

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**  
**جامعة مولود معمري**  
**Faculté des sciences biologiques et sciences agronomiques**  
**Département des sciences géologiques**



**UMMTO**

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de**  
**MASTER EN SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**

**Filière : Géologie**

**Spécialité : Hydrogéologie**

**Par : HADJ SAID Mouloud**

**Thème :**

**Modélisation hydrologique du bassin de la Mitidja (Sous bassin d'El Harrach, W. Alger)**

**Soutenu publiquement le 30/09/ 2025 devant le jury composé de :**

M. ZEGHOUANE Houcine	Maître de conférences A à l'UMMTO	Président
Mr BRAHMI Smail	Maître assistant A à l'UMMTO	Examineur
Mr DROUCHE Abdelmadjid	Maître de conférences B à l'UMMTO	Promoteur

# **DÉDICACE**

## ***Je dédie ce modeste travail***

*À la mémoire de mes chers grands-parents,*

*Dont les prières, les bénédictions et l'amour continuent de m'accompagner et de m'inspirer.*

*À ma chère mère, source infinie de tendresse et de sacrifices, dont l'amour et les prières ont toujours guidé mes pas*

*À mon cher père, modèle de courage et de sagesse, dont les efforts et les conseils m'ont donné la force de persévérer.*

*À mes frères Nabil et Yanis, pour leur affection, leur soutien constant et leur présence réconfortante tout au long de mon parcours.*

*À mes cousines Ryma, Kika et Sonia, pour la joie, l'affection et le soutien qu'elles m'ont toujours apportés, et pour la place spéciale qu'elles occupent dans ma vie.*

*À mes chers camarades et amis de parcours, Dabi, Djidji, Navel et Da Meziane, pour les moments de partage, d'entraide et d'amitié qui ont marqué mes années d'étude et rendu ce chemin plus agréable.*

*À mon amie Navel, pour son amitié sincère, son soutien indéfectible et la place précieuse qu'elle occupe dans ma vie.*

*À tous mes amis, pour leur affection, leurs encouragements et les moments de bonheur partagés, qui ont enrichi mon parcours personnel*

*Hadj Said Mouloud*

## **REMERCIEMENTS**

*Avant tout, je rends grâce à Allah Tout-Puissant, le Clément et le Miséricordieux, source de toute sagesse et de toute réussite, qui m'a offert la santé, la patience et le courage indispensables pour mener à bien ce travail et pour franchir les étapes de mon parcours académique.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Président du jury Mr. ZEGHOUANE Houcine pour l'honneur qu'il m'a accordé en acceptant de présider cette soutenance et pour l'intérêt qu'il a porté à ce mémoire.*

*Mes sincères remerciements s'adressent également à l'ensemble des membres du jury Mr BRAHMI Smail, pour leur disponibilité, leur bienveillance et leurs remarques constructives qui ne manqueront pas d'enrichir ce travail.*

*Je suis particulièrement redevable à mon encadreur M. DROUCHE Abdelmadjid, dont l'accompagnement constant, les orientations éclairées, la patience et les précieux conseils ont été essentiels à l'aboutissement de cette étude.*

*Ma reconnaissance s'étend à tous les enseignants du département, qui ont su, au fil des années, transmettre leur savoir, leur expérience et leur passion, contribuant ainsi à ma formation scientifique et intellectuelle.*

*J'exprime aussi mes remerciements les plus sincères à ma famille bien-aimée. À mes parents, pour leurs sacrifices inestimables, leurs encouragements, leurs prières et leur amour inconditionnel, je dois une part essentielle de ce succès. À mes frères, pour leur soutien moral et leurs encouragements permanents.*

*Je souhaite également exprimer ma gratitude à mes amis et collègues, pour leur solidarité, leur aide et leur présence, qui ont rendu ce parcours plus agréable et plus enrichissant.*

*Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire et à la réussite de mes études. Qu'elles trouvent ici l'expression de ma reconnaissance et de ma considération les plus sincères.*

## Résumé :

La présente étude porte sur la plaine de la Mitidja, vaste dépression située au sud d'Alger et couvrant une superficie d'environ 1300 km<sup>2</sup>. Cette région, à forte valeur agricole, industrielle et démographique, se distingue par sa richesse en ressources hydriques, tant superficielles que souterraines, et constitue un espace stratégique pour le développement socio-économique.

L'analyse géologique et hydrogéologique a mis en évidence une structure complexe façonnée depuis le Pliocène, caractérisée par l'alternance de formations marines et continentales. Deux aquifères majeurs dominent : celui de l'Astien et celui du Quaternaire, qui représentent des réservoirs essentiels pour l'alimentation en eau de la région. Toutefois, leur exploitation intensive et les pressions anthropiques croissantes accentuent leur vulnérabilité.

Sur le plan hydroclimatique, l'étude réalisée à partir de données couvrant la période 2001–2021 montre que la Mitidja bénéficie d'un climat méditerranéen, marqué par des précipitations concentrées en automne et en hiver et des étés secs. Les analyses pluviométriques, selon les méthodes arithmétiques et de Thiessen, indiquent une lame d'eau moyenne annuelle de 790,7 mm. Le bilan hydrologique annuel se répartit entre une évapotranspiration réelle de 541,8 mm, un ruissellement de 164,8 mm et une infiltration estimée à 84,1 mm. Ces résultats confirment le rôle déterminant des conditions climatiques dans le fonctionnement hydrologique du bassin.

L'application du modèle GR1A à l'échelle annuelle a montré de bonnes performances. Les résultats obtenus indiquent un coefficient de Nash de 0,72, un coefficient de détermination

$R^2 = 0,72$  et un bilan hydrique de 99,8 %. Ces indicateurs traduisent une bonne concordance entre les débits observés et simulés, confirmant la pertinence de ce modèle pour l'analyse hydrologique globale du bassin. En revanche, l'utilisation du modèle GR2M à l'échelle mensuelle, bien qu'ayant fourni des résultats acceptables lors du calage, n'a pas donné de validation fiable. Les écarts importants observés entre les débits simulés et mesurés n'ont pas permis de poursuivre la modélisation avec ce modèle.

En conclusion, l'étude met en évidence l'importance de la modélisation hydrologique pour la compréhension des écoulements dans la Mitidja, tout en soulignant les limites de certains modèles selon l'échelle temporelle considérée.

**Mots-clés** : Mitidja, bassin versant, géologie, hydroclimatologie, bilan hydrologique, modélisation, GR1A, GR2M, El Harrach.

## **Abstract:**

This study focuses on the Mitidja plain, a large depression located south of Algiers, covering an area of about 1300 km<sup>2</sup>. This region, with high agricultural, industrial, and demographic value, is distinguished by its richness in water resources, both surface and groundwater, and represents a strategic area for socio-economic development.

The geological and hydrogeological analysis revealed a complex structure shaped since the Pliocene, characterized by alternating marine and continental formations. Two main aquifers dominate: the Astian and the Quaternary, which are essential reservoirs for water supply in the region. However, their intensive exploitation and increasing anthropogenic pressures highlight their vulnerability.

From a hydroclimatic perspective, the study based on data from 2001–2021 shows that Mitidja is subject to a Mediterranean climate, with rainfall concentrated in autumn and winter and dry summers. Rainfall analyses, using the arithmetic and Thiessen methods, indicate an average annual depth of 790.7 mm. The annual water balance is divided into an actual evapotranspiration of 541.8 mm, runoff of 164.8 mm, and infiltration of 84.1 mm. These results confirm the significant influence of climatic conditions on the hydrological functioning of the basin.

The application of the GR1A model at the annual scale showed good performance. The results yielded a Nash coefficient of 0.72, a determination coefficient  $R^2 = 0.72$ , and a water balance of 99.8 %. These indicators demonstrate a strong agreement between observed and simulated flows, confirming the relevance of this model for global hydrological analysis. On the other hand, the use of the GR2M model at the monthly scale, although providing acceptable results during calibration, did not produce reliable validation. The significant discrepancies observed between simulated and measured flows did not allow the continuation of modeling with this approach.

In conclusion, this study highlights the importance of hydrological modeling for understanding runoff processes in the Mitidja, while underlining the limitations of certain models depending on the considered temporal scale.

**Keywords:** Mitidja, watershed, geology, hydroclimatology, water balance, hydrological modeling, GR1A, GR2M, El

## ***LISTE DES ACRONYMES***

ANRH : Agence nationale des ressources hydriques
AIGA : Analyse Informatisée des Grandissements d’Averse (Météo-France & Cemagref)
ANU : Australian National University (Université Nationale Australienne)
CEH : Centre for Ecology and Hydrology (Royaume-Uni)
CEQUEAU : Conceptual model for the study of water quantity and quality (modèle hydrologique canadien)
Cemagref : Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (France, devenu IRSTEA puis INRAE)
DHI : Danish Hydraulic Institute (Institut Danois d’Hydraulique)
ETP : Évapotranspiration potentielle
ETR : Évapotranspiration réelle
GR1A : Génie Rural, modèle pluie-débit à 1 paramètre (échelle annuelle)
GR2M : Génie Rural, modèle pluie-débit à 2 paramètres (échelle mensuelle)
GR3H : Génie Rural, modèle pluie-débit à 3 paramètres (échelle horaire)
GR4J : Génie Rural, modèle pluie-débit à 4 paramètres (échelle journalière)
IHACRES : Identification of unit Hydrographs and Component flow from Rainfalls, Evaporation and Streamflow data
MIKE SHE : Modelling Integrated Kinetic and Ecological – Simulation of Hydrology and Environment
NCEP : National Centers for Environmental Prediction (USA)
Nash ou NSE : Nash-Sutcliffe Efficiency (critère statistique de performance des modèles hydrologique)
ONM : Office national de la météorologie
PAC : Plan d’aménagement côtier
P : Précipitations
Q : Débit
RFU : Réserve facilement utilisable (en eau du sol)
R <sup>2</sup> : Coefficient de détermination
SCS : Soil Conservation Service (méthode hydrologique pour le ruissellement)

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b>	1
<b>CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE</b>	
<b>1- Introduction</b>	3
<b>2- Cadre Géographique</b>	3
<b>3- Cadre géomorphologique</b>	3
<b>4- Aspect socio-économique</b>	4
<b>4-1- Les activités agricoles dans la Mitidja</b>	4
<b>4-2- Les activités industrielles dans la Mitidja</b>	6
<b>5- Démographie</b>	6
<b>6- Couverture et usage du sol</b>	7
<b>7- Pédologie et couvert végétal</b>	8
<b>8- Conclusion</b>	8
<b>CHAPITRE 2 : CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE</b>	
<b>1- Introduction</b>	10
<b>2- Contexte géologique</b>	10
<b>2-1- Sédimentation du bassin de la Mitidja</b>	11
<b>2-1-1- Pliocène marin</b>	11
<b>2-1-2- Quaternaire marin</b>	11
<b>2-1-3- Continental</b>	11
<b>2-2 Histoire de l'évolution géologique de la plaine de la Mitidja</b>	12
<b>3- Contexte hydrogéologique</b>	14
<b>3-1- Réservoir du l'Astien</b>	14
<b>3-2- Réservoir du Quaternaire</b>	14
<b>3-3- Interactions hydrogéologiques entre l'aquifère astien et les alluvions quaternaires</b>	15
<b>4- Conclusion</b>	17
<b>Chapitre 3 : Hydroclimatologie</b>	
<b>1- Introduction</b>	19
<b>2- Les stations de mesures</b>	19
<b>3- Le climat</b>	20
<b>4- Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles</b>	20
<b>4-1- Précipitations moyennes mensuelles dans la Mitidja</b>	20
<b>4-2- Précipitations moyennes annuelles dans la Mitidja</b>	24
<b>5- La température</b>	25
<b>6- Le vent</b>	27
<b>7- Détermination de la lame d'eau précipitée</b>	28
<b>7-1- La méthode Arithmétique</b>	28
<b>7-2- La méthode de Thiessen</b>	28
<b>8- L'évapotranspiration</b>	30
<b>8-1- L'évapotranspiration potentielle ETP</b>	30
<b>8-2- L'évapotranspiration réelle ETR</b>	34
<b>9- Lamme d'eau ruisselée</b>	37
<b>10- Lamme d'eau infiltrée</b>	37
<b>11- Estimation du bilan hydrologique</b>	38
<b>12- Conclusion</b>	38

<b>Chapitre 4 : Modélisation hydrologiques</b>	
<b>1- Introduction</b>	40
<b>2- Définition</b>	40
<b>2-1- Hydrologie</b>	40
<b>2-2- Le cycle de l'eau</b>	40
<b>2-3- Modélisation hydrologique</b>	41
<b>3- Principes de modélisation</b>	42
<b>4- Objectifs de la modélisation hydrologique</b>	43
<b>5- Classification des modèles hydrologiques</b>	44
<b>5-1- Modèles stochastiques</b>	45
<b>5-2- Modèles déterministes</b>	45
<b>6- Critères d'évaluation de modélisation</b>	47
<b>6-1- Erreur moyenne</b>	47
<b>6-2- Erreur quadratique moyenne</b>	47
<b>6-3- Coefficient de Nash-Sutcliffe</b>	48
<b>7- Typologie des modèles</b>	48
<b>7-1- Modèle global (IHACRES)</b>	49
<b>7-2- Modèle AIGA</b>	49
<b>7-3- Modèle CEQUEAU</b>	50
<b>7-4- Modèle MIKE SHE</b>	51
<b>8- Présentation du modèle choisi pour l'étude : Modèles du Génie Rural GR</b>	52
<b>8-1- Modèle pluie-débit annuel GR1A</b>	53
<b>8-2- Le modèle pluie-débit mensuel GR2M</b>	54
<b>8-3- Le modèle pluie-débit journalier GR4J</b>	57
<b>8-4- Le calage et validation d'un modèle</b>	61
<b>8-5- Critères de qualité</b>	62
<b>8-5-1- Le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)</b>	62
<b>8-5-2- Le critère de Nash</b>	62
<b>9- Conclusion</b>	63
<b>CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)</b>	
<b>1- Introduction</b>	65
<b>2- Choix de l'unité hydrologique modélisable et préparation des données</b>	65
<b>3- Préparation des données</b>	65
<b>3-1- Précipitations</b>	65
<b>3-2- Débit</b>	67
<b>3-3- Evapotranspiration potentielle « ETP »</b>	67
<b>3-4- Température</b>	68
<b>4- Période de modélisation</b>	69
<b>5- Utilisation du logiciel Excel pour la mise en œuvre des modèles GR1A et GR2M</b>	69
<b>6- Modélisation au pas de temps annuel</b>	70
<b>6-1- Données d'entrée et mise en route du modèle</b>	70
<b>6-2- Calage du modèle</b>	70
<b>6-3- Validation du modèle</b>	71
<b>6-4- Application</b>	71
<b>6-4-1- Résultats du calage</b>	71
<b>6-4-2- Résultats de la validation</b>	73

<b>7- Modélisation au pas de temps mensuel</b>	73
<b>7-1- Données d'entrée et mise en route du modèle</b>	73
<b>7-2- Calage du modèle</b>	74
<b>7-3- Validation du modèle</b>	74
<b>7-4- Application</b>	75
<b>8- Conclusion</b>	75
<b>Conclusion Générale</b>	
<b>Conclusion Générale</b>	<b>77</b>
<b>Bibliographie</b>	

## LISTE DES FIGURES

<b>1</b>	<b>Carte de situation de la Mitidja</b>	4
<b>2</b>	<b>carte des sous bassins versants de la Mitidja</b>	5
<b>3</b>	<b>Utilisation des sols dans le bassin algérois 02A d'après le projet © ESA WorldCover / Données modifiées du satellite Copernicus Sentinel (2021) traitées par le consortium ESA WorldCover.</b>	7
<b>4</b>	<b>Evolution de la Mitidja pendant le Pliocène et le Quaternaire (Binnie et Partners, 1983)</b>	11
<b>5</b>	<b>Log stratigraphique de la plaine de la Mitidja (Mimouni, 2010)</b>	13
<b>6</b>	<b>Schéma des interactions entre l'aquifère du quaternaire et l'aquifère de l'Astien</b>	16
<b>7</b>	<b>Précipitations moyennes mensuelles dans la Mitidja (2001-2021)</b>	23
<b>8</b>	<b>Précipitations moyennes annuelles dans la Mitidja (2001-2021)</b>	25
<b>9</b>	<b>Variation de la température mensuelles maximales, minimales et moyennes (2006-2015)</b>	26
<b>10</b>	<b>Vitesses du vent mensuelles maximales, minimales et moyennes (2006-2015)</b>	27
<b>11</b>	<b>le cycle hydrologique (PEZET ,2014)</b>	41
<b>12</b>	<b>Schématisme d'un modèle global pluie-débit (Koffi, 2007).</b>	42
<b>13</b>	<b>Fonction de production et de transfert dans un modèle hydrologique (Morin, 1991).</b>	43
<b>14</b>	<b>Les principaux objectifs de la modélisation hydrologique (Perrin, 2002)</b>	44
<b>15</b>	<b>Différentes approches de la modélisation. (Bekkadour,2020).</b>	44
<b>16</b>	<b>Structure du modèle IHACRES (Maftai, 2002)</b>	49
<b>17</b>	<b>La fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU [MORIN]</b>	50
<b>18</b>	<b>La fonction de transfert du modèle CEQUEAU [MORIN]</b>	51
<b>19</b>	<b>Structure du modèle SHE [MAFTAI-2002]</b>	52
<b>20</b>	<b>Schéma de la structure du modèle GR2M. [GHERISSI.2012]</b>	56
<b>21</b>	<b>Schéma de la structure du modèle GR4J [Perrin, 2000]</b>	57
<b>22</b>	<b>Structure du modèle GR4J (Perrin et al., 2003)</b>	58
<b>23</b>	<b>Stations pluviométriques et les polygones de Thiessen du bassin d'El Harrach.</b>	66
<b>24</b>	<b>Période de recoupement entre les différentes séries de données d'entrée du modèle.</b>	69
<b>25</b>	<b>Illustration des étapes de modélisation sous GR1A.</b>	70
<b>26</b>	<b>Graphiques obtenus après le calage du modèle sur la période 1980-1990.</b>	72
<b>27</b>	<b>Graphique obtenu en phase de validation du modèle sur la période 1991-2007.</b>	73

## LISTE DES TABLEAUX

<b>1</b>	<b>Evolution des activités agricoles de la Mitidja</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Caractéristiques des stations hydroclimatiques (2001-2021)</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>Précipitations moyennes mensuelles dans la Mitidja en mm (2001-2021)</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>Précipitations moyennes annuelles dans la Mitidja en mm (2001-2021)</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Températures mensuelles maximales, minimales et moyennes (2006-2015)</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Vitesses du vent mensuelles maximales, minimales et moyennes (2006-2015)</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Précipitations dans les stations</b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b>Résultats de la méthode de Thiessen.</b>	<b>29</b>
<b>9</b>	<b>Les valeurs mensuelles de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de 2001-2014</b>	<b>30</b>
<b>10</b>	<b>Synthèse des totaux annuels de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de 2001-2014</b>	<b>34</b>
<b>11</b>	<b>résultats du calcul de l'évapotranspiration réelle ETR (formule de coutagne)</b>	<b>35</b>
<b>12</b>	<b>Bilan de Thornthwaite à la station Dar El Beïda</b>	<b>36</b>
<b>13</b>	<b>Valeurs de l'ETR obtenue par les trois méthodes</b>	<b>36</b>
<b>14</b>	<b>récapitulatif des différents termes du bilan hydrologique de la station Dar El Beïda (2001-2014)</b>	<b>38</b>
<b>15</b>	<b>Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit.</b>	<b>47</b>
<b>16</b>	<b>Modélisation utilisée avec modèle hydrodynamique de MIKE SHE</b>	<b>51</b>
<b>17</b>	<b>Valeurs des paramètres du modèle GR1A obtenues sur un large échantillon de Bassins versants.</b>	<b>54</b>
<b>18</b>	<b>Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants. [GHERISSI,2012]</b>	<b>56</b>
<b>19</b>	<b>Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants. [BOUREK,2010]</b>	<b>61</b>
<b>20</b>	<b>Stations pluviométrique</b>	<b>66</b>
<b>21</b>	<b>les débits annuels (m<sup>3</sup>/s) et la lame d'eau écoulée (mm) 1980-2007</b>	<b>67</b>
<b>22</b>	<b>les valeurs moyennes annuelles d'évapotranspiration potentielle (mm)</b>	<b>68</b>
<b>23</b>	<b>Caractéristiques des stations de température</b>	<b>68</b>
<b>24</b>	<b>les températures moyennes annuelles (°C)</b>	<b>69</b>
<b>25</b>	<b>Résultats du calage du modèle GR1A sur la période 1980-1990.</b>	<b>72</b>
<b>26</b>	<b>Résultats de la validation du modèle GR1A sur la période 1991-2007.</b>	<b>73</b>
<b>27</b>	<b>Valeur des paramètres du modèle GR2M.</b>	<b>74</b>
<b>28</b>	<b>Résultats du calage du GR2M sur la période 1980-1988.</b>	<b>75</b>

*Introduction*

*Générale*

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'eau constitue une ressource vitale pour l'ensemble des activités humaines et pour l'équilibre des écosystèmes. Dans un contexte marqué par la variabilité climatique et la pression croissante liée au développement démographique, agricole et industriel, la gestion durable des ressources en eau représente un enjeu majeur pour de nombreux pays, et plus particulièrement pour l'Algérie. En effet, les ressources hydriques y sont caractérisées par une répartition spatiale et temporelle très contrastée, souvent accentuée par des épisodes de sécheresse et une demande en constante augmentation.

Parmi les régions stratégiques du pays, la plaine de la Mitidja occupe une place particulière. Située au Sud de la baie d'Alger, elle constitue à la fois un espace agricole de premier ordre, un réservoir en ressources hydriques et une zone fortement urbanisée et industrialisée. Ce territoire est marqué par des conditions hydroclimatiques de type méditerranéen, caractérisées par une alternance de périodes humides et sèches, influençant fortement le régime des cours d'eau et la recharge des nappes.

La compréhension du fonctionnement hydrologique de cette région est donc essentielle pour assurer une gestion efficace des ressources en eau et anticiper les risques liés aux extrêmes hydrologiques (crues, sécheresses). À cet effet, l'analyse repose à la fois sur l'étude du contexte géologique et hydrogéologique, qui conditionne la disponibilité et la dynamique des aquifères, et sur l'étude hydroclimatique, qui permet de quantifier les apports et les pertes en eau au sein du bassin.

Par ailleurs, la modélisation hydrologique constitue un outil incontournable pour simuler le comportement des bassins versants et évaluer l'impact des conditions climatiques et des pressions anthropiques sur les écoulements. Dans ce travail, deux modèles conceptuels de la famille GR (Génie Rural) ont été appliqués au bassin de l'oued El Harrach : le modèle GR1A, à l'échelle annuelle, et le modèle GR2M, à l'échelle mensuelle. Le premier a montré des performances satisfaisantes, tandis que le second a révélé des limites, soulignant l'importance du choix de l'échelle temporelle dans l'efficacité des modèles hydrologiques.

Ainsi, ce mémoire s'articule autour de trois volets principaux : une présentation de la zone d'étude et de son cadre géologique et hydrogéologique, une analyse hydroclimatique basée sur le bilan hydrique, et enfin, l'application et l'évaluation des modèles hydrologiques GR1A et GR2M. L'objectif est de contribuer à une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique de la Mitidja et de fournir des éléments utiles pour la gestion durable de ses ressources en eau.

***CHAPITRE 1 :***  
***PRÉSENTATION DE LA***  
***ZONE D'ÉTUDE***

### CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

#### 1- Introduction

La Mitidja est une zone située près d'Alger et s'étale sur une surface d'environ 1300 km<sup>2</sup>. C'est une zone qui connaît une dynamique particulière par les activités agricoles et industrielles. La Mitidja est connue par ses richesses naturelles telles que les grandes surfaces de terres fertiles et les ressources en eaux souterraines et superficielles. On peut citer aussi les caractéristiques topographique, pédologique et climatique qui ont permis l'installation favorable à l'agriculture.

Dans ce chapitre, on présente la situation géographique, géomorphologique, l'aspect socio-économique et les enjeux qui menacent les ressources en eau dans la région.

#### 2- Cadre Géographique

La plaine de la Mitidja s'étend au Sud de la ville d'Alger selon une orientation ENE-OSO, entre oued Boudouaou à l'Est et la région occidentale de l'oued Mazafran à l'Ouest. Elle occupe une superficie de 1300 km<sup>2</sup> avec une longueur d'environ 80 km et une largeur variant de 8 à 17 km.

Sur le plan administratif, la zone d'étude est partagée entre les wilayas suivantes : Boumerdes, Alger, Blida et Tipaza.

De point de vue géographique ; la Mitidja se positionne entre les longitudes 2° 23' 27'' et 3° 23' 13'' E et les latitudes 36° 24' 26'' et 36° 47' 13'' N.

#### 3- Cadre géomorphologique

La topographie de la Mitidja est généralement plane, avec une pente d'environ 0.5% s'inclinant d'une élévation de 100-150m sur la limite sud et à 20 m environ sur la limite Nord, la pente peut atteindre 2 à 5 % sur les cônes de déjections des dépôts fluviaux.

La Mitidja est subdivisée en quatre unités géomorphologique principales, allant du Nord au Sud comme suit :

- Les Monts du Sahel : ce relief, orienté NE-SO avec une faible pente, est compris entre 200 et 250 m d'altitude. Elle constitue une limite depuis El Harrach jusqu'à Oued Nador, sous forme d'un bombement anticlinale à faible pente séparant la plaine de la mer. Les précipitations qui tombent sur la partie Nord s'écoulent directement vers la méditerranée.
- La plaine : avec une pente faible et une altitude moyenne d'environ 50 m du. La plaine de la Mitidja est délimitée au Nord par le Sahel, au Sud, par les piémonts de l'Atlas blidéen. Elle est de loin la plus intéressante par ses ressources en eaux souterraines. C'est également la région la plus développée du point de vue agricole, qu'industrielle et démographique.

## CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

- Piémonts de l'Atlas blidéen : c'est une zone de déjection formé par érosion, avec une altitude qui peut atteindre 140 m. Elle dissimule la liaison structurale Atlas de Blida-plaine de la Mitidja.

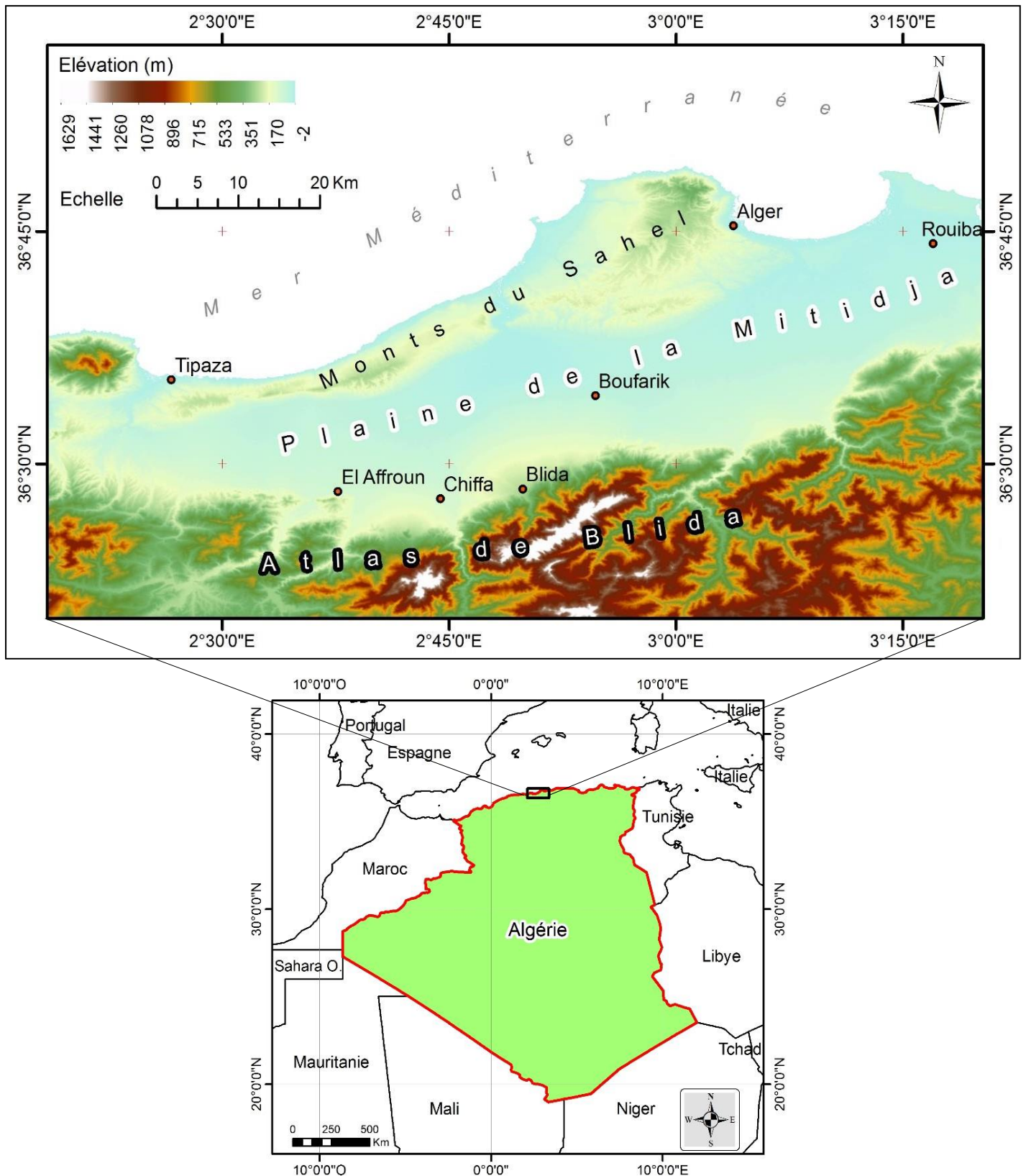


Figure 1 : Carte de situation de la Mitidja

## CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

- L'Atlas de Blida : une série de montagnes qui s'étend sur environ 30km, présentent des pentes délicates et des oueds profondément encaissés. L'altitude de l'atlas varie entre 1200 et plus de 1600 m, son sommet le plus élevé atteint est de 1629 m précisément à Koudiet Sidi Abdelkader. A certains endroits la pente touche 30% ce qui signifie la facilité de l'écoulement des eaux superficielles et renforce les risques d'érosion, par conséquent l'activité érosive de cette montagne a favorisé l'apparition de la zone du piémont.

