



Université d'Etat d'Haïti

(UEH)

Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire

(FAMV)

Département de Génie Rural

(DGNR)

*Recherche et application d'une méthode d'estimation du coefficient de
ruissellement par approche géo-spatiale : cas du Bassin versant de la
Ravine du Sud (Analyse diachronique)*

Mémoire de fin d'études

Présenté par : **Frantz LAMOUR**

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur-Agronome

Option : Génie Rural

Promotion Luminescence (2014-2019)

Conseillers Scientifiques : **Joseph ADERMUS**, Ing.-Agr. PhD.

Jacques Philémon MONDESIR, Ing.-Agr. Msc

Juillet 2021

Ce mémoire intitulé :

***Recherche et application d'une méthode d'estimation du coefficient de ruissellement
par approche géo-spatiale : cas du Bassin versant de la Ravine du Sud
(Analyse diachronique)***

a été approuvé par :

Signature

Date

Nyankona **GONOMY, PhD.**

Président du Jury

Montès **CHARLES**

Membre

Adermus **JOSEPH**

Membre, Conseillé Scientifique

Philémon J. **MONDESIR**

Membre, Conseillé Scientifique

Dédicaces

Ce travail de recherche est dédié à :

- Mon père **Chrisma LAMOUR** (décédé) et ma mère **Egloïde JEAN** pour m’avoir mis au monde, et être investis corps et âme dans ma formation. La présentation de ce document est en grande partie le fruit de leur travail ;
- Mes frères et mes sœurs particulièrement **Martine LAMOUR** qui m’a tant assisté et soutenu tout au long de cette étude ;
- Ma très chère amie **Fabiola SILABE**, qui m’a tant encouragé, d’une manière ou d’une autre, pour la réalisation de ce document ;
- Tous mes camarades de la promotion “**LUMINEUSSANCE**” particulièrement ceux du département de Génie Rural ;
- Mes amis **Géthro DAUPHIN**, **Paul E. CIMILCA**, **Angelo ELMINIS**, **Levy BRIGNOL**, **Rodney TOUSSAINT**, **Clarins NICOLAS**, pour leur support moral.

Remerciements

Cette étude a été rendue possible grâce au soutien technique et financier du Programme *Recovery Observatory* (RO) du Centre National d'Etude Spatiale (CNES) et du Centre National d'Information Géo-Spatial (CNIGS).

Avant tout, je remercie Dieu qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de courage pour achever mon étude. Et « quiconque ne remercie pas les gens, ne remercie pas Dieu ». Mes expressions de gratitude s'adressent particulièrement :

- À mon encadreur, le Dr. **Adermus JOSEPH** pour m'avoir orienté ; ses conseils judicieux m'ont permis de mener à bien ce travail. Un remerciement spécial pour mon co-encadreur M. **Jacques Philémon MONDESIR**, son soutien n'a pas de prix ;
- Au staff du Recovery Observatory (RO), principalement madame **Hélène De Boissezon**, qui nous avait confié le stage de mémoire lors des deux jours de l'atelier qui ont eu lieu à l'Hôtel 'Karibe' ;
- À M. **David TELCY** et M. Gabriel **JEAN-BAPTISTE**, pour leurs précieux conseils et leurs encouragements ;
- À M. **Boby E. PIARD**, responsable du Centre National de l'Information Géo Spatiale (CNIGS) d'Haïti, pour son accord d'hébergement au CNIGS ;
- Au staff de la Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire, particulièrement les membres du département de Génie Rural ;
- À mes collègues de stage : **Géthro DAUPHIN** ; **Angelo ELMINIS** et **Paul E. CIMILCA** pour leur support tout au long de la réalisation du stage ;
- À mes amis : **Rodney TOUSSAINT**, **Levy BRIGNOL**, **Fabiola SILABE**, **Darline JEUNE**, **Clarins NICOLAS**, **Djim LAPORTE**, **Adler SAINT-LAURENT** et **Wilson GASPARD** pour leurs soutiens moraux ;
- Aux employés du CNIGS qui se sont montrés très coopératifs tout au long de cette étude

