

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA Stambouli de Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي معسكر

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomique

Laboratoire de Recherche sur les Systèmes Biologiques et la Géomatique (LRSBG)

THESE DE DOCTORAT

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Spécialité : Hydrogéologie

Interaction entre la modélisation de l'hydrologie de surface et de la végétation et leurs impacts sur les ressources en eaux dans l'Ouest Algérien

Présentée par : Mr HACHEMAOUI Anouar

Le 08/12/2022 Devant le jury composé de :

Président	HAMIMED Abderrahmane	Pr.	Université de Mascara
Examineur	HABI Mohammed	Pr.	Université de Tlemcen
Examineur	BAAHMED Djelloul	MCA	Université de Sidi Bel Abbas
Examineur	BENAISSA Noredine	Pr.	Université d'Oran
Directeur de Thèse	ELOUISSI Abdelkader	MCA	Université de Mascara
Invité	NEDJAI Rachid	Pr.	Université d'Orléans (France)

Année Universitaire : 2022-2023

Abstract

Algeria is considered a country at risk in the index of vulnerability to climate change. In terms of water resources, there has been a significant decrease in water supply in the western part for three decades. This has led to changes in agricultural practices and the viability of natural species, as well as socio-political conditions and anthropogenic action at the watershed scale, which directly affect the water cycle. This study aims to quantify the impact of land use/land cover change on the hydrological response of the Oued Saida basin using the Swat model from 1998 to 2005. Satellite image time series of 1987 and 2002 were used for land use and cover from. A supervised classification approach, using the maximum likelihood classification method was used for the land cover of 1987 and 2002. In addition, post-classification was made to detect changes in land use/land cover. FAO soil data 30 m spatial resolution ASTER DEM data and 1998 to 2005 climate data set were combined as input data to the SWAT model land cover map (2002), with. First for the calibration phase, then those from 1987 was incorporated into the model as the scenario used for the assessment of land use change impacts. Evaluation of the accuracy of classified images was made with the error matrix. The global precision (the kappa coefficient) found for the 1987 (2002) image is 89.5% (95.9%). As a result, evolutionary analysis of land use change from 1987 to 2002 showed a decrease in agricultural area (9.20%), an increase in forest land (5.42%) and an increase in urbanized areas (2.77%). The results of the model calibration using the SWAT-CUP software's SUFI-2 algorithm were satisfactory with a Nash Sutcliffe (NSE) efficiency coefficient of 0.56 and an R² of 0.57. In addition, parameters related to soil properties and land use are the most sensitive. Changes in land cover have affected the runoff, increasing the average annual (monthly) peak flow by 2.5 to 3.5% (0 to 6%) at the expense of the seepage water and groundwater recharge. These changes are explained by socio-economic, political and anthropogenic conditions. The results obtained provide useful information about observed and land use trends and affected hydrological behaviors and can be a tool to assist decision-making in the development and management of the catchment area in a global vision.

Keywords: LULCC · Remote sensing · Hydrological modeling · SWAT · Hydrometeorology · Oued Saida Basin-West Algeria

Résumé

L'Algérie est considérée comme un pays à risque dans l'indice de vulnérabilité au changement climatique. En termes de ressources en eau, il y a été une diminution significative de l'approvisionnement en eau dans la partie ouest depuis trois décennies. Cela a entraîné des changements dans l'agriculture pratiques et la viabilité des espèces naturelles, ainsi que les conditions sociopolitiques et l'action anthropique a l'échelle du bassin versant, qui affectent directement le cycle de l'eau. Cette étude vise à quantifier l'impact du changement d'utilisation des terres/de la couverture terrestre sur la réponse hydrologique du bassin de l'Oued Saida à l'aide du modèle Swat de 1998 à 2005. Série temporelle d'images satellitaires de 1987 et 2002 ont été utilisés pour l'utilisation des terres et la couverture de. Une approche de classification supervisée, utilisant la méthode de classification par maximum de vraisemblance, a été utilisée pour l'occupation du sol de 1987 et 2002. De plus, une post-classification a été effectuée pour détecter les changements. dans l'utilisation/la couverture des sols. Données pédologiques de la FAO Résolution spatiale de 30 m Les données ASTER DEM et les données climatiques de 1998 à 2005 ont été combinés en tant que données d'entrée à la carte d'occupation du sol du modèle SWAT (2002), avec. D'abord pour la phase de calibrage, puis ceux de 1987 a été incorporé dans le modèle en tant que scénario utilisé pour l'évaluation des impacts du changement d'affectation des terres.

Évaluation de la précision des images classées a été faite avec la matrice d'erreur. La précision globale (le coefficient kappa) trouvée pour l'année 1987 (2002) est de 89,5 % (95,9 %). En conséquence, l'analyse évolutive du changement d'utilisation des terres de 1987 à 2002 a montré une diminution en superficie agricole (9,20%), une augmentation des terres forestières (5,42%) et une augmentation des zones urbanisées (2,77%). Les résultats de la calibration du modèle à l'aide de l'algorithme SUFI-2 du logiciel SWAT-CUP était satisfaisante avec un Nash Sutcliffe (NSE) coefficient de rendement de 0,56 et un R² de 0,57. De plus, les paramètres liés aux propriétés du sol et à l'utilisation des terres sont les plus sensibles.

Les changements dans la couverture terrestre ont affecté le ruissellement, augmentant le débit de pointe annuel moyen (mensuel) de 2,5 à 3,5 % (0 à 6 %) au détriment des eaux d'infiltration et de la recharge des nappes phréatiques. Ces changements s'expliquent par des facteurs socio-économiques, conditions politiques et anthropiques. Les résultats obtenus fournissent des informations utiles sur les tendances observées et l'utilisation des terres et affecté les comportements hydrologiques et peut être un outil d'aide à la décision dans le développement et la gestion des zone de chalandise dans une vision globale.

Mots clés : LULCC · Télédétection · Modélisation hydrologique · SWAT · Hydrométéorologie · Oued Saida Bassin-Ouest Algérie.

ملخص

تعتبر الجزائر دولة معرضة للخطر في مؤشر الضعف تجاه تغير المناخ. من حيث الموارد المائية ، كان هناك انخفاض كبير في إمدادات المياه في الجزء الغربي لمدة ثلاثة عقود. وقد أدى ذلك إلى تغييرات في الممارسات الزراعية وصلاحية الأنواع الطبيعية ، فضلاً عن الظروف الاجتماعية والسياسية والإجراءات البشرية على نطاق مستجمعات المياه ، والتي تؤثر بشكل مباشر على دورة المياه. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد تأثير استخدام الأراضي / تغير الغطاء الأرضي على الاستجابة الهيدرولوجية لحوض واد صيدا باستخدام نموذج سوات من 1998 إلى 2005. تم استخدام السلاسل الزمنية لصور الأقمار الصناعية لعامي 1987 و 2002 لاستخدام الأراضي والتغطية. تم استخدام منهج التصنيف الخاضع للإشراف ، باستخدام طريقة تصنيف الاحتمالية القصوى ، للغطاء الأرضي لعامي 1987 و 2002. بالإضافة إلى ذلك ، تم إجراء التصنيف اللاحق لاكتشاف التغييرات. في استخدام الأراضي / الغطاء. تم دمج بيانات التربة الخاصة بمنظمة الأغذية والزراعة 30 مترًا من الدقة المكانية وبيانات ASTER DEM والبيانات المناخية من 1998 إلى 2005 كبيانات إدخال لخريطة الغطاء الأرضي لنموذج (2002) SWAT ، مع. أولاً بالنسبة لمرحلة المعايرة ، ثم تم دمج تلك الخاصة بعام 1987 في النموذج كسيناريو مستخدم لتقييم آثار تغير استخدام الأراضي.

تم تقييم دقة الصور المصنفة باستخدام مصفوفة الخطأ. الدقة الإجمالية (معامل كابا) التي تم العثور عليها لعام 1987 (2002) هي 89.5% (95.9%). وعليه ، أظهر التحليل التطوري لتغير استخدام الأراضي من 1987 إلى 2002 انخفاضًا في المساحة الزراعية (9.20%) ، وزيادة في أراضي الغابات (5.42%) وزيادة في المناطق الحضرية (2.77%). كانت نتائج معايرة النموذج باستخدام خوارزمية SUFI-2 لبرنامج SWAT-CUP مرضية مع معامل أداء Nash Sutcliffe (NSE) البالغ 0.56 و R2 0.57. بالإضافة إلى ذلك ، فإن المعايير المتعلقة بخصائص التربة واستخدام الأراضي هي الأكثر حساسية.

أثرت التغييرات في الغطاء الأرضي على الجريان السطحي ، مما أدى إلى زيادة متوسط التدفق السنوي (شهريًا) الذروة بنسبة 2.5-3.5% (0-6%) على حساب التسرب وتغذية المياه الجوفية. يتم تفسير هذه التغييرات من خلال العوامل الاجتماعية والاقتصادية والظروف السياسية والبشرية. توفر النتائج التي تم الحصول عليها معلومات مفيدة عن الاتجاهات المرصودة واستخدام الأراضي والسلوك الهيدرولوجي المتأثر ويمكن أن تكون أداة لدعم القرار في تطوير وإدارة مناطق مستجمعات المياه في رؤية عالمية.

الكلمات الرئيسية: تغييرات استخدام الأراضي والغطاء الأرضي ، الاستشعار عن بعد ، النمذجة الهيدرولوجية ، SWAT ، الأرصاد الجوية المائية • حوض واد صيدا الغربي الجزائر.

:

Table des matières

Table des matières	1
Dédicaces	i
Remerciements.....	ii
Liste Des Tableaux	iii
Liste Des Figures	iv
Liste Des Abréviations.....	vi
Introduction Générale	1
L'ouest Algérien, un contexte fragile vis-à-vis de la ressource en eau.....	3
La Problématique	4
Hypothèses de base	5
Objectifs.....	6
Portée et limites de la recherche	6
Importance de l'étude	7
Organisation de la thèse	7
Chapitre I : Synthèse Bibliographique.....	9
1.1 Le bilan hydrique	9
1.2.1. Types de modèles hydrologiques	9
1.2.2. Types de modèles hydrologiques en fonction l'approche adoptée	11
1.2.3. Modèles empiriques	12
1.2.4. Modèles à base physique.....	12
1.2.5. Types de modèles hydrologiques en fonction de leur variabilité spatiale.....	13
1.2.6. Modèles globaux	13
1.2.7. Modèles distribués.....	13
1.2.8. Examen des effets d'utilisation des sols sur les composantes du cycle hydrologique	14
1.3. Effet du changement d'occupation des sols sur le ruissellement et les inondations	14
1.3.1. Effets des changements d'utilisation des terres sur l'évapotranspiration.....	17

1.3.2.	Effet du changement d'occupation des sols sur le rendement sédimentaire.....	19
1.3.3.	Examen des modèles hydrologiques liés aux Changement l'utilisation des terres et à la couverture terrestre (LUCC).....	19
1.4.	Analyse des estimations du bilan hydrologique	29
1.5.	Choix du modèle	31
1.5.1.	Description du modèle SWAT	33
1.5.2.	SWAT-CUP	33
1.5.3.	Complexité du modèle	34
1.5.4.	Configuration des bassins versants par SWAT	35
1.5.5.	Sous- bassins	35
1.5.6.	Unités de réponse hydrologique (HRU).....	36
1.5.7.	Théorie du modèle.....	37
1.5.8.	Variables du modèle.....	37
1.5.9.	L'évapotranspiration potentielle (PET)	38
1.5.10.	Évapotranspiration réelle	39
1.5.11.	Ruissellement de surface	39
1.5.12.	La Percolation.....	40
1.5.13.	Ecoulement de sub-surface (hypodermique)	41
1.5.14.	Débit des eaux souterraines	42
1.5.15.	Croissance de la végétation	43
1.5.16.	L'Acheminement ou routage du cycle hydrologique	44
1.6.	La Télédétection	45
1.6.1.	Télédétection et traitement des images satellitaire.....	46
1.6.2.	Classification de l'occupation des sols.....	46
1.6.3.	Classification supervisée	47
1.6.4.	La Classification non supervisée.....	48
1.6.5.	L'indice de végétation différentiel normalisé (NDVI)	49
1.7.	Conclusion	49

Chapitre II : Zone d'étude.....	51
2.1 Le contexte général	51
2.2 Zone d'étude.....	52
2.2.1 La région hydrographique du bassin versant de l'Oranie-chott-cheroui.....	53
2.2.1 Le bassin versant de la Macta.....	53
2.2.2 Le bassin versant de la Tafna	55
2.2.3 La région hydrographique du Chelif-Zehrez	58
2.2.4 Sol et géologie.....	58
2.2.5 La Végétation	59
2.2.6 Hydrographie.....	61
2.2.7 Choix des bassins versant pilotes.....	64
2.2.8 Élévations topographiques	66
2.2.9 Sous-bassins hydrologiques	67
2.2.10 Géologie des bassins versants pilotes choisis	68
2.2.11 Types de sol et classification.....	70
2.2.12 Caractéristiques des bassins versant pilote.....	71
Chapitre III : Données et Méthodes	73
3.2 Débit de base et débit de surface	75
3.3 Données climatologiques	76
3.3.1 Climat	76
3.3.2 Le régime climatique.....	77
3.3.3 Température	78
3.3.4 L'humidité relative	78
3.4 Préparation des données Météorologique pour la modélisation	79
3.4.1 Les Précipitations	79
3.5 CFSR Global Weather Data.....	82
3.6 Télédétection et traitement numérique des images satellitaires.....	83
3.7 Précision de la classification des images	91

3.8	L'interface SIG	91
3.8.1	SWAT-CUP	92
3.8.2	Sequential Uncertainties Fitting (SUFI-2)	93
3.8.3	Périodes de calage et de validation	93
3.8.4	Codage des classes d'utilisation des terres	93
3.8.5	Discrétisation des bassins versant	94
3.8.2	La Fonction objectif	95
3.9	Analyse de sensibilité (AS).....	96
3.10	Évaluation du modèle	97
3.11	Conclusion.....	98
Chapitre IV : implémentation de la chaine logiciels et résultats		99
4.1	Évaluation de l'occupation des sols.....	99
4.1	Bassin versant d'Oued Saida	99
4.2	Bassin versant d'Oued Taria.....	103
4.3	Bassin versant d'Oued Maleh	106
4.4	Analyse diachronique de l'évolution de l'occupation des sols.....	108
4.5	Estimation des débits et modélisation hydrologique SWAT	112
4.6	Fonction objective, Calibrage du modèle par SWAT-CUP et Analyse de sensibilité du modèle	114
4.6.1	Résultats de la modélisation hydrologiques mensuelles	117
4.6.2	Composants du ruissellement.....	118
4.7	Effets des changements d'utilisation des terres sur la ressource en eau.....	120
4.8	Conclusion	125
Conclusion générale.....		128
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		132
Annexe (A)		1
Annexe (B).....		14

Dédicaces

Je dédie ce travail à:

Mes chers parents

Mes sœurs et frères

Mes nièces et neveux

A tous mes amis

Remerciements

Avant de présenter ce travail, je tiens à rendre grâce à Dieu Le Tout Puissant pour m'avoir accordé la foi en lui, d'avoir éclairé ma route et de m'avoir guidé dans le bon chemin.

Mes premiers remerciements vont naturellement à mes Directeurs de thèse, Dr. Elouissi Abdelkader et Dr. Benzater Benali, qui ont toujours fait preuve de bienveillance à mon égard. Je tiens à leurs exprimé ma reconnaissance pour les directives et conseils intéressants qu'ils m'ont donnés et pour avoir accepté de prendre le rôle d'encadrant tout au long de ma Thèse. De plus, ils m'ont également poussé et motivé pour continuer jusqu'à la fin pour obtenir des résultats (en hydrologie, notamment), leurs donner un sens scientifique et les mettre en valeurs.

Je remercie vivement le Professeur Nedjai Rachid de l'université d'Orléans pour m'avoir initié aux approches de l'hydrologie spatialisé et m'avoir donné les premières bases l'ors du stage qu'il m'a très généreusement offert dans son équipe de recherche au laboratoire PACTE, sans les connaissances que j'ai acquis durant ce stage je n'aurais pas pu accomplir ce travail, mais surtout je le remercie d'avoir accepté de faire le déplacement d'Orléans a Mascara pour faire partie de l'honorable Jury.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur Khaldi Abdelkader, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral dès 2013 et surtout d'avoir accepté de confier la continuité de ce travail suite à son départ en retraite à mes Directeurs de Thèse.

Je remercie Monsieur Hamimed Abderrahmane de m'avoir accepté au sein du Laboratoire (LRSBG) et aussi pour m'avoir facilité l'accès aux données et documentations, le soutien logistique ainsi que pour la très bonne ambiance qu'il a pu créer au sein du laboratoire de recherche.

Je tiens aussi à remercier vivement le Professeur Zekai Şen de l'université D'Istanbul d'avoir eu l'amabilité de contribuer à la réussite de ce travail.

Je tiens à remercier tous les examinateurs qui ont eu l'amabilité d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse. Leurs remarques et commentaires ont jeté un courant d'air frais qui m'a permis de clarifier certains points de ce manuscrit.

Mes derniers remerciements et non les moindres, s'adressent à mes parents, qui ont sacrifié toute leur vie pour m'offrir le meilleur, aussi mes sœurs et frères et neveux et nièces, ainsi que mes amis ; qui n'ont cessé, tout au long de cette thèse, de m'encourager et de m'orienter dans ma voie. Leurs soutiens ont été sans faille et la clef de ma réussite.

Liste Des Tableaux

Tableau 1.1	Caractéristiques principales des modèles hydrologiques liés à l'utilisation des sols et aux composantes de l'eau (Hosseini, 2010)	Page 21 a 28
Tableau 2.1.	Quelques caractéristiques hydro-morphologiques de la zone d'étude	Page 65
Tableau 2.2.	Caractéristiques morphométriques des bassins versants de la zone d'étude.	Page 67
Tableau 2.3.	Caractéristiques des sols des bassins versant étudié donnée par la FAO (HWSO, 2009).	Page 71
Tableau 3.1.	Classification du climat en fonction de l'indice d'aridité de De Martonne.	Page 77
Tableau 3.2.	Classification de l'indice d'aridité de De Martonne de zones étudiées pour l'année (2006).	Page 78
Tableau 3.3.	L'humidité relative Annuelle moyenne aux stations météorologique de Saida (2006-2010) et Beni-Saf (2008-2012).	Page 79
Tableau 3.4.	Récapitulatif des postes pluviométriques retenues	Page 79
Tableau 3.5.	Récapitulatif des Images Landsat retenues	Page 85
Tableau 3.6.	Correspondance entre les classes d'utilisation des terres et la couverture terrestre générique de SWAT.	Page 94
Tableau 3.7.	Liste des paramètres pris en compte dans l'étude de sensibilité.	Page 97
Table 4.1.	Classe d'occupation des sols.	Page 99
Tableau 4. 2.	Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol (1987) Oued Saida.	Page 100
Tableau 4. 3.	Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol (2002) Oued Saida.	Page 101
Tableau 4.4.	Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol (1987), Oued Taria.	Page 103
Tableau 4.5.	Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol (2002), Oued Taria.	Page 104
Tableau 4.6.	Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol (1987), Oued Maleh	Page 107
Tableau 4.7.	Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol (2002), Oued Maleh.	Page 107
Tableau 4.8.	Changement de l'occupation du sol entre 1987 et 2002.	Page 109
Tableau 4.9.	Bilan hydrologique avant calibration des bassins versant étudiés (LU 2002).	Page 113
Tableau 4.10.	Bornes des valeurs des paramètres de calibration insérées dans SWAT-CUP, et les valeurs optimales et rangs de sensibilité.	Page 115
Tableau 4.11.	Performances du modèle sur les stations hydrométriques	Page 117
Tableau 4.12.	Volumes annuels ruisselés observés et prédits et écarts respectifs aux stations d'Oued Saida (1998-2005) et d'Oued Taria sur la période (1995-2005).	Page 119
Tableau 4.13.	Bilan hydrologique par sous- bassin versant d'Oued Saida pour l'occupation des sols 2002 et 1987.	Page 121
Tableau 4.14.	Volumes de ruissellement annuels totaux observés et prédits et écarts respectifs	Page 123

Liste Des Figures

Figure 1.1	Classification des modèles hydrologiques selon (Beckers and Degré, 2011)	Page 10
Figure 1.2.	schéma de classification des modèle hydrologique selon (V. P. Singh, 1995).	Page 12
Figure 1.3.	Représentation des sous-bassins et des Hydrological Response Units (HRUs) du modèle SWAT (Chea and Sánchez Pérez, 2016).	Page 36
Figure 1.4.	Représentation schématique du cycle hydrologique telle que simulée par SWAT (Source : Neitsch et al., 2005)	Page 38
Figure 1.5.	Représentation schématique des mouvements de l'eau lors de la percolation (Brulebois, 2016).	Page 41
Figure 2.1.	Le stress hydrique dans le bassin méditerranéen (wri.org/aqueduct).	Page 51
Figure 2.2.	Localisation de la zone d'étude (http://www.abhoranie.dz/).	Page 53
Figure 2.3.	Localisation du bassin versant et des sous bassin versant de la Macta (ANRH).	Page 54
Figure 2.4.	Localisation du bassin versant et des sous bassin versant de la Tafna (Zettam, 2018) .	Page 56
Figure 2.5.	Esquisse géologique du Nord-Ouest algérien (Ministère de l'environnement)	Page 59
Figure 2.6.	Occupation du sol du nord-ouest algérien (Ministère de l'environnement)	Page 60
Figure 2.7.	Réseau hydrographique du bassin de la Macta (Baahmed, 2015).	Page 62
Figure 2.8.	Réseau hydrographique du bassin de la Tafna (Chaib Draa Tani, 2019).	Page 63
Figure 2.9.	Localisation des bassins versant pilote retenus.	Page 64
Figure 2.10.	Cartes des sous-bassins hydrologiques des bassins versant d'Oued Saida(1), Oued Taria (2) et Oued Maleh (3).	Page 68
Figure 2.11.	Cartes géologique des bassins versant de Oued-Saida et Oued Taria (TECSULT, 2004).	Page 69
Figure 3.1.	Organigramme général de la méthodologie adoptée	Page 74
Figure 3.2	Localisation des postes pluviométriques et stations hydrométrique.	Page 80
Figure 3.3..	Organigramme général pour la chaine de modélisation de l'occupation des sols	Page 86
Figure 3.4.	Images satellitaires Landsat (1987 et 2002) bassin versant d'Oued Saida.	Page 87
Figure 3.5.	Images satellitaires Landsat (1987 et 2002) bassin versant d'Oued Taria.	Page 88
Figure 3.6..	Images satellitaires Landsat (1987 et 2002) bassin versant d'Oued Maleh	Page 88
Figure 3.7.	Signature spectrale des classes d'occupation des sols du bassin versant d'Oued Maleh..	Page 90
Figure 3.8.	Fonctions de transferts utilisées dans SWAT d'après (Chaponnière, 2014).	Page 95
Figure. 4.1.	Carte d'occupation des sols bassin versant d'Oued Saida (A) 1987; (B) 2002.	Page 101
Figure.4.2.	Carte d'occupation des sols bassin versant d'Oued Taria (A) 1987; (B) 2002.	Page 104
Figure4.3	Carte d'occupation des sols bassin versant d'Oued Maleh (A) 1987; (B) 2002	Page 106
Figure.4.4.	Evolution de la classe d'occupation des sols entre 1987 et 2002 Oued Saida.	Page 110
Figure 4.5.	Evolution de la classe d'occupation des sols entre 1987 et 2002 Oued Taria.	Page 111
Figure 4.6.	Evolution de la classe d'occupation des sols entre 1987 et 2002 Oued Maleh.	Page 112
Figure 4.7.	Bilan hydrologique hypothétique pour l'occupation des sols (2002) Oued Saida.	Page 113

Figure 4.8.	Bilan hydrologique hypothétique pour l'occupation des sols (2002) Oued Taria.	Page 113
Figure 4.9.	Bilan hydrologique hypothétique pour l'occupation des sols (2002) Oued Maleh.	Page 114
Figure 4.10.	Hydrogramme d'Oued Saida à l'exutoire modélisé par SWAT (SURQ : ruissellement de surface)	Page 118
Figure 4.11.	Hydrogramme d'Oued Taria à l'exutoire modélisé par SWAT (SURQ : ruissellement de surface)	Page 119
Figure 4.12.	Carte d'évapotranspiration (ET) pour les sous-bassins du bassin versant de Oued Saida en 2002 (A) et 1987 (B).	Page 122
Figure 4.13.	Carte des débits de surface (SURFQ) pour les sous-bassins du bassin versant d'Oued Saida en 2002 (A) et 1987 (B).	Page 122
Figure 4.14.	Carte du débit latéral (LATQ) pour les sous-bassins du bassin versant d'Oued Saida en 2002 (A) et 1987 (B).	Page 123
Figure 4.15.	Carte du débit latéral (LATQ) pour les sous-bassins du bassin versant d'Oued Saida en 2002 (A) et 1987 (B).	Page 124
Figure 4.16.	Débit mensuel simulé et observé (m ³ -s ⁻¹) aux stations de jaugeage (période d'étalonnage : janvier 1998-décembre 2005) pour le scénario d'utilisation des terres de 2002 et 1987.	Page 124
Figure 4.17..	Variation du débit de pointe à l'échelle mensuelle entre LU 2002 et LU1987	Page 125

Liste Des Abréviations

ABH-CH-Z : Agence du Bassin Hydrographique Chelef-Zehrez.

ABH-O.C.C : Agence du Bassin Hydrographique Oranie Chott Chergui.

AGRR: Agriculture en rangée.

ALPHA_BF.gw : Coefficient de récession de la nappe (jour).

ANRH : l'Agence Nationale des Ressources en Eau.

ArcGIS: Architecture Geographical Information System.

ArcSWAT: Architecture Soil and Water Assessment Tool.

ARGL: Agriculture.

BARR: sols nus.

CFSR: Climate Forecast System Reanalysis.

CH_K2.rte : Conductivité hydraulique effective dans le chenal principal (mm/h).

CN2.mgt : numéro de la courbe de ruissellement de la (S.C.S) de la condition d'humidité (2).

D.E.M : Digital Elevation Modèle.

EPCO.hru : Facteur de compensation de l'absorption par les plantes.

EPIC: Environment Policy Integrated Climate.

ESCO.hru : Facteur de compensation de l'évaporation du sol.

ET: Evapotranspiration actuelle.

FAO: Food and Agriculture Organization.

FRST: Foret, Maquis et Matorral.

GES : Gaz à Effet de Serre.

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

GLUE: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation.

GR1A: Genie Rural a Un paramètre Annuel.

GR2M: Genie Rural a Deux paramètres Mensuels.

GVI L'indice de végétation verte.

GW_DELAY.gw : Délai de routage de l'eau de percolation (jours).

GWQMN.gw : Profondeur seuil dans l'aquifère peu profond pour que le débit de retour se produise (mm).

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

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center's-River Analysis System.

HRU: Hydrological Response Unit.

HWSD: Harmonized World Soil Database.

I.T.M.A : Institut Technique Agricole Temouchent.

ISODATA: Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique.

KINEROS: a Kinematic Runoff and Erosion model.

LAI : l'indice de surface foliaire.

LANDSAT -TM: Thematic Mapper.

LANDSAT-ETM: Enhanced Thematic Mapper.

LISFLOOD: Le modèle hydrologique.

LUCC: Land Use and Cover Change.

LUCHEM: Assessing the impact of Land Use Change on Hydrology by Modeling.

MCMC: Markov Chain Monte Carlo.

MENA: Moyen-Orient et en Afrique du Nord.

MNT : Modèle numérique de terrain.

MOD: la matière organique dissoute.

NAM Le modèle hydrologique.

NCEP: The National Centers for Environmental Prediction.

NDVI L'indice de végétation différentielle normalisé.

OV_N.hru : Coefficient de Manning (n) pour l'écoulement de surface.

ParaSol: Parameter Solution.

PER: Reel evapotranspiration (mm).

PET: Potential evapotranspiration (mm).

PIR: Proche infrarouge.

R^2 : coefficient de détermination.

RCHRG_DP.gw : Fraction d'eau percoler dans l'aquifère profond.

REVAPMN.gw : Niveau de nappe nécessaire pour contribuer à la réévaporation (mm).

RORB: Runoff Routing to Flood warning System.

SAVI: l'indice de végétation ajusté au sol.

SCS: Curve Number Method.

SGBDR: Système de gestion de Bases de Données Relationnelles.

SHE: Systeme Hydrologique Europeen.

SHESED: System Hydrologic European for water flow and sediment transport.

SIG: Système d'Information Géographique.

SLSUBBSN.hru: Longueur moyenne de la pente du bassin (mètre).

SOL_AWC.sol: Capacité en eau disponible de la couche de sol (mm H₂O/mm de sol).

SOL_K.sol: Conductivité hydraulique à saturation (mm/heure).

SOL_Z.sol: Profondeur de la surface au fond de la couche de sol (mm).

SUFI-2: Sequential Uncertainty Fitting.

SURLAG.bsn: Coefficient de retard de l'écoulement de surface.

SWAT: Soil and Water Assessment Tool.

SWAT-CUP: SWAT Calibration Uncertainties Programs.

TOPMODEL: Topography based Model.

TOPOG_IRM: Hydrological Model in targeting tree planning sites in catchment.

TRNSRCH.bsn: Fraction des pertes par transmission du canal principal qui entre dans l'aquifère profond.

URDL: Zone Urbaine.

USDA: Agence Américaine pour l'agriculture.

USGS: United State Geological Survey.

WASIM: soil water balance model.

WEAP: Water Evaluation And Planing System.

WRI: World Resources Institute.

WXGN: Weather Generator.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

L'intégration du changement d'occupation des sols dans la gestion de la ressource en eau est de plus en plus développée au sein des politiques publiques, elle s'inscrit dans une optique de gestion globale et durable à l'échelle du bassin versant grâce à la réalisation d'études d'impact de ses changements. Ces études comprennent habituellement des scénarios d'occupation des sols à l'échelle du bassin versant, qui alimentent des modèles d'impacts tels que des modèles hydrologiques. L'étude de l'évolution de l'occupation du sol et de son utilisation est intéressante pour une meilleure compréhension des problèmes environnementaux en général. Elle est nécessaire pour déterminer la nature et le mode d'intervention des communautés humaines qui modifient les formes d'utilisation globale des sols selon l'évolution des besoins. Les recherches et les analyses faites sur l'occupation et l'utilisation du sol forment une base d'information nécessaire au planificateur et à l'aménageur (Hamouda, 2011).

Dans les régions arides et semi-arides comme l'Afrique du Nord, la croissance de la population ainsi que le développement économique ont accentué l'exploitation des ressources en eau qui sont déjà limitées. Le risque de pénurie d'eau est en effet très élevé dans ces régions (Yazdanpanah et al., 2014; Brooks, 2007). À titre d'exemple, les marais de la Macta constituent une zone humide avec des caractéristiques écologiques particulières au Maghreb, et une dynamique importante de l'occupation des espaces. Les formations végétales sont soumises à des multiples formes de dégradation, dues essentiellement à l'action du climat (période de sécheresse) et à l'action anthropozoogène croissante sur ce milieu. Les nouveaux modes d'élevage et de culture contribuent à l'accroissement de la dégradation de cet écosystème naturel avec une altération des potentialités biologiques de la zone humide (Sitayeb, 2008). D'après Meddi and Talia (2013), dès la fin des années 1970, l'Ouest algérien a connu une sécheresse caractérisée par une sévérité, une ampleur et une persistance remarquables du déficit pluviométrique. Entre les années 1930 et 1950, il y a eu une tendance à la hausse de la pluviométrie et une tendance à la baisse au début des années 1940 et au milieu des années 1970 (Meddi and Meddi, 2009). La diminution de la pluviométrie dépasse 36 % dans la région de Mascara et à l'extrême Ouest du pays. A la suite de ces travaux, ces auteurs déduisent que pour avoir deux années sèches successives à l'Ouest, la probabilité est de plus en plus grande (Baahmed, 2015). Elouissi (2016) a démontré que les précipitations saisonnières pour les saisons de l'hiver et le printemps tendent vers la baisse et qu'elles sont les plus touchées par la sécheresse. La réduction de la pluviométrie dans les hautes plaines du sud de l'Algérie occidentale a provoqué de profondes modifications de l'occupation et de la gestion des espaces, ainsi l'activité économique de cette région est fortement conditionnée par les fluctuations climatiques et les modes

traditionnels d'exploitation des surfaces agricoles. L'analyse de l'occupation actuelle des espaces et de sa dynamique permet d'appréhender les différentes contraintes appliquées à ces écosystèmes et de mesurer les incidences environnementales et sociales du changement climatique. Dans ce contexte, l'incidence de la progression de l'aridité est perceptible à plusieurs niveaux comme la forte concentration de la population dans les centres urbains, la réduction spatiale des formations végétales spontanées, l'augmentation des surfaces agricoles et de l'effectif du cheptel ovin (Meterfi et al., 2011).

Le changement d'occupation des sols est l'une des activités les plus importantes dans de nombreuses régions du monde. Elle a un fort impact sur le bilan hydrique des bassins versants. La prédiction des flux d'eau dans des environnements changeants avec des conditions limites variables est une tâche qui nécessite l'utilisation de modèles hydrologiques. Ces modèles doivent être évalués pour différentes conditions environnementales (par exemple, le climat, la topographie, le sol et la couverture végétale) afin de pouvoir estimer les changements induits par les changements environnementaux (DeFries and Eshleman, 2004). Plusieurs modèles conceptuels sont disponibles à utiliser pour les études de changement environnemental et pour décrire les processus hydrologiques suivant des approches basées sur la physique. Dans la plupart des cas, les modèles basés sur la physique sont meilleurs parce que beaucoup de leurs paramètres connexes sont mesurables à petite échelle, et donc, prévisibles si les conditions limites changent.

Les effets du changement d'utilisation des terres sur les bilans hydrologiques dans les bassins versants ont fait l'objet de nombreuses études. Cependant, la complexité des questions attire toujours des études scientifiques considérables dans le monde entier (Fohrer et al., 2005). La quantification de l'effet des changements d'utilisation et de couverture des sols sur la dynamique de ruissellement d'un bassin versant a été considérée comme un domaine d'intérêt pour les hydrologues ces dernières années. La relation quantitative bien définie entre les propriétés de l'utilisation des sols et le mécanisme de génération du ruissellement est mal connue.

Différentes méthodologies ont été mises en œuvre pour tenter de combler le manque de connaissances sur le sujet, mais aucun modèle général et crédible n'a encore été établi pour prédire l'effet des changements d'utilisation des terres (Kokkonen and Jakeman, 2002).

Le présent travail de thèse est une tentative de découvrir certains aspects des processus hydrologiques affectés par les changements d'utilisation des terres dans des bassins versants pilotes de l'ouest Algérien. Ayant une importance pour l'agriculture et l'approvisionnement en eau pour tous les usages de l'eau, à titre d'exemple nous allons nous pencher sur le cas du bassin versant de

Oued Saida et Oued Taria qui se situent en amont du barrage de Ouizert et qui alimentent ce dernier depuis sa mise en service et le début de son exploitation en 1986. Ce barrage est destiné à être utilisé à des fins multiples, y compris à la pêche en eau douce. La demande croissante sur la ressource en eau dans cette zone soumise à un stress hydrique exerce une forte pression sur l'utilisation des ressources en terre et en eau.

L'ouest Algérien, un contexte fragile vis-à-vis de la ressource en eau

D'après la carte pluviométrique du nord algérien élaborée par Laborde (1995) en collaboration avec l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH), le changement climatique s'est fait sentir sur le Nord-ouest de l'Algérie particulièrement dans les bassins de la Macta, de la Tafna et du Cheliff, dans le sens où la pluviométrie a fortement diminuée sur cette région (Baahmed, 2015). D'autres part, les travaux portant sur le changement du régime pluviométrique dans le Nord-Ouest Algérien menés par Meddi and Meddi (2007) ont clairement montré une rupture dans la décennie 70 (changement de tendance) pour la quasi-totalité de la région étudiée. Ainsi la variabilité interannuelle des pluies augmente lorsque l'on se rapproche des régions arides et l'augmentation de la variabilité suit l'accroissement de la longitude et la diminution de la latitude. L'altitude atténue cet accroissement. En Algérie et compte tenu de l'aridité de la majeure partie de son territoire, des contrastes nord/sud et est/ouest (nord et est sont relativement mieux arrosés), l'accès à l'eau revêt encore la forme d'une crise chronique et constitue une source de conflits sociaux et un frein réel au développement des territoires qui en sont dépourvus et cela en dépit des efforts consentis par les pouvoirs publics pour de nouvelles mobilisations (transferts, dessalements), une meilleure dotation et une distribution équitable pour la population. La dotation quotidienne en eau potable par habitant est passée de 90 litres (années 1990) à 170 litres distribuées dans plus de 73 % des chefs-lieux de commune (Bellal et al., 2015). Simultanément, l'alimentation en eau potable en continue cesse d'être l'apanage de quelques îlots résidentiels dans les 2 ou 3 villes, les plus importantes du pays mais devient accessible à un nombre plus important d'agglomérations algériennes. L'eau qui coule dans les robinets 24h/24h nous ramène à la distribution de l'eau nous éloigne de ces plages horaires rarement respectées (Bellal et al., 2015). Hallouz et al. (2019) ont aussi démontrée au niveau de l'Oued Mina dans l'ouest algérien que les tendances significatives dans les indices de température correspondant à une tendance au réchauffement dans cette région de l'Algérie. Aussi la fréquence des journées chaudes a augmenté, tandis que la fréquence des journées froides a diminué. Les

indices de précipitations, constitués des précipitations annuelles totales, du nombre de jours de pluie, des précipitations mensuelles maximales sur un jour, des précipitations mensuelles consécutives maximales sur cinq jours ont augmenté alors que les jours de pluie consécutifs ont diminué.

La Problématique

Ces dernières années, en raison de la croissance démographique et l'activité anthropique, plusieurs bassins versant de l'ouest algérien, à l'image du bassin versant d'Oued-Saida, ont subis des changements rapides dans l'utilisation des terres, l'urbanisation et le développement des ressources en eau pour l'agriculture, l'industrie et l'approvisionnement domestique. La conception et la construction du barrage de Ouizert ont débuté au cours des années quatre-vingt du siècle précédent, sa mise en service a eu lieu en 1986. Les gestionnaires sont plus conscient par les effets des changements importants dans l'utilisation des terres résultant de l'accélération du développement des terres et de l'expansion des villages et des villes, il est bien ressenti par la dégradations des capacités de stockage des barrages causés par l'envasement due essentiellement à l'érosion hydrique. Dans un autres cadre Benselama, (2019) a étudié l'érosion du bassin versant d'Oued el Maleh dans la région de Ain Temouchent, il a mis en évidence l'impact de la densité de la végétation dans le processus de perte de sol et d'érosion, une végétation moins dense entraine une érodabilité et dégradation des sols plus élevé. Des changements dans la couverture végétale d'un bassin versant pourraient aussi avoir des effets dévastateurs sur l'équilibre et la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant. Ainsi la gestion des bassins versants tente de contrôler et de réduire l'érosion et la sédimentation par des opérations sur le terrain.

La gestion intégrée des bassins versants en vue d'un développement durable est possible en utilisant des données de télédétection et des modèles hydrologiques dans un environnement spatialisé à l'aide des nouvelles techniques des système d'information géographiques (SIG). Ces outils peuvent servir de méthode utile et fiable.

La nécessité de collecter des séries de données dispersées est inhérente à la solution des questions ci-dessus et de nombreux autres problèmes environnementaux. La complexité et la taille de ces séries de données nécessitent l'application des technologies SIG et de télédétection. L'avantage de disposer de toutes les informations conjointes permet d'effectuer des recherches et des requêtes sur une combinaison d'ensembles de données, de manière à ce que les données puissent être utilisées de façon optimale.

Plusieurs auteurs ont mis en évidence une dynamique de l'occupation des sols sur l'ouest algérien, (Meterfi et al., 2011) ont étudié cette problématique sur la zone hautes plaines de Sidi-Bel-Abbès, ils ont mis en évidence un fort accroissement de la population, de plus en plus concentrée dans les agglomérations, est à l'origine d'une augmentation remarquable du cheptel élevé sur pâturage. Cet élevage, surtout extensif, exerce une pression permanente et croissante sur les ressources naturelles déjà sévèrement fragilisées par les insuffisances pluviométriques. De ce fait, la région subit, depuis plus d'une trentaine d'années, une dégradation de plus en plus accentuée de toutes les composantes de son écosystème (couvert végétal et sol). Dans le bassin versant du Oued-Saida, l'occupation des sols a évolué dans les zones arides selon les fluctuations climatiques et les habitudes d'exploitation des terres agricoles encore traditionnelle mais souvent imposée par les caprices du climat méditerranéen dans son étage aride. L'analyse de la dynamique de l'occupation des sols permet de comprendre l'orientation des systèmes de production et d'en maîtriser les causes pour une meilleure utilisation de chaque espace (Labani et al., 2006). L'incidence de la progression de l'aridité est perceptible à tous les niveaux, une forte concentration de la population dans les centres urbains, réduction spatiale des formations végétales spontanées, augmentation des surfaces agricoles et de l'effectif du cheptel ovin menant la région vers un système de production agropastoral (Meterfi et al., 2011). Les effets de ces changements d'utilisation des sols constatés de par le monde sur les régimes hydrologiques d'un bassin versant ont fait l'objet de nombreuses études et approches.

Ce travail de thèse est entrepris à l'issue d'une réflexion faite après le constat de la méconnaissance des interactions entre les régimes hydrologiques et la dynamique de l'occupation des sols et leurs impacts socioéconomiques en Algérie. Les travaux de modélisation hydrologiques précédents ont été surtout focalisés sur le fonctionnement hydrologique et de transfert de polluant et de matières en suspension des bassins versant. La compréhension de l'évolution des régimes hydrologiques, dans le contexte d'un changement d'occupation des sols, est une étape fondamentale pour l'adoption une stratégie d'aménagement du territoire et des perspectives y afférant.

Hypothèses de base

Le changement d'utilisation des terres a affecté le bilan hydrique dans les bassins versants étudiés. Cela peut varier en fonction des différentes classes de pente. Un système de base de données pour le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tools) étudié le bilan hydrique à travers différentes utilisations des terres dans les bassins versant étudiés sera capable d'évaluer et de quantifier l'effet des changements d'utilisation des terres sur le bilan hydrique.

Objectifs

L'objectif principal de cette étude était d'examiner la relation entre les changements d'utilisation des terres dans des bassins versant pilotes de l'ouest Algérien à l'image de celui d'Oued-Saida et d'Oued Taria, situé au nord-ouest de l'Algérie. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

Préparer une base de données d'occupation des sols pour le model SWAT, Et analyser les tendances de la dynamique de l'occupation des sols.

Prévoir l'effet des scénarios de changement d'utilisation des terres sur le bilan hydrique.

Portée et limites de la recherche

Le bilan hydrique a été prédit sur la base des changements d'utilisation des terres de 1987 à 2002, la validation des cartes d'occupation des sols établies, a été faite par images Google-Earth et non pas par des mesures in-situ, ce qui présente une limitation pour cette étude.

Le manque de stations de mesure des précipitations dans la partie supérieure de la zone d'étude est une autre limite à cette étude, aussi l'accumulation de neige est un élément entrant dans la prédiction du bilan hydrique et les bassins versant étudiés comme celui de Oued-Saida et Oued Taria, et les séries de précipitation portant trop lacunes pour le bassin versant d'Oued El Maleh font partie d'une zone montagneuse une partie de des précipitations qu'il reçoit présente un gradient d'altitudes spatialement non uniforme, aussi les accumulations de neige enregistré parfois dans les hauteurs des monts de Saida n'ont pas pu prises en compte faute de disposer de cette donnée.

Pour les paramètres d'évaporation potentielle et réelle, les températures minimales et maximales, l'insolation, l'humidité relative et la vitesse du vent qui sont deux exigences supplémentaires pour le calcul du bilan hydrique, des stations synoptiques avec des données journalières générées par des modèles de circulation générales de l'atmosphère sont disponibles. Cependant, elles sont en nombre insuffisant pour couvrir tous les bassins étudiés et parfois elles sont situées en dehors des bassins versant et elles ne couvrent pas toutes les zones étudiées.

Un modèle numérique d'élévation (D.E.M) a été utilisé pour les classes d'élévation et de pente, en raison de sa grande taille de pixel (30 m), compte comme une autre limitation de cette étude.

Le développement d'un modèle à base physique implique plus de soixante paramètres. La plupart des paramètres ont des effets sur la création de la base de données, mais les utiliser tous n'est pas pratique.

La prédiction du bilan hydrique nécessite une mise à jour des données sur le type et les propriétés des sols pour différentes années. Cependant, une carte des sols disponible et utilisée est celle de la Food and Agriculture Organization (FAO) qui n'offre pas la précision voulue.

Importance de l'étude

L'ouest Algérien est une zone très vulnérable à la sécheresse due aux changements globaux, dans ce cadre notre étude porte sur le Bassin versant d'Oued Saida et Oued Taria qui présente un cas représentatif de l'ouest Algérien.

Les bassins versants de Oued-Saida et de Oued Taria alimente le barrage de Ouizert, ce barrage se trouve en amont d'un système hydraulique appelé le triplex qui regroupe aussi les barrages de Bouhanifia et de Fergoug, ce dernier est la principale source d'approvisionnement en eau pour l'agriculture dans la plaine de Habra. Ainsi, la surveillance de la quantité d'eau dans le réservoir du barrage de ce système est très importante pour les autorités publiques algériennes qui sont responsables de la gestion du bassin versant. La question changements de l'utilisation des terres a très peu été étudiées et considérées dans la gestion des bassins versant en Algérie, étant un aspects des changements globaux dus à la croissance rapide de la population, aux activités récréatives humaines, aux activités industrielles, aux effets des changements climatiques sur la couverture végétale, à la pollution de l'eau et de l'air, à la sédimentation et au surpâturage qui devraient avoir lieu dans le futur.

D'autres parts le bassin versant côtier d'Oued Turgot sera étudié afin d'examiner le contraste et les différences dans la dynamique de l'occupation des sols ainsi que le comportement hydrologique des bassins versant soumis à des régimes climatiques plus ou moins différents.

Cette étude a tenté de déterminer l'effet des changements d'utilisation des terres sur la quantité de l'eau au cours de la dernière décennie afin que le fonctionnement futur du système des barrages en aval puisse être mieux géré pour satisfaire toutes les parties prenantes.

Organisation de la thèse

Cette Thèse est scindée en quatre chapitres :

Après une introduction, assez exhaustive où la problématique est posée et les hypothèses déterminées, le manuscrit est structuré comme suit :

Chapitre 1 : présente une recherche bibliographique sur la problématique, les hypothèses de travail et explicite l'état des connaissances sur la problématique ; une comparaison des modèles

hydrologiques intégrant l'occupation des sols ; ainsi qu'une description du modèle SWAT et la méthode d'évaluation de la performance du modèle;

Chapitre 2 : décrit la zone d'étude, les bassins versant choisis pour la présente étude ainsi que les données utilisées, collecte, traitement de données et mesures et le choix des bassins versants pilotes qui devront faire l'objet de l'étude ;

Chapitre 3 : Ce chapitre se penche sur les données et la méthodologie adopté dans l'étude, d'abord la détermination de l'occupation des sols pour les trois bassins versants par maximum de vraisemblances et pour différentes dates ainsi que l'étude des tendances de l'occupation des sols dans le temps dans ces bassins versant; puis la modélisation hydrologique par le modèle SWAT ;

Chapitre 4 : ce chapitre sera consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus dans le chapitre 3 et leurs discussion, ou les contributions de l'étude sont ensuite soulignées;

Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale avec une discussion exhaustive synthétisant les résultats obtenus qui résume les principales constatations et conclusions ouvrant sur des perspectives et des recommandations de ce travail.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

Ce chapitre vise à présenter la littérature et les principaux concepts, liés aux impacts du changement d'occupation des sols sur la ressource en eau, qui seront employés dans ce travail de thèse.

1.1 Le bilan hydrique

Selon Shoemaker et al. (2005), le terme "modèle" désigne un ensemble d'équations ou d'algorithmes utilisés pour simuler le comportement d'un système physique. Il est également utilisé pour faire référence aux outils logiciels qui automatisent le calcul d'équations ou d'une combinaison d'équations représentant le système.

Penman (1961) a défini l'hydrologie comme une science qui tente de répondre à la question fondamentale suivante "Qu'arrive-t-il à la pluie ?" Bien que cette question semble simple, la réponse est en fait très compliquée en raison de l'énorme complexité des processus qui régissent le cycle hydrologique (Watson, 2006). Le bilan hydrique d'un lieu, qu'il s'agisse d'un parcours, d'une zone agricole, d'un bassin versant ou d'un continent, peut être déterminé en calculant les changements dans les volumes d'entrée, de sortie et de stockage de l'eau à cet endroit. La principale source d'entrée d'eau est la précipitation, tandis que les principaux processus de sortie sont l'évapotranspiration et le débit des cours d'eau. Les modèles hydrologiques sont conçus pour répondre à la question de Penman.

Le niveau de détail de la réponse dépend toutefois du problème en question et la réponse est généralement employée dans un large éventail de domaine hydrologique, de la gestion des bassins versants à la conception technique (Singh and Woolhiser, 2002). Le mouvement et le transport de l'eau, des sédiments et des contaminants à travers la phase terrestre du cycle hydrologique sont mieux décrits, quantifiés et compris à l'aide de modèles hydrologiques. Dans la réalité, les modèles hydrologiques sont devenus des outils importants pour l'analyse et la gestion des ressources en eau.

1.2.1. Types de modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques sont des représentations simplifiées du cycle de l'eau. Un large éventail de types de modèles hydrologiques est disponible pour l'utilisation par les scientifiques et les ingénieurs des processus hydrologiques sont des modèles à l'échelle et des modèles mathématiques,

un modèle à l'échelle est une réplique miniaturisée d'un système physique réel et est composé de matériaux similaires à ceux que l'on trouve dans le système réel étudié (Thompson, 2017).

Ambroise (1998) présente une classification des modèles hydrologiques basée sur les modèles conceptuels et les modèles « physico-conceptuels », cette classification permet de pallier l'ambiguïté entre les classes de modèles conceptuels et à base physique. En effet, le terme de modèle conceptuel reprend des modèles très éloignés dans leur fonctionnement : celui-ci peut être physiquement basé ou non, le terme conceptuel ne faisant référence alors qu'à une représentation schématique du bassin versant en réservoirs (Gineste, 1997). Les modèles conceptuels à base physique ou capacitifs. Beckers and Degré (2011) donne une description des différents modèles hydrologiques selon la classification suivante : les modèles empiriques ou « boîtes noires ; les modèles conceptuels empiriques ou « boîtes grises ; les modèles conceptuels à base physique ou capacitifs et les modèles physiques (Figure 1.1.).

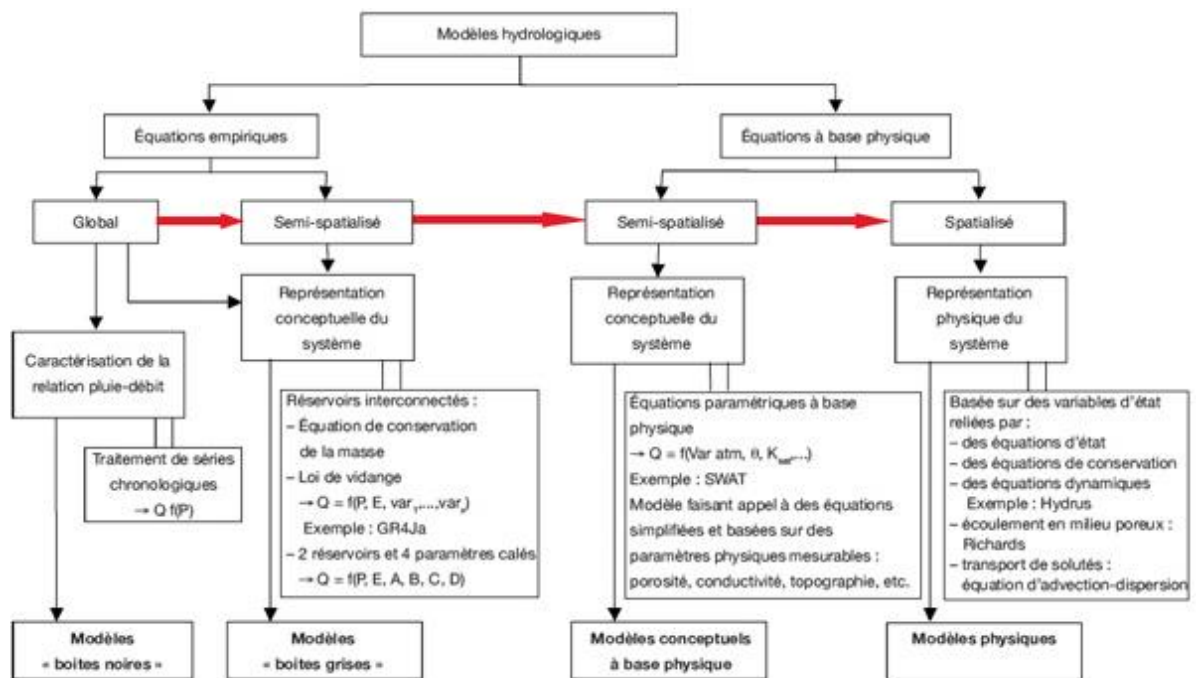


Figure 1.1. Classification des modèles hydrologiques selon Beckers and Degré (2011)

Depuis la révolution informatique, la modélisation hydrologique a fait un énorme bond en avant, ce qui a donné naissance à une nouvelle branche de l'hydrologie, appelée hydrologie numérique ou digitale (Singh, 2018). Actuellement, les modèles hydrologiques sont des outils indispensables et largement utilisés pour la prévision des variables hydrologiques, gestion de réservoirs, prise de décision ou encore pour améliorer la compréhension des processus régissant le cycle hydrologique

d'un bassin versant. Ces outils sont des ensembles d'équations mathématiques qui décrivent et représentent de manière relativement simple les processus hydrologiques occurrents dans un bassin versant (Larabi, 2017). Un modèle mathématique peut être défini comme un ensemble d'équations mathématiques combinées avec des énoncés logiques qui simulent le fonctionnement d'un système réel (Refsgaard, 1997). Étant donné que la discussion de tous les types de modèles hydrologiques, ou même des deux, dépasse le cadre de ce chapitre, la présente analyse documentaire se concentre exclusivement sur le groupe mathématique des modèles hydrologiques. Les modèles hydrologiques visent la simplicité en sélectionnant les aspects fondamentaux du système cible au détriment des détails accessoires (Allen Freeze, 1987).