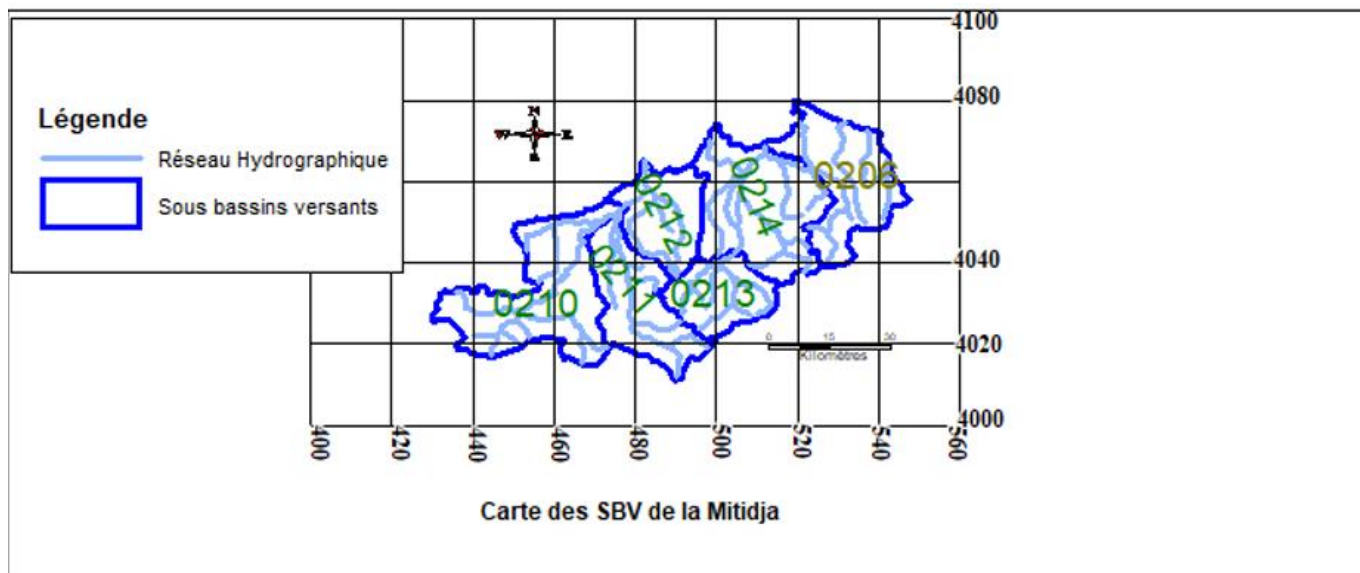


Figure 2 : carte des sous bassins versants de la Mitidja

### 4- Aspect socio-économique

Depuis l'indépendance de notre pays en 1962, la plaine de la Mitidja a connu une forte croissance démographique et économique remarquable. Aujourd'hui, elle est parmi les régions les plus peuplées, bénéficiant d'une économie variée s'appuyant en particulier sur les secteurs de l'agriculture, de l'industrie, du commerce et de services.

#### 4-1 Les activités agricoles dans la Mitidja

La plaine de Mitidja caractérisé par son climat méditerranéen favorable à l'activité agricole, comprenant plusieurs avantages contribuent à la richesse de cette plaine, on peut citer :

- Les terres fertiles avec une excellente capacité d'irrigation.
- La présence d'un climat favorable.
- Sa localisation à côté du marché potentiel (Alger et les villes environnâtes).
- L'expérience dans l'agriculture irriguée (arboriculture et maraîchage).
- Un réseau routier bien développé.
- Un potentiel de stockage et conditionnement des produits agricoles élevé.

## CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Bien avant la période coloniale et jusqu'à aujourd'hui, la Mitidja est connue par son activité agricole. Le tableau 1 récapitule les activités les plus développées depuis 1880 (Nemer, Z.2024).

**Tableau 1: Evolution des activités agricoles de la Mitidja**

Période	Activités agricoles
Avant 1880	Agriculture traditionnelle vivrière, faible occupation des sols, élevage extensif
1880	Vastes exploitations viticoles (production de vins)
1920	Développement de l'agriculture irriguée et de la grande hydraulique
1937	Construction d'un premier barrage d'irrigation (Hamiz)
1962	Remplacement des vignes par l'arboriculture fruitière et l'élevage laitier
1980	Plusieurs projets d'aménagement hydro-agricoles

### 4-2 Les activités industrielles dans la Mitidja

Depuis plusieurs années, la Mitidja se base dans le domaine d'industrie sur les secteurs : des produits chimiques, pharmaceutiques, alimentaires et biotechnologiques. Les types d'activités varient d'une zone à l'autre.

- La zone Est : les zones industrielles importantes qui couvrent une superficie cumulée de 1478 hectares. Ce sont situés à Oued Smar, El Harrach, Rouiba et Réghaïa. Par contre les zones d'activités qui s'étendent sur près de 170 hectares s'implantent dans plusieurs communes d'Alger.

Les types d'activités exercés dans cette partie de la zone d'étude sont : industries textiles et cuirs (1881 unités), la transformation des métaux (1607 unités) et de production agroalimentaire (1233 unités).

- La Mitidja centre : dans les communes de Meftah, Bougara, l'Arbaa, la banlieue de Blida, plusieurs et différentes usines sont instaurées et même l'activité industrielle privée a fait part de développement industriel dans cette région.
- La zone Ouest : à part les zones industrielles de Koléa et Attatba, cette zone est marquée par l'activité agricole et l'élevage.

Finalement, les wilayas d'Alger, Blida et Boumerdes regroupent les principales installations industrielles ces activités sont divisées en : Agro-alimentaire ; tabac ; chimie plastique, pharmacie ; matériaux de construction ; construction mécanique ; sidérurgie, métallurgie et textiles (Nemer, Z.2024)

## 5- Démographie

Depuis l'indépendance, la plaine de la Mitidja a connu une urbanisation marquée par la formation anarchique de foyers de peuplement, à cette époque, la région comptait environ 1 077 000 habitants, avec une densité démographique de 8,3 habitants par km<sup>2</sup> et un taux d'occupation moyen de 7 personnes par logement. En 1998, la population a connu une croissance significative, atteignant près de 2 millions d'habitants, soit une densité de 60

## CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

habitants par km<sup>2</sup>. Les principales zones de forte densité démographique sont : Alger, Blida, Chiffa, Soumaa, Boufarik, El Affroun, Hadjout, Dar El Beida et à El Harrach, ainsi que les alentours des zones industrielles telles que Rouiba, dont la population a doublé entre 1966 et 1977, avec un taux de croissance annuel de 5,5 %. (Derias, 2012)

Une relative stabilisation démographique a été observée entre 1998-2008, le taux global de croissance démographique est passé de 69,12 % à 42,85 %, traduisant un ralentissement de la croissance démographique. Cependant la Mitidja reste un centre de développement actif. Malheureusement, cette dynamique pose des problèmes à long terme de planification urbains, prestation de services publics, création d'emplois, d'offres de logements et gestion de ressources, exigeant des solutions pour répondre aux besoins de cette population. (Derias, 2012)

### 6- Couverture et usage du sol

La région de la Mitidja se caractérise par une différence marquée entre les zones boisées, agricoles et urbaines en termes d'occupation des sols. Près de 32 % de l'étendue totale est occupée par des zones boisées, incluant forêts et bosquets. Cette couverture végétale joue un rôle essentiel dans la préservation de la biodiversité, la régulation du climat et la protection des sols. (Figure 2)

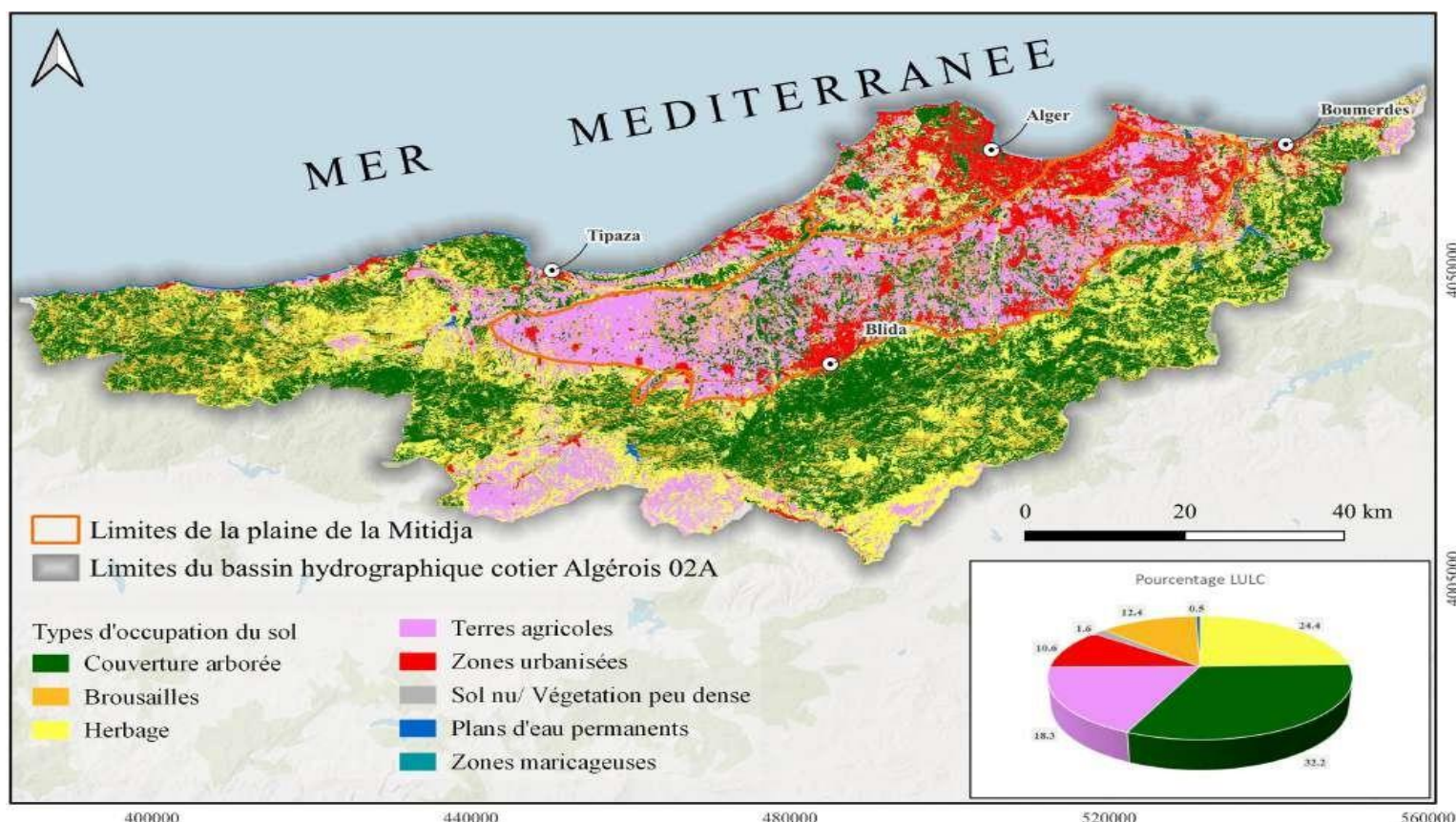


Figure 3: Utilisation des sols dans le bassin algérois 02A d'après le projet © ESA WorldCover / Données modifiées du satellite Copernicus Sentinel (2021) traitées par le consortium ESA WorldCover.

Les terres agricoles représentent également une part significative du territoire, avec près de 18 % de la surface totale, principalement concentrées dans la plaine. En parallèle, les zones urbaines couvrent environ 11 % de la superficie, avec une urbanisation particulièrement marquée dans la partie orientale du bassin, à proximité d'Alger. Cette expansion urbaine se fait souvent au détriment des terres agricoles les plus fertiles, progressivement transformées en zones urbaines pour répondre à la croissance démographique et au développement des infrastructures. Cette dynamique soulève des préoccupations quant à la préservation des terres agricoles productives et à la sécurité alimentaire à long terme dans la région. (Nemer, Z.2024)

### **7- Pédologie et couvert végétal**

La plaine de la Mitidja constitue un important ensemble agricole doté d'un potentiel naturel à haute valeur agronomique (PAC, 2004). On y distingue cinq principales classes de sols : les sols peu évolués, les sols calcimagnésiques, les vertisols, les sols à sesquioxydes de fer et les sols hydromorphes. Ces types de sols favorisent le développement de cultures variées, notamment les maraîchères, les agrumes et les vignes (Ecrément, 1971).

Le couvert végétal représente l'une des caractéristiques majeures d'un bassin versant. Associé à la nature des sols, il contribue à définir les caractéristiques physiographiques et hydrographiques de ce dernier (Anctil et al., 2012). Dans la plaine de la Mitidja, le couvert végétal se présente comme dense, tandis qu'aux piémonts de l'Atlas blidéen, il est très dense (Benslimane et al. 2009).

### **8- Conclusion**

La Mitidja s'étale sur une surface d'environ 1300 km<sup>2</sup>, se distingue par ses caractéristiques géographiques et géomorphologiques uniques, qui en font une région d'une importance stratégique et économique en Algérie.

Son emplacement privilégié, avec des conditions naturelles favorables, ont permis le développement d'une riche activité agricole, industrielle et urbaine.

Ainsi, la zone d'étude se caractérise par une topographie plane encadrée par des reliefs, une occupation du sol contrastée entre zones agricoles, boisées et urbaines, ainsi qu'une diversité pédologique et un couvert végétal significatif. Ces éléments influencent directement les processus hydrologiques, tels que l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration, et conditionnent la dynamique des écoulements de surface et souterrains. De ce fait, la Mitidja constitue un cadre particulièrement adapté à la modélisation hydrologique, permettant d'analyser le fonctionnement du bassin versant et d'évaluer l'impact des caractéristiques naturelles et de l'occupation des sols sur le bilan hydrique.

***CHAPITRE 2 :***  
***CONTEXTE***  
***GÉOLOGIQUE ET***  
***HYDROGÉOLOGIQUE***

### CHAPITRE 2 : CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

#### 1- Introduction

La géologie est la base des sciences de la Terre, c'est absurde de mener une étude sans savoir des connaissances préalables de la géologie. Sur le plan géologique, l'organisation des formations rocheuses, leur composition, leur structure, et leur évolution au fil du temps conditionnent les caractéristiques physiques du sous-sol. Ces éléments influencent directement les propriétés hydrauliques et le comportement des aquifères. En parallèle, l'hydrogéologie, qui s'intéresse au stockage et à la circulation de l'eau dans le sous-sol, repose sur cette base géologique pour analyser les flux, les échanges entre les nappes et les cours d'eau, ainsi que les mécanismes de recharge et de décharge des réservoirs souterrains.

Dans ce travail, nous sommes appuyés sur les contributions de plusieurs travaux de (Glangeaud, 1962) et (Binnie et Partners, 1983) et (Rivoirad, 1952). Ce chapitre vise à établir un cadre détaillé du contexte géologique et hydrogéologique de la zone d'étude. Il s'agit tout d'abord de décrire les principales unités géologiques, leurs caractéristiques lithologiques et structurales, ainsi que les processus qui ont façonné leur évolution. Ensuite, les propriétés hydrogéologiques des formations seront abordées, en mettant en lumière les principaux aquifères, leurs dynamiques, et les interactions avec les systèmes de surface.

#### 2- Contexte géologique

##### 2.1 Sédimentation du bassin de la Mitidja

La nature des formations dans la plaine de la Mitidja, ainsi leur mode de répartition, sont influencés par une combinaison des facteurs morfo-tectoniques et morfo-climatiques du Quaternaire. La structure géologique de ce bassin résulte de l'action combinée des facteurs suivants :

###### 2.1.1 Pliocène marin

- Le Plaisancien : Cette période est caractérisée par des dépôts de marnes grises ou bleues, parfois sableuses, déposées dans des eaux profondes. Ces formations atteignent une épaisseur moyenne de 200 mètres, pouvant dépasser 240 mètres près de la cluse de Mazafran.
- L'Astien : correspondant au Pliocène moyen, se caractérise par une grande variété de formations lithologiques liées à une sédimentation marine peu profonde (Rivoirad, 1952). Cette formation se caractérise par des grès calcaires bien cimentés, des sables consolidés à grains ronds, ainsi que des argiles grises et jaunes. Son épaisseur est généralement comprise entre 100 et 130 mètres, et se situe à des profondeurs de 250 à 300 mètres, bien que certains forages récents aient mis en évidence des niveaux atteignant 400 mètres (GEOHYDROLOGIE, 1972). Les affleurements de l'Astien apparaissent principalement au sud du Sahel et d'Alger, où la formation adopte une structure légèrement anticlinale, mais s'enfonce brusquement sous la plaine en raison de la subsidence du bassin. Vers le sud et l'ouest, la séquence astienne devient progressivement plus argileuse, avec une diminution de son épaisseur liée à

l'interruption de dépôts anciens. Selon la C.G.G (1967), cette réduction d'épaisseur s'observe également dans les zones où les caractéristiques lithologiques de l'Astien tendent à évoluer vers une dominance argileuse.

### 2.1.2 Quaternaire marin

Les dépôts quaternaires marins se situent au nord du Sahel et contribuent à la fermeture de la dépression de la Mitidja entre Alger et Bordj El Bahri.

### 2.1.3 Quaternaire continental

- Le Villafranchien : aussi appelé série des marnes de Maison Carrée ou d'El Harrach, est une formation composée d'argiles plastiques accompagnées de graviers, généralement peu épaisses (2 à 6 m), mais pouvant atteindre jusqu'à 200 m à l'ouest du bassin. Elle est souvent masquée par des dépôts alluviaux récents, sauf dans certaines zones comme El Harrach. Son épaisseur diminue vers le centre du bassin et disparaît presque totalement dans certaines régions, notamment à Rouiba, à cause de l'érosion.
- Quaternaire ancien : Cette formation est quasiment absente dans la Mitidja. Elle se manifeste uniquement sous forme de reliques localisées sur les bords et les terrasses du Sahel. Ces dépôts sont positionnés entre 50 et 150 mètres en dessous des oueds caillouteux.
- Quaternaire moyen : des dépôts grossiers ont comblé les anciens chenaux des marnes d'El-Harrach, formant des aquifères importants, notamment à Chiffa et Mazafran. Le piémont de l'Atlas, dans la région de Blida, date en grande partie de cette époque. Les alluvions de cette période, composées de matériaux argilo-limoneux rouges avec des galets, forment des terrasses et un bourrelet distinctif entre le Sahel et la plaine.
- Quaternaire récent : la plaine connaît son dernier comblement avec des alluvions variées (limons, argiles, sables et galets), d'une hauteur moyenne de 5 mètres. Ces dépôts, essentiels à la recharge des aquifères, jouent un rôle hydrogéologique important en raison de leur nature et de leur emplacement.

Avant la campagne géophysique menée par la C.G.G. et ALGEO (1967–1969), des études géologiques préliminaires avaient révélé que les variations d'épaisseur des alluvions dans la Mitidja étaient liées à l'érosion des couches argileuses. Des poches alluviales séparées par des crêtes argileuses nord-sud formaient des rigoles d'érosion reliant la Mitidja à la mer. Toutefois, en 1982, le bureau Binnie-Atkins a contesté cette vision, proposant une configuration plus uniforme du bassin, marqué par une sédimentation régulière dans un contexte d'affaissement stable.

Le log stratigraphique présenté dans la figure 5 illustre les différentes unités géologiques du bassin de la Mitidja.

SYSTEME		ETAGE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR (m)
QUATERNAIRE	Holocène	Actuel récent		20
	PLEISTOCENE	Flandrien/ Rharbien	Limons, Argiles Limoneuses	30
			Sables consolidé à lumachelles	30
		Soltanien/ Tensifien	Alternance de graviers et d'argiles	150
		Calabrien villafranchien	Argiles et cailloutis	100
TERTIAIRE	PLIOCENE	Astien	Grès Sables, Calcaires	120
		Plaisancien	Marnes et argiles bleues	200
	MIOCENE	Vindobonien	Marne à lentilles de Calcaire	50
		Burdigalien	Marne à lentilles de Grès	?

**Figure 4 : Log stratigraphique de la plaine de la Mitidja (Mimouni, 2010)**

## 2.2 Histoire de l'évolution géologique de la plaine de la Mitidja

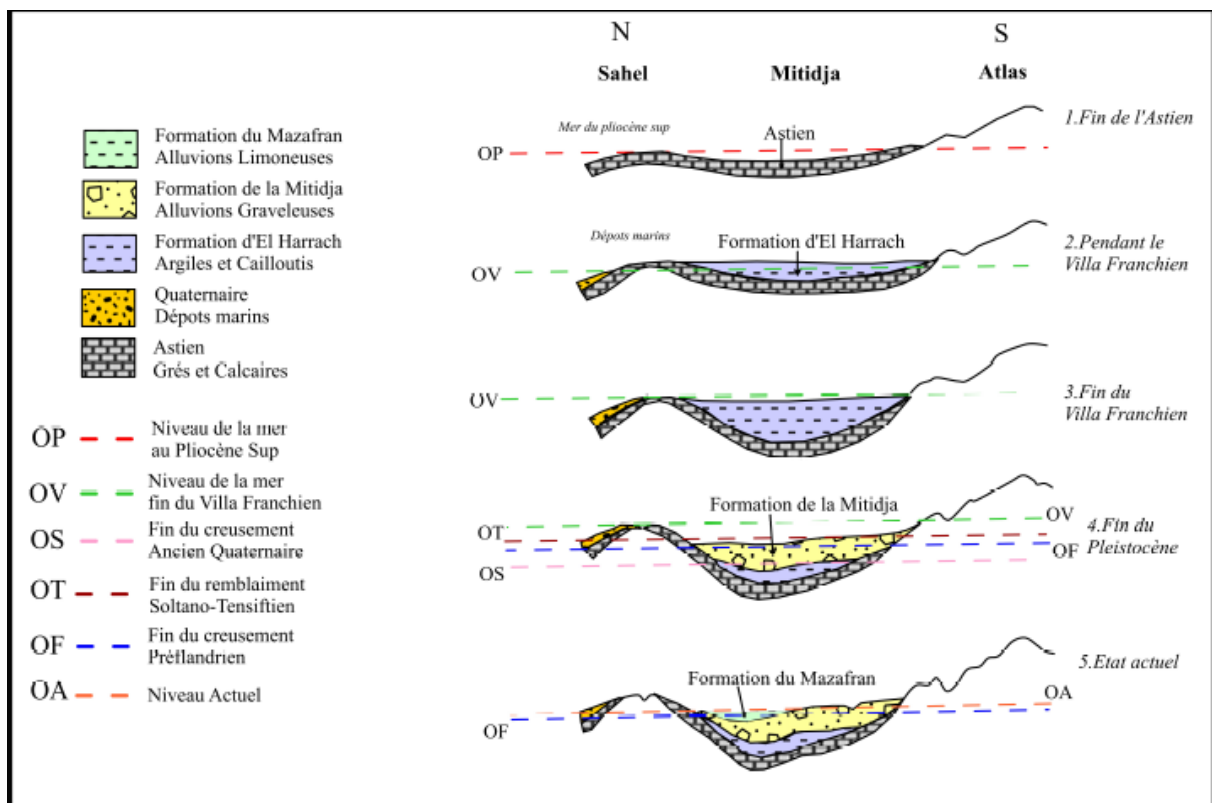
La formation du bassin de la Mitidja est due à l'effondrement d'un socle rigide entre des failles orientées E-O et NE-SO. Les sédiments marins et lagunaires du Plaisancien et du l'Astien ont été déposés avant que le Sahel se soulève pour former une ride anticlinale. Par contre, les dépôts du Miocène, du Pliocène et du Quaternaire ont joué le rôle d'une couverture souple entre les deux blocs ascendants.

- Durant le Pliocène, la formation des dépôts de marnes, grès et calcaires dans une mer peu profonde qui a marqué cette période. Vers la fin de cette dernière, le plissement du Sahel a entraîné un soulèvement anticlinal, isolant ainsi la Mitidja de la mer.
- Au début du Quaternaire ancien, c'est le dépôt de formations fluviolacustres d'origine atlasque dans le bassin.
- Durant le Villafranchien, le bassin s'est approfondi et s'est rempli de dépôts majoritairement argileux, entrecoupés de couches graveleuses. Par la suite, une régression marine a entraîné une forte érosion, réduisant l'épaisseur des dépôts. Au Quaternaire moyen, des apports caillouteux ont comblé les chenaux de matériaux grossiers, tandis que les zones marneuses élevées ont conservé des accumulations

## CHAPITRE 2 : CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

alluviales compartimentées. Le rajeunissement de l'Atlas a provoqué une élévation du niveau marin, favorisant une accumulation rapide de dépôts continentaux dans le bassin. Toutefois, cette surélévation n'a pas conduit à une transgression marine significative.

- Pendant le Quaternaire moyen, les cheneaux formés de matériaux grossiers ont été remplis par des dépôts caillouteux. Par contre, les hauts fonds marneux ont préservés des masses alluviales cloisonnées. Le relief de l'Atlas s'est renouvelé par la suite, provoquant une élévation de niveau marin et une accumulation de dépôts continentaux dans le bassin, sans une présence de transgression marine.
- À la fin du Pléistocène, une régression marine a provoqué une forte érosion, creusant des canyons dans les formations marneuses. Cette érosion a réduit l'épaisseur des dépôts et mis à jour certaines formations, tout en façonnant des cluses qui ont permis le drainage du bassin.
- Durant le Quaternaire moyen, le comblement du bassin s'est effectué par des apports caillouteux.
- Dans le Quaternaire récent et actuel, l'abaissement définitif du niveau marin n'a que peu modifié la surface de la plaine. Malgré les travaux de drainage qui ont éliminé la majorité des zones marécageuses, les mouvements tectoniques dans les secteurs surélevés persistent, comme en témoignent les séismes récents.
- En 1982, les recherches de Binnie et Partners ont contribué à l'élaboration d'un modèle illustrant l'évolution de la Mitidja durant le Pliocène et le Quaternaire (Figure4).



### 2- Contexte hydrogéologique

Grace aux processus géologiques et géomorphologiques antérieurs deux aquifères Quaternaire, l'autre du l'Astien. Ces deux aquifères sont séparés par un complexe argileux d'El Harrach, avec une variation d'épaisseur selon les lieux. Dans certaines zones, notamment à Rouiba et Reghaia, ce complexe argileux est absent, ce qui permet une communication hydraulique entre les deux nappes. Même si cette couche argileuse soit présente, elle ne constitue pas une barrière étanche.