Enfin à tous ceux et celles qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Résumé

Comme beaucoup de bassins versants du pays, celui de la Ravine du Sud connaît de grands problèmes hydrologiques en raison des changements d'utilisation du sol effectués au cours des vingt dernières années. Pour comprendre l'évolution du comportement hydrologique d'un bassin versant (BV) résultant de ces changements et prévoir les impacts y relatifs, la mesure de la variation du coefficient de ruissellement (Cr) est un indicateur intéressant. En fonction des valeurs obtenues pour ce paramètre, l'hydrologue est en mesure de formuler des hypothèses pertinentes sur l'écoulement des eaux de ruissellement et d'anticiper les risques d'inondation en aval. Il est donc important de disposer d'une méthode assez rapide et pratique pour mesurer le coefficient de ruissellement afin de déceler précocement les catastrophes hydrologiques éventuelles, d'où tout l'intérêt de l'outil géo-spatial.

L'hypothèse émise au départ est que la typologie de la classification d'occupation des sols (OCS), officiellement établie par le CNIGS, peut être facilement intégrée dans des modèles empiriques préexistants pour l'estimation du Cr à l'échelle d'un bassin versant. Pour ce faire, des méthodes d'estimation du Cr ont été répertoriées, analysées et réadaptées à notre contexte de travail prenant en compte la nomenclature de sol du CNIGS et de la réalité du bassin versant étudié.

La méthode retenue résulte d'une confrontation entre la carte d'OCS et la carte de pente, afin d'estimer la variation du Cr pour la période allant de 2002 à 2018. Il ressort que dans ce BV, l'intensité du ruissellement varie non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps. Le ruissellement prend de l'ampleur en aval du BV surtout avec l'extension urbaine qu'il y a dans la basse Plaine des Cayes.

Ainsi, le Cr moyen pour l'ensemble du BV de 2002 à 2018 ne varie pas de manière significative. Il est de l'ordre de 0.30 pour l'année 2002 et de 0.34 pour l'année 2018. Mais en aval du BV, on note un Cr local qui varie considérablement par rapport à celui de l'ensemble du BV. En effet, dans la partie aval du BV où la pente est inférieure à 5%, le Cr passe de 0.12 en 2002 à un Cr de 0.30 en 2018, et ce, en raison d'une augmentation significative de la surface bâtie qui passe de 107.75 ha à 724.73 ha (entre 2002 et 2018). Cela montre la nécessité de penser à un plan de réaffectation des sols au niveau de ce bassin versant.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces.....	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures	ix
Listes des acronymes, des symboles et des sigles.....	x
1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectifs de l'étude	2
1.2.1 Objectif général	2
1.2.2 Objectifs spécifiques	2
1.3 intérêt de l'étude.....	3
1.4 limitation de l'étude	3
1.5 Hypothèse.....	3
2 APPROCHE THEORIQUE	4
2.1 Ruissellement.....	4
2.1.1 Ruissellement hortonien ou écoulements superficiels.....	4
2.1.2 Ruissellement sur des zones saturées ou ruissellement de retour.....	4
2.1.3 Facteurs influençant le ruissellement	5
2.1.3.1 Bassin versant	5
2.1.3.1.1 Caractéristiques variables d'un BV	5
2.1.3.1.2 Caractéristiques invariables du BV	5
2.1.4 Conséquences du ruissellement dans un BV	6
2.2 Coefficient de ruissellement.....	6
2.2.1 Classification hydrologique du sol	8
2.2.2 Pente moyenne d'un BV.....	8