Un certain nombre de techniques alternatives et d'approches de modélisation ont été développées. Le premier modèle hydrologique intégré, appelé modèle de captage de Stanford, a été publié dans la littérature en 1966 par Crawford et Linsley (Singh and Frevert, 2003). Au cours des décennies suivantes, la modélisation hydrologique s'est considérablement améliorée grâce aux progrès de la technologie et du l'outil informatique. De meilleurs modèles hydrologiques deviennent disponibles grâce à ces progrès technologiques et à l'amélioration continue des techniques de modélisation, comme les SIG, la télédétection ou les automates cellulaires (Beven et al., 1995; MacMillan et al., 1993). Nombre de ces méthodes sont utilisées dans les modèles de captage contemporains, tels que TOPMODEL (Beven et al., 1995) ; KINEROS, un modèle cinématique de ruissellement et d'érosion développé par (Rovey et al., 1977) et décrit par (Hernandez et al., 2017; R. Smith et al., 1995), et TOPOG_IRM (Zhu and Xu, 2021; Dawes et al., 1993).

1.2.2. Types de modèles hydrologiques en fonction l'approche adoptée

Les modèles peuvent être caractérisés par les types de relations utilisées au sein des routines. Les relations entre les processus réels et ceux du modèle peuvent être représentées de manière empirique ou physique (Refsgaard and Knudsen, 1996). Les critères de classification des modèles reposent principalement sur la représentation de l'espace, du temps et des processus décrits (V. P. Singh, 1995). Le schéma de la figure 1.2 explicite cette classification.

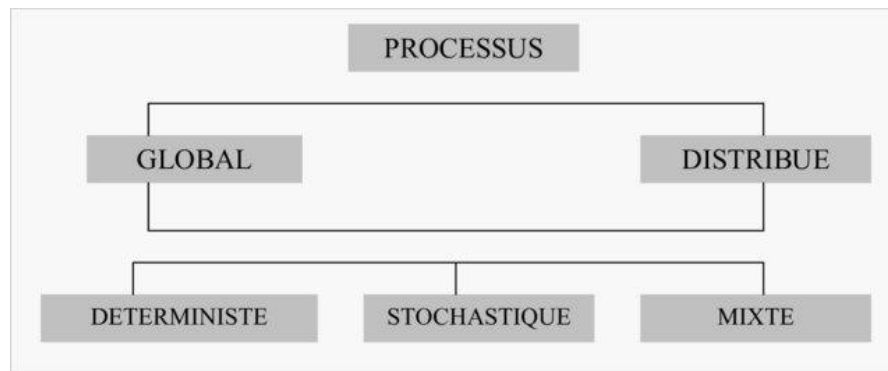


Figure 1.2. schéma de classification des modèle hydrologique selon (Singh, 1995).

1.2.3. Modèles empiriques

Dans ce type de modèles empiriques, appelés parfois modèles "boîte noire" ou "entrée/sortie", les relations au sein des routines sont basées sur des données empiriques. Ces termes décrivent généralement des modèles dont le fonctionnement interne ne vise pas directement à représenter des processus opérationnels "réels", ni à un niveau mathématique abstrait. De ce fait, ces modèles ont tendance à avoir un fort taux d'erreur, une capacité prédictive, mais leur pouvoir explicatif physique est souvent faible (Kirkby et al., 1993). Les applications réussies de ce type de modèles comprennent l'hydrogramme unitaire, l'analyse des fréquences extrêmes, l'analyse de régression et les modèles de prévision en temps réel (Allafta and Opp, 2021; Yair and Lavee, 1985).

1.2.4. Modèles à base physique

Un modèle physique est utilisé dans divers contextes pour désigner une représentation physique d'un objet qui peut être un élément ou un objet unique, par exemple un boulon, ou un grand système, par exemple le système solaire. Ces modèles sont basés sur la compréhension des mécanismes physiques et sont généralement caractérisés par de grandes exigences en termes de temps de calcul et de besoins en données d'entrée. Néanmoins, ils offrent un pouvoir explicatif et expérimental accru. Cependant, en raison du nombre plus élevé d'hypothèses nécessaires, leur capacité de prédiction est généralement égale ou inférieure à celle des modèles empiriques. Beven (1989) a soutenu que des modèles très complexes, basés sur la physique, sont possibles à plus petite échelle, tandis que les modèles à plus grande échelle doivent être simples pour permettre la paramétrisation.

De même, Woolhiser (1996) a souligné que les modèles les plus simples sont généralement plus précis que les modèles physiquement complexes, mais qu'il est difficile de les adapter à de grands bassins versants.

Les généralisations des sorties ou des prédictions du modèle aux paramètres hydrologiques du bassin versant impliquent généralement une représentation simple, ou simplifiée et d'éléments d'entrée du modèle. De nombreuses variables connexes, comme les caractéristiques du sol, par exemple, qui sont importantes à des échelles réduites pour des études hydrologiques détaillées, sont également indispensables à l'échelle du bassin versant. Cependant, certaines de ces variables, augmentent la complexité du modèle sans nécessairement améliorer la précision des résultats finaux.

1.2.5. Types de modèles hydrologiques en fonction de leur variabilité spatiale

La variabilité spatiale au sein d'un bassin versant peut-être abordée à l'un ou l'autre des deux niveaux de modélisation : forfaitaire ou perturbée. Une présentation de ces deux niveaux est proposée ci-dessous.

1.2.6. Modèles globaux

Ces modèles sont exprimés par des équations différentielles ordinaires qui décrivent des lois hydrauliques simples. Par conséquent, ces modèles ne tiennent pas compte de la variabilité spatiale des processus, des entrées, des conditions limites ou des caractéristiques géométriques du système. Au lieu de cela, une valeur unique pour les propriétés et les paramètres est appliquée à l'ensemble du bassin versant. Quelques exemples, le Hydrologic Engineering Center qui a été conçu en 1981 et décrit par Feldman (1995), RORB (Laurenson et Mein, 1995), et qui a été conçu par les ingénieurs de l'armée américaine en 1972 et décrit par Speers (1995).

1.2.7. Modèles distribués

La distribution spatiale des caractéristiques hydrologiques et leurs interrelations sont particulièrement importantes pour expliquer les processus physiques qui se déroulent dans les bassins versants. Le type distribué des modèles hydrologiques rend clairement compte de la variabilité spatiale des processus, des entrées, des conditions limites et des caractéristiques du système puisque ce type de modèles utilise les valeurs des pixels dans chaque sous bassin pour traiter précisément cette variabilité. Des exemples de ce type de modèles incluent dans le modèle Système Hydrologique Européen SHE (Abbott et al., 1986).

D'autre part, les modèles peuvent également être classés en fonction du type d'équation utilisée et du résultat produit. Les résultats des modèles peuvent être une réponse unique ou de nombreuses réponses. Les processus peuvent être décrits par des équations déterministes ou

stochastiques. Les modèles déterministes n'ont qu'un seul résultat possible tandis que les modèles stochastiques ont une multitude de réponses. Néanmoins, dans la plupart des cas et des applications, les deux types d'équations sont utilisés dans le même modèle. Cependant, dans les cas où les informations pertinentes pour le paramétrage font défaut, certains processus sont modélisés de manière plus précise à l'aide d'équations stochastiques qui peuvent donner une approximation raisonnable à des fins de modélisation.

1.2.8. Examen des effets d'utilisation des sols sur les composantes du cycle hydrologique

Dans cette section, l'examen de la littérature a porté sur les effets de l'utilisation des terres sur les caractéristiques du sol et de l'eau, le ruissellement et la génération d'inondations, comme suit :

1.3. Effet du changement d'occupation des sols sur le ruissellement et les inondations

L'une des conditions préalables à l'évaluation de l'influence des changements prévus dans l'utilisation et/ou la couverture des sols sur le ruissellement est l'emploi d'un ou plusieurs scénarios d'utilisation des sols. L'outil de modélisation des changements d'utilisation des sols (LUCC) est un moyen de modélisation qui fournit des moyens de transformation spatiale des tendances globales d'utilisation des sols en scénarios spatialement distribués de modèles d'utilisation des sols, en prenant en compte leur topologie dans un mode de position réelle. L'occupation des catégories d'utilisation des sols à chaque cellule de la grille est réalisée de manière spatialement explicite, en fonction d'une évaluation des caractéristiques du site ainsi que de ses relations avec son voisinage.

Niehoff et al. (2002) ont étudié l'impact des changements d'utilisation des sols sur le ruissellement pluvial, en termes de quantité et de qualité, dans le sud-ouest de l'Allemagne. Leurs résultats ont été présentés à la lumière d'une étude de simulation composée de trois parties :

1. génération de scénarios d'utilisation des sols spatialement explicites ;
2. création de modèles hydrologiques de ruissellement spatialement distribués et basés sur des processus ;
3. interprétation, démonstration et diffusion des résultats. Ils ont abordé les principales questions qui tiennent presque toujours compte des conditions limites de la dynamique de l'utilisation des terres ainsi que de l'échelle spatiale et temporelle des processus hydrologiques et météorologiques impliqués :

- Quels types de changements d'utilisation des terres ont été signalés dans le passé ? Quels types de changements d'utilisation des sols peuvent être projetés dans le futur ? Et quelles seront les distributions spatiales probables de ces changements dans le paysage ?
- Quels sont les mécanismes de génération du ruissellement (c'est-à-dire l'excès d'infiltration, l'écoulement de surface, l'excès de saturation, l'écoulement pluvial souterrain et l'écoulement rapide des eaux souterraines) qui seront potentiellement affectés par les changements d'utilisation et de couverture des sols ? Et comment peuvent-ils être représentés par un modèle hydrologique ?
- Comment les impacts des changements d'utilisation et de couverture des sols sur la génération de ruissellement pluvial sont-ils liés aux caractéristiques des événements pluvieux et aux tendances temporelles ? Et quelle est l'importance relative des caractéristiques du bassin versant et de son échelle spatiale ?

Pour répondre à ces questions critiques, d'une part, et pour satisfaire les objectifs de l'étude, d'autre part, Niehoff et al. (2002) ont sélectionné trois bassins versants différents dans le bassin du Rhin, dont la superficie varie de 100 à 500 km², de sorte que chaque bassin versant représente un modèle d'utilisation des sols caractéristique différent, principalement urbain, agricole ou forestier. Leurs résultats démontrent que l'influence des conditions d'utilisation des sols sur la génération du ruissellement pluvial dépend dans une large mesure des caractéristiques des événements pluvieux qui les accompagnent et de l'échelle spatiale correspondante. En d'autres termes, l'influence n'est pertinente que pour les événements pluvieux convectifs avec de fortes intensités de précipitations, contrairement aux événements pluvieux adjectifs de longue durée avec de faibles intensités de précipitations. Pourtant, les événements convectifs et par conséquent l'utilisation des terres sont d'une importance très mineure pour la formation des inondations dans les grands bassins fluviaux, car ce type d'événements pluvieux est normalement limité à des incidents à petite échelle.

Selon les travaux de (Jodar-Abellan et al., 2019; Hundecha and Bárdossy, 2004), ou plusieurs scénarios d'occupation des sols ont été testés afin de détecter l'effet des changements d'occupation des terres sur la production de ruissellement d'un bassin versant, ils ont conclu qu'une urbanisation accrue augmente les pics de ruissellement surtout pour les pluies d'orages en été, tandis que l'augmentation de ses pics en réponse aux précipitations hivernales est très limitée, aussi les résultats de cette étude montrent qu'un reboisement intensifié du bassin versant induit une réduction considérable du pic de et des volumes totaux de ruissellement. Lørup et al. (1998) ont étudié les impacts à long terme du changement d'utilisation des terres sur le ruissellement des bassins versants semi-aride dans le Zimbabwe, en se basant sur des analyses de longues séries hydrologiques (25-50

ans) provenant de six bassins versants ruraux non expérimentaux de taille moyenne (200-1000 km²). Une méthodologie combinant des méthodes statistiques communes et la modélisation hydrologique a été adoptée afin de distinguer les effets de la variabilité climatique de ceux du changement d'utilisation des terres. Le modèle hydrologique NAM a été en général capable de simuler de façon fiable les hydrogrammes observés pendant la période de référence, fournissant ainsi un moyen de prendre en compte les effets de la variabilité climatique et donc de renforcer la puissance des tests statistiques ultérieurs. Au cours de la période de test, le modèle validé a été utilisé pour fournir l'enregistrement du ruissellement qui aurait eu lieu en absence de changement d'utilisation des terres. Les analyses ont indiqué une diminution du ruissellement annuel pour la plupart des six bassins versants, les changements les plus importants se produisant pour les bassins versants situés dans les terres communales ou de fortes augmentations de la population et de l'intensité agricole ont eu lieu. Cependant, la diminution n'était que statistiquement significative au niveau de 5% pour aucun bassin versant.

D'autres part et selon De Roo et al. (2001) qui ont étudié les causes des inondations et l'influence de l'utilisation des terres, des caractéristiques du sol et des conditions antérieures d'humidité du bassin versant sur celles-ci en utilisant le modèle de bassin versant distribué LISFLOOD. Ce dernier est utilisé pour simuler les effets de ces changements d'occupation des sols sur les inondations. Il modélise le ruissellement dans de grands bassins fluviaux. Deux bassins fluviaux européens transnationaux ont été utilisés pour tester et valider le modèle : le bassin de la Meuse (France, Belgique, Allemagne et Pays-Bas) et le bassin de l'Oder (République Tchèque, Pologne et Allemagne). Dans les deux bassins versants, les informations sur les changements d'utilisation des terres au cours des dernières années ont été recueillies. 200 ans ont été traités au moment du test du modèle.

Jodar-Abellan et al. (2019) ont étudié l'évolution temporelle de la réponse hydrologique dans cinq bassins versants méditerranéens (Sud-Est de l'Espagne) sujets à des crues éclair qui occasionnent de graves catastrophes naturelles, et qui présente beaucoup de similitudes avec le Nord-ouest algérien. Ils ont utilisé le modèle SWAT à l'échelle journalière combinée à plusieurs scénarios d'occupations des sols, leurs résultats ont montré que les risques de crues soudaines ont augmenté dans les bassins versants étudiés en raison des changements d'utilisation des sols, particulièrement affectés par une forte croissance urbaine.

La couverture végétale et ses changements affectent aussi la qualité des cours d'eau. Les couvertures forestières, par exemple, absorbent plus de précipitations et tirent des quantités

importantes d'eau du sol. Inversement, le sol cultivé reçoit plus d'eau pour le même événement pluvieux, ce qui entraîne des quantités plus importantes de ruissellement ou d'infiltration (Vörösmarty and Moore, 1991 ; Musy and Higy, 2004 ; Zhang and Schilling, 2006 ; Brulebois, 2016). La diminution de la couverture végétale, suite à la conversion des forêts en terres arables par exemple, peut entraîner l'érosion, l'appauvrissement des sols, le transfert de sédiments et l'émergence d'une croûte de trempe qui facilite le ruissellement, et par conséquent elle va impacter les réponses hydrologiques (Vörösmarty and Moore, 1991).

La déforestation provoque systématiquement une augmentation du débit (la végétation arborée est l'un des types de végétation les plus consommateurs d'eau), mais de nombreux autres paramètres doivent être pris en compte. Dans sa revue bibliographique, Andréassian (2004) souligne ainsi les effets encore mal connus de la repousse, de la densification et du vieillissement des forêts sur la réponse hydrologique face à un changement d'occupation du sol. Il note également le rôle des caractéristiques climatiques, physiologiques (essences végétales présentes) ou du type de sol, dont les caractéristiques physiques (infiltrabilité, capacité de rétention) régulent les écoulements (Musy and Higy, 2004). Les changements d'occupation du sol touchent aussi la qualité des eaux superficielles (Brulebois, 2016 ; Linglois-Dussert, 2003; Grieve and Marsden, 2001; Pekárová and Pekár, 1996 ; Vörösmarty and Moore, 1991). Linglois-Dussert (2003), parmi d'autres, met en évidence l'influence de l'occupation du sol et de la densité de population sur les flux de nutriments et de sédiments qui augmentent lorsque les surfaces cultivées s'accroissent, confirmant les résultats de Pekárová and Pekár (1996). La quantité et la qualité de la matière organique dissoute (MOD) présente dans le cours d'eau influent sur sa transparence et sa filtration des UV ou la mobilité d'éléments traces. Chantigny (2003) et Amiotte-Suchet et al. (2007) corrélient la qualité et la transmission de la MOM aux cours d'eau avec une variété de facteurs, y compris la couverture végétale.

1.3.1. Effets des changements d'utilisation des terres sur l'évapotranspiration

Les effets hydrologiques des changements d'utilisation des terres ont été décrits en détail par (Calder, 1992 ; Hosseini, 2010). Les principaux changements d'utilisation des sols qui affectent l'hydrologie des bassins versants sont le boisement, l'intensification de l'agriculture, le drainage des zones humides, la construction de routes et l'urbanisation. Cependant, l'effet le plus prononcé que les changements d'utilisation des sols exercent sur le bilan hydrique du bassin versant est leur effet sur le processus d'évapotranspiration (Calder, 1992 ; Hosseini, 2010). De plus, les différentes couvertures terrestres ont des taux d'évapotranspiration différents. Ceci est attribué au fait que les

différentes cultures ont des couvertures végétales, des indices de surface foliaire, des profondeurs de racines et des albédos différents.

En Indonésie, Olchev et al. (2008) ont montré l'impact de la déforestation et des changements d'utilisation des terres sur l'évapotranspiration de la zone de forêt tropicale humide montagneuse. Ils ont quantifié ces composantes en utilisant un modèle SVAT régional basé sur le processus "SVAT-Regio". Les résultats indiquent qu'un scénario de déforestation, tenant compte des impacts principalement anthropiques, qui a été appliqué, suppose une diminution de 15% relativement forte des zones couvertes par les forêts tropicales humides et une augmentation des zones agricoles (plantations de café, maïs et rizières) et urbaines. En outre, le scénario suppose une légère augmentation des zones de prairies. Les résultats des expériences de modélisation montrent que la déforestation de 15% de la zone d'étude entraîne une diminution relativement faible de l'évapotranspiration mensuelle d'environ 2%, une transpiration d'environ 6% et une évaporation par interception d'environ 5%, ainsi qu'une augmentation de l'évaporation du sol d'environ 21%. La diminution de l'évapotranspiration a été la plus forte les jours où le temps était nuageux et pluvieux, et la plus faible les jours ensoleillés et secs.

Tout aussi important, les taux d'interception respectifs pendant les tempêtes diffèrent d'un type de couverture terrestre à l'autre. Même s'il est bien établi que les pertes par interception représentent un ajout net significatif aux pertes par évaporation des bassins versants (Ward and Robinson, 1990), les effets rapportés de l'interception n'affectent que les taux de ruissellement de surface et ne sont perceptibles que lors de petites tempêtes ; ils sont d'une importance mineure lors des plus grandes tempêtes et inondations (Calder, 1993). Les utilisations du sol affectent également les processus d'infiltration et de redistribution de l'eau du sol, puisque la conductivité hydraulique saturée est particulièrement influencée par les racines des plantes et les pores résultant de la faune du sol (Ragab and Cooper, 1993).

L'influence des zones bâties et des routes sur l'écoulement de surface est un exemple modèle de ces effets des types de couverture du sol sur les processus d'infiltration et de redistribution de l'eau dans le sol. Enfin, l'utilisation des sols influence la rugosité de la surface qui, à son tour, contrôle la vitesse de l'écoulement de surface et les débits des plaines d'inondation.

Certaines influences de l'utilisation des terres et de la végétation sur le bilan hydrique sont claires, comme celles du changement de la couverture végétale (indice de surface foliaire) qui impactera l'évapotranspiration. Cependant, les influences de la végétation sur les propriétés du sol sont mal

connues, ce qui influence l'infiltration et la redistribution de l'eau du sol par l'écoulement et la recharge des eaux souterraines.

Bien que l'effet précis de la déforestation sur le bilan hydrique des bassins versants ne soit toujours pas clair (Brulebois, 2016), il ne semble pas faire de doute que l'utilisation des sols influence les processus hydrologiques.

1.3.2. Effet du changement d'occupation des sols sur le rendement sédimentaire

Lawal et al. (2004) ont évalué les impacts du changement d'utilisation des terres sur le rendement sédimentaire dans le bassin versant de la rivière Zagbo au sud du Bénin. La surface cultivée au Bénin est passée de 1 080 000 ha en 1962 à 1 717 000 ha en 1994, soit une augmentation relative de 59 % (FAO, 1997). En raison de la croissance démographique et des migrations, les terres sont devenues rares et, par conséquent, l'intensité des cultures a augmenté et la période de jachère s'est raccourcie. Cette situation a transformé les modes agricoles de culture semi-permanente à des modes de culture continue, rendant ainsi impraticables les méthodes traditionnelles de restauration de la fertilité des sols par la jachère. Au final, cela a entraîné une réduction de la productivité agricole. Le défi était de mettre un terme à la tendance négative de la productivité agricole due à la perte et à la dégradation des sols, et d'inverser la détérioration de la base productive (le sol). L'outil d'évaluation (SWAT) a été utilisé pour prédire l'effet de différents scénarios de gestion des terres sur le rendement sédimentaire dans cette zone. Le résultat de la modélisation du modèle SWAT dans cette étude a illustré la sensibilité des sous-bassins pour produire le rendement sédimentaire (huit sous-bassins extrait d'une carte topographique).

Aussi, les épisodes de fortes précipitations aboutiront à une érosion accrue des sols, et également à un lessivage accru des nutriments et de la matière organique contenus dans les sols (accentuant ainsi les concentrations en nutriments et en MOD déjà augmentées). De plus, ces épisodes intenses provoqueront de forts débits qui pourront par exemple remuer les sédiments d'un cours d'eau et libérer des nutriments permettant le développement de certaines espèces toxiques (Brulebois, 2016; Bates et al., 2008).

1.3.3. Examen des modèles hydrologiques liés aux Changement l'utilisation des terres et à la couverture terrestre (LUCC)

De nombreux modèles hydrologiques existent pour l'évaluation des changements d'utilisation des sols dans les bassins versants, en tenant particulièrement compte de l'environnement cible et de

l'objectif final du modèle. En conséquence, ces modèles ont des capacités, des caractéristiques et des types de résultats différents, y compris le potentiel de résolution dans le temps, c'est-à-dire au pas de temps journalier, mensuel ou annuel, et dans l'espace. Certains des modèles les plus utilisés sont sélectionnés et décrits (Tableau 1.1).

Tableau 1.1. Caractéristiques principales des modèles hydrologiques liés à l'utilisation des sols et aux composantes de l'eau (Hosseini, 2010)

No.	Modèle	Définition et Avantages	Données nécessaires	Inconvénients	Résultats et Raisonnement
1	SRM	- Un modèle simple, de type degré-jour qui nécessite des données de télédétection (RS) sous la forme de l'étendue des couvertures neigeuses des bassins ou des zones.	- Précipitations quotidiennes - Température - Couverture neigeuse - Image(s) de télédétection	- Non lié au SIG. - Nécessite des données quotidiennes sur la couverture neigeuse extraites du RS après interprétation. - Ne peut pas prédire la production de sédiments.	- Ne peut pas prédire le rendement - Les images satellites n'ont pas pu fournir de séries temporelles quotidiennes qui couvrent toute la zone
2	SHE/SHESED	- Une combinaison à base physique et des systèmes de modélisation distribués pour une application à l'écoulement de l'eau et au transport des sédiments. - Système de modélisation flexible qui offre l'avantage de résoudre des complexités comme les sous-composantes pour l'écoulement en surface et en canal, l'évapotranspiration, l'interception, l'écoulement dans les zones saturées et non saturées, la fonte	- Données météorologiques - données - Composantes atmosphériques - Impact des gouttes de pluie - matrice de succion du sol - Propriétés du sol - Utilisation du sol - Modèles numériques d'élévation (MNE)	- Certaines sous-composantes nécessitent des paramètres supplémentaires et d'autres informations d'entrée telles que les composantes atmosphériques, le transport sédimentaire des matériaux dans les canaux, l'impact des gouttes de pluie et la succion matricielle du sol. - Correspond à plus d'une routine de simulation.	- Il possède un certain nombre de routines de simulation qui ne sont pas utiles pour cette étude. - Utile pour une courte durée de changements d'utilisation des sols

Les principales références utilisées pour construire ce tableau sont :

SRM: Rango et al. (1990, 1998),

SHE/SHESED: Bathurst et al. (1995), Wicks and Bathurst (1996), and Refsgaard (1997).

3	SHETRAN	<ul style="list-style-type: none"> - tridimensionnelle (3-D), basé sur la physique et distribué dans l'espace afin de prévoir le débit d'eau, le transport de sédiments à fractions multiples et le transport de solutés réactifs dans les bassins fluviaux. - En outre, il est capable d'évaluer l'érosion des sols, la pollution, le changement d'utilisation des terres, le changement climatique, le débit et l'écoulement des rivières, et les plans de gestion des terres. 	<ul style="list-style-type: none"> - Données météorologiques - Statistiques sur l'utilisation des sols - Caractéristiques des sols - DEM 	<ul style="list-style-type: none"> - La nature semi-aride de l'environnement de la zone d'étude ainsi que ses faibles pentes et ses faibles taux de précipitations nécessitent des réglages assez différents pour le modèle à utiliser. - Utile pour les grands bassins (par ex, 50 000 km² de superficie) - Applicable aux évaluations de bassins à long terme (par exemple, 1 000 ans). 	<ul style="list-style-type: none"> - La nature semi-aride de l'environnement de la zone d'étude, ainsi que ses faibles pentes et ses faibles taux de précipitations, exigent des paramètres assez différents pour le modèle à utiliser.
4	TOPMODEL	<ul style="list-style-type: none"> - Basé sur les interactions terre-surface- atmosphère pour simuler l'écoulement souterrain dans de longues séries temporelles. - Capable de produire certains paramètres et indices dans la zone saturée ou dans des conditions de déficit de stockage. conditions de déficit de stockage, zone racinaire, transmissivité saturée et vitesse d'acheminement du canal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les principales données d'entrée comprennent la topographie et les propriétés du sol 	<ul style="list-style-type: none"> - Aucune prédiction sur le transport/rendement des sédiments n'est proposée. - Le niveau de généralisation des processus hydrologiques en surface est très simple alors qu'à l'interface atmosphère-sol, il est très élevé en ce qui concerne l'évaporation de surface. - Les processus de ruissellement et d'érosion ne sont pas inclus en tant que caractéristiques importantes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Peut être utile pour les zones montagneuses. Cependant, il ne peut pas prédire les sédiments.

Les principales références utilisées pour construire ce tableau sont :

SHETRAN(Dunn et al., 1996), (Parkin et al., 1996), and (Lukey et al., 2000).

TOPMODEL: (Beven et al., 1995), (Moore and Thompson, 1996), (Blazkov and Beven, 1997), (Saulnier et al., 1997), (Kim et al., 1999), and (Seibert, 1999).

5	TOPOG	<ul style="list-style-type: none"> - Décrit les attributs topographiques de paysages complexes, paysages tridimensionnels aux caractéristiques de terrain complexes et aux sols et à la végétation hétérogènes. - Prédit la distribution spatiale des indices de saturation en eau, de risque d'érosion et de glissement de terrain en régime permanent. - Simule le comportement hydrologique transitoire des bassins versants et la façon dont il peut être affecté par des changements dans la couverture végétale. - Modélise la croissance de la végétation et ses impacts sur le bilan hydrique. En outre, il modélise le mouvement des solutés à travers le sol et le transport des sédiments sur sa surface. 	<ul style="list-style-type: none"> - Croissance des cultures - Flux de surface - Propriétés du sol 	<ul style="list-style-type: none"> - Une caractéristique importante de TOPOG est que les bons résultats peuvent être obtenus à partir de bassins versants instrumentés à haute résolution spatiale (jusqu'à 25 m) et de petits bassins versants (jusqu'à 50 ha). 	<ul style="list-style-type: none"> - Dans notre zone d'étude, les informations sur la n'est pas disponible. - Il semble que ce modèle puisse être évalué dans la zone d'étude puisqu'il peut prédire le débit, le rendement sédimentaire et le bilan hydrique en fonction des changements d'utilisation des terres.
6	THALES	<ul style="list-style-type: none"> - Un modèle hydrologique dynamique basé sur le réseau d'éléments créé par TAPES-C. - Il combine des modèles de surface et de subsurface pour prédire le flux cinématique de surface et le débit des cours d'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> -Subsurface données - Surface de la section transversale du tube - éléments -Formes des canaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Le modèle est basé sur la partition du le bassin versant en tubes de courant, commençant à la courbe de niveau de l'élévation la plus basse et se terminant à la courbe de niveau la plus haute. -L'interception et l'évaporation sont traitées séparément, et ne sont et ne sont incorporées que 	<ul style="list-style-type: none"> - Ce modèle nécessite des données de sub-surface, la section transversale des éléments du tube, et les formes des canaux comme informations d'entrée. Et ce type de données n'est pas disponible pour la région de l'ouest algérien.

Les principales références utilisées pour construire ce tableau sont :

TOPOG: (Hatton and Dawes, 1993), (Vertessy et al., 1993), (Vertessy et al., 1994), (Grayson et al., 1995), and (Short et al., 1995). THALES:(Grayson et al., 1995).

7	KINEROS	<ul style="list-style-type: none"> - Basé sur le modèle cinématique de ruissellement et d'érosion (KINEROS) pour la prédiction du ruissellement de surface, de l'écoulement de surface, de l'afflux latéral, de l'érosion et du transport des sédiments. 	<ul style="list-style-type: none"> - Relations de rugosité - Transport de sédiments - Routines des canaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Ce modèle s'applique bien aux petits bassins versants dont la superficie est inférieure à 700 ha. - Il s'adapte avec succès aux environnements semi-arides dont la taille des bassins versants est comprise entre 3 et 700 ha. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ce modèle a été essentiellement développé pour de petits bassins versants alors que la zone d'étude est relativement grande (800 km²).
8	CREAMS	<ul style="list-style-type: none"> - Une collection de composants hydrologiques pour modèles de qualité de l'eau. - Développé pour évaluer les charges polluantes de source non ponctuelle en bordure de champ pour des modèles alternatifs de qualité de l'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Données sur la qualité de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Le modèle a été conçu pour simuler des périodes à long terme 	<ul style="list-style-type: none"> - Ce modèle, qui a été développé à l'origine pour l'évaluation des polluants, ne peut être appliqué à la zone d'étude qui ne dispose pas de suffisamment de données sur la qualité de l'eau pour permettre ce type de modélisation.
9	HYRROM	<ul style="list-style-type: none"> - Basé sur une représentation simple des processus physiques qui régissent l'écoulement de l'eau dans les bassins versants. - En cas de données manquantes, ce modèle peut générer des enregistrements de débit. - Ce modèle inclut une certaine représentation des pertes dues à l'évapotranspiration. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les données les plus importantes pour une application réussie de ce modèle sont les réserves de sol, d'eau souterraine et de ruissellement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Peut prévoir le débit à partir des données de pluie et d'évaporation pour un bassin versant - Le modèle n'est pas spatialement distribué 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne peut pas prédire le rendement sédimentaire - Non distribué dans l'espace

Les principales références utilisées pour construire ce tableau sont : KINEROS:(Goodrich, 1990),(J. D. Michaud, 1992), (Duru and Hjelmfelt Jr, 1994), and Smith et al. (1995). CREAMS: (Knisel and Williams, 1995).

HYRROM: Scientific Software Group website (<http://www.scisoftware.com>)

10	WATFLOOD	<ul style="list-style-type: none"> - Un modèle hydrologique distribué - Un ensemble intégré de programmes informatiques capables de prévoir les débits de crues pour des bassins versants ayant des temps de réponse allant d'une heure à plusieurs semaines. - Ce modèle met l'accent sur l'utilisation optimale des données de télédétection. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite des entrées directes de données pluviométriques RS et Radar - Données RS, données pluviométriques Radar, avec incorporation des données de couverture du sol directement dans le système hydrologique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne peut pas prédire rendement sédimentaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Faiblesse sur le rendement sédimentaire en ce sens que le modèle n'est pas capable de calibrer le rendement sédimentaire - Aucune donnée Radar automatisée n'est disponible pour la zone d'étude.
11	HEC-1 (HEC-HMS)	<ul style="list-style-type: none"> - Le modèle à paramètres forfaitaires le plus couramment utilisé le plus couramment utilisé parmi ceux déjà disponibles. - Conçu pour simuler le ruissellement de surface à partir d'un événement de précipitation unique. - Un modèle à paramètres forfaitaires pour un seul événement pluvieux.mais comprend plusieurs options différentes pour la modélisation, les pertes, les hydrogrammes unitaires et le routage des cours d'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les données d'entrée dues englobent le sous-bassin, le tronçon, la jonction, le réservoir, dérivation, source et puits 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne prédit pas rendement sédimentaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne prédit pas le rendement des sédiments de sédiments - Se concentre sur le débit des rivières. Cependant, le rendement sédimentaire et les changements d'utilisation des terres sont importants dans cette étude.

12	HEC-RAS	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle hydraulique unidimensionnel (1-D) qui calcule les profils de la surface de l'eau pour un écoulement en régime permanent ou à variation progressive. - Composé de trois composantes d'analyse hydraulique unidimensionnelles. - Les conditions d'écoulement permanent et non permanent sont incluses. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiert des informations sur les sous-bassins, les tronçons, jonction, réservoir, détournement, source et puits. 	<ul style="list-style-type: none"> - Unidimensionnel - Spécialement pour la prédiction des inondations dans les rivières - Logiciel en cours de développement pour permettre l'inclusion de calculs/modélisation du transport des sédiments. 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible en termes de rendement sédimentaire. - L'accent est mis sur le débit des rivières, alors que le rendement sédimentaire et les changements d'utilisation des terres, qui sont des considérations importantes pour la zone d'étude, ne sont pas abordés.
----	---------	---	---	---	--

La principale référence utilisée :

WATFLOOD: watflood web site (<http://www.watflood.ca/>)

13	GSSHA	<ul style="list-style-type: none"> - Capable de calculer explicitement les débits, les profondeurs des cours d'eau et les teneurs en humidité du sol dans une variété de régimes et de conditions hydrologiques. - Prise en compte des effets de sub-surface sur le débit des cours d'eau. - Un algorithme numérique puissant qui conserve la masse et les sorties graphiques. - Fondamentalement différent du modèle CASC2D car il étend l'applicabilité du modèle aux bassins non hortonien. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le sol - Utilisation du sol - Conditions initiales d'humidité - Couverture de neige 	<ul style="list-style-type: none"> - Il faut une humidité initiale et des données sur la neige 	<ul style="list-style-type: none"> - Les conditions initiales d'humidité ne sont pas disponibles pour la zone d'étude.
14	HYSIM	<ul style="list-style-type: none"> - Un modèle de simulation hydrologique permettant de simuler le cycle hydrologique (ruissellement de surface, percolation vers les eaux souterraines et écoulement fluvial) en continu. 	<ul style="list-style-type: none"> - Précipitations, évapotranspiration potentielle (PET), fonte des neiges potentielle, déversements et prélèvements dans le système fluvial, prélèvements et augmentation des eaux souterraines. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les précipitations et la TEP sont essentielles - Ne permet pas de prévoir le rendement sédimentaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Faiblesse du rendement sédimentaire, car le modèle ne calibre pas le rendement sédimentaire.

Les principaux references utilisés:
 GSSHA: (Moria, 2007). (Hosseini, 2010)

15	SWAT	<ul style="list-style-type: none"> - Le modèle SWAT est une modification des modèles SWRRB et ROTO pour une application à des bassins ruraux vastes et complexes. - Il est basé sur la physique et distribué dans l'espace pour prédire l'écoulement de l'eau, le rendement sédimentaire. - Il s'agit d'une version distribuée du modèle CREAMS fonctionnant simultanément dans plusieurs centaines de sous-bassins. - Constitue la base des concepts empiriques développés pour les environnements américains, comme le nombre de courbes SCS pour le calcul du débit de surface et du volume de ruissellement, ou l'équation universelle modifiée de perte de sol (MUSLE), entre autres. 	<ul style="list-style-type: none"> - Données météorologiques - Propriétés des sols et thème d'utilisation des terres et leurs attributs - Modèle numérique d'élévation (MNE) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne fournit pas de sorties graphiques - Nécessite des données quotidiennes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ce modèle est capable d'évaluer la pollution, l'utilisation des terres, le changement climatique, ainsi que le débit, l'écoulement intermédiaire et la gestion des terres - Ce modèle peut être utile pour évaluer le débit, les sédiments et le bilan hydrique dans la zone d'étude.
----	------	--	---	---	--

Main sources for tabulated information are:
 SWAT: Soil and Water Assessment Tools site (<http://swatmodel.tamu.edu/>)

1.4. Analyse des estimations du bilan hydrologique

La modélisation des principales composantes du bilan hydrologique est importante pour déterminer les impacts sur l'approvisionnement en eau et la qualité de l'eau des projets de gestion des terres planifiées ou proposées, des changements de végétation, des prélèvements d'eau souterraine et des pratiques et plans de gestion des réservoirs. Puisque l'obtention de données de terrain prend du temps et est assez coûteuse, une variété de modèles et d'approches de modélisation, par exemple SWAT et TOPOG, a été établie pour examiner et quantifier les effets d'une multitude de changements et de pratiques d'utilisation des terres sur les bilans hydrologiques des bassins versants et éventuellement fournir des prévisions quant à ces effets dans le futur.

Une modélisation réaliste des projets et des plans de gestion des terres exige des modèles permettant de simuler les composantes individuelles du bilan hydrologique (Arnold and Allen, 1996). Pourtant, la majorité des études de terrain respectives suivant l'approche du bassin versant entier sont caractérisées par une tendance à n'évaluer qu'une seule composante, par exemple le débit total ou l'évapotranspiration (ET), du régime hydrologique (Arnold and Allen, 1996). Par conséquent, de telles études ne sont pas appropriées pour valider les composantes individuelles, et encore moins toutes les composantes, d'un ou de plusieurs modèles complets. Par exemple, pour les sols tropicaux, certaines études ont rapporté des changements de la densité apparente dus aux changements d'utilisation des terres (Neill et al., 1997).

Arnold and Williams (1995) ont étudié un modèle de bilan hydrique multi composant (SWAT) pour trois bassins versants dans le centre de l'Illinois. Le modèle a démontré sa capacité à simuler toutes les composantes du budget dans des délais acceptables à des pas de temps annuels et mensuels. La comparaison des résultats modélisés avec les bilans hydriques mesurés a permis de comparer la précision des différentes composantes du modèle.

Dans le cas particulier, il a démontré que chaque composant du modèle avait donné des résultats raisonnables. Ce fait devrait permettre une évaluation plus réaliste des diverses pratiques de gestion de l'utilisation des terres à l'échelle du bassin. Il devrait également permettre de mieux déterminer exactement comment chaque alternative affectera le bilan hydrique, permettant ainsi de tester a priori des pratiques de gestion plus innovantes et de suivre leurs effets à travers chaque composante hydrologique du bassin versant.

Dans sa dernière étude relative aux effets du changement d'occupation des sols sur le bilan hydrique des bassins versants, Bormann et al., (2007) ont présenté les résultats d'une comparaison de modèles

dans le cadre de LUCHEM (Assessing the impact of Land Use Change on Hydrology by Ensemble Modeling') où les effets du changement d'occupation des sols sur le bilan hydrique des bassins versants ont été évalués avec différents modèles hydrologiques de bassins versants. Cette partie du projet LUCHEM a été motivée par le fait que les changements d'utilisation des terres peuvent induire des modifications des propriétés chimiques et physiques du sol (par exemple, la densité apparente). Malheureusement, les effets des changements d'utilisation des terres sur les propriétés hydrauliques du sol sont rarement étudiés directement. Cependant, étant donné que certaines informations sur les changements de la densité apparente du sol concomitants aux changements d'utilisation des terres sont le plus souvent disponibles, les changements de la densité apparente peuvent être utilisés comme entrée pour les fonctions de pédo-transfert afin de dériver les changements des paramètres du modèle hydraulique du sol. Dans cette étude, Bormann et al. (2007) ont comparé trois modèles de captage différents (SWAT, TOPLATS, et WASIM) en ce qui concerne leur sensibilité aux changements d'utilisation des terres avec et sans considération des changements associés dans la paramétrisation du sol. Les résultats ont révélé que les différents modèles avaient montré des sensibilités différentes au changement de paramétrage du sol alors que l'ampleur des changements dans l'évapotranspiration et le débit simulés était similaire. SWAT a calculé les plus grands changements dans le bilan hydrique d'un bassin versant à méso-échelle en Allemagne.

Le modèle TOPLATS a également montré des changements significatifs dans les bilans hydriques calculés des bassins versants ainsi que dans la génération de ruissellement, tandis que WASIM a répondu de manière moins sensible aux bilans hydriques. Alors que les modèles TOPLATS et WASIM ont montré des modèles similaires en ce qui concerne les changements dans les flux d'eau pour tous les sous-bassins versants et les scénarios d'utilisation des terres, les résultats de SWAT étaient similaires pour les différents bassins versants, mais ont montré des modèles spécifiques aux scénarios. En ce qui concerne l'ampleur des effets sur les flux d'eau simulés induits par le changement d'utilisation des terres, l'importance de la prise en compte des effets du changement de sol dépend de la définition du scénario particulier et de la sensibilité du modèle au paramétrage du sol. Pour deux des trois scénarios d'utilisation des terres représentant une intensification de l'utilisation des terres, SWAT et TOPLATS ont simulé des changements du bilan hydrique du même ordre de grandeur dus à la fois à l'utilisation des terres et aux changements des propriétés du sol. Par conséquent, il est recommandé de prendre en compte les changements des propriétés du sol dans le cadre de l'analyse des scénarios de changement d'utilisation des terres.

1.5. Choix du modèle

Un modèle hydrologique doit être capable de modéliser les principales composantes du cycle hydrologique qui influencent le rendement et la qualité de l'eau s'il doit être utilisé pour réaliser une évaluation de l'impact du changement d'occupation des terres (Watson, 2006). Comme mentionné précédemment, il existe de nombreux modèles capables de simuler le cycle hydrologique, mais aucun d'entre eux n'est capable d'évaluer les effets des utilisations des terres sur le bilan hydrique et le rendement sédimentaire. Certains modèles hydrologiques ont été appliqués en Algérie, tels que GR1A, GR2M, HEC-HMS, SHE, WEAP, MIKE et SWAT, pour étudier les effets interactifs de plusieurs composants des systèmes hydrologiques multi-composants simultanément, tels que le changement d'utilisation des terres, les propriétés du sol et le modèle numérique d'élévation (DEM), les changements climatiques sur le bilan hydrique et la qualité de l'eau. Ces modèles mentionnés ci-dessus ont été appliqués avec succès pour satisfaire les objectifs de leurs recherches.

Pour identifier les modèles capables de satisfaire les objectifs de notre recherche, de nombreuses investigations ont été faites. Une étude complète de la littérature a été entreprise pour adopter les modèles qui ont la capacité de prédire les impacts à long terme des changements d'utilisation des terres sur le rendement et la qualité de l'eau, en particulier le rendement des sédiments en suspension. Le choix d'un modèle peut être une tâche difficile étant donné que de nombreux modèles sont disponibles pour effectuer la même tâche. Cependant, nous avons réalisé que certains modèles ont des qualités plus favorables que d'autres. Le modèle de bilan hydrique simulant les variables hydrologiques pour le changement d'occupation des terres et la planification des ressources en eau sert à l'exploitation des modèles de changement d'occupation des terres. Étant donné que l'un des éléments essentiels de cette étude est une enquête sur les changements d'utilisation des terres sur trois ans, de 1987 à 2002, nous avons décidé d'utiliser le modèle de bilan hydrique.

L'outil Soil and Water Assessment Tool (SWAT) a été mis au point par l'Agence Américaine pour l'agriculture USDA (Arnold et al., 1998a) a été adopté dans cette étude pour l'analyse hydrologique des simulations pour différentes utilisations du sol et dans des sols aux propriétés variées pour la période 1998-2005. Et 1995 à 2005 selon la disponibilité des données.

Les principales considérations qui nous ont motivés pour l'utilisation de SWAT dans cette recherche sont les suivantes :

- SWAT possède des interfaces conviviales et est compatibles avec les logiciels Arc GIS et QGIS auxquels il peut être ajouté en tant qu'extension. Ainsi, toutes les couches vectorielles et matricielles telles que l'occupation du sol, le type de sols et le MNE seront jointes avec leurs propriétés et les données hydro-climatologiques également.
- SWAT est capable de simuler un large éventail de scénarios de gestion et de changement d'utilisation des terres, y compris le boisement, la déforestation, l'urbanisation, l'opération de gestion des bassins versants, la gestion des terres et la conversion des pâturages en terres cultivées, et vice versa.
- SWAT simule le rendement en eau, y compris le ruissellement de surface, le ruissellement souterrain et l'écoulement des eaux souterraines, l'évaporation réelle et potentielle, l'évapotranspiration et la teneur en eau du sol.

Les groupes d'entre-aide SWAT existent de telle sorte que les membres du groupe, partout dans le monde, puissent partager leurs connaissances et contribuer, par le biais d'une approche d'assistance à distance en ligne, à la résolution des problèmes de tout membre du groupe liés à l'utilisation du SWAT.

Des documents de référence sur la théorie et l'application de SWAT sont disponibles. Un manuel d'utilisation est fourni pour que les utilisateurs puissent comprendre le modèle et l'installer sur ArcGIS et QGIS comme une extension.

SWAT peut simuler le rendement de l'eau, les sédiments, les nutriments et les pesticides. En outre, il modélise d'autres paramètres de qualité de l'eau tels que les algues, l'oxygène dissous et la demande biologique en oxygène carboné.

Le soutien aux développeurs du modèle est disponible et assuré par une équipe d'experts qui sont prêts à répondre aux questions en temps voulu. Un site web a également été développé spécifiquement pour le modèle.

Le modèle SWAT a été appliqué à un large éventail de bassins versants dans la majorité des pays du monde à ce jour et a été appliqué à certains bassins versants en Algérie, il est utilisé par un certain nombre d'autorités de gestion des bassins versants dans le monde pour gérer les ressources en terre et en eau à l'échelle du bassin versant. Il s'agit d'un modèle très réputé qui a été largement accepté comme outil d'aide à la prise de décision.

1.5.1. Description du modèle SWAT

Le Soil and Water Assessment Tool (SWAT) est un modèle conceptuel semi- distribué qui fonctionne en continu sur un pas de temps quotidien (Arnold et al., 1998b). Il s'agit d'un outil complet qui permet de prévoir, sur de longues périodes, l'impact des pratiques de gestion des terres sur l'eau, les sédiments et les produits chimiques agricoles pour de grands bassins versants complexes dont les sols, l'utilisation des terres et les pratiques de gestion varient (Neitsch et al., 2001). SWAT a été développé pour simuler les principaux processus du cycle hydrologique et leurs interactions de manière aussi simple et réaliste que possible, et pour utiliser des données d'entrée facilement disponibles pour les bassins versants à grande échelle, afin de pouvoir être utilisé dans la planification de routine et la prise de décision (Ogden et al., 2001). L'un des principaux avantages de SWAT est qu'il est efficace sur le plan informatique, même pour les plus grands bassins versants, ce qui le rend utile pour les gestionnaires des terres et des ressources en eau. Le modèle a été conçu pour la prédiction des rendements à long terme plutôt que pour des événements de crue uniques (Arnold et al., 1998b).

1.5.2. SWAT-CUP

SWAT Calibration Uncertainties Programs (SWAT-CUP) est un programme destiné à calibrer et à valider le modèle SWAT. Abbaspour et al. (2007) ont développé un ensemble de quatre programmes de calibration différents : Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2), Parameter Solution (ParaSol), Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) et Markov Chain Monte Carlo (MCMC) qui peuvent être liés à SWAT.

Ces programmes d'interface ont été remplacés par le même SWAT_Edit.exe qui fonctionne de la même manière avec les quatre algorithmes. Dans notre étude, l'algorithme SUFI2 a été utilisé, puis une gamme de paramètres optimisés détectés à partir des paramètres appropriés a été appliquée par SWAT pour optimiser les valeurs exactes des paramètres et enfin exécuter le modèle pour obtenir le bilan hydrique de la zone d'étude.

SUFI-2 a une plus grande popularité parmi les utilisateurs pour effectuer paramétrisation, l'analyse de sensibilité, l'étalonnage, la validation et l'analyse d'incertitude des paramètres hydrologiques paramètres hydrologiques (Mikayilov et al., 2007), ceci est dû à l'existence de nombreux paramètres concernant la modélisation du bilan hydrique, le processus de calibration plus facile à réaliser dans des limites de temps réalisables, une meilleure prise en compte des d'incertitudes, et le plus petit

nombre de cycles de calcul pour obtenir de bonnes bandes d'incertitude de prédiction et de bonnes performances du modèle (Nguyen Khoi and Thom, 2015).

1.5.3. Complexité du modèle

L'une des difficultés de l'utilisation des modèles hydrologiques est la question de la complexité du modèle et de la façon dont elle affecte la généralisable des résultats du modèle. Beven, (1989) a soutenu que trois à cinq paramètres devraient être suffisants pour reproduire la plupart des informations d'un évènement hydrologique. Jakeman and Hornberger (1993) ont évalué les relations pluie-débit dans quatre pays : Australie, Écosse, États-Unis et Chine, ils ont montré que l'utilisation de seulement quatre paramètres est suffisante pour reproduire la plupart des informations d'un évènement hydrologique. Ye et al., (1997) ont montré qu'un modèle avec six paramètres était suffisant pour prédire le ruissellement dans trois bassins versants en Australie. Par conséquent, pour prédire uniquement le ruissellement d'un bassin versant à l'aide d'un modèle simple, Ye et al., (1997) ont affirmé que le plus petit nombre de paramètres est suffisant. Cependant, lorsque les besoins de modélisation vont au-delà de la prédiction du ruissellement à partir de bassins versants jaugés, comme pour la prédiction du ruissellement à partir de bassins versants non jaugés, les simulations de la qualité de l'eau, et la prédiction des effets des changements d'utilisation des terres sur la qualité de l'eau, alors des modèles plus complexes doivent être utilisés (Refsgaard, 1997). Le (CRCCH, 2005) a déclaré qu'un modèle doit avoir des paramètres qui peuvent être modifiés pour refléter les activités de gestion si les effets du changement d'utilisation des terres doivent être évalués.

De nombreux modèles hydrologiques d'usage courant sont beaucoup plus simples que les modèles de prévision des impacts des changements d'utilisation des terres, essentiellement parce qu'ils manquent de paramètres qui peuvent être ajustés pour montrer les effets de divers types de changements d'utilisation des terres. C'est pourquoi, au cours de la dernière décennie, les modèles simples ont été remplacés par des modèles complexes pour compenser les limites des modèles susmentionnés. Johnston and Pilgrim (1976) ont apporté la preuve que différents sous-ensembles de paramètres hydrologiques pris dans le même ensemble sont capables de produire des prédictions de ruissellement fiables et presque identiques. Ils ont montré que de nombreux ensembles de paramètres optimisés pour un modèle conceptuel produisaient des séries presque égales de prédictions de taux de ruissellement qui concordaient avec celles observées. D'un autre côté, les résultats dérivés de modèles complexes ne sont pas nécessairement meilleurs que ceux tirés de modèles simples. Un certain nombre d'études d'inter comparaison ont démontré que les modèles

simples donnent des résultats similaires, voire meilleurs, que les modèles plus complexes (Refsgaard and Knudsen, 1996).

Bien que des modèles complexes comme TOPMODEL et SHESED, par exemple, présentent un certain nombre d'inconvénients, ils restent une option intéressante pour certaines applications en raison du rôle potentiel qu'ils peuvent jouer en tant qu'outils d'étude de processus hydrologiques spatialement complexes et de leur capacité à utiliser des données hydrologiques de terrain (Van Griensven et al., 2002).

Les modèles complexes offrent en outre l'avantage d'aborder un grand nombre des graves problèmes biophysiques qui menacent la santé et la durabilité des bassins versants dans le monde entier. Ceci a conduit Michaud and Sorooshian (1994) à souligner que « il serait peu clairvoyant d'interrompre les recherches liées aux modèles complexes ». De même, Bergström (1991) a soutenu l'emploi de modèles complexes dans le développement de modèles opérationnels orientés vers les bassins versants.

