis 1971 par l'Institut de la Recherche Scientifique Eau et environnement du Canada (Charbonneau et al., 1977). Cela sous entend trois choses :

- au sein de ce modèle, le cycle hydrologique est décomposé en éléments (précipitation, évapotranspiration, fonte des neiges, infiltration, ...);
- le bassin est subdivisé en éléments et les lames d'eau produites sur chacun d'eux sont transférées sur les suivants ;
- le but de ce modèle est la représentation la plus réaliste possible des bilans des volumes d'eau.

**I.8.3. TOP MODEL**

TOP MODEL (TOPography-based hydrological MODEL) est un modèle hydrologique initialement développé par (Beven, 1989 ; Beven, 1992) à l'Université de Lancaster. Il s'agit d'un modèle pluie-débit qui suit une approche articulée autour de deux idées centrales :

- le ruissellement se produit sur des zones contributives variables ;
- la topographie influence la manière dont se produit le ruissellement.

L'originalité de TOPMODEL réside dans la définition de l'indice topographique. Cet indice est un paramètre dynamique qui traduit la propension qu'a un pixel à se saturer plus ou moins vite. TOPMODEL modélise le sol à l'échelle du versant de façon suivante:

- la surface du sol donne lieu au ruissellement superficiel (Horton ou aires contributives saturées) ;
- la zone racinaire retient l'eau de pluie en début d'événement;
- la zone insaturée transfère la pluie infiltrée vers la zone saturée selon l'équation de Darcy ;
- la zone saturée s'écoule vers l'exutoire.

**I.8.4. WATER WARE**

WATER WARE (Environmental Software and Service GmbH), il s'agit d'un modèle organisé autour d'un système d'information géographique (SIG) et de bases de données. Ce logiciel est modulable et ainsi peuvent lui être adjoints de nouveaux modèles ou, au contraire, toute substitution est possible. La version classique de WATER WARE repose sur sept modèles. En effet, le ruissellement et le bilan hydrique en général sont modélisés à partir d'un modèle conceptuel à réservoirs, alors que la qualité des eaux simulée par un modèle monodimensionnel de transport par advection et la qualité des eaux est représentée par un modèle stochastique.

#### **I.8.5. GIBSI**

Ce modèle, développé à l'INRS-Eau du Québec (1995), est un système de modélisation intégrée incluant notamment un SIG et plusieurs modèles de simulation phénoménologique. L'objectif de ce modèle est d'être un outil convivial destiné à examiner l'impact de différents scénarios sur les ressources en eaux d'un bassin versant. GIBSI repose sur l'utilisation de quatre modèles, ce qui lui confère un caractère modulaire et donc la possibilité d'ajouter ou de remplacer chacun des modèles. Le modèle HYDRTEL, qui constitue le noyau du modèle GIBSI permet notamment l'interpolation des données pluviométriques sur bassin versant (prise en compte de l'hétérogénéité des précipitations), le calcul de l'évapotranspiration, la simulation du ruissellement, de la fonte des neiges et de l'hydrodynamique classique en rivière.

#### **I.8.6. IHACRES**

Le modèle IHACRES (Identification of unit Hydrographs and Component flow from Rainfalls, Evaporation and stream flow data) est le résultat d'une collaboration entre le CEH (Centre for Ecology and Hydrology) du Royaume-Uni et l'Université Nationale de l'Australie (ANU). Ce logiciel peut être appliqué pour des investigations dans des petits bassins versants équipés pour des études spéciales ou pour des études régionales dans des grands bassins. Ce modèle demande peu de données : les précipitations, un hyétogramme (pour le calage), la température ou l'ETP, et les dimensions du bassin versant. En sortie du modèle on récupère : un hydrogramme de crue modélisé, l'humidité du bassin et les incertitudes indicatives associées aux paramètres d'hydrogramme unitaire.

#### **I.8.7. AIGA**

Il s'agit d'une méthode développée conjointement par Météo France et le Cémagref qui a pour vocation la prévision opérationnelle des crues éclair. Les pluies introduites dans le modèle sont d'une part les pluies du radar météorologique (reçues toutes les 15 minutes) et d'autre part des précipitations prévues à une heure. Le modèle hydrologique à l'échelle du bassin versant utilisé est la méthode du SCS (US Soil Conservation Service). Il faut fournir à cette méthode 2 paramètres ainsi qu'une condition initiale d'humidité. Cette dernière est fournie quotidiennement par ISBA. La sortie d'AIGAest une évaluation du risque basé sur la période de retour de l'événement ainsi prévu (2 à 10 ans, 10 à 50 ans, au-delà de 50 ans).

### **I.8.8. Génie Rural GR**

Développés par le Cemagref au début des années 1980, ils permettent de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Ces modèles soulèvent des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant. Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies).

### **I.8.9. HEC-HMS**

Le HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) est un logiciel qui simule le comportement hydrologique d'un bassin versant suite à des événements pluvieux prédéterminés, développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs. Il est conçu pour simuler les processus de précipitations-ruissellements des bassins versant dendritiques. Il est conçu pour être applicable dans un large éventail de zones géographiques et inclus un très grand nombre de paramètres permettant de résoudre un grand nombre de problèmes.

## **I.9. Critères d'évaluation des performances des modèles**

Les modèles pluie-débit sont des outils pratiques pour la recherche en hydrologie, en hydraulique et dans les études de l'environnement. Dans les applications opérationnelles tout particulièrement, ils doivent être aussi robustes et fiables que possible (O'Donnell et Canedo, 1980). Plusieurs critères d'évaluation ont été développés qui sont soit des critères graphiques,



soit des critères analytiques. Wu et al. (2017) ont cité l'ensemble de paramètre d'évaluation de la performance, les plus utilisés sont :

### **I.9.1. Coefficient de corrélation**

Ce critère mesure la fluctuation des séries simulées et observées si ce coefficient est égal à 1 on a une corrélation parfaite entre les variables étudiées des Séries simulées et observées (Pangalou, 2003).

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_i^N (M_i - M_m)(P_i - P_m)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - M_m)^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - P_m)^2}} \quad (I.1)$$

### **I.9.2. Erreur quadratique moyenne**

La **RMSE** est un meilleur indicateur de la performance des modèles parce qu'il reflète la moyenne des écarts entre l'observé et le simulé, (Benahmed, 2012).

Il est donné par

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - M_i)^2}{N} \right)^{1/2} \quad (I.2)$$

### **I.9.3. Erreur absolue moyenne**

Cet indice mesure la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts induits en comparant les valeurs calculées par le modèle et les valeurs de base observées. Il est définie par:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - M_i|}{N} \quad (I.3)$$

### **I.9.4. Erreur moyenne absolue en pourcentage**

L'une des métriques les plus couramment utilisées pour mesurer la précision des prévisions d'un modèle est MAPE, qui correspond à l'erreur moyenne absolue en pourcentage. Cet indicateur de performance est facile à interpréter. Par exemple, une valeur MAPE de x % signifie que la différence moyenne entre la valeur prévue et la valeur réelle est de x %.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(M_i - P_i)}{M_i} \right| * 100 \quad (I.4)$$

**I.9.5. Coefficient de Nash-Sutcliffe**

Le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (*NSE*) est fréquemment utilisé pour l'évaluation des modèles hydrologiques. Il s'agit d'une métrique normalisée qui fixe la plage relative de la variance du résidu liée à la modification des données mesurées (Nash et Sutcliffe, 1970). Il s'exprime comme suit :

$$NSE = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{moy})^2} \right) \quad (I.5)$$

$Q_{obs_i}$  : débit observé à pas de temps  $i$

$Q_{sim_i}$  : débit simulé à pas de temps  $i$

$Q_{moy}$  : débit moyen

✓ Pour une très bonne performance  $0.75 < NSE \leq 1.0$

✓ Pour une bonne performance  $0.65 < NSE \leq 0.75$

✓ Pour une performance satisfaisante  $0.5 < NSE \leq 0.65$

**I.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte général dans lequel s'inscrit la modélisation hydrologique. La modélisation pluie-débit, discipline de l'hydrologie, s'intéresse à la compréhension et la représentation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant. Les traductions mathématiques de cette transformation sont faites par des modèles hydrologiques. En effet, une présentation de nombreuses recherches a été établie et que se sont focalisées sur la complexité des différents processus hydrologique dont les variations sont à la fois spatiales et temporelles au cours de l'épisode pluvieux. Le choix d'un modèle dépend de l'échelle spatiale et temporelle de la modélisation. Concernant l'échelle temporelle, plus le pas de modélisation est long, plus la description des processus hydrologique est simple. Au contraire, la modélisation des processus à un pas de temps court nécessite une description des processus plus complexe.

Dans notre étude, nous nous limiterons à l'étude par le modèle physique HEC HMS à pas de temps journalier, et par les réseaux de neurones MLP (perceptron multicouche). Ce choix donc nous permet de garder un objectif d'applicabilité opérationnelle : simuler la transformation de la pluie en débit et faire une étude comparative des différents modèles.

# **CHAPITRE II**

## **Présentation de la zone d'étude**

## **II.1. Introduction**

Le bassin versant est un territoire dont les limites sont naturelles, dans lequel les écoulements des eaux convergent vers un seul point appelé l'exutoire (Anctil et al., 2012). L'objectif principal de ce chapitre est d'accéder à une connaissance générale des principales caractéristiques des trois bassins versants de Dehamcha-Kébir Amont willaya de Mila, Boukerdane willaya de Tipaza, Sidi Abdelli wilaya de Tlemcen. Ce chapitre sera donc avant tout descriptif. La caractérisation morphométrique d'un bassin versant est considérée comme la méthode la plus appropriée pour la bonne planification et gestion d'un bassin versant (Pingale et al, 2012).

L'objectif général de cette étude consiste à la description les caractéristiques morphométrique et aussi d'analyser l'occupation du sol au niveau des trois bassins versant.

## **II.2. Situation géographique**

Dans cette étude, trois bassins situés au nord de l'Algérie ont été sélectionnés, et leur répartition diffère entre l'est, le centre et l'ouest.

Le bassin versant de Dehamcha-Kébir Amont est situé dans la partie nord-est de l'Algérie et se situe entre 5°30' et 5°50'E de longitude et entre 36°10' et 36°30'N de latitude avec une superficie géographique de 1054.82 Km<sup>2</sup> (Figure II.1). Les élévations du bassin versant oscillent de 285 à 1658 m.

Le bassin versant Boukerdane est situé dans la province de Tipaza au centre de nord de l'Algérie (Figure II.1). Il s'étend sur 158.16 km<sup>2</sup> de surface et 65.72 km de périmètre. Les élévations du bassin versant oscillent de 75 à 1399 m. Elle est limitée entre 2°10' et 2°17'E de longitude et entre 36°32' et 36°31'N de latitude.

Le bassin versant Sidi Abdelli est situé au nord-est de la wilaya de Tlemcen West de l'Algérie et se situe entre 1°15' et 0°53'E de longitude et entre 34°35' et 35°1'N de latitude avec une superficie géographique de 1138.87 km<sup>2</sup> (Figure II.1). Les élévations du bassin versant oscillent de 311 à 1614 m.

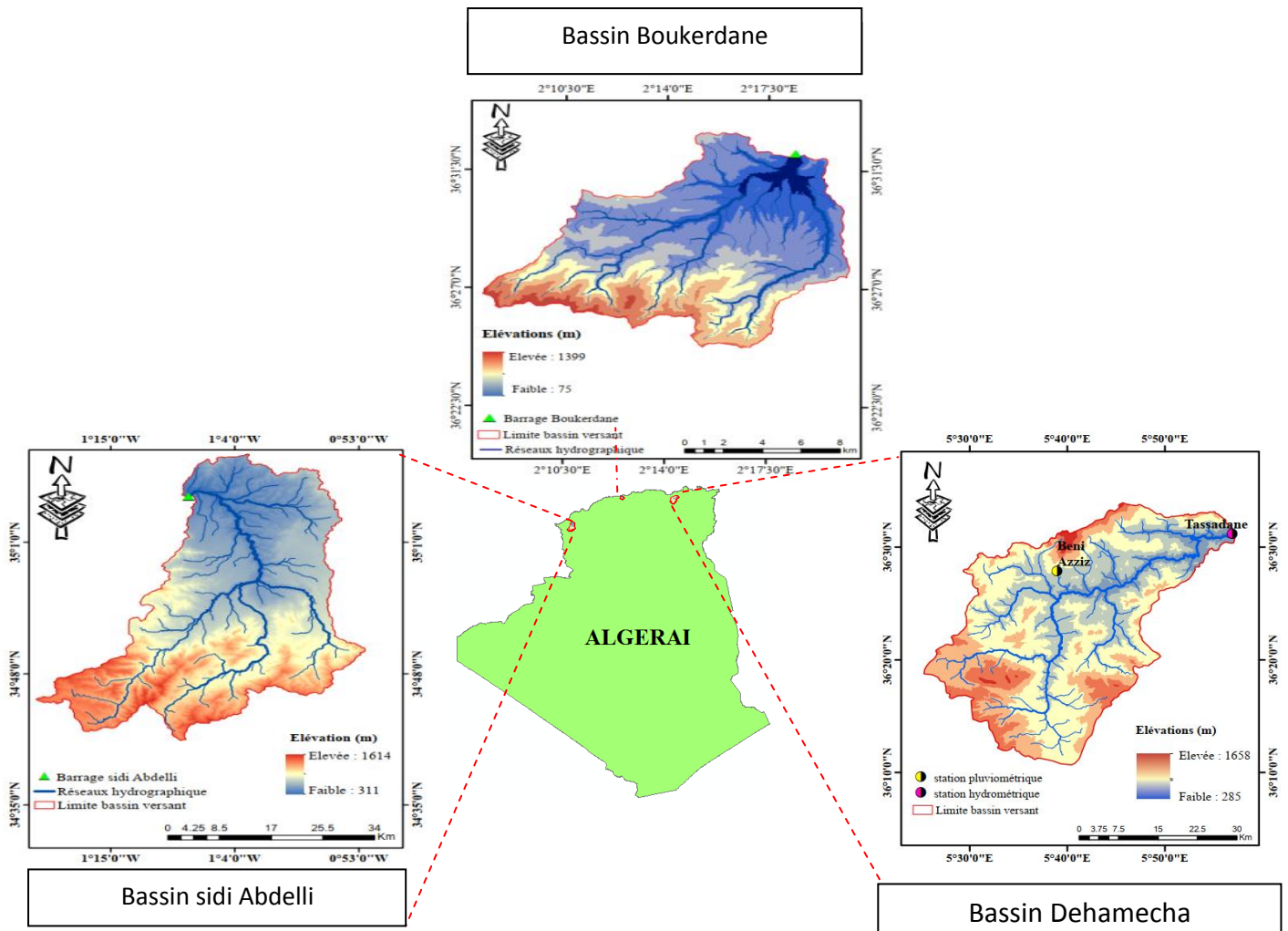


Figure II.1. Situation géographique et limites des bassins versants

### II.3. Données utilisées et méthodologie

La topographie est définie par un modèle numérique d'élévation (MNT) qui décrit l'élévation de n'importe quel point dans une zone donnée à une résolution spatiale spécifique. Le MNT a été utilisé pour la délimitation des bassins versants et de dériver toutes les caractéristiques morphométriques. Le tableau II.1 montre les données utilisées dans cette recherche.

**Tableau II.1.** Types, descriptions, sources et informations des couches de données utilisées.

Données	Description	Source	Variabes générées
SRTM (DEM)	Sites Web de United States Geological Survey (USGS) (résolution de 30 m)	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>	Caractéristiques Morphométriques
LULC	Esri ;Global Land Cover Map	Livingatlas .arcgis .com andcover	Occupation du sol

La figure II.2 montre le traitement de MNT à l'aide d'ArcGIS et les différents paramètres calculés dans les trois bassins versants.

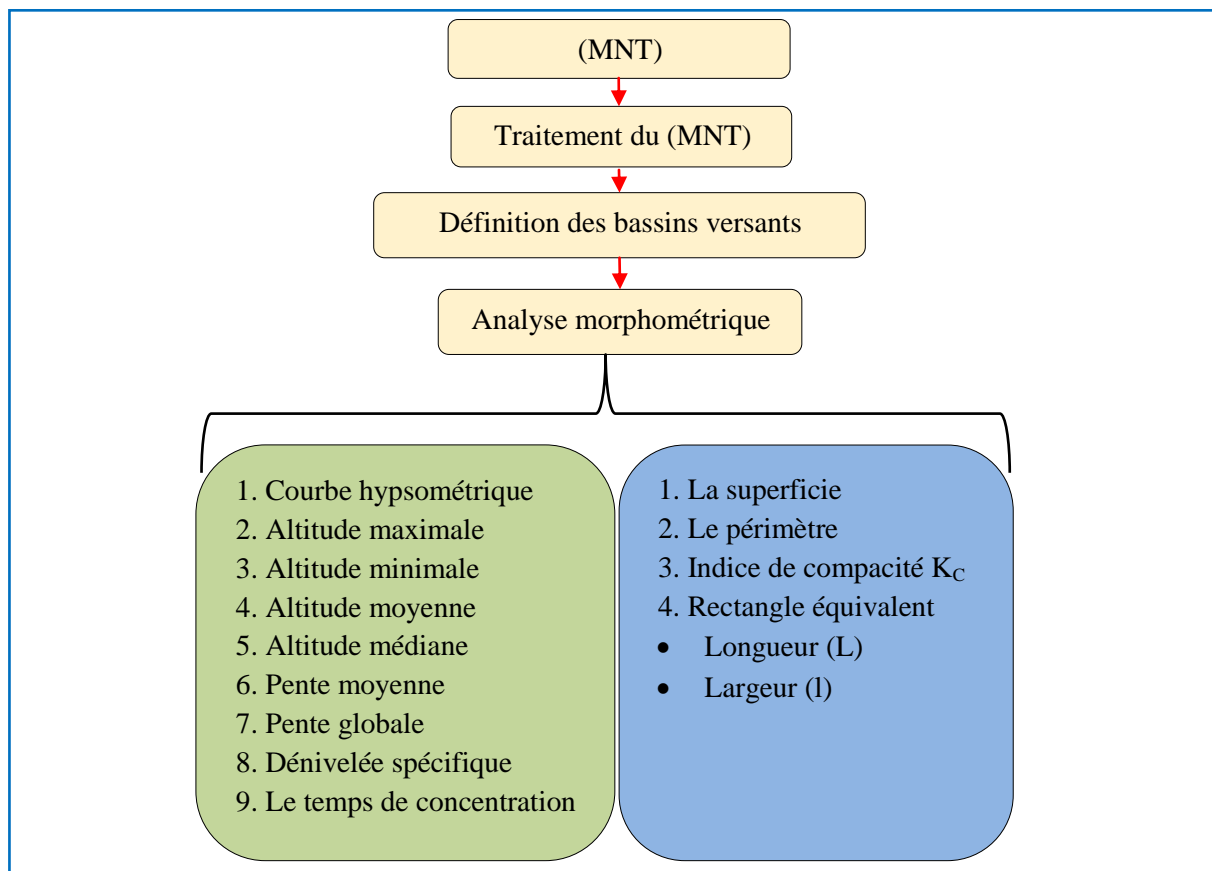


Figure II.2. Méthodologie de l'analyse morphométrique

## II.4. Evaluation des paramètres morphométriques

### II.4.1. Surface

La surface c'est un facteur très important pour connaître lors de l'étude des caractéristiques des bassins versant exprimé en km<sup>2</sup>. Les débits vont être en partie reliés à sa surface. La surface du bassin versant peut-être mesurée par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre ou par des techniques de digitalisation (logiciels Arc Gis, Global Mapper, Map info...). Dans ce travail nous savons utiliser Arc Gis pour obtenir la surface. La surface des bassins versant Dehemcha, Boukerdane et Sidi Abdelli est de l'ordre de 1054.82 km<sup>2</sup>, 158.16 km<sup>2</sup> et 1138.87 km<sup>2</sup> respectivement.

### II.4.2. Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés.

Le périmètre de sous bassin « Dehamcha-Kébir Amont » est de 189.26 km.

Le périmètre de sous bassin « Boukerdane » d'étude est de 65.72 km.

Le périmètre de sous bassin « Sidi Abdelli » d'étude est de 210.13 km.

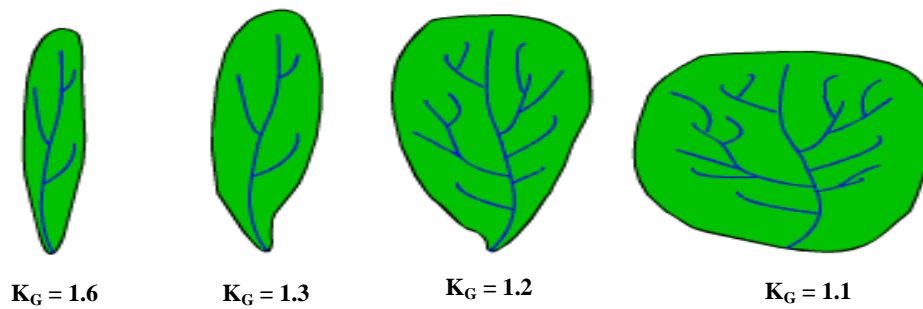
### II.4.3. Indice de compacité Gravelius

L'indice de compacité  $K_G$  détermine la forme du bassin et il sert à mesurer sa compacité c'est-à-dire qu'il est sensé rendre compte de la plus ou moins grande vitesse de concentration à l'exutoire des eaux de ruissellement en provenance des diverses parties du bassin à savoir le temps de concentration. L'indice de compacité compare le périmètre du bassin considéré au périmètre.