#### 3-1- Réservoir du l'Astien

Ce réservoir couvre tout le bassin alluvial et affleure dans la région du Sahel. Il est limité par les marnes du Plaisancien en dessous et par les marnes d'El Harrach au-dessus. La nature hétérogène de cette couche permet des échanges d'eau avec l'aquifère du Quaternaire. Le réservoir de l'Asien est composé de grés fortement altérés, avec une porosité due aux fissures et espaces entre les grains. Cet aquifère est captif, mais devient libre dans les zones d'affleurement du Sahel. Elle présente une transmissivité comprise entre  $10^{-3}$  et  $2.3 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s. Elle atteint une épaisseur de 84 m en amont de Mazafran, jusqu'à 130 m à l'oued El Alleug, avec une moyenne de 100 m. Dans certaines zones comme El Harrach et Hamiz l'épaisseur peut atteindre 150 m, mais il reste plus faible dans le sud. (Nemer, Z.2024).

#### 3-2- Réservoir du Quaternaire

La constitution principale de ce réservoir est de graviers et de galets, alternant avec des couches de limons et d'argiles. Dans les zones de Chiffa et Rouiba, la transmissivité de cet aquifère fluctue entre  $2.3 \times 10^{-3}$  et  $4.6 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, tandis que sa porosité spécifique est évaluée entre 2% et 7%. Dans la région de Mazafran, la transmissivité se situe autour de 2% et 7%, et la porosité spécifique varie entre 3% à 10%. Cette nappe qui s'étend sous les limons, avec une épaisseur oscillante entre 100 et 150 m est à la fois libre et captive. Cette nappe est divisée en deux parties principales : le bassin d'El Harrach-Hamiz à l'est et bassin de Mazafran à l'ouest. (Nemer, Z.2024).

- Bassin d'El Harrach-Hamiz : l'alimentation dans cette zone se fait par les oueds (Harrach et Hamiz), les précipitations, ainsi que le réservoir du l'Astien. La nappe est libre sur l'ensemble du bassin et les niveaux piézométriques varient selon les saisons, allant de zéro au niveau côtier à environs dix mètres dans la zone de piémonts. Une étude de transmissivité a permis de mettre en évidence une zone alluviale a forte transmissivité près de Rouiba, aussi un haut fond marneux localisé à El Alia. A cause de la forte demande en eau dans la région d'Alger. En 1977, lors de la réalisation de huit forages destinés à satisfaire les besoins en eau de la région, des mesures de transmissivité ont été effectuées. Celles-ci ont montré des valeurs comprises entre  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s et  $40 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, mettant en évidence l'hétérogénéité hydrodynamique des couches lithologiques de la zone.
- Bassin du Mazafran : l'alimentation dans ce bassin est assurée par les précipitations, l'infiltration à partir des oueds (Chiffa et Bou Roumi) et même aussi l'aquifère de l'Astien, soit directement ou par drainance. L'écoulement des eaux se fait depuis la bordure de l'Atlas vers le nord et converge vers la cluse du Mazafran. A cause de

l'altitude élevée, la surface piézométrique dans le piémont est très profonde. La nappe est libre en remontant jusqu'elle soit captive aux limons du Mazafran. La carte de transmissivité révèle des zones alluviales à forte transmissivité, notamment dans les lits du Djer et de Bou Roumi, ainsi qu'au niveau des hauts-fonds marneux. Le chenal le plus transmissif est celui de l'Oued Chiffa, où la transmissivité atteint localement  $4 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ . Le coefficient d'emmagasinement varie entre 2 % et 7 % dans la partie libre, tandis qu'il est de l'ordre de  $2 \times 10^{-4}$  dans la partie captive des limons du Mazafran. Quant au principal exutoire de la nappe, il s'agit de l'évapotranspiration, qui s'effectue à travers ces limons.

A part les deux aquifères cités, la région possède deux autres nappes aquifères. La nappes des limons avec sa porosité élevée qui favorisent le stockage significatif d'eau, mais qui présente une faible perméabilité, ce qui limite sa capacité de fonctionner comme un aquifère. Par ailleurs, les alluvions anciennes, contenant des passées graveleuses, sont des aquifères de moindre importance. Cependant, l'aquifère qui semble favorable est celui du Quaternaire moyen et récent. Ce dernier est marqué par une hétérogénéité et une répartition inégale des graviers sableux. Il présente des poches et des chenaux bien transmissifs, s'alternant avec des couches à faible transmissivité sur le plan horizontal. Verticalement, cette hétérogénéité est due à des facteurs morpho- climatiques.

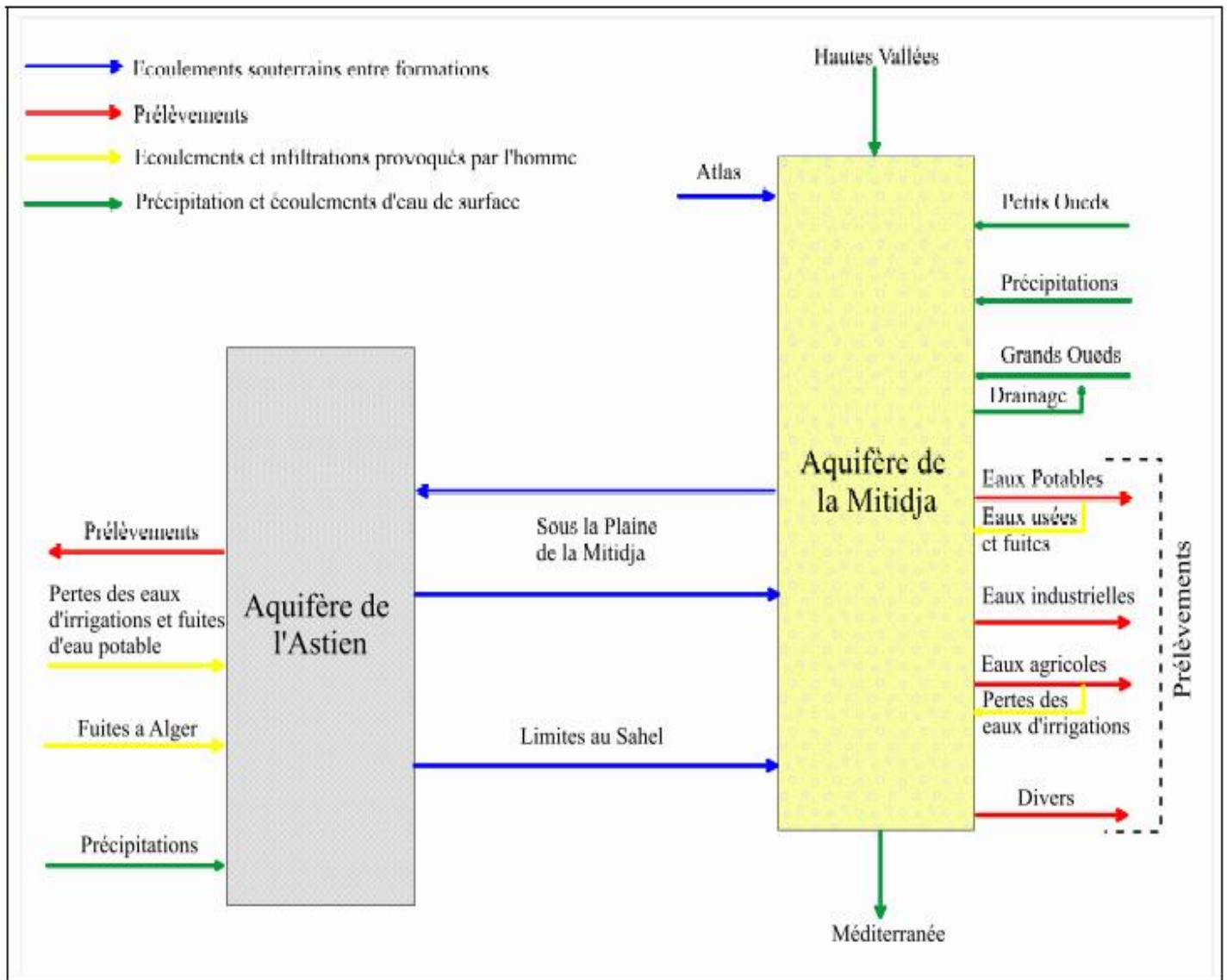
### **3-3- Interactions hydrogéologiques entre l'aquifère astien et les alluvions quaternaires**

Les transferts d'eau entre ces deux aquifères sont généralement faibles, car la couche argileuse qui les sépare est influencée par l'érosion et une faible perméabilité. Le soulèvement de l'aquifère Astien au niveau du flanc sud de Sahel rapproche ce dernier au réservoir alluvial. Il existe trois types de contacts selon Engalec (1970) :

- Une superposition et un emboîtement des formations, avec une continuité des marnes jaunes d'El Harrach, comme c'est le cas à Mazafran.
- Une érosion des marnes jaunes, qui permet une communication hydraulique entre les deux aquifères, observée notamment à Rouiba et El Hamiz.
- Un emboîtement plus profond entre les alluvions et les marnes plaisanciennes.

Les échanges d'eau dépendent principalement des différences de pression entre le sommet et la base de cette couche semi-perméable. Ces interactions sont d'autant plus importantes que la couche est mince.

Comme illustré dans la figure 6 qui présent un modèle mathématique du bassin de la Mitidja, prend en compte les interactions qui peuvent avoir un impact sur les caractéristiques hydrodynamiques, notamment la recharge et la qualité de l'eau.



**Figure 6 : Schéma des interactions entre l'aquifère du quaternaire et l'aquifère de l'Astien.**

Le schéma illustre les différents flux hydriques et interactions entre l'aquifère alluvial de la Mitidja et l'aquifère astien. On y distingue quatre catégories principales de flux :

- Les apports naturels (flèches vertes) : ils regroupent les précipitations directes, les écoulements de surface (petits et grands oueds), ainsi que le drainage en provenance des hautes vallées et de l'Atlas. Ces apports constituent les principales sources de recharge de l'aquifère de la Mitidja.
- Les échanges souterrains (flèches bleues) : ils traduisent les transferts entre l'aquifère astien et l'aquifère de la Mitidja, dont l'intensité dépend des conditions lithologiques et de la perméabilité de la couche séparatrice. Ces écoulements restent globalement faibles, mais peuvent être localement significatifs, notamment au niveau de Rouiba et Hamiz.

- Les apports et pertes anthropiques (flèches jaunes) : ils comprennent les infiltrations issues des fuites d'eau potable et d'irrigation, qui constituent une recharge additionnelle mais diffuse, ainsi que certaines pertes localisées vers Alger.
- Les prélèvements (flèches rouges) : ils concernent les différents usages de l'eau souterraine (eaux potables, agricoles, industrielles), auxquels s'ajoutent les pertes liées aux fuites et aux eaux usées. Ces prélèvements représentent la principale contrainte exercée sur l'aquifère, accentuant la vulnérabilité de la ressource.

### 4- Conclusion

Le contexte géologique et hydrogéologique de la plaine de la Mitidja révèle une complexité structurale et sédimentaire riche, fruit d'une longue évolution géodynamique depuis le Pliocène jusqu'à l'époque actuelle. Cette évolution a façonné un bassin sédimentaire profond, caractérisé par l'alternance de formations marines et continentales, avec une architecture stratigraphique favorable au développement de plusieurs aquifères.

Les deux principaux réservoirs, celui de l'Astien et celui du Quaternaire, constituent une ressource stratégique majeure en eau souterraine pour la région. Leur comportement hydrodynamique, influencé par la nature des formations, la géométrie des dépôts, ainsi que les interactions inter-aquifères, souligne l'importance de leur gestion durable.

Cependant, cette richesse hydrogéologique est mise à mal par la pression anthropique croissante, notamment l'urbanisation, l'industrialisation et l'agriculture intensive, qui affectent la qualité et la quantité des ressources en eau. Ces pressions exigent une connaissance approfondie du fonctionnement du système aquifère, afin d'orienter les politiques de protection et de gestion intégrée des ressources en eau.

***CHAPITRE 3 :***  
***HYDROCLIMATOLOGIE***

### Chapitre 3 : Hydroclimatologie

#### 1. Introduction

L'analyse hydroclimatique constitue une étape fondamentale dans tout processus de modélisation hydrologique, car elle permet d'identifier les principaux facteurs influençant le cycle de l'eau au sein d'un bassin versant. Dans le contexte de la plaine de la Mitidja, région fortement sollicitée en ressources en eau et soumise à une variabilité climatique marquée, l'étude des conditions hydroclimatiques s'avère indispensable pour comprendre le comportement hydrologique global du système. Ce chapitre propose une présentation générale du cadre hydroclimatique du bassin-versant étudié, en mettant l'accent sur les paramètres climatiques majeurs tels que les précipitations, la température et l'évapotranspiration.

Toutefois, ces paramètres ne seront abordés ici que brièvement, afin de poser les bases nécessaires à la compréhension du fonctionnement hydrologique de la zone. Une analyse plus détaillée de ces variables et de leur intégration dans le processus de modélisation sera effectuée ultérieurement, dans le chapitre pratique consacré à la modélisation hydrologique, notamment à travers l'utilisation du modèle GR.

Ainsi, ce chapitre vise principalement à fournir un aperçu des caractéristiques hydroclimatiques du bassin de la Mitidja, dans une perspective descriptive et contextuelle, en amont des développements méthodologiques plus approfondis présentés par la suite.

#### 2. Les stations de mesures

Les données des différents paramètres hydroclimatiques couvrant la période allant de 2001 à 2021 ont été recueillies dans les services de l'ANRH à Blida et l'ONM à Der El Beida.

**Tableau 2: Caractéristiques des stations hydroclimatiques (2001-2021)**

Stations	Code ANRH	X Lambert (Km)	Y Lambert (Km)	Z (m)
Hamiz Barrage	02.06.02	558,55	367,4	130
Réghaïa	02.06.32	557,8	382,25	20
Baraki	02.14.21	535,05	376,5	20
Larbâa	02.14.03	541,15	362,95	100
Douar Malki	02.14.27	532,45	355,75	130
La passerelle	02.13.07	528,05	352,05	260
Boufarik	02.12.09	518,55	363,4	60
Blida	02.11.16	509,8	352,75	210
Soumaa	02.12.34	517,45	355,9	177
Hamdania	02.11.15	506,15	340,4	400
Koléa	02.12.11	506,45	370,4	120

### 3. Le climat

La Mitidja bénéficie d'un climat méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et sec et des hivers pluvieux. Ce type de climat est typique des régions littorales du Nord de l'Algérie, dans le cas de notre zone d'étude il est influencé à la fois par la proximité de la mer méditerranéenne et par les reliefs environnants, précisément le Sahel au Nord et l'Atlas blidéen au Sud.

### 4. Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles

L'analyse des précipitations constitue un élément central pour la compréhension du régime climatique d'une région. Dans le cadre de la présente étude, les précipitations moyennes mensuelles et annuelles ont été examinées à partir de données issues de 11 stations pluviométriques réparties dans la plaine de la Mitidja, sur une période de 21 ans (2001–2021).

Cette analyse vise à caractériser la variabilité temporelle et spatiale des précipitations dans la région. Les résultats permettent de mettre en évidence un régime typiquement méditerranéen, marqué par des pluies concentrées entre l'automne et le printemps, et une période estivale généralement sèche. (Tableau 3 et figure 7)

Les tableaux et graphiques suivants illustrent la répartition des précipitations au cours de l'année et entre les différentes stations, offrant ainsi une vision globale et comparative du comportement pluviométrique dans la Mitidja.

#### 4.1 Précipitations moyennes mensuelles dans la Mitidja

**Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles dans la Mitidja en mm (2001-2021)**

Station	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
Hamiz Barrage	28,4	41,0	390,2	60,4	24,2	113,4	84,0	129,7	72,8	0,0	0,0	9,8
Soumaa	10,8	15,7	341,4	78,9	16,9	31,8	112,5	54,3	47,3	0,8	0,0	1,8
Blida	11,7	12,7	302,3	83,6	17,1	34,7	61,2	144,5	60,1	21,9	0,9	0,9
Koléa	27,0	11,7	436,9	39,8	19,0	4,4	67,3	37,2	22,2	0,0	0,0	0,0
Larbâa	21,5	38,2	350,5	45,4	26,7	27,1	122,3	152,0	63,7	0,0	0,0	0,0
La passerelle	11,4	20,4	135,2	313,5	111,6	112,8	91,6	0,0	90,6	25,6	0,0	31,9
Réghaïa	45,0	12,1	391,8	67,7	62,1	96,2	65,7	77,5	96,5	11,3	3,2	15,6
Douar Malki	29,6	46,3	36,5	107,1	77,5	79,5	102,1	148,1	69,2	0,0	0,0	10,6
Hamdania	8,5	2,0	159,4	205,9	43,7	18,8	187,4	107,2	74,7	0,0	1,9	5,8
Boufarik	21,5	64,5	97,5	104,5	63,7	117,0	59,6	55,0	30,4	3,0	1,9	3,9
Baraki	30,2	51,8	119,5	98,3	87,9	70,0	72,2	59,3	36,3	9,5	1,3	7,2

L'analyse des données pluviométriques mensuelles dans la zone d'étude (tableau...) permet de constater que :

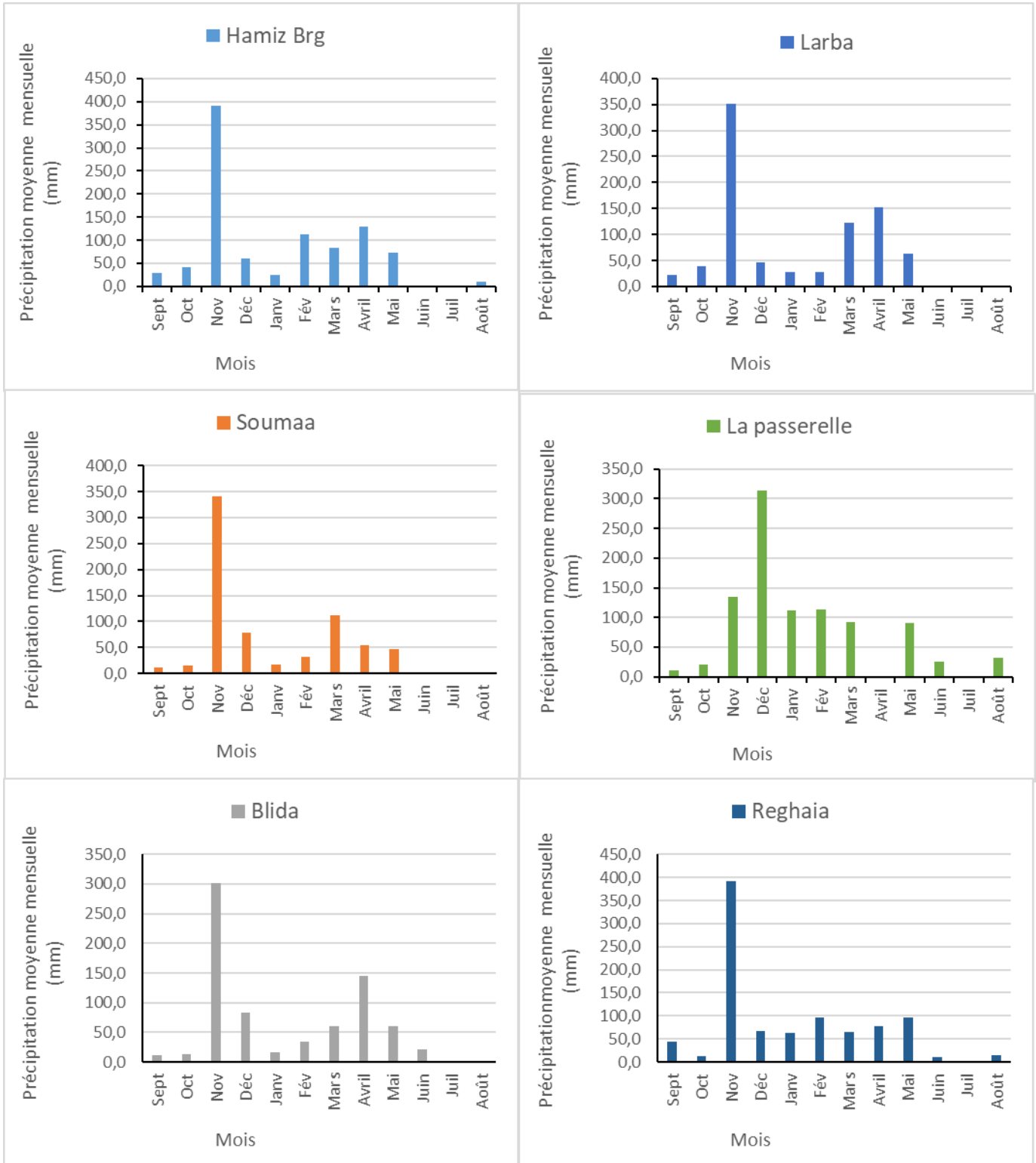
### CHAPITRE 3 : Hydroclimatologie

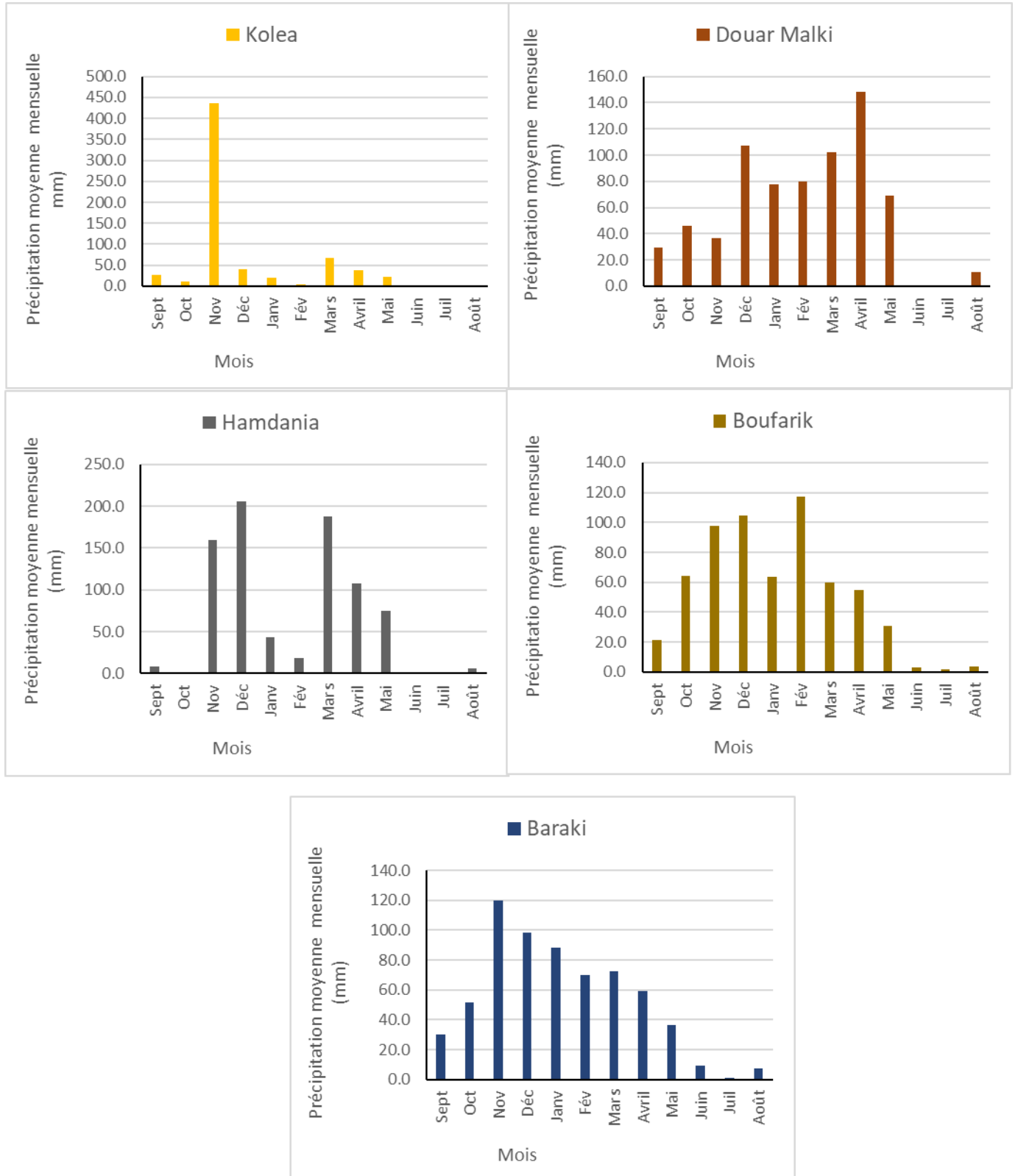
---

- La saison humide débute dès le mois de septembre, où plusieurs stations enregistrent des cumuls notables, notamment Reghaïa (45,0 mm) et Koléa (27,0 mm), marquant la transition entre l'été sec et l'automne pluvieux.
- Les mois de novembre, décembre et janvier représentent le cœur de la saison des pluies, avec des valeurs maximales relevées notamment à Hamiz Brg (390,2 mm en novembre), Soumaa (341,4 mm en novembre), Koléa (436,9 mm en novembre), et El Hamdania (205,9 mm en décembre).
- Le mois de décembre constitue le mois le plus arrosé dans la majorité des stations, avec des cumuls moyens excédant localement 100 mm, voire plus de 150 mm comme à El Hamdania.
- En février et mars, les précipitations demeurent significatives avec des valeurs supérieures à 60 mm dans de nombreuses stations (Baraki, Reghaïa, Hamiz Brg), ce qui prolonge la période humide.
- À partir du mois d'avril, on observe une baisse progressive des précipitations, marquant l'approche de la saison sèche. Néanmoins, certains postes comme Blida et Reghaïa enregistrent encore des valeurs dépassant 140 mm, révélant des variations locales.
- La période estivale (juin à août) est marquée par une chute drastique des précipitations, avec des totaux mensuels souvent inférieurs à 5 mm, notamment à Koléa, Larbaâ, Hamiz Brg et Douar Maliki, témoignant de la forte sécheresse estivale qui caractérise la région.
- Sur le plan spatial, les cumuls les plus élevés sont enregistrés dans les stations de l'Est et du Sud-Est du bassin, notamment à Hamiz Brg, Reghaïa et El Hamdania, suggérant un gradient pluviométrique croissant d'Ouest en Est et du Nord vers le Sud. À l'inverse, les plus faibles quantités sont observées à Boufarik, Douar Maliki et Koléa, localisées dans la partie occidentale de la plaine.

Ces observations confirment la dominance d'un régime pluviométrique méditerranéen, marqué par des pluies abondantes en automne et hiver, et une sécheresse prononcée en été.