2.2.3	Occupation du territoire.....	9
2.2.3.1	Typologie de classification de l'occupation du territoire au CNIGS.....	9
3	METHODOLOGIE	12
3.1	présentation de la zone d'étude.....	12
3.1.1	Situation géographique.....	12
3.1.1.1	Le relief.....	13
3.1.1.2	Le climat.....	13
3.1.1.2.1	Pluviométrie.....	13
3.1.1.2.2	Température.....	13
3.1.2	Végétation.....	14
3.2	Méthode de travail.....	14
3.2.1	Revue et analyse bibliographiques.....	14
3.2.2	Collecte et traitement de données géo-spatiales.....	14
3.2.2.1	Description des différents types de données collectées et produites.....	15
3.2.3	Matériel utilisé.....	15
3.2.4	Traitement des images de télédétection.....	16
3.2.5	Analyse spatiale et Estimation du Cr.....	16
3.3	Schéma résumé de la Démarche méthodologique.....	16
3.3.1	Description de la méthodologie reprise dans le schéma ci-contre.....	16
3.4	les étapes de traitement des images sur ecognition developper.....	19
4	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	22
4.1	Présentation des résultats.....	22
4.1.1	Modèles préexistants d'évaluation du Cr à partir de l'OCS.....	22
4.1.1.1	Coefficient de ruissellement dans la méthode rationnelle.....	23
4.1.1.2	Coefficient de ruissellement dans le Modèle du Ministère des Travaux du Québec (MTQ).....	25
4.1.1.3	Méthode de Wischmeier.....	26

4.1.1.4	Modèles ASCE/WEF	27
4.1.2	Proposition d'une méthode finale d'estimation du Cr pour Haïti	28
4.1.2.1	Analyse des modèles préexistants.....	28
4.1.2.2	Harmonisation de la méthode finale (estimation Cr) avec la nomenclature OCS du CNIGS.....	30
4.1.3	Détermination multi-date de l'occupation du sol (2002 et 2018).....	31
4.1.3.1	Cartographie de l'OCS en 2002 et 2018	32
4.1.3.2	Analyse du changement de l'OCS entre 2002 et 2018	33
4.1.4	Carte de pente du BV de la ravine du Sud.....	35
4.1.5	Estimation du Cr dans le BV à partir des facteurs OCS et pente	36
4.1.5.1	Distribution spatiale du coefficient de ruissellement au niveau du BV de la Ravine du Sud.....	38
4.1.5.2	Estimation des Cr pondérés par classe de pente	39
4.2	Interprétation des résultats	40
4.2.1	Evolution de l'occupation du sol.....	40
4.2.1.1	Evolution de l'occupation du sol en aval	41
4.2.2	Impacte de l'évolution de l'OCS sur le Cr (2002 à 2018).....	42
4.3	Discussion des résultats	43
4.3.1	Relation entre les résultats obtenus et les données exploitées.....	43
4.3.2	Limites et alternatives dans l'interprétation des résultats	44
4.3.3	Relation entre pente, OCS et coefficient de ruissellement	44
5	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	46
6	BIBLIOGRAPHIE	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Coefficient de ruissellement dans la methode Rationnelle	23
Tableau 2 : Coefficient de ruissellement avec la methode du Ministere des Transports du Quebec en zone rurale	25
Tableau 3 : Parametres a, b et c dans la methode de Wischmeier	
Tableau 4 : Coefficient de ruissellement dans le modèle ASCE/WEF	27
Tableau 5 : Identification des methodes compatible au contexte Haïtien.....	29
Tableau 6 : Methode finale d'estimation du coefficient de ruissellement (version adaptee avec l'ocs du BV de la Ravine du Sud).....	31
Tableau 7 : Evolution de l'ocs en fonction de la superficie.....	34
Tableau 8 : Coefficient de ruissellement pondere de la Ravine du Sud 2002.....	36
Tableau 9 : Coefficient pondere du BV de la Ravine du Sud de 2018	37
Tableau 10 : Evolution de l'ocs en termes de proportion.....	40
Tableau 11 : Variation du Cr en aval du BV en fonction des classes d'ocs.....	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Limite du BV de la Ravine du Sud.....	12
Figure 2 : Representation de la pluviometrie temperature mensuelle des cayes ..	13
Figure 3 : Schema simplifie de la methodologie	18
Figure 4 : Deuxieme etape de la segmentation	19
Figure 5 : Derniere etape de la segmentation.....	20
Figure 6 : Quatrieme etape de la classification.....	21
Figure 7 : OCS 2002	32
Figure 8 : OCS 2018	33
Figure 9 : Carte de pente du BV de la Ravine du Sud	35
Figure 10 : Repartition spatiale du coefficient de ruissellement dans le BV Ravine du Sud.....	38
Figure 11 : Carte de Cr par confrontation d'ocs et de pente	39
Figure 12 : Variation des classes d'occupation du sol entre 2002 et 2018.....	41