Il est calculé à l'aide de cette expression :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{A} \cdot \pi} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (II.1)$$

La figure II.3 représente les différentes formes du bassin versant.



**Figure II.3.** Quelques valeurs de KC pour différentes formes de bassin versant (Musy, 2001)

**II.4.4. Rectangle équivalent**

La notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par Roche (1963), permet facilement des bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité et donc par conséquent, la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau.

Si  $L$  et  $l$  représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent à l'aide de cette expression :

$$L = \frac{KG \cdot \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{(1.12)^3}{KG}}\right) \tag{II. 2}$$

$$l = \frac{KG \cdot \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{(1.12)^3}{KG}}\right) \tag{II. 3}$$

Où :  $L$  = la longueur du rectangle équivalent (Km);  $l$  = largeur du rectangle équivalent en (Km);  $S$  = la surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>);  $P$  = le périmètre (km);  $KG$  est l'indice de compacité de Gravelius.

Le tableau II.2 représente un récapitulatif de la surface, périmètre, indice de compacité et la longueur et la largeur des différents bassins versants.

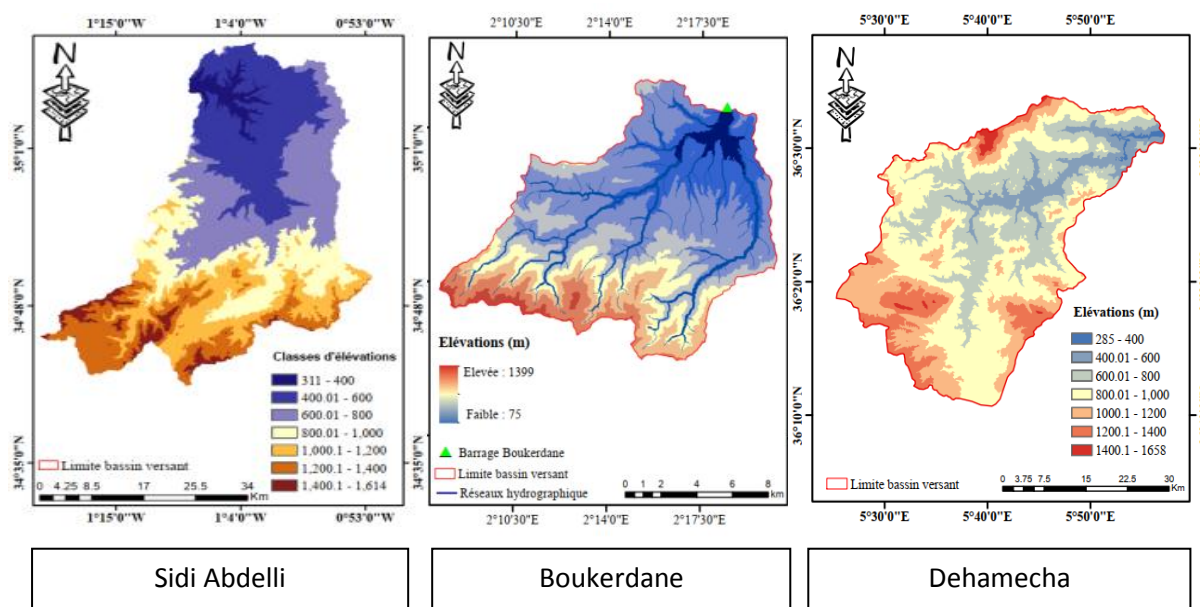


Tableau II.2. Paramètres de surface/de forme du bassin versant

Bassin/sous bassin	surface (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	indice compacité KG	Longueur Lb (km)	largeur l (km)
Dehamcha-Kébir Amont	1054.82	189.26	1.63	80.81	13.05
Boukerdane	158.16	65.726	1.46	22.12	7.15
Sidi Abdelli	1138.87	210.13	1.74	91.69	12.42

II.4.5. Courbe hypsométrique

Le relief peut caractériser par la courbe hypsométrique, elle joue un rôle dans la détermination de l'aptitude au ruissellement, à l'infiltration et l'évaporation bassin versant. Les courbes hypsométriques sont obtenues en portant sur un graphe. En ordonnée une altitude donnée et en abscisse, la surface du bassin pour laquelle chaque point à une cote au moins égale à cette altitude. Elle permet de déterminer les classes des reliefs: hauteurs moyennes. Médianes. Minimales et maximales ainsi les hauteurs correspondant à 5 % et 95% de la surface du bassin ainsi les surfaces partielles entre deux courbes de niveau successives.



**Figure II.4.** Carte hypsométrique des bassins versants.

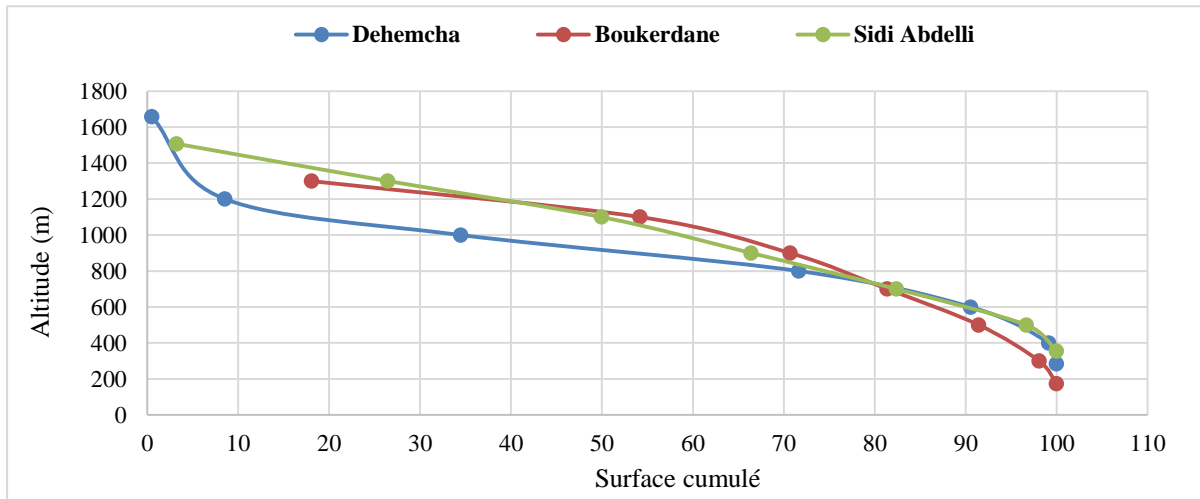
La répartition de la surface partielle en fonction de l'altitude des bassins versants est représentée dans le tableau II.3.

**Tableau II.3.** Répartition de la surface partielle en fonction de l'altitude des bassins versants

<b>Dehamcha-Kébir Amont</b>				
<b>Classes altitude (m)</b>	<b>centre classe(m)</b>	<b>Surface partielle (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Surface partielle en (%)</b>	<b>Surface cumulée %</b>
285 – 400	342.5	8.10	0.50	0.50
400 – 600	500	130.35	8.04	8.54
600 – 800	700	420.55	25.93	34.47
800 - 1000	900	602.86	37.18	71.65
1000 - 1200	1100	306.68	18.91	90.56
1200 - 1400	1300	139.10	8.58	99.14
1400 - 1658	1529	13.95	0.86	100.00
<b>Boukerdane</b>				
75 – 200	173.5	28.58	18.07	18.07
200 – 400	300	57.13	36.12	54.19
400 – 600	500	26.09	16.49	70.69
600 – 800	700	16.89	10.68	81.37
800 - 1000	900	15.95	10.08	91.45
1000 - 1200	1100	10.49	6.63	98.08
1200 - 1399	1299.5	3.03	1.91	100.00
<b>Sidi Abdelli</b>				
311 – 400	355.5	36.70	3.22	3.22
400 – 600	500	264.61	23.22	26.45
600 – 800	700	267.81	23.50	49.95

800 - 1000	900	187.53	16.46	66.41
1000 - 1200	1100	182.14	15.99	82.39
1200 - 1400	1300	162.93	14.30	96.69
1400 - 1614	1507	37.66	3.31	100.00

La figure II.5 représente la variation des surfaces cumulées en fonction des altitudes.



**Figure II.5.** Courbe hypsométrique des trois bassins versant.

**II.4.5.1. Altitudes maximales et minimales**

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire.

- Altitudes maximales du bassin versant Dehemcha est de 1658met l'altitude minimale est 285m
- Altitudes maximales du bassin versant Boukerdane est de 1399m et l'altitude minimale est 75m
- Altitudes maximales du bassin versant Sidi Abdelli est de 1614m et l'altitude minimale est 311m

**II.4.5.2. Altitude moyenne**

L'altitude moyenne est la hauteur au-dessus du niveau de la mer, qu'aurait un pays ou un continent si le relief était également réparti sur toute la surface

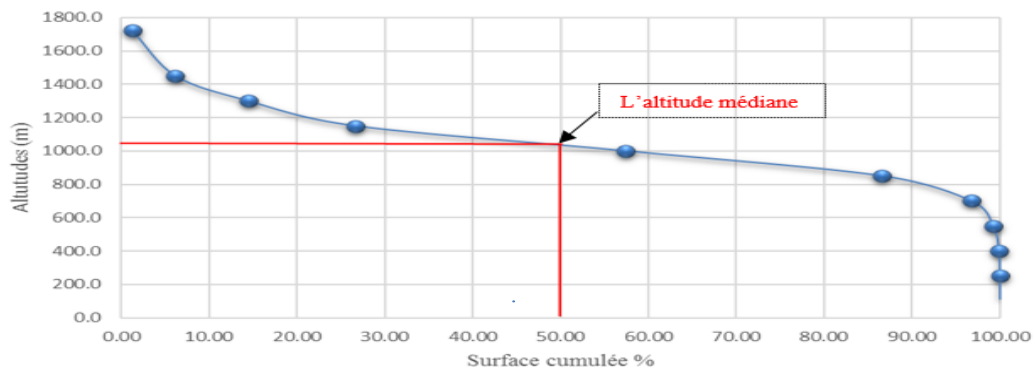
- Altitudes moyenne du bassin versant Dehemcha est 890.05m

- Altitudes moyenne du bassin versant Boukerdane est 473.9m
- Altitudes moyenne du bassin versant Sidi Abdelli est 848.6m

**II.4.5.3. Altitude médiane**

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière. La méthode d'interpolation de l'altitude médiane est représentée sur la figure II.6.

- Altitudes médiane du bassin versant de Dehemcha est 920m
- Altitudes médiane du bassin versant de Boukerdane est 1100m
- Altitudes médiane du bassin versant de Sidi Abdelli est 1150m



**Figure II.6.** Altitude médiane du bassin versant.

**II.5. Détermination de la pente du bassin versant**

**II.5. 1. Pente moyenne**

La pente a une relation importante et complexe avec l'infiltration, le ruissellement de surface et la saturation en eau du sol utilisé dans les mêmes conditions il est donné par :

$$I_m = \frac{D_{max}}{L} \tag{II.4}$$

$D_{max}$  : représente la différence entre les altitudes extrêmes du bassin versant.

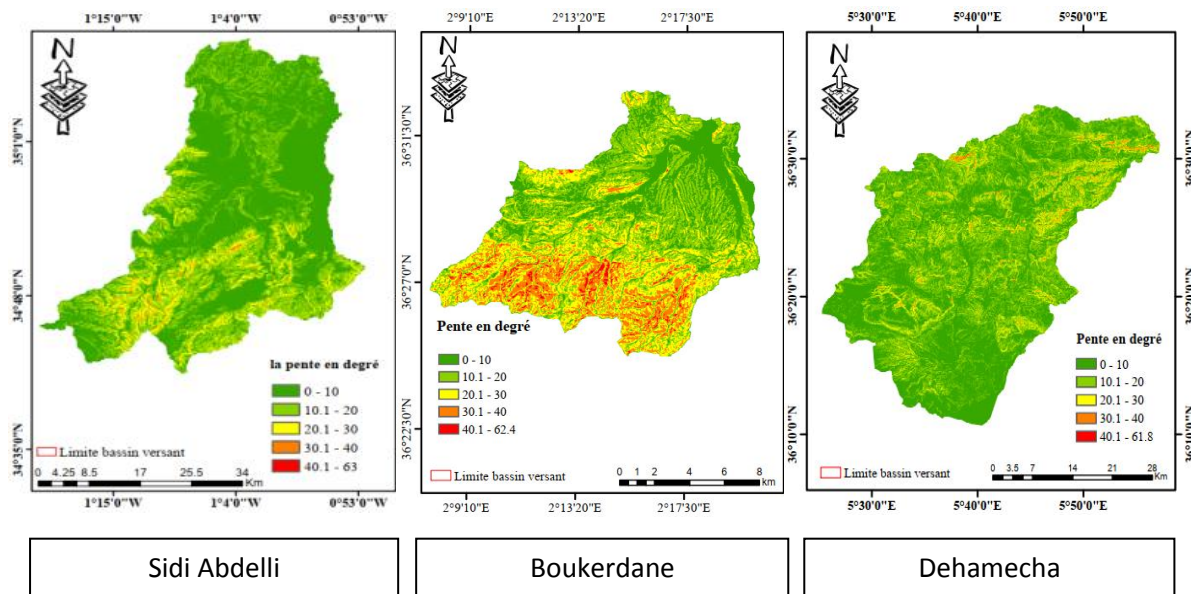


Figure II.7. Pente moyenne des bassins versants

### II.5.2. Indice de pente global $I_g$

L'indice global de pente est calculé après construction de la courbe hypsométrique du bassin qui donne le pourcentage de la superficie du bassin versant situé au-dessus d'une altitude donnée en fonction de cette même altitude. La figure II.8 représente la méthode d'interpolation des différentes altitudes.

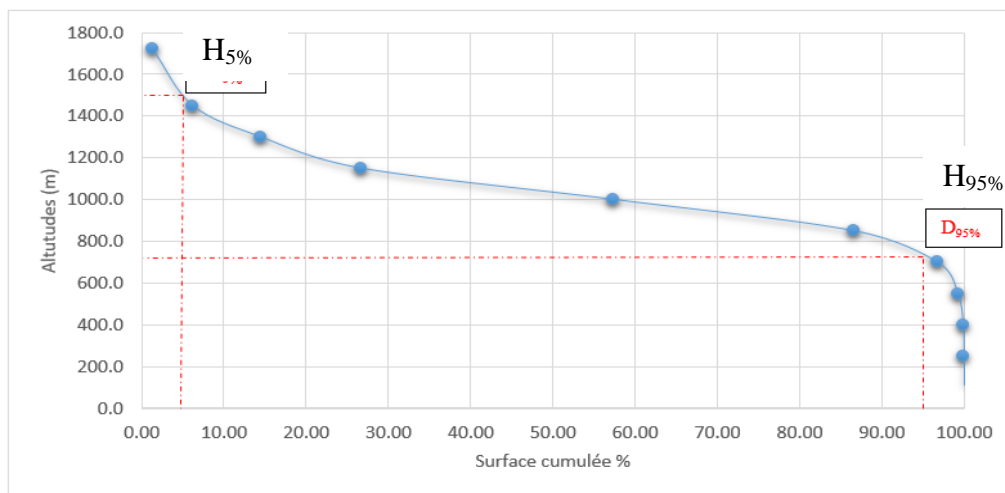


Figure II.8. Représentation des différentes altitudes (H5% et H95%)

Cette pente est utilisée pour caractériser le relief des bassins versants et a conduit à une première classification de l'ORSTOM représentée par (Tableau II.4).

**Tableau II.4.**Classification d'ORSTOM selon la pente globale

Classe	Type de relief	Valeur d'Ig
1	Très faible	$IG < 0,002$
2	Faible	$0,002 < IG < 0,005$
3	Asse faible	$0,005 < IG < 0,01$
4	Modéré	$0,01 < IG < 0,02$
5	Assez fort	$0,02 < IG < 0,05$
6	Fort	$0,05 < IG < 0,1$
7	Très fort	$0,1 < IG$

**II.5.3. Dénivelée spécifique (DS)**

La dénivelée spécifique permet d'utiliser la classification de L'O.R.S.T.O.M (Tableau II.5) qui permet définir les différents types de relief des bassins.

**Tableau II.5.**Classification d'ORSTOM selon la dénivelée spécifique

Type de relief	Valeur de DS
Très faible	$DS < 10$
Faible	$10 < DS < 25$
Asse faible	$25 < DS < 50$
Modéré	$50 < DS < 100$
Assez fort	$100 < DS < 250$
Fort	$250 < DS < 500$
Très fort	$500 < DS$

Le tableau II.6 représente tous les paramètres des reliefs des trois bassins versant.

Tableau II.6. Paramètres de reliefs du bassin versant

Bassin/sous bassin	Hmax (m)	Hmoy (m)	Hmin (m)	H Médian (m)	P <sub>moy</sub> (m/km)	IG (m/km)	Ds (m)
Bassin Dehemcha	1658	890.05	285	920	10.15	9.9	321.4
Boukerdane	1399	473.9	98	1100	18.3	52.05	654
Bassin sidi Abdelli	1614	848.6	311	1150	9.4	10.03	338.48

## II.6. Temps de concentration (T<sub>c</sub>)

Le temps de concentration T<sub>c</sub> des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.

Plusieurs formules de détermination du temps de concentration ont été mises au point, les plus courantes sont les suivantes :

### II.6.1. Formule de GIANDOTTI

$$T_c = \frac{4\sqrt{A}(+1.54*L_p)}{0.8\sqrt{H_{moy}-H_{min}}} \quad (II.5)$$

Avec :

L<sub>p</sub> : Longueur du cours d'eau principal (Km)

A : La superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

H<sub>moy</sub> : Altitude moyenne du bassin versant (m NGA)

H<sub>min</sub> : Altitude minimale du bassin versant (m NGA).

Pour le bassin versant Dehemcha

$$T_c = 15.13 \text{ h}$$

Pour le bassin versant Boukerdane

$$T_c = 5.09 \text{ h}$$

Pour le bassin versant Sidi Abdelli

$$T_c = 13.50 \text{ h}$$

L<sub>p</sub> : Longueur du talweg principal (km)

### II.6.2. Formule de KIRPICH

$$T_c = 0.6615 * (L_{cp})^{0.77} * I^{-0.385} \text{ (II.6)}$$

Avec :

I : Pente du bassin versant (m/m).

Lcp : Longueur du cours d'eau principal (Km)

**II.6.3. Formule de SCS**

$$T_c = \frac{[0.87 * L_p^3]^{0.385}}{H} \text{ (II.7)}$$

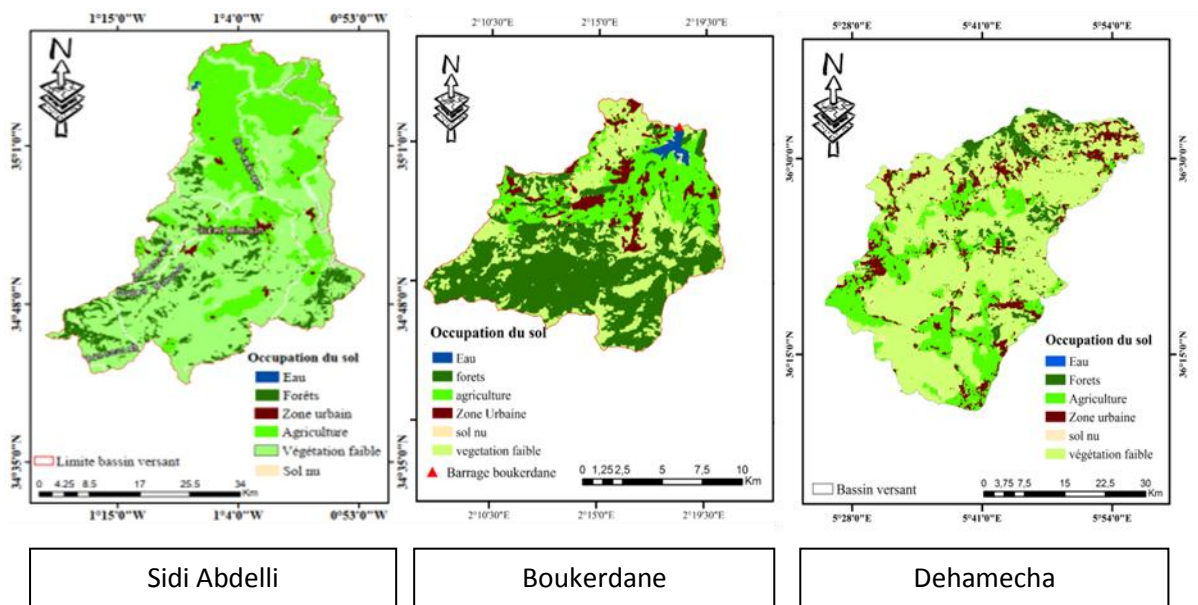
H : Différence entre les points extrêmes du talweg (m).