## CHAPITRE 3 : Hydroclimatologie





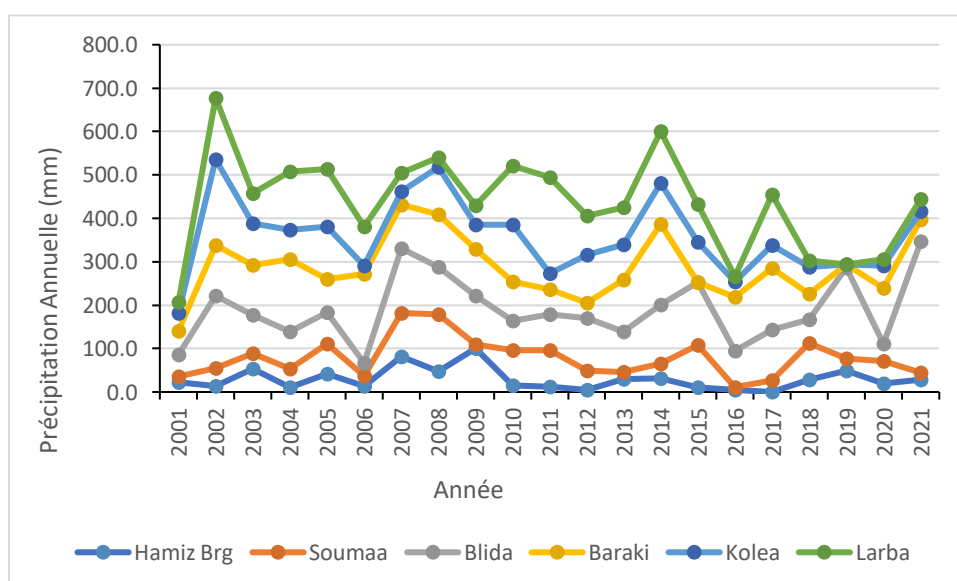
**Figure 7 : Précipitations moyennes mensuelles dans la Mitidja (2001-2021)**

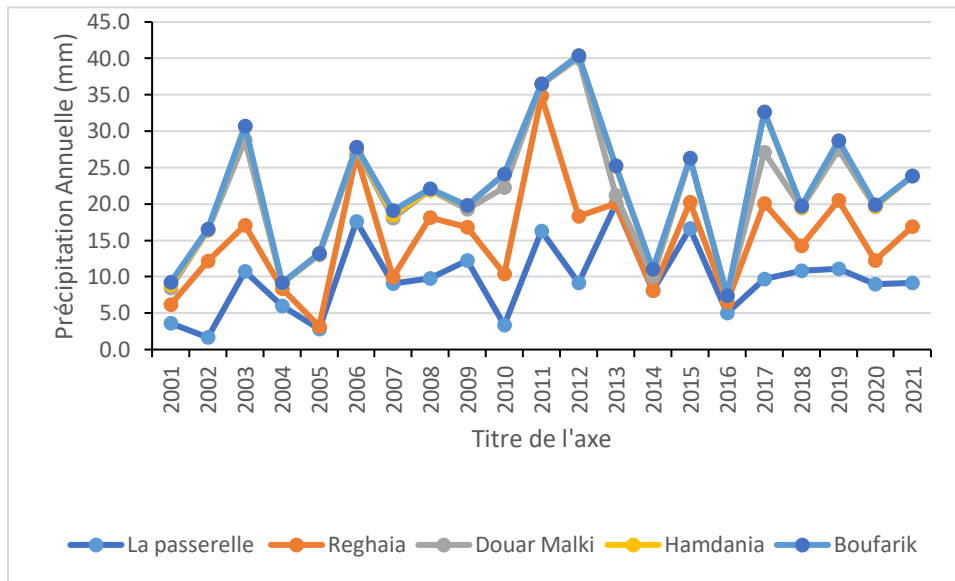
### 4.2 Précipitations moyennes annuelles dans la Mitidja

Le tableau suivant présente les valeurs moyennes annuelles des précipitations enregistrées dans les 11 stations de la Mitidja sur une période de 21 ans.

**Tableau 4: Précipitations moyennes annuelles dans la Mitidja en mm (2001-2021)**

Année	Hamiz Barrage	Soumaa	Blida	Baraki	Koléa	Larbâa	La passere lle	Réghaï a	Douar Malki	Hamd ania	Bou fari k
2001	22,0	14,0	50,3	54,2	40,7	25,2	36,1	25,4	23,3	4,0	3,4
2002	13,5	41,7	166,3	115,9	198,4	141,9	16,6	105,3	41,7	0,6	1,3
2003	53,2	35,0	88,5	115,8	95,0	70,2	107,6	63,4	116,8	18,0	1,1
2004	10,7	43,3	84,9	166,1	69,1	133,5	60,1	23,9	6,9	0,0	0,4
2005	41,2	69,7	72,4	77,3	119,7	133,4	28,7	3,2	98,6	1,2	0,0
2006	14,1	23,3	29,2	205,7	19,2	89,5	175,8	92,1	6,7	3,7	0,0
2007	82,0	100,0	149,4	100,3	29,8	43,2	90,3	9,3	80,6	4,8	6,3
2008	47,0	131,9	108,7	120,8	109,6	21,8	97,7	83,8	37,6	0,0	2,1
2009	100,3	8,9	112,7	107,5	56,3	43,6	122,6	45,7	24,5	4,8	0,3
2010	15,4	80,2	68,4	90,6	130,7	135,9	33,5	70,6	118,4	18,8	0,1
2011	11,5	85,1	82,2	58,2	36,4	220,5	162,5	185,5	15,9	0,9	0,0
2012	4,9	44,6	120,9	35,3	109,8	89,9	91,5	91,5	217,7	3,4	0,0
2013	29,6	16,2	93,7	118,9	80,7	86,3	199,4	1,2	11,3	39,4	1,2
2014	31,8	33,3	135,9	186,2	94,0	119,2	80,9	0,0	19,5	8,4	1,6
2015	9,9	98,7	143,6	0,0	93,7	86,3	166,7	35,7	59,4	0,0	1,7
2016	4,5	6,4	83,7	124,0	34,8	12,5	50,0	15,4	8,4	0,0	0,1
2017	0,0	27,0	116,4	141,5	53,9	115,6	97,3	103,4	70,7	54,9	0,0
2018	28,6	84,2	53,9	58,6	62,1	15,1	108,7	34,1	51,6	1,0	2,0
2019	48,4	29,2	208,5	7,5	0,5	0,0	111,3	94,1	69,5	11,9	0,2
2020	19,3	51,8	40,4	128,2	51,1	15,4	89,9	32,3	74,3	0,9	1,9
2021	28,4	15,7	302,3	51,1	19,0	27,1	91,6	77,5	69,2	0,0	0,0
Annuelle	616,3	1040,2	2312,2	2063,7	1504,6	1626,1	2018,8	1193,4	1222,6	176,7	23,7
Somme	<b>1254.4</b>										





**Figure 8 : Précipitations moyennes annuelles dans la Mitidja (2001-2021)**

L'examen de l'évolution interannuelle des précipitations révèle une variabilité importante d'une année à l'autre, sans tendance clairement linéaire sur l'ensemble de la période.

Toutefois, certaines périodes caractéristiques peuvent être distinguées :

- Période humide (2008–2011) : Plusieurs stations enregistrent des valeurs relativement élevées, notamment en 2009 et 2011, indiquant des années hydrologiques bien arrosées.
- Période plus sèche (2015–2020) : Une baisse relative est observée dans la majorité des stations, notamment entre 2016 et 2018. Certaines stations comme Boufarik ou Douar Malki enregistrent des cumuls très faibles.

L'année 2021 montre un redressement des précipitations dans plusieurs stations, mais sans retrouver les pics observés en début de période

### 5. La température

La température est un paramètre climatique fondamental qui influence directement l'estimation du bilan hydrologique et rentre aussi dans l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle et réelle. Son analyse permet de mieux comprendre les besoins en eau, les périodes de stress thermique, ainsi que l'évolution potentielle du climat.

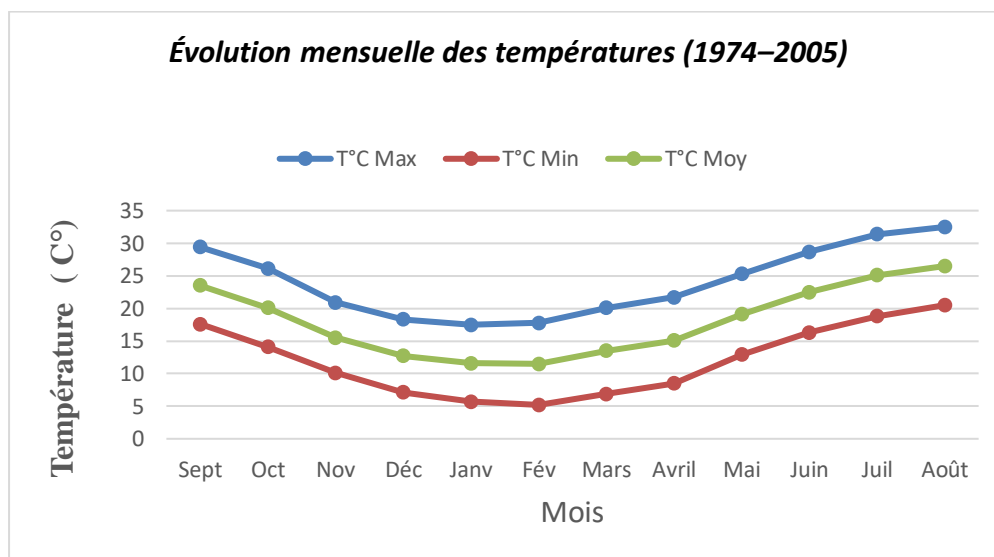
Afin de mettre en évidence l'évolution des caractéristiques thermiques à l'échelle locale, une analyse des températures mensuelles a été réalisée à partir des données enregistrées à la station météorologique de Dar El Beida, durant la période de 2006-2015.

Le tableau et le graphique suivants présentent l'évolution mensuelle des températures minimales, maximales et moyennes enregistrées dans la plaine de la Mitidja au cours de la

période 2006–2015, permettant de mieux visualiser la dynamique thermique caractéristique du climat régional.

**Tableau 5 : Températures mensuelles maximales, minimales et moyennes (2006-2015)**

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août
T°C Max	30,1	27,1	21,6	18,5	16,8	16,4	19,7	22,4	25,1	29,4	32,5	33,3
T°C Min	18,9	15,2	10,5	6,3	5,7	5,4	7,9	9,9	13,3	16,0	19,7	20,4
T°C Moy	24,5	21,1	16,0	12,4	11,2	10,9	13,8	16,2	19,2	22,7	26,1	26,8



**Figure 9 : Variation de la température mensuelles maximales, minimales et moyennes (2006-2015)**

Les températures estivales sont élevées, avec un pic moyen de 33,3°C en août. Les moyennes mensuelles d'été oscillent entre 26 et 27°C, consolidant le caractère chaud de la saison, typique d'un été méditerranéen.

Les températures hivernales demeurent douces, avec des moyennes générales autour de 12°C. Le mois le plus froid est janvier, avec une moyenne minimale de 5,4°C, très proche de la période précédente.

Les saisons intermédiaires restent également bien définies. Le printemps présente une montée progressive de la température (de 13,8°C en mars à 19,2°C en mai), et l'automne se caractérise par des températures encore élevées en septembre (24,5°C) avant de chuter lentement.

Dans l'ensemble, cette répartition saisonnière des températures confirme le caractère méditerranéen du climat de la Mitidja : des étés chauds et secs contrastant avec des hivers doux et humides, et des saisons de transition bien marquées.

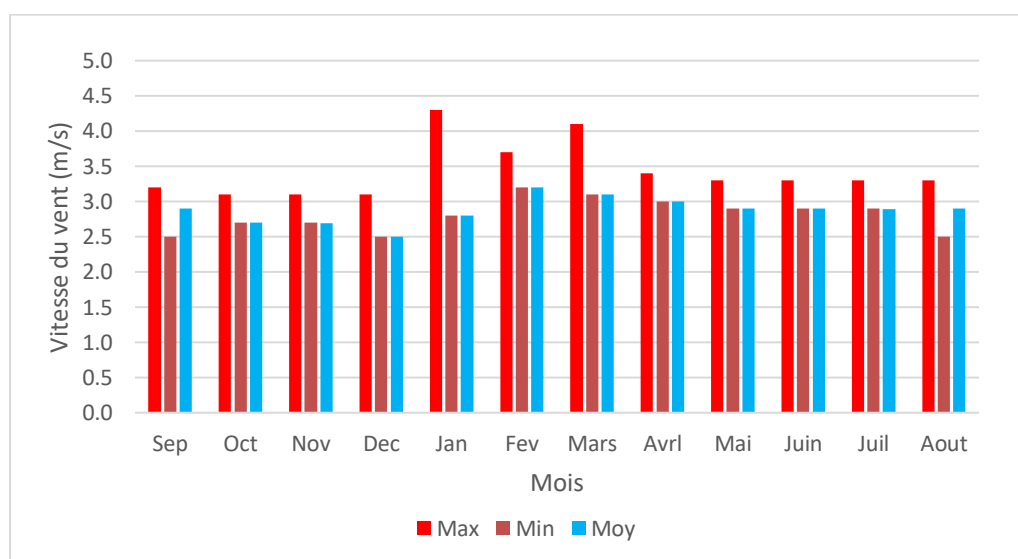
### 6. Le vent

Le vent est un élément important dans l'étude du climat, car il joue un rôle dans la régulation de la température, l'évaporation, et le déplacement des masses d'air. Il peut également avoir un impact sur l'agriculture, en particulier sur l'humidité des sols et le développement des cultures.

Le tableau et le graphique ci-dessous présentent l'évolution mensuelle des vitesses du vent enregistrées à la station de Dar El Beida sur la période 2005–2016. Ils permettent de mieux visualiser la répartition annuelle de ce paramètre climatique essentiel dans la région.

**Tableau 6. : Vitesses du vent mensuelles maximales, minimales et moyennes (2006-2015)**

Année	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Annuel
<b>Max</b>	3,2	3,1	3,1	3,1	4,3	3,7	4,1	3,4	3,3	3,3	3,3	3,3	3,4
<b>Min</b>	2,5	2,7	2,7	2,5	2,8	3,2	3,1	3,0	2,9	2,9	2,9	2,5	2,8
<b>Moy</b>	2,9	2,7	2,7	2,5	2,8	3,2	3,1	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9



**Figure 10: Vitesses du vent mensuelles maximales, minimales et moyennes (2006-2015)**

Dans la région de Dar El Beida, située dans la plaine de la Mitidja, les données disponibles montrent que la vitesse moyenne annuelle du vent est de 2,9 m/s. Cette valeur indique un vent généralement modéré, ce qui est typique des zones à climat méditerranéen, où les vents ne sont ni trop forts ni trop faibles, permettant une certaine stabilité des conditions climatiques.

### 7. Détermination de la lame d'eau précipitée

Afin d'estimer la lame d'eau précipitée exprimée en mm sur l'ensemble de la zone d'étude, deux méthodes simples ont été retenues : la méthode arithmétique et la méthode des polygones de Thiessen.

#### 7.1 La méthode Arithmétique

La méthode arithmétique, considérée comme la plus simple, consiste à calculer la moyenne des précipitations enregistrées dans l'ensemble des stations de la zone d'étude au cours de la période considérée.

$$P = \frac{\sum pi}{n}$$

Avec :

P : précipitations moyennes annuelles en mm

$pi$  : Précipitations moyennes enregistrée dans chaque station en mm

n : nombres de stations pluviométriques

Les résultats sont dans le tableau suivant :

**Tableau 7 : Précipitations dans les stations**

Stations	Précipitations (mm)
Hamiz Barrage	953.9
Soumaa	712.2
Blida	751.6
Koléa	665.5
Larbâa	847.4
La passerelle	944.6
Réghaïa	944.7
Douar Malki	706.5
Hamdania	815.3
Boufarik	622.5
Baraki	643.5
$\sum pi$	8607,7

**P=782,5 mm**

**7.2. La méthode de Thiessen**

Le principe de cette méthode repose sur un découpage géométrique de l'espace, dans lequel chaque pluviomètre est associé à une zone d'influence où la pluviométrie est supposée constante. Pour ce faire, on trace les médiatrices des segments reliant les stations pluviométriques deux à deux. L'intersection de ces médiatrices délimite un polygone représentant la zone d'influence de chaque pluviomètre.

La quantité moyenne de précipitations sur la région étudiée est alors déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$P = \frac{\sum p_i \cdot s_i}{S_t}$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles en mm

P<sub>i</sub> : Précipitations moyennes enregistrée dans chaque station en mm

S<sub>t</sub> : Surface totale du bassin versant Km<sup>2</sup>

S<sub>i</sub> : Surface du polygone considéré Km<sup>2</sup>

**Tableau 8 : Résultats de la méthode de Thiessen.**

Stations	P <sub>i</sub> (mm)	S <sub>i</sub> (Km <sup>2</sup> )	P <sub>i</sub> × S <sub>i</sub> (Hm <sup>3</sup> )	P(mm)
Hamiz Barrage	953.9	72.5	69157.75	798.94
Soumaa	712.2	48.85	34790.97	
Blida	751.6	24.24	18218.78	
Koléa	665.5	85.88	57153.14	
Larbâa	847.4	44.53	37734.72	
La passerelle	944.6	88.67	83757.68	
Réghaïa	944.7	119.04	112457.09	
Douar Malki	706.5	98.01	69244.07	
Hamdania	815.3	139.25	113530.53	
Boufarik	622.5	35.06	21824.85	
Baraki	643.5	89.07	57316.55	
La somme ∑	8607.7	845.1	675186.12	

**P=798.9 mm**

Pour estimer la précipitation annuelle représentative du bassin, nous avons pris la moyenne arithmétique des résultats obtenus par la méthode de Thiessen et par la méthode arithmétique simple

**P=790.7**

### 8. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est un phénomène permanent qui traduit la quantité d'eau consommée par l'ensemble du couvert sol-végétation. Elle regroupe, d'une part, l'eau transpirée par les plantes et, d'autre part, l'eau évaporée directement à partir de la surface du sol.

Ce processus est fortement influencé par les conditions climatiques et leurs variations, lesquelles dépendent de plusieurs paramètres tels que l'humidité de l'air, la vitesse du vent, la température et la pression atmosphérique. L'évapotranspiration résulte ainsi de la combinaison de deux mécanismes distincts : l'évaporation, d'ordre physique, et la transpiration, d'ordre biologique. (Yahiaoui.2011)

On distingue généralement deux formes principales d'évapotranspiration (Yahiaoui.2011)

#### 8-1- L'évapotranspiration potentielle ETP

Elle correspond à la quantité maximale d'eau pouvant être évacuée sous forme de vapeur, dans des conditions climatiques données, en supposant que le sol dispose en permanence d'une réserve en eau suffisante.

L'estimation de ce paramètre repose sur l'application de formules empiriques suivantes :

- **Formule de THORNTHWAITE**

$$ETP = 1.6 \left( \frac{10T}{I} \right)^a K$$

ETP : L'évapotranspiration potentielle mensuelle

I : indice thermique annuel tel que  $I = \sum_1^{12} i$

i : indice thermique mensuel

T : température moyenne mensuelle en (c°).

K : coefficient d'ajustement mensuel ou facteur de correction.

$$a = \left[ \frac{1.6}{100} \right] I + 0.5$$

Dans le cadre de l'analyse hydrologique, les tableaux ci-après (Tableau 10 et 11) présentent successivement les valeurs mensuelles et annuelles de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour la période 2001–2014, ainsi que la synthèse des totaux annuels correspondants.

#### **Tableau 9 : Les valeurs mensuelles de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de 2001-2014**

### CHAPITRE 3 : Hydroclimatologie

Année hydro	Année	sept	oct	nov	déc	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	Annuel
2001/2002	2002	24.5	23.6	14.2	10.7	11.0	11.6	13.6	14.8	19.3	24.8	24.8	25.4	18.2
	i	11.1	10.5	4.9	3.2	3.3	3.6	4.5	5.2	7.7	11.3	11.3	11.7	88.2
	l	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	
	a	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	115.8	102.0	34.2	19.5	21.2	23.3	37.6	47.3	86.2	140.3	143.5	140.1	911.2
2002/2003	2003	23.7	21.4	16.3	13.3	10.7	9.6	13.7	15.4	18.0	26.3	29.0	29.6	18.9
	i	10.5	9.0	6.0	4.4	3.2	2.7	4.6	5.5	6.9	12.4	14.3	14.8	94.2
	l	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	
	a	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	104.7	80.4	41.1	26.7	17.9	14.2	35.0	47.3	70.7	153.7	189.4	185.0	966.2
2003/2004	2004	24.6	21.1	16.5	11.8	11.6	12.8	13.2	15.2	16.5	23.2	26.4	28.2	18.4
	i	11.2	8.9	6.1	3.7	3.6	4.2	4.3	5.4	6.1	10.2	12.4	13.7	89.7
	l	89.7	89.7	89.7	89.7	89.7	89.7	89.7	89.7	89.7	89.7	89.7	89.7	
	a	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	116.3	81.5	44.8	22.8	22.9	27.4	34.8	48.6	62.9	122.5	160.0	170.7	915.3
2004/2005	2005	25.6	23.6	13.9	12.0	8.8	8.0	12.8	15.3	20.2	24.1	27.5	25.7	18.1
	i	11.9	10.5	4.7	3.8	2.3	2.0	4.1	5.4	8.3	10.8	13.2	11.9	89.1
	l	89.1	89.1	89.1	89.1	89.1	89.1	89.1	89.1	89.1	89.1	89.1	89.1	
	a	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	126.3	101.2	32.4	24.0	13.5	11.2	33.0	49.9	93.5	133.1	173.8	142.9	934.8
2005/2006	2006	23.6	21.4	15.1	11.1	9.4	9.8	14.1	17.5	21.5	24.0	27.7	26.0	18.4
	i	10.5	9.0	5.3	3.4	2.6	2.8	4.8	6.6	9.1	10.7	13.3	12.2	90.4
	l	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	

### CHAPITRE 3 : Hydroclimatologie

	a	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	107.0	82.9	37.5	20.2	15.2	16.1	38.9	63.5	104.5	130.5	175.1	145.5	936.7
2006/2007	2007	24.1	23.1	17.9	12.6	12.2	13.3	12.3	15.3	19.5	22.2	26.5	28.0	18.9
	i	10.8	10.2	6.9	4.0	3.9	4.4	3.9	5.4	7.9	9.6	12.5	13.6	93.1
	l	93.1	93.1	93.1	93.1	93.1	93.1	93.1	93.1	93.1	93.1	93.1	93.1	
	a	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	109.6	94.8	50.8	24.5	23.9	27.9	28.6	47.3	84.4	110.4	159.4	166.2	927.6
2007/2008	2008	24.3	19.8	14.2	11.0	11.6	12.5	13.3	16.3	18.8	22.6	27.2	27.2	18.2
	i	11.0	8.0	4.8	3.3	3.6	4.0	4.4	6.0	7.5	9.8	13.0	13.0	88.4
	l	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	
	a	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	114.4	72.8	34.0	20.5	23.3	26.9	36.0	56.6	82.5	117.7	170.8	159.6	915.1
2008/2009	2009	24.6	21.0	14.4	11.0	10.9	10.4	12.7	14.2	20.6	24.5	28.4	27.3	18.3
	i	11.1	8.8	5.0	3.3	3.3	3.0	4.1	4.9	8.5	11.1	13.9	13.1	90.0
	l	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	
	a	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	115.5	80.0	34.2	20.0	20.2	18.2	32.1	42.8	96.1	136.4	184.2	160.3	940.2
2009/2010	2010	23.3	20.8	17.9	14.4	11.8	13.1	13.4	15.9	17.9	21.8	26.9	26.6	18.6
	i	10.2	8.6	6.9	5.0	3.7	4.3	4.4	5.8	6.9	9.3	12.8	12.6	90.4
	l	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	
	a	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	103.7	78.3	51.7	33.2	23.5	28.2	35.5	52.9	72.8	108.5	165.4	152.0	905.7
2010/2011	2011	23.6	20.4	15.1	12.5	11.2	10.2	13.3	16.4	18.8	21.4	25.9	27.1	18.0

### CHAPITRE 3 : Hydroclimatologie

	i	10.5	8.4	5.3	4.0	3.4	2.9	4.4	6.0	7.4	9.1	12.1	12.9	86.4
	l	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	
	a	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	109.5	77.9	39.3	27.0	22.6	18.7	37.0	58.5	83.6	108.0	157.2	159.2	898.5
2011/2012	2012	23.5	19.7	16.2	12.0	10.0	6.8	11.7	14.7	18.4	24.5	25.6	28.8	17.7
	i	10.4	8.0	6.0	3.8	2.9	1.6	3.6	5.1	7.2	11.1	11.8	14.2	85.6
	l	85.6	85.6	85.6	85.6	85.6	85.6	85.6	85.6	85.6	85.6	85.6	85.6	
	a	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	108.8	74.0	45.5	25.2	18.6	8.8	29.5	48.5	81.0	139.4	153.6	179.8	912.8
2012/2013	2013	24.3	21.3	16.6	12.4	11.1	9.6	13.7	14.8	16.7	19.9	24.2	25.4	17.5
	i	10.9	9.0	6.1	4.0	3.4	2.7	4.6	5.1	6.2	8.1	10.9	11.7	82.7
	l	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	
	a	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	117.3	86.8	48.9	28.2	23.9	18.1	41.5	50.5	69.9	97.0	140.2	143.7	866.1
2013/2014	2014	23.6	22.8	13.9	11.3	12.5	12.6	11.7	16.5	17.4	22.1	24.8	0.0	17.2
	i	10.5	9.9	4.7	3.4	4.0	4.1	3.6	6.1	6.6	9.5	11.3	0.0	73.7
	l	73.7	73.7	73.7	73.7	73.7	73.7	73.7	73.7	73.7	73.7	73.7	73.7	
	a	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	
	K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
	Etpc	116.4	103.1	40.1	27.4	33.9	33.9	35.7	67.9	82.0	123.4	152.0	0.0	815.8

**Tableau 10: Synthèse des totaux annuels de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de 2001-2014**

Année hydrologique	ETPc annuelle
2001/2002	911.2
2002/2003	966.2
2003/2004	915.3
2004/2005	934.8
2005/2006	936.7
2006/2007	927.6
2007/2008	915.1
2008/2009	940.2
2009/2010	905.7
2010/2011	898.5
2011/2012	912.8
2012/2013	866.1
2013/2014	815.8

L'évapotranspiration potentielle moyenne de la période 2001–2014 a été déterminée en faisant la moyenne arithmétique des valeurs annuelles d'ETPc.

$$\text{ETP}_{\text{moy}} = 909.1 \text{ mm}$$

### 8.2.L'évapotranspiration réelle ETR

Elle désigne l'évapotranspiration qui s'exprime dans les conditions réelles d'humidité du sol. Son évaluation peut être réalisée à l'aide de différentes formules empiriques adaptées à ce type de situation. (Yahiaoui.2011)

- **Formule de TURC**

Cette formule est fonction de la température moyenne annuelle et de la hauteur moyenne des précipitations moyennes annuelles. Elle s'écrit :

$$ETR = \frac{p}{\sqrt{0.9 + \frac{p^2}{L^2}}}$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

## CHAPITRE 3 : Hydroclimatologie

---

L : pouvoir évaporant de la température.

$$L=300+24T+0.05T^3=1056.4$$

T : température moyenne annuelle. T= 18.2

Donc **ETR= 833.5**

- **Formule de Coutagne**

Cette formule tient compte essentiellement des précipitations et de la température. Son application est restreinte à la condition suivante :

Avec :

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$$

ETR : l'évapotranspiration réelle en mm

P : lame moyenne annuelle précipitée en mm

T : température moyenne annuelle en °C

Le tableau suivant présente les résultats du calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)

**Tableau 11: résultats du calcul de l'évapotranspiration réelle ETR (formule de coutagne)**

P	T	$\lambda$	$1/8\lambda$	$1/2\lambda$	ETR(m)	ETR (mm)
0.7907	18.2	0.299	0.419	1.674	0.6040	604

La condition précédente est vérifiée.

Donc **ETR=604 mm**

- **Méthode du bilan de Thornthwaite**

Cette méthode repose sur le calcul mensuel de l'évapotranspiration potentielle (ETP), considérée comme le pouvoir évaporant de l'atmosphère sur le bassin étudié, en se basant sur les données de la station de Dar El Beïda. Le sol est supposé saturé lorsque sa réserve facilement utilisable (RFU) atteint 100 mm, bien que cette valeur puisse généralement varier entre 50 mm et 200 mm. Le mois de septembre est retenu comme point de départ de l'analyse, car il correspond à la période où la réserve en eau du sol est totalement épuisée.

Trois situations principales peuvent alors être distinguées :

- 1er cas : Si  $P \geq ETP$  ; on pose **ETR = ETP** et l'excédent des précipitations sur ETR est emmagasiné dans l'humidité du sol et donc il augmente les réserves jusqu'à ce que ce dernier soit saturé et le reste s'écoule.

## CHAPITRE 3 : Hydroclimatologie

- 2ème cas : Si  $P < ETP$  ; ETR mobilise alors l'ensemble des réserves du sol jusqu'à ce qu'elle devienne égale à l'ETP.

- ❖ Si  $P + RFU \leq ETP$ ,  $ETR = P + RFU$ .

- ❖ Si  $P + RFU > ETP$ ,  $ETR = ETP$ .

- 3ème cas : Si  $P = ETR$ , une fois la réserve d'humidité du sol épuisée, l'ETR devient égale aux précipitations, on obtient alors un déficit du bilan (Thornthwaite 1948).