LISTES DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

ASCE	American Society of Civil Engineers
BV	Bassin Versant
CERTU	Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports et l'Urbanisme
CNES	Centre National d'Etude Spatiale
CNIGS	Centre National d'Information Géo-Spatiale
Cr	Coefficient de ruissellement
FAMV	Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire de
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
Ha	Hectare
MED	Ministère de l'Environnement
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MPCE	Ministère de la Planification et de la Coopération Externe
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MTD	Ministère Du Tourisme
NRCS	National Resource Conservation Service
OCS	Occupation du Sol
RO	Recovery Observatory
SPOT-5	Système Probatoire d'Observation de la Terre
UEH	Université d'Etat d'Haïti
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
USDA	U.S. Department of Agriculture
WEF	Water Environment Federation
WPCF	Water Pollution Control Federation

1 INTRODUCTION

1.1 PROBLEMATIQUE

La maîtrise du ruissellement des eaux de pluie (traditionnellement calculé par des méthodes expérimentales longues et assez coûteuses) est l'un des problèmes les plus alarmants auxquels Haïti fait face au niveau de ses bassins versants. La déforestation, une des principales causes de dégradation des bassins versants, contribue à accélérer le processus de ruissellement des eaux de pluie et provoque, entre autres, l'érosion des terres et le glissement de terrain (VITAL, 2017). En effet, 25 des 30 bassins versants du pays seraient dénudés et 85% de ceux-ci sont fortement dégradés (MDE, 1999). Annuellement, 36 millions de tonnes métriques de terres arables seraient perdues et 10 000 ha de terres cultivables auraient disparu (Pelt, 2005). Par ailleurs, 15% du territoire national serait irrécupérable à cause de l'érosion irréversible des terres sous l'importance accrue du ruissellement dans ces BV (Belliard et Norris, 1999, cité par Valbrun, 2007) ; (MDE, 2001). Cette situation lamentable de l'environnement rend difficile la gestion du sol et surtout de l'eau, tant du point de vue de son utilisation que du point de vue «risques» pour les zones en aval.

Le bassin versant de la Ravine du Sud est un cas typique de la gestion catastrophique des BV en Haïti. Suite aux actions anthropiques non contrôlées (réduction drastique de la couverture végétale pour l'exploitation de bois, agriculture non conservationniste...) au niveau du bassin versant, il a été constaté, en saison pluvieuse, une augmentation en nombre et en intensité des inondations au niveau de la plaine des Cayes (MDT, 2004). En saison sèche, il est également constaté une diminution rapide du débit de la rivière entraînant un manque important de l'alimentation de la prise d'eau d'irrigation. Comment évaluer techniquement et rapidement ces constats liés au comportement hydrologique des bassins versant ?

Pour évaluer ces constats, si c'est possible de les matérialiser, on devrait avoir recours à des études empiriques et longues. Par ailleurs, leur évaluation est difficile à se faire au niveau du bassin versant de notre étude. Mais, l'estimation du coefficient de ruissellement est notre préoccupation dans cette étude.