Lcp: Longueur du talweg principal (km).

t<sub>c</sub>: Temps de concentration en heures.

**II.7. Occupation du sol**

La couverture végétale joue un rôle important dans un bassin versant. Les ensembles de données sur l'occupation du sol ont été utilisés pour créer un fichier de grille de Curve Number (CN) à partir duquel les valeurs CN pour le bassin versant ont été générées (Selvam, et al.2015). Pour la zone d'étude, des images satellites a été librement téléchargée (Esri ; Global Land Cover Map) à partir de la page Web (b). La figure II.9 représente l'occupation du sol des trois bassins versant.



**Figure II.9.** Carte d'occupation du sol du bassin versant.



Le tableau II.7 représente le détail des différentes catégories de l'occupation du sol.

**Tableau II.7.**Détail des différentes catégories d'occupation du sol.

occupation du sol	Dehemcha		Boukerdane		Sidi Abdelli	
	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface %	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface %	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface %
Plan d'eau	0.050	0.004	2,19	1,38	1.023	0.11
Forêts	67.76	6.42	71,01	44,90	100.00	8.77
Urbaine	206.63	19.60	29,87	18,89	17.64	1.54
Agriculture	102.58	9.73	11,04	6,98	391.75	34.38
végétation faible	6.033	0.57	0,16	0,10	623.77	54.68
Sol nu	671.04	63.65	43,84	27,72	5.130	0.45

Le tableau II.8 représente un récapitulatif des paramètres morphométrique des trois bassins versant.

**Tableau II.8.** Récapitulatif des paramètres morphométrique des trois bassins versant.

Les paramètres	Dehemcha	Boukerdane	Sidi Abdelli
La superficie	1054.82	158.16	1138.87
Le périmètre	189.26	65.726	210.13
Indice de compacité KC	1.63	1.46	1.74
Longueur (L)	80.81	22.11	91.69
Largeur (l)	13.05	5.94	12.42
Altitude maximale	1658	1399	1614
Altitude minimale	285	75	848.6
Altitude moyenne	890.05	473.9	311
Altitude médiane	920	1030	1100
Pente moyenne	10.15	18.3	9.4
Pente globale	9.9	52.05	10.03

Dénivelée spécifique	321.4	654	10.28
Le temps de concentration (h)	15.13	5.09	13.50

## **II.8. Conclusion**

L'objectif visé dans ce chapitre est d'établir le portrait global du milieu physique pour les trois bassins versant et ses caractéristiques morphométrique. Une telle caractérisation est une étape essentielle dans la réalisation d'un projet de gestion intégrée de l'eau. A cet égard, l'accent est mis sur les caractéristiques géométriques, topographiques et hydrographiques.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons utilisé un model numérique de terrain (MNT) de 30 m de résolution pour délimiter le bassin versant étudié et préparé les cartes thématiques avec leur caractéristique géométrique.

**CHAPITRE III**  
**Modélisation Pluie-Débit à l'aide**  
**de HEC-HMS**

### **III.1. Introduction**

Les hydrologues sont principalement concernés par l'évaluation de la réponse du bassin versant pour la planification, le développement et l'exploitation de divers systèmes de ressources en eau. Plusieurs chercheurs ont tenté de relier le ruissellement à diverses caractéristiques qui l'affectent. Dans le but de simuler les processus pluie-débit et d'évaluer le style d'inondation, des modèles conceptuels et physiques sont largement utilisés (Meresa, 2019; Sohrat et Birendra, 2020). Afin de représenter et de simplifier un bassin versant dans un modèle informatique, il faut avoir des connaissances sur les processus du bassin versant ayant un impact sur l'hydrologie locale. Le ruissellement a souvent été considéré comme consistant en un ruissellement de surface produit à la surface du sol lorsque l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration (Castro & Maidment, 2020).

Divers modèles hydrologiques ont été utilisés dans différents bassins versants pour modéliser le processus de ruissellement des précipitations sur les données disponibles sur les précipitations, l'utilisation des terres et les propriétés des sols (Aliye et al., 2015). Le modèle HEC HMS est utilisé par plusieurs chercheurs pour prédire le potentiel hydrique du bassin versant grâce à la modélisation du ruissellement des précipitations. Il est devenu très populaire et a été adopté dans de nombreuses études hydrologiques en raison de sa capacité à simuler le ruissellement à court et à long terme (Tassew et al., 2020).

Le but de cette étude est de simuler le processus pluie-débit pour trois bassins versants (Dehemcha, Boukerdane, Sidi Abdelli) à l'aide du modèle HEC-HMS (Hydrological Engineering Center Hydrological Modeling System). Les données utilisées pour cette étude étaient le sol, l'occupation du sol, le modèle numérique de terrain (MNT) avec une résolution de 30 m x 30 m, les précipitations et les débits journalier pour les événements des crues, afin de simuler l'écoulement dans le bassin versant à l'exutoire.

### **III.2. Méthodologie**

La présente étude a été menée sur les trois bassins versants (Dehemcha, Boukerdane, Sidi Abdelli) en Algérie. Cette étude était principalement axée sur la modélisation du processus pluie-débit à l'aide du modèle HEC HMS. Des données hydro-météorologiques (précipitations, débit) à partir des données de l'Agence Nationale des ressources hydrique (ANRH) et spatiales (MNT, occupation du sol, type de sol). Nous avons choisi les précipitations et les débits journaliers pour les événements des crues (trois crues pour chaque bassin versant). Les ensembles de données sur le type de sol et l'occupation du sol ont été utilisés pour créer un fi-

chier de grille de curve Number (CN) à partir duquel les valeurs CN pour les bassins versant ont été générées.

Un système d'information géographique (SIG) peut utiliser des données d'altitude et des algorithmes géométriques pour effectuer la même tâche beaucoup plus rapidement. La version actuelle de HEC HMS contient des outils SIG qui est intégrées directement dans le modèle HEC-HMS. Cela a rendu la capacité qui inclut des options pour délimiter les sous-bassins et les tronçons à partir d'un ensemble de données de terrain en peu de temps et sans délai (Engineers, 2021). Les sous-bassins des zones d'étude sont illustrés sur la figure III.1.

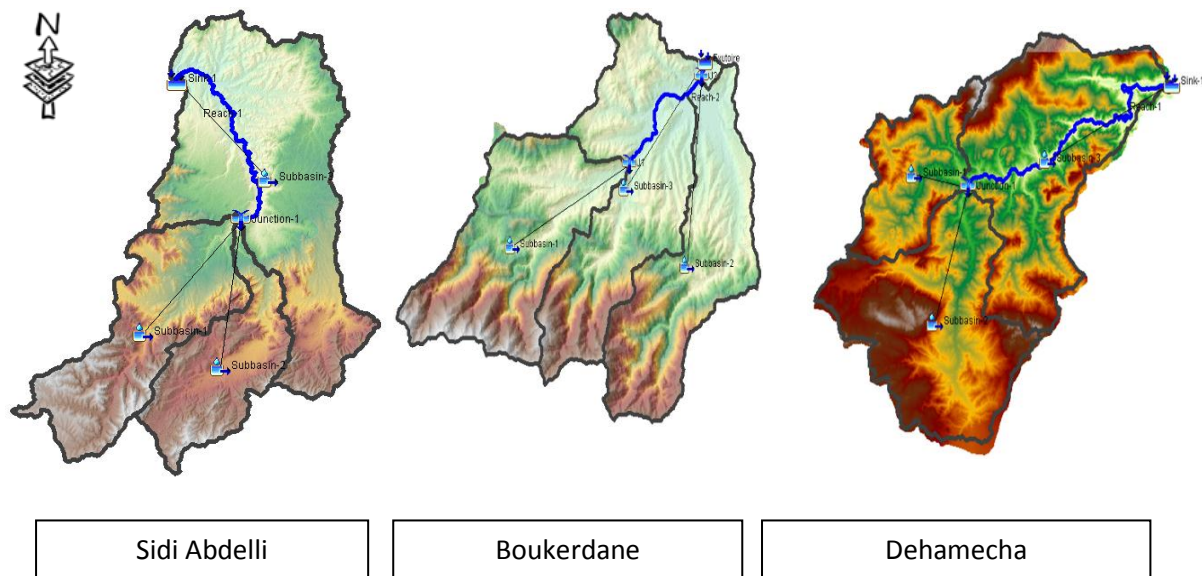


Figure III.1. Sous bassins de la zone d'étude.

### III.3. Assemblage et préparation des données

#### III.3.1. Modèle numérique de terrain (MNT)

Le modèle numérique de terrain (MNT) est utilisé pour déterminer les attributs du terrain tels que l'élévation et la pente en tout point (Mokhtari et al., 2016). Le modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation numérique et mathématique de l'altitude d'un point quelconque de la surface terrestre d'une zone géographique, dans un système référentiel bien défini (Fisher et Tate, 2006). Le MNT est représenté comme un ensemble des mailles régulières, caractériser chacune par une valeur d'altitude dans le but d'en faciliter la manipulation et le stockage en mémoire de l'ordinateur pendant les calculs. Pour la zone d'étude, un modèle numérique d'élévation (DEM) a été téléchargé à partir de la page Web (d) au format SRTM avec une résolution spatiale de 30 m x 30 m. Le MNT reste l'une des plus importantes sources de données utilisées pour l'extraction de nombreux paramètres utilisés

tels que la pente, la direction d'écoulement de l'eau. Les caractéristiques d'élévation sont représentées sur la figure III.2.

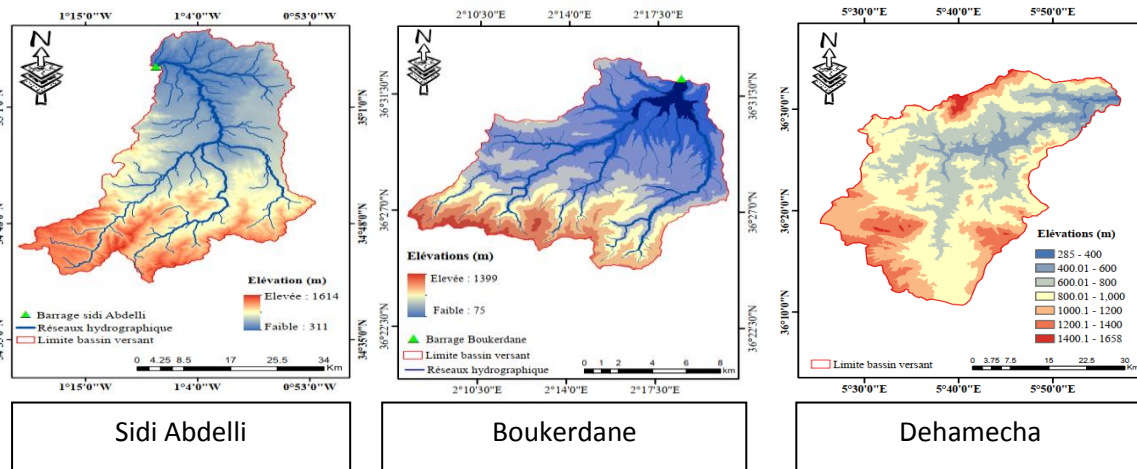


Figure III.2. Carte caractéristique d'élévation

III.3.2. Couvert végétal

La couverture végétale joue un rôle important dans un bassin versant. Les ensembles de données sur l'occupation du sol ont été utilisés pour créer un fichier de grille de Curve Number (CN) à partir duquel les valeurs CN pour le bassin versant ont été générées (Selvam et al., 2015). Pour la zone d'étude, des images satellites a été librement téléchargée (Esri ; Global Land CoverMap) à partir de la page Web (b) Cette couche affiche une carte globale de l'utilisation des terres couverture des terres (LULC) dérivée par l'imagerie ESASentinel-2 à une résolution de 10 m. chaque année est générée avec le modèle de classification des terres par IA d'apprentissage en profondeur d'impact observa-tory, formé à l'aide de milliards de pixels d'image étriqués par l'homme de la national géographique society. Les cartes mondiales sont produites en appliquant ce modèle à la collection d'image Sentinelle -2level -2A sur l'ordinateur planétaire de Microsoft, traitant plus de 400000 observations de la terre par an. La figure III.3 représente les déférentes classes de l'occupation du sol des trois bassins versant.

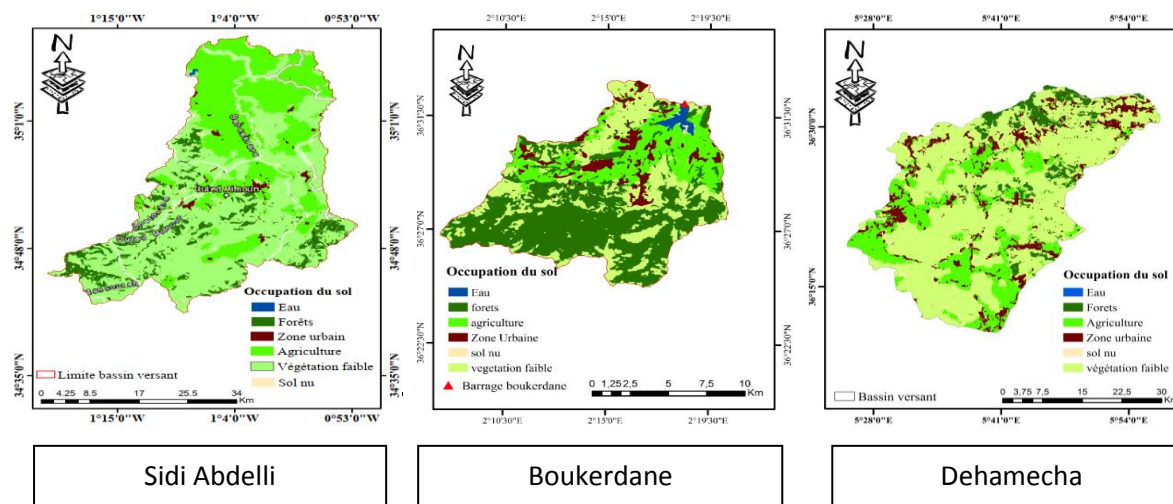


Figure III.3. Carte caractéristique d'occupation du sol

### III.3.3. Type de sol

Pour la détermination des types de sol dans les zones d'étude, la connaissance de la texture des sols est indispensable (shadeed, 2010). Les SIG se présentent comme un support efficace pour la cartographie des sols. Ils rendent l'observation sur le terrain et le processus de cartographie plus facile et rapide. Pour cela la base des données type de sol est réalisée sous Arc Gis. Les données sur les sols couvrant les zones d'étude ont été extraites du site Web de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (c) sportal au format de fichier de forme de l'Environmental System Research Institute (ESRI). Les caractéristiques du sol sont représentées sur la figure III.4.

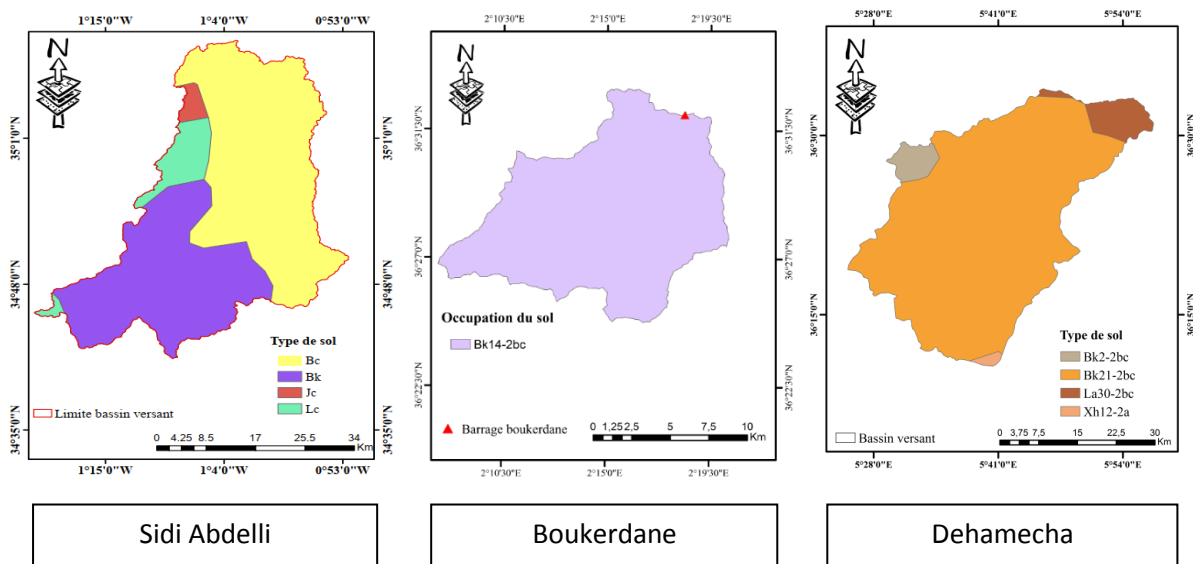


Figure III.4. Carte caractéristique du type de sol

## III.4. Descriptif du modèle

### III.4.1. HEC-HMS (hydrologic engineering center-hydrological modeling system)

HEC-HMS est un logiciel de modélisation hydrologique conceptuel semi-distribué développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps des ingénieurs de l'armée américaine (Merwade, 2012). Qui contient un outil intégré pour modéliser les processus hydrologiques des systèmes de bassins versants dendritiques. Ce modèle se compose de plusieurs composants pour le traitement des pertes de pluie, des écoulements directs et du routage. Le modèle HEC-HMS a été largement utilisé, par exemple, dans de nombreuses études hydrologiques en

raison de sa simplicité et de sa capacité à être utilisé dans des méthodes courantes (Halwatura, et al., 2021).

#### **III.4.2. Composants du modèle HEC-HMS**

Les composants du modèle sont utilisés pour simuler la réponse hydrologique dans un bassin versant. Les principaux composants du modèle sont les modèles de bassin, les modèles météorologiques, les spécifications de contrôle et les données de séries chronologiques (Engineers, 2021).

- **Modèle du bassin (basin model)**

Les modèles de bassin sont l'un des éléments les plus importants d'un projet de modélisation avec le modèle HEC HMS et représentent le bassin versant physique. Leur objectif principal est de convertir les conditions atmosphériques en débit à des endroits spécifiques du bassin versant (US Army Corps of Engineers, 2018). Le modèle de bassin s'est développé en ajoutant et en connectant des éléments hydrologiques. Ces éléments hydrologiques utilisent un modèle mathématique pour décrire les processus physiques dans le bassin versant. Ces éléments hydrologiques sont : sous bassin, bief, jonction, source, puits, réservoir, dérivation (Msaddek et al., 2020).

- **Modèle météorologique (Meteorological Model)**

La composante météorologique dans HEC-HMS est le premier élément de calcul au moyen duquel l'apport de précipitations est réparti dans l'espace et dans le temps sur le bassin hydrographique. Il calcule l'apport de précipitations requis par un élément de sous-bassin.

- **Spécification de contrôle (Control specification)**

Les spécifications de contrôle sont l'un des principaux composants de HEC-HMS et sont principalement utilisées pour contrôler les simulations. Ils contrôlent quand une simulation démarre et s'arrête, et quel intervalle est utilisé dans la simulation. Une simulation est formée en combinant un modèle de bassin, un modèle météorologique et des spécifications de contrôle (Engineers, 2021).

- **Données de séries chronologiques (Time Series data)**

Les modèles hydrologiques nécessitent souvent des séries chronologiques de données sur les précipitations pour estimer les précipitations moyennes du bassin. Une série chronologique de données de débit, souvent appelées débit observé, est utile pour calibrer un modèle et est nécessaire pour l'optimisation (Ismael et al., 2017).

#### **III.4.3. Fonction de production : SCS-CN**



L'une des méthodes les plus populaires utilisées pour déterminer le ruissellement à partir d'une entrée de précipitations donnée pour une simulation événementielle ou continue est le module SCS-CN dans la modélisation. HEC-HMS est un modèle hydrologique basé sur la physique et distribué dans l'espace, qui exprime la quantité de pluie-débit et le processus en fonction des caractéristiques physiques du bassin. La courbe du service de conservation des sols (SCS-CN) est un modèle de perte qui peut calculer le volume des débits de la rivière. L'excès de ruissellement de surface dépend des précipitations, du sol et l'occupation du sol d'un bassin versant particulier (Ismael et al., 2017). Le modèle SCS Curve Number (CN) estime l'excès de précipitations comme une fonction des précipitations cumulées, de la couverture et de l'humidité initiale du sol à partir de l'équation principale du modèle SCS pour estimer le ruissellement est donnée:

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (\text{III.1})$$

Avec : Q = Ruissellement cumulé ou pluie nette (en millimètres), P = Précipitation cumulée ou pluie brute (en millimètres),  $I_a$  = Perte initiale (en millimètres), et  $I_a = 0,2 S$ .

S = Rétention maximale potentielle. Le potentiel de rétention maximum, S, et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du numéro de courbe CN (Curve-Number) par :

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (\text{III.2})$$

CN peut être estimé comme une fonction du type du sol, d'occupation du sol et des conditions hydriques précédentes du bassin.