En résumé, dans le but de prédire les impacts des changements d'occupation des sols, il est généralement considéré comme nécessaire d'utiliser un modèle plus complexe.

1.5.4. Configuration des bassins versants par SWAT

La première étape de la mise en place d'une simulation de bassin versant consiste à partitionner le bassin versant en sous-bassins. SWAT permet de définir plusieurs sous-bassins différents au sein du bassin versant. L'utilisation de sous-bassins dans une simulation est particulièrement bénéfique lorsque différentes parties du bassin versant sont caractérisées par des utilisations des terres et des propriétés du sol suffisamment dissemblables pour affecter l'hydrologie.

1.5.5. Sous- bassins

Le premier niveau de subdivision du bassin est le sous-bassin. Les sous-bassins possèdent des positions géographiques uniques dans le bassin versant et sont spatialement liés les uns aux autres. La délimitation du sous-bassin peut être obtenue à partir des limites du sous-bassin qui sont définies par la topographie de la surface de sorte que toute la zone à l'intérieur d'un sous-bassin s'écoule vers l'exutoire du sous-bassin. Alternativement, la délimitation des sous-bassins peut être obtenue à partir des limites des cellules de la grille puisque la plupart des données spatiales sont basées sur la grille (par exemple, DEM, HWSD et LULC). Les cellules de grille sont une approche attrayante pour la délimitation des sous-bassins. Cependant, contrairement à la discrétisation des sous-bassins,

les cellules de grille ne préservent pas les tronçons d'acheminement et les voies d'écoulement topographiques. Un sous bassin contient au moins une unité de réponse hydrologique (HRU), un canal tributaire et un canal principal ou un tronçon. Deux types de retenues, une retenue et/ou une zone humide, peuvent également être définis dans un sous-bassin comme illustré dans la figure 1.3.

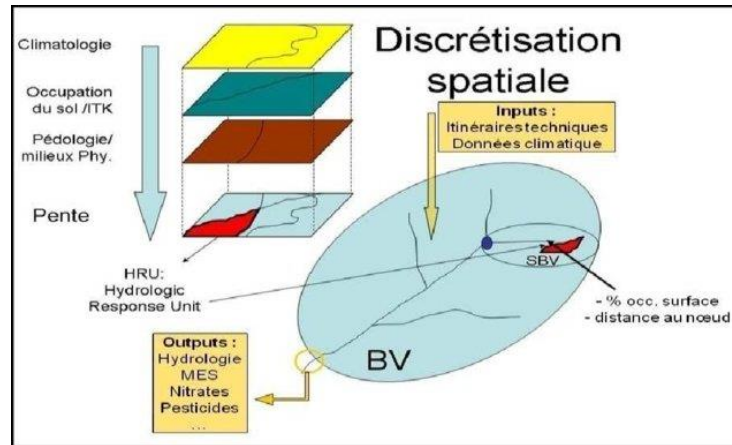


Figure 1.3. Représentation des sous-bassins et des Hydrological Response Units (HRUs) du modèle SWAT (Chea and Sánchez Pérez, 2016).

1.5.6. Unités de réponse hydrologique (HRU)

L'unité de réponse hydrologique (HRU) sont des zones bien définies dans le sous bassin versant qui sont composées de combinaisons uniques de couverture terrestre, de sol et de gestion (NEITSCH, 2005). Bien que des champs individuels avec une utilisation des terres, un sol et une gestion spécifiques puissent être dispersés dans un sous bassin, ces zones sont regroupées pour former une HRU. Les HRU sont utilisées dans la plupart des simulations SWAT car elles simplifient la simulation en regroupant toutes les zones similaires de sol et d'utilisation des terres en une seule unité de réponse. Il n'est souvent pas pratique de simuler des champs individuels. L'UHR suppose qu'il n'y a pas d'interaction entre les HRU d'un même sous bassin. Les variables de charge telles que le ruissellement et les sédiments de chaque HRU sont estimées séparément puis additionnées pour déterminer les charges totales du sous bassin.

L'avantage des HRU est l'augmentation de la précision de la prédiction des variables dans les points de vente. Par exemple, la croissance et le développement des plantes peuvent être très différents selon les espèces. Lorsque la diversité de la couverture végétale dans un sous bassin est prise en compte, la quantité nette de ruissellement entrant dans le canal principal depuis le sous bassin sera beaucoup plus précise (NEITSCH, 2005). Les trois principales couches habituellement nécessaires pour créer des HRU sont les cartes des sols et des pentes. la formation d'unités de réponse

hydrologique (HRUs) se fait par la superposition des couches d'occupation des sols, de types des sols et des classes de pentes comme montrée dans la figure 1.3.

1.5.7. Théorie du modèle

SWAT permet de simuler un certain nombre de processus physiques différents tels que le ruissellement de surface, l'écoulement intermédiaire et l'écoulement des eaux souterraines dans le bassin versant.

Les processus qui se produisent au sein d'un bassin versant passent par deux phases dans SWAT, la première phase consiste à déterminer les charges d'eau, de sédiments, de nutriments et de pesticides qui entrent dans le canal principal de chaque sous-bassin versant, et la deuxième phase concerne le mouvement de l'eau, des sédiments, des nutriments et des pesticides à travers le réseau de canaux jusqu'à la sortie du bassin versant.

A des fins de modélisation, un bassin versant peut être partitionné en un certain nombre de sous-bassins versants ou sous-bassins. Le partitionnement du bassin versant en sous-bassins dans la simulation est particulièrement bénéfique lorsque différentes zones du même bassin versant sont dominées par des utilisations du sol ou des sols dont les propriétés sont suffisamment différentes pour avoir un impact sur l'hydrologie. De plus, cela permet à l'utilisateur de référencer spatialement les différentes zones du bassin versant les unes par rapport aux autres. Le partitionnement du bassin versant en un nombre approprié de subdivisions augmente la précision du modèle dans la mesure où le partitionnement permet au modèle de refléter les différences dans les variables hydrologiques concernées, par exemple, l'évapotranspiration pour diverses cultures et sols, entre les diverses subdivisions du bassin versant qui seraient autrement obscurcies. D'autre part, le ruissellement est prédit séparément pour chaque UHR et acheminé pour obtenir le ruissellement total pour le bassin versant. Cela augmente encore la précision du modèle et donne une bien meilleure description physique du bilan hydrique (Neitsch et al., 2011a).

1.5.8. Variables du modèle

Les processus de la phase terrestre dans SWAT font référence aux précipitations, à la température, au rayonnement solaire, à l'humidité relative et à la vitesse du vent (Van Griensven, 2002). La couverture végétale est importante dans l'interception des pluies. Les précipitations qui atteignent la surface du sol se divisent en ruissellement de surface et en infiltration. Les précipitations infiltrées contribuent à la percolation, à l'écoulement intermédiaire et au retour au sol par capillarité

et par l'action des racines de la végétation, tandis que l'eau résidant dans la zone racinaire recharge les aquifères superficiels et profonds. Outre ces composantes, la phase terrestre du cycle hydrologique traite du transport des sédiments, des nutriments et des pesticides vers le canal principal. La figure 1.4 présente une représentation schématique des principaux processus simulés par SWAT dans la phase terrestre du cycle hydrologique.

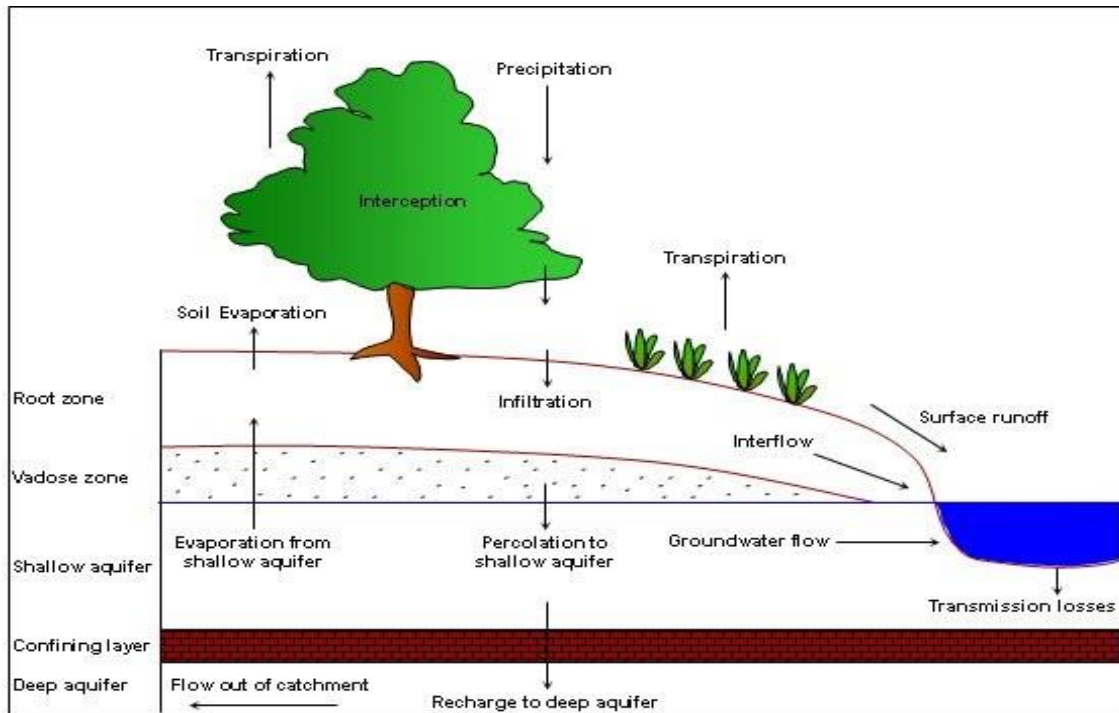


Figure 1.4. Représentation schématique du cycle hydrologique telle que simulée par SWAT (Source : Neitsch et al., 2005)

1.5.9. L'évapotranspiration potentielle (PET)

Parmi les nombreuses méthodes développées pour l'estimation de la PET, trois méthodes ont été intégrées dans SWAT. Il s'agit de l'équation de Penman-Monteith (Monteith, 1965), l'équation de Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972) et l'équation de Hargreaves (Hargreaves and Zohrab, 1985). Différentes données d'entrée sont requises par chacune de ces équations. L'équation de Penman-Monteith utilise la température de l'air, le rayonnement solaire, l'humidité relative et la vitesse du vent pour estimer la PET. L'équation de Priestley-Taylor utilise la température de l'air, le rayonnement solaire et l'humidité relative alors que l'équation de Hargreaves n'utilise que la température de l'air pour cette estimation.

Cette étude a appliqué l'équation de Priestley-Taylor pour calculer le potentiel l'évapotranspiration dans SWAT en suivant l'équation 1.1 :

$$\lambda E_0 = \sigma_{PET} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (H_{Net} - G) \quad (1.1)$$

où est la chaleur latente de vaporisation (MJ/kg), E_0 est l'évapotranspiration potentielle (mm/d), σ_{PET} est un coefficient égal à 1,28, Δ est la pente de la courbe pression de vapeur saturante-température, dP/dT (kPa/C), γ est la constante psychométrique (kPa/C), H_{Net} est le rayonnement net (MJ/m²/d), et G est la densité du flux de chaleur vers le sol (MJ/m²/d).

1.5.10. Évapotranspiration réelle

Une fois que l'évapotranspiration potentielle totale a été déterminée, l'évapotranspiration réelle doit être calculée. Le modèle commence par évaporer toute pluie interceptée par le couvert végétal puis calcule les quantités maximales de transpiration et de sublimation/évaporation du sol en utilisant une approche similaire à celle de Ritchie (1972). On calcule ensuite la quantité réelle de sublimation et d'évaporation du sol. L'évaporation potentielle du sol est estimée en fonction de l'évapotranspiration potentielle et de l'indice de surface foliaire (LAI). L'évaporation réelle du sol est calculée à l'aide de fonctions exponentielles de la profondeur du sol et de la teneur en eau (Arnold et al., 1998b) tandis que la transpiration potentielle est calculée comme une fonction linéaire de l'évapotranspiration potentielle et du LAI. L'absorption d'eau et la transpiration réelles des plantes sont estimées en fonction de la transpiration potentielle et de la disponibilité en eau du sol.

1.5.11. Ruissellement de surface

Le ruissellement de surface, ou écoulement de surface, est un écoulement qui se produit le long d'une surface en pente. En utilisant les quantités de précipitations quotidiennes ou infra-quotidiennes, SWAT simule les volumes de ruissellement de surface et les taux de ruissellement de pointe pour chaque HRU ou sous-bassin. Le ruissellement de surface est calculé à l'aide de l'équation empirique "SCS curve number method" (USDA, 1972), qui est utilisée aux États-Unis depuis plus de 50 ans. Elle est le résultat de plus de 20 ans d'études sur les précipitations et le ruissellement dans de petits bassins versants aux États-Unis (NEITSCH, 2005). SWAT offre en outre la possibilité de calculer le ruissellement de surface en utilisant l'équation d'infiltration de Green et Ampt (Green and Ampt, 1911). Une description complète de l'équation d'infiltration de Green et Ampt est donnée par Neitsch (2005). Cependant, comme cette méthode nécessite la disponibilité d'enregistrements de précipitations infra-quotidiens, elle est d'une valeur limitée pour de nombreuses applications de SWAT.

Le numéro de courbe SCS est donné par l'équation 1.2 :

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{Day}} - I_a)^2}{(R_{\text{Day}} - I_a - S)} \quad (1.2)$$

Où Q_{surf} est l'excès de ruissellement ou de pluie accumulé (mm) ; R_{day} est la hauteur de pluie pour la journée (mm) ; I_a est les prélèvements initiaux qui comprennent le stockage en surface, l'interception et l'infiltration avant le ruissellement (mm) ; et S est le paramètre de rétention (mm) qui est donné par :

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{\text{CN}} - 10 \right) \quad (1.3)$$

Où CN est le numéro de courbe du jour. Les abstractions initiales, I_a , sont généralement est approximativement égal à $0,2.S$. Par conséquent, l'équation 1.3 devient :

$$Q_{\text{Surf}} = \frac{(R_{\text{Day}} - 0.2S)^2}{(R_{\text{Day}} + 0.8S)^2} \quad (1.4)$$

Où Q_{surf} est le ruissellement accumulé ou l'excès de pluie (mm), R_{day} est la hauteur de pluie pour la journée (mm), et S est le paramètre de rétention (mm). On suppose que la pluie qui ne devient pas un écoulement de surface s'infiltré dans le sol. Le ruissellement ne se produira que lorsque $R_{\text{day}} > I_a$.

Dans cette étude, la méthode des nombres courbes a été utilisée en raison de la disponibilité d'enregistrements quotidiens des précipitations de bonne qualité. Les données disponibles pour la zone d'étude sont quotidiennes. SWAT peut appliquer des données quotidiennes et infra-quotidiennes, tandis que la méthode des nombres courbes nécessite des données quotidiennes et que la méthode Green-Ampt fonctionne avec des données infra-quotidiennes (Hosseini, 2010).

1.5.12. La Percolation

La recharge des nappes souterraines s'effectue grâce au phénomène de percolation. Lors d'un épisode pluvieux, dès que la teneur en eau du sol dépasse sa capacité de rétention maximale (capacité au champ en agronomie), une lame d'eau gravitaire percole à travers le profil de sol et alimente les niveaux plus profonds (figure 1.5). L'indicateur de recharge des nappes consiste en un nombre moyen de jours par an durant lesquels l'eau percole à la base du profil de sol (Brulebois, 2016).

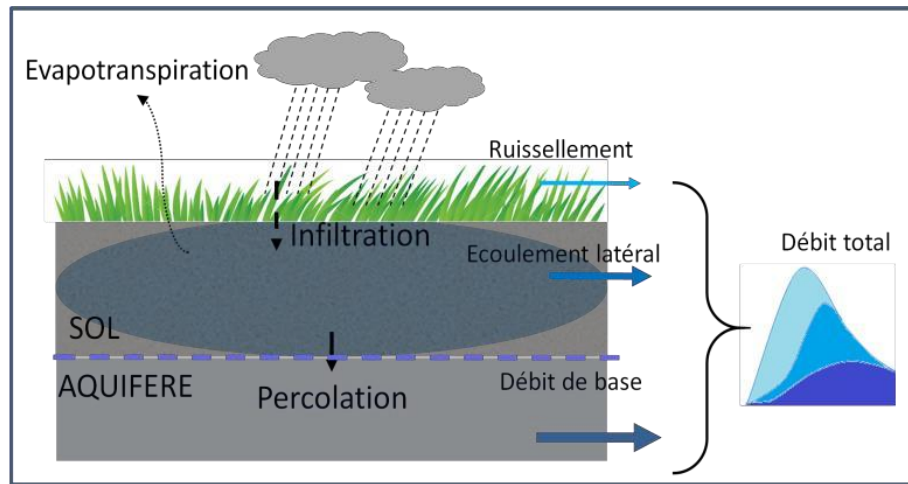


Figure 1.5. Représentation schématique des mouvements de l'eau lors de la percolation (Brulebois, 2016).

La percolation est calculée à l'aide de la méthodologie de routage du stockage dans SWAT et est calculée pour chaque couche de sol dans le profil. L'eau ne percole à partir d'une couche de sol donnée que si la teneur en eau du sol dépasse la capacité du champ de cette couche. La quantité d'eau qui percole d'une couche de sol à la couche sous-jacente est calculée par l'équation 1.5 :

$$W_{Percly} = SW_{ly.excess} \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (1.5)$$

Où $W_{perc,ly}$ est la quantité d'eau percolant vers la couche de sol sous-jacente en un jour donné (mm), $SW_{ly.excess}$ est le volume d'eau drainable dans la couche de sol en ce jour (mm), t est le pas de temps (h), et TT_{perc} est le temps de parcours de la percolation (h). Le temps de parcours de la percolation est unique pour chaque couche de sol. Il est calculé à l'aide de la méthode l'équation de stockage linéaire suivante 1.6 :

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{Sat}} \quad (1.6)$$

Où SAT_{ly} est la quantité d'eau dans la couche de sol lorsqu'elle est complètement saturée (mm), FC_{ly} est la teneur en eau du sol de la couche à la capacité au champ (mm), et K_{sat} est la conductivité hydraulique saturée de la couche (mm/h).

1.5.13. Ecoulement de sub-surface (hypodermique)

L'écoulement intermédiaire pour chaque couche de sol est calculé en utilisant le modèle de stockage cinématique (Sloan et al., 1983 ; Sloan and Moore, 1984) qui est un modèle simple de stockage-

débit et qui simule l'écoulement intermédiaire dans une section transversale bidimensionnelle le long d'un chemin d'écoulement sur la pente d'une colline. Le gradient hydraulique est supposé être égal à la pente du lit, comme dans l'approximation de la vague cinématique (Beven, 1981). Le modèle de stockage cinématique est basé sur l'équation de continuité de masse avec le segment entier de la pente de la colline utilisé comme volume de contrôle. L'équation de continuité de masse (1.7) peut être exprimée sous forme de différences finies mixtes comme (Sloan and Moore, 1984).

$$\frac{S_2 - S_1}{T_2 - T_1} = iL - \frac{(Q_{Lat1} + Q_{Lat2})}{2} \quad (1.7)$$

où S est le volume d'eau drainable stocké dans la zone saturée par unité de largeur (mm^2), t est le temps (d), i est le taux d'entrée vertical dans la zone saturée (mm/d), L est la longueur de la pente de la colline (mm), Q_{Lat} est l'écoulement intermédiaire déchargé du profil par unité de largeur (mm^2/d) et les indices 1 et 2 indiquent le début et la fin du pas de temps, respectivement.

1.5.14. Débit des eaux souterraines

SWAT sépare les eaux souterraines en deux systèmes aquifères : un aquifère peu profond et non confiné qui contribue à l'écoulement des eaux souterraines dans les cours d'eau du bassin versant, et un aquifère profond et confiné qui contribue à l'écoulement des eaux souterraines en dehors du bassin versant (Neitsch et al., 2011a). L'eau qui percole au-delà du fond de la zone racinaire est divisée en deux fractions, chaque fraction constituant la recharge d'un des aquifères. Le bilan hydrique pour l'aquifère peu profond est donné par l'équation 1.8 (Neitsch et al., 2011a) :

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{deep} - w_{pump,sh} \quad (1.8)$$

où pour le jour cible, $aq_{sh,i}$ est la quantité d'eau stockée dans l'aquifère peu profond (mm), $aq_{sh,i-1}$ est la quantité d'eau stockée dans l'aquifère peu profond au jour $i-1$ (mm), w_{rchrg} est la quantité de recharge entrant dans l'aquifère (mm), Q_{gw} est le débit d'eau souterraine dans le canal principal (mm), w_{revap} est la quantité d'eau se déplaçant dans la zone du sol en réponse au manque d'eau (mm), w_{deep} est la quantité d'eau percolant de l'aquifère peu profond vers l'aquifère profond (mm), et $w_{pump,sh}$ est la quantité d'eau retirée de l'aquifère peu profond par pompage (mm).

L'aquifère peu profond contribue à l'écoulement des eaux souterraines vers le canal principal dans chaque sous-bassin versant. L'écoulement des eaux souterraines de l'aquifère peu profond vers le cours d'eau est estimé à en utilisant l'équation suivante (1.9):

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} - \exp^{-\alpha_{gw} \Delta t} + w_{rchrg}(1 - \exp^{-\alpha_{gw} \Delta t}) \quad (1.9)$$

où pour un jour donné, $Q_{gw,i}$ est le débit d'eau souterraine dans le canal principal (mm), $Q_{gw,i-1}$ est le débit d'eau souterraine dans le canal principal le jour $i-1$ (mm), α_{gw} est la constante de récession du débit de base, Δt est le pas de temps (d), et w_{rchr} est la quantité de recharge entrant dans l'aquifère (mm).

L'eau stockée dans l'aquifère superficiel peut remonter vers la zone racinaire dans des conditions très sèches ou être éliminée par les plantes à racines profondes qui peuvent absorber l'eau directement de l'aquifère superficiel (Neitsch et al., 2011a). Une fraction de la recharge quotidienne totale peut également être acheminée vers l'aquifère profond. L'eau qui pénètre dans l'aquifère profond n'est pas prise en compte dans les futurs calculs du bilan hydrique dans SWAT et est considérée comme perdue dans le système (Neitsch et al., 2011a).

1.5.15. Croissance de la végétation

Brulebois (2016) explique que le module comprend une base de données des principales caractéristiques physiologiques de nombreuses cultures et couverts végétaux. Les équations permettent de simuler la croissance potentielle de la plante (en termes de biomasse) en fonction des conditions environnementales (température, humidité du sol, disponibilité en nutriments, énergie solaire interceptée). Il permet le calcul de l'évapotranspiration réelle (qui est fonction de l'évapotranspiration potentielle et de la disponibilité en eau du sol), de la demande en nutriments azotés et phosphorés, d'après les équations de (Jones, 1983).

SWAT utilise un seul modèle de croissance de la végétation pour simuler la croissance de tous les types de végétation. Il s'agit d'une version simplifiée du modèle de croissance de la végétation utilisé dans EPIC (Williams, 1995). Le modèle de croissance de la végétation est utilisé pour évaluer l'élimination de l'eau et des nutriments de la zone racinaire, la transpiration et la production de biomasse/rendement (Neitsch et al., 2011a).

Cependant, un certain nombre de caractéristiques du modèle EPIC de croissance de la végétation ne sont pas incorporées dans SWAT. Celles-ci englobent la croissance détaillée des racines, le cycle des micronutriments, les réponses à la toxicité et la croissance simultanée de plusieurs espèces végétales dans la même HRU.

Le développement phénologique est basé sur les unités thermiques accumulées quotidiennement. La théorie des unités thermiques postule que les plantes ont des besoins en chaleur qui peuvent être quantifiés et liés au temps qu'elles mettent à atteindre leur maturité (Neitsch et al., 2011a). L'accumulation d'unités thermiques pour un jour donné est calculée comme suit :

$$HU = T_{av} - T_{base} \quad (1.10)$$

Où $T_{av} > T_{base}$, HU est le nombre d'unités de chaleur accumulées au cours d'une journée donnée (unités de chaleur), T_{av} est la température moyenne journalière (°C), et T_{base} est la température de base, ou minimale, de croissance de la plante (°C).

Le nombre total d'unités thermiques nécessaires pour qu'une plante atteigne sa maturité est calculé par l'équation 1.11 :

$$PHU = \sum_1^M HU \quad (1.11)$$

Où PHU est le nombre total d'unités de chaleur nécessaires à la maturité de la plante (unités de chaleur) ; HU est le nombre d'unités de chaleur accumulées au jour d ; où d = 1 le jour de la plantation ; et m est le nombre de jours nécessaires à une plante pour atteindre la maturité.

L'augmentation potentielle de la biomasse végétale en un jour donné est définie comme l'augmentation de la biomasse dans des conditions de croissance idéales et est estimée en fonction de l'énergie interceptée et de l'efficacité des plantes à convertir l'énergie en biomasse (Neitsch et al., 2011a). L'augmentation potentielle de la biomasse pendant une journée est estimée à l'aide de la loi de Beer. Le LAI est simulé en fonction des unités thermiques et de la biomasse. La croissance des plantes peut être réduite par des températures extrêmes ainsi que par un manque d'eau, d'azote ou de phosphore (NEITSCH, 2005). L'absorption d'azote et de phosphore est estimée à l'aide de l'approche de l'offre et de la demande, selon laquelle les demandes quotidiennes d'azote et de phosphore des plantes sont calculées comme étant les différences entre les concentrations réelles des éléments dans la plante et les concentrations optimales associées.

1.5.16. L'Acheminement ou routage du cycle hydrologique

Une fois que les flux d'eau, d'éléments dissous et en suspension, ont été calculés, le modèle simule le transfert de ces flux au sein du réseau hydrographique. De nouveaux processus, intervenant au sein des cours d'eau, modifient alors la qualité des eaux (dépôt ou remise en suspension, biodégradation, dilution, croissance algale et bactérienne) (Brulebois, 2016).

Dans la phase d'acheminement, les charges d'eau, de sédiments, de nutriments et de pesticides dans le cours d'eau principal sont déterminées. Ces charges doivent ensuite être acheminées à travers le réseau hydrographique du bassin versant. Les processus du canal principal simulés par SWAT comprennent le mouvement de l'eau, des sédiments, des nutriments et des pesticides dans le réseau de cours d'eau, ainsi que le cycle des nutriments et les transformations des pesticides dans le cours

d'eau (Neitsch et al., 2011a). Dans les paragraphes suivants, seuls les détails sur le routage de la composante eau du modèle sont présentés. Des détails sur le routage des sédiments, des nutriments et des pesticides dans SWAT peuvent être trouvés dans Neitsch et al. (2011).

SWAT utilise l'équation de Manning pour calculer le taux et la vitesse d'écoulement dans un segment de bief (Neitsch et al., 2011a). L'eau est acheminée à travers le réseau de canaux en utilisant la méthode de routage à stockage variable, qui a été développée par Williams (Williams, 1969), ou la méthode d'acheminement Muskingum. La méthode de routage à stockage variable a été utilisée dans cette étude. Pour un segment de bief donné, le routage du stockage est basé sur l'équation de continuité (1.12) :

$$V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad (1.12)$$

Où V_{in} est le volume entrant (m^3) pendant le pas de temps, V_{out} est le volume sortant (m^3) pendant le même pas de temps, et ΔV_{stored} est le changement de volume (m^3) du stockage pendant le même pas de temps.

SWAT prend en compte les pertes d'eau du canal principal dues à l'évaporation et à la transmission par le lit du canal. L'ajout ou le retrait d'eau du canal par des dérivations est également pris en compte. Le débit peut être complété par la pluie qui tombe directement sur le canal ainsi que par l'ajout d'eau provenant de décharges ponctuelles.

1.6. La Télédétection

Dans sa signification la plus généralement acceptée, la télédétection fait référence aux techniques instrumentales employées pour l'acquisition et la mesure de données/informations organisées dans l'espace (le plus souvent, géographiquement distribuées) sur certaines propriétés (spectrales, spatiales, physiques) d'un ensemble de points cibles (pixels) dans la scène détectée qui correspond à des caractéristiques, des objets et des matériaux, en appliquant un ou plusieurs dispositifs d'enregistrement qui ne sont pas en contact physique et intime avec l'élément ou les éléments surveillés (donc à une distance finie de la cible observée, dans laquelle les données spatiales et les informations sur les propriétés de l'élément ou des éléments observés ne sont pas disponibles).

Les techniques impliquent l'acquisition de connaissances relatives à la scène détectée (cible) en utilisant le rayonnement électromagnétique, les champs de force ou l'énergie acoustique détectés par des caméras d'enregistrement, des radiomètres et des scanners, des lasers, des récepteurs de radiofréquence, des systèmes radar, des sonars, des dispositifs thermiques, des détecteurs de son,

des sismographes, des magnétomètres, des gravimètres, des scintillomètres et d'autres instruments (Hosseini, 2010; Short's, 2010).

1.6.1. Télédétection et traitement des images satellitaire

La télédétection offre une immense source de données pour étudier la variabilité spatiale et temporelle des paramètres environnementaux. Elle peut fournir des informations synoptiques en temps opportun pour l'identification et la surveillance des grandes zones géographiques qui sont difficilement accessibles par d'autres moyens (Smith, 2012).

Le traitement et l'analyse d'images peuvent être définis comme "l'acte d'examiner des images dans le but d'identifier des objets et de juger de leur signification." Un analyste d'images étudie les données télé-déteectées et tente, par le biais de processus logiques, de détecter, d'identifier, de classer, de mesurer et d'évaluer l'importance des objets physiques et réels, de leurs modèles et de leurs relations spatiales (Bektas and Goksel, 2005). Les objets sur les images satellites sont caractérisés par des propriétés physiques telles que le ton, la texture, la couleur, la taille, la forme, le motif, la hauteur, l'ombre, le site et l'association. Le traitement d'images numériques est l'utilisation d'algorithmes informatiques pour effectuer un traitement d'image sur des images numériques. En tant que sous-domaine du traitement numérique du signal, le traitement numérique de l'image présente de nombreux avantages par rapport au traitement analogique de l'image ; il permet d'appliquer une gamme beaucoup plus large d'algorithmes aux données d'entrée et d'éviter des problèmes tels que l'accumulation de bruit et la distorsion du signal pendant le traitement (Canty, 2006; Hosseini, 2010). Le DIP a été largement appliqué à grande échelle pour déterminer la signification spectrale des objets à partir d'images (Gibson and Power, 2000). L'objectif de l'utilisation du DIP dans cette recherche est la détection de l'utilisation des terres.

1.6.2. Classification de l'occupation des sols

La classification de l'occupation du sol à l'aide d'images satellitaires peut être considérée comme une combinaison entre le traitement d'image numérique et les techniques de classification pour analyser l'occupation du sol (Bektas and Goksel, 2005).

L'une des principales étapes de l'analyse d'image impliquée dans cette thèse est d'identifier des groupes de pixels qui ont des caractéristiques spectrales similaires et de déterminer les diverses caractéristiques ou classes d'occupation du sol représentées par ces groupes. Cette forme d'analyse est connue sous le nom de classification. L'objectif principal de la classification des images est

de faire correspondre les classes d'information au sol aux classes spectrales respectives enregistrées par le satellite. La classification peut être visuelle ou numérique. La classification visuelle repose sur la capacité de l'analyste à utiliser des éléments visuels tels que le ton, le contraste, la forme, etc. Pour classer les éléments de l'image. La classification numérique, en revanche, s'appuie sur les informations spectrales utilisées pour créer l'image et classe chaque pixel individuel en fonction des longueurs d'onde de sa bande ou de ses caractéristiques spectrales. En fin de compte, tous les pixels d'une image sont affectés à des classes syndicales ou à des classes tels que l'eau, la forêt, les pâturages, etc. Les images classées peuvent être illustrées sur une carte thématique.

Il convient de souligner que les classes spectrales et les classes d'information sont différentes les unes des autres et que c'est le rôle de l'analyste d'images de les distinguer pour une classification précise. Les classes spectrales sont des groupes de pixels qui ont des spectres presque similaires alors que les classes d'information sont les différents thèmes ou groupes que l'analyste tente de reconnaître dans une image (Canty, 2006). Les classes d'information peuvent inclure des classes telles que les pâturages, les forêts, les types d'agriculture ou les plans d'eau. N'importe quelle image peut être classée, mais les images multi spectrales sont plus utiles dans les cas suivants : la classification des ressources naturelles. Plus d'un type de surface terrestre peut afficher le même ordre de grandeur numérique ; par conséquent, la classification sur une seule bande est généralement très difficile à réaliser. Par conséquent, toute classe spectrale dans une classification à une seule bande contiendra plusieurs classes d'information. Par conséquent, la distinction entre ces classes d'information sera difficile. Habituellement, deux bandes ou plus sont utilisées pour la classification, et leurs numéros numériques unis sont utilisés pour identifier les signatures spectrales des classes spectrales présentes dans l'image. Plus les bandes utilisées pour créer une classification sont nombreuses, plus l'analyste a de chances d'obtenir un ensemble de classes d'occupation du sol uniques (Jensen, 2005).

1.6.3. Classification supervisée

Cette méthode est la procédure la plus souvent utilisée pour l'analyse quantitative des données de télédétection. On identifie sur l'image des surfaces assez homogènes représentatives des thèmes qu'on souhaite discriminer. Les signatures spectrales de ces surfaces serviront comme références pour classer l'ensemble de l'image en utilisant des algorithmes de classification appropriés (Richards and Jia, 2006).

Une classification supervisée est réalisée lorsqu'une connaissance préalable ou acquise des classes d'un champ est utilisée pour identifier des échantillons représentatifs des différents types de couverture de surface. Ces échantillons, appelés groupes de pixels d'entraînement, sont configurés pour identifier les caractéristiques spectrales communes à chaque classe. La détermination des groupes de pixels d'entraînement ou sites est basée sur la connaissance de l'analyste des types de couverture de surface et de la région géographique de l'image. Une fois les sites d'entraînement établis, les informations numériques de toutes les bandes spectrales ou longueurs d'onde de l'image sont utilisées pour définir la "signature" spectrale de chaque classe. L'ordinateur détermine mathématiquement les signatures de chaque classe. Ainsi, dans une classification supervisée, le chercheur ou l'analyste commence par des classes d'information et les utilise pour définir les classes spectrales correspondantes. Ensuite, chaque pixel de l'image est rattaché à la classe à laquelle il ressemble le plus (Narumalani et al., 2006).

1.6.4. La Classification non supervisée

Cette technique est généralement utilisée lorsqu'on ne dispose que de peu d'informations sur les données et la région de l'étude. Les résultats d'une classification n'ont de sens que si les classes peuvent être convenablement interprétées (Ronald Eastman, 2003).

Dans la classification non supervisée, les pixels d'une image sont appliqués par l'ordinateur et classés dans différentes longueurs d'onde ou classes spectrales. Le regroupement est basé uniquement sur les informations numériques des données et les classes spectrales sont ensuite mises en correspondance par l'ordinateur et l'analyste avec les classes d'informations respectives. En fin de compte, le ou les algorithmes de l'ordinateur et l'analyste créent un bon concept des classes spectrales aux classes d'information dans la classification non supervisée (Babykalpana and Thanushkodi, 2010).

L'avantage de la méthode de classification non-supervisée revient à son automatisme. Elle permet de réduire le temps de calcul et fournit aussi des résultats totalement impartiaux. Différentes méthodes de classification non supervisées existent, mais on rencontre plus souvent deux méthodes : ISODATA et KMEANS (Nghiem, 2014).

1.6.5. *L'indice de végétation différentiel normalisé (NDVI)*

Les images satellites sont un outil précieux pour étudier la couverture végétale, sa nature, ses caractéristiques, ses densités, ses changements dans le temps et ses effets sur l'environnement, en général, et sur le cycle hydrologique, en particulier (Jensen, 2005).

Les images multi spectrales sont des outils très utiles pour l'étude des terrains terrestres en raison de leur capacité à offrir plusieurs images qui sont en fait la réflexion des ondes électromagnétiques de la terre à différentes longueurs d'onde (Gibson and Power, 2000).

L'indice végétatif est une valeur calculée, ou dérivée, à partir d'ensembles de données de télédétection et utilisée pour quantifier la couverture végétale à la surface de la Terre. Bien qu'il existe de nombreux indices de végétation, l'indice le plus largement utilisé est l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Le NDVI, comme la plupart des autres indices de végétation, est calculé comme le rapport entre la réflectivité mesurée dans la partie rouge et celle dans la partie proche infrarouge du spectre électromagnétique. Ces deux bandes spectrales sont choisies parce qu'elles sont les plus affectées par l'absorption de la chlorophylle dans la végétation verte feuillue et par la densité de la végétation verte à la surface. Dans le site en outre, dans les bandes rouges et proche infrarouge, le contraste entre la végétation et le sol est maximal. Sur cette base, différentes méthodes et équations portant le nom d'indices d'étude du couvert végétal ont été développées. L'indice de végétation verte (GVI), l'indice de végétation ajusté au sol (SAVI) et l'indice végétatif différentiel normalisé (NDVI) sont les indices les plus courants.

1.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse documentaire portant sur les modèles de bilan hydrique et les modèles hydrologiques. Le chapitre a commencé par les concepts généraux utilisés dans les activités de modélisation, en particulier avec les questions liées aux modélisations hydrologiques. La classification générale des modèles a été présentée. La comparaison de quinze modèles populaires qui impliquent le changement d'utilisation des terres et les composantes de l'eau a conduit à la sélection du modèle SWAT pour cette étude. L'avantage du SWAT est sa capacité à prédire les composantes de l'eau telles que le ruissellement de surface, l'écoulement intermédiaire, l'écoulement des eaux souterraines, l'évaporation, l'évapotranspiration, le rendement de l'eau du sol et des sédiments dans une plateforme SIG avec une base de données puissante. Ce modèle a été capable de prédire les composants chimiques qui n'étaient pas nécessaires dans cette

recherche. SUFI2 est un programme de SWAT-CUP qui a la capacité de se lier à SWAT pour la calibration et la validation du modèle.

CHAPITRE II
ZONE D'ETUDE

Chapitre II : Zone d'étude

2.1 Le contexte général

Le problème climatique représente aujourd'hui un enjeu mondial majeur pour l'humanité. Les conséquences de ce phénomène sont multiples, irréversibles et dépassent la capacité de réponse des écosystèmes et des humains, qui peuvent être durablement altérés ou détruits. Selon le dernier rapport du World Resources Institute (WRI) publié le 6 août 2019 (Hofste et al., 2019), douze des 17 pays les plus touchés par le stress hydrique se trouvent au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (MENA). La région est chaude et sèche, ou la ressources en eau est donc faible au départ, mais les demandes croissantes ont poussé les pays à un stress extrême. La carte réalisée par WRI montre que l'Algérie est également touchée et classé dans la catégorie des pays soumis à un stress extrême, et l'ouest Algérien est encore plus vulnérable (Figure 2.1).

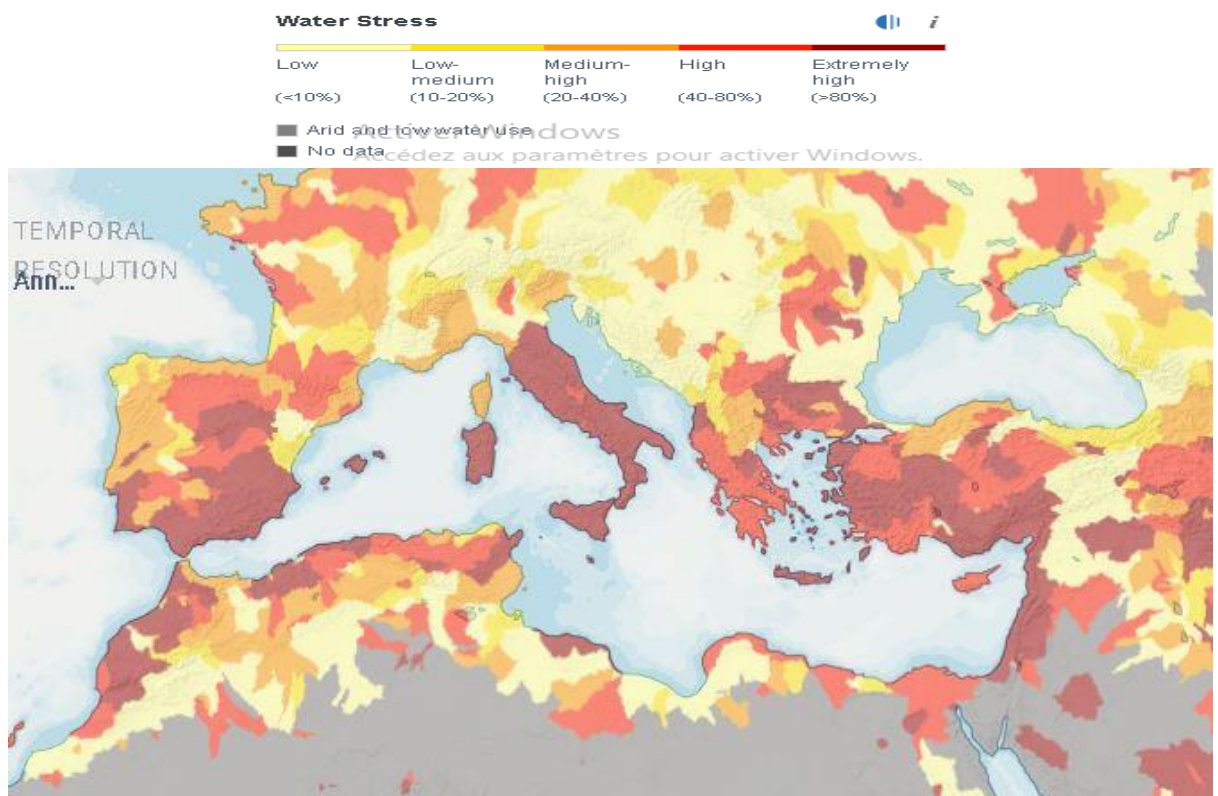


Figure 2.1. Le stress hydrique dans le bassin méditerranéen (wri.org/aqueduct).

L'Algérie a un statut de faible émetteur de carbone. Cependant, sa position géographique le confine à une énorme vulnérabilité naturelle au changement climatique. Le climat de l'Algérie est classé en trois types : subhumide (pour une bande très mince au Nord Est), semi-aride et aride.

Le sol joue un rôle majeur dans la lutte contre le changement climatique. En tant que réserve de carbone organique, il influence la composition de l'atmosphère en recyclant les matières organiques. En effet, le sol est à la fois une source et un puits de gaz à effet de serre (GES), c'est à dire qu'il est à la fois émetteur de gaz à effet de serre (GES) lorsque les matières organiques se dégradent, et puits de carbone lorsqu'elles s'y accumulent. Le sol est une ressource très faiblement renouvelable, c'est à dire qu'il lui faut plusieurs milliers d'années pour se régénérer alors qu'il peut se dégrader très rapidement.

Le développement des activités humaines (agriculture, élargissement des zones urbaines, réchauffement climatique, etc.) a particulièrement appauvri et pollué les sols. En effet, plus des trois quarts de la surface du sol sont actuellement exploités dont un quart de cette surface est déjà considéré comme dégradé. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2020), la dégradation des sols réduit, voire détruit leur capacité à produire et peut même mener jusqu'à la désertification.

Le changement climatique et l'occupation des sols sont interdépendants. Ces changements s'influencent mutuellement à diverses échelles temporelles et spatiales; toutefois, les utilisations inappropriées des terres sont le principal facteur de causalité du changement climatique. Il étudie la littérature pertinente et le cas du Népal pour évaluer la relation entre l'utilisation des terres et le changement climatique. De même, elle se concentre sur la manière dont l'utilisation des terres influe sur le changement climatique et vice versa. Au cours des derniers siècles, le changement d'affectation des sols a eu des effets importants sur les variables écologiques et le changement climatique. De même, la compréhension de la recherche sur ces deux sujets aidera les décideurs et les planificateurs de la conservation à gérer les terres et le climat (Thapa, 2021).

D'une part, le changement climatique implique le réchauffement de la planète, les précipitations, les catastrophes naturelles telles que les inondations, les tempêtes et les sécheresses (Jamet and Corfee-Morlot, 2009), d'autre part l'utilisation des terres a un impact sur le climat à travers la déforestation et la croissance rapide de la population, tandis que le changement climatique a un impact sur l'utilisation des terres à travers les fortes précipitations imprévisibles et l'augmentation des températures (Seddon et al., 2020).

2.2 Zone d'étude

Notre zone d'étude, concerne les plus grands bassins hydrographiques côtiers du Nord-Ouest Algérien (Figure 2.2).



Figure 2.2. Localisation de la zone d'étude (<http://www.abhoranie.dz/>)

La politique de gestion des ressources en eau en Algérie est basée sur le principe des grands bassins versant, dans l'ouest Algérien on distingue les deux grandes régions hydrographiques qui sont l'Oranie Chott-Chergi (O.C.C) et Chelef-Zehrez (CH-Z).

2.2.1 *La région hydrographique du bassin versant de l'Oranie-chott-chergui*

2.2.1 *Le bassin versant de la Macta*

Le bassin versant de la Macta est le plus grand bassin du nord-ouest Algérien. Il couvre une superficie de 14389 km², et est constitué par 16 sous-bassins selon la délimitation de l'agence nationale des ressources en eau (ANRH) comme l'illustre la figure 2.3 (Baahmed, 2015).

Le bassin de la Macta est délimité au nord par la Mer Méditerranée, au sud par les montagnes de Saida (1201 m) et Daya Montagnes (1356 m), et au sud-ouest par les montagnes de Tlemcen, y compris les monts de Beni Chougrane et la plaine de Mohamadia (Meddi and Talia, 2013).

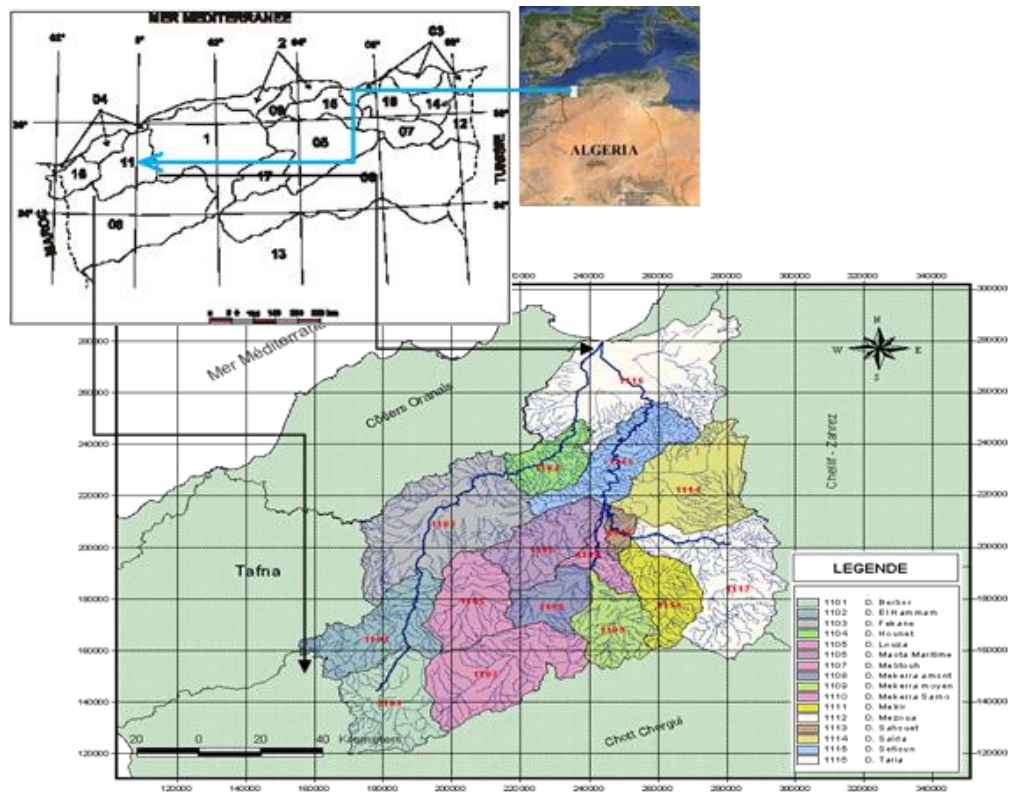


Figure 2.3. Localisation du bassin versant et des sous bassin versant de la Macta (ANRH).

Administrativement ce bassin s'étend sur la majorité des wilayas de Mascara, Sidi Bel Abbes et Saida et une partie des wilayas de Tlemcen et Mostaganem (Elouissi, 2016).

Le relief est un facteur déterminant quant à l'aptitude au ruissellement et le comportement des crues. de l'amont vers l'aval, la Macta se caractérise par trois zones. Une Zone à reliefs moyens C'est le centre du bassin où dominent les Monts de Beni Chougrane qui s'orientent de Sud-ouest à Nord Est. Cette chaîne montagneuse très accidentée avec des altitudes moyennes de 700 m et un maximum de 910 m au Djebel Kallel. Une deuxième zone à basse altitude présentée par les plaines de l'Habra et Mohammadia au Nord du bassin délimitées au sud par les Beni Chougrane. Et une troisième zone de hautes altitudes où l'écoulement prend naissance dans les Monts de Daya et ceux de Saida, où le relief est accidenté et dominé par une série de Djebels (Beghira de 1409 m, Djebel Marhoum de 1404 m, Djebel Tenfeld de 1356 m et Djebel Ouled Aouf de 1025 m) (Benzater, 2021).

2.2.2 *Le bassin versant de la Tafna*

Selon L'ABH-OCC (Agence de Bassin Hydrographique - Oranie - Chott - Chergui), Le bassin de la Tafna se trouve dans le Nord-Ouest de l'Algérie, avec une superficie de 7245 km² dont un tiers de ce dernier s'étend sur le territoire marocain (Figure 2.4). Selon la classification des bassins hydrographiques de l'Algérie, établie par l'Agence nationale des ressources hydrique (ANRH), le bassin de la Tafna possède le code N°16 du découpage de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) (Mami, 2020).

La superficie totale dans le territoire Algérien est de 5 340 Km². En incluant la surface située à l'intérieur du territoire Marocain (1905 Km²) le bassin a une surface globale de 7 245 Km². Il a toujours été considéré comme étant le principal château d'eau de toute la région hydrographique de l'Oranie par l'importance de ses ressources superficielles et souterraines.

Possédant de fortes potentialités en eau, ainsi elles sont utilisées pour d'autres bassins accusant de faibles capacités en eau. Ceci s'est traduit par l'implantation de plusieurs barrages et au fonçage de milliers de puits et de forages. Administrativement, le bassin de la Tafna s'étend sur trente-huit (38) communes réparties sur deux (02) wilayas (Tlemcen 35/53 communes et Ain Temouchent 03/28 communes). Selon le recensement général de 2008, la population est de 781.089 habitants. (ABH-OCC, s. d.).

Le bassin versant de la Tafna possède six affluents. Le sous bassin de Sebdou, qui s'étale sur une superficie de 602 km² et se situe dans la partie sud de la Tafna, son exutoire est localisé à l'entrée du barrage de Beni-Bahdel, alors que le cours d'eau prend naissance à Ghar Boumaaza. Le sous bassin compte environ 44868 habitants. Le sous bassin de Khémis possède une superficie de 378 km², se situe dans la partie Sud de la Tafna, son exutoire est localisé à l'entrée du barrage de Beni-Bahdel. Le sous bassin de Chouly, localisé dans la partie Est de la Tafna a une superficie de 326 Km². Le sous bassin d'Isser, qui a une surface de 1140 km², il se situe dans l'Est de la Tafna. Le sous bassin de Sikkak, qui couvre 463 km², se situe dans l'Est de la Tafna. Enfin le plus grand sous bassin, celui de Mouilah qui s'étale sur une superficie de 2650 km², il se situe dans l'Est de la Tafna (Zettam, 2018).

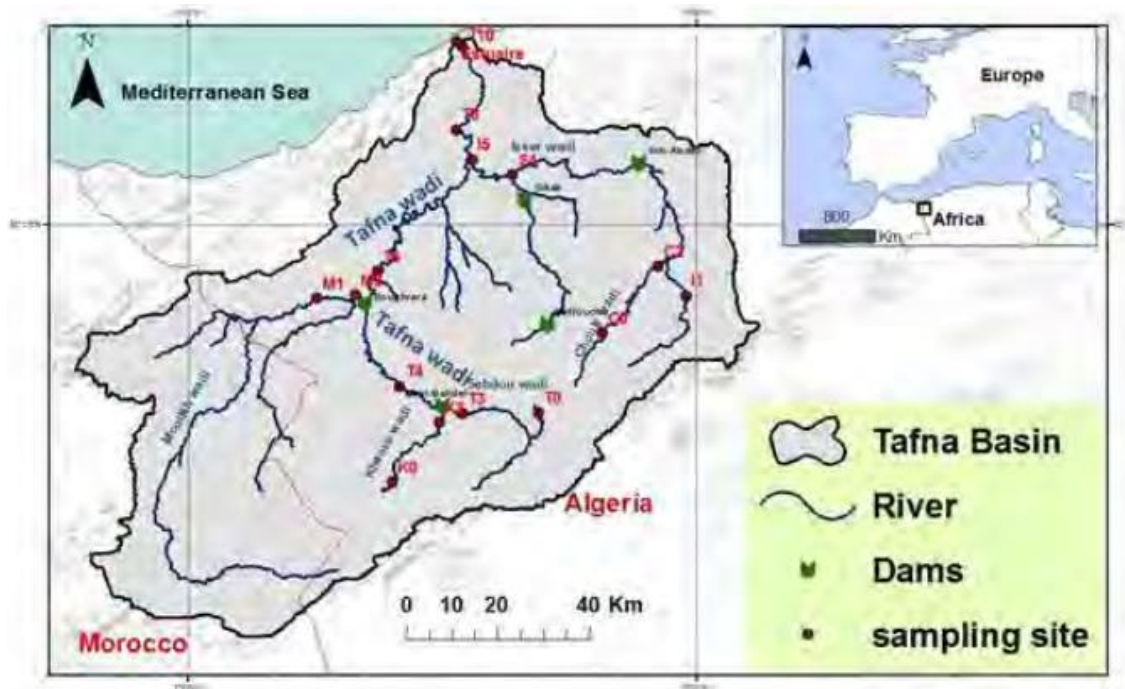


Figure 2.4. Localisation du bassin versant et des sous bassin versant de la Tafna (Zettam, 2018) .