**Tableau 12: Bilan de Thornthwaite à la station Dar El Beïda**

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
<b>P</b>	33.4	63.2	112.5	128.2	101.4	113.7	82.5	76.8	62.9	12.7	1.3	6.4	794.9
<b>ETPc</b>	113.2	86.1	41.4	24.9	22.1	21.4	34.7	51.5	80.5	124.2	162.5	146.6	909.0
<b>P- ETPc</b>	-79.8	-22.8	71.0	103.3	79.2	92.3	47.8	25.2	17.6	-111.5	-161.2	-140.2	
<b>ETR</b>	33.1	63.2	41.4	24.9	22.1	21.4	38.7	51.5	80.5	95.1	1.3	6.4	<b>479.6</b>
<b>RFU</b>	0	0	71	100	100	100	100	100	82.4	0	0	0	
<b>Excédent</b>	0	0	0	103.3	79.2	92.3	47.8	25.2	0	0	0	0	347.8
<b>DA</b>	79.8	22.8	0	0	0	0	0	0	0	41.3	160.9	154.4	459.2

L'analyse du Tableau...du bilan hydrologique, nous permet de constater que l'ETP est élevé au mois de mai jusqu'à septembre, avec une valeur maximale de 162.5 mm enregistré au mois de juillet. À partir du mois de décembre, on observe une reconstitution progressive du stock hydrique du sol, traduite par une augmentation de la réserve facilement utilisable (RFU). Celle-ci atteint son niveau maximal entre décembre et avril, période durant laquelle les précipitations dépassent les besoins évaporatifs. Au-delà de cette phase, une diminution progressive de la RFU s'amorce dès le mois de juin, indiquant l'épuisement complet des réserves en eau du sol.

L'examen du tableau ci-dessus montre que les valeurs de l'ETR obtenues à partir des méthodes de Thornthwaite, Turc et Coutagne présentent des écarts notables. Pour l'établissement du bilan hydrologique, la valeur retenue correspond à la moyenne des résultats issus des formules de Coutagne et de Thornthwaite, soit **541.8 mm**. En effet, l'estimation fournie par la méthode de Turc (833.5 mm) apparaît sensiblement plus élevée et a donc été écartée

**Tableau 13 : Valeurs de l'ETR obtenue par les trois méthodes**

Méthode	Thornthwaite	Turc	Coutagne
<b>ETR (mm)</b>	<b>479.6</b>	<b>833.5</b>	<b>604.0</b>

### 9. lame d'eau ruisselée

Le ruissellement de surface correspond au volume d'eau qui, lors d'un épisode pluvieux, n'est ni infiltré dans le sol ni évaporé par évapotranspiration. La lame d'eau ruisselée peut être estimée à l'aide de la formule de (Tixeront-Berkaloff), exprimée comme suit :

$$R = \frac{P^3}{3(ETPc)^2} \text{ si : } P < 600 \text{ mm.}$$

Avec :

R : Ruissellement annuel (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

ETPc: Evapotranspiration potentielle annuelle corrigée (mm).

La formule de Tixeront-Berkaloff modifiée par Romantchook est la suivante :

$$R = P^3/3 \text{ si : } P > 600 \text{ mm.}$$

Avec :

R : Ruissellement annuel (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

Dans notre cas les valeurs des précipitations sont ( $P > 600 \text{ mm}$ ) ; donc on applique la deuxième formule, qui donne un ruissellement de 164.8 mm.

### 10. lame d'eau infiltrée

De la même manière que pour le ruissellement, une tentative d'estimation de l'infiltration a été effectuée. Ce paramètre reste cependant difficile à quantifier en l'absence de mesures directes, telles que celles obtenues au moyen d'un lysimètre. Dans ce travail, l'infiltration a donc été évaluée à partir de l'équation du bilan hydrologique.

$$P = ETR + R + I \text{ d'où } I = P - (ETR + R)$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles (mm) ; P= 790,7mm

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne (mm) ; ETR=541,8mm

R : lame d'eau ruisselle (mm) ; R= 164,8mm

I : lame d'eau infiltrée (mm).

L'application numérique donne :  $I = 790.7 - (541.8 + 164.8) = 84.1 \text{ mm}$

### 11. Estimation du bilan hydrologique

Le calcul du bilan hydrologique, réalisé à partir des données de la station de Dar El Beïda, a permis de mettre en évidence les différentes composantes du cycle hydrique, à savoir les précipitations, l'infiltration, l'évapotranspiration réelle et le ruissellement.

**Tableau 14 : récapitulatif des différents termes du bilan hydrologique de la station Dar El Beïda (2001-2014)**

	<b>Précipitation</b>	<b>ETR</b>	<b>Ruissellement</b>	<b>Infiltration</b>
Teneur en (mm)	790.7	541.8	164.8	84.1
Teneur en %	100	68.5	20.8	10.6

### 12- Conclusion

L'étude hydroclimatologique de la Mitidja met en évidence les principales caractéristiques du régime hydrique de la région. Le bilan hydrologique réalisé révèle une pluviométrie annuelle moyenne de 790,7 mm, dont la majeure partie est consommée par l'évapotranspiration réelle (541,8 mm), traduisant l'influence marquée du climat méditerranéen, chaud et sec en été. Les apports en eau de surface se manifestent par un ruissellement de 164,8 mm, confirmant l'importance de l'écoulement direct dans l'alimentation des cours d'eau et des retenues. Enfin, une fraction plus réduite, estimée à 84,1 mm, contribue à l'infiltration, jouant un rôle essentiel dans la recharge de la nappe phréatique de la Mitidja.

Ces résultats traduisent un équilibre fragile entre les entrées et les sorties d'eau, où la forte évapotranspiration limite la disponibilité hydrique, mais où l'infiltration demeure néanmoins un apport non négligeable pour les ressources souterraines. L'ensemble met en évidence le caractère méditerranéen du climat local, marqué par une alternance entre abondance hivernale et déficit estival, conditionnant directement la gestion durable de l'eau dans cette plaine.

***CHAPITRE 4 :***  
***Modélisation hydrologiques***

### **Chapitre 4 : Modélisation hydrologiques**

#### **1- Introduction**

Ces dernières années, l'évolution rapide des moyens de calcul et l'apparition d'ordinateurs de plus en plus puissants ont profondément changé la façon dont on aborde la modélisation hydrologique. Aujourd'hui, ces outils informatiques permettent aux hydrologues de simuler plus facilement et plus rapidement le comportement des bassins versants, en particulier la relation entre les précipitations et les débits. Les modèles développés ces trois dernières décennies offrent ainsi une grande souplesse d'utilisation et un gain de temps considérable dans les analyses.

L'utilisation de modèles mathématiques appliqués aux données d'observation et aux mesures de terrain est pourtant indispensable pour mieux comprendre le fonctionnement d'un bassin versant et ses échanges avec le milieu environnant. Un modèle hydrologique permet à la fois de décrire la situation actuelle et de prévoir l'évolution future du système.

Ces modèles cherchent à représenter les différentes étapes de la transformation pluie-débit, y compris les phénomènes liés aux crues et aux étiages. Ils fournissent ainsi des informations précieuses pour dimensionner les ouvrages hydrauliques, mettre en place des protections contre les crues, ou encore gérer les ressources en eau et les écosystèmes d'un bassin versant.

Cependant, un modèle reste toujours une simplification d'un système naturel complexe (Payraudeau, 2002). Le choix d'un modèle doit donc se faire avec soin, en vérifiant sa capacité à reproduire le plus fidèlement possible la réalité du terrain.

Dans le présent chapitre, nous allons définir la modélisation hydrologique, ses principes, ses objectifs et présenter quelques modèles hydrologiques.

#### **2- Définitions**

##### **2-1- Hydrologie**

L'hydrologie c'est la science qui s'intéresse à étudier et analyser le cycle global de l'eau et son comportement à la surface terrestre et dans le sol. Elle est liée à d'autres disciplines telles que l'hydraulique, la statistique appliquée, la mécanique des sols, ou encore la géographie physique. L'étude hydrologique est essentielle dans les différents projets comme l'irrigation, l'alimentation en eau, le drainage et dans les dispositifs de protection contre les inondations. Elle permet aussi d'évaluer les débits moyens et extrêmes (crues et étiages) afin d'assurer la sécurité, le dimensionnement et la bonne exploitation hydraulique (Zaoui,2022).

##### **2-2- Le cycle de l'eau**

Le cycle global de l'eau est un processus qui regroupe l'ensemble des phénomènes liés au mouvement et au renouvellement de l'eau à la surface de la terre. Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau s'évapore des surfaces aquatiques et du sol, formant de la vapeur dans l'atmosphère. Cette vapeur se condense en nuages, puis retombe sous forme de précipitations. Une partie de ces précipitations est interceptée par la végétation et retourne à l'atmosphère par

évapotranspiration, tandis que l'autre atteint le sol. Selon les conditions, l'eau peut s'évaporer, ruisseler ou s'infiltrer. L'eau infiltrée nourrit les plantes ou les nappes souterraines, contribuant à l'approvisionnement en eau des sources et des cours d'eau. Ainsi, l'évaporation, la transpiration et l'infiltration complètent le cycle hydrologique (Figure 11) (Zaoui,2022).

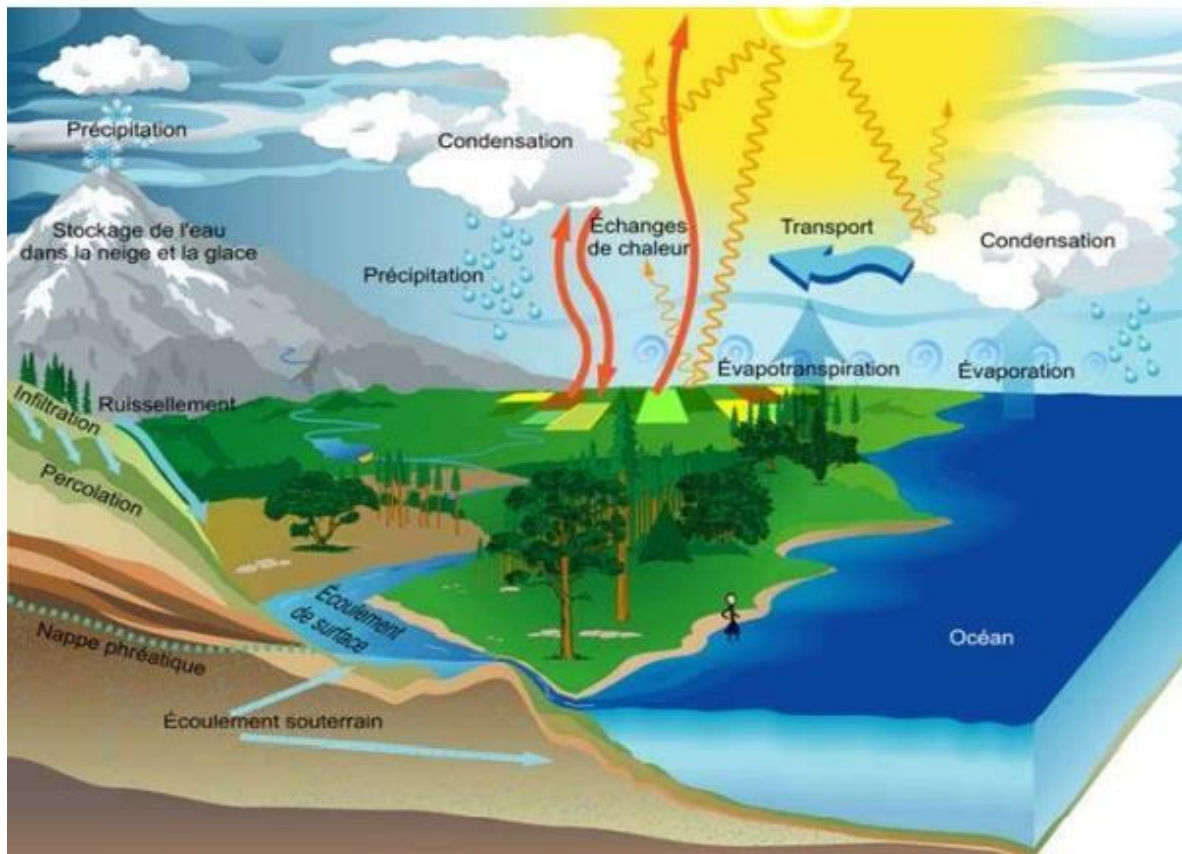


Figure 11: le cycle hydrologique (PEZET ,2014)

### 2-3- Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique consiste à représenter de manière simplifiée, soit physiquement, soit avec des équations mathématiques un système complexe dont les réactions aux sollicitations extrêmes sont difficiles à prévoir en raison du très grand nombre de facteurs mis en jeu. Cet outil est indispensable pour comprendre les phénomènes naturels, en établissant des liens mathématiques entre les variables d'entrée et de sortie. Dans le domaine de l'hydrologie, un modèle pluie-débit est un outil numérique qui illustre la liaison entre les précipitations et le débit à l'échelle d'un bassin versant. (Bekkadour,2020).

Ce modèle est défini en général par (figure 12) :

- ❖ Variables d'entrées : appelées aussi variables indépendantes ou forçages car elles jouent un rôle de moteur sur un grand nombre de processus. Ce sont les séries de données sur la pluie, l'évapotranspiration ou la température.

## CHAPITRE 4 : Modélisation hydrologiques

- ❖ Variables de sorties : c'est les variables dépendantes qui indiquent les résultats produits par le modèle, comme le débit à l'exutoire, le niveau de la nappe phréatique, ou encore les flux et concentrations des polluants.
- ❖ Variables d'états : ce sont les variables internes qui décrivent l'états de système, permettent de le caractériser et représenter comment évolue dans le temps. Ces variables sont les niveaux de remplissage des différents réservoirs.
- ❖ Equations mathématiques : leur rôle c'est d'établir des liens entre les variables sorties avec les variables d'entrées et celles d'états. Elles permettent donc de représenter, de façon plus ou moins détaillée les processus qui se produisent dans le bassin versant étudié.
- ❖ Paramètres de calage : pour adapter le fonctionnement du modèle au bassin versant étudié, il faut utiliser ces paramètres qui peuvent avoir une signification physique approximative ou être calés pour améliorer les résultats.
- ❖ Ses performances : il s'agit d'estimer l'importance des erreurs du modèle, en comparant les valeurs simulées et celles mesurés.

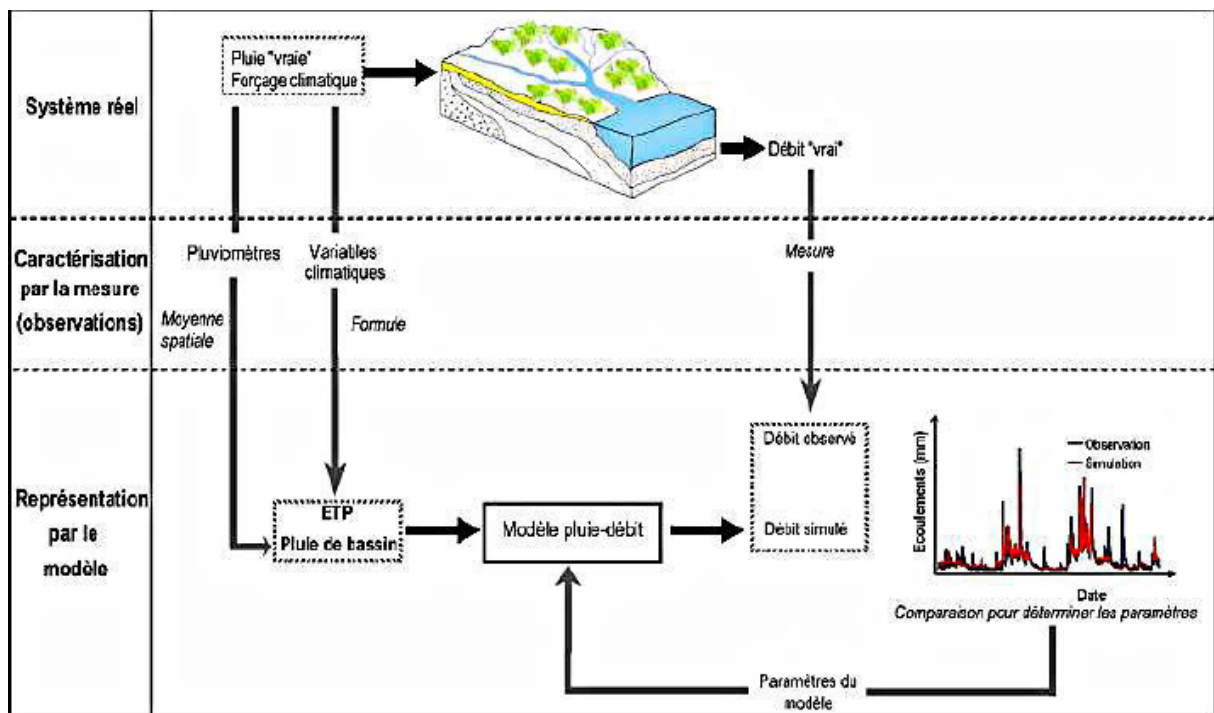


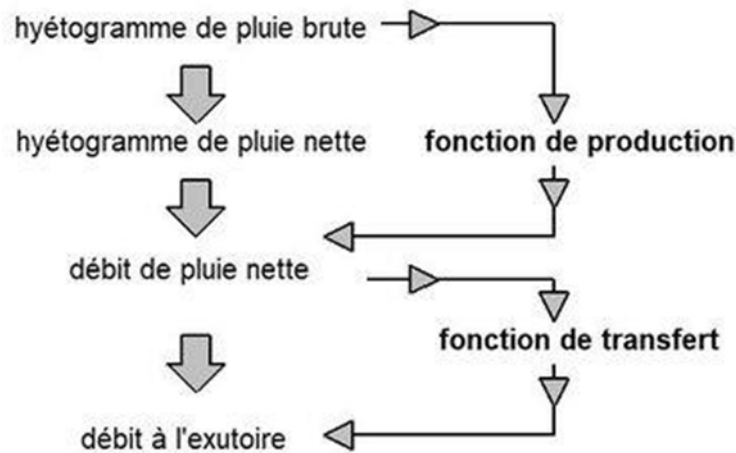
Figure 12 : Schématisation d'un modèle global pluie-débit (Koffi, 2007).

### 3- Principes de modélisation

Afin d'établir un modèle hydrologique les variables nécessaires sont traduites par deux fonctions indispensable qui constituent le principe de la modélisation. (Figure13).

- Fonction de production : c'est une méthode simple mais réaliste, elle sert à étudier le bilan hydrologique du bassin versant étudié. Elle permet de calculer la quantité d'eau qui va s'écouler à l'exutoire d'un bassin versant ou sous bassin versant.

- Fonction de transfert : c'est la transformation de la pluie nette en hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant, c'est-à-dire qu'elle donne une forme à la crue en simulant comment le débit évolue dans le temps à la sortie du bassin.



**Figure 13 :**  
production et de  
dans un modèle hydrologique (Morin, 1991).

**Fonction de  
transfert**

### 4- Objectifs de la modélisation hydrologique

Selon les travaux de Perrin, 2002), les principaux objectifs de la modélisation hydrologique sont (figure 14) (Bekkadour,2020) :

- ✓ Simulation des débits : elle sert à combler les vides (lacunes) dans les séries de données, comme les données de pluie sont souvent disponible sur une échelle temporelle plus grande que celles des débits, elle permet de reconstituer les débits passés et réaliser même des analyses statistiques.
- ✓ Prédétermination des débits de crue ou d'étiage : c'est les informations qui permettent de savoir à quelle fréquence des crues importantes (dépassant un seuil de risque) ou des faibles débits peuvent se produire, et pendant combien de temps, cela sert aussi à dimensionner les ouvrages.
- ✓ Prévion des crues et des étiages : c'est une démarche qui sert de prévoir avec un peu d'avance, les crues qui peuvent provoquer des inondations, ou les étiages qui nécessitent une bonne gestion de l'eau (comme le soutien des débits par des barrages-réservoirs).
- ✓ Évaluation de l'impact des aménagements sur l'hydrologie : la modélisation permet aussi de prédire les réactions du bassin versant suite à des changements liés aux activités humaines ou à l'environnement. Ces analyses sont très utiles afin d'évaluer les risques et aussi assurer une bonne gestion de la ressource. L'efficacité du modèle dépend alors de sa capacité à bien représenter le bassin en fonction des objectifs fixés.

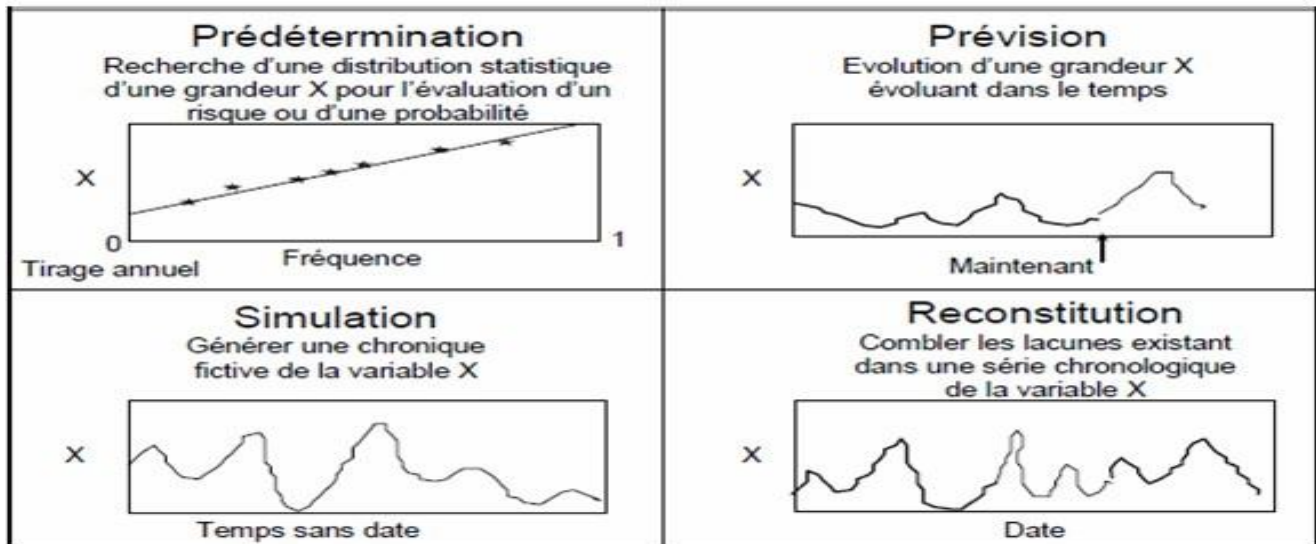


Figure 14 : Les principaux objectifs de la modélisation hydrologique (Perrin, 2002)

### 5- Classification des modèles hydrologiques

Le tout premier modèle hydrologique connu remonte à 1674, avec les travaux de Perrault sur le bassin versant de la Seine à Paris. Ce modèle, de type global et à pas de temps annuel, estimait que le débit d'écoulement représentait environ un sixième des précipitations reçues. Depuis cette époque, la modélisation hydrologique a connu un développement considérable, permettant aujourd'hui de distinguer plusieurs types de modèles, selon l'approche adoptée pour représenter les différentes composantes du cycle hydrologique (Bekkadour,2020).

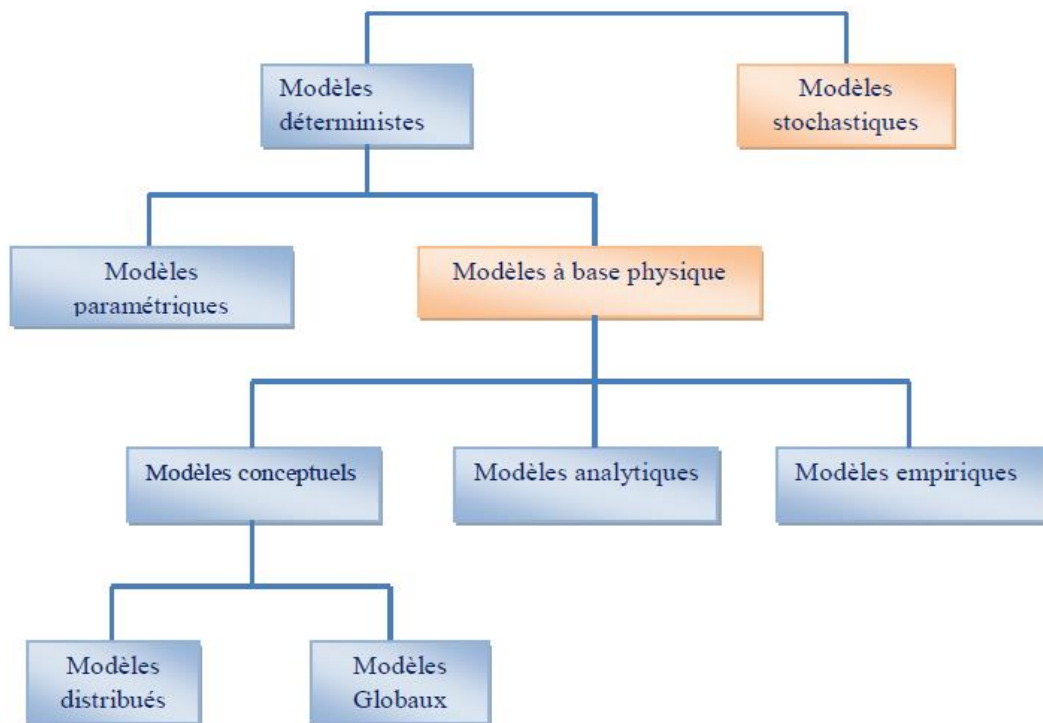


Figure 15 : Différentes approches de la modélisation. (Bekkadour,2020).

### 5-1- Modèles stochastiques

La modélisation stochastique constitue une alternative pertinente lorsqu'une incertitude existe, que ce soit au niveau des données disponibles ou des processus hydrologiques eux-mêmes. Cette approche est souvent considérée comme un outil rationnel pour appréhender la variabilité spatiale et établir des liens entre les incertitudes associées aux paramètres du modèle et celles affectant les prédictions. Néanmoins, bien qu'elle représente l'un des moyens les plus efficaces pour caractériser cette variabilité, la modélisation stochastique exige une bonne connaissance des lois de probabilité associées aux phénomènes étudiés, ou du moins de leurs moments statistiques principaux.

### 5-2- Modèles déterministes

Un modèle est qualifié de déterministe, par opposition à un modèle stochastique, lorsque l'ensemble de ses grandeurs est considéré comme non aléatoire, qu'elles proviennent d'observations directes ou de reconstitutions. Dans le domaine de l'hydrologie, la majorité des modèles adoptent cette approche. À partir d'un jeu donné de variables de forçage, d'état et de paramètres, un modèle déterministe fournit une unique valeur de sortie, généralement représentée par le débit simulé à l'exutoire du bassin versant.

#### a. Modèles à base physique

Les modèles à base physique reposent exclusivement sur les lois fondamentales de la physique, sans recourir, en principe, à des paramètres empiriques. Toutefois, dans le domaine de l'hydrologie, de tels modèles n'existent pas au sens strict. En effet, la forte hétérogénéité spatiale qui caractérise la réponse hydrologique des bassins versants rend leur mise en œuvre particulièrement complexe, voire irréalisable. L'une des principales limites réside dans la faible précision des données spatiales disponibles, notamment celles relatives à la nature des sols et à leur profondeur. En pratique, il devient donc nécessaire d'estimer certaines caractéristiques, telles que les profondeurs et les conductivités hydrauliques moyennes des sols représentatifs de différentes zones du bassin, à travers des procédures de calage.

#### b. Modèles paramétriques

C'est le type des modèles qui incluent des paramètres dont les valeurs ne sont pas directement mesurables, mais doivent être déterminées à l'aide d'une procédure de calage.

#### c. Modèles empiriques

Les modèles empiriques s'appuient sur des relations observées entre les variables d'entrée et de sortie du système hydrologique étudié. Ils visent à établir une correspondance, souvent sous forme d'équations ajustées, entre des grandeurs mesurées telles que les précipitations (entrée) et les débits (sortie), en se basant uniquement sur les données issues du système. Contrairement aux modèles physiques, les modèles empiriques ne cherchent pas à représenter les mécanismes internes ou les processus à l'origine du phénomène hydrologique. Le système y est traité comme une « boîte noire », où seule la relation entrée-sortie est prise en compte, sans explication détaillée de son fonctionnement interne.