Où: CN = Curve Number (sans unité). Ce dernier varie entre 0 et 100.

#### III.4.4. Fonction de transfert : hydrogramme unitaire

La modélisation des précipitations excédentaires est la transformation des précipitations excédentaires en ruissellement à un exutoire donné. Il existe différentes options dans HEC-HMS pour calculer les précipitations excessives. Il s'agit du modèle Unit Hydrographs de Snyder, du modèle Soil Conservation Service Unit Hydrograph, du modèle Clark et du modèle Modified Clark (Scharffenberg, 2016). Pour déterminer comment le ruissellement est distribué dans le temps, nous devons introduire un facteur dépendant du temps appelé Temps de concentration. Le Temps de concentration ( $T_c$ ) est défini comme le temps nécessaire à une particule d'eau pour se déplacer du point hydrologique le plus éloigné du bassin jusqu'à l'exu-

toire, la distance temporelle entre le centre des précipitations excédentaires et le pic de l'hydrogramme et calculé pour chaque sous-bassin à l'aide de l'équation (III.3).

$$\text{Log}T = 0.6 T_c \tag{III.3}$$

Où : lagT = Le temps de réponse (lag time); Tc = le temps de constatation

• **III.4.5. Préparation de la grille des numéros de courbe**

Le curve Number du service de conservation des sols (voir figure III.5) a été utilisé pour tenir compte de la variabilité spatiale du potentiel de ruissellement dans les bassins versant. Le curve Number est déterminé à partir de la carte de l'occupation du sol et des types de sol (Subramanya, 2008). La grille des curve Number a été préparée en traitant les données de l'occupation du sol et les données de type de sol.

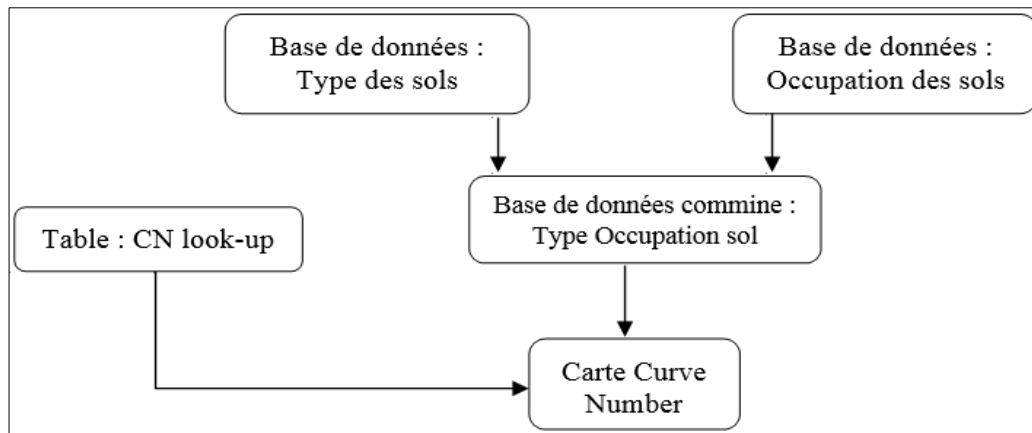


Figure III.5. Curve Number

Le tableau des numéros de courbe du service de conservation des sols donne le numéro de courbe basé à la fois sur les données d'occupation du sol et les groupes hydrologiques du sol.

Le tableau III.1 représente les différents groupes hydrologiques.

Tableau III.1. Types d'occupation du sol, groupes hydrologiques

Occupation du sol	Groupe hydrologique du sol			
	A	B	C	D
Plan d'eau	98	98	98	98
Forêts	25	55	70	77
Urbaine	77	85	90	92
Agriculture	69	78	85	86
végétation faible	67	78	85	89

Sol nu	68	79	86	89
--------	----	----	----	----

La figure III.6 représente le Curve Number des trois bassins versants.

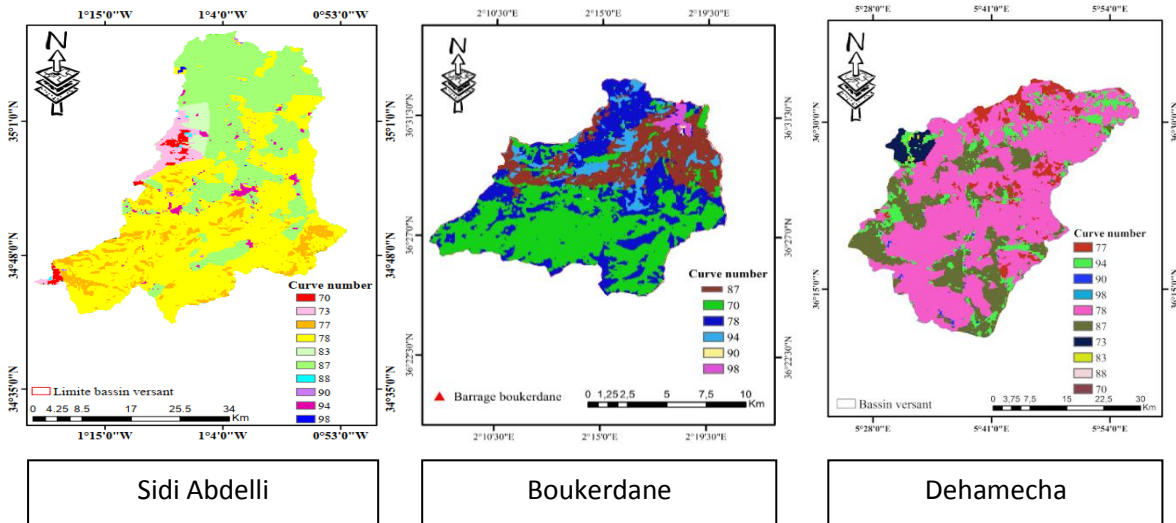


Figure III.6. Cartes caractéristiques du Curve Number.

Le tableau III.2 montre les hauteurs minimales et maximales pour les trois bassins versants.

Tableau III.2. Hauteurs minimal et maximal pour des trois bassins versants

<b>Dehemcha</b>			
Bassin versant	Hmin (m)	Hmoy (m)	Lp (km)
BV Dehemcha	285	890.05	90.82
Sous bassin 1	541	867.63	19.69
Sous bassin 2	542	991.19	37.02
Sous bassin 3	285	795.44	53.80
<b>Boukerdane</b>			
Bassin versant	Hmin (m)	Hmoy (m)	Lp (km)
BV Boukerdane	75	473.86	20.17
Sous bassin 1	134	593.71	13.60
Sous bassin 2	99	397.95	12.98
Sous bassin 3	103	435.91	15.97
<b>Sidi Abdelli</b>			
Bassin versant	H min (m)	H moy (m)	Lp (km)
BV sidi abdeli	313	848.6	74.49

Sous bassin 1	497	1052.39	42.10
Sous bassin 2	496	1086.24	38.64
Sous bassin 3	311	653.60	56.85

Le tableau III.3 représente le temps de concentration, log time et le Curve Number de différents bassins versants.

Tableau III.3. Temps de concentration, log time et le Curve Number) dans la zone d'étude.

<b>Bassin versant Dehemcha</b>							
N° sous bassin	Surface (Km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	CN	S	Ia (mm)	Tc (h)	lagT (min)
Sous bassin 1	270.304	124.421	83.06	51.80	10.36	6.65	239.2
Sous bassin 2	674.142	194.052	81.45	57.85	11.57	9.49	341.6
Sous bassin 3	613.369	189.630	80.55	61.33	12.27	10.06	362.3
<b>Bassin versant Boukerdane</b>							
N° sous bassin	Surface (Km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	CN	S	Ia (mm)	Tc (h)	lagT (min)
Sous bassin 1	51.69	49.15	79.78	64.38	12.88	2.90	104.3
Sous bassin 2	56.50	59.70	80.47	61.65	12.33	3.62	130.3
Sous bassin 3	49.89	54.77	81.62	57.20	11.44	3.62	130.3
<b>Bassin versant sidi Abdelli</b>							
N° sous bassin	Surface (Km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	CN	S	Ia (mm)	Tc (h)	lagT (min)
Sous bassin 1	318.04	142.17	78.77	68.46	13.69	7.22	260.0
Sous bassin 2	222.59	120.95	79.53	65.38	13.08	6.13	220.8
Sous bassin 3	602.24	206.98	82.71	53.10	10.62	12.54	451.5

**III.5. Évaluation et comparaison des modèles**

Les performances du modèle HEC-HMS ont été évaluées selon d'importants critères d'évaluation des performances. Ces tests d'erreur statistique étaient : l'efficacité de Nash Sutcliff (NSE), le coefficient de corrélation (R), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ont été utilisés (Wana, 2020). La valeur R est un indicateur de la force de la relation entre les valeurs observées et simulées. L'efficacité de simulation de Nash-Sutcliffe (NSE) indique la qualité du tracé de la valeur observée par rapport à la valeur simulée (Nash et Sutcliffe, 1970). Si la valeur mesurée est la même que toutes les prédictions, NSE est un. Si le NSE est compris entre zéro et un, il indique des écarts entre les valeurs mesurées et prédites. Nous avons utilisé les formules suivantes pour calculer les paramètres.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{p,i})^2} \tag{III.4}$$

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})(Q_{p,i} - \overline{Q_p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{p,i} - \overline{Q_p})^2}} \tag{III.5}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2} \tag{III.6}$$

Où  $Q_{o,i}$  est le débit observé,  $Q_{p,i}$  est le débit prédit,  $\overline{Q_o}$  est la valeur moyenne du débit observé et  $\overline{Q_p}$  est la valeur moyenne du débit prédit.

### III.6. Résultats et discussion

#### III.6.1. Bassin versant Dehemcha

La figure III.7 représente la modélisation de l'ensemble des événements de crue choisis lors de calibration.

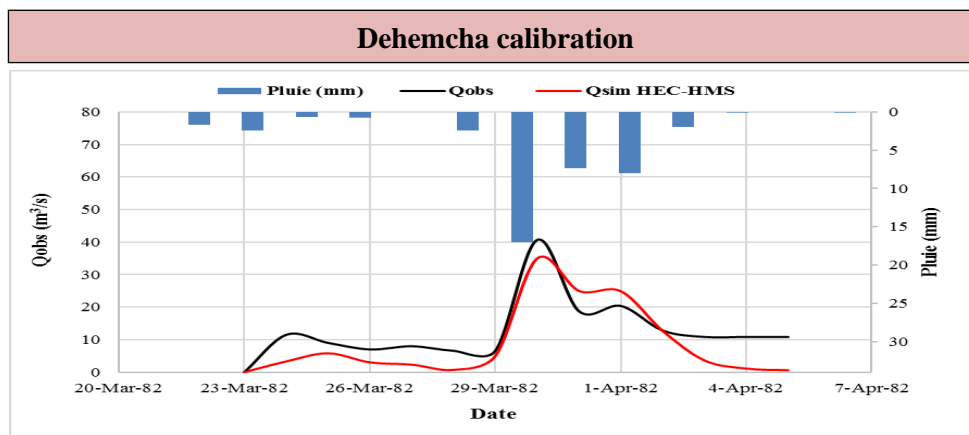


Figure III.7. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Dehemcha)  
Lors de la phase de validation, nous avons utilisés deux évènements de crue, représentés sur les figures III.8 et III.9.

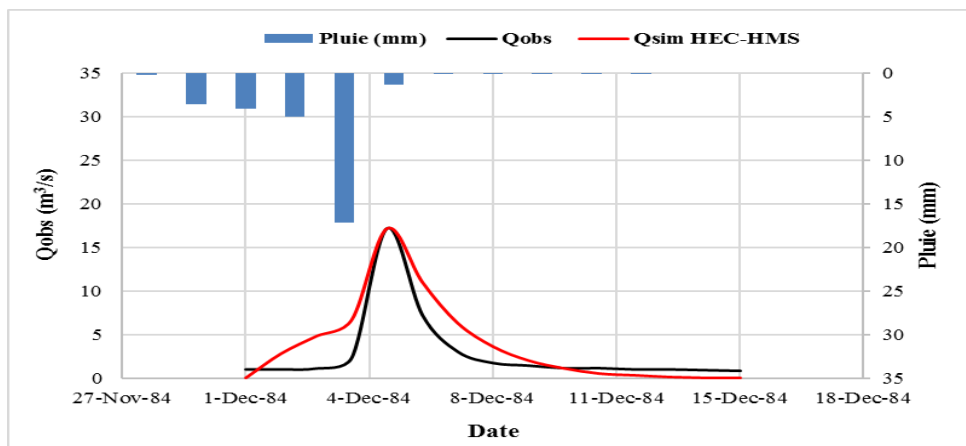


Figure III.8. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Dehemcha)

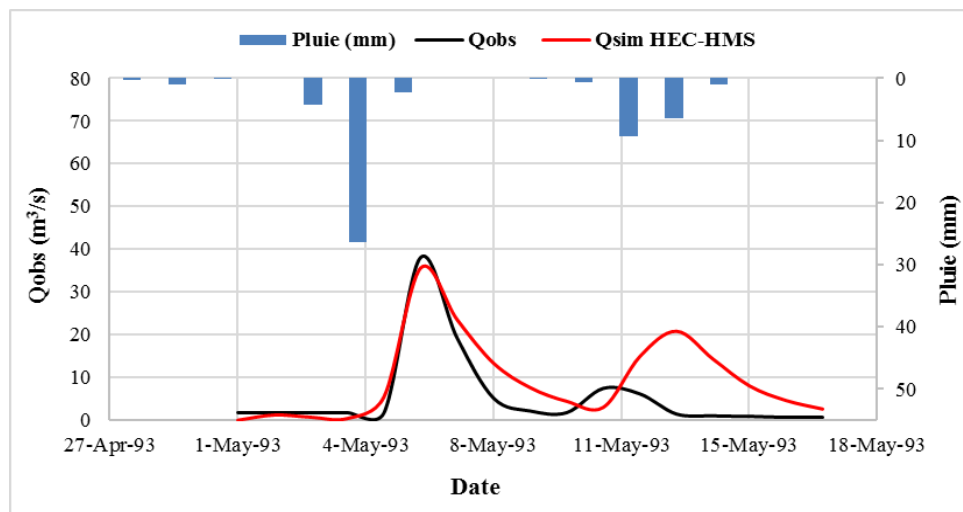


Figure III.9. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Dehemcha).

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé est approximativement égal au débit observé dans la plupart des évènements des crues pour le bassin versant (Tab.III.3). En fait, plusieurs tentatives ont été faites afin de trouver la meilleure combinaison qui offre une bonne concordance entre les hydrogrammes observés et simulés avec des paramètres uniques de calibration, le numéro de courbe CN pour la fonction de production et le temps de réponse (lag time) pour la fonction de transfert (Figures III.7, III.8 et III.9).

Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide de différents indices quantitatifs, tels que la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le coefficient de corrélation (R) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) et sont représentés dans le tableau III.4.

**Tableau III.4.** Paramètres d'évaluation des performances du bassin Dehemcha par HEC HMS.

Bassin versant Dehemcha					
Les crues	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)		Paramètre statistique		
	Qobs (m <sup>3</sup> /s)	Qsim (m <sup>3</sup> /s)	RMSE	NSE	R
23-Mar-82 to 5-Apr-82	40.6	35.0	6.006	0.576	0.898
1-Dec-84 to 15-Dec-84	17.1	17.2	2.144	0.732	0.916
1-May-93 to 17-May-93	38.1	35.6	7.185	0.399	0.8

D'après le tableau III.4, On constate que les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées. Lors de calage on a remarqué que le modèle pourrait être utilisé pour prédire le débit précisément avec R = 0,91 et NSH=0.58. Ces paramètres sont hautement

significatifs et indiquent que le modèle HEC HMS est en mesure de bien répondre aux données d'apprentissage et capable de les rapprochés.

Lors de la phase de validation, les résultats du modèle montrent que, pour la première crue  $R=0.92$ ,  $NSH=0.73$  et pour la deuxième crue  $R=0.8$  et  $NSH=0.40$ . Ces valeurs restent toujours significatives et indiquent que le modèle est en mesure de bien répondre aux données de validation et capable de les rapprochés.

**III.6.2. Bassin versant Boukerdane**

La figure III.10 représente la modélisation de l'ensemble des évènements de crue choisis lors de calibration.

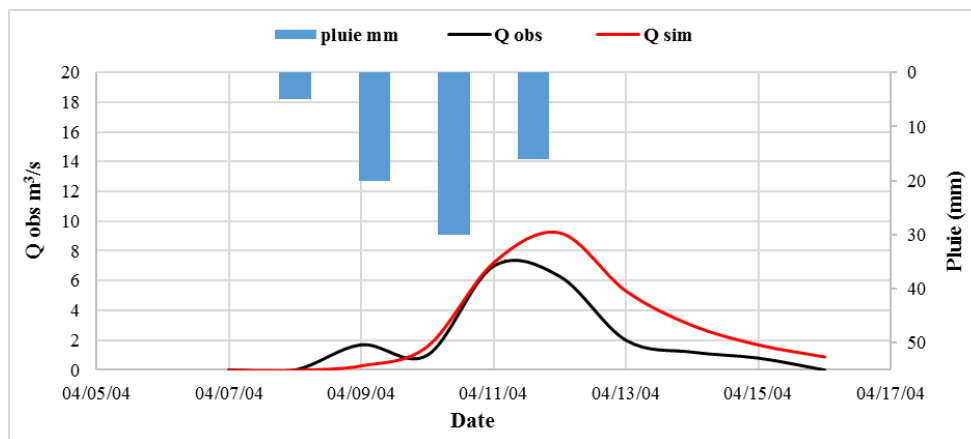


Figure III.10. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Boukerdane) Lors de la phase de validation, nous avons utilisés deux évènements de crue, représentés sur les figures III.11 et III.12.

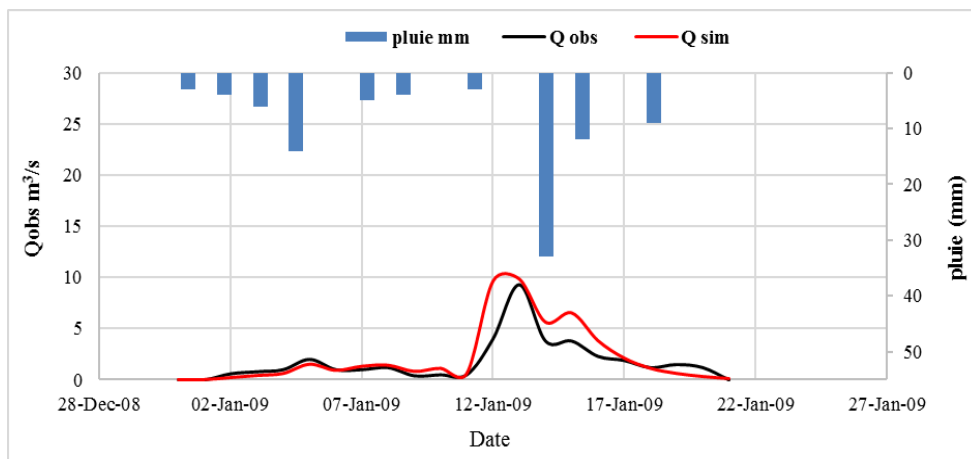


Figure III.11. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Boukerdane).

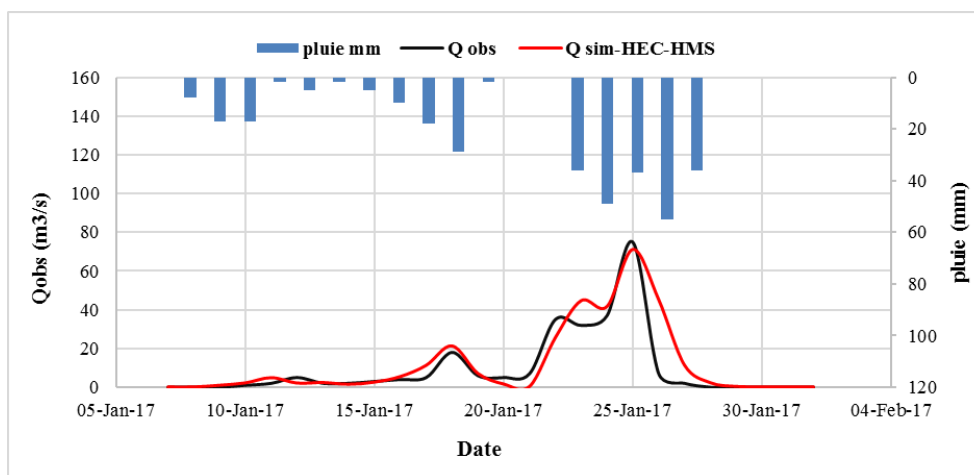


Figure III.12. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Boukerdane).

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé du bassin Boukerdane est approximativement égal au débit observé dans la plupart des évènements des crues. En fait, plusieurs tentatives ont été faites afin de trouver la meilleure combinaison qui offre une bonne concordance entre les hydrogrammes observés et simulés avec des paramètres uniques de calibration, le numéro de courbe CN pour la fonction de production et le temps de réponse (lag time) pour la fonction de transfert (Figures III.10, III.11 et III.12).

Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide de différents indices quantitatifs, tels que la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le coefficient de corrélation (R) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) et sont représentés dans le tableau III.5.

Tableau III.5. Paramètres d'évaluation des performances du bassin Boukerdane par HEC HMS.

Bassin versant Boukerdane					
Les crues	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)		Paramètre statistique		
	Qobs (m <sup>3</sup> /s)	Qsim (m <sup>3</sup> /s)	RMSE	NSE	R
7-Apr-04to 16-Apr-04	7.00	9.2	1.628	0.548	0.908
31-Dec-08 to 21-Jan-09	9.3	9.8	1.469	0.472	0.902
07-Jan-17 to 01-Feb-17	75.0	70.1	8.675	0.737	0.889

D'après le tableau III.5, On constate que les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées. Lors de calage on a remarqué que le modèle pourrait être utilisé pour prédire le débit précisément avec R = 0,91 et NSH=0.55. Ces paramètres sont très significatifs et indiquent que le modèle HEC HMS et en mesure de bien répondre aux données d'apprentissage et capable de les rapprochés.



Lors de la phase de validation, les résultats du modèle montrent que, pour la première crue  $R=0.91$ ,  $NSH=0.47$  et pour la deuxième crue  $R=0.89$  et  $NSH=0.74$ . Ces valeurs restent toujours significatives et indiquent que le modèle est en mesure de bien répondre aux données de validation et capable aussi de les rapprochés.

**III.6.3. Bassin versant Sidi Abdelli**

La figure III.13 représente la modélisation de l'ensemble des évènements de crue choisis lors de calibration.

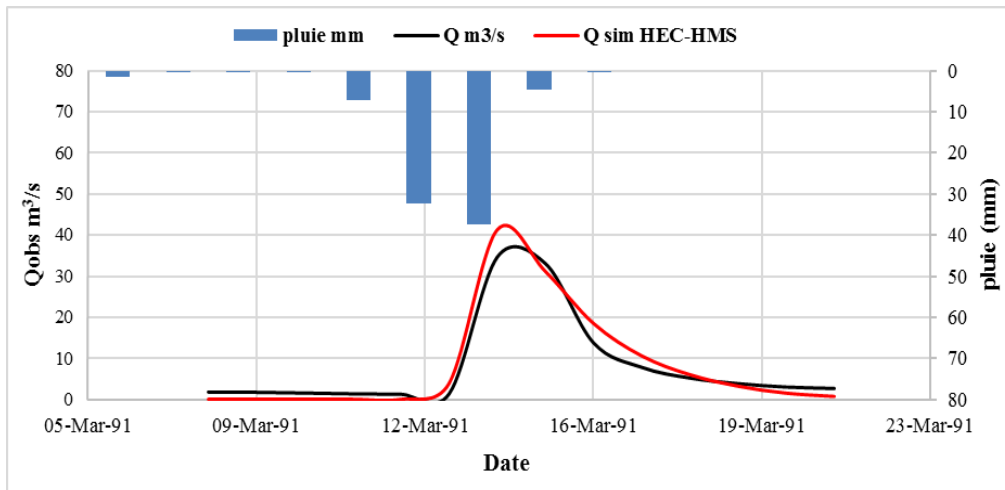


Figure III.13. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Sidi Abdelli)

Lors de la phase de validation, nous avons utilisés deux évènements de crue, représentés sur les figures III.14 et III.15.

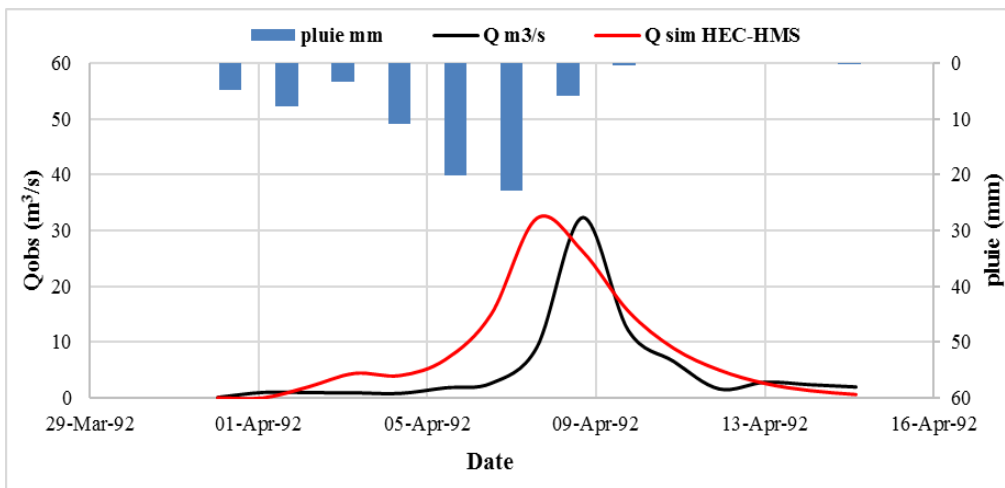


Figure III.14. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli).

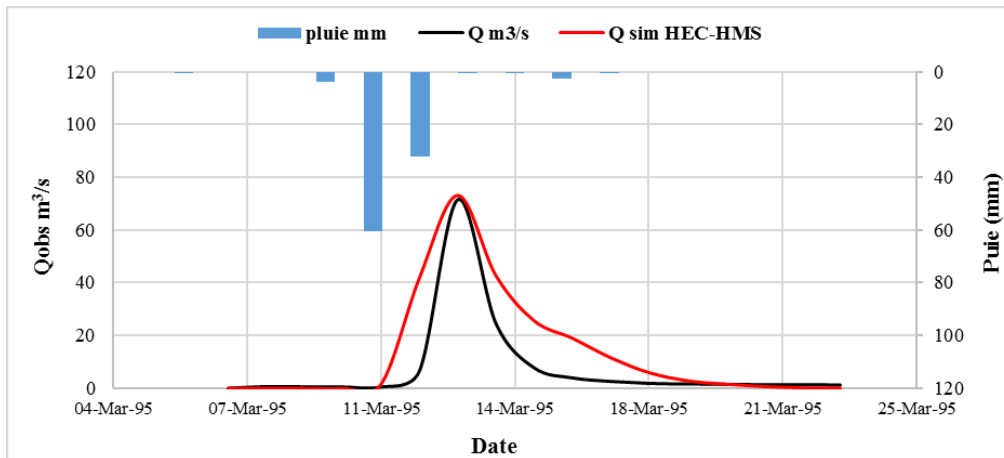


Figure III.15. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli).

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé du bassin Boukerdane est approximativement égal au débit observé dans la plupart des évènements des crues. En fait, plusieurs tentatives ont été faites afin de trouver la meilleure combinaison qui offre une bonne concordance entre les hydrogrammes observés et simulés avec des paramètres uniques de calibration, le numéro de courbe CN pour la fonction de production et le temps de réponse (lag time) pour la fonction de transfert (Figures III.13, III.14 et III.15).

Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide de différents indices quantitatifs, tels que la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le coefficient de corrélation (R) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) et sont représentés dans le tableau III.6.

Tableau III.6. Paramètres d'évaluation des performances du bassin Sidi Abdelli par HEC HMS.

Bassin versant Sidi Abdelli					
Les crues	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)		Paramètre statistique		
	Qobs (m <sup>3</sup> /s)	Qsim (m <sup>3</sup> /s)	RMSE	NSE	R
08-Mar-91 to 21-Mar-91	34.8	41.4	2.731	0.939	0.982
01-Apr-92 to 15-Apr-92	32.3	32.2	7.368	0.154	0.728
07-Mar-95 to 23-Mar-95	71.5	73.2	11.469	0.543	0.877

D'après le tableau III.6, On constate que les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées. Lors de calage on a remarqué que le modèle pourrait être utilisé pour prédire le débit précisément avec  $R = 0,98$  et  $NSH=0.94$ . Ces paramètres sont hautement significatifs et indiquent que le modèle HEC HMS et en mesure de bien répondre aux données d'apprentissage et capable de les rapprochés.

Lors de la phase de validation, les résultats du modèle montrent que, pour la première crue  $R=0.73$ ,  $NSH=0.15$  et pour la deuxième crue  $R=0.88$  et  $NSH=0.54$ . Ces valeurs restent toujours significatives et indiquent que le modèle est en mesure de bien répondre aux données de validation et capable aussi de les rapprochés. Il est à signaler que le coefficient de Nash lors de validation de la première crue n'est pas significatif.

### **III.7. Conclusions**

Dans ce chapitre, la simulation du débit dans les trois bassins versant est modélisée à l'aide d'un modèle semi-distribué (HEC-HMS) pour neuf événement de crue. Le modèle HEC-HMS est développé en utilisant les paramètres du sol, l'occupation du sol et du climat.

Les résultats obtenus montrent que les performances du modèle HEC-HMS été satisfaisantes pour simuler les débits de pointe. Le débit de pointe simulé très proche de débit observé dans les trois bassins versant (Dehemcha, Boukerdane, Sidi Abdelli). Donc on peut dire que le modèle HEC-HMS peut être utilisé en Algérie comme modèle performant pour le calcul des débits de pointe de projet (barrage, protection contre les inondations,...) au niveau des bassins versant qui ne comporte aucune station hydrométrique.

**CHAPITRE IV**  
**Modélisation Pluie-Débit à l'aide**  
**de RNA**

### **IV.1. Introduction**

La modélisation en hydrologie; et particulièrement la transformation des précipitations en débit, est un sujet qui n'est jamais démodé, car situé au coeur de l'hydrologie. On peut lire dans l'abondante littérature existante que les recherches menées dans ce domaine se continuent, non seulement pour développer ou améliorer les modèles existants, mais aussi pour créer des modèles nouveaux. L'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse ( satisfaisant) aux questions que l'on se pose à propos de l'objet modélisé, ce qui nous renvoie à l'objet assigné au modèle qui doit bien entendu précéder et orienter la conception et la construction du modèle. Le développement de l'informatique et des études sur les systèmes complexes naturels à l'image des bassins versants, ont provoqué une prolifération de modèles mathématiques en hydrologie, qui aident à comprendre, gérer et réduire la complexité des différents phénomènes hydrologiques. C'est dans ce but qu'il sera question dans ce présent chapitre d'utiliser l'approche modèle basée sur les réseaux de neurones artificiels, en particulier le perceptron multicouche (PMC), inspirés du cerveau humain, largement utilisés en hydrologie, et introduisant un nouveau concept de simulation basé sur l'apprentissage des données afin de prévoir le débit liquide au niveau des trois bassins versants, Dehamcha-Kébir, Boukerdane et Sidi Abdelli.

### **IV.2. Méthodologie**

La création d'un tel modèle nécessite le passage par plusieurs étapes afin de réaliser une modélisation performante et fiable qui est le cas pour des modèles d'intelligences artificielles. Les réseaux de neurones réalisent des fonctions non linéaires paramétrées. Leurs mises en œuvre nécessitent :

- La détermination des entrées et des sorties pertinentes, c'est-à-dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser.
- La collecte des données nécessaire à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du réseau de neurones.
- La détermination de nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une approximation satisfaisante.
- La réalisation de l'apprentissage.
- L'évaluation des performances du réseau de neurones à l'issue de l'apprentissage.

### IV.3. Perceptron multicouches (PMC)

- Le réseau neuronal le plus populaire est le perceptron multicouche (PMC) : tous les signaux circulent dans une seule direction de l'entrée vers la sortie du réseau. La figure IV.1 montre un PMC avec trois couches : une couche d'entrée, une couche de sortie et une couche intermédiaire ou cachée.

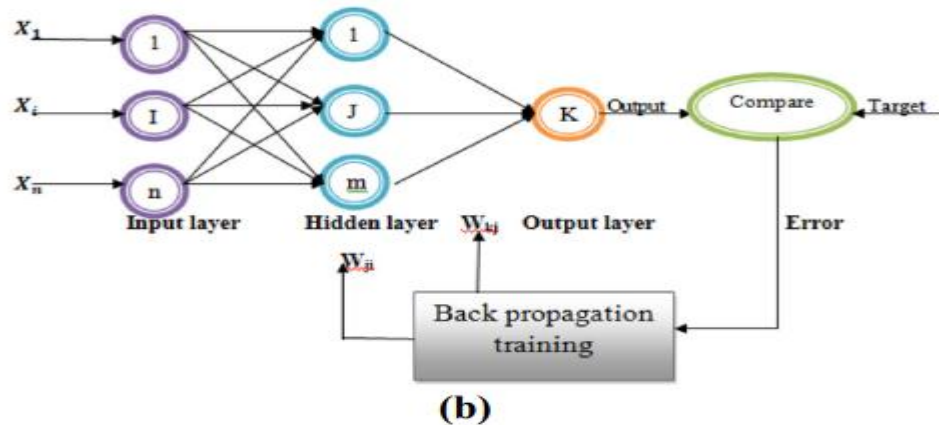


Figure IV.1. Architecture de PMC.

#### IV.3.1. Méthode de construction des modèle RNA

##### IV.3.1.1. Taille de la base des données

Dans le cas de notre étude, on a choisi d'utiliser, selon la disponibilité de données, l'ensemble des paramètres pH, températures, Conductivité (Cond.), turbidité (Turb.) et l' Oxygène dissous ( $O_2$  diss).

##### IV.3.1.2. Partage de l'ensemble des données

Il est conseillé de partager l'ensemble des données en deux sous-ensembles. à savoir :

- Le premier sous ensemble servira lors de la construction du modèle RNA à l'apprentissage, il représentera 50% 60% 70% 80% 90 % de l'ensemble des données.
- Le deuxième sous ensemble qui représente les 50% 40% 30% 20% 10% restante de l'ensemble des données aura pour mission d'effectuer le test de validation. Il faut être prudent toutefois d'assurer que l'ensemble de test n'inclut pas les données de l'ensemble de la formation. Si toutefois le modèle RNA est formé d'un ensemble de données particulier, encore testé avec un autre ensemble de données complètement différentes.

##### IV.3.1.3. Fonction d'activation

Le choix de la fonction d'activation pour les couches cachées est nécessaire pour introduire la non-linéarité dans le réseau. Sans la non-linéarité, les couches cachées se comportent comme des perceptrons simples.

Cependant, la non-linéarité (c'est-à-la capacité de représenter des fonctions non linéaires) qui rend les réseaux multicouches puissant. Pour l'apprentissage de rétro-propagation, la fonction d'activation doit être différentiables, et ça aide si la fonction est limitée.

Lors de la conception des réseaux de neurones artificiels, la fonction de transfert initiale est appliquée à chacune des couches du réseau. Dans cette étude notre choix c'est orienté pour la fonction d'activation sigmoïdes pour les neurones de la couche cachés, et pour la couche de sortie la fonction linéaire. Cette fonction à donner des résultats meilleurs que la fonction tangente hyperbolique.

**IV.3.1.4. Paramètres d'évaluation des performances des modèles**

Les différents paramètres d'évaluation des performances du modèle pluie débit sont cités dans le premier chapitre, synthèses bibliographique.

**IV.4. Modèles de réseau de neurones artificiels**

L'approche choisie dans la construction de ces modèles est présentée dans les tableaux IV. 1 IV.2 et IV.3. Les données reçus par les stations au niveau des bassins versants de Dehamcha-Kébir, Boukerdane et Sidi Abdelli serviront de données d'entrées aux modèles RNA pour prédire la relation pluie débit.

Tableau IV. 1. Données entrées-sortie (Boukerdane)

Model RNA	Echantillon	Année	Données d'entrée	Donnée de sortie
PMC	3652	1995-2005	Pluie	débit

Tableau IV.2.Données entrées-sortie (Dehamcha-Kébir)

Model RNA	Echantillon	Année	Données d'entrée	Donnée de sortie
PMC	3287	1980-1990	Pluie	débit

Tableau IV.3. Données entrées-sortie (Sidi Abdelli)

Model RNA	Echantillon	Année	Données d'entrée	Données de sortie
PMC	2479	1991-2005	Pluie	débit

**IV.5. Prédiction de la relation pluie débit par modèle PMCNN**

Nous avons simulé dans cette partie différentes architectures du modèle PMCNN. Toutes ces architectures ont été entraînées et validées sur l'ensemble de données tels que décrits dans le

tableau ci dessus. Nous rappelons qu'il y avait une base de données pour la modélisation de la pluie débit, qui contient un échantillon d'une d'entrée qui est la pluie, et une variable de sortie qui est le débit. Cette base de données a été divisée en un ensemble d'apprentissage, un ensemble de validation et un ensemble de test. On a utilisé 70% des points pour faire l'entraînement et les points restants 30% pour faire validation.

Pour chaque architecture, nous avons fait varier les paramètres de conception pour observer l'effet sur les performances de la modélisation. Nous avons varié le nombre de couches cachées avec le nombre de neurones dans chaque couche cachée afin de voir la performance du modèle PMCNN. Pour comparer les architectures entre elle, il est nécessaire de définir des critères d'erreur de modélisation qui est couramment appelé fonction cout.

La modélisation du problème a été effectuée comme suit :

- ✓ Choix de l'architecture du réseau : en premier lieu, il faut choisir l'architecture du réseau, c'est-à-dire le type de réseau, les entrées externes, le nombre de neurones cachés, la ou les sorties et les agencements des neurones entre eux. Cette étape influence considérablement la qualité du résultat. En effet, le nombre de poids ajustables est l'un des paramètres clés.
- ✓ Apprentissage : il faut ensuite calculer les valeurs des poids synaptiques de telle sorte que le réseau reproduise au mieux la sortie. Il fait appel à des algorithmes d'optimisation qui cherchent à minimiser par des méthodes non linéaires une fonction cout qui mesure l'écart entre les réponses réelles du réseau et ses réponses désirées. Cette optimisation se fait de manière itérative, en modifiant les poids en fonction du gradient de la fonction cout. Le système le plus communément utilisé est l'algorithme de rétropropagation de l'erreur (Livingstone et al., 1997).
- ✓ Validation : pour terminer, il faut tester la qualité du réseau obtenu en lui présentant des exemples qui ne font pas partie de l'ensemble d'apprentissage. Ce test de la capacité de généralisation du réseau est le seul véritable test de la performance du réseau (Livingstone et al., 1997) qui pourra ensuite être utilisé en prédiction.

Le logiciel utilisé est le Matlab avec un code de calcul PMCNN. Il permet de développer et d'exécuter des applications utilisant la technique des réseaux de neurones formels. La fonction d'activation choisie pour les neurones des couches cachées est la fonction sigmoïde, et celle pour le neurone de sortie est la fonction linéaire. L'algorithme de minimisation retenu est celui de Levenberg-Marquardt.

#### **IV.5.1. Bassin versant Sidi Abdelli**

##### **IV.5.1.1. Simulation mensuelle**



Nous avons effectués une modélisation du bassin versant Sidi Abdelli. Dans ce bassin, on s'est limité à représenter uniquement les résultats de l'ensemble de l'apprentissage et validation (70%-30%), ainsi que les différents paramètres de performance. Le schéma de la structure retenu est (1-1-1), une couche d'entrée avec un seul neurone (une entrée), une couche cachée avec trois neurones et une couche de sortie avec une seule sortie.

Nous allons présenter les résultats d'un ensemble d'apprentissage 70% et validation 30%.

- Le schéma du modèle PMCNN retenu pour la prévision mensuelle de la pluie débit est représenté sur la figure IV.2.

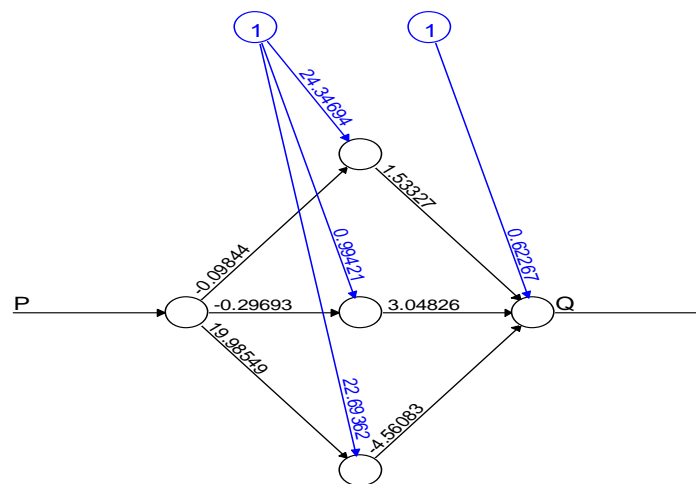


Figure IV.2. Schéma du modèle PMCNN retenu pour la prévision mensuelle de la pluie débit.

Ce schéma montre bien le nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans chaque couche. Le schéma nous permet de comprendre comment fonctionne le réseau de neurone pour avoir une réponse finale. Une fois les valeurs d'entrées ont été attribuées à nos neurones, ils vont être combinées en passant par des câbles jusqu'au prochaine neurone de la couche cachée. Ainsi chaque neurone d'une couche cachée va recevoir une nouvelle valeur, qui va être modifiée bien évidemment, et l'envoyée via des câbles à la couche de sortie. Ainsi on aura la prédiction de notre réseau de neurone en fonction des entrées données.

Les nuages de points du modèle des valeurs prédites et observées dans la phase de calage et de validation sont représentés respectivement sur la figure IV.3 et la figure IV.4.