2.2.2.3 *Le bassin versant de la côtier-oranais*

Le bassin versant Côtiers Oranais est situé au Nord des bassins de la Tafna, la Macta et du Chott Chergui. Il est limité au Nord par la mer Méditerranée, dont l'altitude maximale varie de 1.061 m (Monts de Tessala) à 1021 m (Monts de Traras) et une altitude minimale de 15 m (au niveau de la frange côtière). Il a une superficie du bassin de l'Oranie est de 5.913 km², soit 7,65 % de la superficie totale de la région hydrographique Oranie –Chott chergui. Il habrite une population du bassin Côtiers Oranais est de 2.247.832 habitants, répartis à travers 78 Communes (ABH-OCC, s. d.).

Il se compose de:

- Sous Bassin Côtier Occidental : est caractérisé par plusieurs affluents qui dévalent les Monts des Traras (1021 m d'altitude) et débouchent directement dans la mer.

Parmi ses principaux Oueds : Oued Marsa.

- Sous Bassin Côtier Central : occupant la plus grande partie de la superficie totale de l'ensemble du bassin des Côtiers Oranais avec un pourcentage de 80% ;il est aractérisépar la présence de dépressions sublittoraux endoréiques (Sebkha d'Oran, saline d'Arzew).L'Oued le plus important est celui d'El Maleh, qui prend son origine des hauteurs des monts des Tessala avec deux principaux affluents : Oued Meteguer et Oued Senane.

- Sous Bassin Côtier Oriental avec les principaux Oueds: Oued Tine qui prend son origine de Sirat dans un terrain argilux jusqu'aux marais de la Macta et Oued Ain Sefra qui prend naissance dans la zone Est de la ville de Mostaganem (Rezak, 2014).

2.2.2.4 Le bassin versant de Chott-Chergui

Le bassin versant du Chott Ech Chergui, situé dans les hautes plaines de l'Ouest Algérien, correspond à une vaste dépression (37060 Km²) au centre de laquelle s'étend le Chott (2000 Km²), vaste étendue constamment humide (Maizi, 2015). Le bassin du Chott Chergui est caractérisé par une grande zone endoréique où les écoulements convergent vers les Chotts alignés en chapelets où le chevelu hydrographique est très peu développé. Le plus grand nombre de ces oueds localisés au Nord prennent naissance dans les crêtes de l'Atlas Tellien et se déversent au Sud dans le Chott Chergui. Ainsi, ce bassin versant forme un lac correspondant à une vaste étendue de 2 000 Km² occupant le centre de la dépression, sa forme allongée à une orientation de Sud-Ouest à Nord-Est tabulaire (topographie plat), limitée au Nord par les confins de l'Atlas Tellien représentés surtout par les monts de Tlemcen et au Sud par les monts de l'Atlas Saharien dominés par les monts des Ksour. L'altitude minimale est de 950 m dans la zone du lac, et un maximum de 2000 m au Sud, dont les reliefs et la morphologie des hauts plateaux Oranais constituent un large ensemble monotone caractérisé par l'absence de relief tranché (manque des pics) (Brahim et al., 2013).

Le bassin couvre une superficie de 49704 Km², soit 64,4% de la superficie totale de la région hydrographique Oranie Chott Chergui qui compte 77.251 Km². Le bassin est limité par les reliefs des bassins de la Tafna et la Macta au Nord, par le bassin du Sahara au Sud, par celui du Cheliff Zahrez à l'Est et enfin par le territoire Marocain à l'Ouest. Il s'étend en partie sur sept Wilayates à savoir Laghouat, Tlemcen, Tiaret, Saida, Sidi Bel Abbés, El Bayadh et Nâama. Le bassin couvre une superficie de 49.704 Km², soit 64,4% de la superficie totale de la région hydrographique Oranie Chott Chergui qui compte 77.251 Km², le Chott Chergui renferme plusieurs zones humides dont les principales sont celles du Chott Chergui et celle du Chott Gherbi. Le Chott Chergui est une zone riche en ressources en eau souterraines et superficielles. Ces eaux sont généralement saumâtres ou salées en surface mais douces en profondeur ; parfois les eaux sont même thermales comme le confirme la zone de Ain Skhouana (ABH-OCC, s. d.).

2.2.3 *La région hydrographique du Chelif-Zehrez*

Le bassin du Chélif est situé au Nord-Ouest de l'Algérie avec une superficie d'environ 44 694 km² et une longueur de 700 km. Il est considéré comme le plus important fleuve d'Algérie et prend sa source dans l'atlas tellien et débouche dans la Mer Méditerranée (Taïbi et al., 2015).

Le bassin versant de Chélif est sous l'influence d'un climat semi-aride avec des précipitations qui varient entre environ 600 mm an⁻¹ au Nord-Est et 300 mm an⁻¹ (voire moins) à l'Ouest et au Sud du bassin (Taïbi et al., 2015). La température moyenne annuelle varie entre 13 à 20°C, le débit annuel moyen à l'exutoire est de 49 m³.s⁻¹, L'agriculture représentée par la céréaliculture, occupe une place importante dans la région de Chélif, la végétation naturelle est de type Méditerranéen dominée par les garrigues (ABH, 2009).

2.2.4 *Sol et géologie*

Dans le bassin de la Macta, le sol est en général dominé par des calcaires (Figure 2.5). Au niveau de hauts piémonts et montagnes, la roche mère affleure en différents endroits. Les sols sont peu profonds à l'exception des sols des différentes vallées et des bas piémonts caractérisés par des dépôts les plus récents.

La région de Béni Chougrane se caractérise par un faciès calcaire marneux et un faciès composé de grés et de conglomérats. A proximité de l'exutoire (marécages de la Macta), nous rencontrons essentiellement des matériaux transportés ; les dépôts sont généralement argileux et fortement salés.

L'écoulement est fonction des conditions géologiques des terrains traversées, à savoir : pendage, épaisseur, relations tectoniques, perméabilité, ... La connaissance détaillée des lithofaciès et de leurs structures profondes et superficielles, est nécessaire à la compréhension du système hydrologique et hydraulique souterrain des régions considérées (plaine de Sidi Bel Abbés, plaine de Ghriss, plateau de Saïda) (Baahmed, 2015)

Pour le bassin versant de la Tafna, il existe deux structures géologiques principales englobant l'étendue suivant :

- Le bassin amont, qui comprend les monts de Tlemcen, appartient au jurassique supérieur caractérisé par la prédominance des calcaires et des dolomies ;

- Le bassin aval, orienté vers le Nord qui inclut la zone de piémont et les plaines d'Hennaya, Remchi et de l'Isser. Ce sont les vallées limoneuses appartenant au miocène et aux quaternaire (Collignon, 1986; Zettam, 2018).

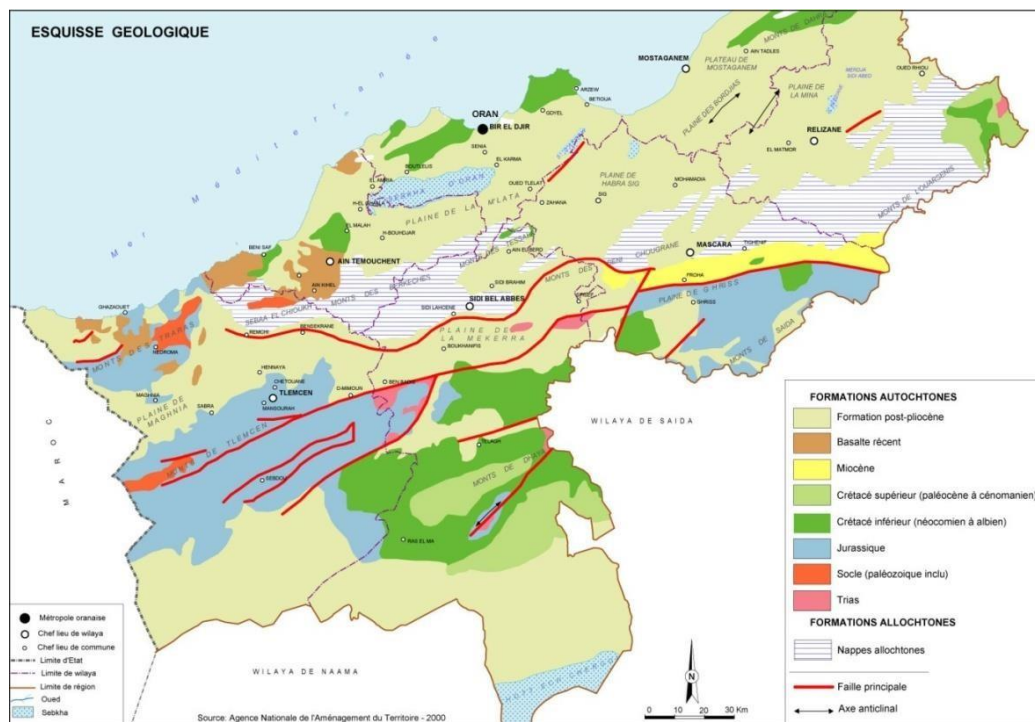


Figure 2.5. Esquisse géologique du Nord-Ouest algérien (Ministère de l'environnement)

2.2.5 La Végétation

Dans le bassin versant de la Macta, la végétation est halophile et adaptée aux sels sodiques à proximité de la mer. A l'extrême du bassin versant, on trouve la forêt de Touazizine et la forêt de Zegla. Dans la partie centrale du bassin versant et plus précisément dans le sous-bassin de la Macta, Sarno, on trouve les forêts de Louza, Belarbi, Tenira, constituées essentiellement de pins d'Alep (Figure 2.6). Cette couverture végétale est généralement dominée par la céréaliculture (plaine de Ghriss de Mascara, Ain Fares...etc.).

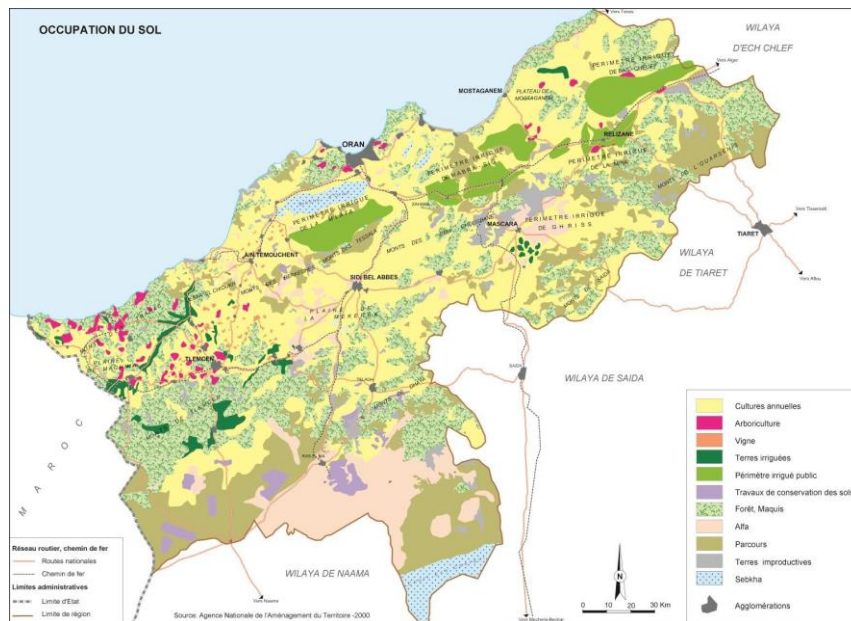


Figure 2.6. Occupation du sol du nord-ouest algérien année 2004 (Ministère de l'environnement)

Pour le bassin versant de la Tafna, la végétation naturelle représentée par des forêts et maquis recouvre environ 40% de la surface totale du bassin versant (Zettam, 2018).

Dans la zone montagneuse Sud, au-dessus de 1200 m d'altitude, la majeure partie des terrains est occupée par une forêt de Chêne vert et de Pin d'Alep. Le Chêne liège se rencontre sur des terrains riches en silice qui caractérisent la forêt d'Ahfir. Au-dessous de 1200 m, nous avons une association d'Oxycèdre, quelques vestiges de Chêne vert, de Palmier nain et de Thuya (Taleb, 2004). Les terrasses et le fond des vallées de l'Oued Tafna sont occupés par des terrains cultivés et les pentes sont couvertes de garrigues (Taleb et al., 2004).

Dans la zone Nord, sur sol argilo marneux, généralement profond, la végétation ligneuse est remplacée par les cultures céréalières, fruitières et surtout maraîchères. La végétation naturelle subsistante, comprenant le Tamarix et le Laurier, ne représente que par des taches peu étendues, l'agriculture occupe une place importante dans la Tafna, elle est représentée par la céréaliculture (170.000 ha), l'arboriculture (26280 ha) et culture maraîchère (7695 ha) (Zettam, 2018).

Le bassin du Chelif appartient aux bassins sédimentaires sub-littoraux allongés Est -Ouest et mis en place après la dernière phase alpine de tectonique tangentielle. Au Nord, cette dépression est séparée de la mer par le Tell septentrional représenté par une suite de reliefs parallèles formés essentiellement de terrains jurassico-crétacés que l'on retrouve aussi dans la plaine (Dahra et

massifs épi-métamorphiques à schistosités du Doui, Rouina et Témoulga). Au sud, le bassin du Cheliff est limité par le Tell méridional représenté par un ensemble de massif montagneux où le substratum y est principalement marno-calcaire et correspond à l'allochtone tellien avec ses différentes nappes. Une phase infra-crétacé, compressive donne des plis NE-SW ; Une phase à composante tangentielle intervient après le Sénonien et le Paléocène et serait en partie responsable de l'épimétamorphisme. Une phase datée Aquitano-Burdigaliennne, compressive et profonde génératrice d'un nouvel épimétamorphisme (ABH-CZ, s. d.).

Pendant que les nappes telliennes achèvent de se mettre en place, un nouveau cycle sédimentaire s'amorce marqué par une transgression qui envahit le bassin et finit par déposer une épaisse sédimentation mio-plio-quadernaire. Parallèlement, le bassin du Cheliff est soumis pendant tout le Néogène à une importante tectonique principalement distensive pour certains auteurs (Gourinard, 1958; Perrodon, 1957) et polyphasée pour (Thomas, 1985). Cette tectonique continue jusqu'à l'actuel comme en témoigne l'intense activité séismique de la région (ABH-CZ, s. d.).

2.2.6 *Hydrographie*

Le bassin versant est drainé par deux principaux cours d'eau l'oued Mebtouh (nommé à l'amont Oued Mekerra), à l'ouest, et l'oued El-Hammam à l'est (Figure 2.7). Le bassin versant de la Macta associe: Une basse plaine littorale séparée de la mer par un cordon dunaire et présente des altitudes le plus souvent inférieures à 9 m, ce qui favorise la présence de plans d'eau, de marais et de steppes plus ou moins humides. Vers l'amont, elle se prolonge au sud-est par les vallées des oueds Sig et Habra. Des massifs, orientés Sud-ouest-Nord Est, qui confèrent un caractère montagneux à la plus grande partie du bassin versant : Les monts de Tessala (point culminant à 1061 m) bordent le bassin versant à l'ouest et au nord-ouest. Ils sont traversés par l'oued Mebtouh avant qu'il ne rejoigne la basse plaine inférieure. Au sud-ouest, ils sont relayés par la partie orientale des monts de Tlemcen (1412 m au djebel Ouargla). Les monts de Beni Chougrane (932 m) occupent une bonne partie de la zone moyenne du bassin versant. Celui-ci remonte, à l'est, jusqu'aux monts de Saïda (1201 m au djebel Tiffrit) et, au sud, jusqu'aux monts de Dhaya (1455 m au djebel Mezioud) et jusqu'aux hauteurs de la bordure septentrionale des hauts plateaux (1415 m au djebel Beghira) qui séparent le terrain d'étude de la dépression du Chott Ech Chergui. Enfin, de larges plaines alluviales insérées dans les massifs montagneux : Celle de Sidi Bel Abbés, de direction Sud-Nord, est associée à l'oued Mekerra (nom donné à l'oued Mebtouh à l'amont) (Baahmed, 2015; Benzater, 2021).

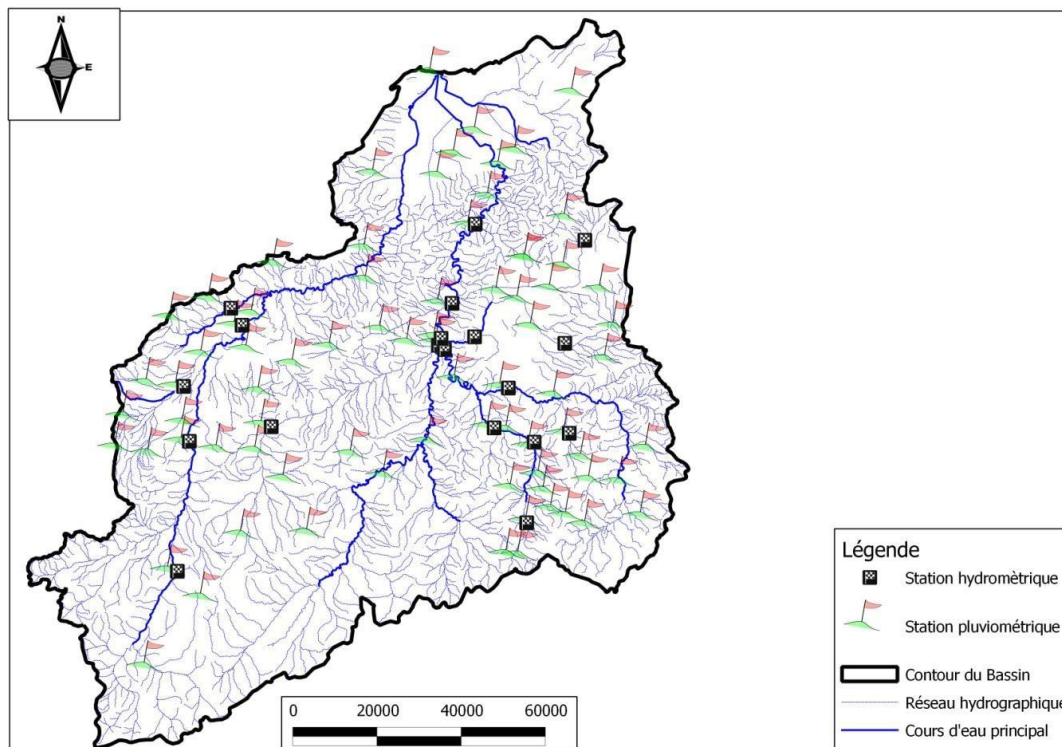


Figure 2.7. Réseau hydrographique du bassin de la Macta (Baahmed, 2015).

Concernant le bassin versant de la Tafna (Figure 2.8), la formation du réseau hydrographique est fortement conditionnée par les facteurs caractéristiques des terrains traversés par les différents oueds. Ainsi la lithologie intervient sur le degré de ramification des oueds. C'est le cas de l'oued Tafna qui traverse les calcaires des Monts de Tlemcen et suit la direction Sud-Ouest, Nord – Est du relief dominant représenté par la chaîne montagneuse des Traras et les Monts de Tlemcen.

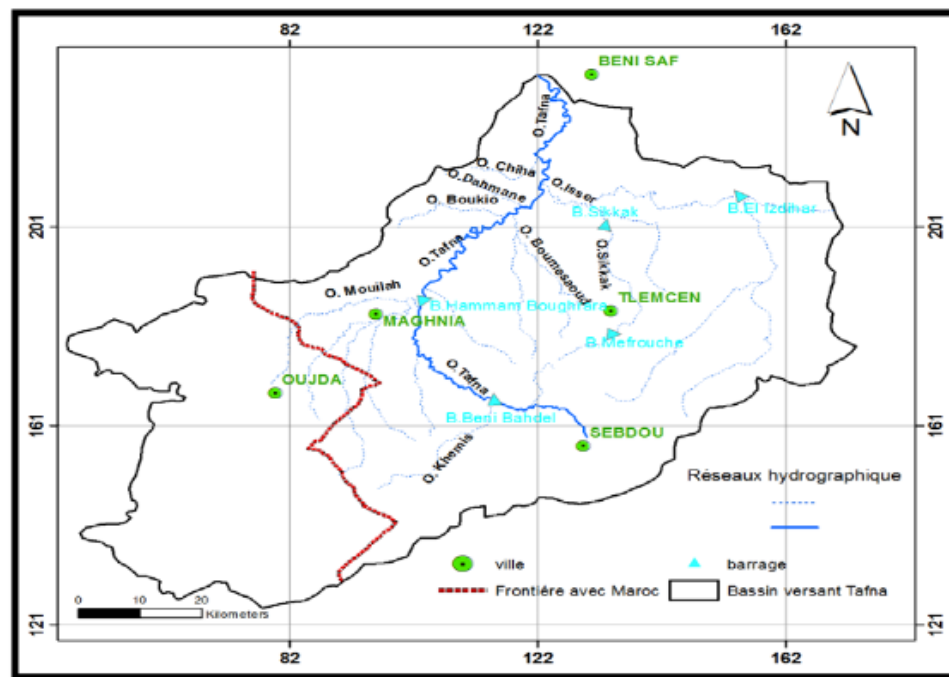


Figure 2.8. Réseau hydrographique du bassin de la Tafna (Chaib Draa Tani, 2019)

L'oued Tafna est une cour d'eau de 170 km de long, il prend naissance au Sud de Sebdu, à 1500 m d'altitude, dans les Monts de Tlemcen. Le cours est subdivisé en trois parties (la haute Tafna, la moyenne Tafna et la basse Tafna) :

- la haute Tafna : la partie occidentale (Oued Sebdu, Oued Khemis et l'Oued Mouilah).

L'oued prend naissance dans les Ouled Ouriach à Ghar Boumaâza et s'affirme après la jonction d'un grand nombre de ramifications creusées dans les terrains jurassiques et descendant de crêtes atteignant 1500m.

- la moyenne Tafna : la partie orientale avec comme principaux affluents l'Oued Isser et L'Oued Sikkak. À partir de Sidi Medjahed, l'Oued pénètre dans le bassin tertiaire et coule dans une vallée peu profonde dans des terrains plus ou moins argileux,
- la basse Tafna : la partie septentrionale débute pratiquement au village Tafna et s'étend jusqu'à la Plage de Rachgoun, embouchure de l'Oued. Les Oueds Boukiou, Boumaâoud et Zitoun sont les principaux affluents dans cette partie.

Le cours inférieur de la Tafna s'étend depuis les gorges de Tahouaret vers le village de Pierre du Chat (Fatmi Lakhdar) jusqu'à la plage de Rachgoun à la mer Méditerranée, sur une distance de 20 Km. (Chaib Draa Tani, 2019).

2.2.7 *Choix des bassins versant pilotes*

Pour l'application de notre méthodologie, nous avons choisi trois bassins versant pilotes représentant certaines distinctions. Ils correspondent en majorité à des sous bassins versant à vocation agricoles. Il s'agit des bassins versant d'Oued Saida et Oued Taria, qui font partie des hautes plaines intérieures en Algérie, ils sont les deux bassins versants alimentant le Barrage de Ouizert faisant partie du grand bassin versant de la Mactaa. Le deuxième bassin versant est celui d'Oued Maleh, c'est un bassin versant côtier qui débouche sur la mer méditerranée, drainant une zone a vocation agricole et soumis à un climat méditerranéen, il fait partie du bassin versant côtier-oranais.

La Figure 2.9 donne la localisation des bassins versant choisis dans notre d'étude.

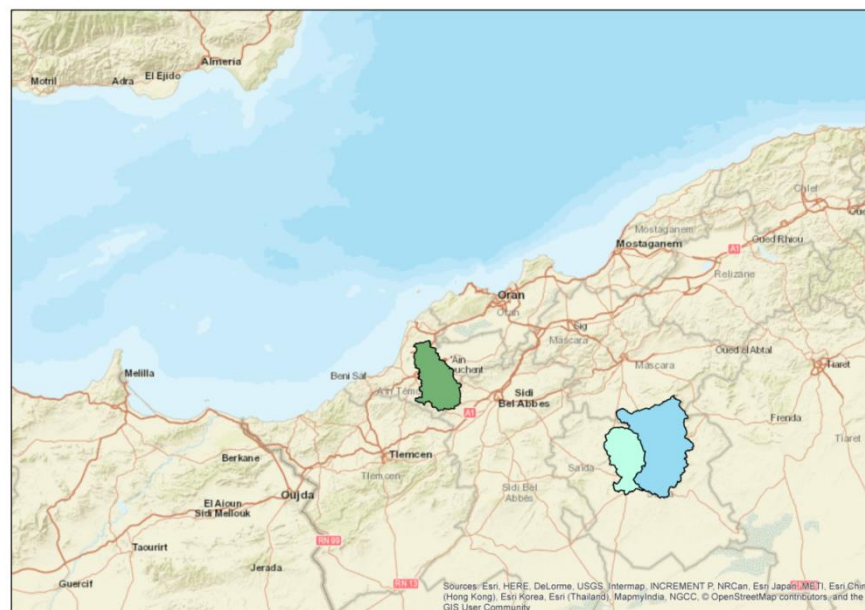


Figure 2.9. Localisation des bassins versant pilote retenus.

Le premier limnimètre est situé à Sidi-Boubekeur il draine le bassin versant d'Oued Saida d'une superficie de 569 km². Le deuxième bassin versant choisi est celui de Oued Taria, il est adjacent à celui de Oued Saida et d'une superficie de 1349 km², les mesure de jaugeage sont effectué au niveau de la localité de Oued Taria, ses deux bassin versant sont soumis au même régime climatique mais avec des caractéristiques hydro-morphologiques différentes. Ils alimentent principalement le barrage de Ouizert d'une capacité de 73 millions de mètre cubes, ce derniers est un ouvrage stratégique pour l'alimentation en eau potable des populations de la Wilaya de Mascara

et a l'irrigation des plaines de Habra pour 9000 hectares et la plaine de Ghriss avec 1200 hectares. Le troisième bassin versant ayant fait l'objet de cette étude est celui de Oued Maleh d'une superficie de km^2 a été choisie pour comparer les résultats tirés des premiers bassins versants des plateaux ingénieur soumis à un climat semi-aride avec ce derniers qui est un bassin versant côtier soumis un climat méditerranéen (Tableau 2.1).

Tableau 2.1. Quelques caractéristiques hydro-morphologiques de la zone d'étude

Bassin versant	Superficie Km^2	Altitude (m)			Hydrométrie		Coefficient de ruissellement (%)	Densité de drainage (Km/km^2)	Longueur du cours d'eau principal (Km)
		Max	Min	Moy	Précipitation moyenne annuelle (mm)	Apport Moyen (mm/an)			
Oued Saida (1998-2005)	569,04	1218	505	866.7	260	25.04	10.38	0.23	43.8
Oued Taria (1995-2005)	1349,02	1328	466	954.5	270.5	17.30	6.39	0.11	68.45
Oued Maleh (1995-2005)	644.5	800	7	315	282.5	18.4	5.89	0.14	41.6

Le choix des bassins versants étudiés est dicté par :

1. La complexité et de la quantité de données nécessaires au modèle SWAT la disponibilité des données hydrologiques et météorologiques issues des stations situant dans les sites étudié, avec des séries assez longues, et présentant peu lacunes et exploitables, pour le bassin versant d'Oued Saida, les postes pluviométriques de Sidi Boubekeur et Ain el Hdjar combiné à la station hydrométrique de Sidi Boubekeur, pour le bassin versant de Oued Taria nous avons retenu les postes pluviométriques d' Oued Taria et de Beniane qui generent un ruissèlement mesurés au niveau de la station hydrométriques d'Oued Taria. Et enfin le bassin versant côtier de oued Maleh; avec une série pluviométrique assez longue et exploitables mais des données des poste pluviométriques de Hammam Bouhadjar et Ain Lerbaa assez lacunées.
2. La complémentarité entre les deux bassins versant d'Oued Taria et Sidi Boubekeur soumis à un climat semi-aride et comme les principaux bassins alimentant le Barrage de Ouizert. D'autres part l'existence d'un contraste climatique entre les premiers bassins et le bassin de oued Maleh soumis à un climat méditerranéen;
3. Les bassins versant choisis ne contiennent aucun barrage pouvant affecter les comportements hydrologiques naturel des cours d'eau.

2.2.8 *Élévations topographiques*

L'élévation topographique des bassins versant étudiés varie entre 506 m et 1 218 m au-dessus du niveau moyen de la mer avec une élévation moyenne de 866 m pour le bassin versant d'Oued Saida. Pour celui d'Oued Taria, elle varie entre 466 m et 1328 m avec une dénivelée moyenne de 954 m. les altitudes dans bassin versant d'Oued Maleh varie entre 7 m et 800 m avec une altitude moyenne de l'ordre 315 m.

Les mesures d'élévation dans sont liées par au niveau moyen de la mer, les informations hypsométriques des bassins versant étudiées sont présentées dans le Tableau 2.2.

Ce tableau montre que la proportion la plus élevée du bassin versant d'Oued Saida (20,33%) appartient à la classe d'altitude 900-1000 m tandis que la proportion la plus faible concerne la classe 809-600 m.

Pour le bassin versant d'Oued Taria, la proportion d'altitude dominante (26,43%) est pour la classe d'altitude (1000-1100m) et la proportion la plus faible (0,74%) pour la classe d'latitude (466-500 m), et enfin pour le bassin versant d'Oued Maleh la classe d'latitude la plus dominante (100-200 m) avec une proportion de (21%) et la classe la plus faible est de (0,91%) pour la classe d'altitude (700-800 m) .

Tableau 2.2. Caractéristiques morphométriques des bassins versants de la zone d'étude.

Classe d'élévation	Superficie (ha)	(%)	Superficie cumulée (%)
Bassin versant d'Oued Saida			
506-600	22.25	3.89	3.892
600-700	81.45	14.24	18.14
700-800	109.01	19.06	37.21
800-900	107.81	18.85	56.06
900-1000	116.24	20.33	76.40
1000-1100	86.76	15.17	91.58
1100-1218	48.13	8.419	100
Bassin versant d'Oued Taria			
466-500	10.004	0.74	0.74
500-600	59.13	4.38	5.12
600-700	119.28	8.84	13.96
700-800	161.47	11.97	25.93
800-900	132.71	9.83	35.77
900-1000	155.36	11.51	47.29
1000-1100	356.53	26.43	73.72
1100-1200	264.7	19.62	93.34
1200-1328	89.73	6.65	100
Bassin versant d'Oued Maleh			
7-100	100.65	15.62	15.62
100-200	135.32	21.00	36.61
200-300	98.28	15.25	51.86
300-400	69.26	10.75	62.61
400-500	94.26	14.63	77.23
500-600	100.43	15.58	92.82
600-700	40.40	6.27	99.09
700-800	5.90	0.91	100.00

2.2.9 *Sous-bassins hydrologiques*

Le bassin versant d'Oued Saida est divisé en 25 sous-bassins hydrologiques (Figure 2.10). Les caractéristiques physiographiques de chaque sous-bassin sont présentées dans le Tableau 2.3. Ce tableau indique que le plus grand sous-bassin est le sous-bassin numéro 5, tandis que le plus petit est le sous-bassin numéro 11.

sous-bassin numéro 11. Le premier et le second représentent respectivement 12,49% et 1% du total du bassin versant total.

D'autre part le bassin versant d'Oued Taria est décomposé en 29 sous-bassins versant.

Et enfin, le bassin d'Oued el Maleh est situé dans la partie supérieure du bassin versant. Le bassin versant est composé de 25 sous-bassins (Figure 2.9).

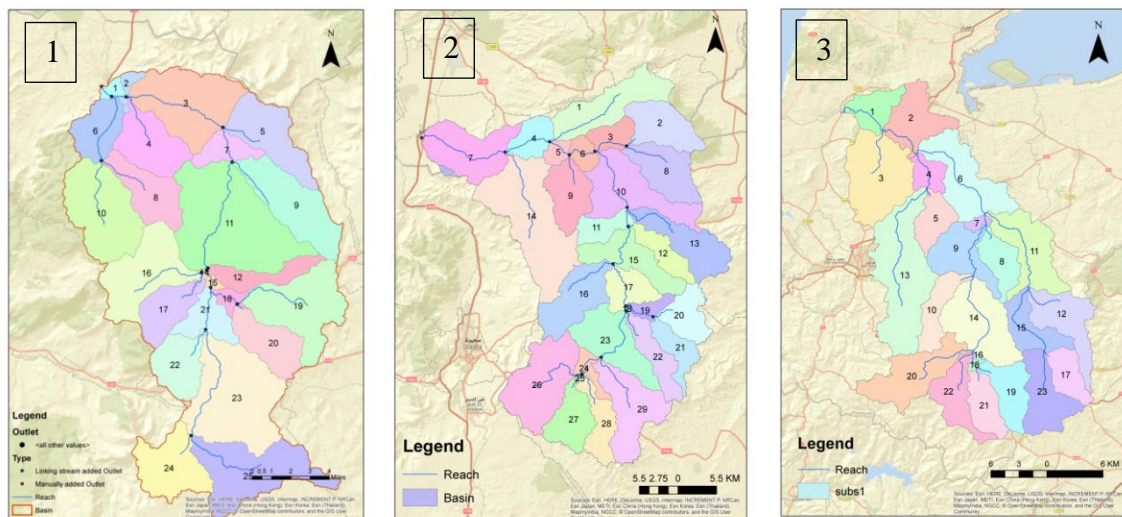


Figure 2.10. Cartes des sous-bassins hydrologiques des bassins versant d'Oued Saida(1), Oued Taria (2) et Oued Maleh (3).

2.2.10 Géologie des bassins versants pilotes choisis

Les bassins versant d'Oued Saida et d'Oued Taria font partie intégrante du bassin versant d'Ouzert.

La Figure 2.11 présente la carte géologique à l'échelle 1/500 000, elle indique que les roches présentes dans le bassin versant sont majoritairement d'origine sédimentaire. Des roches plutoniques, volcaniques et métamorphiques sont également cartographiées. L'âge des roches sédimentaires s'étend du Silurien au Pliocène.

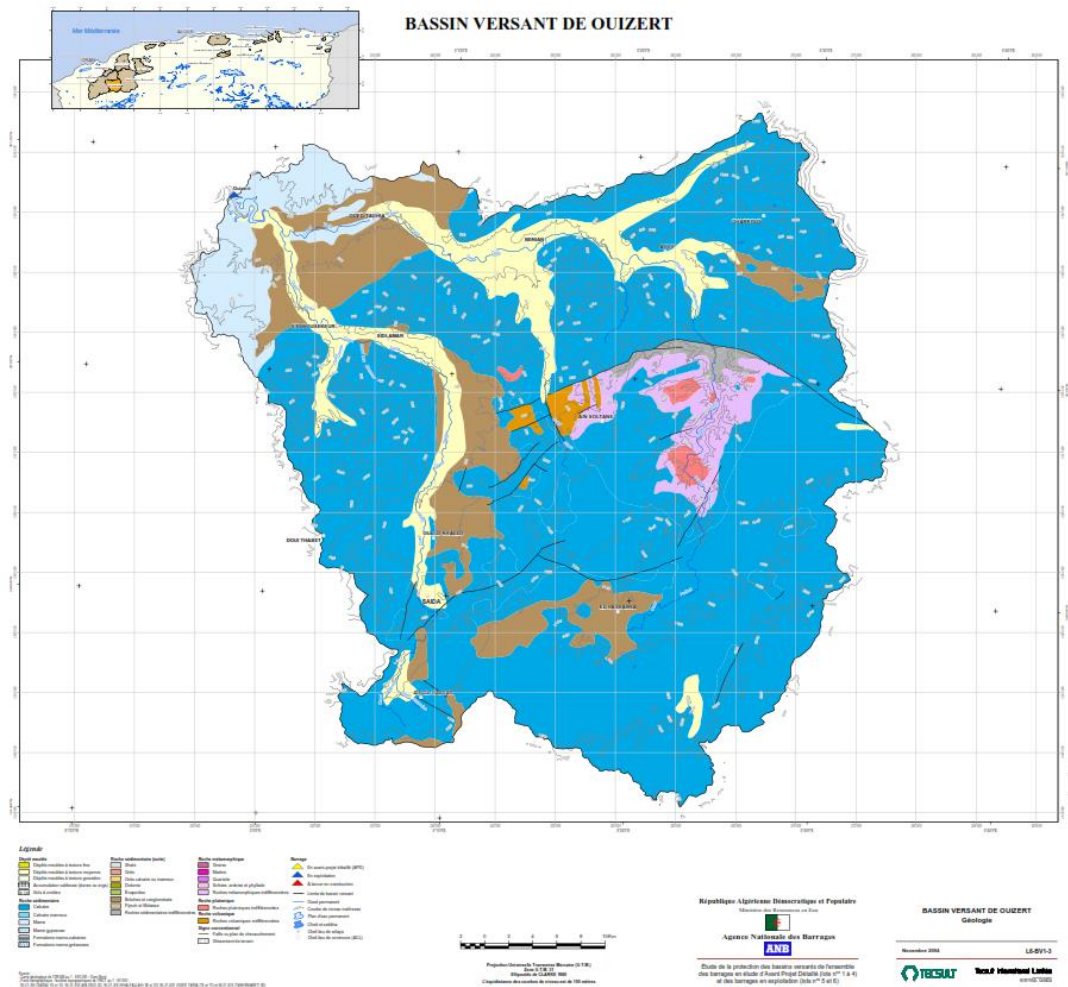


Figure 2.11. Carte géologique des bassins versant de Oued-Saida et Oued Taria (TECSULT, 2004)

Les dépôts quaternaires cartographiés sur la carte 1 : 500 000 sont localisés principalement le long des oueds. Ils sont interprétés comme dépôts quaternaires continentaux correspondant soit à des alluvions, des regs ou terrasses.

Dans ce rapport Neuf (9) lithologies ont été différenciées. Le pourcentage de la superficie Occupée par chaque formation dans le bassin versant est indiqué entre parenthèses.

Les formations répertoriées sont les marnes (50%), les brèches et conglomérats (10%), les formations marno-gréseuses (9%), les shale (6%), les roches sédimentaires indifférenciées (5%), les calcaires (4%), les grès (4%), les évaporites (1%), les roches plutoniques (<1%). Les dépôts meubles occupent environ 11% de la superficie du bassin versant. Les dépôts quaternaires sont majoritairement localisés le long des oueds.

D'autre part, et d'après (Benchouk, 2017) qui c'est basé sur les travaux de (Thomas, 1985) le bassin versant d'Oued Maleh fait partie du grand bassin versant Côtier-Oranais et du Tell septentrional où affleure différentes formations géologiques allant du Paléozoïque, au Quaternaire.

La région étudiée appartient au plateau d'Ain Témouchent qui correspond à une terrasse néogène et quaternaire, faiblement inclinée vers la mer à travers laquelle percent des îlots secondaires qui créent des accidents sur la topographie généralement calme.

Le long de sa bordure septentrionale, le plateau d'Ain Temouchent est bordé par une ligne de reliefs côtiers secondaires découpés en plusieurs pointements séparés par des étendues de formations néogènes.

2.2.11 Types de sol et classification

Nous avons utilisé les données de la carte mondiale des sols HWSD réalisé par l' Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), cette dernière fournit de nombreuses informations sur les paramètres des sols dans le monde entier, c'est une base de données contient des unités différentes de cartographie des sols qui combine les mises à jour régionales et nationales existantes des informations sur les sols.

Ces classes de sols et certaines de leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.3, la figure 2.5 présente la répartition des sols sur les bassins versants.

Tableau 2.3. Caractéristiques des sols des bassins versants étudiés, FAO (HWSD, 2009).

Type de sol	Profondeur (cm)	texture	pH	Matière organique	superficie	teneur en gravier
Bassin versant Oued Saida						
Bk2-2ab-1125	72	Limon	8	1.4		10
Jc14-2a-1343	100	Limono- argile	6.4	0.86		9
Bassin versant Oued Taria						
Bk2-2ab-1125	72	limon	8	1.4		10
Jc14-2a-1343	100	Limono- argile	6.4	0.86		9
Bassin versant Oued Maleh						
Zo7-3a-391	100	Argile légère et limon	8.1	0.42		6
Bc6-2ab-1078	100	limon	6.6	0.98		10
Bc7-22ab-1080	81	limon	6.8	0.4		9
Bk6-2-3a-1135	100	Limon et Argile légère	8	0.63		10

2.2.12 *Caractéristiques des bassins versant pilote*

- **station hydrométriques d'Oued Saida (Sidi Boubekeur)**

Elle est localisée en amont du barrage d'Ouizert au niveau de la ville de Siki Boubekeur, elle draine Oued Saida composé principalement de maquis et foret mais aussi de l'arboriculture et de la céréaliculture, les rives de la station sont en plein milieu urbain, elle porte le code 11-11-29 de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH).

- Latitude : 35° 1'37.36"N
- Longitude : 0° 3'19.76"E

- Altitude : 525 mètre.

- **station hydrométriques d'Oued Taria (Oued Taria)**

C'est la station exutoire du sous bassin d'oued Taria, elle est localisée à l'intérieur de la ville de Oued Taria. Les rives de la station sont riches en champs de Blé, en vergés, arbres fruitiers (Oliviers) et en cultures maraîchères, elle porte le code 11-12-01 de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH).

- Latitude : 35° 6'53.55"N

- Longitude : 0° 5'18.74"E

- Altitude : 477 mètre.

- **station hydrométriques d'Oued Maleh (Tugot)**

C'est la station exutoire du sous bassin d'oued Maleh, elle est localisée en amont du village de Tergat, elle débouche sur la mer méditerranée, Les rives de la station sont riches en champs de Blé, en vergés, arbres fruitiers (vignes) et en cultures maraîchères, elle porte le code 04-02-20 de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH).

- Latitude : 35°27'0.24"N

- Longitude : 1° 9'37.56"W

- Altitude : 20 mètres.

CHAPITRE III
DONNEES ET METHODES

Chapitre III : Données et Méthodes

3.1 Données utilisées

Un cadre globale de la méthodologie employée dans cette étude est illustré à la figure 3.1. Six principaux ensembles de données d'entrée ; un modèle numérique d'élévation (DEM), une carte d'utilisation des terres, une carte des sols, des données climatologiques et des données de jaugeage ont été recueillies et traitées. Une brève description de ces ensembles suit:

1. Modèle numérique d'élévation (DEM) à partir d'une image radar avec une résolution de 30 m de l'United State Geological Survey (USGS, 2000).
2. Images satellites Landsat (1987 et 2001) avec une résolution de 30 m et image satellitaire pour la détection des changements d'utilisation des sols.
3. Une carte des sols établie par l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), (HWSD, 2000). La carte des sols a classé les sols de la zone d'étude en plusieurs classes.
4. Des données climatiques quotidiennes sur les précipitations ont été fournies par l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH). Cet ensemble de données, dérivé d'un total de 2 postes pluviométriques couvrant le bassin versant de Oued Saida et deux postes pluviométriques pour le bassin versant de Oued Taria ainsi que trois postes pluviométriques pour le bassin versant de Oued Turgot.
5. Les données (CFSR Global Weather Data) incluent les données journalières des températures, le rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'humidité relative et le point de rosée, télécharger sur le site Web W3S-Water.
6. Débit fluvial journalier jaugé au niveau de plusieurs stations hydrométriques (ANRH). Ces données ont été mesurées à partir des stations de Sidi Boubekour, d'Oued Taria et de Turgot village.

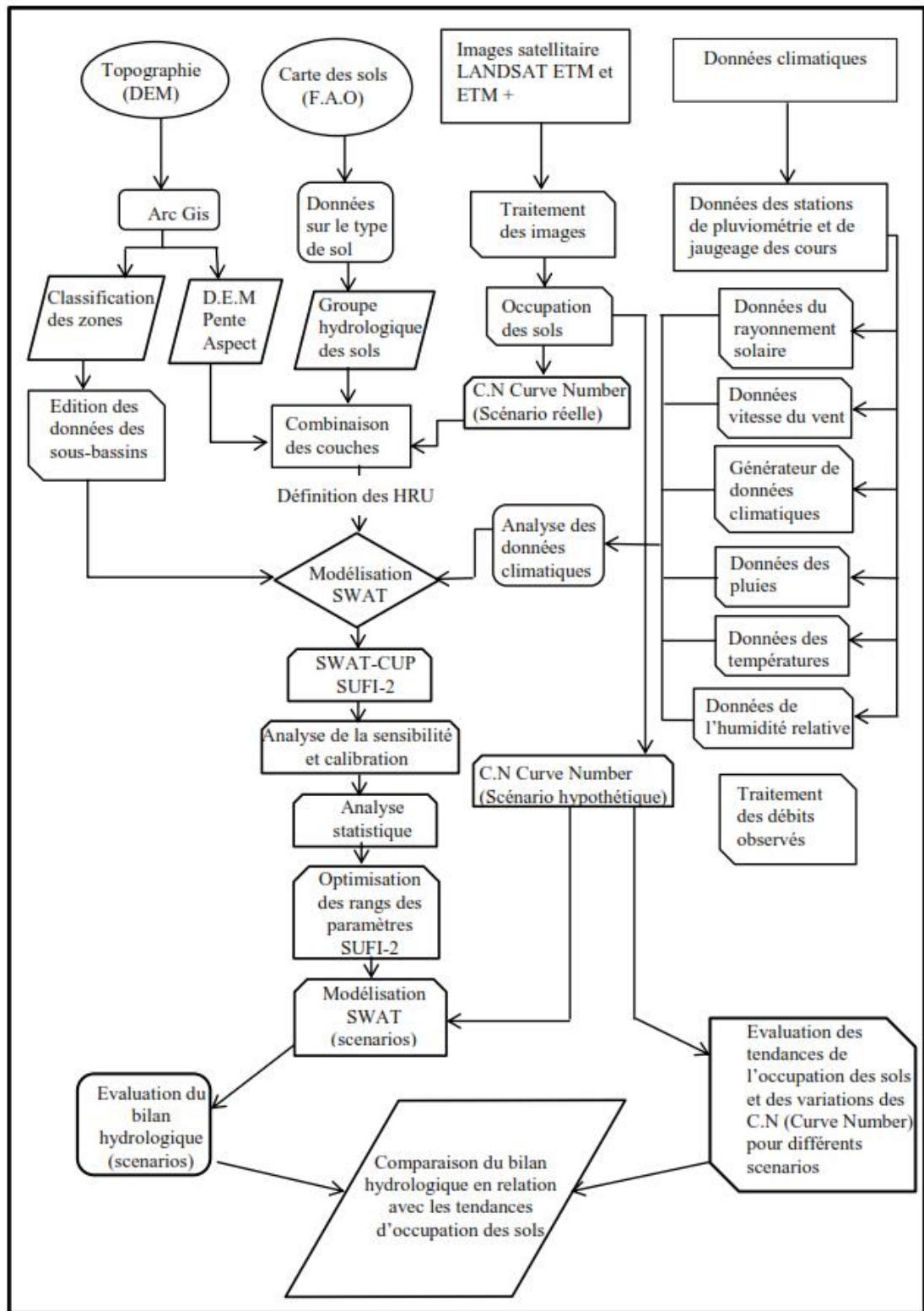


Figure 3.1. Organigramme général de la méthodologie adoptée

3.2 Débit de base et débit de surface

Le modèle SWAT s'est avéré performant dans les simulations de débit et de débit de base dans le monde entier et dans des bassins versants complexes avec des événements extrêmes.

Dans chaque HRU, la classe de courbe du Soil Conservation Service (SCS) et l'infiltration Green-Ampt ont été adaptés pour calculer le ruissellement de surface en utilisant les précipitations quotidiennes (Hosseini, 2010).

En outre, SWAT subdivise le système d'eaux souterraines en aquifères confinés profonds, qui contribuent à l'écoulement en dehors du bassin versant, et les aquifères non confinés peu profonds, dans lesquels les eaux souterraines et le débit de base retournent au cours d'eau selon l'équation 3.1 (Aboelnour et al. 2020).

$$S_{wt} = S_{w0} + \sum_{k=0}^n (R_{Day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{Gw}) \quad 3.1$$

où S_{wt} est le taux d'eau final du sol en mm ; S_{w0} présente le taux initial d'eau dans le sol (mm) ; t est le temps en jours ; R est la quantité de précipitations (mm) ; Q_{surf} est la quantité de ruissellement de surface (mm), E_a est la quantité d'évapotranspiration (mm) ; W_{seep} est la quantité d'eau en mm entrant dans la zone vadose à partir du profil du sol ; et enfin, Q_{Gw} est la quantité de retour flow (mm) au cours d'eau ou débit de base (Cunge, 1969).

La simulation des processus hydrologiques peut être séparée en deux phases : la phase « sous-bassin » et la phase « transfert ». La première phase de la modélisation consiste à simuler la quantité d'eau, de sédiments, de nutriments et de pesticides arrivant au cours d'eau principal de chaque sous-bassin versant. Les processus modélisés peuvent être classés dans différents modules : le climat (précipitations, températures, ensoleillement, humidité, vent, température du sol), l'hydrologie (interception par les végétaux, infiltration, redistribution, évapotranspiration, flux latéral de subsurface, ruissellement de surface, réservoirs, ...), la croissance des cultures, l'érosion / la sédimentation, les nutriments, les pesticides et les pratiques culturales. Les « sorties » obtenues pour chaque HRU sont sommées ou pondérées pour chaque sous-bassin, et les résultats sont restitués à chaque exutoire de sous-bassin (Andro, 2020)

Le processus de séparation du débit de base, également appelé analyse des hydrogrammes, vise à diviser les enregistrements de débit en deux composantes principales : le ruissellement et le débit de base, les méthodes basées sur les filtres sont de plus en plus acceptées et appliquées. Elles sont

relativement faciles à documenter et à reproduire, et correspondent généralement à des enregistrements de débit. Elles correspondent généralement à des enregistrements de débit de base mesurés ou séparés manuellement, correctement calibrés.

La méthode est basée sur une séparation adéquate (Lyne and Hollick, 1979). Selon cette méthode, les ondes hautes fréquence sont associées au ruissellement direct, tandis que les ondes à basse fréquence peuvent être associées à la composante de l'écoulement de base. L'équation (3.1) donne le filtre numérique utilisé pour la séparation du débit de base tel qu'il a été mis en œuvre dans plusieurs études (Arnold and Allen, 1999; Hosseini, 2010)

$$q_t = \alpha \times q_{t-1} + \frac{(1+\alpha)}{2} \times (Q_t - Q_{t-1}) \quad 3.2$$

Où Q_t est le débit au pas de temps t , q_t est le débit de base, et α est le paramètre de filtrage associé au bassin versant.

Le paramètre ALPHA_BF qui sert à limiter la plage de ce paramètre dans la modélisation SWAT.

3.3 Données climatologiques

3.3.1 Climat

Les bassins versant d'Oued Saida et Oued Taria font partie intégrante du bassin versant de Ouizert, ils sont soumis à un climat semis aride, Concernant le bassin versant d'Oued Maleh et d'après l'étude climatique la région d'Ain Temouchent effectué par (Benchouk, 2017) en se basant sur les données météorologiques recueillies auprès de l'Institut de Technologie Moyen Agricole Spécialisé (I.T.M.A, Aïn Temouchent), le bassin versant est caractérisée par un climat méditerranéen humide avec un hiver relativement froid et pluvieux et un été chaud et sec.

La température moyenne annuelle est d'environ 18,04 °C. Le mois le plus chaud est Août avec une température moyenne de 26,84 °C.

Le régime général des pluies est celui des zones semi-arides d'après l'indice de De.Martonne.

Il est caractérisé par des précipitations d'hiver avec un maximum enregistré en mois de Novembre de 60,4 mm, et une période sèche, pratiquement sans pluie s'étendant de la mi-mai jusqu'à la mi-octobre.

3.3.2 *Le régime climatique*

Afin de déterminer le type de climat des zones étudiées, les méthodes de (Martonne, 1926) a été utilisée.

La méthode de De Martonne utilise la température moyenne (°C) et la quantité de précipitations (mm) pour classer le climat selon l'équation 3.3 (De Martonne, 1926) :

$$A_I = \frac{P}{\frac{[(T+10)+12p(t+10)]}{2}} \quad (3.3)$$

Où A_I est le coefficient de sécheresse, T est la température moyenne annuelle (°C), et P est la pluviométrie annuelle moyenne (mm), t est la température moyenne du mois le plus sec en (°C), et p est la précipitation du mois le plus sec en mm.