#### d. Modèles analytiques

Il s'agit de modèles dont les relations entre les variables d'entrée et de sortie sont établies à partir de l'analyse statistique de séries de données mesurées. Un exemple typique de cette catégorie est celui des modèles linéaires, dans lesquels les paramètres sont directement liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Toutefois, l'analyse des données peut également révéler des comportements non linéaires, conduisant ainsi à l'adoption de relations plus complexes entre les variables.

### e. Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels représentent généralement le bassin versant comme un ensemble de réservoirs interconnectés, après une simplification des différentes composantes du cycle de l'eau. Cette approche vise principalement à reproduire de manière cohérente le comportement global du système hydrologique, sans pour autant chercher à en expliquer en détail les mécanismes physiques sous-jacents. Autrement dit, ces modèles privilégient la représentation du fonctionnement global du bassin à des fins de simulation, plutôt qu'une analyse causale des processus en jeu.

### f. Modèles globaux

Dans les modèles globaux, le bassin versant est traité comme une entité homogène et indivisible. Les relations entre les variables d'entrée (telles que les précipitations) et de sortie (notamment les débits) sont établies à partir de formulations empiriques, sans faire appel à des lois physiques détaillées. Ce type de modèle se caractérise par une structure simple, nécessitant peu de données, ce qui le rend attractif pour l'utilisateur en termes de facilité d'utilisation, de calibration et de mise en œuvre. Bien que la représentation des processus hydrologiques y soit très simplifiée, les modèles globaux peuvent fournir des résultats satisfaisants, en particulier dans le cadre d'objectifs opérationnels comme la prévision des crues.

### g. Modèles spatialisés

Les modèles hydrologiques spatialisés, développés par diverses écoles hydrologiques, ont atteint aujourd'hui un stade avancé de conception. Ils se caractérisent par l'utilisation d'entrées et de sorties intégrant la distribution spatiale des caractéristiques du bassin versant. La définition de cette spatialisation peut être arbitraire ou s'appuyer sur des divisions morphologiques ou hydrologiques naturelles. Ces modèles se classent généralement en trois catégories :

- Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés : simplifient les processus tout en intégrant une répartition spatiale partielle ou complète des paramètres.
- Modèles physiques spatialisés : basés sur les lois physiques, avec une représentation détaillée et localisée des processus.
- Modèles physiques-conceptuels semi-spatialisés : combinent une approche conceptuelle et physique, avec une spatialisation partielle des paramètres ou processus.

Afin de clarifier les approches existantes, le tableau ci-après présente un récapitulatif des caractéristiques essentielles des modèles pluie-débit.

**Tableau 15 : Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit.**

<b>Caractéristique</b>	<b>Type de modèle</b>
Selon la nature de la variable	- Modèle déterministe (variables non aléatoires) - Modèle stochastique (variables aléatoires)
Traitement de l'espace (homogénéité du bassin)	- Modèle global - Modèle semi-distribué ou (semi-global) - Modèle spatialisé
Fondement théorique et approche de développement	- Modèle empirique - Modèle conceptuel - Modèle à base physique

### **6- Critères d'évaluation de la modélisation**

Les modèles pluie-débit constituent des outils essentiels dans les domaines de la recherche hydrologique, du génie hydraulique ainsi que dans les études environnementales. Leur utilité est particulièrement marquée dans les applications opérationnelles, où ils doivent démontrer une grande robustesse et un haut niveau de fiabilité (Bekkadour,2020).

Afin de répondre à ces exigences et d'évaluer leur performance, plusieurs critères d'évaluation ont été développés. Ces critères peuvent être de nature graphique, permettant une appréciation visuelle de la qualité des ajustements, ou analytique, reposant sur des indicateurs numériques. En hydrologie, les critères analytiques les plus couramment utilisés sont :

#### **6-1- Erreur moyenne**

Elle est définie par la moyenne des écarts entre les débits observés et les débits calculés (Habaieb, 1992) :

$$G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})$$

G : l'erreur moyenne

n : Nombre d'observations

Q<sub>ci</sub> : Débit calculé

Q<sub>oi</sub> : Débit observé

Plus cette erreur se rapproche de zéro, plus l'estimations des débits est considéré meilleure.

#### **6-2- Erreur quadratique moyenne**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}$$

EQM : erreur quadratique moyenne

n : Nombre d'observations

Q<sub>ci</sub> : Débit calculé

Qoi : Débit observé

Plus cette erreur quadratique tend vers zéro, plus l'estimation est meilleure. C'est le critère le plus utilisé en hydrologie pour quantifier l'erreur.

### 6-3- Coefficient de Nash-Sutcliffe

$$NS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_m)^2} \right]$$

NS : critère du Nash

n : Nombre d'observations

Qci : Débit calculé

Qoi : Débit observé

Qm : Débit moyenne observé

Cette formule traduit un certain rendement du modèle comparable au coefficient de détermination d'une régression. On considère généralement qu'un modèle hydrologique donne des résultats acceptables si la valeur du critère de Nash est supérieure à 0.8 (Gaume, 2002).

NS varie entre (-∞ et 1). Si NS est égal à 1, la simulation correspond parfaitement aux données mesurées. Ce critère accorde plus d'importance aux erreurs sur les forts débits au moment du calage sur Q. En pratique, il convient de garder cette propriété à l'esprit lors de l'interprétation des performances des modèles, ou encore de transformer les variables sur lesquelles on calcule le critère (Nash et Sutcliffe, 1970).

Dans l'interprétation des résultats, cette propriété doit être prise en compte. Il peut donc être pertinent de transformer les variables utilisées dans le calcul du critère afin de rééquilibrer l'influence des différentes périodes hydrologiques, notamment entre les périodes d'étiage (faibles débits) et celles de crue (forts débits).

## 7- Typologie des modèles

Les modèles pluie-débit ont pour vocation de simuler le processus de transformation des précipitations en débits à l'échelle d'un bassin versant. Ils établissent une relation fonctionnelle entre les apports pluviométriques et les écoulements générés, permettant ainsi de mieux comprendre le comportement hydrologique global du bassin. Ces modèles contribuent à l'identification et à l'analyse des processus hydrologiques dominants, en précisant leur rôle respectif, leur dynamique temporelle ainsi que leur distribution spatiale (Perrin, 2000). Dans la suite de ce travail, nous présenterons les principaux modèles couramment mobilisés dans la littérature scientifique.

### 7-1- Modèle global (IHACRES)

Le modèle **IHACRES** (Identification of unit Hydrographs and Component flow from Rainfalls, Evaporation and Streamflow data), développé grâce à une collaboration entre le Centre for Ecology and Hydrology (CEH, Royaume-Uni) et l'Université Nationale Australienne (ANU), est un modèle hydrologique conceptuel applicable aussi bien aux petits bassins versants instrumentés qu'aux bassins de plus grande échelle. Son principal avantage réside dans ses faibles exigences en données d'entrée, limitées aux précipitations, à un

hyétogramme pour le calage, à la température ou à l'évapotranspiration potentielle (ETP), ainsi qu'aux caractéristiques morphométriques du bassin. Les sorties du modèle comprennent un hydrogramme de crue simulé, une estimation de l'humidité du sol et une évaluation des incertitudes associées aux paramètres de l'hydrogramme unitaire. (Figure 16).

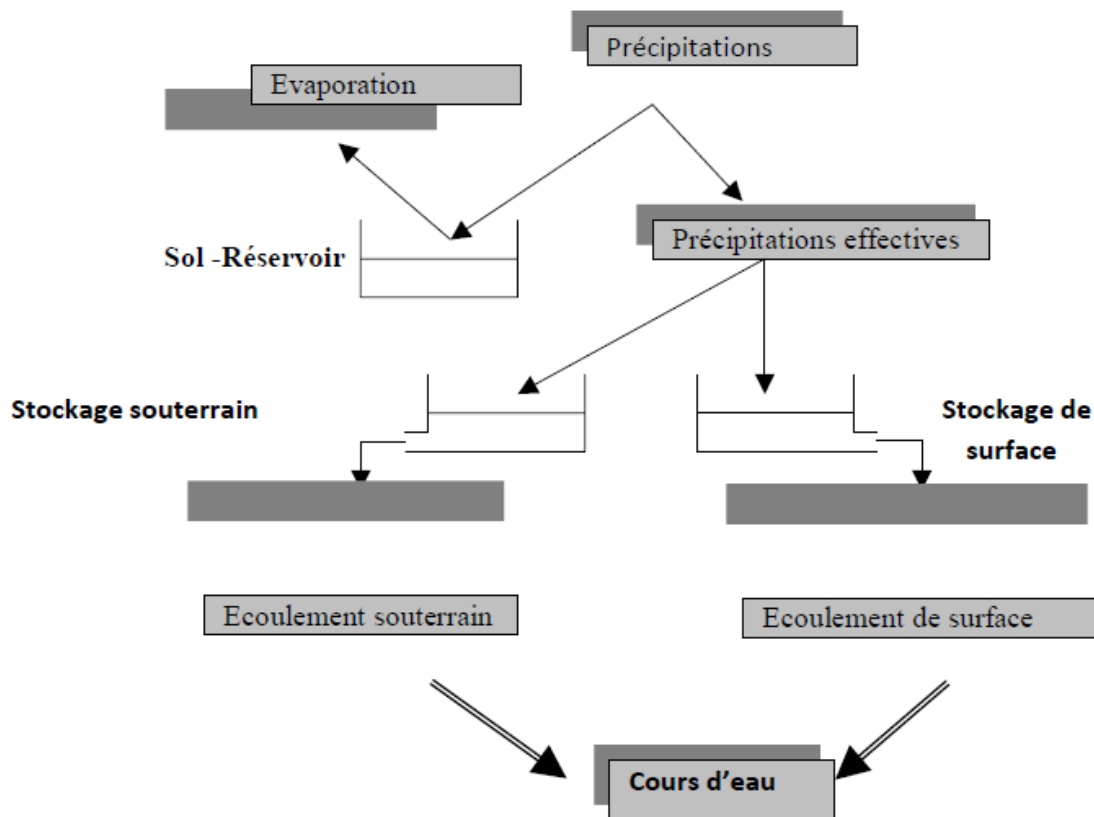


Figure 16 : Structure du modèle IHACRES (Maftai, 2002)

### 7-2- Modèle AIGA

Le système AIGA (Analyse Informatisée des Grandissements d'Averse), développé par Météo-France et le Cémagref est une méthode dédiée à la prévision opérationnelle des crues soudaines. Il exploite les données radar de précipitations mises à jour toutes les 15 minutes, ainsi que des prévisions à très court terme (1 heure). Le modèle hydrologique repose sur la méthode du SCS (Soil Conservation Service), appliquée au bassin versant, avec deux paramètres principaux et une condition initiale d'humidité du sol issue du schéma de surface ISBA. Les résultats fournis correspondent à une évaluation du risque de crue, exprimée selon la période de retour estimée de l'événement (2–10 ans, 10–50 ans, ou > 50 ans).

### 7-3- Modèle CEQUEAU

Le modèle CEQUEAU, développé depuis 1971 par l'Institut de la Recherche Scientifique Eau et Environnement du Canada, est un modèle hydrologique conceptuel spatialisé, qualifié de paramétrique matriciel à bilan. Il repose sur la décomposition du cycle hydrologique en processus élémentaires (précipitations, évapotranspiration, infiltration, fonte nivale, etc.) et

## CHAPITRE 4 : Modélisation hydrologiques

sur une représentation spatiale du bassin versant en unités homogènes (*carreaux*). Ces unités sont organisées de manière à reproduire les écoulements selon la topographie. Le modèle combine deux fonctions principales :

- Une fonction de production, qui calcule les précipitations efficaces en intégrant notamment l'évapotranspiration et la dynamique des différentes couches du sol
- Une fonction de transfert, qui simule le déplacement des volumes d'eau à travers les carreaux en prenant en compte les écoulements de surface et souterrains.

L'objectif principal de CEQUEAU est de représenter de façon réaliste les bilans hydriques au sein du bassin versant.

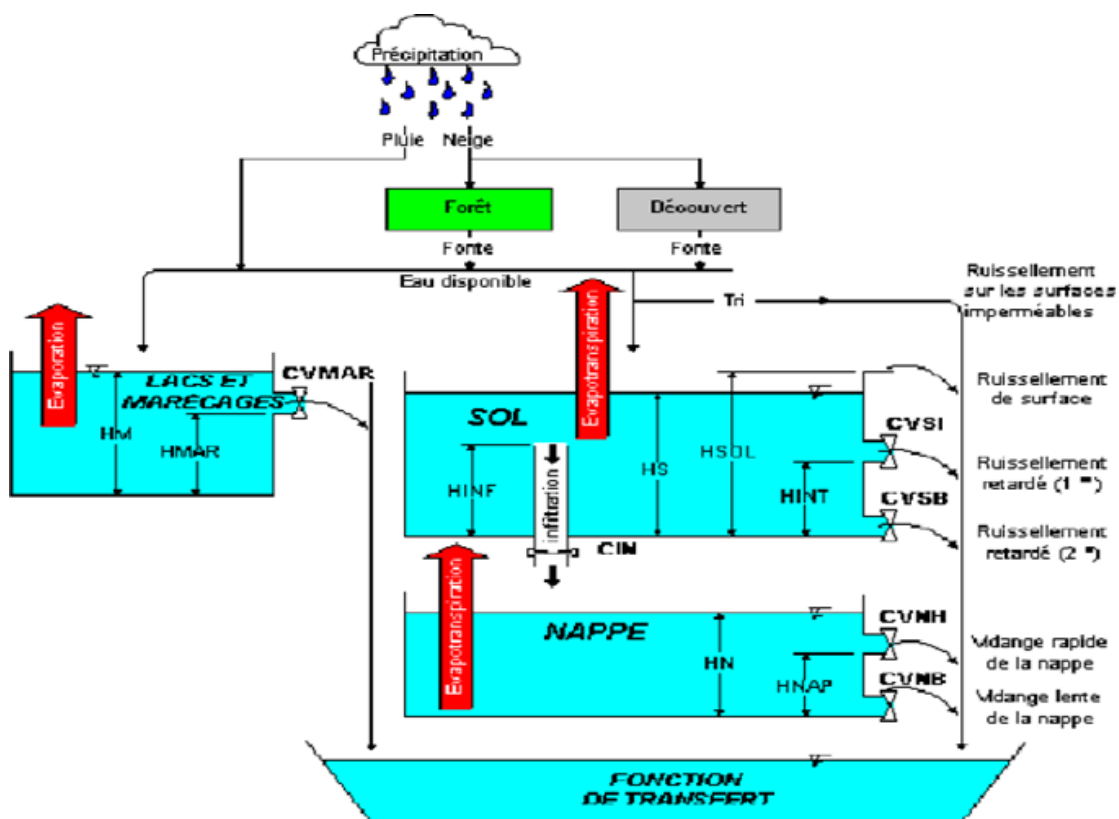


Figure 17 : La fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU [MORIN]

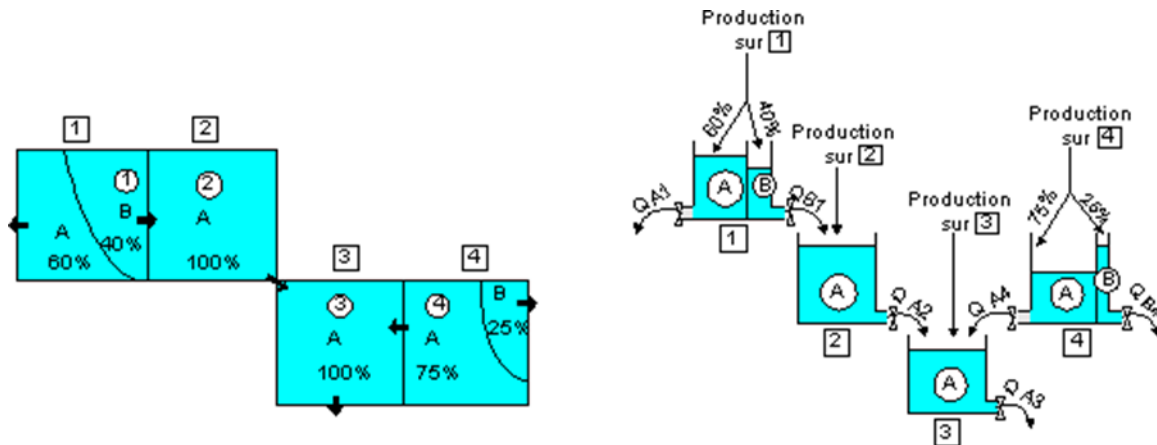


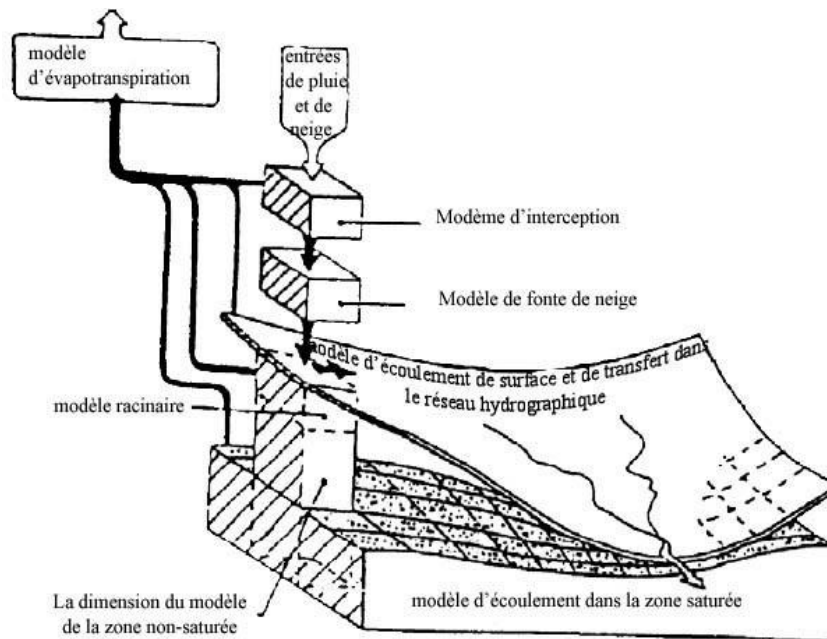
Figure 18 : La fonction de transfert du modèle CEQUEAU [MORIN]

#### 7-4- Modèle MIKE SHE

Le modèle MIKE SHE, développé par le Danish Hydraulic Institute (DHI), est un modèle hydrologique physique et distribué visant à représenter l'ensemble des processus du cycle continental de l'eau. Grâce à son approche mécaniste, il peut être appliqué à différentes échelles spatiales, de la parcelle agricole à l'ensemble du bassin versant. Ses principales applications concernent la simulation de la dynamique hydrologique des bassins, l'évaluation des impacts des changements anthropiques (occupation du sol, aménagements, caractéristiques des sols) et l'analyse de scénarios climatiques extrêmes (sécheresses, pluies intenses). La représentation spatiale s'appuie sur une discrétisation du bassin en colonnes tridimensionnelles homogènes, organisées en strates horizontales, permettant de modéliser les échanges verticaux et horizontaux, ainsi que les écoulements de surface et, dans certains cas, les transferts de polluants.

Tableau 16 : Modélisation utilisée avec modèle hydrodynamique de MIKE SHE

Interception et Evapotranspiration	Kriston et Jensen (1975)
Ecoulement en zone non saturée	Richart (1931)
Ecoulement en zone saturée	Boussineq (1904)
Ruissellement	Ondes diffusive
Ecoulement dans le réseau hydrographique	Saint Venant (1871)



**Figure 19: Structure du modèle SHE [MAFTAI-2002]**

Le modèle MIKE SHE intègre également la modélisation des transferts de polluants, des cinétiques de réaction, des phénomènes d'adsorption/désorption et des prélèvements racinaires, en s'appuyant sur des approches classiques (cinétique du premier ordre, isothermes d'adsorption). Cette complexité assure une représentation réaliste des processus physico-chimiques et biologiques influençant la qualité de l'eau. Toutefois, l'utilisation du modèle requiert de nombreuses données d'entrée (précipitations, température, occupation du sol, types de cultures, caractéristiques pédologiques, usages des terres, topographie, etc.) et une expertise approfondie. Un atout majeur de MIKE SHE réside néanmoins dans ses bases de données intégrées, qui permettent de réaliser des simulations exploratoires ou des études préliminaires sans collecte systématique de données sur le terrain, la calibration détaillée n'étant requise que pour des analyses plus fines.

### 8- Présentation du modèle choisi pour l'étude : Modèles du Génie Rural GR

Les modèles hydrologiques du Génie Rural ont été développés par le CEMAGREF au début des années 1980, dans le but d'établir une relation entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et le débit mesuré à son exutoire (Michel, 1983). Ces modèles soulèvent des questions fondamentales quant à la manière de représenter le processus de transformation de la pluie en écoulement à l'échelle d'un bassin.

Bien que leur structure, fondée sur des réservoirs, les rapproche des modèles conceptuels, ces modèles relèvent en réalité d'une approche empirique. Leur développement s'est appuyé sur l'analyse de vastes jeux de données hydrométéorologiques, permettant de faire émerger progressivement une structure capable de reproduire fidèlement le comportement hydrologique du bassin (Mathevet, 2005).

Plusieurs principes méthodologiques ont guidé leur élaboration :

- Représentation globale du bassin versant, sans découpage spatial

- Développement empirique, sans recours initial aux équations physiques régissant les écoulements ;
- Construction progressive des modèles, en augmentant leur complexité à partir de structures simples ;
- Justification de l'ajout de complexité uniquement par l'amélioration des performances du modèle ;
- Recherche de structures généralisables, applicables à une diversité de bassins versants ;
- Validation systématique à l'aide de larges échantillons de bassins, afin de tester la robustesse des modèles (Andréassian et al., 2006) ;
- Évaluation comparative avec d'autres structures de modèles, pour mieux situer leurs performances relatives.

La famille des modèles GR (Génie Rural) comprend différentes versions adaptées à des pas de temps variés :

- GR1A : simulation à pas de temps annuel ;
- GR2M : simulation mensuelle ;
- GR4J : simulation journalière ;
- GR3H : simulation horaire.

Cette diversité temporelle permet de répondre à des objectifs spécifiques, allant de la gestion à long terme des ressources en eau jusqu'à la prévision en temps réel.

### 8-1- Modèle pluie-débit annuel GR1A

Le modèle GR1A (Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global fonctionnant à un pas de temps annuel. Il se caractérise par une structure particulièrement simple, reposant sur un seul paramètre à calibrer. Son développement a été initié à la fin des années 1990 par le Cemagref, dans le cadre d'une démarche visant à concevoir un modèle de simulation robuste, fiable et facilement applicable, notamment pour les besoins de l'évaluation et de la gestion des ressources en eau (Dahmani, 2016)

La structure du modèle demeure relativement simple, puisqu'elle se ramène à une unique équation. Le débit annuel  $Q_k$  est exprimé comme une fonction proportionnelle à la pluviométrie  $P_k$  de l'année considérée, le coefficient d'écoulement étant, quant à lui, influencé par la pluviométrie de l'année précédente ( $P_{k-1}$ ) que par l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne  $E_k$ .

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X \cdot E_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\}$$

Où :

- $Q_k$  : est le débit simulé de l'année  $k$
- $P_k$  : est la pluie observée de l'année
- $P_{k-1}$  : est la pluie observée de l'année  $k-1$
- $E_k$  : est l'évapotranspiration potentielle de l'année  $k$
- $X$  : est le paramètre du modèle à optimiser

Le paramètre  $X$ , traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (échanges avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents).

Si  $X > 1$  : Le système perd de l'eau

Si  $X < 1$  : Le système gagne de l'eau

Ce paramètre apparait comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle sur un large échantillon de bassins versants. Les valeurs trouvées sont présentées dans le tableau 17

**Tableau 17: Valeurs des paramètres du modèle GR1A obtenues sur un large échantillon de Bassins versants.**

Paramètres	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X(mm)	0.7	0,13 – 3,5

### 8-2- Le modèle pluie-débit mensuel GR2M

Le modèle GR2M (Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global fonctionnant à un pas de temps mensuel et basé sur deux paramètres à calibrer. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, dans une optique d'application à la gestion des ressources en eau et à l'étude des étiages.

Ce modèle a fait l'objet de plusieurs améliorations successives, proposées notamment par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhoulf (1994), Makhoulf et Michel (1994), puis Moulhi (2003) et Moulhi et al. (2006b). Ces contributions ont permis d'affiner progressivement la structure du modèle et d'en améliorer les performances. La version retenue ici est celle de Moulhi et al. (2006), considérée comme la plus aboutie.

Bien que fondée sur une approche empirique, la structure de GR2M s'apparente à celle des modèles conceptuels à réservoirs. Elle repose sur un mécanisme de suivi de l'état d'humidité du bassin versant, permettant d'intégrer l'effet des conditions antérieures et d'assurer une simulation hydrologique en continu.

Le modèle repose sur l'interaction de trois fonctions clés (figure 18) :

- Un réservoir de production, représentant les échanges entre la pluie, l'évapotranspiration et l'humidité du sol ;
- Un réservoir de routage, chargé du transfert des eaux produites vers l'exutoire ;

## CHAPITRE 4 : Modélisation hydrologiques

---

- Une ouverture vers l'extérieur du bassin, simulant les échanges non atmosphériques (tels que les pertes vers les nappes profondes ou les échanges avec des bassins adjacents).

L'articulation de ces composantes permet au modèle de reproduire de manière satisfaisante le comportement hydrologique global du bassin versant.

Un schéma de la structure est donné à la figure 20 Pk est la pluie mensuelle du mois k et E

L'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol, très similaire à celui existant dans le modèle GR4J. Du fait de la pluie P, le niveau S dans le réservoir devient S1 défini par :

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{X_1}{S}} \quad \text{ou} \quad \varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)$$

Le paramètre X1, capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie P1 en excès est donnée par :

$$P_1 = P + S - S_1$$

Du fait de l'évapotranspiration, le niveau S1 devient S2 :

$$\frac{S_1(1-\Psi)}{1+\Psi\left(1-\frac{S_1}{X_1}\right)} \quad \text{Ou} \quad \Psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$$

E est l'évapotranspiration potentielle. Le réservoir se vidange ensuite en une percolation P2 et son niveau S, prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$\frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X}\right)^3\right]^{\frac{1}{3}}} \quad \text{et} \quad P_2 = S_2 - S$$

La pluie totale P3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :  $P_3 = P_1 + P_2$ ,

Le niveau R dans le réservoir devient alors R1 :  $R_1 = R + P_3$ ,

Un terme d'échange en eau est alors calculé par :  $F = (X_2 - 1) \cdot R_1$ .

Le paramètre X2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_2 = X_2 * R$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange suivant une fonction quadratique. Le débit est donné par :

$$Q = \frac{R^2}{R_2 + 60}$$

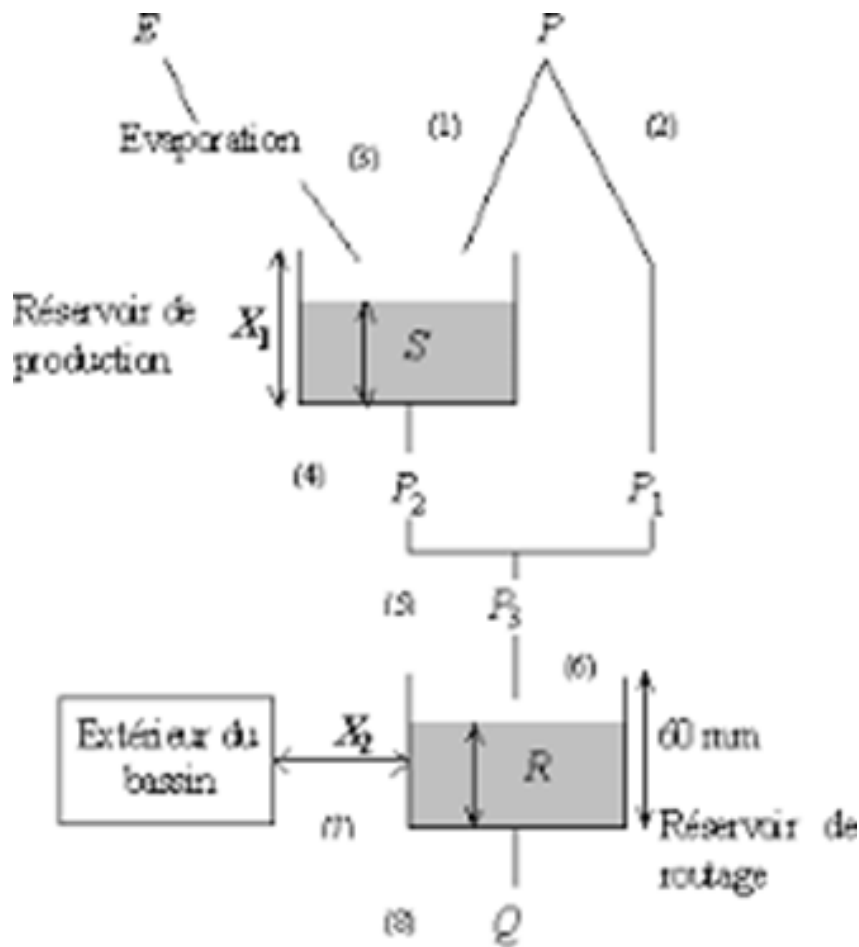


Figure 20 : Schéma de la structure du modèle GR2M. [GHERISSI.2012]

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X1 : capacité du réservoir de production (mm),

X2 : coefficient d'échanges souterrains (-).