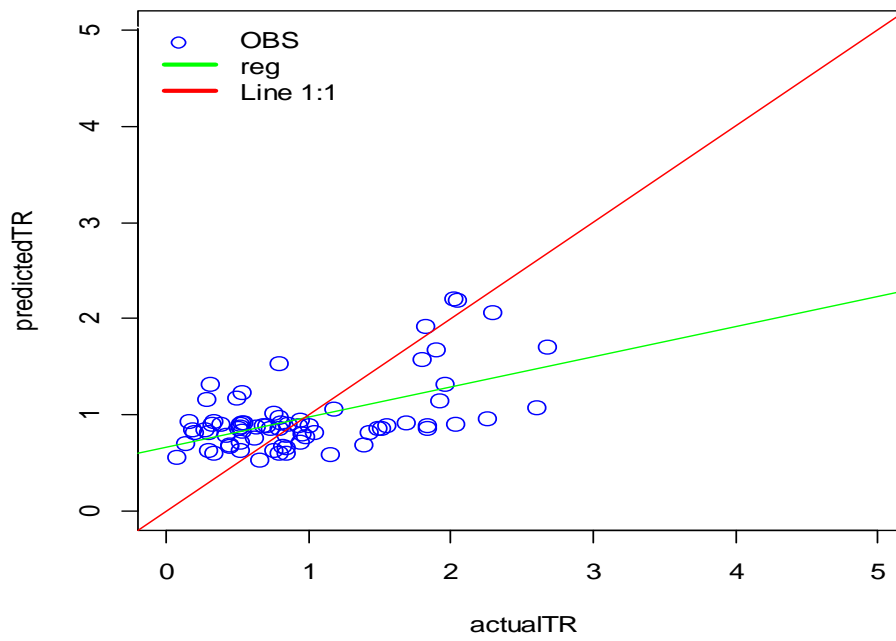


Figure IV.3. Nuage de points de valeurs mensuelles prédites et observées de la phase calage

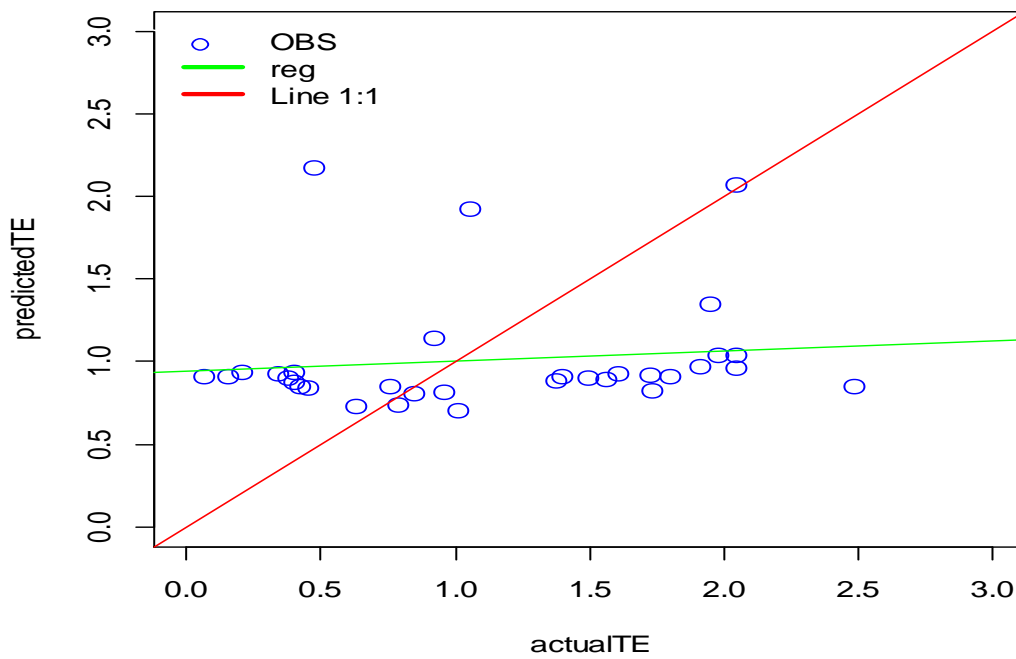
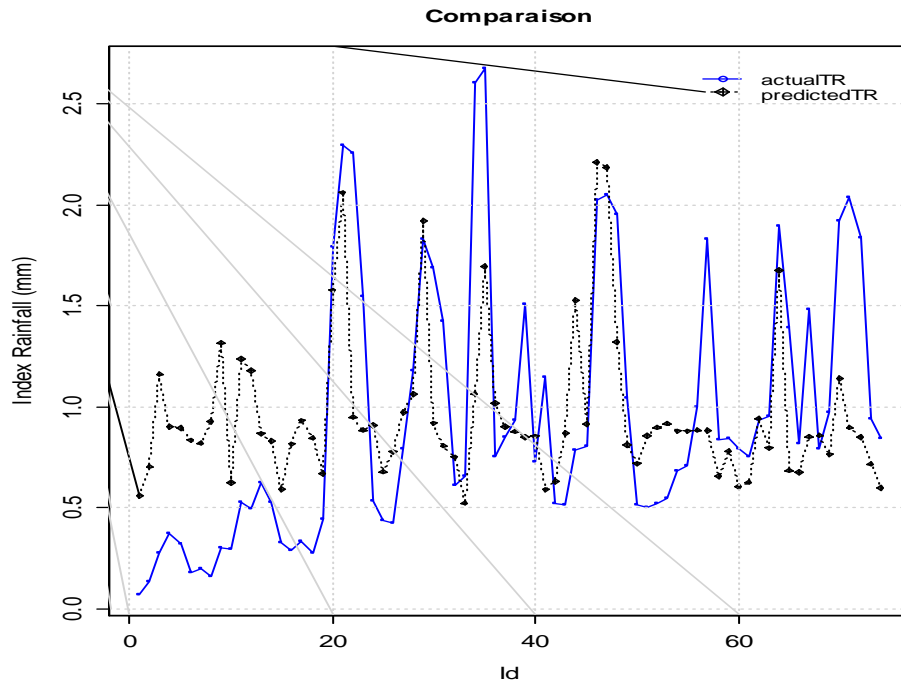
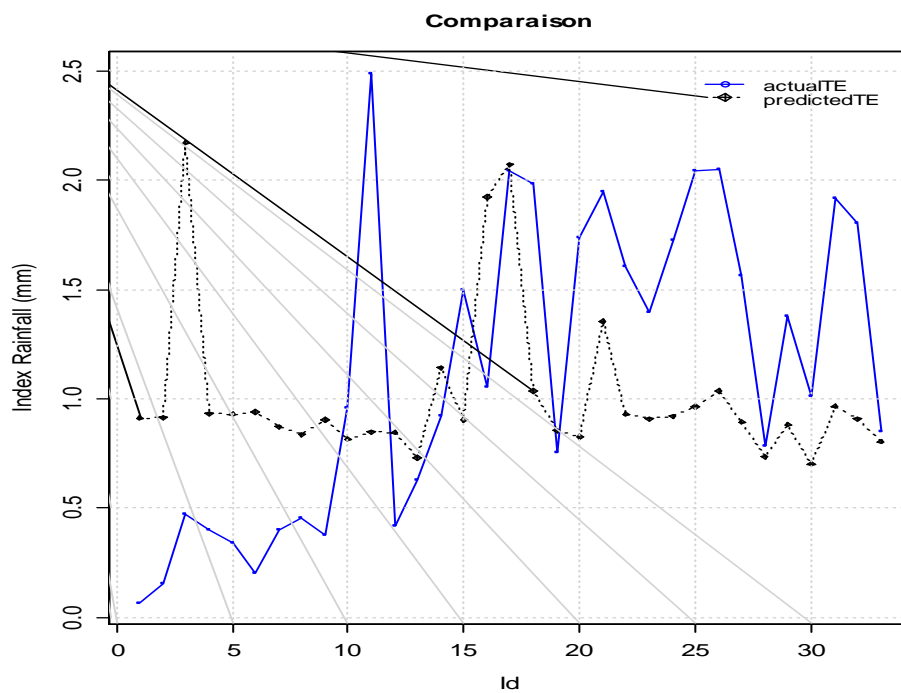


Figure IV.4. Nuage de points de valeurs mensuelles prédites et observées de la phase validation.

Les figures IV.5 et IV.6 illustrent une comparaison de la relation pluie débit entre les valeurs prédites avec celles observées.



Figures IV.5. Modèle pluie débit des valeurs prédites versus valeurs observée par le PMC de la phase calage



Figures IV.6. Modèle pluie débit des valeurs prédites versus valeurs observée par le PMC de la phase validation.

Le récapitulatif des résultats aux quels nous avons aboutis sont représentés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4. Récapitulatif des paramètres d'évaluation des performances.

Modèles RNA-PMC	70% - 30%	
	Couches (1-1-1)	
Critères de performances	Calage	Validation
MAPE(%)	84.25	122.79
RMSE(mg/L)	0.535	0.74
<b>MAE(mg/L)</b>	0.425	0.62
<b>R</b>	0.56	0.118
<b>NASH</b>	0.314	-0.17

Le modèle PMC-RNA n'a pas donné des résultats satisfaisant pour le bassin versant.

D'après le tableau IV.4, les résultats montrent que lors de la phase d'apprentissage (calage), les coefficients de corrélation sont  $R=0,56$  et  $NSH= 0,31$ . L'erreur moyenne absolue est  $MAPE=84,25\%$ . Ces paramètres sont médiocres et indique que le modèle PMC-RNA n'est pas en mesure de répondre aux données d'apprentissage et ne sont pas capable de les rapprochés.

Lors de la phase de validation, les résultats du modèle MPC-RNA montrent que les coefficients de corrélation sont  $R=0,12$  et  $NSH=-0,17$ . . L'erreur moyenne absolue est  $MAPE=84,25\%$ . Ces valeurs sont médiocres et ne sont pas significatifs. Ces paramètres indiquent que le modèle PMC-RNA n'est pas en mesure de bien répondre aux données de validation et ne sont pas capable de les rapprochés.

#### IV.5.1.2. Simulation journalière

Dans cette partie, nous avons changé de structure par rapport à la simulation mensuelle (1-2-1), avec l'ensemble de l'apprentissage et validation (70%-30%). Nous avons effectué une couche d'entrée avec un seul neurone (une entrée), deux couches cachées avec deux neurones la première couche cachée et un neurone la deuxième couche cachée et une couche de sortie. Le schéma du modèle PMCNN retenu pour la prévision journalière de la pluie débit est représenté sur la figure IV.7.

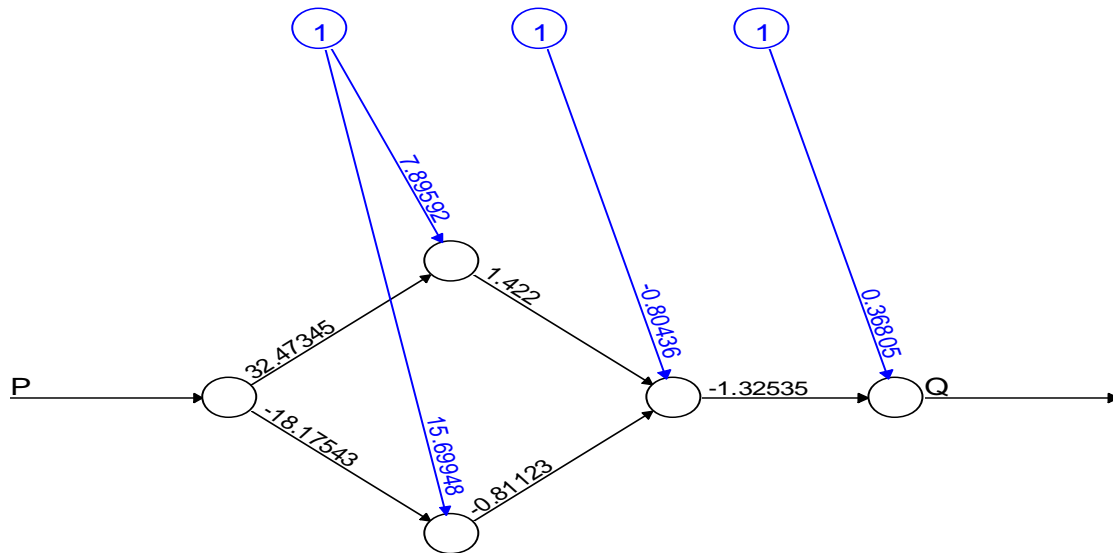


Figure IV.7. Schéma du modèle PMCNN retenu pour la prévision journalière de la pluie débit.

Ce schéma montre bien le nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans chaque couche.

Les nuages de points du modèle des valeurs prédites et observées dans la phase de calage et de validation sont représentés respectivement sur la figure IV.8 et la figure IV.9.

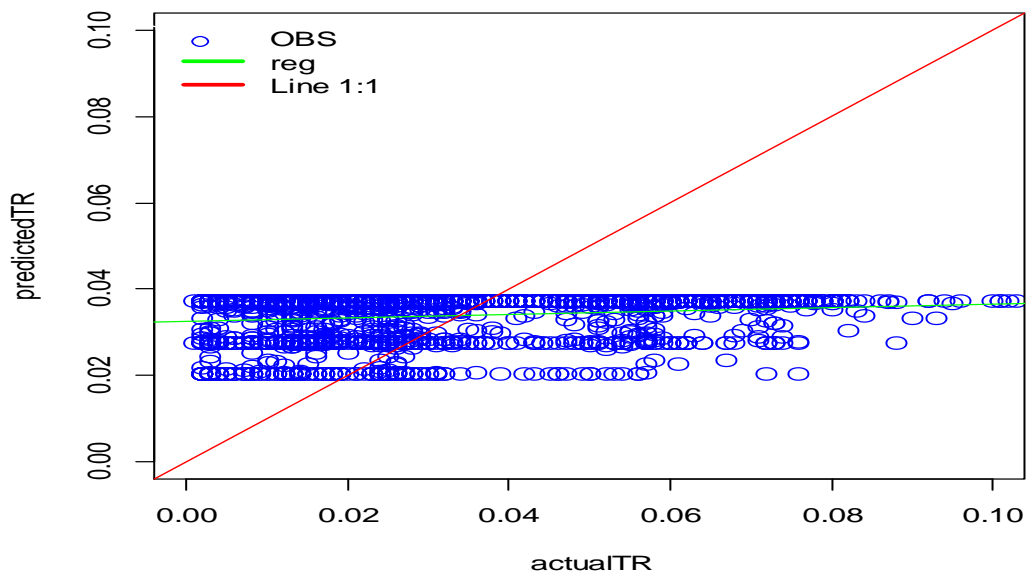


Figure IV.8. Nuage de points de valeurs journalières prédites et observées de la phase calage

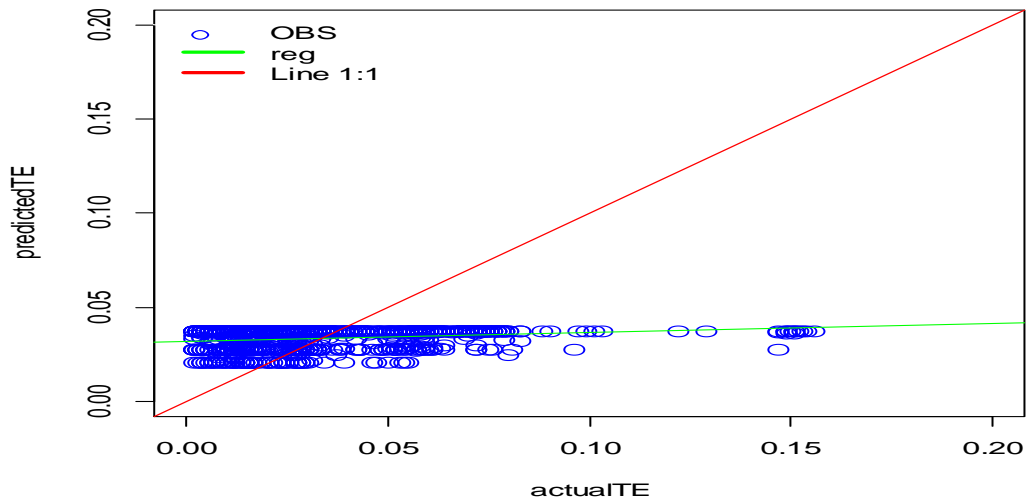
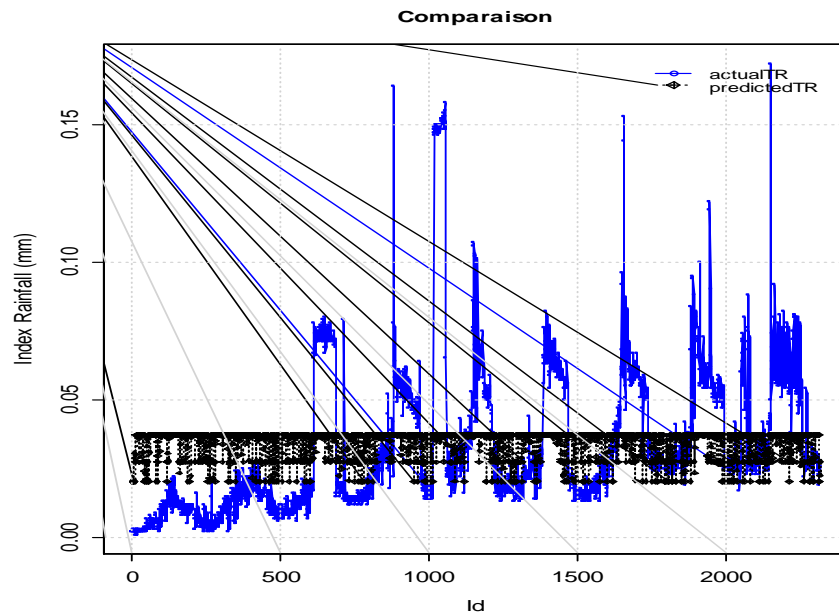
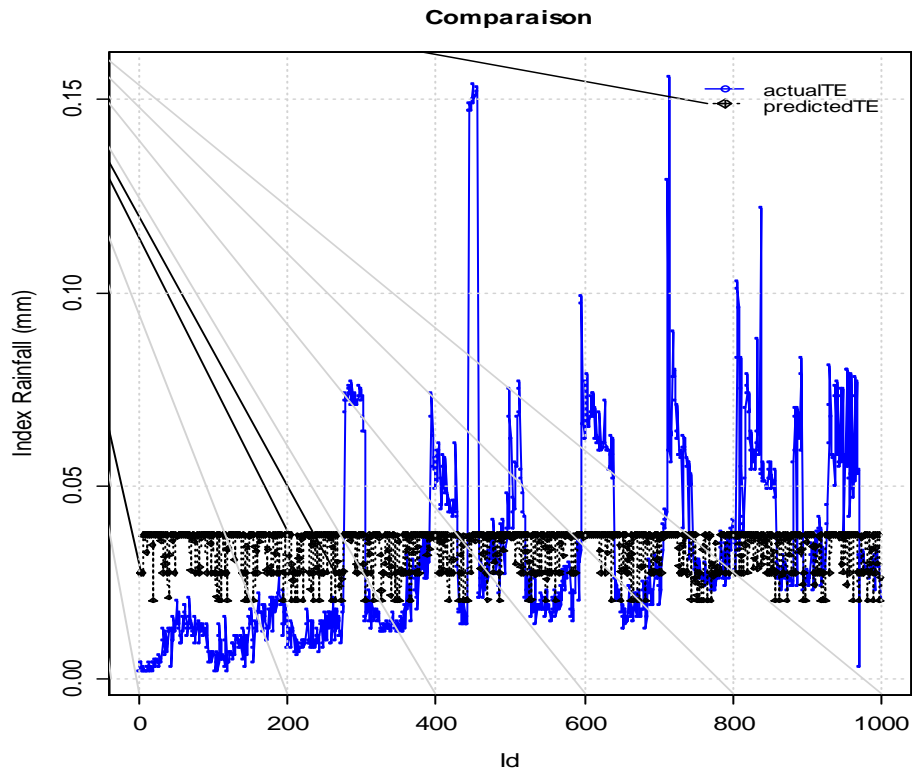


Figure IV.9. Nuage de points de valeurs journalières prédites et observées de la phase validation.

Les figures IV.10 et IV.11 illustrent une comparaison de la relation pluie débit entre les valeurs prédites avec celles observées.



Figures IV.10. Modèle pluie débit des valeurs prédites versus valeurs observée par le PMC de la phase calage



Figures IV.11. Modèle pluie débit des valeurs prédites versus valeurs observée par le PMC de la phase validation.

Le récapitulatif des résultats aux quels nous avons aboutis sont représentés dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5. Récapitulatif des paramètres d'évaluation des performances.