Le coefficient de ruissellement comme principal indicateur du comportement hydrologique des BV peut permettre de suivre précocement tous les changements défavorables en tous points dans un bassin versant donné. L'évaluation de ce paramètre de manière rapide et relativement fiable est donc importante pour pouvoir donner une vision éclairée de la réalité hors site.

Il existe plusieurs méthodes empiriques pouvant être utilisées pour estimer le ruissellement dans un bassin versant à distance, à partir de données géo-spatiales. Ainsi, il est intéressant de voir les possibilités d'utiliser ou de réadapter ces modèles préexistants dans le contexte haïtien, en tenant compte de la typologie de l'occupation des sols en Haïti.

1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les objectifs sont divisés en deux parties ; général et spécifiques.

1.2.1 Objectif général

Choisir et adapter une méthode empirique pour estimer le coefficient de ruissellement au niveau du BV de la Ravine du Sud, à partir de l'utilisation d'imagerie spatiale.

1.2.2 Objectifs spécifiques

Spécifiquement, cette étude vise à :

- Lister les modèles existants permettant de calculer le Coefficient de ruissellement à partir des données géo spatiales telles l'Occupation du sol ;
- Analyser et adapter ces méthodes d'estimation du Coefficient de ruissellement en fonction de la nomenclature d'occupation du sol utilisée au CNIGS (adaptation au contexte haïtien) ;
- Cartographier l'occupation du sol à deux dates différentes : une date antérieure de référence (2002) et une date plus récente (2018) ;
- Estimer et cartographier le Coefficient de ruissellement à partir des différentes couches d'occupation de sol produites et autres données attributaires ;

1.3 INTERET DE L'ETUDE

Pouvoir prédire les événements hydrologiques dans les bassins versants haïtiens sans avoir à se rendre sur le terrain et anticiper les risques d'inondation en aval de ces derniers.

1.4 LIMITATION DE L'ETUDE

La limite de cette étude est son côté théorique par faute de moyen financier et de temps. Une phase de terrain, à travers des mesures expérimentales de la hauteur d'eau de pluie ruisselée aurait été nécessaire pour la validation et la confirmation de la pertinence de l'approche géo-spatiale retenue pour l'estimation du Cr.

1.5 HYPOTHESE

La typologie de l'occupation du sol établie par le CNIGS permettrait d'estimer (de manière fiable) le coefficient de ruissellement à l'échelle d'un bassin versant spécifique, à partir des modèles empiriques préexistants.

2 APPROCHE THEORIQUE

2.1 RUISSELLEMENT

Le ruissellement est la partie des précipitations qui ne s'infiltre pas dans le sol et ne s'évapore pas dans l'atmosphère. Dès lors que les capacités de rétention de la végétation et du sol superficiel sont saturées, cette partie s'écoule en surface avant d'atteindre le réseau hydrographique directement ou via un système artificiel d'évacuation (Quentrec & al, 2009).

À l'intérieur d'un bassin versant, le ruissellement peut se répartir sous deux principales formes : le ruissellement superficiel ou ruissellement hortonien et le ruissellement sur les zones saturées ou ruissellement de retour.

2.1.1 Ruissellement hortonien ou écoulements superficiels

Le Ruissellement hortonien ou écoulement superficiel c'est l'écoulement de l'eau des précipitations qui commence bien avant la saturation du sol. Cette forme de ruissellement apparaît lorsque l'intensité de la pluie excède la capacité d'infiltration du sol. Il est indépendant de la morphologie du bassin versant et de la position de la parcelle considérée dans le bassin. On suppose en général que le phénomène est homogène sur tout le bassin versant.