Le tableau 3.1 montre les classifications de la sécheresse basée sur l'indice d'aridité de De Martonne pour les bassins étudiés.

Tableau 3.1. Classification du climat en fonction de l'indice d'aridité de De Martonne.

Coefficient de De Martonne (A_I)	Classe climatique
≤ 5	Aride
5-12	Semi-aride
12-20	sec semi-humide
20-30	semi-humide
30-60	humide
≥ 60	humide

Pour l'estimation de cet indice, les données des stations de l'office national de la Météorologie (ONM) acquise auprès du site tutiempo.es ont été utilisés, les résultats sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Classification de l'indice d'aridité de De Martonne de zones étudiées pour l'année 2006.

Bassin versant	Station	Lat	Long	P	T	t	p	A _I
Oued Saida Oued Taria	ONM Saida	34.86	0.15	322.91	17.5°	26.6°	0	13.75
Oued Turgot	ONM Beni-Saf	35.3	-1.35	338.82	19.6°	26.3°	0	14.80

Dans cette étude, A_I est égal à 13,75 pour les bassins versants d'Oued Saida et Oued Taria, et pour le bassin d'Oued El Maleh il est de l'ordre de 14.80. Selon la méthode De Martonne, cela indique que les zones sont classées dans la classe de climat sec-subhumide, avec une légère humidité pour le bassin versant côtier d'Oued El Maleh.

3.3.3 *Température*

La station météorologique de Saida est la plus représentatif des bassins versant d'Oued Saida et d'Oued Taria, le site (Tutiempo Network, s. d.-b) Donne sur la période (2006-2010) la température moyenne annuelle est de 17,6 °C. Les valeurs température annuelle maximale moyenne et minimales moyennes sont respectivement de 24.18 °C et 10,24 °C. Le mois de janvier présente les plus basses températures, alors que les mois de juillet et août sont les mois les plus chauds.

D'autres part, la Station météorologique de Beni est représentatif du bassin versant d'Oued El Maleh, et selon (Tutiempo Network, s. d.-a) Sur la période (2008-2012), la température moyenne annuelle est de 19.94 °C. Les valeurs température annuelle maximale moyenne et minimales moyennes sont respectivement de 22.94 °C et 16,2 °C, ou le mois de janvier est le mois ayant les plus basses températures, tandis que les mois de juillet et août sont les mois les plus chauds.

Le contraste de températures entre les deux stations donne une idée sur le régime climatique régnant pour chaque bassin versant.

3.3.4 *L'humidité relative*

L'humidité relative annuelle moyenne des stations de Saida et Beni-Saf pour des données sur 5 années est indiquée dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3. L'humidité relative Annuelle moyenne aux stations météorologique de Saida (2006-2010) et Beni-Saf (2008-2012).

Station	Année	2006	2007	2008	2009	2010	Moyenne
Saida		57%	60%	60%	60%	60%	59%
Beni-Saf	Année	2008	2009	2010	2011	2012	Moyenne
		74 %	75%	74%	74%	71%	74%

Dans le tableau 3.3, nous remarquons que les bassins versant d'Oued Saida et Oued Taria sont soumis à une humidité qui oscille en 57 % et 60 %, en moyenne elle est de l'ordre de 59 %, d'autres parts, pour le bassin versant d'Oued El Maleh elle varie en 71% et 75% et en moyenne elle est de l'ordre de 74%.

L'analyse du tableau nous permet de constater le contraste d'humidité entre les deux zones climatiques, un climat plus humide au niveau du Bassin versant d'oued El Maleh situé en bord de la mer avec une moyenne annuelle de 74%, tandis que celui régnant au niveau des bassin versant d'Oued Saida et Oued Taria est plus sec avec une moyenne annuelle de 59 %.

3.4 Préparation des données Météorologique pour la modélisation

3.4.1 Les Précipitations

La pluie étant le principal élément précurseur des débits il est indispensable d'utilisé des données mesurés et réelles pour mener à bien notre modélisation, les séries de données utilisées dans ce travail proviennent de l'agence Nationale des ressources hydrique (ANRH) et l'office Nationale de la Météorologie. Nous avons utilisé les données de précipitation à l'échelle journalière pour le modèle exécuté le modèle SWAT. La période utilisée des données observées est de 1995 à 2005 pour les bassins versant d'Oued Taria et d'Oued el Maleh et de 1998 à 2005 pour le bassin versant d'Oued Saida, nous avons sélectionné la série de données et les stations climatiques, qui sont de l'ordre de cinq (tableau 3.4), ayant le moins de lacunes possible pour la période étudiée.

Tableau 3.4. Postes pluviométriques retenus

Bassin versant	Poste pluviométrique	Code station	Latitude	longitude	période	Pourcentage de lacunes
Oued Saida	Sidi Boubekeur	111102	35.03	0.05	1998-2005	4.14 %
	Ain Hadjar	111103	34.75	0.149		5.16 %
Oued Taria	Oued Taria	111201	35.11	0.09	1995-2005	0 %
	Beniane	111217	35.1	0.23		0.33 %
Oued Maleh	Hamam Bouhjar	040415	35.36	-0.96	1995-2005	2.51 %
	Chaabet Lham	040208	35.33	-1.1		9.32%

Les données manquantes seront reconstituées à l'aide de l'outil qu'offre le modèle SWAT. Il est doté d'un module permettant le comblement des lacunes dans les séries climatiques par le générateur de précipitation, température, la vitesse du vent l'humidité relative ainsi que la radiation solaire. SWAT utilise un modèle développé par (Nicks, 1974) pour générer des valeurs manquantes, le générateur de précipitations utilise un modèle de chaîne de Markov de premier ordre pour définir une journée de précipitations.

Le Module intégré dans SWAT Weather Generator (WGN) utilise un modèle à chaîne de Markov de premier ordre pour définir un jour comme humide ou sec en comparant un nombre aléatoire (0.0- 1.0) à un nombre de secondes aléatoire (0.0- 1.0) généré par le modèle aux probabilités mensuelles d'humidité et de sécheresse entrées par l'utilisateur. Si le jour est classé comme humide, la quantité de précipitations est générée à partir d'un modèle à distribution asymétrique ou à distribution exponentielle modifiée (Neitsch et al., 2011b). Les valeurs calculées des paramètres utilisés pour nos trois bassins versant sont donnés en annexe dans les tableaux (A.1, A.2, A.3), et les noms des variables sont donnés dans le tableau A.4 en annexe.

La répartition spatiale des postes pluviométriques utilisés dans cette étude sont représenté dans la figure 3.2.

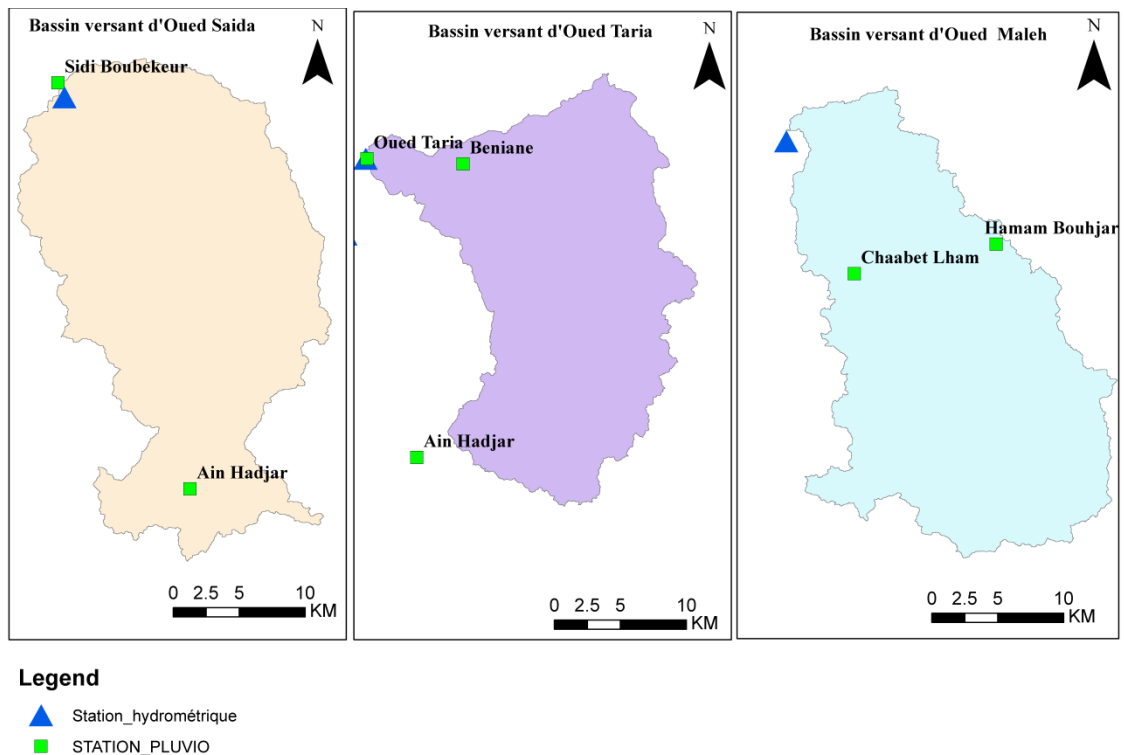


Figure 3.2 Localisation des postes pluviométriques et stations hydrométriques.

SWAT nécessite des valeurs journalières de précipitations, de températures maximales et minimales, du rayonnement solaire, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. L'utilisateur peut choisir de lire ces entrées à partir d'un fichier ou de générer les valeurs en utilisant des données moyennes mensuelles résumées sur un certain nombre d'années.

SWAT inclut le modèle de générateur de données climatiques WXGEN (Sharpley and Williams, 1990) pour générer des données climatiques ou pour combler les lacunes des enregistrements mesurés.

Les étapes de fonctionnement du générateur de données météo commence par générer d'abord indépendamment les précipitations pour la journée, une fois que la quantité totale de précipitations pour la journée est générée, la distribution des précipitations au cours de la journée est calculée si les conditions suivantes sont remplies la méthode (Green and Ampt, 1911) est utilisée pour l'infiltration.

La température maximale, température minimale, le rayonnement solaire et l'humidité relative sont ensuite générés en fonction de la présence ou de l'absence de pluie pour la journée.

Enfin, la vitesse du vent est générée indépendamment (Neitsch et al., 2011b).

Pour reconstituer les valeurs manquantes des précipitations, (XGEN Generator) utilise un modèle de chaîne de Markov de premier ordre, la probabilité de pluie pour un jour donné est conditionnée par l'état humide ou sec du jour précédent.

Ou un jour humide est défini comme un jour avec 0,1 mm de pluie ou plus.

La probabilité d'un jour humide le jour i , compte tenu de jour humide le jour $i - 1$, elle est noté P_i (W/W), et la probabilité d'un jour humide le jour i précédé par un jour sec du jour $i - 1$, P_i (W/D), pour chaque mois de l'année.

A partir de ces entrées, les probabilités de transition restantes peuvent être dérivées :

$$P_i (D/W) = 1 - P_i (W/W) \quad (3.4)$$

$$P_i (D/D) = 1 - P_i (W/D) \quad (3.5)$$

Il existe plusieurs fonctions de distribution de probabilité pour décrire la distribution des quantités de précipitations, deux options sont disponible dans le module WGEN generator de SWAT : une distribution asymétrique et une distribution exponentielle.

La distribution asymétrique a été proposée par (Nicks, 1974) et est basée sur une distribution asymétrique utilisée par (Fiering, 1967) pour générer un débit représentatif.

L'équation utilisée pour calculer la quantité de précipitations lors d'une journée humide est la suivante :

$$R_{Day} = \mu_{Month} + \sigma_{Month} \left[\frac{\left(\left[\left(\text{SND}_{Day} - \frac{G_{Month}}{6} \right) \left(\frac{G_{Month}+1}{6} \right) \right]^3 - 1 \right)}{G_{Month}} \right] \quad (3.6)$$

Où R_{Day} est la quantité de pluie tombée un jour donné (mm), μ_{Month} est la moyenne des précipitations quotidiennes (mm) pour le mois, σ_{Month} représente l'écart-type des précipitations quotidiennes (mm) pour le mois, SND_{Day} est l'écart-type normal calculé pour le jour, et G_{Month} est le coefficient d'asymétrie pour les précipitations quotidiennes du mois.

L'écart normal standard de la journée est donné par la formule 3.7:

$$\text{SND}_{Day} = \cos(6.283 \cdot \text{rnd}_2) \cdot \sqrt{-2 \cdot \text{Ln}(\text{rnd}_1)} \quad (3.7)$$

Ou rnd_1 et rnd_2 des nombres aléatoires compris entre 0,0 et 1,0.

Cette méthode sera utilisé pour générer les valeurs manquantes des précipitations seront comblées.

3.5 CFSR Global Weather Data

La base de données climatiques Réanalyse du système de prévision climatique (CFSR) mise au point par The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Elle a été réalisée sur une période de 36 ans, de 1979 à 2014. Le CFSR a été conçu et exécuté comme un système global de haute résolution, couplé atmosphère-océan-surface terrestre-glace de mer pour fournir la meilleure estimation de l'état de ces domaines couplés sur cette période.

(Dile and Srinivasan, 2014; Fuka et al., 2014) ont prouvé l'efficacité de cette base de données comme données d'entrée pour la modélisation hydrologique SWAT. Ils ont utilisé cette base de données comme inputs ou variables d'entrée pour prouver sa capacité de reproduire et modéliser l'écoulement des eaux de surface dans plusieurs bassins versant de par le monde, comme celui de Town Brook d'une superficie 37 Km² situé dans l'état de New York au états unies, et bassin versant Km² de Gumera en Ethiopie d'une superficie de 1200. Ces études ont mis en évidence la capacité de la base de données climatique CFSR à reproduire à bien les écoulements de surface.

Dans notre travail de modélisation, nous n'avons pas pu disposer de données mesurées de températures, humidité relative, rayonnement solaire et de la vitesse du vent nécessaire à notre modélisation, ainsi nous avons eu recours à cette base de données mise à la disposition des utilisateurs gratuitement sur le site (<https://swat.tamu.edu/data/cfsr>).

3.6 Télédétection et traitement numérique des images satellitaires

La télédétection permet l'acquisition d'informations sur un phénomène/objet ou une surface tout en étant à distance de celui-ci. La technologie de la télédétection permet de recueillir des données sur la surface de la terre à des échelles spatiales, spectrales et temporelles différentes. Les données spatiales comprennent l'utilisation du sol, la couverture végétale, le sol, la topographie, etc. Dans la plupart des cas, les données de télédétection sont directement utilisées pour la modélisation hydrologique en extrayant des variables d'entrée telles que LULC, l'humidité du sol, les précipitations, l'évapotranspiration (ET), etc. par le traitement numérique des images.

Un système d'information géographique (SIG) est un outil qui aide à gérer, intégrer, d'analyser et de manipuler l'information spatiale, y compris les données de télédétection, selon les besoins de l'utilisateur (Fulaji, 2016).

Une carte d'occupation du sol représente la couverture (bio) physique observée sur la surface de la zone étudiée, et est confinée à décrire la végétation et les constructions humaines. Elle se différencie de la carte d'utilisation du sol qui reprend les arrangements, les activités et les actions que les hommes effectuent pour produire, changer ou maintenir certaines parties de terre (Nghiem, 2014).

Le principe général de la classification des images satellitaires est de faire correspondre les pixels ayant les mêmes propriétés à une catégorie qui définit le type d'occupation du sol. Dans le cas d'une classification supervisée, les catégories (légende de la carte) doivent être prédéfinies. Cette légende doit présenter un langage standard et générique, mais elle doit également présenter les critères scientifiques, les objectifs de l'étude (Hardy and Anderson, 1973).

Anderson et al. (1976, 1971) ont défini les conditions nécessaires à l'utilisation des images satellitaires afin de déterminer les grandeurs physiques ou biophysique ; elles doivent avoir un niveau minimum d'exactitude d'interprétation dans l'identification de l'utilisation des terres et des catégories d'occupation du sol à partir des données de télédétection. Celui-ci doit être supérieur à 85 % ; une précision de l'interprétation pour les différentes catégories qui doit être à peu près égale au seuil précédent ; un système de classification adapté pour l'analyse diachronique des données satellites multi-temporelles ; il est également importante d'utiliser les autres données obtenues à

partir des levés au sol ou des cartes à plus grande échelle pour l'amélioration des résultats de classification ;

Nous avons utilisé les images Landsat pour la cartographie de l'occupation des sols et du couvert végétal. L'analyse concerne quatre scènes pour les années 1987, 2001 pour chaque bassin versant. Ces images sont acquises à partir des sites de USGS (United State Geological Survey) (*EarthExplorer*, s. d.). Nous avons retenu des images acquises pendant la saison de printemps (tableau 3.5) où le développement de la couverture florale est assez développé et distinction des différentes classes de couverture des sols. Ces images se caractérisent par une couverture nuageuse quasi nulle. Les données des satellites Landsat-4 et 7 utilisées correspondent à des images multi-spectrales de 30 m de résolution spatiale.

Selon Kergomard (2000) et d'une manière générale, nous pouvons affirmer que la pratique d'un traitement radiométrique incluant la correction atmosphérique n'est pas nécessaire, et même parfois gênante quand l'utilisation d'une seule image fondée sur l'interprétation ou l'analyse visuelle, avec ou sans travail préliminaire d'amélioration de l'image, et l'ors de la pratique des classifications dirigées à partir d'échantillons pris sur l'image à classer. D'autres part, Kamal et al. (2020) ont étudié l'impact des niveaux de correction radiométrique des images Landsat sur les cartes d'occupation du sol résultant de la classification de maximum de vraisemblance. Les résultats obtenus de cette étude montrent qu'il n'y a pas de différence dans les résultats de classification de chaque niveau de correction, tant au niveau de la surface que de la distribution des classes. Cette constatation indique que le résultat de la classification maximum de vraisemblances est invariable du niveau de correction de l'image.

Tableau 3.5. Liste des Images Landsat retenues

Bassin versant	Satellite	Date d'acquisition	Bandes spectrales utilisés	Taille du pixel
Oued Saida	Landsat 5 TM Path=197 Row = 36	25-041987	1-2-3-4-5-6	30*30
	Landsat 7 ETM Path=197 Row = 36	26-04-2002	1-2-3-4-5-6-7	30*30
Oued Taria	Landsat 5 TM Path=197 Row = 36	25-041987	1-2-3-4-5-6	30*30
	Landsat 7 ETM Path=197 Row = 36	26-04-2002	1-2-3-4-5-6-7	30*30
Oued Maleh	Landsat 5 TM Path=198 Row = 36	16-04-1987	1-2-3-4-5-6-7	30*30
	Landsat 7 ETM Path =198 Row= 036	17-04- 2002	1-2-3-4-5-6-7	30*30

Le traitement des images satellitaires a pour but d'améliorer la qualité de celle-ci tandis que la classification est un processus d'attribution des pixels d'une image à des classes (catégories) de l'occupation du sol (Bektas and Goksel, 2005).

Les bandes varient de 0,45 à 12,50 μm . Les bandes rouge, proche infrarouge (NIR) et moyen infrarouge (MIR) sont utiles pour détecter la chlorophylle, la végétation, l'humidité du sol, l'eau et la structure des feuilles. La végétation apparaît plus probablement sur l'image satellite dans la bande 0,7 μm 0,9 μm (Hosseini, 2010).

La méthodologie adoptée dans notre travail est illustrées dans la Figure (3.3). Elle consiste à Les données satellitaires utilisées par cette recherche ont été fournies par l'Organisation Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS).

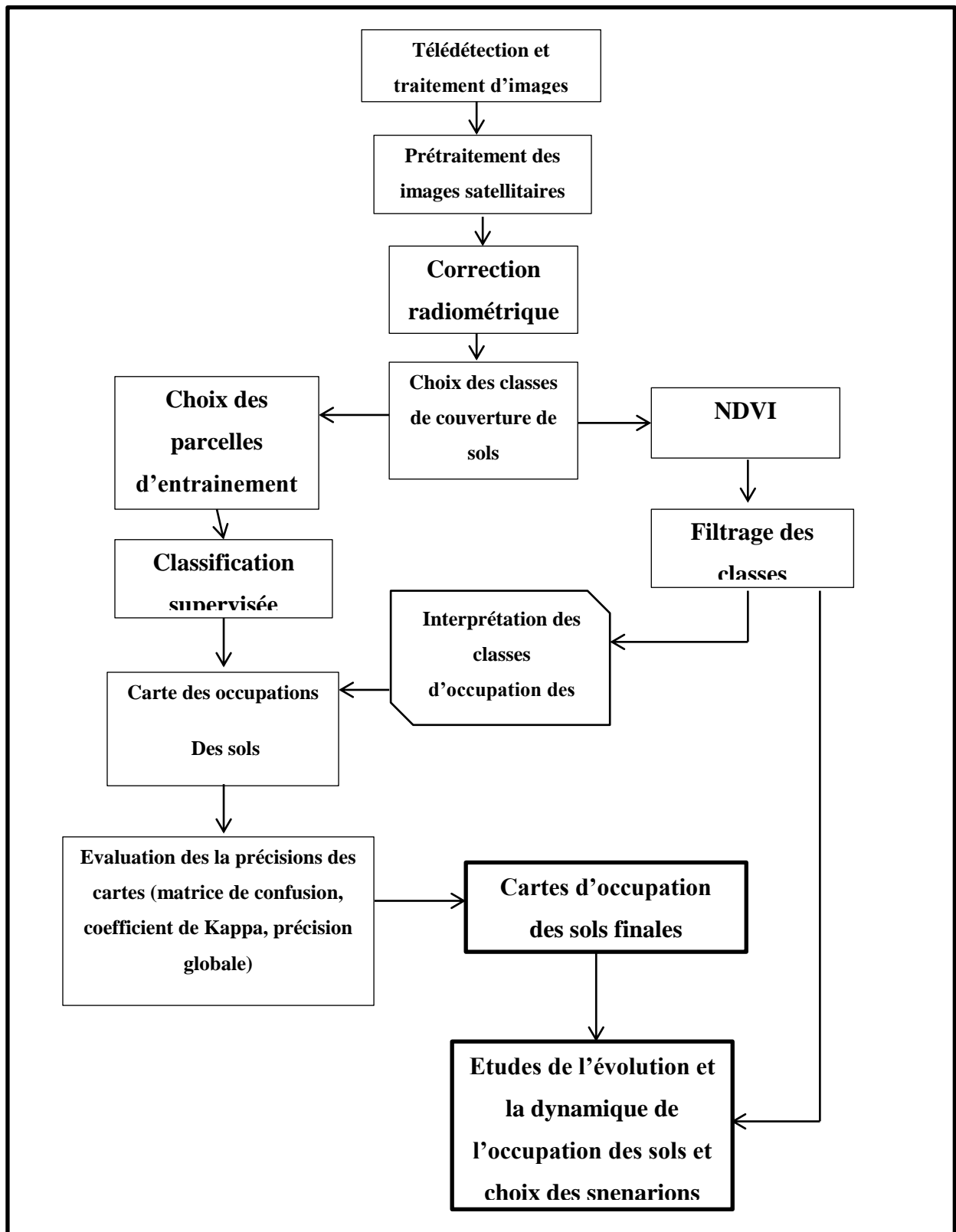


Figure 3.3. Organigramme général pour la chaîne de modélisation de l'occupation des sols

Un travail de prétraitement incluant la correction géométrique a déjà été réalisé par les analystes de l'USGS, ces images ont subi les corrections radiométriques et géométriques partielles (sans corrections atmosphériques) grâce à l'usage d'un modèle numérique de terrain (MNT). Ce prétraitement correspond au niveau L1TP (USGS, 2019). Par ailleurs nous avons effectué un traitement des images pour les corrections radiométriques. Les techniques de post-traitement de base, y compris le filtrage et l'amélioration, ont également été réalisées par le fournisseur. Enfin, une méthode de classification supervisée appuyées par et des observations de classes sur Google-Earth ont été mis en œuvre pour la validation classification de l'occupation des sols sur les images datant de 1987 et 2002 séparément pour tous les bassins versants (Figures 3.4, 3.5 et 3.6).

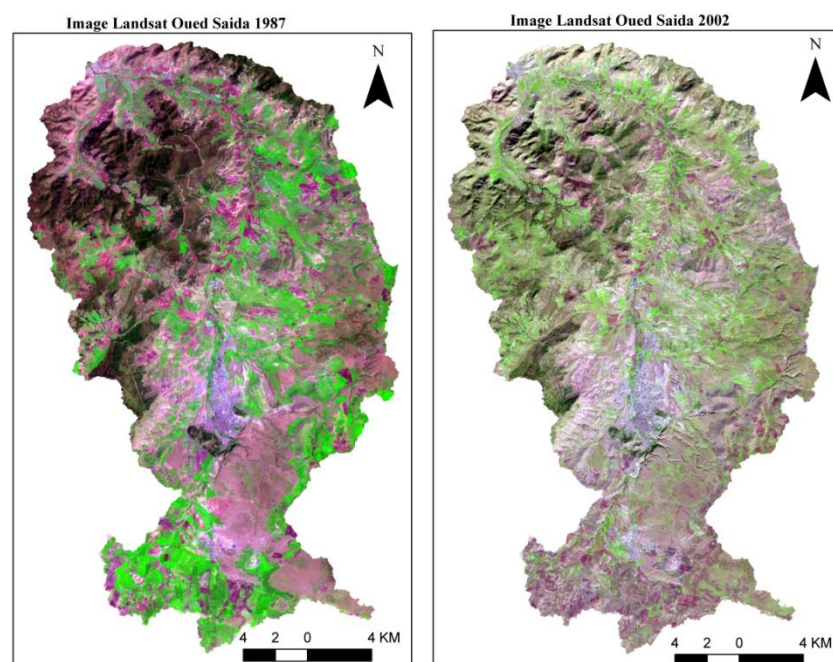


Figure 3.4. Images satellitaires Landsat (1987 et 2002) bassin versant d'Oued Saida

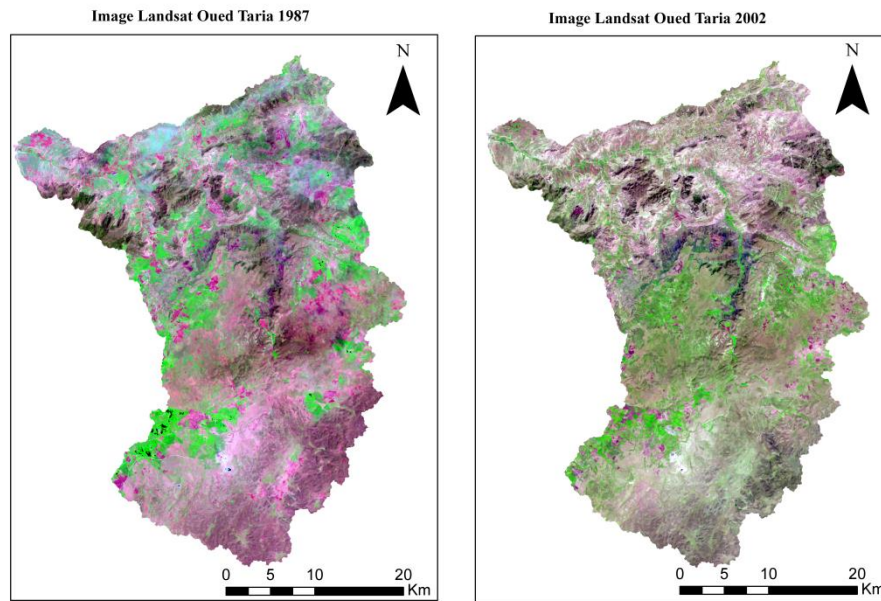


Figure 3.5. Images satellitaires Landsat (1987 et 2002) bassin versant d'Oued Taria

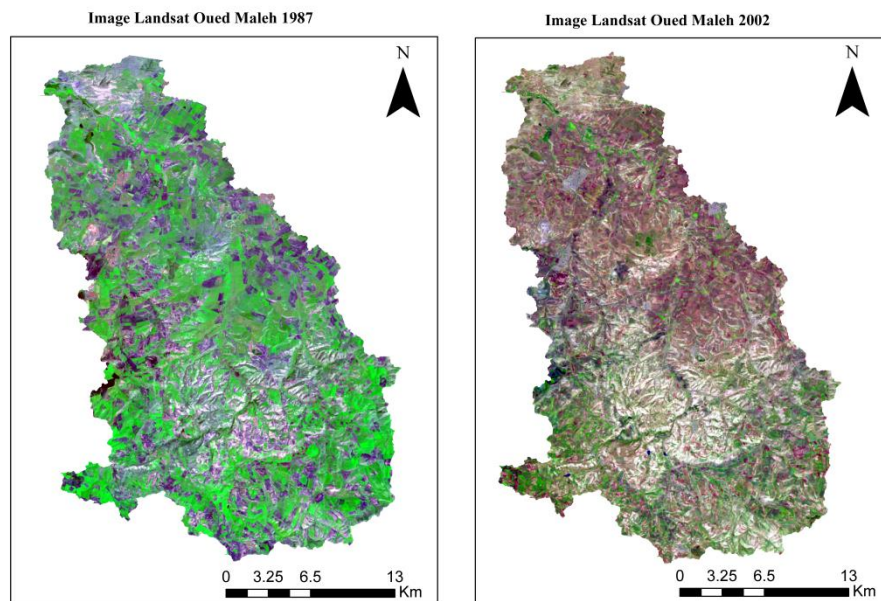


Figure 3.6. Images satellitaires Landsat (1987 et 2002) bassin versant d'Oued Maleh

Tout d'abord, nous avons effectué un post-traitement des images satellitaires en utilisant l'indice végétatif de différence normalisée (NDVI), par la suite une classification supervisée par maximum de vraisemblance est effectué. Le NDVI a été calculé dans cette étude comme suit :

$$NDVI = \frac{P.I.R - Rouge}{P.I.R + Rouge} \quad (3.8)$$

L'équation ci-dessus revient à soustraire l'intensité (P.I.R) représentant la bande 3 de celle du (Rouge) représentant la bande 4 et à la proportionner à la somme des intensités de ces bandes. Les valeurs négatives de NDVI (valeurs approchant -1) correspondent à l'eau. Les valeurs proches de zéro (-0,1 à 0,1) correspondent généralement aux régions arides avec de la roche, du sable ou de la neige. Enfin, des valeurs positives et faibles représentent des arbustes et des pâturages (environ entre 0,2 et 0,4), tandis que les valeurs plus élevées indiquent les forêts pluviales tempérées et tropicales (valeurs approchant 1) (*Measuring Vegetation (NDVI and EVI)*, 2000).

En deuxième lieu une classification supervisée des images est effectuée, l'algorithme utilisée est celui du maximum de vraisemblance. Cette dernière est basée sur l'hypothèse de la continuité de l'espace de propriétés de l'image globale (Nintarakit, 1989).

L'algorithme de Maximum de Vraisemblance est basé sur la théorie des probabilités bayésiennes ; il est un des algorithmes le plus utilisés pour la classification supervisée (J. Ronald Eastman, 2003). Il utilise des échantillons pour déterminer les caractéristiques des catégories de l'occupation du sol, qui deviennent des centres dans l'espace multi-spectral. Autrement dit, au lieu d'affecter un vecteur spectral à la catégorie dont le centre de gravité est le plus proche, elle se base sur une analyse statistique de la distribution des vecteurs spectraux de l'échantillon pour définir des zones de probabilité équivalente autour de ces centres. La probabilité d'appartenance à chacune des classes est calculée pour chaque vecteur spectral et le vecteur est affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus élevée. Un avantage considérable de cette méthode est qu'elle fournit pour chaque pixel, en plus de la classe à laquelle il a été affecté, un indice de certitude lié à ce choix (Nghiem, 2014).

La classification par maximum de vraisemblance est basée sur la règle de décision de maximum de vraisemblance de Bayes (Richards and Jia, 2006). Hasyim et al. (2011) donne cette relation par la formulation suivante:

$$P(x_i/w_j)^n = \frac{1}{\sqrt{2\pi^p} \sqrt{|C_j|}} \exp\left(-\frac{1}{2} x(x_i - u_j)^T \times C_j^{-1} \times (x_i - u_j)\right) \quad (3.9)$$

Où:

- C_j : Matrice de covariance de la classe w_j avec la dimension p ;
- μ_j : le vecteur de la classe w_j ;
- x : désigne le déterminant ;
- $P(x_i, w_j)$: la probabilité de la coexistence [ou intersection] des événements x et w ;
- $[x_i - \mu_j]^T$: vecteur transposé $[x_i - \mu_j]$.

L'application de cette règle, permet de savoir si l'échantillon de l'image est affecté à une certaine classe, si la distance entre les valeurs des paramètres de cet échantillon et la valeur moyenne de la classe est maximale. Cette règle n'est pas basée sur la physique des mécanismes de diffusion et permet de classifier des images indépendantes (Richards and Jia, 2006, p. 200).

La figure 3.7 illustre le diagrammes de dispersion pour comparer les multiples échantillons d'entraînement pour chaque combinaison de bande unique de la couche d'image des différentes classes d'occupation des sols du bassin versant d'oued Maleh pour l'année 1987, nous avons utilisé les bandes composites fausses couleurs 5, 4 et 3 pour l'interprétation visuelle de toutes les images recueillies. le nuage de points vous a permis de voir la séparabilité et la distribution de nos échantillons d'entraînement, l'interprétation visuelle de ces images nous a permis de constater la séparabilité des classes avec peu de chevauchement entre les classes. Enfin, les différentes utilisations du sol, c'est-à-dire les zones bâties et urbaines, l'agriculture, les terres en labour, les forêts mixtes, les sols nus et dégradées, ont été extraites en utilisant un ensemble d'échantillons initiaux et de la méthode du maximum de vraisemblance (MLC).

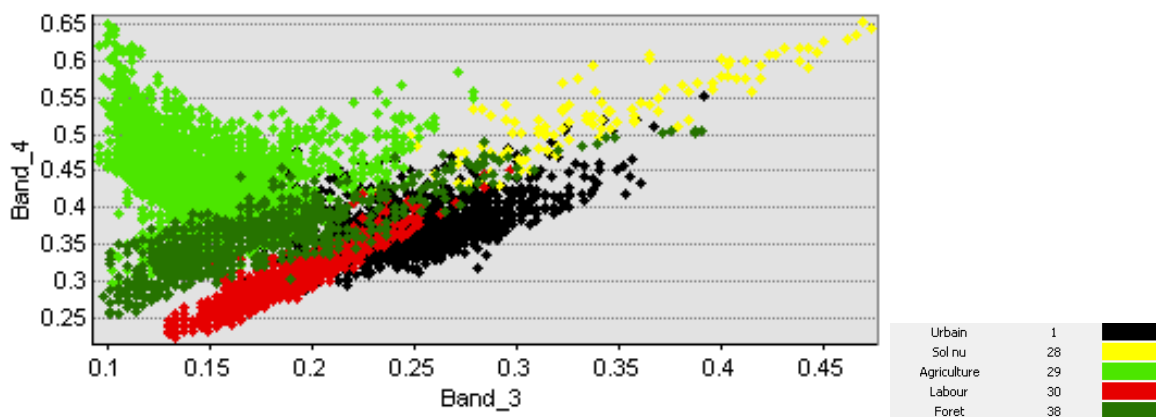


Figure 3.7. Diagramme de dispersion des classes d'occupation des sols du bassin versant d'Oued Maleh 1987.

Les diagrammes des autres bassins versants pour les différentes années sont donnés en Annexe (B.1, B2, B3, B4, B5).

Les cartes d'utilisation des terres de zones étudiées ont été créées en utilisant des images TM, ETM des années 1987 et 2002 par le logiciel ArcGis. Les classes d'utilisations des terres ainsi que leurs codes, sont les suivants :

- Urbain ;
- Agriculture ;
- Labour ;
- Sols nus ;
- Foret ;

3.7 Précision de la classification des images

Lillesand et al. (1994) affirment qu'une classification d'image satellitaire n'est pas complète tant que sa précision n'est pas évaluée. Pour l'évaluation de sa précision, il est nécessaire de savoir que la qualité de tout résultat qui est que les informations utilisées pour établir les "vrais" types d'occupation du sol présents sur le terrain.

Il n'est pas rare que la précision des données de référence soit influencée par facteur tel que les changements dans la couverture terrestre entre les données de l'image classifiée et les données de référence (Gibson and Power, 2000).

Pour évaluer la précision de la classification des images, il est courant de créer une matrice de confusion. Dans une matrice de confusion, les résultats de la classification sont comparés à informations de la vérité de terrain. La force d'une matrice de confusion réside dans le fait qu'elle identifie.

3.8 L'interface SIG

L'interface S.I.G a été utilisée dans cette étude pour simuler SWAT pour les différents bassins versants a été utilisé pour entrer, éditer et simuler le modèle. L'interface S.I.G fournit un support de données adéquat et efficace à SWAT, grâce à plusieurs modules qui offrent une gamme complète de fonctionnalités via plusieurs modules qui offrent une gamme complète de capacités de manipulation d'entrée/sortie conviviales et interactives afin d'éditer les données d'entrée/sortie conviviales et interactives afin d'aider l'utilisateur à effectuer un certain nombre de différentes tâches lors de la mise en place du modèle (Arnold et al., 2013).

Le modèle SWAT est le résultat de plus de 30 années de développement au niveau du département de l'agriculture et des laboratoires de l'université de Texas A and M (Krysanova and White, 2015) aux Etats Unis. De plus, son caractère « Open source » ouvre des horizons d'adaptation du modèle à d'éventuelles spécificités du milieu étudié. Couches d'informations géographiques. Cette implémentation est facilitée par l'utilisation d'ArcSWAT, module ArcGIS disponible gratuitement sur le site internet de la TAMU.

Arcswat permet de crée des couches cartographiques et de les combiner sous un environnement ArcGIS, et aussi les combiner avec des fichiers de base de données qui doivent être préparés selon un format spécifique Txt, les combinaisons de ces information seront répertoriés et forme une base de données (dbf).

Arc Hydro est une technologie de pointe de système de gestion de base de données relationnelle géo-spatiale (SGBDR) pour l'intégration de l'hydrographie et de l'hydrologie avec les SIG. Arc Hydro est un modèle de données géospatiales et temporelles pour les ressources en eau conçu pour fonctionner dans ArcGIS. Un modèle de données se distingue d'un modèle de simulation en ce sens qu'il fournit un cadre standardisé pour le stockage des informations, mais ne contient pas de routines pour simuler les processus hydrologiques. Le modèle de données est généralement couplé à un ou plusieurs modèles de simulation, les données et les informations étant transférées d'Arc Hydro vers un modèle et les résultats étant renvoyés vers Arc Hydro. Arc Hydro fournit donc un moyen de relier les modèles de simulation par un système commun de stockage des données. Arc Hydro Tools est un ensemble d'outils ArcGIS qui exerce le modèle Arc Hydro. Il remplit divers champs dans une géodatabase Arc Hydro pour un bassin fluvial à partir d'un modèle numérique du terrain (DEM) (Shamsi, 2008).

L'interphase GIS permet d'effectuer les tâches suivantes :

- Délimiter les sous-bassins versants et définir les HRU à l'aide d'un modèle numérique d'élévation (DEM), et des cartes d'utilisation des terres et des sols.
- Modifier les sols, les stations météorologiques, les HRU, les eaux souterraines, la gestion des sols, des stations météorologiques, des HRU, des eaux souterraines, de la gestion des terres, de la croissance des plantes, de l'utilisation des terres urbaines, du travail du sol, des engrais et des pesticides.
- traiter les données manquantes dans les stations pluviométriques et synoptiques en les recréant. données manquantes.
- Définir les emplacements géographiques des stations météorologiques et les séries temporelles d'entrée respectives pour les précipitations, la température, le rayonnement solaire, l'humidité relative et la vitesse du vent.

3.8.1 *SWAT-CUP*

SWAT-CUP ou (SWAT-Calibration and Uncertainty Programs) est un logiciel qui permet de réaliser des modifications automatiques des paramètres puis de faire fonctionner le modèle et comparer automatiquement les sorties du modèle aux données observées (Abbaspour et al., 2004).

Il existe cependant une limitation à prendre en compte lors d'une calibration automatique des paramètres. Si un jeu de paramètres aboutit à une seule modélisation, l'inverse n'est pas vrai, c'est-à-dire qu'une sortie de modèle peut correspondre à de nombreux jeux de paramètres très différents et

donc pas forcément représentatifs de la réalité du bassin versant. Pour pallier cela, il existe de nombreuses règles de bonne conduite à suivre lors de la calibration du modèle. (Brulebois, 2016).

3.8.2 *Sequential Uncertainties Fitting (SUFI-2)*

Dans SUFI-2, l'incertitude des paramètres tient compte de toutes les sources d'incertitudes telles que l'incertitude des variables motrices, du modèle conceptuel, des paramètres et des données mesurées (Abbaspour et al., 2015). La 95PPU est calculée aux niveaux 2,5 % et 97,5 % de la distribution cumulative d'une variable de sortie obtenue par échantillonnage en hypercube latin en excluant 5 % des très mauvaises simulations (Abbaspour et al., 2007; McKay, 1988).

Une faible valeur du facteur r est considérée comme souhaitable pour une moindre incertitude (Abbaspour et al., 2004) et quand elle tend vers 1, cela indique une forte incertitude. Il faut un équilibre entre les deux (facteur p et facteur r) car un facteur p plus grand ne peut être obtenu qu'avec un facteur r plus élevé. Lorsque des valeurs acceptables des facteurs r et p sont atteintes, les incertitudes des paramètres se situent dans les plages de paramètres calibrés. SUFI-2 permet l'utilisation de différentes fonctions objectives telles que le coefficient de détermination (R^2) (Krause et al., 2005) et le coefficient NSE (Nash-Sutcliff efficiency) (Nash and Sutcliffe, 1970).

3.8.3 *Périodes de calage et de validation*

Habituellement, dans la modélisation, quelques années initiales sont sélectionnées pour la mise en place ou l'échauffement du modèle pour la configuration ou l'échauffement du modèle.

En général, deux tiers et un tiers des ensembles de données d'origine sont sélectionnés pour le calibrage du modèle. L'ensemble de données originaux sont sélectionnés pour la calibration et la validation du modèle, respectivement (Hosseini, 2010).

Dans nos cas d'études, les séries disponibles ne dépassent pas les dix années, avec plus ou moins de périodes de lacunes. A cet effet nous nous sommes contentés de faire tourner le modèle que sur une période de calage, plusieurs auteurs comme (Zettam et al., 2017) confrontées à ce genre de restriction des données climatiques ce sont contentés d'implémenter leurs modélisations sur une période de calage sans une période de validation du modèle.

3.8.4 *Codage des classes d'utilisation des terres*

A la lumière des résultats du traitement d'image, la carte d'occupation des sols a été divisée en cinq classes. Ces classes ne coïncident pas exactement avec les codes SWAT. Les types d'utilisation sont classés en sept types principaux qui ont été expliqués dans la section 3.8.

Ces classes comprennent :

1. Zones urbaines et bâtis,
2. Agriculture,
3. Terre en labours,
4. Forêts mixte
5. Sols nu et dégradés,

Cette classification est en accord avec celle mise en œuvre dans le modèle SWAT avec l'aide le Tableau 3.6 résume cette correspondance entre les différentes classes d'occupation des sols.

Tableau 3.6. Correspondance entre les classes d'utilisation des terres et la couverture terrestre générique de SWAT.

Occupation des sols	Code SWAT correspondant
Zones urbaines et bâtis	URDL
Agriculture	AGRL
Terre en labours	AGRR
Forêts mixte, maquis et mattoral	FRST
Sols nu et dégradés	BARR

3.8.5 Discrétisation des bassins versant

A partir des routines de surface contenues dans ArcGIS, et du modèle numérique de terrain(MNT) de résolution (30m/30m), le module ArcSWAT modélise un réseau hydrographique. Puis, à partir d'un seuil surfacique défini par l'utilisateur, ArcSWAT crée un nombre élevé de sous-bassins. Il convient alors de trouver un compromis afin d'obtenir un nombre de sous-bassins ni trop faible (reproduction trop simpliste de la réalité) ni trop fort (augmentation du temps de calcul et des ressources informatiques nécessaires). A partir d'une centaine de sous-bassins, la performance du modèle atteint un seuil et n'augmente plus (Jha et al., 2004). Il est recommandé de vérifier que la taille des sous-bassins est homogène, afin d'éviter que plusieurs sous-bassins amont de grande taille se déversent dans un sous-bassin aval de taille réduite (saturation des compartiments).

Les unités de réponses hydrologiques ou (HRU) sont ensuite construites pour chaque sous-bassin, la formation d'unités de réponse hydrologique (HRUs) se fait par la superposition des couches d'occupation des sols, de types des sols et des classes de pentes. Ces HRU correspondent à la maille élémentaire du modèle, c'est à cette échelle que sont résolues les équations de transferts de matières et d'eau (figure 3.8).

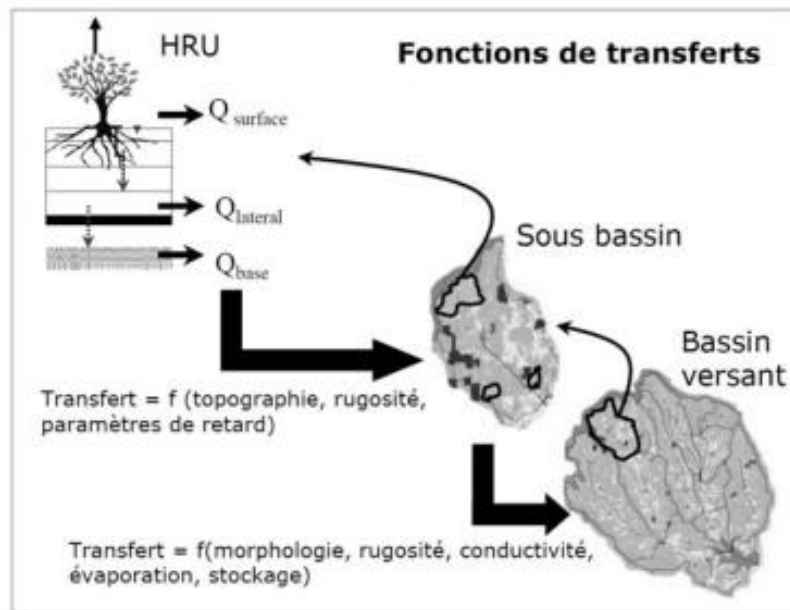


Figure 3.8. Fonctions de transferts utilisées dans SWAT d'après (Chaponnière, 2014).

3.8.2 La Fonction objectif

Une fonction objectif est un indicateur de la déviation des séries temporelles observées par rapport aux séries prédites (Van Griensven and Bauwens, 2003). Cette fonction objectif a été largement utilisée dans la calibration des modèles hydrologiques. Il représente des paramètres d'appréciation de cette fonction. On distingue six types de fonctions objectives dans SUFI2 à savoir :

- 1 : mult Une forme multiplicative de l'erreur quadratique.
- 2 : sum Une forme de sommation de l'erreur quadratique.
- 3 : R^2 (coefficient de détermination.)
- 4 : Chi^2 noté (χ^2)
- 5 : NSE (Nash-Sutcliffe coefficient).
- 6 : BR^2 il représente le coefficient de détermination (R^2) multiplié par le coefficient de la ligne de régression, br^2 . Cette fonction permet de rendre compte de l'écart entre l'amplitude de deux signaux (représentés par b) et leur dynamique (représentée par R). des amplitudes de deux signaux (représentés par b) ainsi que de leur dynamique (représentée par R^2). (Hosseini, 2010).

3.9 Analyse de sensibilité (AS)

L'objectif d'une analyse de sensibilité est d'identifier les principaux paramètres clés qui affectent la performance du modèle et jouent un rôle essentiel dans la paramétrisation du modèle (Song et al., 2015). Pour cela, dix-huit paramètres liés à différentes composantes du cycle hydrologique sont testés. Saltelli et al. (2008) soutiennent que l'analyse de sensibilité est une condition préalable pour la construction de modèles dans n'importe quel contexte, qu'il s'agisse de diagnostic ou de pronostic, et dans tous les domaines où des modèles sont utilisés.

Le choix de ces paramètres a été motivé par leurs utilisations par d'autres auteurs dans des zones représentant de grandes similitudes avec notre zone d'étude, dans ce sens une recherche bibliographique a été menée pour cerner les paramètres les plus pertinents. Des travaux similaires à nôtres ont été entrepris par (Hallouz et al., 2018; Taleb et al., 2019; Zaibak and Meddi, 2022; Zettam et al., 2017), après lectures, dix-huit (18) paramètres suivant comme présenté dans le tableau 3.7 ont été adoptés pour notre étude de sensibilité.

Tableau 3.7. Liste des paramètres pris en compte dans l'étude de sensibilité

Nom du paramètre	Description
RCHRG_DP.gw	Fraction d'eau percoler dans l'aquifère profond
REVAPMN.gw	Niveau de nappe nécessaire pour contribuer à la réévaporation (mm)
SOL_AWC.sol	Capacité en eau disponible de la couche de sol (mm H ₂ O/mm de sol).
SOL_Z.sol	profondeur de la surface au fond de la couche de sol (mm)
SOL_K.sol	Conductivité hydraulique à saturation (mm/heure)
CN2.mgt	Numéro de la courbe de ruissellement de la (S.C.S) de la condition
ALPHA_BF.gw	Coefficient de récession de la nappe (jour)
GW_DELAY.gw	Délai de routage de l'eau de percolation (jours)
GWQMN.gw	Profondeur seuil de l'eau dans l'aquifère peu profond pour que le débit de retour se produise.(mm).
TRNSRCH.bsn	Fraction des pertes par transmission du canal principal qui entre dans l'aquifère profond
OV_N.hru	Coefficient de Manning (n) pour l'écoulement de surface
ESCO.hru	Facteur de compensation de l'évaporation du sol
GW_REVAP.gw	Coefficient de réévaporation de la nappe
CH_K2.rte	Conductivité hydraulique effective dans le chenal principal (mm/h)
CH_N2.rte	Coefficient de Manning (n) pour l'écoulement au niveau du chenal
SURLAG.bsn	Coefficient de retard de l'écoulement de surface
SLSUBBSN.hru	Longueur moyenne de la pente du bassin (metre)
EPCO.hru	Facteur de compensation de l'absorption par les plantes

3.10 Évaluation du modèle

Un certain nombre d'outils statistiques ont été utilisés pour l'évaluation de la performance du modèle. Il s'agit de la moyenne des sorties simulées, de l'erreur relative (RE), le coefficient de détermination (R^2), et le coefficient d'efficacité de la simulation de Nash-Sutcliffe (NS).

En général, le R^2 est un indicateur de l'intensité de la relation entre les valeurs observées et simulées. NSE indique dans quelle mesure le tracé des valeurs observées par rapport simulées correspond à une ligne droite. Si les valeurs de R^2 et de NSE sont proches de zéro, alors le pouvoir prédictif du système de modélisation est considéré comme "inacceptable ou faible". Si les valeurs de R^2 et NSE sont proches de 1, le pouvoir prédictif du système de modélisation est presque "parfait".

Cependant, il n'y a pas de normes explicites spécifiées pour l'évaluation de la prédiction du modèle à l'aide de ces statistiques. Par conséquent, quatre principaux indicateurs statistiques principaux ont été appliqués par le chercheur pour évaluer les résultats de la calibration et de la validation du modèle.

3.11 Conclusion

Ce chapitre a présenté la zone d'étude ainsi que ses principales caractéristiques telles que les précipitations, la température, la direction des vents et l'humidité l'emplacement des stations hydro-climatologiques

A l'issue de ce chapitre, une description des bassins versant objet de cette étude a été donnée, Ainsi que l'approche méthodologie adoptée a été décrite, par la suite et la collecte et de traitement des données climatologiques et hydrométriques, et des images satellitaires pour les périodes d'étude, les propriétés des sols et la carte des sols.

En outre, les classes de sol et des sous-bassins dans les bassins versant d'Oued Saida, Oued Taria et Oued Maleh.

Un pré et post-traitement des données d'entrée ont été implémentés pour la détermination l'utilisation des terres, l'objectif ultime étant une des effets des changements d'utilisation des terres sur le bilan hydrique sur les périodes (1998-2005) pour le bassin versant d'Oued Saida, et 1995-2005 pour les bassins versant d'Oued Taria et Oued Maleh.

CHAPITRE IV
IMPLEMENTATION DE LA CHAINE
LOGICIES ET RESULTATS

Chapitre IV : implémentation de la chaîne logiciels et résultats

4.1 Évaluation de l'occupation des sols

L'analyse de l'occupation des sols dans l'ouest algérien soumis des conditions d'utilisation des terres instables pendant la période d'étude (1987 à 2002). Pour cerner cette dynamique, nous avons choisis des bassins versants avec des configurations variées afin de nous permettra de voir les tendances et les interactions entre les différentes classes d'occupation des sols. Ces mutations peuvent être expliquées par des facteurs anthropiques, socio-politiques ou encore climatiques.

En tant que types d'occupation du sol dominants dans le bassin versant, cinq classes d'occupation du sol qui représentent le mieux le bassin versant ont été sélectionnées, telles que les terres urbaines, les terres agricoles, les terres dégradés, les cultures en ligne agricoles et les terres forestières (tableau 4.1).

Table 4.1. Classe d'occupation des sols.