Modèles RNA-PMC	70% - 30%	
	Couches (1-1-1)	
Critères de performances	Calage	Validation
MAPE(%)	130.8	125.01
RMSE(mg/L)	0.026	0.025
<b>MAE(mg/L)</b>	0.02	0.019
<b>R</b>	0.198	0.21
<b>NASH</b>	0.039	0.046

Le modèle PMC-RNA n'a pas donné des résultats satisfaisant pour le bassin versant. D'après le tableau IV.5, les résultats montrent que lors de la phase d'apprentissage (calage), les coefficients de corrélation sont  $R=0,2$  et  $NSH= 0,039$ . L'erreur moyenne absolue est  $MAPE=130.8\%$ . Ces paramètres sont médiocres et indique que le modèle PMC-RNA n'est pas en mesure de répondre aux données d'apprentissage et ne sont pas capable de les rapprochés.

Lors de la phase de validation, les résultats du modèle MPC-RNA montrent que les coefficients de corrélation sont  $R=0,21$  et  $NSH=0.046$ . L'erreur moyenne absolue est  $MAPE=125.01\%$ . Ces valeurs sont médiocres et ne sont pas significatives. Ces paramètres indiquent que le modèle PMC-RNA n'est pas en mesure de bien répondre aux données de validation et ne sont pas capable de les rapprochés.

Il est à signaler que, les modèles des autres bassins versant sont plus médiocres que celui de Sidi Abdelli. Nous avons jugé ainsi, qu'il n'est pas nécessaire de représenter les résultats de la modélisation des autres bassins versants.

On a constaté que les résultats à l'échelle journalière sont plus médiocres par rapport à l'échelle mensuelle. Ces résultats indiquent que le modèle PMC-RNA trouve des difficultés de généralisation due aux fluctuations journalières et mensuelles des pluies et des débits et du degré de complexité de l'interaction de ces deux paramètres, ce qui rend la tâche de modéliser encore plus difficile. Pour cela, dans notre cas, le modèle PMC ne pas être utilisé pour prédire la relation pluie débit. Il est plus intéressant de sélectionner des évènements des crues telles qu'élaborer lors de la modélisation avec HEC HMS.

## IV.6. Simulation à l'échelle des crues

### IV.6.1. Bassin versant Dehemcha

La figure IV.12 représente la modélisation de l'ensemble des évènements de crue choisis lors de calibration par les réseaux de neurone.

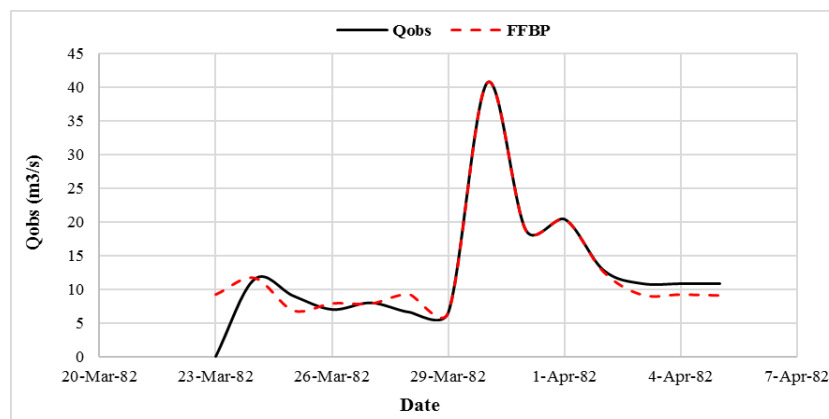


Figure IV.12. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Dehemcha)  
Lors de la phase de validation, nous avons utilisés deux évènements de crue, représentés sur les figures IV.13 et IV.14.



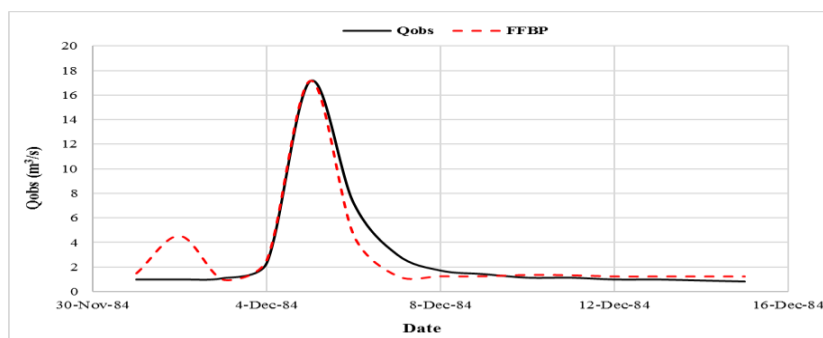


Figure IV.13. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Dehemcha).

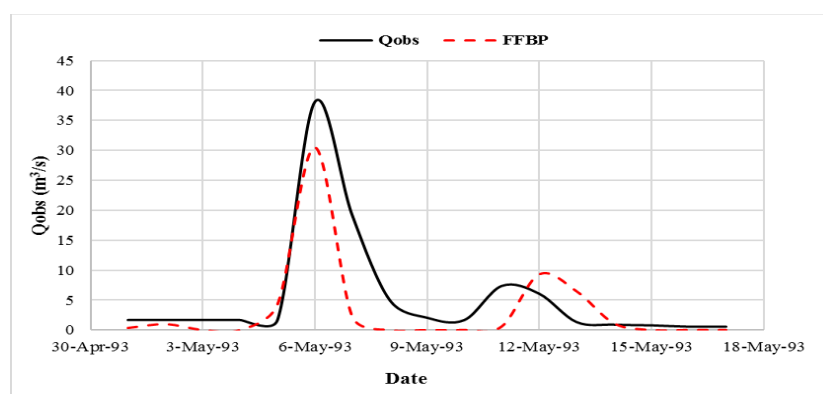


Figure IV.14. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Dehemcha).

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé est approximativement égal au débit observé dans la plupart des évènements des crues pour le bassin versant.

Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide de différents indices quantitatifs, tels que le coefficient de corrélation (R) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE).

On constate que, lors de calage, les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées. Le modèle pourrait être utilisé pour prédire le débit précisément avec  $R = 0,96$  et  $NSH=0.91$ . Ces paramètres sont hautement significatifs et indiquent que le modèle réseaux de neurones et en mesure de bien répondre aux données d'apprentissage et capable de les rapprochés.

Lors de la validation, les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées. Le modèle pourrait être utilisé pour prédire le débit précisément avec  $R = 0,95$  et  $NSH=0.91$ . Ces paramètres sont hautement significatifs et indiquent que le modèle réseaux de neurones et en mesure de bien répondre aux données d'apprentissage et capable de les rapprochés.

IV.6.2. Bassin versant Boukerdane

La figure IV.15 représente la modélisation de l'ensemble des événements de crue choisis lors de calibration par les réseaux de neurone.

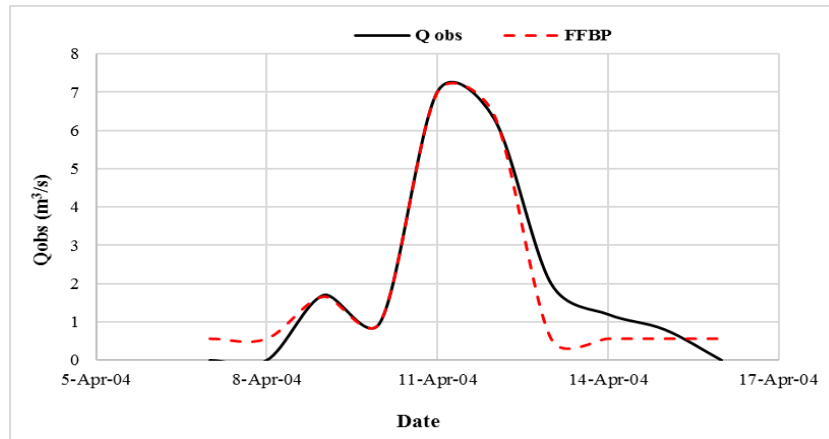


Figure IV.15. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Boukerdane) Lors de la phase de validation, nous avons utilisés deux évènements de crue, représentés sur les figures IV.16 et IV.17.

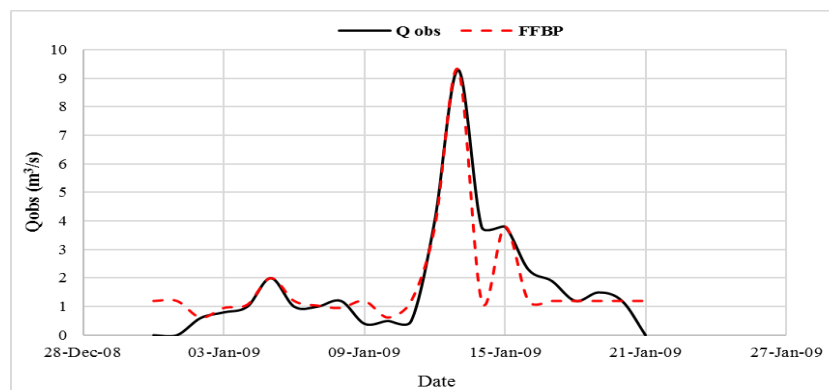


Figure IV.16. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Boukerdane).

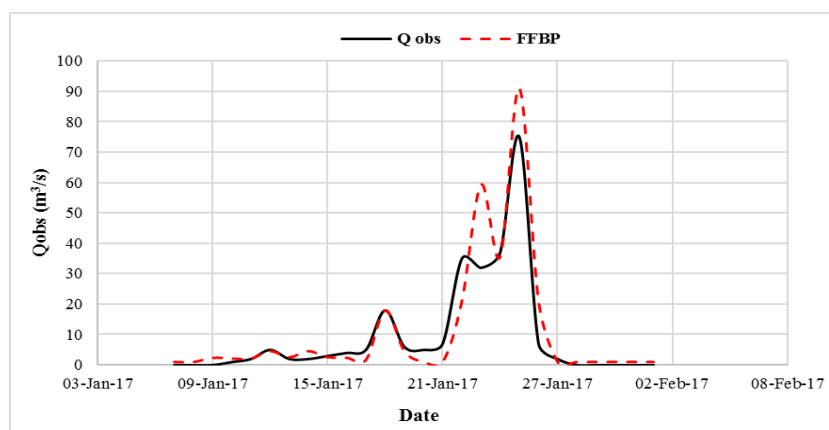


Figure IV.17. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Boukerdane).

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé est approximativement égal au débit observé dans la plupart des évènements des crues pour le bassin versant.

Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide de différents indices quantitatifs, tels que le coefficient de corrélation (R) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE).

On constate que les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées. Le modèle pourrait être utilisé pour prédire le débit précisément avec  $R = 0,97$  et  $NSH=0.94$ . Ces paramètres sont hautement significatifs et indiquent que le modèle réseaux de neurones est en mesure de bien répondre aux données d'apprentissage et capable de les rapprochés.

Lors de la validation, les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées. Le modèle pourrait être utilisé pour prédire le débit précisément avec  $R = 0,92$  et  $NSH=0.84$ .

Ces paramètres sont hautement significatifs et indiquent que le modèle réseaux de neurones est en mesure de bien répondre aux données d'apprentissage et capable de les rapprochés.

#### IV.6.3. Bassin versant Sidi Abdelli

La figure IV.18 représente la modélisation de l'ensemble des évènements de crue choisis lors de calibration par les réseaux de neurone.

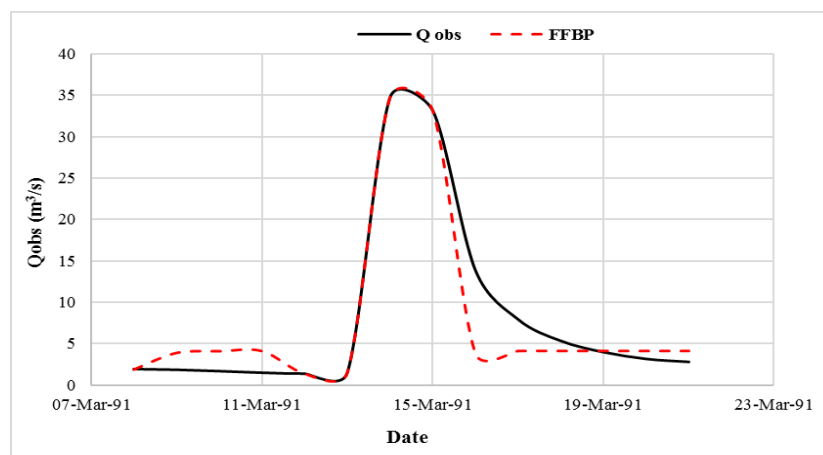


Figure IV.18. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Sidi Abdelli)  
Lors de la phase de validation, nous avons utilisés deux évènements de crue, représentés sur les figures IV.19 et IV.20.

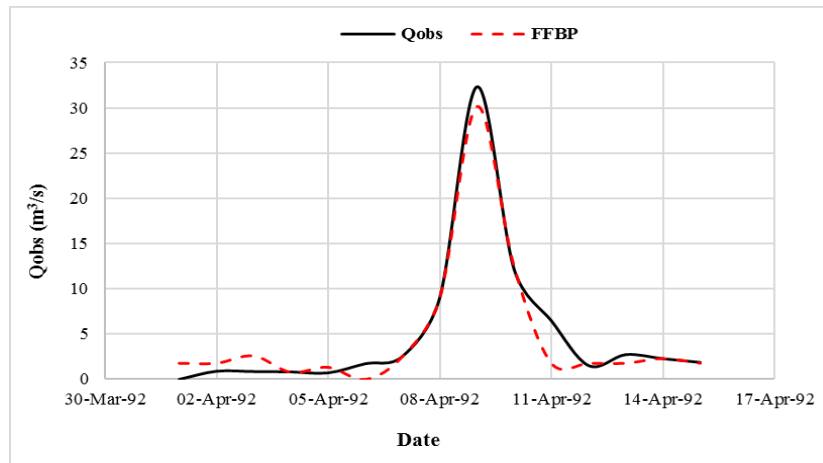


Figure IV.19. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli).

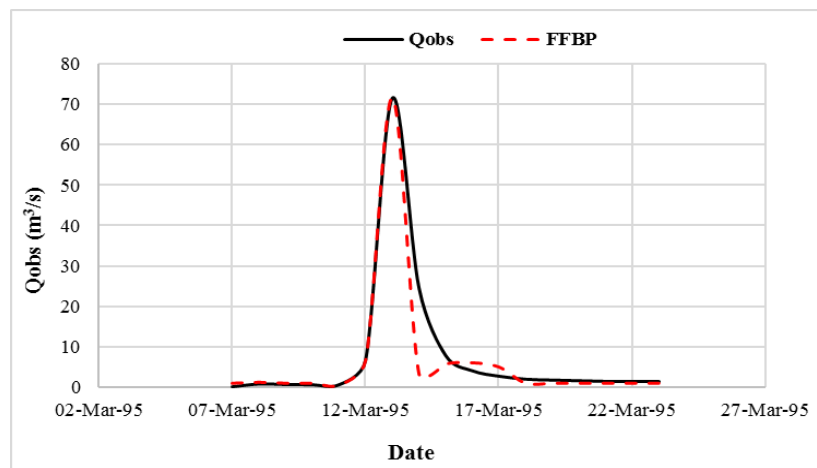


Figure IV.20. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli).

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé est approximativement égal au débit observé dans la plupart des évènements des crues pour le bassin versant.

Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide de différents indices quantitatifs, tels que le coefficient de corrélation (R) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE).

Le modèle pourrait être utilisé, lors de calage, pour prédire le débit précisément avec  $R = 0,96$  et  $NSH=0.92$ . Ces paramètres sont hautement significatifs et indiquent que le modèle réseaux de neurones est en mesure de bien répondre aux données d'apprentissage et capable de les rapprochés.

Lors de la validation, les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées. Le modèle pourrait être utilisé pour prédire le débit précisément avec  $R = 0,98$  et  $NSH=0.96$ .

Ces paramètres sont hautement significatifs et indiquent que le modèle réseaux de neu-

rones et en mesure de bien répondre aux données d'apprentissage et capable de les rapprochés.

Nous pouvons dire qu'à l'échelle de crue, les réseaux de neurone ont donnés des très bons résultats par rapport à l'échelle journalière et mensuelle. Ces résultats indiquent que les réseaux de neurones être utilisé pour prédire la relation pluie débit. Il est plus intéressant de sélectionner des évènements des crues que les évènements journaliers et mensuels.

#### IV.7. Comparaison entre les résultats de HEC-HMS et RNA à l'échelle de crue

##### IV.7.1. Bassin versant Dehemcha

La figure IV.20 représente la modélisation de l'ensemble des évènements de crue choisis lors de calibration par les réseaux de neurone.

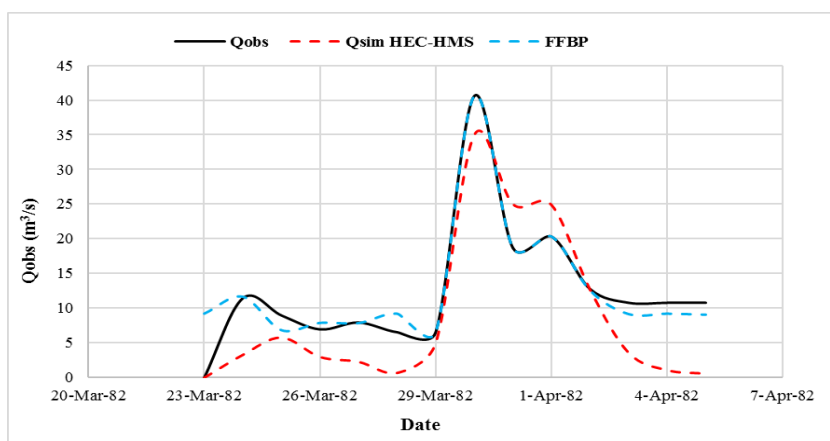


Figure IV.20. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Dehemcha) Lors de la phase de validation, nous avons utilisés deux évènements de crue, représentés sur les figures IV.21 et IV.22.

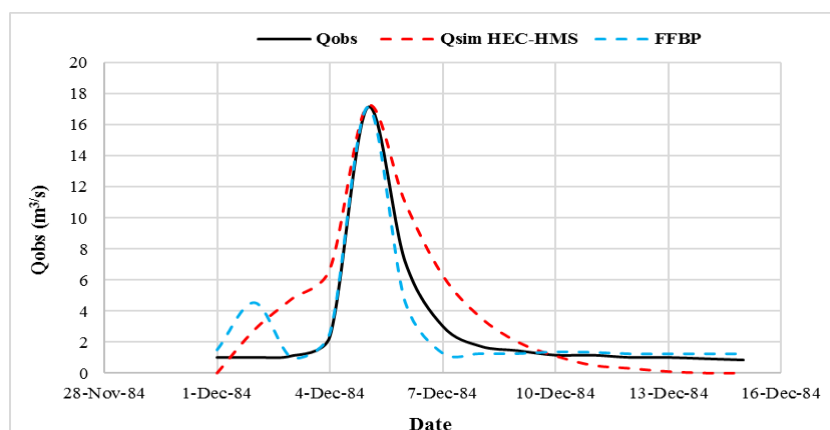


Figure IV.21. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Dehemcha).

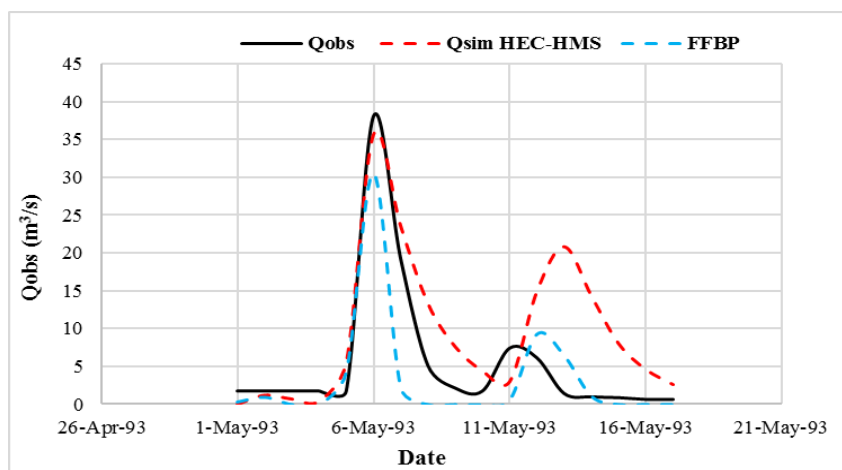


Figure IV.22. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Dehemcha).

Le récapitulatif des résultats aux quels nous avons aboutis sont représentés dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6. Récapitulatif des paramètres d'évaluation des performances.

Bassin versant Dehemcha				
Crues	Modèles	RMSE	NSE	R
I	HEC-HMS	6.006	0.576	0.898
	FFBP	2.752	0.911	0.956
II	HEC-HMS	2.144	0.732	0.916
	FFBP	1.249	0.909	0.953

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé est très proche du débit observé dans la plupart des évènements des crues.

Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide de différents indices quantitatifs, tels que la racine quadratique moyenne, le coefficient de corrélation (R) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE).

On constate que, lors de calage et validation, les résultats obtenus par HEC HMS coïncident avec ceux obtenus par les réseaux de neurones. Les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées.

#### IV.7.2. Bassin versant Boukerdane

La figure IV.23 représente la modélisation de l'ensemble des évènements de crue choisis lors de calibration par les réseaux de neurone.