2.1.2 Ruissellement sur des zones saturées ou ruissellement de retour

Ce ruissellement a été proposé par Cappus en 1960, puis développé par différents auteurs (Beven & al, 1988 ; Merot, 1988), le ruissellement sur des zones saturées ou écoulements de retour fait référence au concept de zones de source à surface variable (zone contributive). Par opposition au ruissellement hortonien, l'écoulement de retour est alors considéré comme provenant que dans les zones saturées et non pas sur l'ensemble du bassin versant. Au cours de la pluie, les zones contributives se développent depuis les points bas proches des lignes de drainage vers l'amont du bassin versant.

Cette étude tient en compte le ruissellement hortonien, car cette forme de ruissellement est non seulement répartie sur l'ensemble du bassin versant mais aussi est indépendante de la morphologie de ce dernier.

2.1.3 Facteurs influençant le ruissellement

Pour mieux caractériser le ruissellement au niveau d'un bassin versant il faut prendre en compte les **caractéristiques variables et invariables** du bassin versant.

2.1.3.1 Bassin versant

Bassin versant (BV) : Est le territoire qui recueille les eaux de ruissellement et d'infiltration alimentant soit un fleuve, une rivière ou une ravine. Il les concentre vers le point de sortie appelé exutoire. Le bassin versant est défini par le relief et délimité par les lignes de partage des eaux (lignes de plus hautes altitudes qui déterminent la direction d'écoulement des eaux de pluie). C'est la plus grande unité de la division territoriale contenant des sous bassins versants et des zones hydrographiques :

➤ Sous-bassin versant

Sous bassin versant (SBV) : Est le bassin versant d'un affluent.

➤ Zones hydrographiques

Zone Hydrographique (ZH) : Dans la nomenclature du CNIGS, il s'agit de subdivisions d'un sous bassin versant (autrement dit des micro-bassin versants).

2.1.3.1.1 Caractéristiques variables d'un BV

Les conditions du territoire (état de saturation du sol et du sous-sol, urbanisation, réseau d'assainissement), pouvant évoluer au fil du temps, elles jouent un rôle important dans la réaction d'un bassin versant face à des événements hydrologiques. Ces facteurs sont d'ailleurs si importants que, lorsqu'ils sont très dégradés, ils peuvent être à l'origine d'une inondation suite à une pluie de période de retour fréquente.

2.1.3.1.2 Caractéristiques invariables du BV

Les caractéristiques du bassin versant (relief, taille du BV, nature des sols...) ont une grande influence sur le type d'écoulement des eaux (diffus, torrentiel) et sur le temps de concentration des eaux. Il est primordial de les connaître de façon à prévoir au mieux les débits arrivant à l'exutoire et pouvoir y faire face.

La nature des sols, les précipitations, et la configuration des bassins versants, ce sont des facteurs naturels pouvant aggraver le ruissellement pluvial par les activités humaines, qui affectent l'occupation et l'usage des sols tant en milieu rural qu'en milieu urbain. L'imperméabilisation conduit à une augmentation des vitesses et des volumes ruisselés, Toutefois, il est important de souligner que l'imperméabilisation des sols n'a un effet aggravant que pour des pluies ordinaires. Pour des précipitations très fortes, les terrains se saturent et le ruissellement devient indépendant de l'occupation des sols (CERTU, 2016).

2.1.4 Conséquences du ruissellement dans un BV

➤ En amont

En amont, ce sont surtout les agriculteurs qui subissent les dégâts du ruissellement : les semis peuvent être détruits, les ravines gênent le passage des engins agricoles, la fertilité du sol diminue, puisque la terre fine riche en éléments fertilisants et en matière organique est entraînée vers l'aval.

➤ A l'aval

Sur le chemin de l'eau et à l'aval, le ruissellement peut dégrader des habitations, des ouvrages d'art et des routes, emporter des véhicules. Les principaux dégâts constatés sont les engravements et enlaidissements de chaussées et d'habitations, voire leur destruction, ainsi que le colmatage des buses, des fossés, ce qui peut aggraver les risques d'inondation. Indirectement, le ruissellement peut entraîner la pollution des eaux superficielles et souterraines, du fait notamment de la forte turbidité des eaux.