N°	Description	SWAT land cover class code	Classe
01	Urban low density	URDL	Zone urbaine
02	Mixed Barren Land	BARR	Sols nus et dégradés
03	Row Crops	AGR	Terres en labour
04	Mixed forest	FRST	Forêt mixte, matorales et maquis
05	Agriculture	AGRL	Arboriculture et culture maraîchère

4.1 Bassin versant d'Oued Saida

Pour le bassin versant d'Oued Saida, le choix des images est conditionné par les changements des caractéristiques de surface au fur et à mesure que l'activité du feuillage se développe, ce qui permet de minimiser la couverture nuageuse et de mieux distinguer les différentes classes.

Les résultats de la classification de l'image Landsat de l'année 1987 à l'aide des échantillons des images définis et des combinaisons optimales des canaux sélectionnés. Une fois la classification effectuée, il est nécessaire d'évaluer la précision. Pour cela, les résultats classifiés de l'occupation des sols seront comparés aux données de références. Dans cette étape, les données de référence pour évaluer la classification de l'occupation du sol de 1987 sont créées à partir de données

d'observations effectuées sur les images Google-Earth vu la non disponibilité de données de référence constatées sur le terrain.

L'évaluation de la précision d'une classification de l'occupation du sol est basée sur la matrice de confusion. Cette matrice permet de déterminer la précision globale des résultats obtenus (nombre total de pixels correctement classifiés, coefficient Kappa) et la précision de chaque catégorie classifiée (précision individuelle) (Gao and Skillcorn, 1998).

Le résultat de l'évaluation de la précision de la classification supervisée montre que la classification est globalement satisfaisante pour l'image 1987 (2002), avec une précision totale de 89,5 % (95,9 %) et un coefficient de Kappa de 0,78 (0,82).

Ainsi, le tableau 4.2 présente la matrice de confusion pour évaluer la classification de l'occupation du sol de 1987. Il montre que sur les 571 pixels d'image évaluée, 507 pixels de la carte 1987 sont en accord avec ceux de référence, soit environ 88.8%.

Les pixels bien classifiés correspondent aux nombres de pixels sur la diagonale de la matrice de confusion. Il montre également que les précisions individuelles fluctuent entre 60.4 et 98.3%.

Tableau 4. 2. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol Oued Saida (1987)

Classe	Urbain	Agriculture	Forêt	Labour	Sol nu	Nombre (pixel)	Précision
Urbain	96	3	4	1	6	108	88.9
Agriculture	4	172	1	0	15	175	98.3
Forêt	0	0	138	1	0	145	95.2
Labour	0	0	0	69	0	72	95.8
Sol nu	8	0	2	1	32	53	60.4
Total	108	175	145	72	53	553	89,5

A titre d'exemple, 175 pixels de la catégorie de l'Agriculture ont été considérés, dont 172 pixels bien classifiés, soit environ 94.17% et 3 pixels sont confondus avec la catégorie urbain.

Le tableau 4.2 montre également que la précision de la classification des zones urbaines est plus faible, égale à 82.35 %. Il ressort de la figure 4.1 et du tableau 4.2 que la plus grande surface du bassin versant est occupée par une utilisation agricole des terres, suivie principalement par des forêts sur les flancs des collines et des terres nues. Les terres cultivées et les zones urbaines couvrent la plus petite surface.

D'autre part, le tableau 4.3 présente la matrice de confusion pour évaluer la classification de l'occupation du sol de l'année 2002. Il montre que sur les 553 pixels d'image évaluée, 507 pixels de la carte 2002 sont en accord avec ceux de référence, soit environ 88.8%.

Les pixels bien classifiés correspondent aux nombres de pixels sur la diagonale de la matrice de confusion. Il montre également que les précisions individuelles fluctuent entre 60.4 et 98.3%.

Le tableau 4.3 montre que sur les 391 pixels d'image évalués, 375 pixels de la carte d'occupation des sols de l'année 2002 sont en accord avec ceux de référence, soit environ 95.91%. Les pixels bien classifiés correspondent aux nombres de pixels sur la diagonale de la matrice de confusion. Il montre également que les précisions individuelles fluctuent entre 82.35 et 98.57%. A titre d'exemple, 115 pixels de la catégorie de l'Agriculture ont été considérés, dont 113 pixels bien classifiés, soit environ 94.17% et 2 pixels sont confondus avec la catégorie urbain et sol nu.

Tableau 4. 3. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol Oued Saida (2002)

Classe	Urbain	Agriculture	Forêt	Labour	Sol nu	Nombre (pixel)	Précision
urbain	42	1	0	1	0	51	82.35
Agriculture	3	113	0	3	1	115	98.26
Forêt	0	0	82	0	0	82	100
Labour	0	0	0	69	0	73	94.52
Sol nu	6	1	0	0	69	70	98.57
Total	51	115	82	73	70	391	95.91

Dans tous les cas, l'utilisation des terres agricoles et forestières dépasse 50% de l'utilisation totale des terres dans le bassin versant, tandis que les zones urbanisées et les terres cultivées de façon saisonnière représentent environ 15% pour les différentes dates des images utilisées (Figure 4.1).

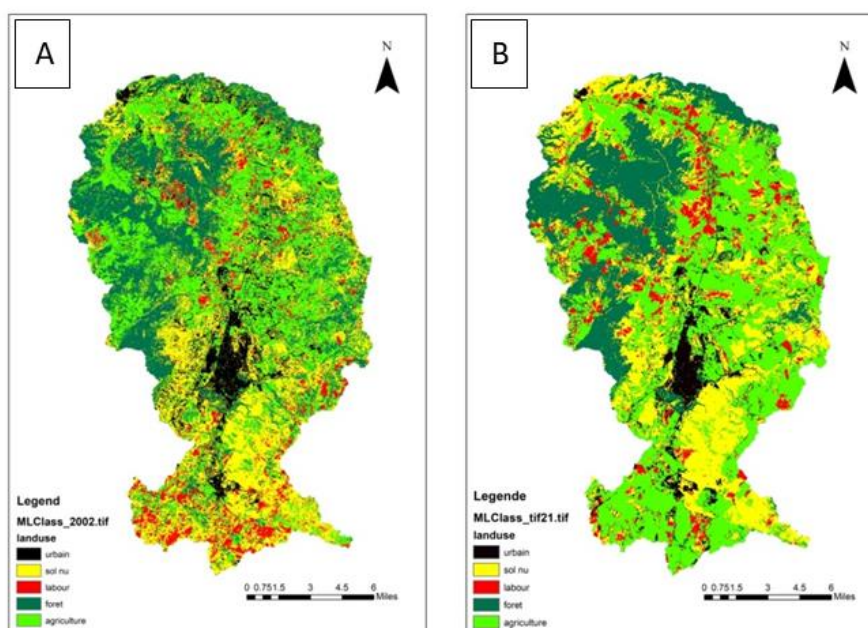


Figure. 4.1. Carte d'occupation des sols bassin versant d'Oued Saida (A) 1987; (B) 2002

Pour l'année 1987, les zones urbanisées et bâties couvrent 7.9% du territoire et se concentrent autour des localités principales (Sidi Boubekeur, Sidi Ameer, Hammam Rabi, Ain el Hadjar) et le pôle urbain principal du bassin versant la ville de (Saida).

Les sols nus couvrant environs 27.6% sont localisés sur la partie sud du bassin versant autour la ville de Saida et aussi dans la zone Nord-Est du bassin versant dans des zones montagneuses avec des pentes assez abruptes.

Les zones forestières sont de l'ordre de 21.46 %, elles sont plus localisées sur la partie centre et Est du bassin versant couvrant des zones des montagnes. Nous constatons à cette date une intrusion des terres agricoles dans les parties couvertes par des forêts mais avec des pentes assez douces, ceci peut être expliqués par certaines pratiques des populations rurales à cette époque de pratiquer la céréaliculture sur des terrains forestiers qui serviront de pâturage aux cheptels.

Les zones labourées 6.52 % sont essentiellement localisés dans le Sud du bassin versant autour des terres agricoles et des sols nus ceci est aussi expliquées par les pratiques agricoles et de mode de cultures, où il y a une alternance entre des terrains sont laissés en jachères et d'autres sont cultivés.

Les terres agricoles représentent environ 36.49% ; elles sont localisées dans les parties assez planes, mais aussi le long d'Oued Saida et de ses affluents.

En revanche, pour l'année 2002, les zones urbanisées et bâties couvrent 10.7% du territoire et se concentrent autour des localités principales (Sidi Boubekeur, Sidi Ameer, Hammam Rabi, Ain el Hadjar) et le pôle urbain principal du bassin versant la ville de Saida.

Les sols nus couvrant 28.59% sont localisés sur la partie sud du bassin versant autour la ville de Saida et la zone Nord-Est du bassin versant dans des zones montagneuses avec des pentes assez abruptes, et dans les montagnes autour de la localité de Sidi Boubekeur.

Les zones forestières sont plus localisées sur la partie centre et Est du bassin versant couvrant des zones des montages couvrant environs 26.48%, nous constatons à cette date une réduction des intrusions des terres agricoles dans les parties couvertes par des forêts, ceci est due à l'abandon de la pratique de culture dans le domaine forestier par populations rurales.

Les zones labourées sont essentiellement localisés dans le long des Oueds au Nord du bassin versant.

4.2 Bassin versant d'Oued Taria

Pour Oued Taria, étant bassin versant sous-jacent de Oued Saida, nous avons utilisé les mêmes images que celles de Oued Saida. Le choix des dates des images est conditionné par les changements des caractéristiques de surface au fur et à mesure que l'activité du feuillage se développe, ce qui permet de minimiser la couverture nuageuse et de mieux distinguer les différentes classes. Elles sont soumises à divers traitements et corrections standards. Les résultats de la classification sont présentés dans la figure 4.2.

L'évaluation de la précision de la classification d'une image a été effectuée en créant la matrice d'erreur de classification ou la matrice de confusion. Dans cette matrice de confusion, les résultats de la classification sont comparés aux données réelles constatées sur terrain obtenues à travers l'exploration des images Google-Earth coïncidant avec les dates de chaque image traitée.

Le coefficient de Kappa est calculé pour les images satellitaires de 1987 et 2002. La matrice d'erreur des images classifiées de l'année 1987 et de l'année 2002 sont présentées respectivement dans les tableaux 4.4 et 4.5.

Les valeurs du coefficient Kappa sont respectivement 0,87 et 0,75 pour les images satellites de 1987 et 2002. Les cartes d'occupation des sols pour les années 1987 et 2002 du bassin d'Oued Taria sont présentées dans la figure 4.3.

La précision globale des images classées est de l'ordre de 90.96 et 81.31 respectivement pour les images de 1987 et l'année 2002.

Le tableau 4.4 montre également que la précision de la classification des zones urbaines est plus faible, égale à 82.35 %. Il ressort de la figure 4.3 et du tableau 4.2 que la plus grande surface du bassin versant est occupée par une utilisation agricole des terres, suivie principalement par des forêts sur les flancs des collines et des terres nues. Les terres cultivées et les zones urbaines couvrent la plus petite surface.

Tableau 4.4. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol Oued Taria (1987)

Classe	Urbain	Agriculture	Forêt	Sol nu	Labour	Nombre (pixel)	Précision
Urbain	197	2	0	0	0	204	96.6
Agriculture	0	29	0	1	9	68	99.5
Forêt	5	14	203	0	1	204	98.8
Sol nu	2	1	0	82	1	83	88.3
Labour	0	22	1	0	83	94	42.6
Total	51	115	82	73	70	653	90.96

D'après le Tableau 4.4, il est clair que sur les 391 pixels d'image évaluée, 375 pixels de la carte d'occupation des sols de l'année 2002 sont en accord avec ceux de référence, soit environ 95.91%. Les pixels bien classifiés correspondent aux nombres de pixels sur la diagonale de la matrice de confusion. Il montre également que les précisions individuelles fluctuent entre 82.35 et 98.57%. A titre d'exemple, 115 pixels de la catégorie de l'Agriculture ont été considérés, dont 113 pixels bien classifiés, soit environ 94.17% et 2 pixels sont confondus avec la catégorie urbain et sol nu.

Tableau 4.5. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol Oued Taria (2002)

Classe	Urbain	Agriculture	Forêt	Sol nu	Labour	Nombre (pixel)	Précision
Urbain	64	0	0	0	0	71	90.1
Agriculture	0	52	1	86	0	75	69.3
Forêt	4	22	105	1	0	110	95.5
Sol nu	2	0	4	115	5	203	56.7
Labour	1	1	0	1	221	226	97.8
Total	51	115	82	73	70	685	81.31

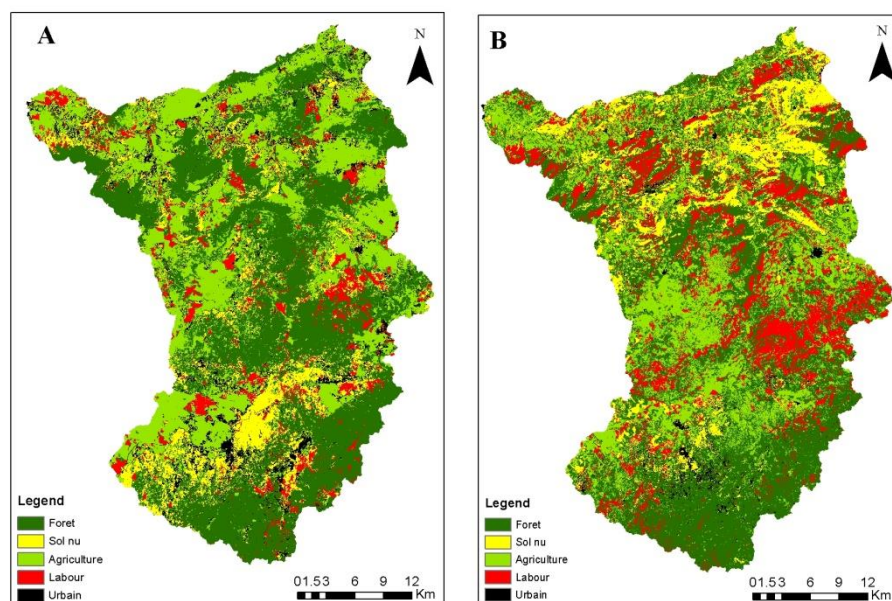


Figure 4.2. Carte d'occupation des sols bassin versant d'Oued Taria (A) 1987; (B) 2002

Dans la configuration de l'occupation des sols en 1987, du bassin versant d'Oued Taria, nous trouvons que les zones urbanisées et bâties couvrent 2.5% du territoire et se concentrent autour des localités principales (Oued Taria, Beniane, Aouf, Baloul, Hessassna et Ain Soltane).

Les sols nus couvrant environ 11.5% sont localisés sur la partie Nord-est du bassin versant entre les localités d'Aouf, Beniane et Ouled Brahim mettant en évidence, la dégradation de la couverture forestière sur cette zone montagneuse avec des pentes assez importantes.

Les zones forestières sont de l'ordre de 44.35%, elles sont localisées sur la partie centre, Nord-Est et Nord-Ouest du bassin versant couvrant des zones des montagnes, et une grande proportion de la partie sud couvrant des maquis et des matorrals dans les zones steppiques.

Les terres agricoles sont de l'ordre de 22.31%, localisées sur toutes les zones du bassin versant mais essentiellement celle ayant des pentes assez douces favorables à la pratique agricole.

Les zones labourées sont de l'ordre de 16.52%, elles sont essentiellement localisées à proximité des terres agricoles et dans certaines régions en plein milieu forestier et le long des oueds, mais aussi constate qu'elles se sont développées dans la région entre les localités de Tircine et Balloul, ce qui peut être expliqué par le développement de l'activité agricole dans cette région.

Pour l'année 2002, les zones urbanisées et bâties couvrent 2.6% du territoire et se concentrent autour des localités principales Oued Taria, Beniane, Aouf, Baloul, Hessassna et Ain Soltane.

Les sols nus couvrant 14.23%, sont localisés sur la partie sud du bassin versant autour la ville de Saida et la zone Nord-Est du bassin versant dans des zones montagneuses avec des pentes assez abruptes, Mais aussi dans les montagnes autour de la localité de Sidi Boubekeur.

Les zones forestières sont plus localisées sur la partie centre et Est du bassin versant couvrant des zones des montagnes couvrant environ 26.48%, nous constatons à cette date une réduction des intrusions des terres agricoles dans les parties couvertes par des forêts, ceci est dû à l'abandon des pratiques de culture dans le domaine forestier par populations rurales.

Les zones labourées sont essentiellement localisés dans le long des Oueds au Nord du bassin versant.

4.3 Bassin versant d'Oued Maleh

Le bassin versant d'Oued Maleh étant un bassin côtier, il est soumis à un régime climatique différent que les deux bassins versant précédents. Dans ce contexte les même dates ont été choisies afin de comparer la dynamique d'occupation des sols, les résultats de la classification sont présentés sur la figure 4.3.

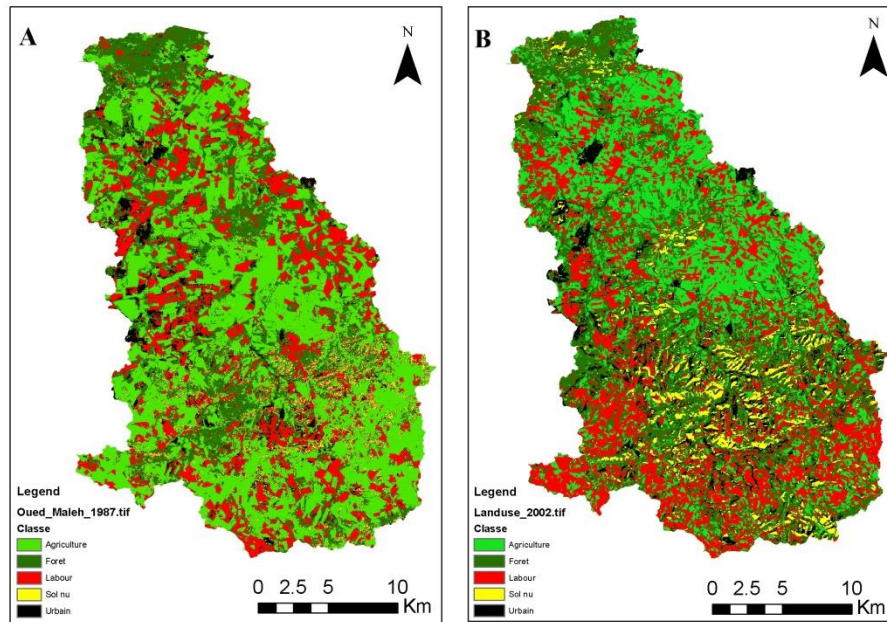


Figure 4.3. Carte d'occupation des sols bassin versant d'Oued Maleh (A) 1987; (B) 2002

Le résultat de l'évaluation de la précision de la classification supervisée montre que la classification est globalement satisfaisante pour l'image de 1987, avec une précision totale de 81.98 % et un coefficient de Kappa de 0,76.

Ainsi, le tableau 4.6, qui présente la matrice de confusion pour évaluer la classification de l'occupation du sol de 1987 montre que sur les 505 pixels d'image évaluée, 414 pixels de la carte 1987 sont en accord avec ceux de référence, soit environ 81.89%. Les pixels bien classifiés correspondent aux nombres de pixels sur la diagonale de la matrice de confusion. Le tableau 4.6 montre également que les précisions individuelles fluctuent entre 24.6 et 97.3%, nous constatons une faible précision des sols nus, on constate aussi une grande confusion entre ces derniers et les sols labour et les zones forestières, ceci peut être expliquée par une signature spectrale assez similaire entre les sols nus et ceux labourés pouvant présenter une confusion entre les deux natures des terrain, ainsi que les forêts très clair avec une faible densité d'arbres ou les maquis et matorrals peux denses qui ont une activité florales assez faible.

Tableau 4.6. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol Oued Maleh (1987)

.Classe	Urbain	Labour	Agriculture	Forêt	Sol nu	Nombre (pixel)	Précision
Urbain	64	4	3	1	4	76	73.6
Labour	10	179	0	3	20	212	97.3
Agriculture	2	0	73	3	0	78	93.6
Forêt	11	1	2	82	25	121	90.1
Sol nu	0	0	0	2	16	18	24.6
Total	87	184	78	91	65	505	81.98

Le tableau 4.7 présente la matrice de confusion pour évaluer la classification de l'occupation du sol de 2002. Il montre que sur les 532 pixels d'image évaluée, 478 pixels de la carte 2002 sont en accord avec ceux de référence, soit environ 81.89%.

Les pixels bien classifiés correspondent aux nombres de pixels sur la diagonale de la matrice de confusion. Il montre également que les précisions individuelles fluctuent entre 59.2 et 99.4%, on constate une faible précision des zones urbaines, avec une confusion entre ces derniers et les zones forestières,

Tableau 4.7. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation du sol Oued Maleh (2002)

Classe	Labour	Urbain	Agriculture	Forêt	Sol nu	Nombre (pixel)	Précision
Labour	167	2	2	0	0	168	99.4
Urbain	0	29	0	5	2	49	59.2
Agriculture	1	1	97	11	0	106	91.5
Forêt	0	16	7	118	4	136	86.8
Sol nu	0	1	0	2	67	73	91.8
Total	168	49	106	136	73	532	89.85

Dans le bassin versant d'Oued Maleh, l'état de l'occupation des sols en 1987 est caractérisé par des zones urbanisées et bâties couvrant 4.95 % du territoire et se concentrent autour des localités principales (El Maleh, Chaabat el Lham, Hammam Bouhdjar, Hessassna, Oued Bekach et Hassi el Ghella) et un grand pôle urbain de la ville d'Ain Temouchent.

Les sols nus couvrant environs 4.41% sont localisés sur la partie Nord du bassin versant dans des zones montagneuse à proximité de Hassi el Ghella et dans la partie sud de la localité de Hessassna.

Les zones forestières sont de l'ordre de 29.85%, elles sont localisées sur la partie centre, Nord et milieu du bassin versant couvrant des zones des montages, la couverture forestière est de type forêt claire et matorral, et elle occupe les zones montagneuse.

Les terres agricoles sont de l'ordre de 41.64%, localisées sur toutes les zones du bassin versant mais essentiellement celle ayant des pentes assez douces favorables à la pratique agricole.

Les zones labourées sont de l'ordre de 20.02%, elles sont essentiellement localisées à proximité des terres agricoles.

Pour l'année 2002, les zones urbanisées et bâties couvrent 6.26% du territoire et se concentrent autour des localités dans les principales centres urbains et localités de la région.

Les sols nus couvrant 5.41%, sont localisés sur la partie sud du bassin versant dans des zones montagneuses avec des pentes assez abruptes dans des zones à proximité de la localité de Hessassna.

Les zones forestières sont plus localisées sur la partie centre et Est du bassin versant couvrant des zones des montages couvrent environs 35.04%.

Les zones labourées sont essentiellement localisés dans la partie Sud et Sud-Ouest du bassin versant, elle représente environ 25.98 % de la superficie du bassin versant.

4.4 Analyse diachronique de l'évolution de l'occupation des sols

La connaissance des dynamiques récentes est essentielle pour appréhender les tendances de ces changements, mais aussi les causes de cette dynamique. Dans cette partie, l'analyse diachronique de l'occupation des sols est utilisée pour l'évaluation quantitative de cette dynamique entre 1987 et 2002.

Afin de montrer l'évolution de chaque catégorie de l'occupation du sol au cours du temps, nous avons comparé la relation entre la même catégorie à deux dates pour différencier les zones stables, les zones de régression et les zones de progression de cette catégorie.

Après l'analyse des changements à l'aide de deux cartes de l'occupation des sols pour chaque bassin versant, nous avons calculé les taux de changement des surfaces des différentes catégories pour les périodes 1987-2002. Les valeurs positives représentent une progression de la surface de la catégorie pendant la période analysée et les valeurs négatives indiquent la perte de surface d'une catégorie entre les deux dates. Les valeurs proches de zéro nous indiquent que la catégorie reste relativement stable entre les deux dates (tableau 4.8).

Tableau 4.8. Changement de l'occupation du sol entre 1987 et 2002.

Classe	BV Oued Saida			BV Oued Taria			BV Oued Maleh		
	Surface 1987	Surface 2002	variation (%)	Surface 1987	Surface 2002	variation (%)	Surface 1987	Surface 2002	variation (%)
Urbain	50.11	67.65	2.77	34.36	34.99	0.05	26.33	40.37	2.18
Agriculture	230.76	172.61	-(7.89)	334.92	300.64	-(2.54)	268.40	173.86	-(14.67)
Forêt	135.69	169.95	5.41	672.86	597.79	-(5.57)	192.40	225.87	5.19
Sol nu	41.22	41.36	-(0.01)	155.82	191.78	2.67	28.40	37.03	1.34
Labour	174.58	180.81	-(0.28)	149.86	222.63	5.40	129.05	167.45	5.96
Surface Totale (Km²)	570			1347			644		

La table 4.8 montre que la conversion des classes d'occupation du sol dans le bassin de l'Oued Saida s'est principalement traduite par une augmentation importante du couvert forestier et arbuste, elle s'explique par l'extension des terres entourant la forêt sur des terrains adjacents abandonnés par leurs occupants dans la décennie 1990 pour des raisons de sécurité, et par l'exode de ces populations vers les villes voisines telles que Sidi Amar et Sidi Boubaker, ce qui explique l'extension des zones urbaines, ces villes étant situées à proximité de Saida Ouest. La diminution des terres agricoles consacrées à l'arboriculture et au maraîchage s'explique également par cette migration car ces cultures nécessitent la présence permanente de leurs propriétaires qui se sont installés dans les villes pour des considérations sociales, économiques et culturelles. En revanche, aucune diminution n'a été observée dans les terres agricoles en raison de la facilité de culture, du besoin de très peu de temps et d'entretien, et de l'absence de présence permanente. Par ailleurs, une légère augmentation des sols érodés a été observée, ce qui peut s'expliquer par la dégradation des terres abandonnées en raison des conditions anthropiques et climatiques qui favorisent l'érosion et la dégradation des sols. D'autre part, sur la figure 4.4 nous pouvons observer que les classes dont la surface reste relativement stable dans le temps, sont les sols en labours. Les autres classes affichent des variations plus ou moins notables. Les terres forestières et les zones urbanisées ont sensiblement progressé pendant cette période. A l'inverse, nous pouvons constater une forte diminution des surfaces des terres agricoles et des zones recouvertes d'arbustes. La classe qui s'est relativement bien développée reste celle des zones urbanisées qui sont concentrées principalement autour des grandes villes. Une telle évolution de ces zones est liée à une forte croissance actuelle de la population de la région et une étendue des zones industrielles. En revanche, les sols à utilisation agricoles accusent une nette diminution. La cause principale de cette diminution est l'abandon de ses terres par les populations suite aux conditions sécuritaires qui ont sévit dans la région durant la décennie 1990, cet exode de la

population s'est traduit par une augmentation des zones urbaines et les sols abandonnés ont subi un regain de forêts clair, les maquis et les matorrals.

Les résultats des calculs des pourcentages de changement entre 1987 et 2002 (Tableau 4.8) montrent que les classes des zones urbanisées et des terres forestières présentent une progression avec la totalité de changement respectif de 2.77% et 5.41%, soit plus de 17 Km² et 35 Km².

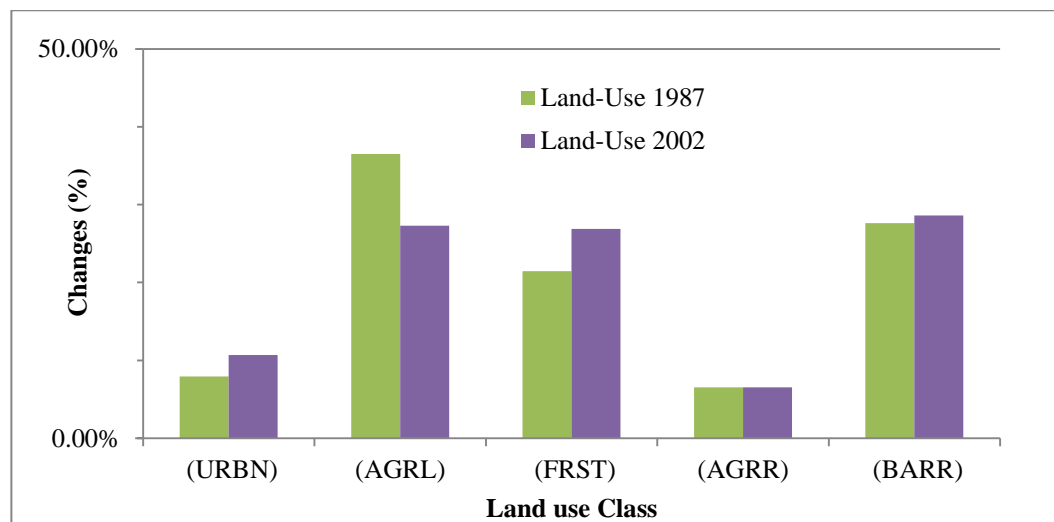


Figure 4.4. Evolution de la classe d'occupation des sols entre 1987 et 2002 Oued Saïda

Le tableau 4.7 et la figure 4.4 montrent également que les autres changements sont relativement importants tels que la diminution des surfaces des terres agricoles (-7.89%), soit une diminution de plus de 58 Km², d'autres part les sols nus et les sols en labours présente une certaine stabilité.

Pour le bassin versant d'Oued Taria, la figure 4.5 nous pouvons observer que les classes dont la surface reste relativement stable dans le temps, sont les sols urbanisées. Les autres classes affichent des variations plus ou moins notables. Les terres forestières et les zones agricoles ont sensiblement diminué pendant cette période. A l'inverse, nous pouvons constater une progression des surfaces des terres en labour et des sols nus et dégradés.

La classe qui a affiché une certaine stabilité reste les zones urbanisées, ceci peut être expliqué par la faible densité de population du bassin versant, avec des localités de taille petites regroupant des populations à vocation rurale et pastorale.

En revanche, les sols à utilisation agricoles accusent une nette diminution accompagnée par une augmentation des terres en labour qui représente une alternance dans le mode cultural qui reste la cause principale de cette diminution et de l'augmentation des terres en labours.

Les résultats des calculs des pourcentages de changement entre 1987 et 2002 (Tableau 4.7) et l'analyse des figures 4.2 et 4.5 pour le bassin versant d'Oued Taria montrent que la classe des zones urbanisées est restée stable et passe de 34.36 km² à 34.99 km² soit une augmentation non significative (0.05%), les terres forestières et les terres agricole présentent une certaine diminution

avec la totalité de changement respectif de (-5.57%) et (-2.54%), soit une perte en surface de (-34) km² pour les terres cultivés et (-75) km² pour les zones forestières. Aussi, il est a noté la tendance haussière pour les sols nus ou dégradés 2.67 % avec une augmentation d'environ 25 Km² et pour les sols en labours 5.40 % qui ont augmentés sensiblement d'environ 100 Km²; il est a remarqué que cette augmentation se concentre dans la région de Balloul et elle se fait au détriment des zones forestière et steppiques due probablement à la pratique culturale avec les actions de revalorisation des terres agricoles dans le cadre du plan nationale de développement agricole (P.N.D.A) qui était lancé à cette époque. Egalement, il est a souligné que les sols nus ou dégradés se concentrent beaucoup plus sur les montagnes de la région de Gharrous et Aouf dans la partie Nord-Est du bassin versant, ces montagnes présentent une topographie favorable à l'érosion favorisant une dégradation de la couverture forestière et à la dégradation des sols.

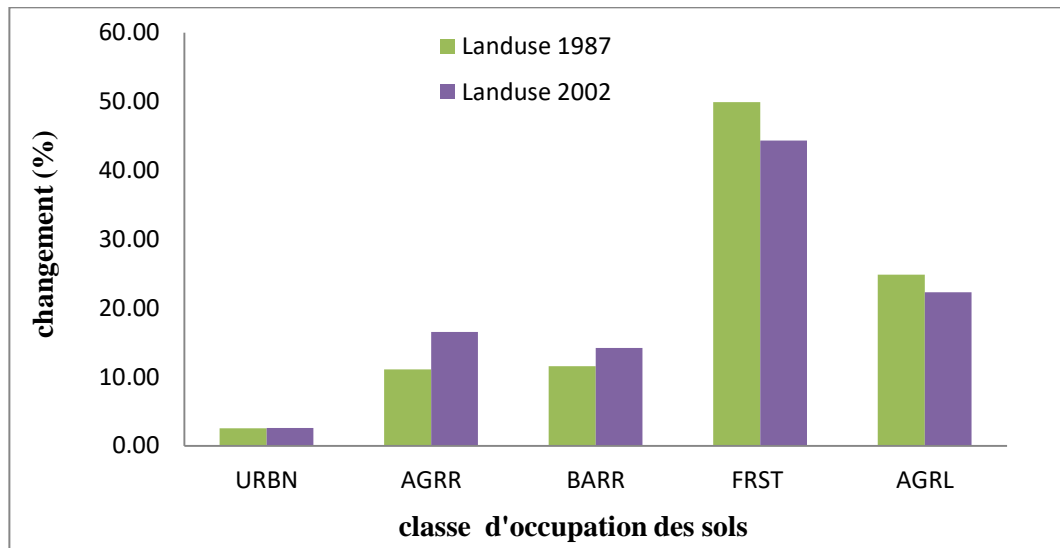


Figure 4.5. Evolution de la classe d'occupation des sols entre 1987 et 2002 Oued Taria.

Dans le cas du bassin versant d'Oued Maleh, l'analyse du Tableau 4.7 et de la figure 4.6 nous permet de constater que les classes qui affichent une tendance haussière dans le temps, sont les sols urbanisés, les sols en labour, les forêts et les sols nus ou dégradés, d'autre part les zones agricoles ont sensiblement diminué pendant cette période.

L'augmentation des zones urbanisées peut être expliquée par la forte anthropisation de ce bassin versant, il connaît une activité économique, touristique et industrielle assez développée, cette tendance peut être expliqué par l'expansion des localités de taille moyenne et grande regroupant des populations assez urbanisées et d'autres localités à vocation rurale et agricole.

En revanche, les sols à utilisation agricoles accusent une nette diminution accompagnée par une augmentation des terres en labour qui représente une alternance dans le mode culturale qui reste la cause principale de cette diminution et de l'augmentation des terres en labours.

Les résultats des calculs des pourcentages de changement entre 1987 et 2002 dans le Tableau 4.7 et l'analyse des figures 4.2 et 4.6 pour le bassin versant d'Oued Maleh montrent que la classe des zones urbanisées a nettement augmenté dans le temps, elle passe de 26.33 km² à 40.37 km² soit une augmentation de (2.18%), les terres agricoles présentent une certaine diminution avec la totalité de changement de (-14.67%), soit une perte en surface de (-94.54) km²; et pour les terres forestières une augmentation de 6 km². Aussi, il a été détecté une tendance croissante pour les sols nus ou dégradés 1.34 % avec une augmentation d'environ 1.33 Km²; et pour les sols en labours l'augmentation est de l'ordre de 5.40 % qui ont augmentées d'environ 6 Km²; il est a remarqué que cette augmentation se concentre dans la partie Sud et Sud-Ouest du bassin versant dans la région de et elle se fait au détriment des zones Agricole et d'un degré moindre les zones forestière.

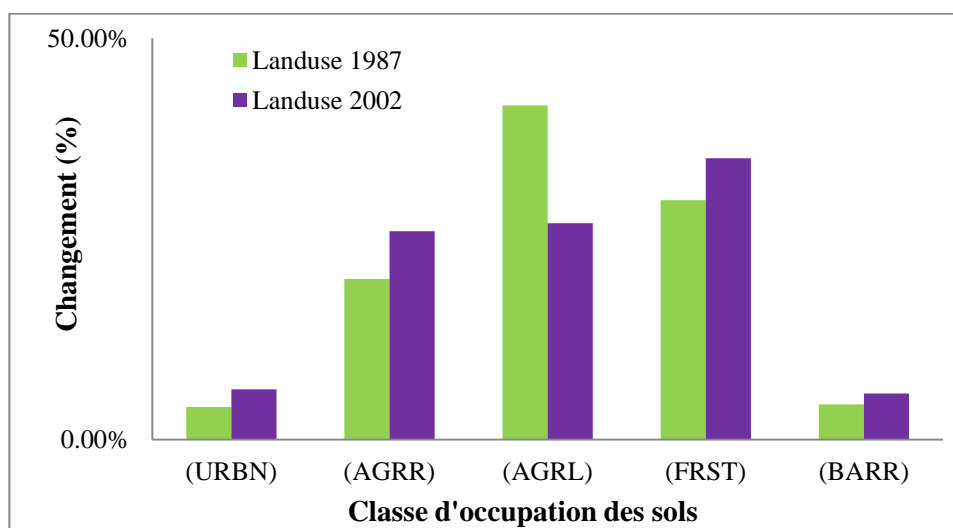


Figure 4.6. Evolution de la classe d'occupation des sols entre 1987 et 2002 Oued Maleh

4.5 Estimation des débits et modélisation hydrologique SWAT

Dans cette partie l'analyse des bassins versants d'Oued Saida, Oued Taria et Oued Maleh par le modèle SWAT a permis de faire une combinaison des données déjà choisis précédemment et une simulation à l'échelle temporelle mensuelle, dans cette partie le modèle SWAT est construit et exécuter pour les trois bassin versant suivant la méthodologie adoptée précédemment.

En premier le modèle est tourné avec des valeurs des paramètres par défaut donnés par Arcswat, les valeurs du bilan hydrologique à l'échelle interannuelle est donnés dans le tableau 4.9 et les figures 4.7, 4.8 et 4.9.

Tableau 4.9. Bilan hydrologique avant calibration des bassins versant étudiés (LU 2002)

Bassin versant	Période (années)	Pluie (mm)	Débit de surface (mm)	ETP (mm)	Débit latéral (mm)	Débit de retour (mm)
Oued Saïda	1998-2005	257.6	8.96	237.4	1.73	0
Oued Taria	1995-2005	305.7	28.49	257.6	2.03	1.43
Oued Maleh	1995-2005	293.2	2.32	289	2.44	0

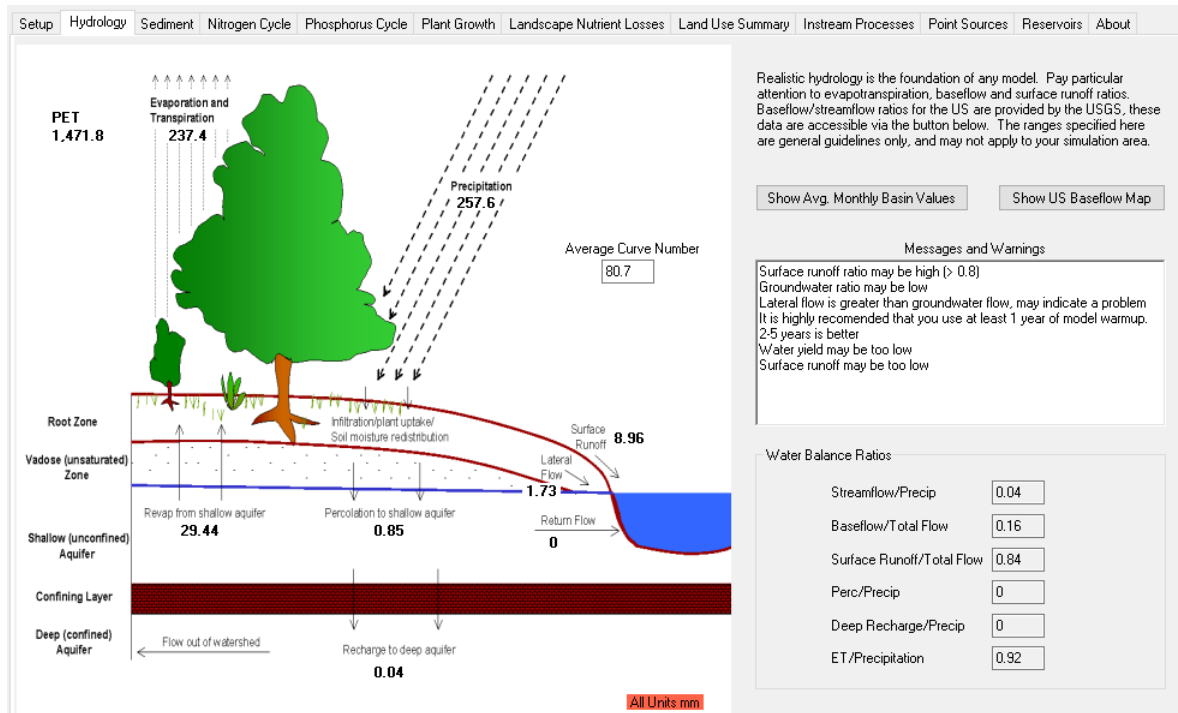


Figure 4.7. Bilan hydrologique hypothétique pour l'occupation des sols Oued Saïda (2002)

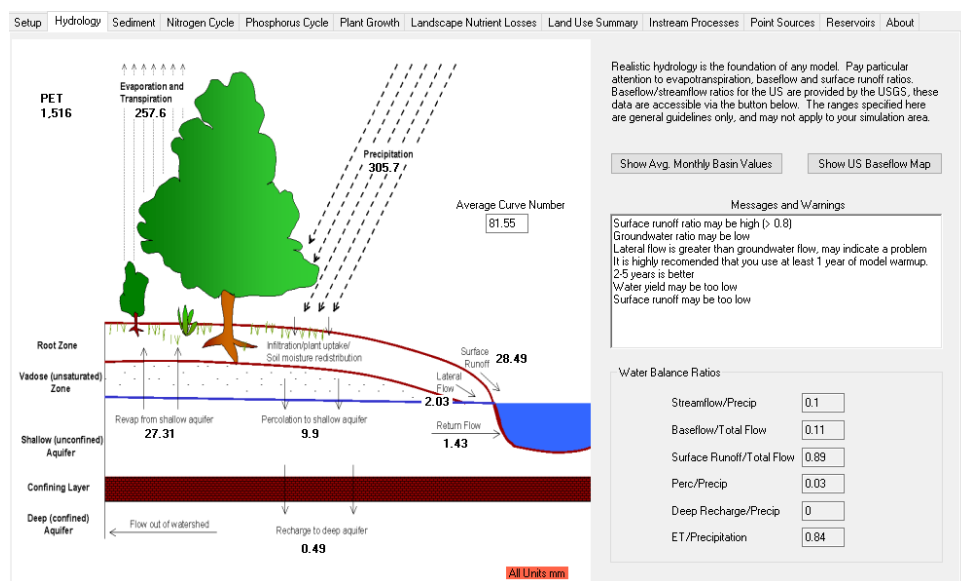


Figure 4.8. Bilan hydrologique hypothétique pour l'occupation des sols Oued Taria (2002)

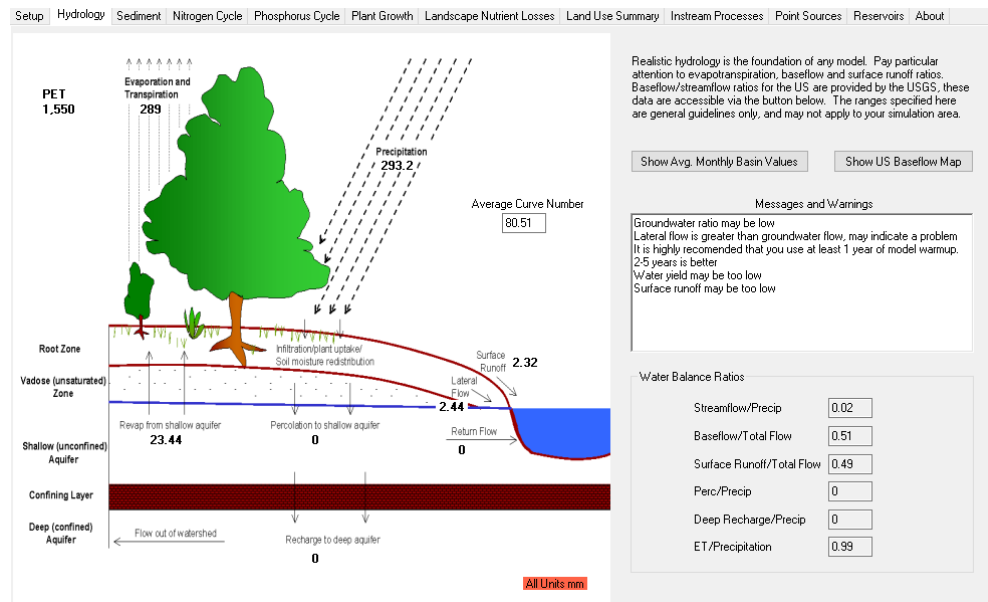


Figure 4.9. Bilan hydrologique hypothétique pour l'occupation des sols Oued Maleh (2002)

4.6 Fonction objective, Calibrage du modèle par SWAT-CUP et Analyse de sensibilité du modèle

L'analyse de sensibilité et la calibration des paramètres de SWAT requièrent davantage d'étapes et d'expertise, ou plusieurs jeux de paramètres pouvant aboutir à la même reproduction des débits, il convient au préalable de sélectionner avec attention les paramètres qui seront modifiés durant la calibration, et de ne considérer que des valeurs de paramètres gardant un sens physique.

Une recherche a été menée sur les paramètres les plus couramment modifiés dans la littérature lors de la calibration du modèle. Par itération successive, nous avons ainsi choisie 18 paramètres pour effectuer la calibration, mais on ne prendra en considération que les ceux les six paramètres les plus influent sur la reproduction des débits.

Le jeu de paramètres à calibrer est un vrai enjeu, puisque chaque modification de paramètre doit avoir une signification physique et implique une connaissance du fonctionnement du bassin versant, les paramètres choisis sont données dans le chapitre 3.

Une calibration semi-automatique, dont les détails techniques ont été décrits dans le chapitre 3 a été réalisée pour chacun de ces paramètres via le logiciel SWAT-CUP. Les bornes minimale et maximale des paramètres (tableau 4.10) et leurs valeurs données ont été déterminées lors de cette analyse de sensibilité. La gamme de variation est volontairement élargie, pour éviter la détection d'optimums locaux dans le calcul de la fonction objectif (F.O) dans notre cas représenté par le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS).

Tableau 4.10. Bornes des valeurs des paramètres de calibration insérées dans SWAT-CUP, et les valeurs optimales et rangs de sensibilité.

Nom du paramètre	Valeurs par défaut	Minimum	Mawimum	Bassin versant		Bassin versant		Bassin versant Oued Maleh
				Oued Saida		Oued Taria		
				Valeurs ajustées	Rang de sensibilité	Valeurs ajustées	Rang de sensibilité	
r__SLSUBBSN.hru	50	0.02	0.2	0.03	17	0.18	3	/
v__GW_REVAP.gw	0.02	0.02	0.2	0.11	13	0.2	4	/
r__CN2.mgt	-	-0.2	0.2	-0.13	6	0.15	17	/
v__RCHRG_DP.gw	0	0	1	0.07	1	0.2	10	/
v__TRNSRCH.bsn	0	0	0.9	0.19	10	0.89	18	/
v__REVAPMN.gw	10	0	1000	3	2	65	2	/
v__GW_DELAY.gw	31	30	450	262.26	8	212.7	1	/
r__ESCO.hru	0	0	1	0.44	12	0.87	5	/
r__SOL_Z.sol	-	-0.25	0.25	0.11	4	-0.04	14	/
v__ALPHA_BF.gw	0.048	0	1	0.44	7	0.18	12	/
v__SURLAG.bsn	4	0	0.9	0.61	16	0.46	7	/
v__SOL_K.sol	51.6	0	2000	570	5	1850	16	/
v__CH_K2.rte	0	-0.01	500	86.49	14	52.49	15	/
v__EPCO.hru	1	0.1	0.8	0.17	18	0.34	8	/
v__CH_N2.rte	0.050	-0.01	0.3	0.08	15	0.13	11	/
r__SOL_AWC.sol	0.21	-0.2	0.2	0.13	3	-0.09	9	/
v__OV_N.hru	-	0.01	30	2.98	11	26.25	6	/
v__GWQMN.gw	0	0	2	0.13	9	1.47	13	/

Le tableau 4.10 résume les résultats de la calibration des trois bassins versant étudiés, il en ressort qu'il existe un jeu ou une combinaison de données des paramètres ou la fonction objectif est satisfaite pour les bassins versant d'Oued Saida et celui d'Oued Taria, par contre pour le bassin versant d'Oued Maleh, il n'existe aucun jeux ou combinaison de données pour satisfaire la fonction objectif (FO).

Le tableau présente les paramètres calibrés pour le bilan hydrologique ainsi que leurs gammes, le fonctionnement de SWAT CUP est itératif ou le changement relatif des paramètres noté (r) a été contrôlé à $\pm 20\%$, et le changement absolu noté (v) a été fait en se référant aux littératures et documents théoriques données par le logiciel SWAT-CUP.

Pour le bassin versant d'Oued Saida, après calibration elle, nous avons constaté plusieurs variations des valeurs optimales des paramètres, les six paramètre ayant une influence prépondérantes sur la

performance de la modélisation sont les paramètres liés aux eaux souterraines comme la recharge profonde de la nappe (RCHGR_DP) qui est passé de 0 à 0.07 marquant un légère augmentation, et la profondeur seuil de l'eau dans l'aquifère superficiel pour le retour d'eau ou la percolation pour l'aquifère profond (REVAPMN) qui a légèrement diminué pour passer de 10 (mm) à 3 (mm), ceux liés au sol tels que la capacité en eau disponible de la couche de sol (SOL_AWC), Conductivité hydraulique à saturation (SOL_K) qui est passé de 51.6 (mm/h) à 570 (mm/h) et la profondeur de la couche du sol (SOL_Z) elle a augmenté de 11%. Ceci peut se traduire par une augmentation des quantités d'eau infiltré accompagnée d'une diminution des quantités d'eau ruisselée et une légère diminution des quantités d'eau alimentant la nappe profonde, et ceci pour reproduire à bien les hydrogrammes et les pics de débits.

Pour le cas du bassin versant d'Oued Taria, suite à la calibration d'autres paramètres se sont montrés prépondérant et sensibles au modèle, on constate que les six paramètres les plus influent sont ceux les paramètres liés aux eaux souterraines comme le temps de retard des eaux souterraines (GW_DELAY), et Coefficient de "revap" des eaux souterraines ou l'eau peut se déplacer de l'aquifère peu profond vers la zone non saturée sus-jacente. (GW_REVAP), aussi les paramètres liés aux unités de réponse hydrologique (HRU) comme

Le Coefficient de Manning (n) pour l'écoulement de surface (OV_N), la longueur moyenne de la pente du bassin (SLSUBBSN), le facteur de compensation de l'évaporation du sol (ESCO) et le paramètre lié au sol telle la capacité en eau disponible de la couche de sol (SOL_AWC). Après calibration ces paramètres ont connus des variations, les paramètres liés aux eaux souterraines comme le temps de retard des eaux souterraines (GW_DELAY) a augmenté en passant de 31 jours à 217.3 jours, le coefficient de réévaporation de la nappe (GW_REVAP) qui a sensiblement augmenté en passant de 0.02 à la valeur maximale de 0.2, la profondeur seuil de l'eau dans l'aquifère superficiel pour le retour d'eau ou la percolation pour l'aquifère profond (REVAPMN) qui a augmenté en passant de 10 (mm) à 65 (mm), pour ceux représenté à l'échelle de la HRU comme (OV_N, SLSUBBSN, ESCO) ils ont connus une augmentation significatif passant à 26.6 pour OV_N s'approchant ainsi de la valeur maximale de 30, et de 0 à 0.87 pour ESCO, et augmentant de 18% pour SLSUBBSN ; et enfin le paramètre lié au sol SOL_AWC a enregistré une légère diminution de 0.07%.

Enfin, concernant le bassin versant d'Oued Maleh aucun jeux de données des paramètres n'a donné satisfaction pour atteindre la fonction objectif

Les paramètres calibrés sont globalement homogènes pour les stations hydrométriques, avec un coefficient de récession des nappes compris entre 0.042 et 0.095 selon les stations, un coefficient de recharge des nappes profondes compris entre 0.1 et 0.3, un délai de routage de l'eau dans la zone non-saturée compris en 1 et 4.7 jours, et une hauteur de nappe minimum pour produire un écoulement comprise entre 514 (mm) et 1088 (mm). On constate que les paramètres modifiés sont tout de même relativement proche des valeurs initiales (excepté le délai de routage). On en conclut à une bonne capacité du modèle à reproduire les débits en contexte différent.

4.6.1 Résultats de la modélisation hydrologiques mensuelles

Les critères de performance ont été calculés sur l'ensemble de la période de référence (1998-2005 pour Oued Saïda, 1995-2005 pour Oued Taria, et 1995-2005 pour Oued El Maleh). Le tableau 4.11 présente les résultats de la performance des trois bassins versant.

Tableau 4.11. Performances du modèle sur les stations hydrométriques

Bassin versant	Station hydrométrique	N.S	R²	Appréciation
Oued Siada	Sidi Boubekeur	0.56	0.57	Bon (Moriasi et al., 2007; Abbaspour et al., 2015)
Oued Taria	Oued Taria	0.23	0.28	Médiocre (Moriasi et al., 2007)
Oued Maleh	Turgot (Terga)	/	/	/

La calibration des modèles l'échelle mensuelle a permis de reproduire les débits observés en calibration comme le montrent les performances présentées dans le tableau 4.11. On ne constate que les performances en calibration globalement bonnes pour le bassin versant d'Oued Saïda médiocre pour celui d'Oued Taria et inexistante pour le Bassin d'Oued Maleh

Les faibles performances constatées à l'échelle mensuelle pour le bassin d'Oued Taria peuvent s'expliquer par le nombre de station pluviométriques utilisés dans la modélisation (deux stations) qui ne couvre pas la totalité du bassin versant surtout dans les parties sud qui présentent une grande altitude, tandis que les stations utilisés sont situés dans la partie basse du bassin versant, ceci implique que le gradient des précipitation n'est pas pris en considération dans la modélisation ce qui peut affectés l'ampleur de certains évènements pluvieux.