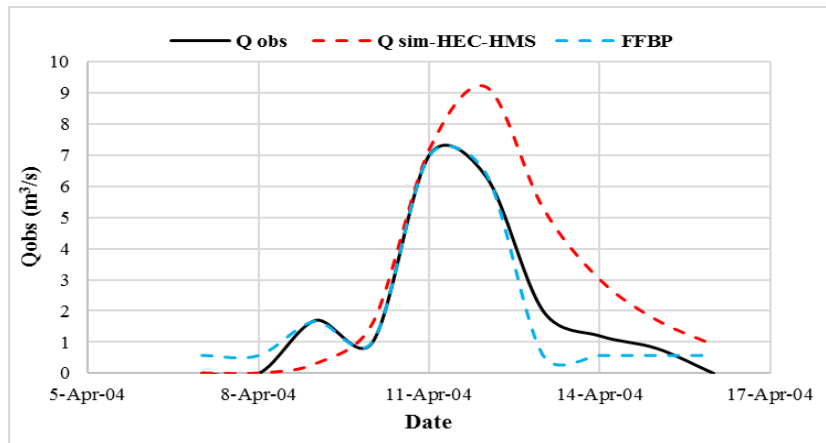


Figure IV.23. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Boukerdane) Lors de la phase de validation, nous avons utilisés deux évènements de crue, représentés sur les figures IV.24 et IV.25.

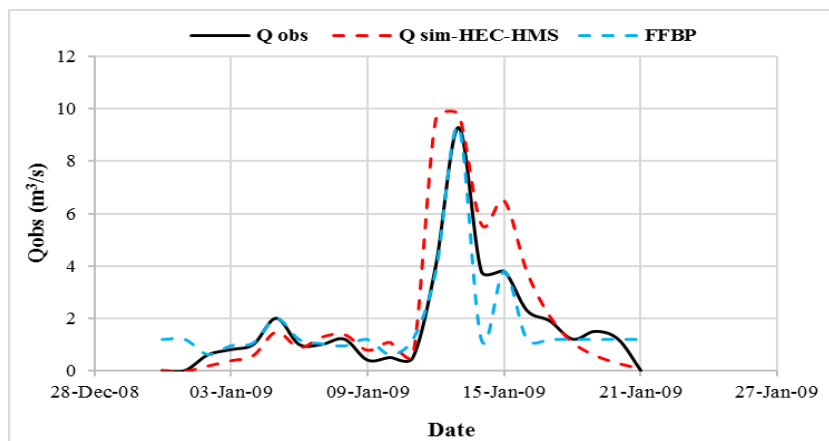


Figure IV.24. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Boukerdane).

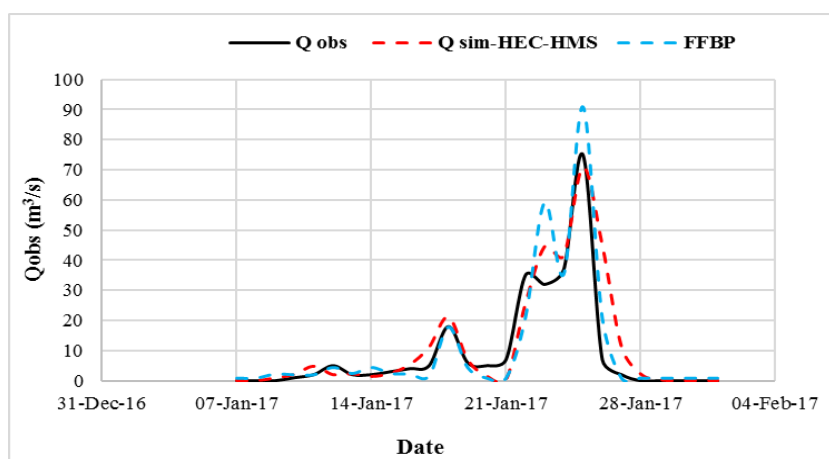


Figure IV.25. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Boukerdane).

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé est approximativement égal au débit observé dans la plupart des événements des crues pour le bassin versant.

On remarque que, lors de calage et validation, les résultats obtenus par HEC HMS sont très proches de ceux obtenus par les réseaux de neurones. Les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées.

Les paramètres d'évaluation des performances sont représentés dans le tableau IV.7.

Tableau IV.7. Récapitulatif des paramètres d'évaluation des performances.

Bassin versant Boukerdane				
Crues	Modèles	RMSE	NSE	R
I	HEC-HMS	1.628	0.548	0.908
	FFBP	0.591	0.94	0.97
II	HEC-HMS	1.469	0.472	0.902
	FFBP	0.803	0.842	0.918

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé est très proche du débit observé dans la plupart des événements des crues.

On constate que, lors de calage et validation, les résultats obtenus par HEC HMS coïncident avec ceux obtenus par les réseaux de neurones. Les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées.

**IV.7.3. Bassin versant Sidi Abdelli**

La figure IV.26 représente la modélisation de l'ensemble des événements de crue choisis lors de calibration par les réseaux de neurone.

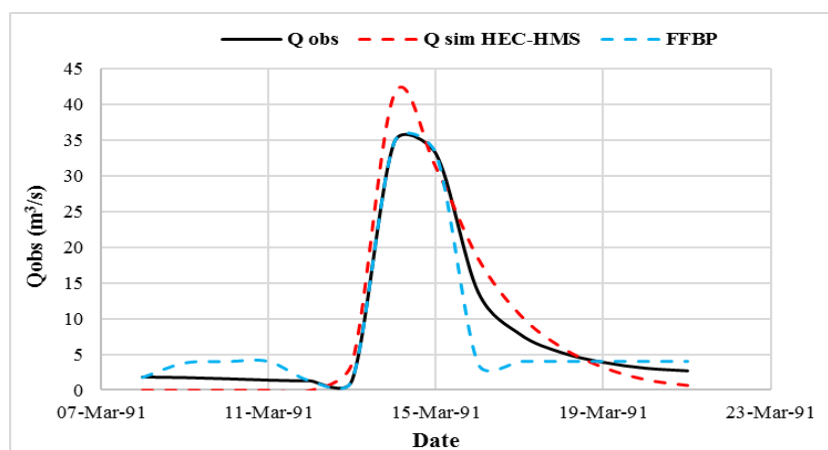




Figure IV.26. Modélisation de l'évènement de crue lors de calibration (Bassin Sidi Abdelli)  
Lors de la phase de validation, nous avons utilisés deux évènements de crue, représentés sur les figures IV.27 et IV.28.

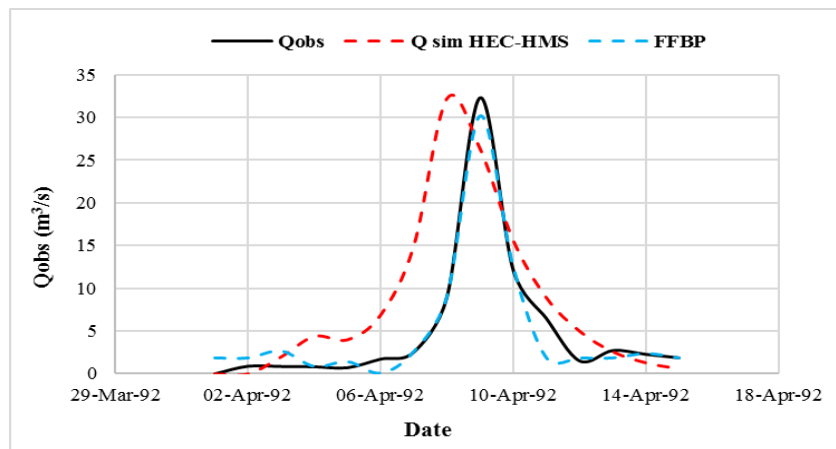


Figure IV.27. Modélisation de l'évènement de la première crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli).

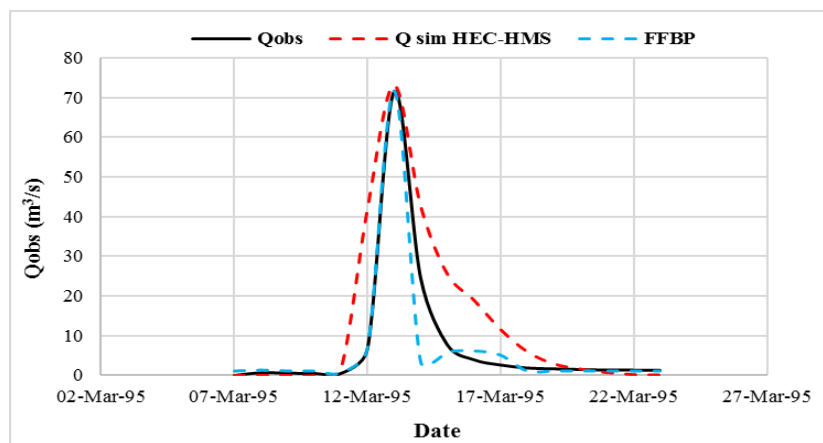


Figure IV.28. Modélisation de l'évènement de la deuxième crue lors de validation (Bassin Sidi Abdelli).

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé est très proche du débit observé dans la plupart des évènements des crues.

On remarque que, lors de calage et validation, les résultats obtenus par HEC HMS sont très proches de ceux obtenus par les réseaux de neurones. Les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées.

Les paramètres d'évaluation des performances sont représentés dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8. Récapitulatif des paramètres d'évaluation des performances.

<b>Bassin versant Sidi Abdelli</b>				
<b>Crues</b>	<b>Modèles</b>	<b>RMSE</b>	<b>NSE</b>	<b>R</b>
<b>I</b>	HEC-HMS	2.731	0.939	0.982
	FFBP	3.125	0.92	0.96
<b>II</b>	HEC-HMS	7.368	0.154	0.728
	FFBP	1.593	0.96	0.982

Les résultats montrent que le débit de l'hydrogramme de ruissellement simulé est très proche du débit observé dans la plupart des évènements des crues.

On constate que, lors de calage et validation, les résultats obtenus par HEC HMS coïncident avec ceux obtenus par les réseaux de neurones. Les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées.

#### **IV.8. Conclusions**

Dans ce chapitre, on a modélisé la relation Pluie-Débit liquide avec deux modèles différents : HEC HMS et RNA. On a appliqué ces modèles au bassin versant de Dehemcha, Boukerdane et Sidi Abdelli. La modélisation par HEC HMS et RNA à l'échelle de crue à donner de très bons résultats. La capacité prévisionnelle des modèles ainsi que leur stabilité paraissent bonnes pour les prévisions des débits liquides via la transformation pluie-débit. A titre de comparaison, les résultats de deux modèles sont très proches. Par contre, les modèles obtenus à pas temps journalier et mensuel par les réseaux de neurones sont médiocres. A ces échelles, le modèle RNA ne pas être utilisé pour prédire la relation pluie débit.

Néanmoins, il est à signaler que plus les données sont nombreuses plus les prédictions approchent des valeurs réelles.

# **Conclusion Général**

## Conclusion Général

La modélisation du pluie-débit est très importante pour simuler la réponse du bassin versant aux précipitations et produire un hydrogramme de débit. Dans cette étude, le modèle HECHMS et les réseaux de neurones ont été utilisés pour simuler le processus pluie-débit dans les trois bassins versant (Dehemcha, Boukerdane, Sidi Abdelli) situé au nord de l'Algérie.

Nous avons utilisé dans ce travail les données telles que l'hydro métrologie, le type de sol, l'occupation des sols et le modèle numérique de terrain. Le modèle numérique de terrain (DEM) avec une résolution de 30 m a été utilisé pour délimiter les bassins versants, générer le réseau principal de cours d'eau et extraire toutes les caractéristiques morphométriques et physiques nécessaires à cette étude. Pour la zone d'étude, l'occupation du sol a été librement téléchargée à partir de (Esri ; Global Land Co-verMap), alors que les données des types de sol a été extraites du site Web de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture FAO afin d'attribuer la carte de CN et de prévoir le débit. La relation pluie-débit est examinée à l'aide de la méthode de SCS-CN et la méthode d'hydrogramme unitaire SCS. Le SIG intégré dans le modèle HEC-HMS a été utilisé pour générer un modèle de bassin à partir des données de terrain (MNT) et les paramètres d'entrée tels que le Curve Number, le temps de latence (LogTime) et les abstractions initiales sont utilisés pour simulé la processus pluie-débit.

Les résultats obtenus montrent que les performances du modèle HEC-HMS été satisfaisantes pour simuler les débits de pointe. Le débit de pointe simulé très proche de celui observé dans les trois bassins versant. Les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées. Lors de calage, le coefficient de corrélation R varié entre 0,90 à 0,98 et celui de Nash varié entre 0,55 à 0,94. Par contre, lors de la validation, le coefficient de corrélation R varié entre 0,73 à 0,92 et celui de Nash varié entre 0,37 à 0,74.

Les résultats obtenus par les réseaux de neurones à l'échelle de crue sont très intéressants.

Les performances du modèle ont été évaluées à que le coefficient de corrélation (R) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE).

On a constaté que, lors de calage, les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs observées. Pour les trois bassins versants, le modèle pourrait être utilisé pour prédire le débit précisément varié entre R 0,92 et 0,98 et la Nash varié entre 0.91 et 0.94. Ces paramètres sont hautement significatifs et indiquent que le modèle des réseaux de neurones et en mesure de bien répondre aux données d'apprentissage-validation et capable de les rapprochés.

A titre de comparaison, la performance du modèle réseau de neurone, FFBP, été satisfaisante pour modéliser le processus pluie-débit à l'échelle de crue par rapport au modèle HEC-HMS, Où il a réduit le taux l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et augmenté la valeur de Nash-Sutcliffe (NSE) et la valeur de corrélation (R).

A l'échelle journalière et mensuelle, les réseaux de neurones, n'ont pas donnés des bons résultats. On a remarqué que le modèle neuronal trouve des difficultés de généralisation due aux fluctuations journalières et mensuelles des pluies-débits et du degré de complexité de l'interaction de ces deux paramètres, ce qui rend la tâche de modéliser encore plus difficile. Pour cela, dans notre cas, le modèle neuronal ne pas être utilisé pour prédire la relation pluie débit.

Finalement nous pourrons dire que cette étude nous a renseigné sur l'importance de la relation pluie débit afin d'appréhender les connaissances sur les phénomènes hydrologiques.

Comme perspectives, nous proposons :

- L'utilisation des autres modèles neuronaux pouvant aboutir à des résultats satisfaisants ;
- Augmenter le nombre de stations pluviométriques et hydrométriques afin de rapprocher le maximum possible des résultats réels ;
- Introduire d'autre paramètres d'entrées qui influent sur la relation pluie débit, tels que température, évapotranspiration, l'humidité ;
- L'utilisation d'une hybridation des réseaux de neurones telle que logique floue pour augmenter la transparence du modèle.

## Les références

- Musy, A., & High, C. (2004).**Hydrologie.Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Habchi, I. (2019). Modélisation pluies débit dans un milieu semi-aride par réseau neuro artificiel et neuro-flou. Oum El Bouaghi. Mémoire de master. Université d’oum el bouaghi.
- TARIK, B. A., & NOUREDDINE, D. (2005).** Quantification du transport solide par la technique floue, application au barrage de Ben Amrane.
- SAAD, B. (2014).** Hydraulique et hydrologie (éd. 3e). Quebec, Canada : Presses de l'université du Quebec.
- Thibault MATHEVET le 04 Novembre 2005** à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts. Centre de : Paris. QUELS MODÈLES PLUIE-DEBIT GLOBAUX.
- Musy, A., 2005.** Cours d'hydrologie générale, Laboratoire d'hydrologie et Aménagements (HYDRAM), Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Suisse. Cours online, URL: (a)
- Gaume, E. (2002).** *Eléments d'analyse sur les crues éclair*. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêt. Paris, 359 p.
- Ambroise B. 1998** Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 1. Processus et facteurs. Revue des Sciences de l'eau Vol. II [4] ,471-495.
- Mathevet, T., 2005.** Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants (PhD Thesis). Thèse de Doctorat, à l’Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts.
- BERTHIER E.(2008)** digital elevation models and the monitoring of glacier elevation changes in North-West Canada and South-East Alaska.
- Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E., et Rasmussen J. (1986).** *An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. , 87(1-2), 0–59. doi:10.1016/0022-1694(86)90114-9.*
- MORIN G., PAQUET P. 1995.** Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU, guide de l'utilisateur, version 1.0B windows – Rapport de recherche n° 435, INRS-Eau, Québec.
- BEVEN K.J 1992.** The future of distributed modelling. Hydrol. Processes, n° 6, pp. 253- 254.
- BEVEN K.J. 1989.** Changing ideas in hydrology, the case of physically-based models. Journal of hydrology, n° 105, pp. 157-172.

**Charbonneau, R., Fortin, J. P. & Morin, G. (1977)** The CEQUEAU model: description and examples of its use in problems related to water resource management. *Hydrol. Sci. Bull.* 22, 193–202.

**Michel, C. (1983).** Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche* (1), 39-44. doi.org/10.1051/lhb/1983004

**O'DONNELL, T. et P. CANEDO, (1980)** The reliability of conceptual basin model calibration. Publication no. 129, A.I.S.H., Symposium sur les prévisions hydrologiques, Oxford, 571 pages.

**Wu, B., Wang, Z., Zhang, Q., Shen, N., & Liu, J., 2017.** Modelling sheet erosion on steep slopes in the loess region of China. *Journal of Hydrology*, 553, 549–558. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.07.017.

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

**Anctil, F., Rousselle, J., & Lauzon, N. (2012).** *Hydrologie: Cheminement de l'eau*. Presses inter Polytechnique.

**Pingale, S. M., Chandra, H., Sharma, H. C., & Mishra, S. S. (2012).** Morphometric analysis of Maun watershed in Tehri-Garhwal district of Uttarakhand using GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 3(2), 373-387.

**Selvam, S., Dar, F. A., Magesh, N. S., Singaraja, C., Venkatramanan, S., & Chung, S. Y. (2015).** Application of remote sensing and GIS for delineating groundwater recharge potential zones of Kovilpatti municipality. *Tamil Nadu Using IF Technique Earth Sci Inform.* doi, 10.

**Jaiswal, R. K., Sohrat, A., & Birendra, B. (2020).** Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall-runoff models. *Appl Water Sci.*

**Meresa, H. (2019).** Modelling of river flow in ungauged catchment using remote sensing data: application of the empirical (SCS-CN), artificial neural network (ANN) and hydrological model (HEC-HMS). *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 257-273.

**Castro, C. V., & Maidment, D. R. (2020).** GIS preprocessing for rapid initialization of HEC-HMS hydrological basin models using web-based data services. *Environmental Modelling & Software*, 130, 104732.

**Aliye, M. A., Aga, A. O., Tadesse, T., & Yohannes, P. (2020).** Evaluating the performance of HEC-HMS and SWAT hydrological models in simulating the rainfall-runoff process for

data scarce Region of Ethiopian Rift Valley Lake Basin. *Open Journal of Modern Hydrology*, 10(04), 105.

**Devia, G. K., Ganasri, B. P., &Dwarakish, G. S. (2015).** A review on hydrological models. *Aquatic procedia*, 4, 1001-1007.

**Tassew, B. G., Belete, M. A., &Miegel, K. (2019).** Application of HEC-HMS model for flow simulation in the Lake Tana basin: The case of GilgelAbay catchment, upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrology*, 6(1), 21.

**Natarajan, S., &Radhakrishnan, N. (2020).** An integrated hydrologic and hydraulic flood modeling study for a medium-sized ungauged urban catchment area: A case study of Tiruchirappalli City Using HEC-HMS and HEC-RAS. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 101, 381-398.

**Engineers, U. A. C. (2016).** HEC-HMS User's Manual.

**Mokhtari, E. H., Remini, B., &Hamoudi, S. A. (2016).** Modelling of the rain-flow by hydrological modelling software system HEC-HMS-watershed's case of wadiCheliff-Ghrib, Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 30(1), 87.

**Fisher, P. F., & Tate, N. J. (2006).** Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in physical Geography*, 30(4), 467-489.

**Shadeed, S., &Almasri, M. (2010).** Application of GIS-based SCS-CN method in West Bank catchments, Palestine. *Water Science and Engineering*, 3(1), 1-13.

**Merwade, V. (2012).** Creating SCS curve number grid using HEC-GeoHMS. Purdue University.

**Halwatura, D., &Najim, M. M. M. (2013).** Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental modelling & software*, 46, 155-162.

**Hamdan, A. N. A., Almuktar, S., &Scholz, M. (2021).** Rainfall-runoff modeling using the hec-hms model for the al-adhaim river catchment, northern iraq. *Hydrology*, 8(2), 58.

**Engineers, U. A. C. of. (2021).** Hydrologic Engineering Center HEC-HMS User ' s Manual. Version 4., 627.

**Ismael, O., Joseph, S., & Patrick, K. H. (2017).** HEC-HMS model for runoff simulation in Ruiru reservoir watershed. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 6(4), 1-7.



**Scharffenberg. (2016).** Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA (USA), 1, 598.

**. webographie**

(a) <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>).

(b) <https://livingatlas.arcgis.com/en/home/>.

(c) <http://www.fao.org/soil>

(d) <https://www.earthexplorer.usgs.gov/>