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le tableau 18

Tableau 18: Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants. [GHERISSI.2012]

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X1(mm)	380	140 – 2640
X2 (-)	0.92	0,21 – 1,31

### 8-3- Le modèle pluie-débit journalier GR4J

Le modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à pas de temps journalier, reposant sur quatre paramètres. Il a été développé au début des années 1980 par le Cemagref dans le but de fournir un outil de simulation hydrologique à la

## CHAPITRE 4 : Modélisation hydrologiques

fois fiable, robuste et facilement applicable dans des contextes variés de gestion des ressources en eau et d'ingénierie hydrologique. Ses applications couvrent notamment le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, la prévision des crues et des étiages, la gestion de réservoirs ou encore la détection des impacts anthropiques ou climatiques sur le régime hydrologique.

Le GR4J est un modèle global à réservoirs, ce qui signifie qu'il considère le bassin versant comme une entité homogène, sans prise en compte explicite de la variabilité spatiale de ses caractéristiques physiques ou hydrologiques. La conversion des précipitations en débits est modélisée à l'aide d'une structure simple de réservoirs interconnectés, combinée à des formulations mathématiques efficaces, permettant de représenter les principales composantes du cycle hydrologique.

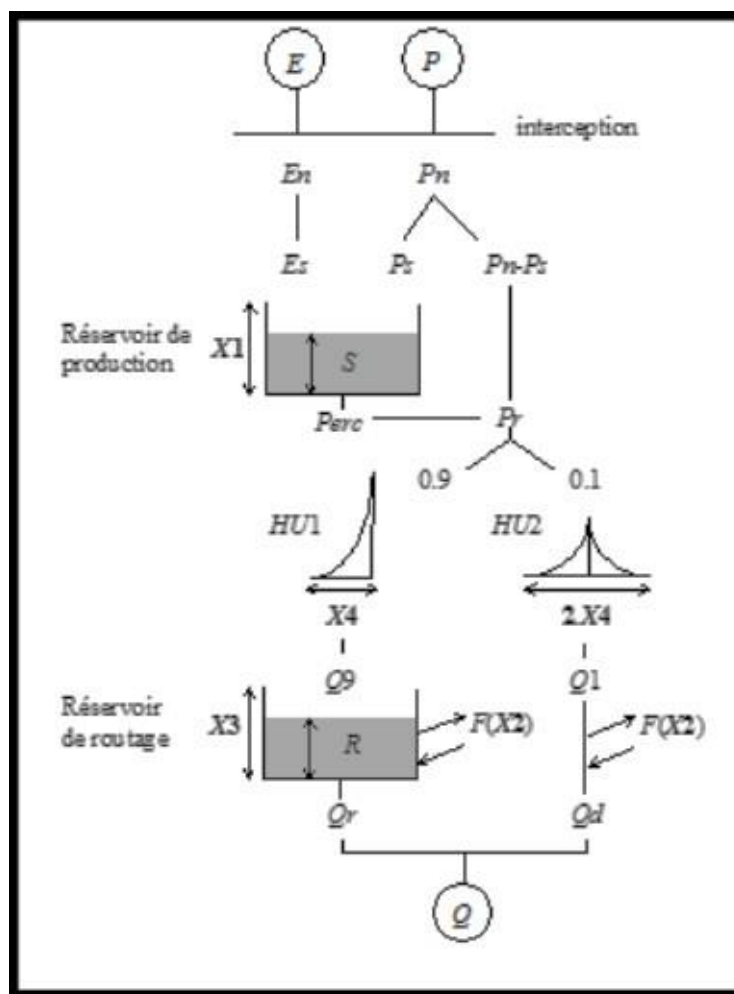
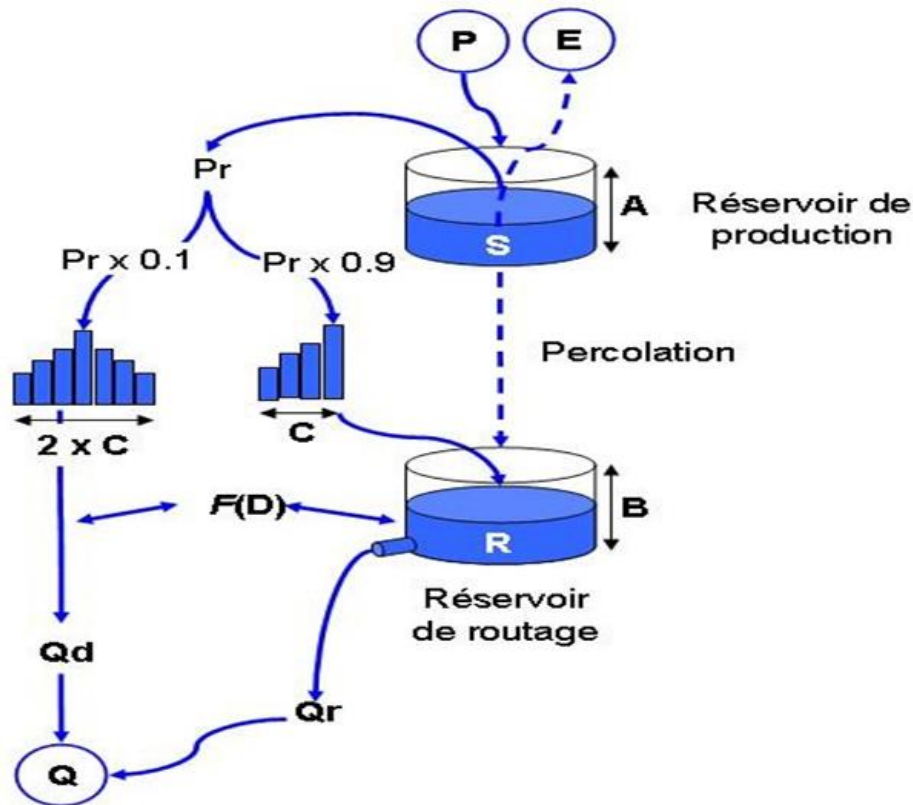


Figure 21 : Schéma de la structure du modèle GR4J [Perrin, 2000]



Le modèle GR4j (Perrin et al., 2003)

- 4 paramètres :
  - A : capacité maximale du réservoir de production (en mm)
  - B : capacité maximale du réservoir de routage (en mm)
  - C : durée de l'hydrogramme unitaire (en jours)
  - D : échange inter-bassin (en mm)
- données d'entrée : précipitations et ETP journalières (mm/j)
- données produites : écoulements moyens journaliers (mm/j)

Figure 22 : Structure du modèle GR4J (Perrin et al., 2003)

Le modèle a quatre paramètres optimisables. On désigne par P (mm) la hauteur de la pluie et par E (mm) l'évapotranspiration potentielle (ETP).

P est une estimation de la pluie de bassin et E peut être issue d'une courbe d'ETP moyenne interannuelle. Les équations suivantes correspondent aux équations intégrées sur un pas de temps.

La première opération est la neutralisation de P par E pour déterminer une pluie nette  $P_n$  et une évapotranspiration nette  $E_n$  calculée par :

$$P > E \quad \text{alors} \quad P_n = P - E \quad E_n = 0$$

$$\text{Si } P < E \quad \text{alors} \quad P_n = 0 \quad \text{et} \quad E_n = E - P$$

Dans le cas où  $P_n$  est différente de zéro, une partie  $P_s$  de  $P_n$  alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 \left( 1 - \left( \frac{S}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left( \frac{-P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh \left( \frac{P_n}{X_1} \right)}$$

Où

$X_1$  (mm) et  $S$  sont respectivement la capacité maximum et le niveau du réservoir de production.

Dans le cas contraire, lorsque  $E_n$  est différent de zéro, une quantité d'évaporation  $E_s$  est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$P_s = \frac{S \left( 2 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left( \frac{-E_n}{X_1} \right)}{1 + \left( 1 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left( \frac{E_n}{X_1} \right)}$$

Le contenu du réservoir est mis à jour par :

$$S = S - E_s + P_s$$

Une percolation  $Perc$  issue du réservoir de production est alors calculée :

$$Perc = S' \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{4 S'}{9 X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Le contenu du réservoir est de nouveau mis à jour par :

$$S = S - Perc$$

La quantité d'eau  $P_r$  qui atteint finalement la partie routage du modèle est :

$$P_r = Perc + (P_n - P_s)$$

$P_r$  est divisé en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire  $HU_1$  et un réservoir de routage et 10 % par un unique hydrogramme unitaire  $HU_2$ .  $HU_1$  et  $HU_2$  dépendent du même paramètre  $X_4$ , temps de base de  $HU_1$  exprimé en jours. Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en  $S$  (cumul de la proportion de la pluie unitaire traitée par l'hydrogramme en fonction du temps) notées respectivement  $SH_1$  et  $SH_2$ .

$SH_1$  est définie en fonction du temps par :

$$\text{Pour } t = 0 \quad SH_1(t) = 0$$

## CHAPITRE 4 : Modélisation hydrologiques

---

$$\text{Pour } 0 < t < X4 \quad SH1(t) = \frac{t}{X4}$$

$$\text{Pour } t \geq X4 \quad SH1(t) = 1$$

SH2 est définie de façon similaire par :

$$\text{Pour } t \leq 0 \quad SH2(t) = 0$$

$$\text{Pour } 0 < t \leq X4 \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}}$$

$$\text{Pour } X4 < t < 2X4 \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left( 2 - \frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}}$$

$$\text{Pour } t > 2X4 \quad SH2(t) = 1$$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

$$SH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1)$$

$$SH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1)$$

Où « j » est un entier

A chaque pas de temps k, les sorties Q9 et Q1 des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0.9 \sum UH1(j) \cdot Pr(k-j+1)$$

$$Q1(k) = 0.1 \sum UH2(j) \cdot Pr(k-j+1)$$

Où  $l = \text{int}(X4) + 1$  et  $m = \text{int}(2.X4) + 1$ , avec  $\text{int}(\cdot)$  désignant la partie entière.

Un échange souterrain en eau (perte ou gain) est calculé par :

$$F = X2 \left( \frac{R_k}{X3} \right)^{\frac{7}{2}}$$

Où R est le niveau dans le réservoir, X3 la capacité à un jour du réservoir et X2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.

Le niveau dans le réservoir de routage est mis à jour en ajoutant la sortie Q9 De l'hydrogramme HU1 et F :

$$R = \max(0 ; R + Q9 + F)$$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par :

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{R}{X3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Le niveau dans le réservoir devient :  $R = R - Q_r$

La sortie  $Q_1$  de l'hydrogramme HU2 est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement  $Q_d$  :

Le débit total  $Q$  est alors donné par :  $Q = Q_r + Q_d$

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler :

X1 : capacité du réservoir de production (mm)

X2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau

Suivant :

**Tableau 19 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants. [BOUREK,2010]**

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
X1 (mm)	350	100 à 200
X2 (-)	0	-5 à 3
X3 (mm)	90	20 à 300
X4 (jours)	1.7	1.1 à 2.9

### 8-4- Le calage et validation d'un modèle

Le calage d'un modèle hydrologique consiste à déterminer l'ensemble de paramètres qui permet de reproduire au mieux le comportement hydrologique observé du bassin versant. Pour ce faire, on utilise un critère d'évaluation ; dans ce cas, il s'agit du critère des moindres carrés des erreurs, exprimé sous la forme adimensionnelle de l'indice de Nash-Sutcliffe borné. Le calage revient donc à rechercher les valeurs optimales des paramètres qui minimisent l'erreur de modélisation sur la période de référence retenue. En pratique, une période d'environ cinq ans est généralement utilisée pour cette étape.

La validation consiste ensuite à appliquer le modèle sur un jeu de données indépendant, c'est-à-dire des observations qui n'ont pas servi lors du calage, afin de vérifier la capacité du

modèle à reproduire correctement le fonctionnement hydrologique du bassin sur d'autres périodes. [BOUREK,2010]

### 8-5- Critères de qualité

#### 8-5-1. Le coefficient de détermination ( $R^2$ )

Il permet d'évaluer le degré d'association entre deux variables X et Y et de juger de la qualité de l'ajustement des points par la droite de régression, en expliquant la proportion de la variance de Y par les variations de X. [BENKACI A ,2006].

Il peut être estimé par l'équation suivante :

$$R^2 = \frac{\sum(Q_i \text{ obs} - Q_i \text{ sim})^2}{\sum(Q_i \text{ obs} - Q_i \text{ moy})^2}$$

Où  $Q_{moy}$  est la moyenne des débits observés. Pour une bonne simulation des débits le coefficient de détermination doit être égal à un.

#### 8-5-2. Le critère de Nash

Nash et Sutcliffe (1970) ont proposé un critère adimensionnel, largement reconnu comme l'un des principaux indicateurs de performance des modèles pluie-débit. Ce critère mesure la proportion de la variance naturelle des débits observés qui est expliquée par le modèle, en comparaison avec un modèle de référence simple qui attribuerait à chaque pas de temps la moyenne des débits observés.

Il est défini par la relation suivante :

$$Nash(Q) = 100 \times \left[ 1 - \frac{\sum_i (Q_{i, \text{obs}} - Q_{i, \text{cal}})^2}{\sum_i (Q_{i, \text{obs}} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2} \right]$$

$Q_{i, \text{obs}}$  et  $Q_{i, \text{cal}}$  sont les débits observés et calculés au pas de temps  $i$  (mm)

$\bar{Q}_{\text{obs}}$  est la moyenne des débits observés sur la période considérée.

Pour tenir compte de certaines valeurs particulières des débits, ce critère a été calculé en utilisant la racine carrée des débits pour atténuer l'importance des débits de pointe, ou le logarithme pour les débits d'étiage. En pratique, on estime que la simulation est de mauvaise qualité lorsque le critère de Nash est faible ( $< 70\%$ ), elle est acceptable lorsqu'il est supérieur à  $70\%$ , parfaite lorsqu'il est égal à  $100\%$ . (BENKACI A,2006)

### 9- Conclusion

Un bassin versant est un système complexe ouvert dont le fonctionnement, en réponse aux forçages atmosphériques, dépend étroitement de ses caractéristiques hydrologiques et pédologiques. De nombreux travaux de recherche ont été consacrés à l'étude des processus intervenant dans la génération des débits, permettant des avancées majeures dans la compréhension des cheminements de l'eau au sein d'un bassin versant.

Dans ce contexte, la modélisation pluie-débit s'impose comme l'un des outils les plus adaptés pour représenter, de manière simplifiée, la réalité complexe du fonctionnement hydrologique. Compte tenu de la diversité des conditions hydroclimatiques à travers le monde, différents types de modèles pluie-débit ont été développés afin de prédire la réponse hydrologique d'un bassin versant à des événements pluvieux, à partir de séries d'observations conjointes de précipitations et de débits.

Au vu des objectifs de la présente étude et des caractéristiques du bassin versant étudié, le choix s'est porté sur le modèle GR (GR1A et GR2M, reconnu pour sa simplicité de mise en œuvre et sa capacité à fournir des simulations fiables avec un nombre limité de paramètres.

***CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-  
débit du bassin de la Mitidja  
(Bassin d'El Harrach)***

## **1- Introduction**

La modélisation pluie-débit constitue une démarche essentielle pour appréhender la relation entre les précipitations reçues par un bassin versant et les écoulements qui en résultent. Dans ce travail, les modèles du Génie Rural (GR) ont été retenus pour représenter le comportement hydrologique du bassin versant de la Mitidja. Ces modèles conceptuels offrent la possibilité, une fois le schéma établi, d'évaluer si le système échange de l'eau avec d'autres milieux que l'atmosphère, tout en fournissant un outil fiable pour l'analyse des interactions entre eaux de pluie et eaux souterraines.

L'application de cette approche au bassin de la Mitidja vise à simuler sa réponse hydrologique afin de mieux caractériser les relations entre précipitations, ruissellement et recharge de la nappe phréatique. Cette démarche permet également de mettre en évidence l'influence de la variabilité climatique, déjà discutée dans les chapitres précédents, sur la disponibilité et la dynamique des ressources en eau souterraine dans la région étudiée.

## **2- Choix de l'unité hydrologique modélisable et préparation des données**

La modélisation hydrologique s'applique à l'unité hydrologique qu'est le bassin versant. Dans cet espace, un oued principal draine les eaux provenant de ses affluents. Le bassin de la Mitidja se subdivise en trois unités hydrologiques distinctes, chacune caractérisée par un réseau hydrographique propre alimentant l'oued principal, ces unités sont : la Mitidja-Est (ou orientale), la Mitidja-Centre et la Mitidja-Ouest (ou occidentale).

Dans le cadre de ce travail, la modélisation hydrologique retenue ne peut être appliquée qu'au bassin versant de la Mitidja-Centre, appelé bassin versant de l'El Harrach. En effet, la présence de barrages dans les autres bassins empêche l'évaluation directe des volumes d'eau ayant transité lors des épisodes pluvieux. Les stations hydrométriques implantées en aval de ces ouvrages enregistrent généralement les débits issus des lâchures ou bien ceux du bassin situé après la digue. Par ailleurs, des données récentes de précipitations et de températures ont été exploitées afin de caractériser le contexte climatique actuel du bassin. Cependant, la modélisation hydrologique nécessite la disponibilité conjointe des variables météorologiques (P, T) et hydrologiques (Q). Or, les données de débit existantes ne concernent qu'une période ancienne. De ce fait, la modélisation a été réalisée sur cette période commune (P, T, Q), tandis que l'analyse climatique s'appuie sur les données les plus récentes.

Le bassin versant de l'El Harrach couvre une superficie de 1 248 km<sup>2</sup> et présente un périmètre de 184,8 km. Son indice de compacité ( $K_c = 1,46$ ) traduit une forme relativement peu allongée.

## **3- Préparation des données**

### **3.1. Précipitations**

Les précipitations constituent une variable d'entrée essentielle du modèle hydrologique. Dans la zone d'étude, plusieurs stations pluviométriques disposent de séries de mesures fiables, déjà traitées et préparées en vue de leur exploitation, et présentées dans la seconde partie de ce

## CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)

document. Pour le bassin de l'El Harrach, il a été retenu la construction d'une série fictive (SF), élaborée à partir de la moyenne des données enregistrées dans les stations situées à l'intérieur (2 stations) et à l'extérieur (5 stations) du bassin. Cette approche vise à améliorer la précision et la représentativité des données d'entrée du modèle (tableau 20). La série fictive ainsi constituée correspond aux précipitations moyennes mensuelles calculées selon la méthode des polygones de Thiessen.

Tableau 20 : Stations pluviométrique

Code	Nom	Sbv	X	Y	Z
020602	Hamiz	Côtier cap matif	533000	4055000	130
020611	Dar el Beida	Côtier cap matif	520000	4068000	24
021115	Hamdania	Oued chiffa	479000	4028000	400
021211	Koléa	Oued mazafran	479000	4058000	10
021209	Boufarik pépinière	Oued mazafran	491000	4052000	60
021307	Passerelle	Oued El Harrach amont	501000	4041000	260
021403	Larbâa	Oued El Harrach maritime	515000	4051000	100

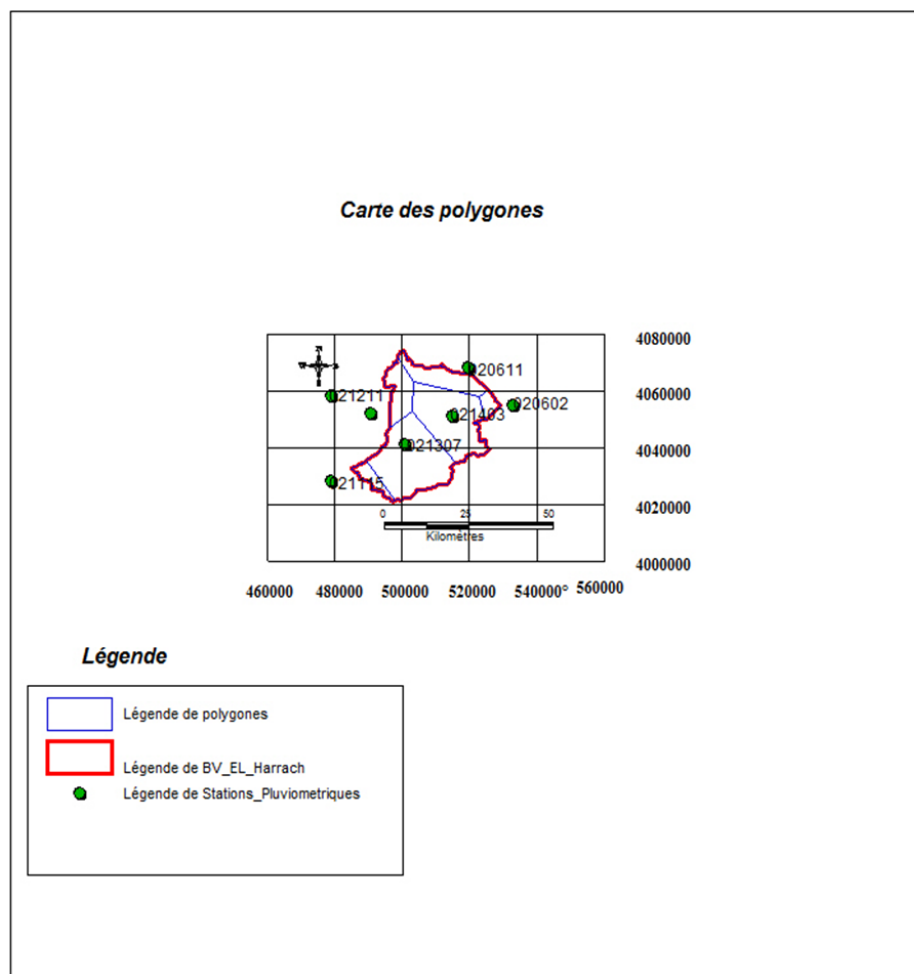


Figure 23 : Stations pluviométriques et les polygones de Thiessen du bassin d'El Harrach.

## CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)

### 3.2. Débit

Le lancement d'un modèle pluie-débit requiert la disponibilité de mesures hydrométriques. Sur l'oued El Harrach, la station de Baraki (021418), implantée à proximité de l'exutoire du bassin, assure l'enregistrement systématique des débits transitant par la section de jaugeage. Cette station fournit des relevés journaliers continus depuis 1971.

Tableau 21 : les débits annuels (m<sup>3</sup>/s) et la lame d'eau écoulée (mm) 1980-2007

<i>Années</i>	<b>1980</b>	<b>1981</b>	<b>1982</b>	<b>1983</b>	<b>1984</b>	<b>1985</b>
<i>Annuel m<sup>3</sup>/s</i>	<b>6,4</b>	<b>3,7</b>	<b>4,2</b>	<b>3,1</b>	<b>2,6</b>	<b>7,3</b>
<i>Lame écoulée (mm)</i>	<b>161,29</b>	<b>93,57</b>	<b>104,63</b>	<b>77,55</b>	<b>64,76</b>	<b>184,06</b>
<i>Années</i>	<b>1986</b>	<b>1987</b>	<b>1988</b>	<b>1989</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>
<i>Annuel m<sup>3</sup>/s</i>	<b>4,1</b>	<b>8,3</b>	<b>1,3</b>	<b>2,8</b>	<b>1,1</b>	<b>4,2</b>
<i>Lame écoulée (mm)</i>	<b>102,35</b>	<b>208,01</b>	<b>33,28</b>	<b>69,96</b>	<b>28,64</b>	<b>106,42</b>
<i>Années</i>	<b>1992</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>
<i>Annuel m<sup>3</sup>/s</i>	<b>8,0</b>	<b>1,9</b>	<b>4,7</b>	<b>4,0</b>	<b>3,6</b>	<b>3,2</b>
<i>Lame écoulée (mm)</i>	<b>200,16</b>	<b>47,07</b>	<b>118,32</b>	<b>99,30</b>	<b>91,47</b>	<b>79,37</b>
<i>Années</i>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>
<i>Annuel m<sup>3</sup>/s</i>	<b>3,6</b>	<b>6,2</b>	<b>2,9</b>	<b>2,2</b>	<b>1,0</b>	<b>13,7</b>
<i>Lame écoulée (mm)</i>	<b>91,53</b>	<b>155,11</b>	<b>73,24</b>	<b>54,33</b>	<b>25,31</b>	<b>342,86</b>
<i>Années</i>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>		
<i>Annuel m<sup>3</sup>/s</i>	<b>3,4</b>	<b>3,9</b>	<b>4,2</b>	<b>3,4</b>		
<i>Lame écoulée (mm)</i>	<b>86,11</b>	<b>98,33</b>	<b>106,72</b>	<b>84,25</b>		

### 3.3. Evapotranspiration potentielle « ETP »

En hydrologie comme en climatologie, l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) revêt une importance fondamentale. Elle représente la quantité maximale d'eau susceptible d'être évapotranspirée sous un climat donné, en supposant une couverture végétale continue et un apport hydrique suffisant.

L'évapotranspiration potentielle d'un bassin versant correspond à la demande de l'atmosphère en humidité.

Les facteurs influençant l'évapotranspiration potentielle ; Les facteurs climatiques souvent ont une influence majeure sur l'ETP :

- La température : L'évaporation est plus importante lorsque la température est élevée.
- Le rayonnement solaire : L'énergie solaire procure la puissance requise pour l'évaporation.
- La proportion d'humidité : L'évaporation est favorisée par un air sec.
- La rapidité du vent : L'air est renouvelé au-dessus de la surface par le vent, ce qui stimule l'évaporation.

## **CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)**

Dans le contexte algérien, diverses formules empiriques fiables et fréquemment employées sont disponibles pour évaluer l'ETP. Toutefois, la température est un des critères les plus employés dans le calcul de l'ETP. On utilise la formule de Thornthwaite pour estimer ce paramètre.

**Tableau 22 : les valeurs moyennes annuelles d'évapotranspiration potentielle (mm)**

<i>Années</i>	<b>1980</b>	<b>1981</b>	<b>1982</b>	<b>1983</b>	<b>1984</b>	<b>1985</b>	<b>1986</b>	<b>1987</b>
<i>ETP (mm)</i>	<b>874,1</b>	<b>888,3</b>	<b>935,4</b>	<b>916,8</b>	<b>900,0</b>	<b>899,1</b>	<b>921,8</b>	<b>925,1</b>
<i>Années</i>	<b>1988</b>	<b>1989</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>	<b>1992</b>	<b>1992</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>
<i>ETP (mm)</i>	<b>948,6</b>	<b>938,9</b>	<b>928,7</b>	<b>925,7</b>	<b>875,1</b>	<b>909,8</b>	<b>953,7</b>	<b>916,2</b>
<i>Années</i>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>
<i>ETP (mm)</i>	<b>898,4</b>	<b>902,8</b>	<b>929,0</b>	<b>931,8</b>	<b>943,8</b>	<b>934,2</b>	<b>911,2</b>	<b>966,2</b>
<i>Années</i>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>				
<i>ETP (mm)</i>	<b>915,3</b>	<b>934,8</b>	<b>936,7</b>	<b>927,6</b>				

### **3.4. Température**

L'observation des températures pendant une courte période reste un frein pour le bassin de la Mitidja.

En comparaison avec la chronique du National Centers for Environmental Prediction (NCEP) situé aux États-Unis et disponible en Open source (<https://globalweather.tamu.edu>), nous avons constaté que la série de Dar El Beida (020611) est relativement courte (1995-2007 pour l'année civile). Cette séquence de réanalyse, identifiée sous le code w36731, illustre les températures quotidiennes du 1er janvier 1979 au 31 juillet 2014, en lien avec le bassin d'El Harrach. Le tableau ... présente certaines particularités des deux stations de mesure thermique disponibles dans le bassin d'El Harrach.