Pour le bassin versant d'Oued Maleh les mêmes explications que celle avancés pour le bassin versant d'Oued Taria peuvent être avancés, aussi les données de précipitations utilisées dans notre modélisation ayant un taux de lacunes atteignant les 9%.

4.6.2 Composants du ruissellement

Pour le bassin versant d'Oued Saida, la figure 4.10 représente les débits simulés par le la modélisation ceux observés pour le bassin versant d'Oued Saida, les critères de performances, les simulations hydrologiques sont très proches les unes des autres pour le scenario d'occupation des sols réel de l'année 2002. A l'exception du critère NS, sensible aux pics de crues, les performances sont similaires.

Cela se confirme grâce à l'analyse des hydrogrammes mensuels simulés et observés tels que l'illustre bien la figure 4.10

Les débits sont très proches, et la modélisation reproduit a bien le comportement hydrologique du bassin versant, à l'exception de quelques pics de crues, simulés différemment (en 1999 et 2001 par exemple).

Malgré tout, la reproduction des débits n'est pas impactée de manière significative par la simplification les bases de données utilisés.

FLOW_OUT_1

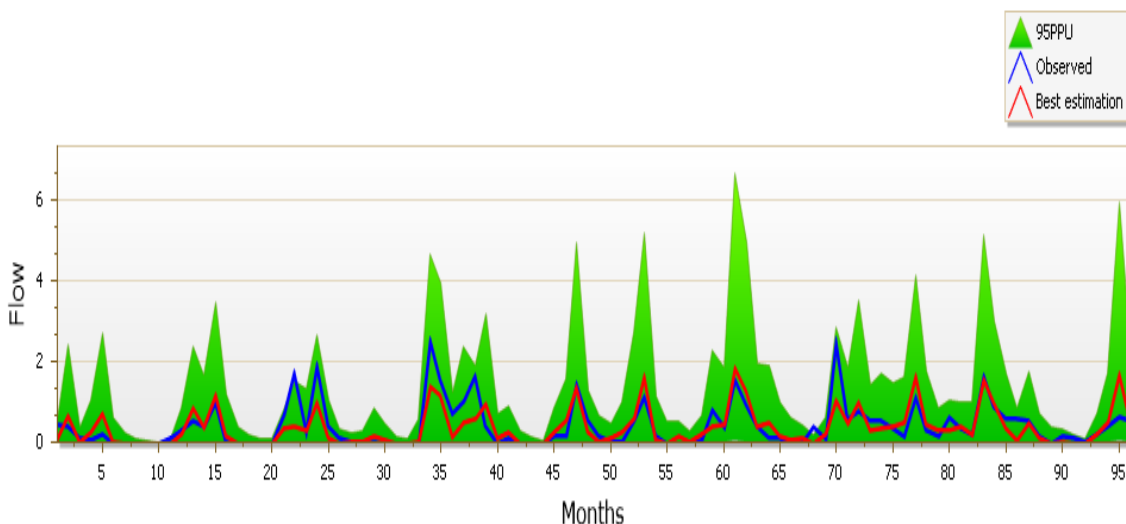


Figure 4.10. Hydrogramme d'Oued Saida à l'exutoire modélisé par SWAT (SURQ : ruissellement de surface)

D'autres parts la figure 4.11 illustre les débits restitués par la modélisation pour le bassin versant d'Oued Taria, l'analyse de cette figure nous permet de constater que en globalité le modele reproduit a bien les débits observé à l'exutoire du bassin versant, toutefois il est clairement que la modélisation ne reproduit pas fidèlement les pics de débits par exemple pour les années (1995, 1997 et 2000) ; aussi on remarque une surestimation du débit durant l'année 2003, ceci explique les faibles valeurs du coefficient de Nash pour le bassin versant d'Oued Taria.

FLOW_OUT_3

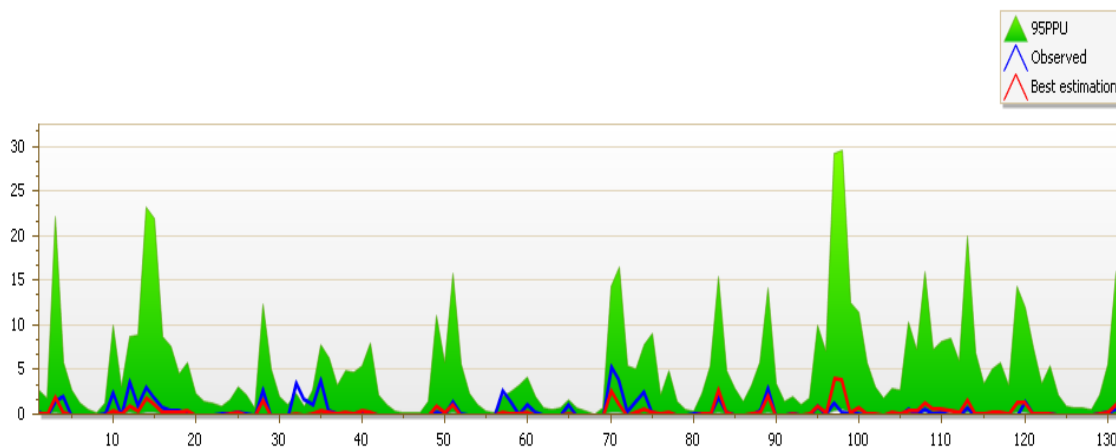


Figure 4.11. Hydrogramme d'Oued Taria à l'exutoire modélisé par SWAT (SURQ : ruissellement de surface)

Le tableau 4.12 présente les volumes totaux de ruissellement observés et prédits, tirés de la modélisation aux stations hydrométriques d'Oued Saida sur la période 1998-2005, et celle d'Oued Taria sur la période période 1995-2005. L'écart entre les volumes de ruissellement prédits et les volumes observés à Oued Taria est moins important qu'à Sidi Boubekeur.

La déviation à la station de Sidi Boubekeur pour la période d'étalonnage est de 21.5% tandis que celle de la station d'Oued taria elle est de l'ordre de 42 %.

Tableau 4.12. Volumes annuels ruisselés observés et estimés et écarts respectifs aux stations d'Oued Saida (1998-2005) et d'Oued Taria (1995-2005).

Bassin versant	Station hydrométrique	Volume de ruissellement observé (Hm ³)	Volume de ruissellement simulé (Hm ³)	D _v Écarts (%)
Oued Saida	Sidi Boubekeur (1998-2005)	14.25	17.31	21.5
Oued Taria	Oued Taria (1995-2005)	6.15	2.81	42

Ce critère statistique était la déviation des volumes de ruissellement mis en place par le comité de travail sur la définition des critères d'évaluation des modèles de bassins versants du Comité de gestion des bassins versants (ASCE, 1993), qui est une mesure de la capacité d'un modèle à prédire le volume total de ruissellement pour la période d'analyse. Selon Van Liew et al. (2005), des déviations de volume de ruissellement de 20 % étaient considérés comme bonnes, les valeurs entre 20% et 40% étaient considérées comme satisfaisantes et les valeurs supérieures à 40% étaient considérées comme non satisfaisantes. Ces fourchettes ont été appliquées pour la performance du

modèle. Les valeurs correspondantes pour le bassin versant d'Oued Saida et Oued Taria dans les mêmes périodes sont 21.5% et - 42 %, respectivement. Par conséquent, les prédictions de rendement total en eau pour la station de Sidi Boubekeur sont plus fiables, et celles de la station d'Oued Taria ne sont pas satisfaisante et ne peuvent être prise en considération pour évaluer l'impact de l'occupation des sols sur le Barrage de Ouizert.

4.7 Effets des changements d'utilisation des terres sur la ressource en eau

Après calibration du modèle pour le bassin versant d'oued Saida, un scénario d'occupation des sols hypothétique a été utilisé dans la modélisation afin de cerner le comportement du bassin versant, et étudié les variations des différentes composantes du bilan hydrologique.

Le tableau 4.11 donne les estimations des composantes du bilan hydrologique du bassin versant d'Oued Saida pour les scénarios d'occupation des sols de l'année 2002 (LU2002) et celui de l'année 1987 (LU1987).

L'analyse du tableau 4.13 et les figures 4.12, 4.13 et 4.14 nous constatons que pour les sous bassin versant (1) représentant la localité de Sidi Boubekeur et (23) représentant la ville de Saida ; l'évapotranspiration et l'écoulement latéral à l'échelle interannuelle est légèrement plus importante pour la configuration d'occupation des sols (LU 1987) que celle de (LU 2002) , ceci peut être expliqué par l'expansion urbaine qu'a connu la ville de Saida et celle de Sidi Boubekeur, mais aussi pour cette dernière elle représente l'exutoire de tout le bassin versant, accompagné d'une forte activité florale des forêts et surfaces agricole qui explique que le scénarios (LU 1987) génère plus d'évapotranspiration que le scénarios LU (2002) dans ces sous bassin versant, et aussi par une grande aptitude des eaux a la percolation qui favorise l'écoulement de subsurface (LATQ).

D'autres part l'écoulement de surface est plus important pour la configuration (LU 2002) que celle (LU (1987), ce qui peut être expliqué par l'urbanisation du bassin versant qui a augmenté de 2.77% sur tout le bassin versant entre 1987 et 2002 ceci a permis une augmentation significatif de l'écoulement de surface surtout dans les sous bassin versant urbanisés comme le sous bassin N° 4.11 et 23.

A travers l'analyse du tableau 4.13, dans certains sous bassins versants on remarque clairement que les changements affectants l'occupation des sols dans le temps ont affectés la répartition et l'ordre de grandeur des composantes du bilan hydrologique aux seins du sous bassin versant, ceci se répercute sur la recharge des nappes, et l'eau qui s'écoule appelée communément eau Bleu et celle qui est utile au développement de la flore appelée eau verte.

Tableau 4.13. Bilan hydrologique par sous- bassin versant d'Oued Saida pour l'occupation des sols 2002 et 1987.

N° Sous bassin	ET 2002 (mm)	ET 1987 (mm)	SURFQ 2002 (mm)	SURFQ 1987 (mm)	LATQ 2002 (mm)	LATQ 1987 (mm)
1	234.0436	242.8346	30.4292	20.6440	1.4187	2.0736
2	244.4347	252.0503	17.3919	10.6789	4.9100	4.7953
3	251.4075	252.2486	14.1714	11.3080	3.8853	5.7725
4	255.0775	256.1102	9.9881	7.7132	5.7302	5.8356
5	255.5503	254.8824	10.8845	10.6084	1.7336	2.1099
6	251.2110	253.5010	8.9860	7.7054	8.7868	7.5825
7	258.5197	258.0841	10.3977	10.2757	1.0687	1.3866
8	230.4293	230.5098	7.7973	7.5206	0.4233	0.5740
9	258.6307	259.4540	8.4288	6.8018	3.4625	3.4241
10	230.5512	230.2358	7.3770	7.5115	0.5120	0.5207
11	232.2400	231.0676	5.7590	6.8005	0.5311	0.6189
12	260.0533	259.1957	6.9287	6.7125	2.5070	2.7616
13	229.8770	230.3180	8.0342	7.1646	0.9731	1.2248
14	230.2357	230.8530	8.0737	7.5745	0.3052	0.2484
15	227.4020	228.3912	10.8638	9.5763	0.9827	1.5378
16	230.4465	224.8206	7.6782	15.0420	0.3383	0.3225
17	222.4681	224.0856	16.7214	15.5941	0.3211	0.3266
18	229.9685	229.0315	4.8204	5.4923	1.5180	1.5831
19	230.5230	230.9564	6.2865	5.3846	2.0372	2.1415
20	217.3821	221.7824	22.5118	18.1994	0.3235	0.3658
21	231.1375	230.1666	4.8085	5.6755	0.5064	0.5077
22	228.7640	228.9794	9.3935	9.3532	0.7869	0.6582
23	216.4351	220.0980	23.4988	20.5180	0.4695	0.4731
24	222.9207	226.8913	12.7086	8.7183	1.8583	1.5341
25	229.0896	228.8155	9.1067	9.8849	0.4755	0.5619
26	230.0132	227.1302	5.9259	9.0632	0.4871	0.4869
27	229.9695	228.3271	5.6098	7.6554	0.3615	0.3609

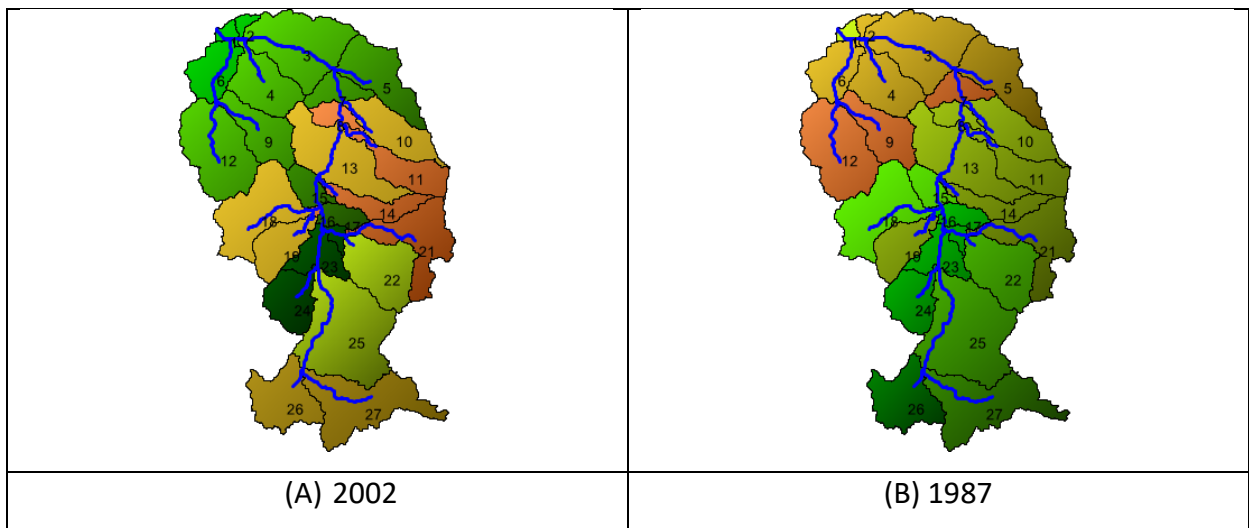


Figure 4.12. Carte d'évapotranspiration (ET) pour les sous-bassins du bassin versant de Oued Saida en 2002 (A) et 1987 (B).

Pour le sous bassin versant n°5 qui représente en globalité une zone montagneuse et forestières 1987 elle est devenue plus agricole en 2002 ce qui a légèrement augmenté la quantité d'eau de surface ruisselée et a diminué la quantité d'eau de percolation ou de subsurface comme le montre les figure 4.13 et 4.14.

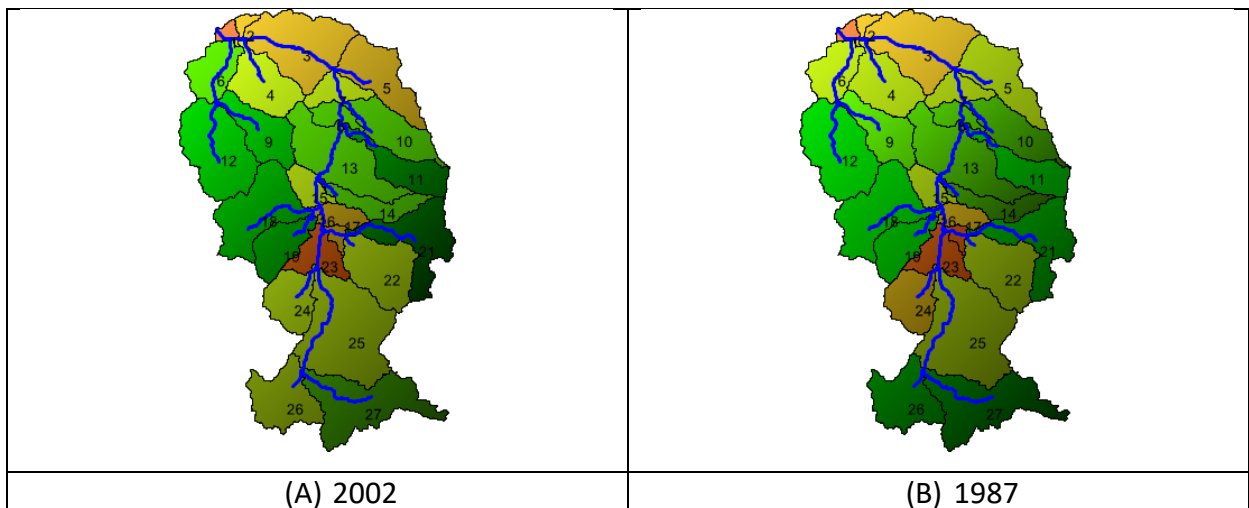


Figure 4.13. Carte des débits de surface (SURFQ) pour les sous-bassins du bassin versant d'Oued Saida en 2002 (A) et 1987 (B).

D'autre part on constate dans le sous bassin n°09 situé au milieu du bassin versant nous avons fait un autre constat, cette zone a connu une augmentation du débit de surface et une légère augmentation du débit latéral entre le scénario 1987 et 2002, en revanche elle a connu une légère diminution de l'évapotranspiration entre le scénario 1987 et 2002, ceci peut être expliqué par les mutations de l'occupation des sols qu'a connue cette zone, en 1987 elle était couverte de sol servant

à l'agriculture et de forêts, cette configuration s'est transformé en 2002 en une zone presque totalement forestière ce qui a favorisé l'écoulement de surface au détriment de celui de subsurface accompagnée d'une faible activité florale des forets par rapport à l'agriculture.

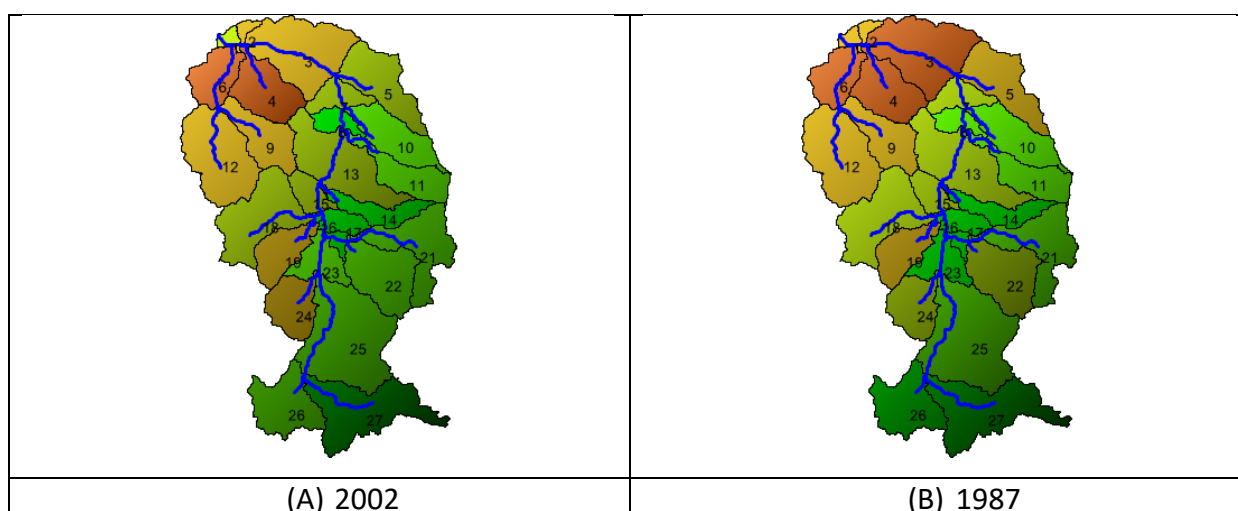


Figure 4.14. Carte du débit latéral (LATQ) pour les sous-bassins du bassin versant d'Oued Saïda en 2002 (A) et 1987 (B)

A l'échelle du bassin versant en sa globalité, le tableau 4.14 explicite Le comportement hydrologique du bassin versant en relation avec le scénario d'état réel LU 2002 et le scénario hypothétique LU 1987 a permis de constater une augmentation de la CN 2 entre LU 1987 et LU 2002, cette augmentation a provoqué une augmentation de 81% à 87% du débit de surface, et une diminution de 18% à 13% du débit latéral à l'échelle interannuelle, à l'échelle annuelle, le bassin versant génère 2. 5% à 3,5% d'eau de surface en plus dans la configuration du scénario réel LU 2002 que dans le scénario hypothétique LU 1987, ceci s'explique par l'urbanisation du bassin versant qui permet de générer plus d'eau de ruissellement. En revanche, au pas de temps mensuel, les variations de débit des cours d'eau ne sont pas très significatives entre les deux scénarios d'occupation des sols, le scénario hypothétique LU 1987 génère jusqu'à 6% de débit en moins que le scénario des conditions réelles LU 2002.

Tableau 4.14. Volumes de ruissellement annuels totaux observés et prédits et écarts respectifs

land use scenario	surface runoff (mm)	lateral flow (mm)	Total flow (mm)	CN2
land use 1987	3.58 (81 %)	0.81 (18%)	4.39	58.99
land use 2002	4.71 (87%)	0.68 (13%)	5.39	60.06

A l'échelle annuelle, les taux de ruissellement entre les scénarios réels (occupation des sols 2002) sont 2,5% et 3,5% plus élevés que ceux simulés pour le scénario hypothétique (occupation des sols 1987) comme l'illustre la Figure 4.15, d'où une augmentation de la capacité d'infiltration, puisque la

zone d'étude est caractérisée par des sols karstiques à forte perméabilité. De même, une réduction du ruissellement est importante pour le scénario d'utilisation des terres de 1987 ; cela implique que la configuration de l'état d'utilisation des terres en 2002 ne favorisait pas la recharge des eaux souterraines. Cela signifie que la configuration de l'utilisation des terres pour 2002 soutient moins la recharge des eaux souterraines que le scénario hypothétique de 1987.

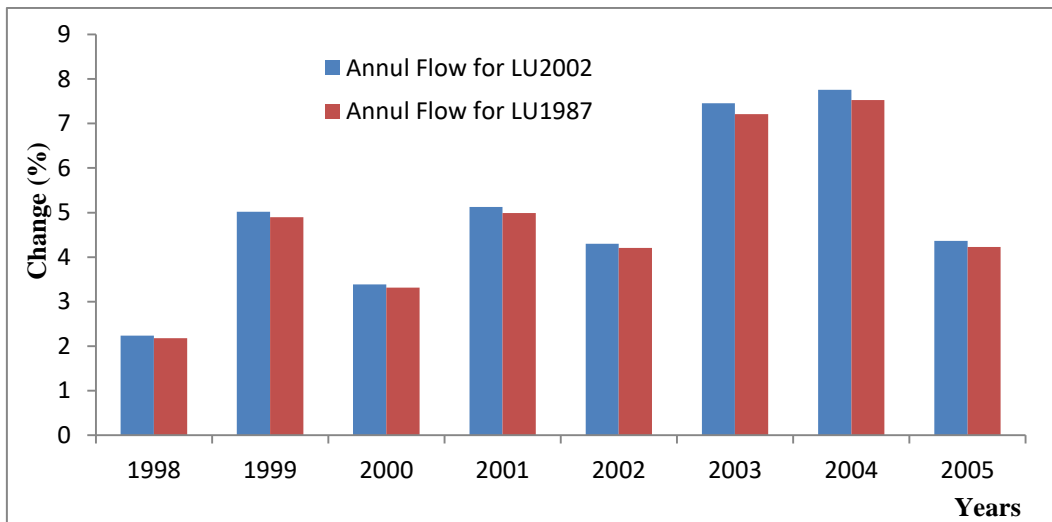


Figure 4.15. Carte du débit latéral (LATQ) pour les sous-bassins du bassin versant d'Oued Saida en 2002 (A) et 1987 (B).

A l'échelle mensuelle, la figure 4.16 montre également une petite différence entre les débits des deux scénarios de couverture du sol. La même figure montre également que les positions des débits de pointe sont généralement relativement bien respectées et similaires pour LU1987 et LU 2002, avec une tendance légèrement plus productive pour le scénario LU 2002.

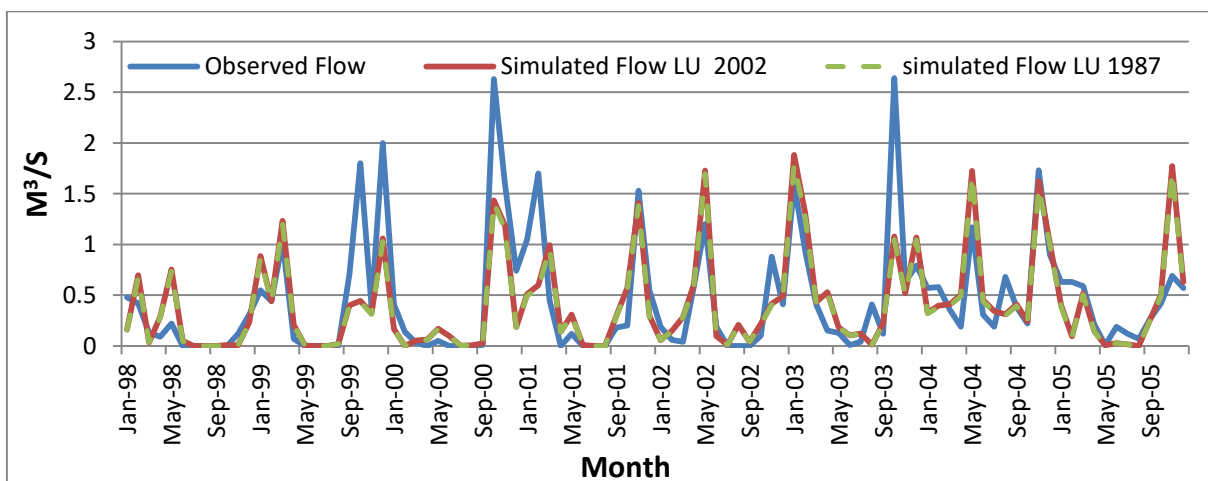


Figure 4.16. Débit mensuel simulé et observé ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) aux stations de jaugeage (période d'étalonnage : janvier 1998-décembre 2005) pour le scénario d'utilisation des terres de 2002 et 1987.

Ces différences dans les pics de débits sont traduites dans la figure 4.17, elle montre que les variations des débits de pointe (entre les scénarios LU 1987 et LU 2002), le pourcentage de cette variation des débits de pointe varie de 0 à 6%. Cependant, la variation des débits de pointe pour les différents scénarios d'utilisation des terres est négligeable ou nulle pendant les mois d'été (juin, juillet, août). De nombreuses études ont montré que lorsque l'utilisation des terres agricoles est remplacée par une utilisation naturelle des terres dans de nombreuses régions, la variation des débits de pointe est très sensible à l'utilisation des terres, avec une augmentation de (FRST) et une diminution de (AGRL).

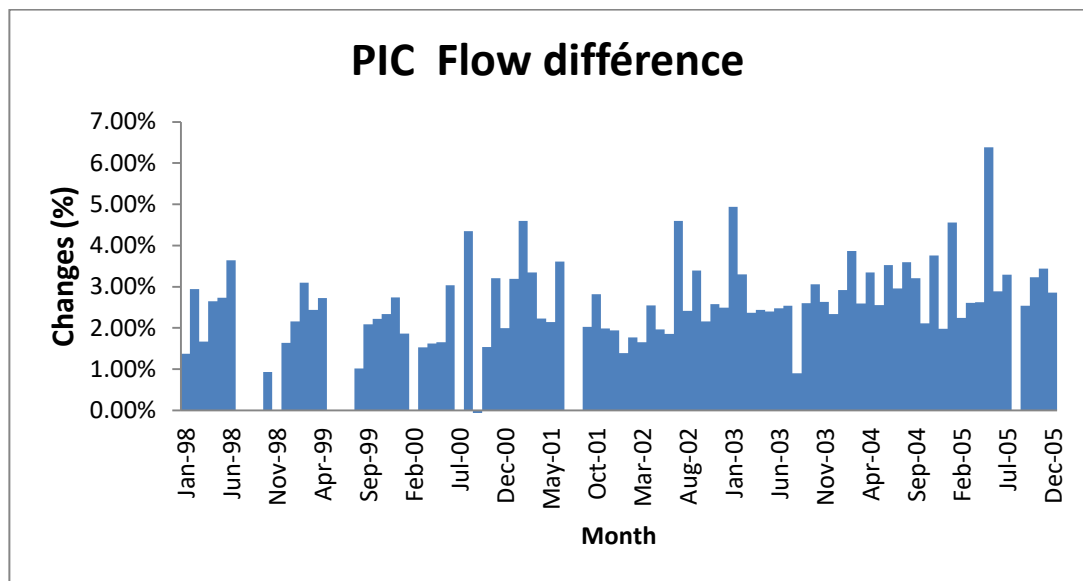


Figure 4.17. Variation du débit de pointe à l'échelle mensuelle entre LU 2002 et LU 1987.

4.8 Conclusion

Ce chapitre développe le prétraitement d'images satellitaires et la modélisation de l'occupation des sols pour les bassins versants choisis dans cette étude par la méthode du maximum de vraisemblance, suite à cette modélisation une étude d'analyse des tendances d'utilisations des sols sur la période 1987 à 2002. Le prétraitement des données a consisté à superposer les utilisations du sol détectées par traitement d'image, à convertir le type d'utilisation du sol en codes SWAT pertinents, à estimer les débits et les bilans hydrologiques.

Ensuite, la calibration performance des programmes SUFI-2 a été comparée dans les périodes du modèle en utilisant les sols prévalentes en 2002, et en recherchant la meilleure fonction objective pour SUFI2. L'analyse statistique a été effectuée pour évaluer la précision de la performance du modèle. Le calcul du bilan hydrique et l'analyse de sensibilité des modélisations a été effectué en utilisant le logiciel SWAT-CUP et l'algorithme SUFI-2.

Le calcul du bilan hydrique et de certains paramètres a été effectué en utilisant le modèle calibré et les utilisations du sol prévalant en 2002 représentant le mieux la période des observations climatiques et hydrométriques, le bassin versant d'Oued Maleh n'a pas donné de résultats, celui d'Oued Taria a donné des résultats mais non exploitable car elle répondent pas au seuil minimale d'acceptabilité, en revanche le Bassin versant d'Oued Saida a abouti à des résultats jugés satisfaisants, ce dernier a été choisi et a fait l'objet de la suite de l'étude.

Ensuite, la superposition des scénarios des cartes d'occupation des sols avec les autres couches (sol, pentes, HRU) a été réalisée pour calculer les Curves Number (CN2) des différentes dates et explorer les tendances dans ses Curves number dans tous les sous-bassins des années dans tous les sous-bassins pour les années 1987 et 2002.

Les effets des changements d'occupation des sols sur le bilan hydrique ont été étudiés sur la base des utilisations de la zone d'étude dans les années 2002 comparées à ceux de 1987 pris comme hypothèse de comparaison.

Nous pouvons conclure que le modèle est capable d'estimer le bilan hydrique de chaque sous bassin versant, et enfin les liens et interactions ont été établies et quantifiés entre les changements d'occupation des sols constatés et leurs impacts sur le bilan hydrique à l'échelle du bassin versant d'Oued Saida.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Cette étude a développé une approche basée sur l'implémentation d'une chaîne de logiciels avec de la modélisation hydro-agro-environnemental à différentes échelles spatiales, pour cerner les dynamiques d'occupation des sols dans le temps et leurs évolutions, mais aussi comprendre et quantifier les mécanismes de transfert des eaux en liens avec les mutations de utilisation des sols ce contexte dans le bassin versant de la d'oued Saida (Nord-Ouest de Algérien).

A l'issue de ce travail, les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

L'occupation des sols a été déterminé pour les bassins versant d'Oued Saida, Oued Taria et Oued Maleh pour les années 1987 et 2002, avec des précisions globales de l'ordre de respectivement pour l'année 1987 et % pour l'année % 2002, et un coefficient de Kappa égale a

L'analyse de la dynamique de la couverture du sol a permis de faire le constat sur les différentes tendances de cette dynamique ; pour le bassin versant d'Oued Saida les zones urbanisées ont progressé de 2.77% et des terres forestières présentent une progression de 5.41% accompagné d'une diminution des terres agricoles 7.89%, les terres en labour et les sols nus ont gardé une certaine stabilité. Ceci est expliqué par un exode rural massif de la population vers les villes et les agglomérations du bassin versant motivé par des conditions sécuritaires et économique qu'a subit la région, ce qui a permis l'expansion des zones urbaines et les terres abandonnés ont été reconquis par les matorrals, maquis et forêts.

Pour le bassin versant d'Oued Taria la classe des zones urbanisées affiche une certaine stabilité, elle passe de 34.36 km² à 34.99 km² soit une augmentation non significative (0.05%), les terres forestières et les terres agricole présentent une certaine diminution avec la totalité de changement respectif de 5.57% et 2.54%, soit une perte en surface de 34 km² pour les terres cultivés et 75 km² pour les zones forestières. Aussi, il est a noté la tendance haussière pour les sols nus ou dégradés 2.67 % avec une augmentation d'environ 25 Km² et pour les sols en labours 5.40 % qui ont augmentés sensiblement d'environ 100 Km², et enfin pour le bassin versant d'Oued Maleh classe des zones urbanisées a nettement augmenté dans le temps, elle passe de 26.33 km² à 40.37 km² soit une augmentation de 2.18%, les terres agricoles présentent une certaine diminution avec la totalité de changement de -14.67%, soit une perte en surface de 94.54 km² ; et pour les terres forestières une augmentation de 6 km². Aussi, il a été détecté une tendance croissante pour les sols nus ou dégradés 1.34 % avec une augmentation d'environ 1.33 Km² ; et pour les sols en labours l'augmentation est de l'ordre de 5.40 % qui ont augmentées d'environ 6 Km² ; il est a remarqué que

cette augmentation se concentre dans la partie Sud et Sud-Ouest du bassin versant dans la région de et elle se fait au détriment des zones Agricole et d'un degré moindre les zones forestière.

En second lieux, ces cartes d'occupation des sols déterminés ont servi à l'élaboration d'un système de base de données pour étudier le bilan hydrique et les changements de là à travers différentes configuration d'utilisations des terres, pour le bassin versant d'Oued Saida la modélisation a été développé avec succès, pour le bassin versant d'Oued Taria la performance était médiocre et enfin pour celui de Oued Maleh le bilan hydrologique n'a pas pu être modélisé. Le bilan hydrique aux stations de Sidi Boubekeur a été prédit pour la période de janvier 1998 à décembre 2005 et pour le bassin d'Oued Taria a été prédit pour la période de janvier 1995 à août 2005 avec une performance médiocre. Le ruissellement de surface représente environ 21% et 33% des précipitations dans ce bassin versant, et environ 33% pour le bassin versant d'Oued Taria selon la modélisation.

L'analyse de sensibilité des modèles sur les bassins versant d'Oued Saida a mis en évidence les paramètres les plus sensible à la modélisation, les paramètres liés aux eaux souterraines, ceux liées au sol et ceux liées à l'occupation des sols. Et pour le bassin versant d'Oued Taria une autre configuration ce sont les paramètres liés aux eaux souterraine, et ceux unités de réponse hydrologique (HRU), et enfin ceux liés au sol

Les écoulements des eaux souterraines et les flux latéraux ont eu lieu principalement dans la partie montagneuse supérieure du bassin versant, La raison principale de ce processus était les basses températures en haute altitude permettent l'infiltration; par conséquent, plus de percolation des eaux a eu lieu à ces altitudes aidée par la topographie aplanie qui ne favorise pas l'écoulement des eaux, cette région représente la zone d'alimentation de la nappe Karstiques des monts de Saida et de Sidi Kada.

De plus, les maquis et matorrals, situés pour la plupart dans la partie supérieure du bassin versant d'Oued Saida contribue à la conservation des sols.

L'outil SWAT nous a permis de répondre aux objectifs de cette thèse, dont le premier est l'implantation du modèle sur le bassin de la Tafna sur une période passée d'une trentaine d'année (1995-2005) tout en le calibrant à l'aide de l'outil SWAT-CUP tout en intégrant les mutations d'occupation des sols comme variable, ce qui nous a permis de cerner l'interaction entre les tendances de l'occupation des sols et les composantes du bilan hydrologique à travers divers scénarios d'utilisation des terres.

Contributions de cette étude

Ce travail a été réalisé avec succès en utilisant une variété de types de données et de compositions, ainsi qu'un grand effort pour la constitution d'une base de données avec un certain nombre de logiciels selon une méthodologie complexe.

Les contributions suivantes à la connaissance peuvent être attribuées à cette étude :

1. Un système de base de données des bassins versants d'Oued Saida, Oued Taria et Oued Maleh avec des ensembles de données dans un environnement GIS a été développé avec succès pour être utilisé non seulement pour la modélisation mais aussi pour la prise de décision par les gestionnaires pour les prise de décision par ces derniers dans une optique de développement durable.
2. Une meilleure compréhension de la dynamique de l'occupation des sols dans l'ouest Algérien ainsi que les causes de ces changements et leurs conséquences.
3. Une technique utilisant des scénarios d'utilisation des terres a été développée par la détection de paramètres optimisés de flux et de sédiments dans le bassin versant d'Oued Saida qui peut être applicable à d'autres régions du pays avec un climat similaire.
4. L'étude a prouvé la fiabilité et la haute précision du modèle SWAT pour estimer le bilan hydrique à l'échelle annuel et mensuel. pour déterminer les composantes annuelles et mensuelles du bilan hydrique dans le climat semi-aride du bassin versant Oued Saida, ceci peut être généralisé sur d'autres bassins versant

Recommandations et Perspectives

Les recommandations dérivées de cette étude concernent la modélisation des paramètres de protection du réservoir du barrage en tant qu'élément essentiel de la gestion des risques. des paramètres pour protéger le réservoir du barrage en tant qu'investissement national. Le calibrage et la validation des modèles prennent généralement beaucoup de temps, surtout en l'absence de données suffisantes.

Par conséquent, il est important de sélectionner une zone d'étude avec des données hydro-climatologiques et géologiques adéquates, et de réduire le nombre de paramètres en fonction de l'expérience sur le terrain.

Un plan de gestion intégrée du bassin versant est recommandé pour la zone d'étude. Ceci est difficile à réaliser à moins que toutes les organisations et les parties prenantes du bassin versant ne partagent pas leurs données, leurs connaissances et leurs sous une seule entité en utilisant des outils TIC comme le système de base de données créé dans cette étude.

Les suggestions suivantes peuvent être faites pour les études futures :

1. Calibrer le modèle pour le transfert de matière et de polluants qui sont des facteurs de gestion pour la conservation des sols et de la qualité des eaux dans le bassin versant.
2. Effectuer des études pédologiques avec plus de précision contribuerons efficacement à améliorer les qualités des modélisations hydrologique par SWAT.
3. Créer une nouvelle base de données sur le bilan hydrique avec des données actualisées sur l'utilisation des terres et un DEM avec une taille de pixel appropriée (inférieure à 10 mètres) tel que les techniques LIDAR.
4. Renforcer le réseau de mesures des paramètres hydro-climatique et doter les bassins versant de station hydrométriques pointu aiderai grandement à une gestion optimale et durable du territoire et à faire face aux défis anthropique, agronomique et environnementaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbaspour, K. C., Johnson, C., and Van Genuchten, M. T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose zone journal*, 3(4), 1340-1352.
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., and Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of hydrology*, 524, 733-752.
- Abbaspour, K. C., Vejdani, M., Haghghat, S., and Yang, J. (2007). *SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT*. 1596-1602.
- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1 : History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1), 45-59. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9)
- ABH-CZ. (s. d.). *Le Bassin Cheliff Zahrez*. Consulté 1 juillet 2022, à l'adresse <http://www.abh-cz.com.dz/bassin.html>
- ABH-OCC. (s. d.). *Agence de Bassin Hydrographique—Oranie—Chott—Chergui*. Consulté 1 juillet 2022, à l'adresse <http://www.abhoranie.dz/>
- Aboelnour, M., Gitau, M. W., and Engel, B. A. (2020). A Comparison of Streamflow and Baseflow Responses to Land-Use Change and the Variation in Climate Parameters Using SWAT. *Water*, 12(1), 191. <https://doi.org/10.3390/w12010191>
- Allafta, H., and Opp, C. (2021). GIS-based multi-criteria analysis for flood prone areas mapping in the trans-boundary Shatt Al-Arab basin, Iraq-Iran. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2087-2116. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1955755>
- Allen Freeze, R. (1987). Hydrological forecasting, M. G. Anderson and T. P. Burt (eds), Wiley, Chichester, 1985. No. of pages : 616. price £36.50. ISBN 0 471 90614 X. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(2), 214-215. <https://doi.org/10.1002/esp.3290120214>
- Ambroise, B. (1998). Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1-processus et facteurs. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 11(4), 471-496.
- Amiotte-Suchet, P., Linglois, N., Leveque, J., and Andreux, F. (2007). 13C composition of dissolved organic carbon in upland forested catchments of the Morvan Mountains (France) : Influence of coniferous and deciduous vegetation. *Journal of Hydrology*, 335(3-4), 354-363.

- Andréassian, V. (2004). Waters and forests : From historical controversy to scientific debate. *Journal of hydrology*, 291(1-2), 1-27.
- Andro, L. (2020). *Modélisation hydrologique SWAT du bassin versant de la Charente : Du traitement des données au calage du modèle*. 31.
- Arnold, J., and Allen, P. (1996). Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of hydrology*, 176(1-4), 57-77. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02782-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02782-3)
- Arnold, J. G., and Allen, P. M. (1999). Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 411-424.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998a). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998b). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arnold, J. G., and Williams, J. (1995). *SWRRB-a watershed scale model for soil and water resources management*. Water Resources Publications.
- Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., Williams, J., Haney, E., and Neitsch, S. (2013). *SWAT 2012 input/output documentation*. Texas Water Resources Institute.
- Baahmed, D. (2015). *Bilan hydrique et evaluation des ressources en eau superficielle du bassin de la macta* [Sidi belabess]. <https://docplayer.fr/18708859-These-presentee-en-vue-de-l-obtention-du-diplome-de-doctorat-en-sciences-en-hydraulique.html>
- Babykalpana, Y., and Thanushkodi, K. (2010). Classification of LULC Change Detection using Remotely Sensed Data for Coimbatore City, Tamilnadu, India. *arXiv preprint arXiv:1005.4216*.
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., and Palutikof, J. (2008). Climate Change and Water. In *Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Beckers, E., and Degré, A. (2011). Revue bibliographique : La prise en compte des transferts horizontaux dans les modèles hydrologiques. *BASE*. <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=7074>
- Bektas, F., and Goksel, C. (2005). Remote sensing and GIS integration for land cover analysis, a case study : Bozcaada Island. *Water Science and Technology*, 51(11), 239-244.

- Bellal, S. A., Mokrane, S., Ghodbani, T., and Dari, O. (2015). Ressources, usagers et gestionnaires de l'eau en zone semi-aride : Le cas de la wilaya d'Oran (ouest algérien). *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement. Territory in movement Journal of geography and planning*, 25-26, Article 25-26. <https://doi.org/10.4000/tem.2859>
- Benchouk, M. (2017). *CARACTERISATION, CLASSIFICATION, ET STATISTIQUE MULTI VARIABLE DES EAUX DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EL MALAH (NW ALGERIEN)*. [Mémoire de Master].
- Benselama, O. (2019). *Etude des processus d'érosion dans le bassin versant d'OUED EL MALEH D'AIN TEMOUCHENT et l'analyse des facteurs de risque*.
- Benzater, B. (2021). *Evolution des précipitations dans le contexte des changements climatiques au Nord-Ouest Algérien* [Thesis]. <http://dspace.univ-mascara.dz:8080/jspui/handle/123456789/488>
- Bergström, S. (1991). Principles and Confidence in Hydrological Modelling. *Hydrology Research*, 22(2), 123-136. <https://doi.org/10.2166/nh.1991.0009>
- Beven, K. (1981). Kinematic subsurface stormflow. *Water Resources Research*, 17(5), 1419-1424.
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology—The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105(1), 157-172. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90101-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90101-7)
- Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., and Freer, J. (1995). TOPMODEL. Computer models of watershed hydrology. *VP Singh*, 627-668.
- Blazkov, S., and Beven, K. (1997). Flood frequency prediction for data limited catchments in the Czech Republic using a stochastic rainfall model and TOPMODEL. *Journal of Hydrology*, 195(1-4), 256-278.
- Bormann, H., Breuer, L., Gräff, T., and Huisman, J. A. (2007). Analysing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance : A comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis. *Ecological modelling*, 209(1), 29-40.
- Brahim, H., Meddi, M., and Boucefiane, A. (2013). Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales Cas du Bassin Chott-Chergui. *Nature and Technologie*, 8, 41 à 48.
- Brooks, D. B. (2007). Fresh water in the middle east and north Africa. In *Integrated water resources management and security in the Middle East* (p. 33-64). Springer.
- Brulebois, E. (2016). *Impacts du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau en Bourgogne : Aspects quantitatifs et qualitatifs*.
- Calder, I. (1992). *Hydrologic effects of land-use change*. McGraw-Hill Inc.
- Calder, I. (1993). *Hydrologic effects of land use change*.

- Canty, M. J. (2006). *Image analysis, classification and change detection in remote sensing : With algorithms for ENVI/IDL and Python*. Crc Press.
- Chaib Draa Tani, M. (2019). *Acteurs de l'eau et leurs interactions dans la gestion de l'eau au niveau du bassin versant Tafna*. [Thesis]. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/14863>
- Chantigny, M. H. (2003). Dissolved and water-extractable organic matter in soils : A review on the influence of land use and management practices. *Geoderma*, 113(3-4), 357-380.
- Chaponnière, A. (2014). *Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride : Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain)*. Presses Académiques Francophones.
- Chea, R., and Sánchez Pérez, J. (2016). *Modélisation des transferts d'eau et des matières en suspension dans un continuum fluvial lors des événements extrêmes (crues/étiages sévères)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4087.4004>
- Collignon, B. (1986). *Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen (Algérie)*.
- CRCCH. (2005). <http://www.ewatercrc.com.au/>
- Cunge, J. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205-230.
- Dawes, W., Hatton, T. J. (Thomas J., and Resources, C. D. of W. (1993). *TOPOG IRM / by W. Dawes and T. Hatton*. CSIRO Division of Water Resources.
- De Roo, A., Odijk, M., Schmuck, G., Koster, E., and Lucieer, A. (2001). Assessing the effects of land use changes on floods in the Meuse and Oder catchment. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(7-8), 593-599.
- DeFries, R., and Eshleman, K. N. (2004). Land-use change and hydrologic processes : A major focus for the future. *Hydrological Processes*, 18(11), 2183-2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.5584>
- Dile, Y. T., and Srinivasan, R. (2014). Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds : An application in the Blue Nile River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(5), 1226-1241. <https://doi.org/10.1111/jawr.12182>
- Dunn, S., Mackay, R., Adams, R., and Oglethorpe, D. (1996). The hydrological component of the NELUP decision-support system : An appraisal. *Journal of Hydrology*, 177(3-4), 213-235.
- Duru, J. O., and Hjelmfelt Jr, A. T. (1994). Investigating prediction capability of HEC-1 and KINEROS kinematic wave runoff models. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 87-103.

- EarthExplorer*. (s. d.). Consulté 15 juillet 2022, à l'adresse <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- elouissi, a. (2016). *changement climatique, impacts et vulnérabilité. cas du bassin versant de la macta* [thesis]. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/15065>
- FAO. (1997). <https://www.fao.org/3/w4345e/w4345e00.htm>
- Fiering, M. B. (1967). 1967. *Streamflow synthesis*. Harvard University Press, Cambridge.
- Matalas, N.C. 1967. *Mathematical assessment of synthetic hydrology*. *Water Resources Res.* 3(4), 937-945.
- Fohrer, N., Haverkamp, S., and Frede, H. (2005). Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions : Development of sustainable land use concepts for low mountain range areas. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 659-672.
- Fuka, D. R., Walter, M. T., MacAlister, C., Degaetano, A. T., Steenhuis, T. S., and Easton, Z. M. (2014). Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 28(22), 5613-5623.
- Fulaji, B. S. (2016). *Study of Streamflow Response to Land use Land cover Change in the Nethravathi River Basin, India*.
- Gao, J., and Skillcorn, D. (1998). Capability of SPOT XS data in producing detailed land cover maps at the urban-rural periphery. *International Journal of Remote Sensing*, 19(15), 2877-2891.
- Gibson, P., and Power, C. (2000). *Introductory Remote Sensing : Applications and Digital Image Processing*.
- GIEC. (2020, août 4). *Rapport spécial du GIEC 2019 : Les terres émergées*. Selectra. <https://climate.selectra.com/fr/actualites/rapport-giec-terres-emerges>
- Gineste, P. (1997). *Télédétection spatiale et modélisation du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants. I. Problématique de la modélisation*. 367-378.
- Goodrich, D. C. (1990). *Basin scale and runoff model complexity*. Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona (Tucson, AZ).
- Gourinard, Y. (1958). *Recherches sur la géologie du littoral oranais... Épirogénèse et nivellements : Par Yves Gourinard*. Service de la carte géologique de l'Algérie.
- Grayson, R., Blöschl, G., and Moore, I. (1995). Distributed parameter hydrologic modelling using vector elevation data : THALES and TAPES-C. *Computer models of watershed hydrology*, 669-696.
- Green, W. H., and Ampt, G. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1-24.

- Grieve, I. C., and Marsden, R. L. (2001). Effects of forest cover and topographic factors on TOC and associated metals at various scales in western Scotland. *Science of the total environment*, 265(1-3), 143-151.
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahé, G., Alirahmani, S., and Keddar, A. (2018). Modeling of discharge and sediment transport through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria). *Water Science*, 32(1), 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.12.004>
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., Karahacane, H., and Ali Rahmani, S. (2019). Tendances des précipitations et évolution des écoulements dans un cadre de changement climatique : Bassin versant de l'oued Mina en Algérie. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 32(2), 83-114. <https://doi.org/10.7202/1065202ar>
- Hamouda, S. (2011). *Etude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et SIG* [Phdthesis, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00612952>
- Hardy, E. E., and Anderson, J. R. (1973). *A land use classification system for use with remote-sensor data*. 2.
- Hargreaves, G. H., and Zohrab, A. S. (1985). *Reference Crop Evapotranspiration from Temperature*. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=26773>
- Hasyim, A. W., Hariyanto, T., and Sulistyarso, H. (2011). Urban Land Use Change Analysis using Temporal Multispectral Imagery and Image Difference. *International Journal of Academic Research*, 3(3), 246-251.
- Hatton, T. J., and Dawes, W. (1993). *TOPOG---IRM. 2. Example simulations*.
- Hernandez, M., Nearing, M. A., Al-Hamdan, O. Z., Pierson, F. B., Armendariz, G., Weltz, M. A., Spaeth, K. E., Williams, C. J., Nouwakpo, S. K., Goodrich, D. C., Unkrich, C. L., Nichols, M. H., and Holifield Collins, C. D. (2017). The Rangeland Hydrology and Erosion Model : A Dynamic Approach for Predicting Soil Loss on Rangelands: DYNAMIC RANGELAND SOIL EROSION MODEL. *Water Resources Research*, 53(11), 9368-9391. <https://doi.org/10.1002/2017WR020651>
- Hofste, R. W., Reig, P., and Schleifer, L. (2019). *17 Countries, Home to One-Quarter of the World's Population, Face Extremely High Water Stress*.
- Hosseini, M. (2010). *EFFECT OF LAND USE CHANGES ON WATER BALANCE AND SUSPENDED SEDIMENT YIELD OF TALEGHAN CATCHMENT, IRAN*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19100.90240>

- Hundecha, Y., and Bárdossy, A. (2004). Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of hydrology*, 292(1-4), 281-295. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.01.002>
- J. Ronald Eastman. (2003). (PDF) *IDRISI Kilimanjaro Guide to GIS and Image Processing* | Tk Bong—Academia.edu. https://www.academia.edu/24202322/IDRISI_Kilimanjaro_Guide_to_GIS_and_Image_Processing
- Jakeman, A., and Hornberger, G. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water resources research*, 29(8), 2637-2649.
- Jamet, S., and Corfee-Morlot, J. (2009). *Assessing the impacts of climate change: A literature review*.
- Jensen, J.R. (2005). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2nd Edition* (Hall). <https://www.pearson.com/content/one-dot-com/one-dot-com/us/en/higher-education/program.html>
- Jha, M., Gassman, P. W., Secchi, S., Gu, R., and Arnold, J. (2004). Effect of Watershed Subdivision on Swat Flow, Sediment, and Nutrient Predictions1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 40(3), 811-825. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb04460.x>
- Jodar-Abellan, A., Valdes-Abellan, J., Pla, C., and Gomariz-Castillo, F. (2019). Impact of land use changes on flash flood prediction using a sub-daily SWAT model in five Mediterranean ungauged watersheds (SE Spain). *Science of The Total Environment*, 657, 1578-1591. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.034>
- Johnston, P. R., and Pilgrim, D. H. (1976). Parameter optimization for watershed models. *Water Resources Research*, 12(3), 477-486. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00477>
- Jones, C. (1983). A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum. *Field Crops Research*, 6, 133-147.
- Kamal, M., Muhammad, F., and Mahardhika, S. (2020). Effect of image radiometric correction levels of Landsat images to the land cover maps resulted from maximum likelihood classification. *E3S Web of Conferences*, 153, 02004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015302004>
- Kergomard, C. (2000). Pratique des corrections atmosphériques en télédétection: Utilisation du logiciel 5S-PC. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.1679>

- Kim, S., Delleur, J., Mitchell, J., Engel, B., and Walker, S. (1999). SIMULATION OF RUNOFF IN AGRICULTURAL WATERSHEDS WITH TILE DRAINS USING AN EXTENDED TOPMODEL. *Transactions of the ASAE*, 42(3), 639.
- Kirkby, M. J., Naden, P. S., Burt, T., and Butcher, D. P. (1993). *Computer Simulation in Physical Geography, 2nd Edition* (2nd edition). Wiley.
- Knisel, W., and Williams, J. (1995). Hydrology components of CREAMS and GLEAMS models. *Computer models of watershed hydrology.*, 1069-1114.
- Kokkonen, T., and Jakeman, A. J. (2002). Chapter 14 Structural effects of landscape and land use on streamflow response. *Developments in Environmental Modelling*, 22, 303-321. [https://doi.org/10.1016/S0167-8892\(02\)80015-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8892(02)80015-X)
- Krause, P., Boyle, D. P., and Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5, 89-97.
- Krysanova, V., and White, M. (2015). Advances in water resources assessment with SWAT—an overview. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5), 771-783.
- Labani, A., Benabdeli, K., and Kefifa, A. (2006). Climatic fluctuations and dynamics of landscape occupation in the district of Ain El Hadjar (Saïda, Algeria). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 17(3), 391-398.
- Laborde, J. (1995). Les différentes étapes d'une cartographie automatique : Exemple de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 8, 37-46.
- Larabi, S. (2017). *Nouvelles approches de calibration automatique appliquées à un modèle hydrologique conceptuel semi-distribué*. [Phd, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique]. <https://espace.inrs.ca/id/eprint/6650/>
- Lawal, O., Gaiser, T., and Stahr, K. (2004). Effect of land use changes on sediment load in the Zagbo River Catchment in Southern Benin. *Deutscher Tropentag proceeding*.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., and Chipman, J. (1994). Remote sensing and image interpretation. John Willey and Sons. Inc, *United States of America*.
- Linglois-Dussert, N. (2003). *Suivi interannuel et modélisation de la composition chimique des eaux d'écoulement en relation avec les occupations du sol : Cas du bassin versant du Cousin (Morvan)*.
- Lørup, J. K., Refsgaard, J. C., and Mazvimavi, D. (1998). Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling : Case studies from Zimbabwe. *Journal of Hydrology*, 205(3), 147-163. [https://doi.org/10.1016/S0168-1176\(97\)00311-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1176(97)00311-9)

- Lukey, B., Sheffield, J., Bathurst, J., Hiley, R., and Mathys, N. (2000). Test of the SHETRAN technology for modelling the impact of reforestation on badlands runoff and sediment yield at Draix, France. *Journal of Hydrology*, 235(1-2), 44-62.
- Lyne, V., and Hollick, M. (1979). *Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling*. 79(10), 89-93.
- MacMillan, R., Furley, P., and Healey, R. (1993). Using hydrological models and geographic information systems to assist with the management of surface water in agricultural landscapes. *Landscape ecology and geographic information systems.*, 181-209.
- Maizi, D. (2015). *Etude hydrologique et hydrogéologique du bassin versant du Chott Ech Chergui Hautes plaines-Ouest Algérie—Sécheresse info*.
<http://www.secheresse.info/spip.php?article47698>
- Mami, A. (2020). *Impact des changements climatiques sur la disponibilité et la gestion des ressources en eau : Cas du bassin versant de la Tafna*.
- Martonne, E. de. (1926). L'indice d'aridité. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 3(9), 3-5.
- McKay, J. (1988). Sensitivity and uncertainty analysis using a statistical sample of input values. *Uncertainty analysis. Measuring Vegetation (NDVI and EVI)*. (2000, août 30). [Text.Article]. NASA Earth Observatory.
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation>
- Meddi, H., and Meddi, M. (2009). Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 20(1), 57-65.
<https://doi.org/10.1684/sec.2009.0169>
- Meddi, M., and Meddi, H. (2007). VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS DU NORD-OUEST DE L'ALGERIE. *Geographia Technica*, 2, 49-55.
- Meddi, M., and Talia, A. (2013). Runoff evolution in Macta basin (Northwest of Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 6(1), 35-41.
- Meterfi, B., Letreuch-Belarouci, N., and Benabdeli, K. (2011). Incidence de la fluctuation des précipitations sur l'occupation des sols dans les hautes plaines de Sidi-Bel-Abbès (Algérie). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement, Volume 5*, 191-210.
- Michaud, J. D. (1992). *Distributed rainfall-runoff modeling of thunderstorm-generated floods : A case study in a mid-sized, semi-arid watershed in Arizona*.
- Michaud, J., and Sorooshian, S. (1994). Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed. *Water Resources Research*, 30(3), 593-605.
<https://doi.org/10.1029/93WR03218>

- Mikayilov, F., Vejdani, M., and Haghghat, S. (2007). SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. *Proc.Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'07)*.
- Monteith, J. L. (1965). *Evaporation and environment*. 19, 205-234.
- Moore, R., and Thompson, J. (1996). Are water table variations in a shallow forest soil consistent with the TOPMODEL concept? *Water Resources Research*, 32(3), 663-669.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Musy, A., and Higy, C. (2004). *Hydrologie : Une science de la nature* (Vol. 21). PPUR presses polytechniques.
- Narumalani, S., Mishra, D. R., Burkholder, J., Merani, P. B., and Willson, G. (2006). A comparative evaluation of ISODATA and spectral angle mapping for the detection of saltcedar using airborne hyperspectral imagery. *Geocarto International*, 21(2), 59-66.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neill, C., Melillo, J. M., Steudler, P. A., Cerri, C. C., de Moraes, J. F., Piccolo, M. C., and Brito, M. (1997). Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon. *Ecological Applications*, 7(4), 1216-1225.
- NEITSCH, S. L. (2005). SWAT2005 theoretical documentation. <http://swatmodel.tamu.edu/media/1292/SWAT2005theory.pdf>.
<https://ci.nii.ac.jp/naid/10027756261/>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2011a). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2011b). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- Nghiem, V. T. (2014). *Impact du changement du mode d'occupation des sols sur le fonctionnement hydrogéochimique des grands bassins versants : Cas du bassin versant de l'Ain*. IGA.
- Nguyen Khoi, D., and Thom, V. (2015). Parameter Uncertainty Analysis for Simulating Streamflow in a River Catchment of Vietnam. *Global Ecology and Conservation*, 4, 538-548. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.10.007>
- Nicks, A. (1974). STOCHASTIC GENERATION OF THE OCCURRENCE, PATTERN, AND. *Miscellaneous Publication*, 1275, 154.

- Niehoff, D., Fritsch, U., and Bronstert, A. (2002). Land-use impacts on storm-runoff generation : Scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *Journal of hydrology*, 267(1-2), 80-93.
- Nintarakit, N. (1989). *Classification automatique d'images satellitaires par la méthode de maximum de vraisemblance (ORSTOM 88-89)*.
- Ogden, F. L., Garbrecht, J., DeBarry, P. A., and Johnson, L. E. (2001). GIS and distributed watershed models. II: Modules, interfaces, and models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(6), 515-523.
- Olchev, A., Ibrom, A., Priess, J., Erasmi, S., Leemhuis, C., Twele, A., Radler, K., Kreilein, H., Panferov, O., and Gravenhorst, G. (2008). Effects of land-use changes on evapotranspiration of tropical rain forest margin area in Central Sulawesi (Indonesia) : Modelling study with a regional SVAT model. *ecological modelling*, 212(1-2), 131-137.
- Parkin, G., O'Donnell, G., Ewen, J., Bathurst, J. C., O'Connell, P. E., and Lavabre, J. (1996). Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 2. Case study for a Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 175(1), 595-613. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80027-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80027-8)
- Pekárová, P., and Pekár, J. (1996). The impact of land use on stream water quality in Slovakia. *Journal of Hydrology*, 180(1-4), 333-350.
- Penman, H. (1961). Weather, plant and soil factors in hydrology. *Weather*, 16(7), 207-219.
- Perrodon, A. (1957). *Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale*.
- Priestley, C. H. B., and Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- Ragab, R., and Cooper, J. (1993). Variability of unsaturated zone water transport parameters : Implications for hydrological modelling. 1. In situ measurements. *Journal of hydrology*, 148(1-4), 109-131.
- Refsgaard, J. C. (1997). *Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models—ScienceDirect*. 69-97.
- Refsgaard, J. C., and Knudsen, J. (1996). Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological Models. *Water Resources Research*, 32(7), 2189-2202. <https://doi.org/10.1029/96WR00896>
- REZAK, salima. (2014). *HYDROLOGIE ALGERIENNE : SYNTHÈSE DES APPORTS DE CRUES SUR SIG*. USTO.

- Richards, J. A., and Jia, X. (2006). Interpretation of hyperspectral image data. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, 359-388.
- Ritchie, Joe. t. (1972). *Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover—Ritchie—1972—Water Resources Research—Wiley Online Library*.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR008i005p01204>
- Rovey, E. W., Woolhiser, D. A., and Smith, R. E. (1977). *Distributed kinematic model of upland watersheds*, A.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., and Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis : The primer*. John Wiley and Sons.
- Saulnier, G.-M., Beven, K., and Obled, C. (1997). Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. *Journal of Hydrology*, 202(1), 158-172. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00059-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00059-0)
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A., Smith, A., and Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190120.
- Seibert, J. (1999). *Conceptual runoff models-fiction or representation of reality?*
- Shamsi, U. M. (Sam). (2008). Arc Hydro : A Framework for Integrating GIS and Hydrology. *Journal of Water Management Modeling*. <https://doi.org/10.14796/JWMM.R228-11>
- Sharpley, A. N., and Williams, J. R. (1990). EPIC, erosion/productivity impact calculator. *Technical bulletin (USA)*.
- Shoemaker, L., Dai, T., Koenig, J., and Hantush, M. (2005). *TMDL model evaluation and research needs*. Citeseer.
- Short, D., Dawes, W. R., and White, I. (1995). The practicability of using Richards' equation for general purpose soil-water dynamics models. *Environment International*, 21(5), 723-730.
- Short's, N. (2010). *Remote Sensing Totorial. Watershed modeling*. In : *Computer Models of Watershed Hydrology*. Singh, V.P (ed.). Chapter 1,, 1- 22.
http://rst.gsfc.nasa.gov/Intro/Part2_1.html. Retrieved 23 June 2010. Singh, V.P. (1995).
- Singh, V. P. (1995). What is environmental hydrology? In *Environmental hydrology* (p. 1-12). Springer.
- Singh, V. P. (2018). Hydrologic modeling : Progress and future directions. *Geoscience letters*, 5(1), 1-18.
- Singh, V. P., and Frevert, D. K. (2003). *Watershed modeling*. 1-37.
- Singh, V., and Woolhiser, D. (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *J. Hydrol. Eng.*, 7(4), 270-292. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270))

- Sitayeb, T. (2008). Contribution à l'étude de la dynamique de l'occupation des sols de la plaine de la Macta (Algérie) à l'aide de la télédétection et des systèmes d'information géographique. *Comptes Rendus Biologies*, 331(6), 466-474. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.03.010>
- Sloan, P. G., and Moore, I. D. (1984). Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12), 1815-1822.
- Smith, R. B. (2012). *Introduction to Remote Sensing. Lecture Notes. - References—Scientific Research Publishing*. <https://www.scirp.org/%28S%28351jmbntvnsjt1aadkposzje%29%29/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1366088>
- Smith, R., Goodrich, D., Woolhiser, D., and Unkrich, C. (1995). KINEROS-a kinematic runoff and erosion model. *Computer models of watershed hydrology.*, 697-732.
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., and Xu, C. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of hydrology*, 523, 739-757.
- Taïbi, S., Meddi, M., Mahe, G., and Assani, A. (2015). Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. *Theoretical and Applied Climatology*.
- Taleb, A., Belaidi, N., and Gagneur, J. (2004). Water quality before and after dam building on a heavily polluted river in semi-arid Algeria. *River Research and Applications*, 20(8), 943-956.
- Taleb, R., Naimi, M., CHIKHAOUI, M., Raclot, D., and Sabir, M. (2019). Evaluation Des Performances Du Modele Agro-Hydrologique SWAT à Reproduire Le Fonctionnement Hydrologique Du Bassin Versant Nakhla (Rif occidental, Maroc). *European Scientific Journal ESJ*, 15. <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n5p311>
- TECSULT, I. (2004). *Étude de la protection des bassins versants de l'ensemble des barrages en études d'Avant Projet Détaillé (lots nos 1 à 4) et des bassins versants des barrages en exploitation (lots nos 5 et 6)*. ANBT.
- Thapa, P. (2021). The Relationship between Land Use and Climate Change: A Case Study of Nepal. In *The Nature, Causes, Effects and Mitigation of Climate Change on the Environment*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98282>
- Thomas, G. (1985). Géodynamique d'un bassin intramontagneux. Le bassin du Bas chéelif occidental durant le mio-plio- quaternaire. *Thèse Ès-Sciences. Pau*.
- Thompson, S. A. (2017). *Hydrology for water management*. CRC Press.

- Tutiempo Network. (s. d.-a). *Climat BENI-SAF Données climatiques (605180)*.
www.tutiempo.net. Consulté 12 juillet 2022, à l'adresse
<https://fr.tutiempo.net/climat/2012/ws-605180.html>
- Tutiempo Network. (s. d.-b). *Climat SAIDA - Données climatiques (605360)*. www.tutiempo.net.
Consulté 29 juin 2022, à l'adresse <https://fr.tutiempo.net/climat/08-2006/ws-605360.html>
- USDA, S. (1972). National engineering handbook, section 4 : Hydrology. *Washington, DC*.
- USGS. (2019). *Landsat Collection 1 Level 1 Product Definition | U.S. Geological Survey*.
<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-collection-1-level-1-product-definition>
- Van Griensven, A. (2002). *Developments towards integrated water quality modelling for river basins*. [PhD Thesis].
- Van Liew, M. W., Arnold, J., and Bosch, D. (2005). Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. *Transactions of the ASAE*, 48(3), 1025-1040.
- van Griensven, A., Francos, A., and Bauwens, W. (2002). Sensitivity analysis and auto-calibration of an integral dynamic model for river water quality. *Water Science and Technology*, 45(9), 325-332. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0271>
- van Griensven, A. van, and Bauwens, W. (2003). Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water Resources Research*, 39(12).
- Vertessy, R., Benyon, R., and Haydon, S. (1994). *Melbourne's forest catchments : Effect of age on water yield*.
- Vertessy, R., Hatton, T., O'shaughnessy, P., and Jayasuriya, M. (1993). Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. *Journal of Hydrology*, 150(2-4), 665-700.
- Vörösmarty, C. J., and Moore, B. (1991). Modeling basin-scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies : An example using the Zambezi River. *Surveys in Geophysics*, 12(1), 271-311.
- Watson, B. (2006). *Development of a Model for Land Use Change Impact*. University, Australia.
- Williams, J. R. (1969). Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Transactions of the ASAE*, 12(1), 100-0103.
- Williams, J. R. (1995). The EPIC model. *Computer models of watershed hydrology.*, 909-1000.
- Woolhiser, D. A. (1996). Search for physically based runoff model—A hydrologic El Dorado? *Journal of Hydraulic Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:3\(122\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:3(122))
- Yair, A., and Lavee, H. (1985). Runoff generation in arid and semi-arid zones. *Hydrological forecasting/edited by MG Anderson and TP Burt*.

- Yazdanpanah, M., Hayati, D., Hochrainer-Stigler, S., and Zamani, G. H. (2014). Understanding farmers' intention and behavior regarding water conservation in the Middle-East and North Africa : A case study in Iran. *Journal of environmental management*, 135, 63-72.
- Ye, W., Bates, B., Viney, N., Sivapalan, M., and Jakeman, A. (1997). Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resources Research*, 33(1), 153-166.
- Zaibak, I., and Meddi, M. (2022). Simulating streamflow in the Cheliff basin of west northern Algeria using the SWAT model. *Journal of Earth System Science*, 131(1), 25. <https://doi.org/10.1007/s12040-021-01777-x>
- Zettam, A. (2018). *Transfert des nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) vers la mer Méditerranée. Approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins versants Nord africains.*
- Zettam, A., Taleb, A., Sauvage, S., Boithias, L., Belaidi, N., and Sánchez-Pérez, J. M. (2017). Modelling hydrology and sediment transport in a semi-arid and anthropized catchment using the SWAT model: The case of the Tafna river (northwest Algeria). *Water*, 9(3), 216. <https://doi.org/10.3390/w9030216>
- Zhang, Y.-K., and Schilling, K. (2006). Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940 s : Effect of land use change. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 412-422.
- Zhu, T., and Xu, X. (2021). Simulation Modeling of Hydrological and Erosion Processes. In T. Zhu and X. Xu (Éds.), *Watershed Erosion Processes* (p. 147-155). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81151-8_9

ANNEXE

ANNEXE

Annexe (A)

Tableau A.1. Données climatologiques (WGN) de la station synoptique d'Oued Saïda

STATION	111102	111112	wea43
WLATITUDE	35.037	34.932	33.25
WLONGITUDE	0.05	0.181	-95.78
WELEV	530	705	179.8
RAIN_YRS	10	10	10
TMPMX1	12.3256	12.3256	11.68
TMPMX2	14.47598	14.47598	13.94
TMPMX3	18.68607	18.68607	18.82
TMPMX4	20.79494	20.79494	23.62
TMPMX5	25.89349	25.89349	27.61
TMPMX6	32.33097	32.33097	32.32
TMPMX7	36.19079	36.19079	34.87
TMPMX8	35.2268	35.2268	34.98
TMPMX9	29.23882	29.23882	31.39
TMPMX10	24.14537	24.14537	25.74
TMPMX11	16.39597	16.39597	18.38
TMPMX12	12.74874	12.74874	13.08
TMPMN1	2.197859	2.197859	-0.22
TMPMN2	2.108608	2.108608	1.57
TMPMN3	4.271379	4.271379	5.93
TMPMN4	5.239206	5.239206	11.09
TMPMN5	9.405484	9.405484	15.69
TMPMN6	14.76582	14.76582	20.37
TMPMN7	17.34012	17.34012	22.35
TMPMN8	18.23408	18.23408	21.96
TMPMN9	14.23755	14.23755	18.19
TMPMN10	11.21064	11.21064	11.9
TMPMN11	6.066364	6.066364	5.63
TMPMN12	3.571437	3.571437	1.21
TMPSTDMX1	4.111866	4.111866	7.36
TMPSTDMX2	5.154445	5.154445	6.94
TMPSTDMX3	5.474108	5.474108	6.47
TMPSTDMX4	5.565354	5.565354	4.74
TMPSTDMX5	6.218726	6.218726	3.98
TMPSTDMX6	4.784006	4.784006	3.41
TMPSTDMX7	3.560896	3.560896	3.27
TMPSTDMX8	3.190574	3.190574	3.38
TMPSTDMX9	4.30669	4.30669	4.44
TMPSTDMX10	4.489277	4.489277	5.32
TMPSTDMX11	4.927303	4.927303	6.19
TMPSTDMX12	3.768111	3.768111	6.47
TMPSTDMN1	3.387601	3.387601	6.1
TMPSTDMN2	3.305265	3.305265	5.58
TMPSTDMN3	3.59721	3.59721	5.59
TMPSTDMN4	3.467298	3.467298	4.63
TMPSTDMN5	4.027401	4.027401	3.72
TMPSTDMN6	4.114562	4.114562	2.76
TMPSTDMN7	3.494383	3.494383	2.06
TMPSTDMN8	3.209638	3.209638	2.24

TMPSTDMN9	3.4052	3.4052	3.96
TMPSTDMN10	3.588372	3.588372	5.06
TMPSTDMN11	3.177498	3.177498	5.42
TMPSTDMN12	3.086429	3.086429	5.51
PCPMM1	32.52727	33.35	66.9
PCPMM2	32.06364	34.24	72.3
PCPMM3	24.99091	27.82	89.8
PCPMM4	27.77273	29.05	120
PCPMM5	23.35455	26.01111	133.2
PCPMM6	4.28	7.09	93.1
PCPMM7	1.52	5.84	81.9
PCPMM8	6.85	5.97	66.4
PCPMM9	19.3	17.44	88.6
PCPMM10	27.64545	37.96	87.9
PCPMM11	43.80909	41.45	81.3
PCPMM12	32.78182	30.13	77.1
PCPSTD1	2.865439	2.979156	12.7
PCPSTD2	3.480443	3.916492	14.2
PCPSTD3	3.290135	3.078939	14.2
PCPSTD4	3.232882	3.197694	17.8
PCPSTD5	3.542635	3.945239	18.3
PCPSTD6	1.050138	1.270733	19
PCPSTD7	0.423786	1.546055	16.5
PCPSTD8	1.554525	1.419733	16
PCPSTD9	2.396991	2.632925	22.1
PCPSTD10	3.248392	4.494359	20.3
PCPSTD11	4.717274	4.661989	19.6
PCPSTD12	3.644235	3.166831	16.3
PCPSKW1	3.774264	3.562991	2.23
PCPSKW2	5.352264	4.921452	2.27
PCPSKW3	7.475353	4.91833	0.91
PCPSKW4	5.612072	5.409821	0.94
PCPSKW5	9.710452	9.305103	1.5
PCPSKW6	9.108989	7.055214	2.78
PCPSKW7	9.525248	10.49462	0.94
PCPSKW8	9.084063	9.800987	1.44
PCPSKW9	5.293374	6.541245	2.27
PCPSKW10	5.850945	6.213588	1.93
PCPSKW11	5.30466	5.951673	2.41
PCPSKW12	6.574019	5.488016	3.05
PR_W1_1	0.1470588	0.1178862	0.17
PR_W1_2	0.125	0.131579	0.18
PR_W1_3	7.17E-02	0.1046512	0.19
PR_W1_4	0.1167883	0.1344538	0.22
PR_W1_5	0.1047297	0.1212121	0.21
PR_W1_6	2.41E-02	6.07E-02	0.16
PR_W1_7	1.64E-02	2.67E-02	0.15
PR_W1_8	3.34E-02	4.42E-02	0.13
PR_W1_9	0.1157895	9.92E-02	0.13
PR_W1_10	0.1020408	0.1230769	0.14
PR_W1_11	0.1653846	0.1695652	0.13
PR_W1_12	0.1578947	0.1548117	0.15
PR_W2_1	0.4117647	0.5396826	0.43
PR_W2_2	0.5079365	0.4545455	0.41

PR_W2_3	0.5625	0.4807692	0.39
PR_W2_4	0.4285714	0.483871	0.41
PR_W2_5	0.3111111	0.4166667	0.49
PR_W2_6	0.2222222	0.1052632	0.44
PR_W2_7	0	0.2	0.4
PR_W2_8	9.09E-02	0.1875	0.39
PR_W2_9	0.25	0.3157895	0.47
PR_W2_10	0.3617021	0.36	0.4
PR_W2_11	0.3857143	0.4428571	0.46
PR_W2_12	0.44	0.4788733	0.43
PCPD1	6.272727	6.4	7.12
PCPD2	5.727273	5.5	6.78
PCPD3	4.363636	5.2	7.36
PCPD4	5.090909	6.2	8.15
PCPD5	4.090909	5.333333	9.04
PCPD6	0.9	1.9	6.67
PCPD7	0.5	1	6.2
PCPD8	1.1	1.6	5.45
PCPD9	4	3.8	5.91
PCPD10	4.272727	5	5.86
PCPD11	6.363636	7	5.82
PCPD12	6.818182	7.1	6.46
RAINHHMX1	3.084848	3.43	16
RAINHHMX2	4.160606	4.72	17.5
RAINHHMX3	3.090909	3.38	20.3
RAINHHMX4	3.836364	4.153333	27.2
RAINHHMX5	4.342424	4.077778	38.4
RAINHHMX6	0.96	1.526667	35.6
RAINHHMX7	0.44	1.556667	34
RAINHHMX8	1.453333	1.703333	45.2
RAINHHMX9	3.045455	3.67	36.8
RAINHHMX10	4.381818	5.853333	25.7
RAINHHMX11	6.60303	6.626667	22.9
RAINHHMX12	4.80303	4.03	14
SOLARAV1	10.07648	10.07648	9.43
SOLARAV2	13.42759	13.42759	12.28
SOLARAV3	17.85038	17.85038	16.42
SOLARAV4	21.07718	21.07718	19.4
SOLARAV5	24.22149	24.22149	22.96
SOLARAV6	26.37848	26.37848	25.01
SOLARAV7	27.22349	27.22349	24.51
SOLARAV8	23.00812	23.00812	23.13
SOLARAV9	19.86921	19.86921	19.23
SOLARAV10	14.91246	14.91246	15.54
SOLARAV11	10.88315	10.88315	11.4
SOLARAV12	8.836364	8.836364	9.05
DEWPT1	0.6965689	0.6965689	0.76
DEWPT2	0.6446624	0.6446624	2.42
DEWPT3	0.5929618	0.5929618	4.85
DEWPT4	0.5746061	0.5746061	10.55
DEWPT5	0.5126686	0.5126686	16.45
DEWPT6	0.3826061	0.3826061	19.86
DEWPT7	0.3290616	0.3290616	20.56
DEWPT8	0.3522581	0.3522581	20.07

DEWPT9	0.4883939	0.4883939	17.15
DEWPT10	0.5427273	0.5427273	11.38
DEWPT11	0.6648485	0.6648485	5.2
DEWPT12	0.7207038	0.7207038	1.66
WNDV1	2.382522	2.382522	4.82
WNDV2	2.162058	2.162058	4.74
WNDV3	2.225308	2.225308	5.32
WNDV4	2.33597	2.33597	5.26
WNDV5	2.262639	2.262639	4.55
WNDV6	2.248545	2.248545	4.28
WNDV7	2.274399	2.274399	3.85
WNDV8	2.130293	2.130293	3.75
WNDV9	1.998576	1.998576	3.76
WNDV10	1.857595	1.857595	4.06
WNDV11	2.141606	2.141606	4.45
WNDV12	2.292874	2.292874	4.63

Tableau A.2. Données climatologiques (WGN) de la station synoptique d'Oued Taria

STATION	111201	111217	3780
WLATITUDE	35.114	35.1	34.813
WLONGITUDE	0.09	0.127	0
WELEV	484	850	794
RAIN_YRS	10	10	10
TMPMX1	12.33021	12.33021	12.33021
TMPMX2	14.48083	14.48083	14.48083
TMPMX3	18.69022	18.69022	18.69022
TMPMX4	20.79951	20.79951	20.79951
TMPMX5	25.89792	25.89792	25.89792
TMPMX6	32.33551	32.33551	32.33551
TMPMX7	36.19526	36.19526	36.19526
TMPMX8	35.2314	35.2314	35.2314
TMPMX9	29.24347	29.24347	29.24347
TMPMX10	24.14992	24.14992	24.14992
TMPMX11	16.40048	16.40048	16.40048
TMPMX12	12.75324	12.75324	12.75324
TMPMN1	2.20005	2.20005	2.20005
TMPMN2	2.110987	2.110987	2.110987
TMPMN3	4.274516	4.274516	4.274516
TMPMN4	5.243139	5.243139	5.243139
TMPMN5	9.410011	9.410011	9.410011
TMPMN6	14.77064	14.77064	14.77064
TMPMN7	17.34444	17.34444	17.34444
TMPMN8	18.23874	18.23874	18.23874
TMPMN9	14.24205	14.24205	14.24205
TMPMN10	11.21505	11.21505	11.21505
TMPMN11	6.070727	6.070727	6.070727
TMPMN12	3.574742	3.574742	3.574742
TMPSTDMX1	4.111619	4.111619	4.111619
TMPSTDMX2	5.154361	5.154361	5.154361
TMPSTDMX3	5.474187	5.474187	5.474187
TMPSTDMX4	5.565479	5.565479	5.565479
TMPSTDMX5	6.218795	6.218795	6.218795
TMPSTDMX6	4.78409	4.78409	4.78409
TMPSTDMX7	3.560817	3.560817	3.560817
TMPSTDMX8	3.190555	3.190555	3.190555
TMPSTDMX9	4.306716	4.306716	4.306716
TMPSTDMX10	4.489211	4.489211	4.489211
TMPSTDMX11	4.927261	4.927261	4.927261
TMPSTDMX12	3.768063	3.768063	3.768063
TMPSTDMN1	3.390623	3.390623	3.390623
TMPSTDMN2	3.308221	3.308221	3.308221
TMPSTDMN3	3.598659	3.598659	3.598659
TMPSTDMN4	3.468255	3.468255	3.468255
TMPSTDMN5	4.027407	4.027407	4.027407
TMPSTDMN6	4.114463	4.114463	4.114463
TMPSTDMN7	3.494137	3.494137	3.494137
TMPSTDMN8	3.209846	3.209846	3.209846

TMPSTDMN9	3.405308	3.405308	3.405308
TMPSTDMN10	3.588387	3.588387	3.588387
TMPSTDMN11	3.178153	3.178153	3.178153
TMPSTDMN12	3.088582	3.088582	3.088582
PCPMM1	33.31818	48.14545	48.14545
PCPMM2	30.56364	48.03637	48.03637
PCPMM3	20.59091	29.29091	29.29091
PCPMM4	26.18182	33.51818	33.51818
PCPMM5	26.74545	26.53636	26.53636
PCPMM6	8.863636	7.663636	7.663636
PCPMM7	3.527273	6.236363	6.236363
PCPMM8	7.645454	11.80909	11.80909
PCPMM9	16.05455	19.5	19.5
PCPMM10	25.39091	25.55455	25.55455
PCPMM11	40.20909	54.75455	54.75455
PCPMM12	32.34546	46.53637	46.53637
PCPSTD1	3.019448	4.786393	4.786393
PCPSTD2	3.19055	4.650775	4.650775
PCPSTD3	2.335508	3.986663	3.986663
PCPSTD4	3.073039	4.183316	4.183316
PCPSTD5	3.738802	3.992456	3.992456
PCPSTD6	2.617165	1.797394	1.797394
PCPSTD7	0.9305363	1.941982	1.941982
PCPSTD8	1.830179	2.201968	2.201968
PCPSTD9	2.348454	2.725008	2.725008
PCPSTD10	2.982156	3.640188	3.640188
PCPSTD11	4.406818	5.682309	5.682309
PCPSTD12	4.605872	4.881333	4.881333
PCPSKW1	4.361465	4.069654	4.069654
PCPSKW2	4.719729	3.699383	3.699383
PCPSKW3	4.724436	5.508515	5.508515
PCPSKW4	6.120545	5.503416	5.503416
PCPSKW5	7.002342	7.78449	7.78449
PCPSKW6	12.95829	9.017557	9.017557
PCPSKW7	9.724298	10.28593	10.28593
PCPSKW8	12.66737	7.23442	7.23442
PCPSKW9	8.06405	6.670495	6.670495
PCPSKW10	5.235353	8.706601	8.706601
PCPSKW11	5.271074	5.685851	5.685851
PCPSKW12	10.07043	5.846355	5.846355
PR_W1_1	0.154717	0.1272085	0.1272085
PR_W1_2	0.1174089	0.1230159	0.1230159
PR_W1_3	0.1006944	0.0657895	0.0657895
PR_W1_4	0.1140684	0.0892193	0.0892193
PR_W1_5	0.1118644	0.0786885	0.0786885
PR_W1_6	0.0383387	0.0345912	0.0345912
PR_W1_7	0.015015	0.0059347	0.0059347
PR_W1_8	0.04	0.0339506	0.0339506
PR_W1_9	0.1197183	0.0875421	0.0875421
PR_W1_10	0.0993151	0.0718954	0.0718954
PR_W1_11	0.1601563	0.1407407	0.1407407
PR_W1_12	0.1653846	0.1507353	0.1507353
PR_W2_1	0.4533333	0.368421	0.368421
PR_W2_2	0.546875	0.4745763	0.4745763

PR_W2_3	0.4528302	0.4594595	0.4594595
PR_W2_4	0.5522388	0.4545455	0.4545455
PR_W2_5	0.2826087	0.3333333	0.3333333
PR_W2_6	0.2941177	0.0833333	0.0833333
PR_W2_7	0.375	0.5	0.5
PR_W2_8	0.1875	0.3529412	0.3529412
PR_W2_9	0.2608696	0.2121212	0.2121212
PR_W2_10	0.4081633	0.3714286	0.3714286
PR_W2_11	0.4459459	0.3666667	0.3666667
PR_W2_12	0.4691358	0.4057971	0.4057971
PCPD1	6.909091	5.272727	5.272727
PCPD2	5.818182	5.363636	5.363636
PCPD3	4.818182	3.363636	3.363636
PCPD4	6.090909	4	4
PCPD5	4.181818	3.272727	3.272727
PCPD6	1.545455	1.090909	1.090909
PCPD7	0.7272727	0.3636364	0.3636364
PCPD8	1.454545	1.545455	1.545455
PCPD9	4.181818	3	3
PCPD10	4.454545	3.181818	3.181818
PCPD11	6.727273	5.454545	5.454545
PCPD12	7.363636	6.272727	6.272727
RAINHHMX1	3.672727	4.960606	4.960606
RAINHHMX2	3.433333	4.615151	4.615151
RAINHHMX3	2.469697	4.690909	4.690909
RAINHHMX4	3.512121	5.284849	5.284849
RAINHHMX5	4.593939	5.021212	5.021212
RAINHHMX6	1.757576	1.748485	1.748485
RAINHHMX7	0.6090909	1.024242	1.024242
RAINHHMX8	1.633333	2.19697	2.19697
RAINHHMX9	2.90303	3.287879	3.287879
RAINHHMX10	3.754545	4.236363	4.236363
RAINHHMX11	5.79394	6.939394	6.939394
RAINHHMX12	5.39697	6.360606	6.360606
SOLARAV1	10.08133	10.08133	10.08133
SOLARAV2	13.43244	13.43244	13.43244
SOLARAV3	17.85529	17.85529	17.85529
SOLARAV4	21.08228	21.08228	21.08228
SOLARAV5	24.22641	24.22641	24.22641
SOLARAV6	26.38357	26.38357	26.38357
SOLARAV7	27.2285	27.2285	27.2285
SOLARAV8	23.01318	23.01318	23.01318
SOLARAV9	19.87423	19.87423	19.87423
SOLARAV10	14.91726	14.91726	14.91726
SOLARAV11	10.88817	10.88817	10.88817
SOLARAV12	8.840877	8.840877	8.840877
DEWPT1	0.7016486	0.7016486	0.7016486
DEWPT2	0.6495716	0.6495716	0.6495716
DEWPT3	0.5979447	0.5979447	0.5979447
DEWPT4	0.5795925	0.5795925	0.5795925
DEWPT5	0.5178061	0.5178061	0.5178061
DEWPT6	0.3874809	0.3874809	0.3874809
DEWPT7	0.3342623	0.3342623	0.3342623
DEWPT8	0.357377	0.357377	0.357377

DEWPT9	0.4935041	0.4935041	0.4935041
DEWPT10	0.5474385	0.5474385	0.5474385
DEWPT11	0.6699624	0.6699624	0.6699624
DEWPT12	0.7259256	0.7259256	0.7259256
WNDV1	2.387709	2.387709	2.387709
WNDV2	2.167105	2.167105	2.167105
WNDV3	2.230419	2.230419	2.230419
WNDV4	2.340774	2.340774	2.340774
WNDV5	2.267703	2.267703	2.267703
WNDV6	2.253214	2.253214	2.253214
WNDV7	2.279369	2.279369	2.279369
WNDV8	2.134929	2.134929	2.134929
WNDV9	2.003569	2.003569	2.003569
WNDV10	1.862528	1.862528	1.862528
WNDV11	2.146909	2.146909	2.146909
WNDV12	2.297729	2.297729	2.297729

Tableau A.3. Données climatologiques (WGN) de la station synoptique d'Oued Maleh

STATION	40406	40415	3519
WLATITUDE	35.41	35.36	35.44
WLONGITUDE	-0.88	-0.97	-1.25
WELEV	108	161	787
RAIN_YRS	10	10	10
TMPMX1	12.33	12.33	12.33
TMPMX2	14.48	14.48	14.48
TMPMX3	18.69	18.69	18.69
TMPMX4	20.79	20.79	20.79
TMPMX5	25.89	25.89	25.89
TMPMX6	32.33	32.33	32.33
TMPMX7	36.19	36.19	36.19
TMPMX8	35.23	35.23	35.23
TMPMX9	29.36	29.36	29.36
TMPMX10	24.09	24.09	24.09
TMPMX11	16.52	16.52	16.52
TMPMX12	12.94	12.94	12.94
TMPMN1	2.20	2.20	2.20
TMPMN2	2.11	2.11	2.11
TMPMN3	4.27	4.27	4.27
TMPMN4	5.24	5.24	5.24
TMPMN5	9.41	9.41	9.41
TMPMN6	14.77	14.77	14.77
TMPMN7	17.34	17.34	17.34
TMPMN8	18.23	18.23	18.23
TMPMN9	14.32	14.32	14.32
TMPMN10	11.21	11.21	11.21
TMPMN11	6.10	6.10	6.10
TMPMN12	3.66	3.66	3.66
TMPSTDMX1	4.11	4.11	4.11
TMPSTDMX2	5.15	5.15	5.15
TMPSTDMX3	5.47	5.47	5.47
TMPSTDMX4	5.57	5.57	5.57
TMPSTDMX5	6.22	6.22	6.22
TMPSTDMX6	4.78	4.78	4.78
TMPSTDMX7	3.56	3.56	3.56
TMPSTDMX8	3.19	3.19	3.19
TMPSTDMX9	4.33	4.33	4.33
TMPSTDMX10	4.61	4.61	4.61
TMPSTDMX11	4.81	4.81	4.81
TMPSTDMX12	3.80	3.80	3.80
TMPSTDMN1	3.39	3.39	3.39
TMPSTDMN2	3.31	3.31	3.31
TMPSTDMN3	3.60	3.60	3.60
TMPSTDMN4	3.47	3.47	3.47
TMPSTDMN5	4.03	4.03	4.03
TMPSTDMN6	4.11	4.11	4.11
TMPSTDMN7	3.49	3.49	3.49
TMPSTDMN8	3.21	3.21	3.21

TMPSTDMN9	3.47	3.47	3.47
TMPSTDMN10	3.65	3.65	3.65
TMPSTDMN11	3.16	3.16	3.16
TMPSTDMN12	3.11	3.11	3.11
PCPMM1	40.47	42.72	40.47
PCPMM2	39.60	31.53	39.60
PCPMM3	29.64	23.45	29.64
PCPMM4	27.64	15.47	27.64
PCPMM5	21.15	11.75	21.15
PCPMM6	0.42	0.22	0.42
PCPMM7	0.56	0.21	0.56
PCPMM8	3.78	1.70	3.78
PCPMM9	27.69	14.23	27.69
PCPMM10	27.91	21.21	27.91
PCPMM11	66.29	49.78	66.29
PCPMM12	48.77	35.71	48.77
PCPSTD1	3.81	5.51	3.81
PCPSTD2	3.95	4.19	3.95
PCPSTD3	3.80	3.55	3.80
PCPSTD4	2.82	2.09	2.82
PCPSTD5	2.92	2.63	2.92
PCPSTD6	0.14	0.08	0.14
PCPSTD7	0.17	0.12	0.17
PCPSTD8	1.21	0.84	1.21
PCPSTD9	5.00	2.67	5.00
PCPSTD10	3.41	3.27	3.41
PCPSTD11	7.09	6.37	7.09
PCPSTD12	4.18	4.04	4.18
PCPSKW1	4.52	8.41	4.52
PCPSKW2	3.83	5.35	3.83
PCPSKW3	6.11	6.84	6.11
PCPSKW4	4.62	5.35	4.62
PCPSKW5	7.06	10.87	7.06
PCPSKW6	11.75	11.67	11.75
PCPSKW7	10.09	17.61	10.09
PCPSKW8	16.53	17.71	16.53
PCPSKW9	8.47	6.73	8.47
PCPSKW10	5.82	7.31	5.82
PCPSKW11	4.68	5.59	4.68
PCPSKW12	3.42	4.71	3.42
PR_W1_1	0.13	0.10	0.13
PR_W1_2	0.13	0.08	0.13
PR_W1_3	0.09	0.06	0.09
PR_W1_4	0.11	0.06	0.11
PR_W1_5	0.10	0.04	0.10
PR_W1_6	0.02	0.01	0.02
PR_W1_7	0.01	0.00	0.01
PR_W1_8	0.04	0.01	0.04
PR_W1_9	0.08	0.03	0.08
PR_W1_10	0.13	0.07	0.13
PR_W1_11	0.15	0.11	0.15
PR_W1_12	0.15	0.10	0.15
PR_W2_1	0.55	0.33	0.55
PR_W2_2	0.51	0.34	0.51

PR_W2_3	0.47	0.29	0.47
PR_W2_4	0.52	0.33	0.52
PR_W2_5	0.30	0.18	0.30
PR_W2_6	0.00	0.00	0.00
PR_W2_7	0.25	0.00	0.25
PR_W2_8	0.13	0.00	0.13
PR_W2_9	0.40	0.23	0.40
PR_W2_10	0.28	0.17	0.28
PR_W2_11	0.46	0.24	0.46
PR_W2_12	0.46	0.26	0.46
PCPD1	7.18	4.18	7.18
PCPD2	5.90	3.18	5.90
PCPD3	4.36	2.40	4.36
PCPD4	5.55	2.45	5.55
PCPD5	4.00	1.55	4.00
PCPD6	0.45	0.27	0.45
PCPD7	0.40	0.10	0.40
PCPD8	1.45	0.27	1.45
PCPD9	3.33	1.30	3.33
PCPD10	4.78	2.40	4.78
PCPD11	6.50	3.70	6.50
PCPD12	6.90	3.78	6.90
RAINHHMX1	5.09	6.72	5.09
RAINHHMX2	4.43	4.60	4.43
RAINHHMX3	4.44	3.99	4.44
RAINHHMX4	3.77	2.80	3.77
RAINHHMX5	3.54	2.80	3.54
RAINHHMX6	0.13	0.07	0.13
RAINHHMX7	0.13	0.07	0.13
RAINHHMX8	1.07	0.57	1.07
RAINHHMX9	6.10	2.76	6.10
RAINHHMX10	5.16	4.15	5.16
RAINHHMX11	8.69	8.93	8.69
RAINHHMX12	5.42	5.53	5.42
SOLARAV1	10.08	10.08	10.08
SOLARAV2	13.43	13.43	13.43
SOLARAV3	17.85	17.85	17.85
SOLARAV4	21.08	21.08	21.08
SOLARAV5	24.22	24.22	24.22
SOLARAV6	26.38	26.38	26.38
SOLARAV7	27.22	27.22	27.22
SOLARAV8	23.01	23.01	23.01
SOLARAV9	19.92	19.92	19.92
SOLARAV10	14.94	14.94	14.94
SOLARAV11	10.87	10.87	10.87
SOLARAV12	8.83	8.83	8.83
DEWPT1	0.70	0.70	0.70
DEWPT2	0.64	0.64	0.64
DEWPT3	0.59	0.59	0.59
DEWPT4	0.57	0.57	0.57
DEWPT5	0.51	0.51	0.51
DEWPT6	0.38	0.38	0.38
DEWPT7	0.33	0.33	0.33
DEWPT8	0.35	0.35	0.35

DEWPT9	0.49	0.49	0.49
DEWPT10	0.54	0.54	0.54
DEWPT11	0.66	0.66	0.66
DEWPT12	0.71	0.71	0.71
WNDV1	2.38	2.38	2.38
WNDV2	2.16	2.16	2.16
WNDV3	2.23	2.23	2.23
WNDV4	2.34	2.34	2.34
WNDV5	2.26	2.26	2.26
WNDV6	2.25	2.25	2.25
WNDV7	2.27	2.27	2.27
WNDV8	2.13	2.13	2.13
WNDV9	2.01	2.01	2.01
WNDV10	1.88	1.88	1.88
WNDV11	2.16	2.16	2.16
WNDV12	2.34	2.34	2.34

Tableau A 4. Définition des variables pour les données climatologiques

Nom de la Variable	Définition
TMPMX (mon)	Température maximale quotidienne moyenne de l'air pour le mois (°C).
TMPMN (mon)	Température minimale quotidienne moyenne de l'air pour le mois (°C).
TMPSTDMX (mon)	Écart-type de la température maximale quotidienne de l'air dans le mois (°C).
TMPSTDMN (mon)	Écart-type de la température minimale quotidienne de l'air dans le mois (°C).
PCPSTD (mon)	Moyenne des précipitations totales mensuelles (mm).
PCPSTD (mon)	Écart-type pour les précipitations quotidiennes du mois (mm /jour).
PCPSKW (mon)	Coefficient d'obliquité pour les précipitations quotidiennes du mois.
PR_W (1,mon)	Probabilité qu'un jour humide suive un jour sec dans le mois.
PR_W (2,mon)	Probabilité d'un jour humide après un jour humide dans le mois.
PCPD (mon)	Nombre moyen de jours de précipitations dans le mois.
RAINHHMX (mon)	Précipitations maximales sur 0,5 heure pendant toute la période d'enregistrement pour le mois (mm).
SOLARAV (mon)	Rayonnement solaire quotidien moyen pour le mois (MJ/m ² /jour).
DEWPT (mon)	Température moyenne quotidienne du point de rosée pour le mois (°C).
WNDV (mon)	Vitesse moyenne quotidienne du vent pour le mois (m/s).

Annexe (B)

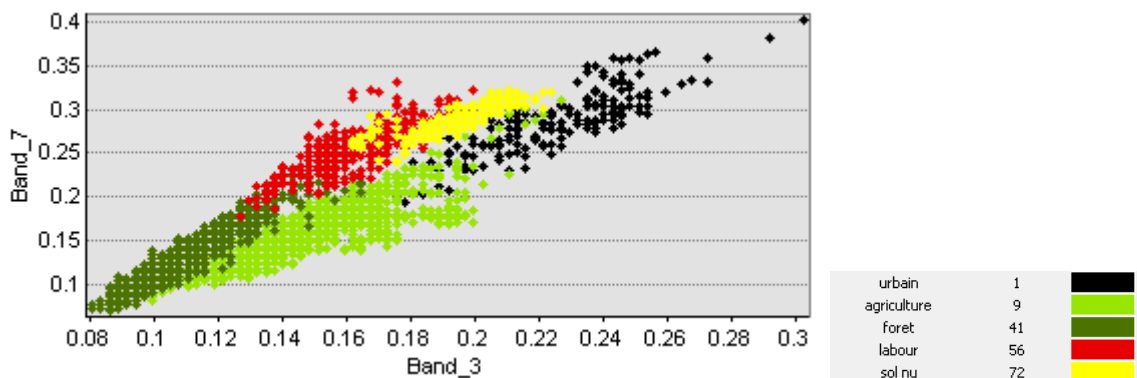


Figure B.1. Diagramme de dispersion des classes d'occupation des sols du bassin versant d'Oued Saida 1987

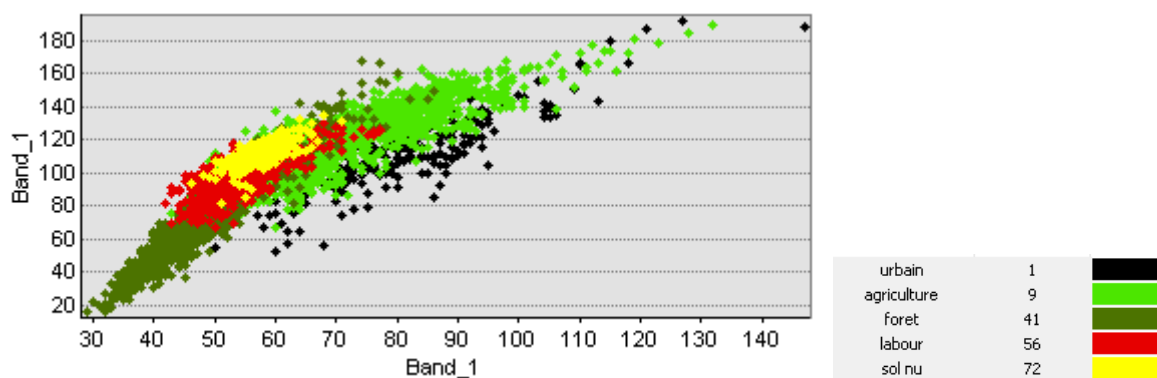


Figure B.1. Diagramme de dispersion des classes d'occupation des sols du bassin versant d'Oued Saida 2002

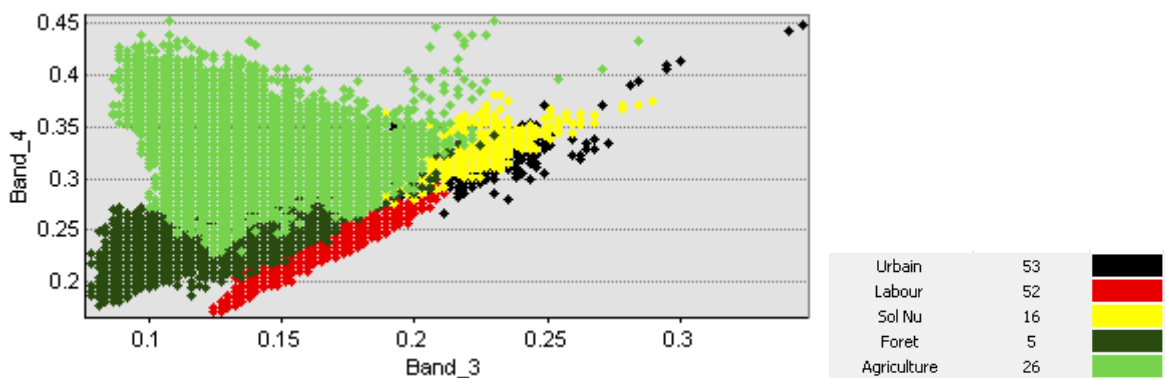


Figure B.5. Diagramme de dispersion des classes d'occupation des sols du bassin versant d'Oued Taria 1987

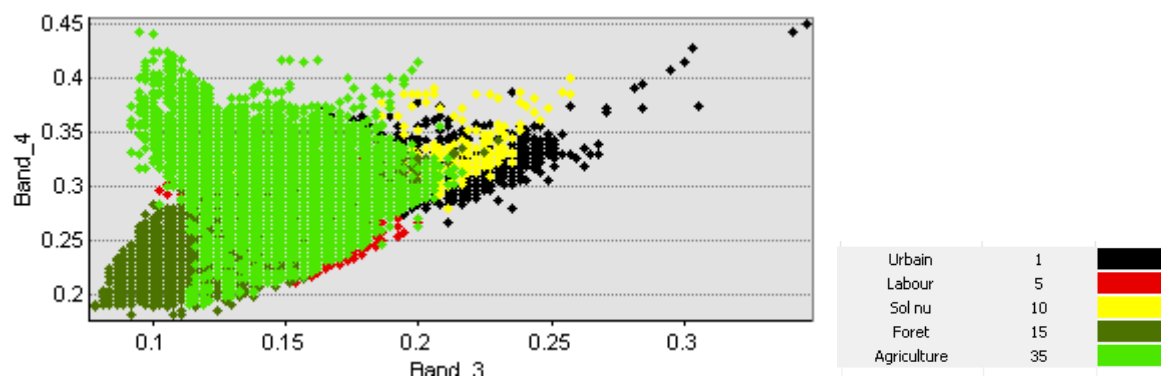


Figure B.5. Diagramme de dispersion des classes d'occupation des sols du bassin versant d'Oued Taria 2002.

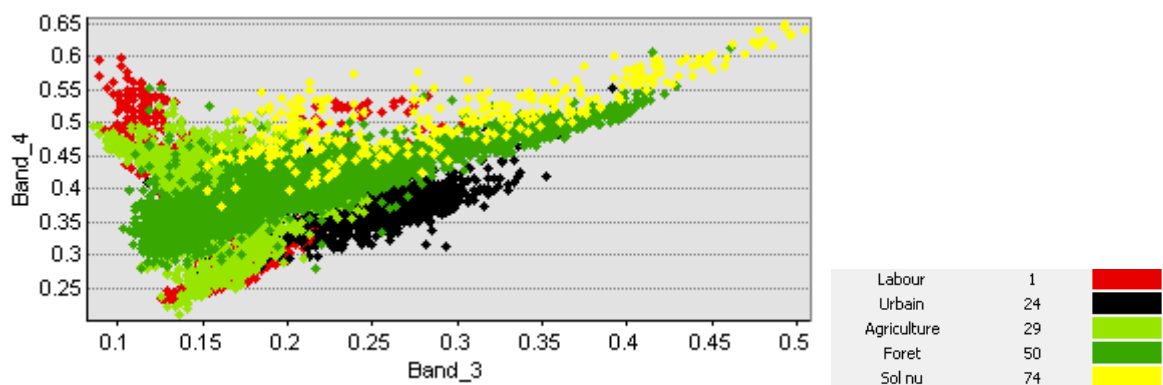


Figure B.5. Diagramme de dispersion des classes d'occupation des sols du bassin versant d'Oued Maleh 2002