**Tableau 23: Caractéristiques des stations de température**

<i>Nom</i>	<i>Code</i>	<i>X UTM(m)</i>	<i>Y UTM (m)</i>	<i>Z (m)</i>	<i>Période d'observation</i>	<i>Période de recoupement</i>
<i>Dar El Beida</i>	<b>20611</b>	<b>519 358,53</b>	<b>4 059 475,58</b>	<b>24</b>	<b>1995-2007</b>	<b>1995-2007</b>
<b>w36731</b>	<b>w36731</b>	<b>511 167,85</b>	<b>4 059 867,71</b>	<b>24</b>	<b>1979-2014</b>	

Pour confirmer ces informations, on choisit d'illustrer le double cumul de la série w36731 et de la station de Dar El Beida durant la période de comparaison (sept. 1995-déc. 2007). Il est important de souligner que la température moyenne mensuelle de la série w36731 est déterminée par l'arithmétique moyenne des températures quotidiennes du mois en question, exprimées en °C. La température moyenne quotidienne  $T_i$  est le rapport arithmétique entre le pic et le minimum du jour.

## CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)

Tableau 24: les températures moyennes annuelles (°C)

Années	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Températures (°C)	17,4	17,5	18,7	17,8	17,9	17,9	18,4	18,4
Années	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Températures (°C)	19,4	18,7	19,3	18,1	17,3	18,1	18,8	18,6
Années	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Températures (°C)	18,5	18,4	19,0	18,2	18,6	18,9	18,2	18,9
Années	2004	2005	2006	2007				
Températures (°C)	18,4	18,1	18,4	18,9				

### 4- Période de modélisation

Le choix de la période sur laquelle un modèle hydrologique sera élaboré est une étape essentielle qui dépend de divers paramètres. (Figure 24)

Dans le bassin de la Mitidja, il est difficile de disposer de toutes les données sur une durée d'observation suffisamment longue en fonction de l'objectif de la modélisation envisagée.

Les données hydrométriques et pluviométriques sont collectées sur des périodes assez longues dans le bassin d'El Harrach (Mitidja centrale), mais la mesure de température à Dar El Beida ne permet pas d'atteindre l'objectif de la modélisation.

Afin de surmonter cette difficulté, on choisit la série w36731 la plus longue possible, soit 1980-2007, qui permet de simuler le comportement hydrologique du bassin pendant une période de recouvrement entre les trois paramètres d'entrée du modèle.

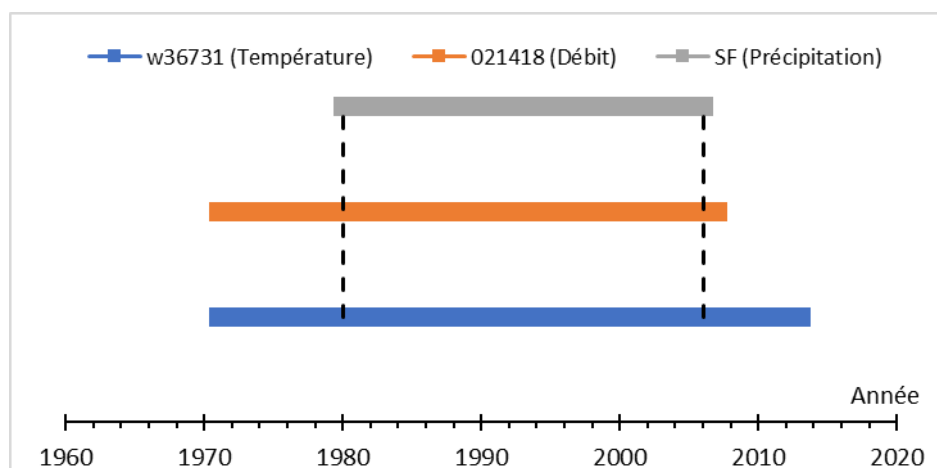


Figure 24 : Période de recouvrement entre les différentes séries de données d'entrée du modèle.

### 5-Utilisation du logiciel Excel pour la mise en œuvre des modèles GR1A et GR2M

L'application des modèles hydrologiques GR1A et GR2M a été effectuée à l'aide du logiciel Microsoft Excel, choisi pour sa flexibilité et sa capacité à gérer efficacement les calculs et les

## CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)

séries de données hydrométéorologiques. Pour chaque modèle, une feuille de calcul spécifique a été élaborée afin d'intégrer les données d'entrée (pluies, évapotranspiration potentielle et débits observés) ainsi que les paramètres propres à chaque formulation. Le modèle GR1A, de structure simple, a permis de simuler le débit mensuel à partir d'un seul paramètre de correction de l'ETP, tandis que le modèle GR2M repose sur deux paramètres permettant une représentation plus détaillée du fonctionnement du bassin versant. Le tableur Excel a été utilisé pour automatiser les calculs, appliquer les équations des modèles, et comparer les débits simulés aux débits observés. Les critères de performance, notamment les coefficients de Nash–Sutcliffe calculés sur les débits (Q), les volumes (VQ) et les logarithmes des débits ( $\ln(Q)$ ), ont permis d'évaluer la qualité des simulations pour chaque modèle. Cette approche sous Excel facilite la visualisation et la vérification des résultats tout en assurant la transparence, la simplicité et la reproductibilité du processus de modélisation hydrologique

### 6- Modélisation au pas de temps annuel

À l'échelle annuelle, la simulation de la relation pluie-débit sur un bassin versant permet d'évaluer l'influence de l'évolution des précipitations sur l'écoulement superficiel. Il convient de rappeler que la nappe d'eau libre de la Mitidja garantit principalement sa durabilité grâce à ces eaux de pluie. L'alimentation des eaux souterraines sera directement impactée par toute modification du rythme des précipitations.

Le modèle GR1A est sélectionné pour reproduire l'évolution des précipitations et son interaction avec le débit de l'oued El Harrach sur la période 1980-2007. Il est important de souligner qu'il s'agit d'un modèle avec un seul paramètre « X », dont la version utilisée dans cette étude est celle de Mouilhi (2003) et Mouilhi et al. (2006 a). La figure 25 montre les différentes étapes de la modélisation en utilisant le GR1A.

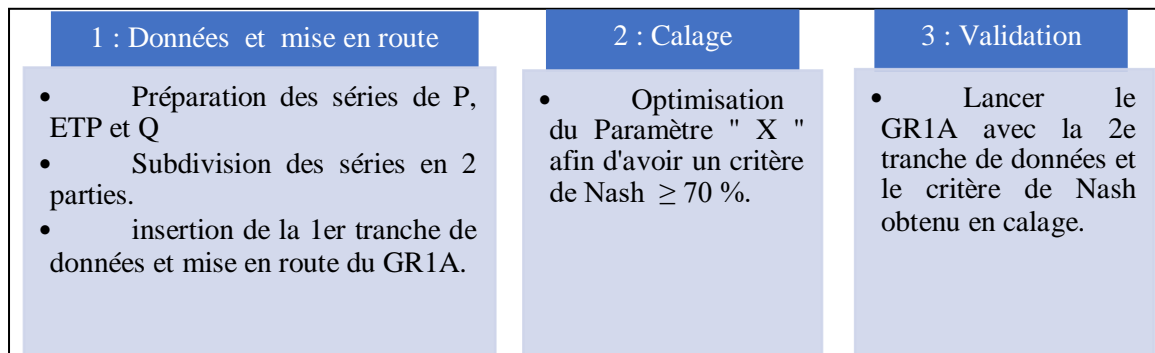


Figure 25 : Illustration des étapes de modélisation sous GR1A.

#### 6.1. Données d'entrée et mise en route du modèle

Pour établir ce modèle, on utilise les données hydroclimatiques suivantes :

- Les précipitations annuelles de la station fictive (obtenues par la méthode des polygones de Thiessen).
- L'ETP annuelle (obtenue par la méthode de Thornthwaite).

## **CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)**

- Les débits annuels observés à la station de Baraki, convertis en lame d'eau écoulée (mm).

Connaissant l'état initial au début de la période de simulation, le modèle GR1A permet de restituer les débits calculés. Cela souligne l'importance d'une bonne initialisation pour garantir la fiabilité de la simulation. En effet, les erreurs liées à l'état initial tendent à s'atténuer progressivement : après quelques dizaines de pas de temps, une mauvaise initialisation peut être totalement compensée (C. Perrin, 2000). Dans la pratique, une période de mise en route de deux ans est systématiquement retenue, et les résultats obtenus durant cette phase ne sont pas pris en compte (Makhlouf, 1994). Cette étape de mise en route est appliquée aussi bien lors du calage que lors de la validation (Haziza, 2003).

### **6.2. Calage du modèle**

À cette étape, le modélisateur doit déterminer le paramètre optimisable « X » du modèle, dont l'ajustement permet de reproduire au mieux les débits observés à l'exutoire du bassin versant (Ardoind-Bardin, 2004). La qualité de ce calage est évaluée à l'aide du critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970), largement employé dans les modèles pluie-débit pour mesurer leur performance (Yles, 2014). Dans le cas du GR1A (Haziza, 2003), un modèle est considéré comme satisfaisamment optimisé lorsque la valeur du critère de Nash est supérieure ou égale à 70 %. Plus cette valeur se rapproche de l'unité, plus l'erreur de simulation diminue ; une valeur égale à 1 traduit une erreur nulle et donc un modèle parfait.

Le paramètre « X » varie généralement entre 0,13 et 3,5 pour un intervalle de confiance de 90 %. Lorsqu'il dépasse l'unité, cela indique une perte d'eau par le système, traduisant une ouverture du bassin vers l'extérieur (hors échanges atmosphériques), en lien avec des interactions possibles avec les nappes souterraines ou des bassins voisins. En revanche, une valeur inférieure à 1 traduit un gain d'eau par le système (Yles, 2014).

### **6.3. Validation du modèle**

Le processus de validation du modèle se déroule après la phase de calibrage afin de répondre à la question de sa capacité à reproduire l'état actuel et à prévoir la réponse future du bassin simulé.

Il est essentiel de passer par cette étape afin de vérifier la reproductibilité des résultats par le modèle et la représentativité des paramètres essentiels.

La validation du modèle repose sur le principe de le tester sur un ensemble de données qui n'ont pas été utilisées lors de la phase de calage. La présence de cette étape est directement corrélée avec la disponibilité des informations.

La validation du modèle se déroule généralement en deux étapes :

- La validation interne (approche classique) : consiste à sélectionner aléatoirement une partie de données afin de caler les paramètres du modèle, tandis qu'une autre partie est utilisée pour valider les valeurs des paramètres sans modification.
- La validation externe : consiste à confronter les résultats obtenus par modèle à des données qui n'ont pas été utilisées pour leur élaboration.

## CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)

### 6.4. Application

Le modèle GR1 A est utilisé pour simuler le comportement hydrologique du bassin versant d'El Harrach entre 1980 et 2007. Cette période est divisée en deux périodes : une période de calibrage du modèle, de 1980 à 1990, et une période de validation, de 1991 à 2007.

#### 6.4.1. Résultats du calage

À l'issue de la phase de mise en route, la procédure de calage a conduit aux résultats présentés dans le tableau 26. ; Le coefficient de correction de l'ETP, correspondant au paramètre « X », affiche une valeur nettement supérieure à 1. Cela traduit un transfert d'une partie des eaux de surface vers la nappe souterraine, mettant ainsi en évidence une relation indirecte entre les précipitations et la nappe phréatique de la Mitidja.

**Tableau 25 : Résultats du calage du modèle GR1A sur la période 1980-1990.**

Critère	X	Nash	Bilan (%)	R <sup>2</sup>
Valeur	1,25	0.72	99.8	0,72

X : coefficient de correction de l'ETP ; R2 : coefficient de détermination.

Selon ces résultats, le coefficient de Nash, supérieur à 70 %, est acceptable pour la validation de cette phase de calage du modèle. La présentation graphique des débits observés et simulés, traduit une corrélation acceptable avec un coefficient de détermination supérieur aussi à 70 %. La figure 26 ci-dessous montre les différents graphes obtenus après le calage du modèle.

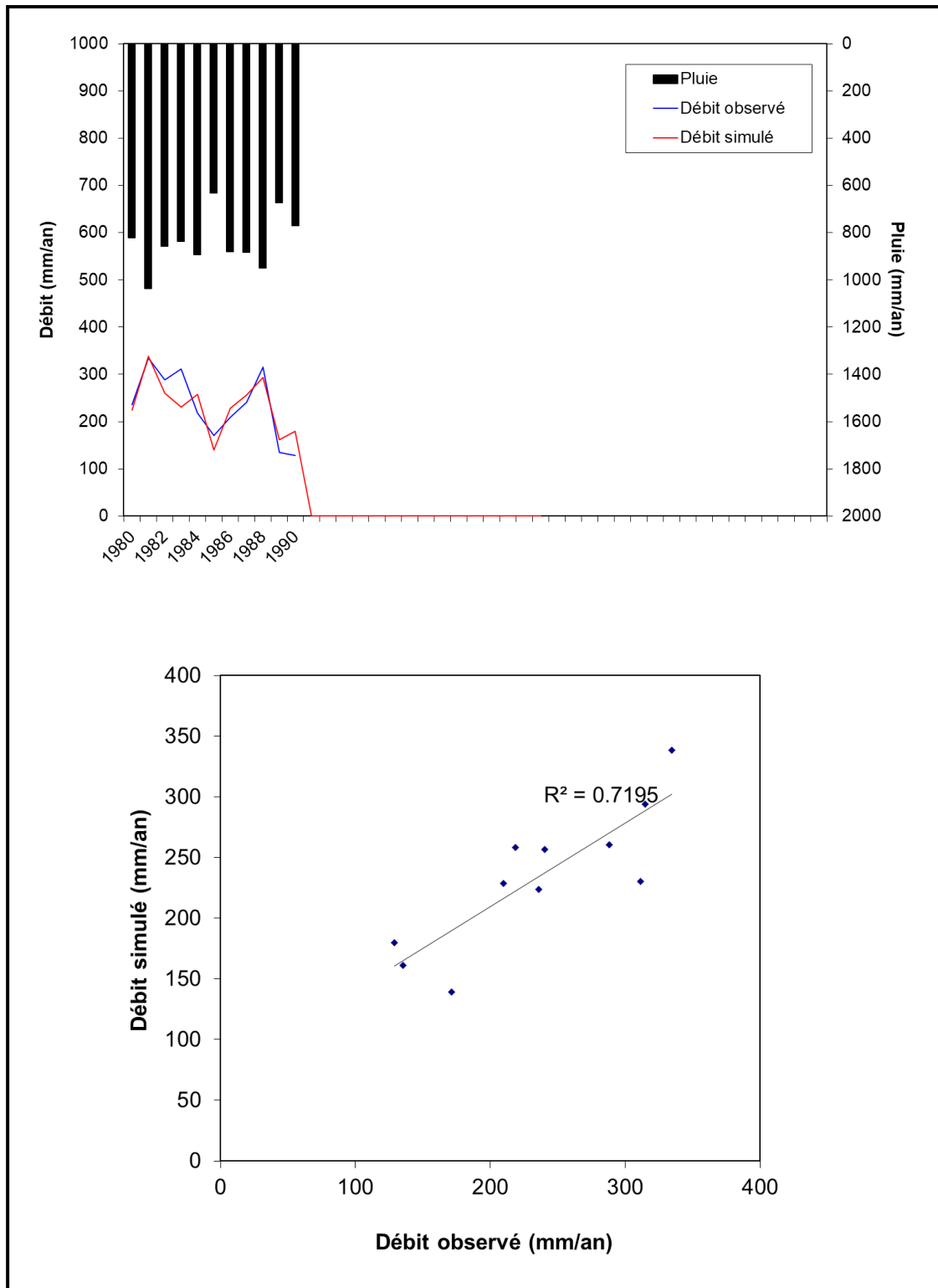


Figure 26: Graphiques obtenus après le calage du modèle sur la période 1980-1990.

#### 6.4.2. Résultats de la validation

Lors de la phase de validation, le modèle a été appliqué à la série de données faible couvrant la période 1991–2007. Les résultats obtenus mettent en évidence une corrélation relative entre

## CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)

les débits observés ( $Q_{oi}$ ) et simulés ( $Q_{si}$ ), avec un coefficient de corrélation de 74% (tableau 26).

Tableau 26 : Résultats de la validation du modèle GR1A sur la période 1991-2007.

Critère	Coefficient de détermination $R^2$	Coefficient de corrélation R
Valeur	0.55	0.74

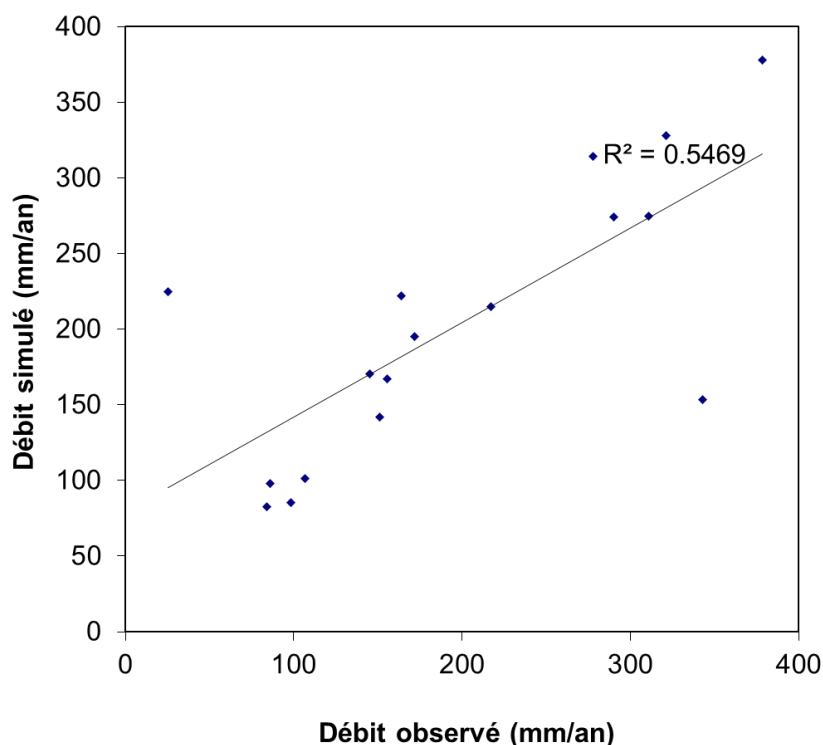


Figure 27: Graphique obtenu en phase de validation du modèle sur la période 1991-2007.

Les résultats de la validation montrent que le modèle parvient à reproduire de manière satisfaisante la dynamique des débits observés. Malgré certaines différences ponctuelles, la cohérence globale des simulations confirme la fiabilité de l'approche adoptée.

### 7- Modélisation au pas de temps mensuel

La modélisation pluie-débit à l'échelle mensuelle offre la possibilité d'analyser l'effet de la variabilité des précipitations sur les écoulements des cours d'eau du bassin étudié, notamment à l'échelle saisonnière. Dans le cas du bassin de l'El Harrach, cet impact est évalué à l'aide du modèle GR2M, dans sa version développée par Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006).

#### 7.1. Données d'entrée et mise en route du modèle

La mise en œuvre du modèle GR2M nécessite trois variables essentielles. Les précipitations et l'ETP mensuelles constituent les données d'entrée, tandis que le débit mensuel, exprimé en lame d'eau, sert à l'optimisation des paramètres du modèle ainsi qu'à l'évaluation de ses performances.

## **CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)**

L'élaboration du modèle hydrologique GR2M appliqué au bassin de l'El Harrach repose sur les séries chronologiques des précipitations moyennes mensuelles issues de la station fictive SF, de l'ETP mensuelle calculée par la méthode de Thornthwaite, ainsi que des débits mensuels observés à la station de Baraki, convertis en lame d'eau écoulée (mm).

Comme pour le modèle GR1A, une période de mise en route est indispensable afin de limiter l'incidence d'une mauvaise initialisation. Cette phase, généralement fixée à 12 mois, n'est pas prise en compte dans les résultats du modèle .

### **7.2. Calage du modèle**

Le modèle GR2M se distingue du GR1A par une structure plus élaborée, intégrant à la fois un réservoir de production et un réservoir de routage, tout en ouvrant le système sur un extérieur autre que l'atmosphère.

Deux paramètres optimisables, X1 et X2, sont associés à ces réservoirs. Leur ajustement, généralement effectué de manière manuelle, permet de caler le modèle sur une période donnée. Les valeurs possibles de ces paramètres, établies à partir d'un large échantillon de bassins versants, sont regroupées dans le tableau 27

L'efficacité de l'optimisation est évaluée à l'aide du critère adimensionnel de Nash, qui valide la phase de calage lorsque sa valeur atteint ou dépasse 70 % (Yles, 2014).

**Tableau 27 : Valeur des paramètres du modèle GR2M.**

<b>Paramètre</b>	<b>Médiane</b>	<b>Intervalle de confiance à 90 %</b>
X1 (mm)	380	140 - 2640
X2 (-)	0,92	0,21 – 1,31

X1 : capacité du réservoir de production en (mm) ; X2 : capacité d'échanges souterrains (-)

### **7.3. Validation du modèle**

La validation du modèle constitue une étape essentielle pour évaluer sa performance. Elle consiste à vérifier la capacité du modèle à reproduire des débits simulés proches des débits observés, dans une marge d'erreur acceptable. Cette évaluation repose principalement sur le critère de Nash, dont une valeur avoisinante 70 % est généralement considérée comme satisfaisante pour approuver la fiabilité du modèle.

Lors de cette phase, le modèle est appliqué avec les paramètres optimisés (X1 et X2) issus du calage, mais sur un jeu de données indépendant, c'est-à-dire non utilisé lors de l'étape précédente.

### **7.4. Application**

## **CHAPITRE 5 : Modélisation pluie-débit du bassin de la Mitidja (Bassin d'El Harrach)**

La simulation du comportement hydrologique du bassin d'El Harrach a été effectuée à l'échelle mensuelle sur la période 1980-2007. La période 1980-1988 a été utilisée pour le calage du modèle, tandis que la période 1988-2007 a été consacrée à sa validation.

**Tableau 28 : Résultats du calage du GR2M sur la période 1980-1988.**

<b>Critère</b>	<b>X1</b>	<b>X2</b>	<b>Nash</b>	<b>Bilan (%)</b>
<b>Valeur</b>	9.95	0.40	14.9	54.3

La performance globale du modèle à l'échelle mensuelle reste limitée, comme l'indique la faible valeur du critère de Nash (tableau 28). Cette performance réduite peut s'expliquer en partie par le fait que plusieurs données relatives aux précipitations (P) et aux débits (Q) ont dû être comblées. En conséquence, les résultats obtenus ne permettent pas de poursuivre efficacement la modélisation pluie-débit pour ce bassin.

### **8- Conclusion**

La modélisation hydrologique constitue un outil essentiel pour simuler le comportement d'un bassin donné. Dans la Mitidja, seul le bassin d'El Harrach, situé au centre, se prête à ce type d'approche, les autres bassins étant influencés par la présence de barrages.

À l'échelle annuelle, le modèle GR1A a fourni des résultats satisfaisants lors du calage, bien que la validation ait été moins convaincante. Néanmoins, l'analyse de la relation entre précipitations et débits sur la période 1980-2007 a permis de mettre en évidence indirectement les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines. La modélisation a ainsi révélé une perte d'eau du système vers le milieu souterrain, soulignant l'impact de la variabilité des précipitations sur la nappe phréatique de la Mitidja.

En revanche, la modélisation mensuelle via le GR2M a produit des résultats moins satisfaisants. Le faible coefficient de Nash obtenu lors du calage (Nash = 14,9) indique que le modèle ne peut pas être poursuivi à l'échelle mensuelle avec fiabilité.

En conclusion, bien que la modélisation annuelle permette de comprendre les grandes tendances hydrologiques du bassin d'El Harrach et ses interactions avec la nappe, la modélisation mensuelle reste limitée. Ces analyses fournissent néanmoins une base solide pour des études futures sur la gestion et la préservation des ressources en eau dans la Mitidja.

*Conclusion*

*Générale*

## CONCLUSION GENERALE

La plaine de la Mitidja, d'une superficie d'environ 1300 km<sup>2</sup>, se distingue par des caractéristiques géographiques, géomorphologiques et pédologiques particulières, qui en font une région à la fois stratégique et économiquement importante en Algérie. Sa topographie plane, son occupation du sol contrastée et la diversité de son couvert végétal influencent directement les processus hydrologiques, notamment l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration, et conditionnent la dynamique des écoulements de surface et souterrains.

Le contexte géologique et hydrogéologique de la Mitidja révèle une complexité structurale et sédimentaire qui a favorisé le développement de plusieurs aquifères, en particulier ceux de l'Astien et du Quaternaire, constituant des réservoirs stratégiques pour l'alimentation en eau de la région. Cependant, ces ressources sont soumises à une pression anthropique croissante liée à l'urbanisation, l'industrialisation et l'agriculture intensive, ce qui rend indispensable une gestion durable et intégrée des eaux souterraines.

L'analyse hydroclimatologique de la région met en évidence un bilan hydrique marqué par une pluviométrie annuelle moyenne de 790,7 mm, dont la majeure partie est consommée par l'évapotranspiration réelle. Le ruissellement direct et l'infiltration contribuent respectivement à l'alimentation des cours d'eau et à la recharge de la nappe phréatique, illustrant l'équilibre fragile entre les entrées et les sorties d'eau et l'impact direct du climat méditerranéen sur la disponibilité hydrique.

Enfin, la modélisation hydrologique du bassin d'El Harrach, réalisée à l'aide des modèles GR1A et GR2M, a permis de mieux comprendre le comportement du système hydrologique et les interactions entre eaux de surface et eaux souterraines. Si le modèle annuel (GR1A) a fourni des résultats satisfaisants pour le calage, la modélisation mensuelle (GR2M) s'est avérée moins performante, limitant son utilisation à l'échelle fine. Néanmoins, ces travaux offrent une base solide pour orienter la gestion future des ressources en eau dans la Mitidja et pour approfondir les recherches sur la réponse du bassin aux variations climatiques et anthropiques.

En somme, cette étude met en lumière l'importance de considérer simultanément les aspects géographiques, géologiques, hydrologiques et climatiques afin de comprendre le fonctionnement global du bassin et de proposer des stratégies adaptées pour une gestion durable des ressources hydriques de la Mitidja.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)**, Antenne de Blida. Données pluviométriques et hydrométriques de la plaine de la Mitidja [Base de données]. ANRH, Blida.
- Bekaddour, M. (2020)**. Étude de la performance du modèle hydrologique HBV Light appliqué au bassin versant d'Oued Louza [Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen].
- Boudjana, Y., & Laouamri, S. (s.d.)**. Simulation de la recharge artificielle des nappes souterraines (Application à la nappe de la Mitidja) [Mémoire de master, École Nationale Polytechnique].
- Derias, A. (2012)**. Protection de l'environnement et développement : Intégration ou antagonisme ? Étude de cas : Région de la Mitidja [Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene – Alger]. Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire
- Dahmani, M. N. (2016)**. Étude hydrologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Saïda [Mémoire de master, Université d'Oran 2].
- Drouiche, A. (2021)**. La variabilité climatique et impacts sur les ressources en eau souterraine de la Mitidja [Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].
- Fatima, D. (2014)**. Influence des activités agricoles et industrielles sur la qualité des eaux souterraines et l'environnement dans la Mitidja [Mémoire de master, Université Blida I].
- Henine, H. (s.d.)**. Interfaçage entre un modèle hydrologique et un modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluant les SIG [Mémoire de master, École Nationale Polytechnique].
- Nemer, Z. (2024)**. Caractérisation hydrogéophysique des formations aquifères dans la plaine de la Mitidja : Cas du champ de captage d'El Hamiz (Mitidja Est) [Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].
- Office National de la Météorologie (ONM)**. (Températures moyennes (2006–2015), station de Dar-El Beïda [Base de données]. ONM, Alger
- Yahiaoui, S. (2011)**. Évaluation de la qualité des eaux souterraines de la Mitidja et leur aptitude à l'irrigation [Mémoire de master, École Nationale Supérieure d'Hydraulique].
- Zaoui, R. (2022)**. Modélisation hydrologique pluie-débit appliquée au sous-bassin de bassin versants d'Oued Ressoul (Nord-Est Algérie) [Mémoire de master, Université 08 Mai 1945 – Guelma]