2.2 COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

L'évaluation du coefficient de ruissellement (Cr) de l'eau pluviale sur un bassin versant repose sur la connaissance de plusieurs facteurs. Selon Bernadotte (2006), ce coefficient dépend principalement de la nature des terrains, de la pente du bassin, de l'intensité de la pluie et des conditions atmosphériques antérieures. Cependant, de tous ces facteurs, l'occupation du sol reste le plus dynamique. Son évolution dans le temps peut entraîner une modification significative du régime hydrologique au niveau d'un bassin versant.

Normalement le Cr se calcule par simple rapport entre la quantité d'eau ruisselée et la quantité d'eau précipitée (méthode rationnelle). Si la hauteur d'eau précipitée peut être enregistrée avec la mise en place d'une station pluviométrique, la quantification de l'eau ruisselée s'avère très plus difficile (Bennis, 2003). Généralement, comme le bassin comprend plusieurs types de surface, la procédure est de calculer un coefficient de ruissellement pondéré en faisant l'hypothèse d'une pluie constante sur l'ensemble du bassin versant.

Dans la pratique, le Coefficient de ruissellement (Cr) représente la part d'eau qui ruisselle par rapport à la quantité d'eau précipitée. Il se traduit par la transformation de la hauteur de la pluie tombée en volume d'eau immédiatement ruisselé.

Une pluie de faible intensité dans une zone dégradée peut engendrer un volume de ruissellement plus élevé qu'une pluie de forte intensité dans une zone boisée. La pente et la nature du sol étant des paramètres qui changent très peu dans le temps, on peut dire que la variable la plus importante dans le calcul du Cr est l'OCS. C'est pourquoi la prise en compte de l'occupation du sol a été priorisée dans ce travail, qui consiste à « synthétiser » une méthode finale d'estimation du coefficient de ruissellement adaptée au contexte haïtien.

L'estimation du coefficient de ruissellement est une étape très importante et pouvant avoir une influence majeure sur le calcul des débits de conception. À ce titre, le coefficient de ruissellement est, selon plusieurs sources, la variable la plus incertaine et la plus difficile à déterminer (ASCE et WPCF, 1969 ; Pilgrim et Cordery, 1993 ; MDDEFP et MAMROT, 2014). L'estimation du coefficient de ruissellement nécessite de préciser plusieurs caractéristiques et propriétés :

- **La classification hydrologique du sol ;**
- **L'occupation du territoire ;**
- **La pente moyenne du bassin-versant. Les estimations obtenues peuvent varier sensiblement d'un utilisateur à l'autre.**

En outre, l'estimation du coefficient de ruissellement laisse place à une certaine subjectivité de l'utilisateur (Grimaldi et Petroselli, 2015). Les guides d'hydrologie générale suggèrent fréquemment une fourchette de valeurs pour une même utilisation du sol.

Dans ASCE et WPCF (1969) par exemple, l'étendue des valeurs du coefficient de ruissellement pour une zone commerciale située au centre-ville se situe entre 0.70 et 0.95 et même pour une zone "plus naturelle", la fourchette de valeurs peut aller de 0.10 à 0.30.

2.2.1 Classification hydrologique du sol

Selon le National Resource Conservation Service du USDA, 2009, la classification hydrologique du sol c'est la capacité que possède le sol à l'infiltration de l'eau, autrement dit cette dernière définit le potentiel du sol au ruissellement.

En collaboration avec les pédologues, le National Resource Conservation Service de l'USDA (USDA-NRCS, 2009) a développé un système de classification des sols qui essaie de décrire leur potentiel de ruissellement. Selon ce système, les sols sont classifiés en quatre (4) groupes appelés groupes hydrologiques de sol (Hydrologic Soil groups). La classification est basée sur le postulat que les sols qui ont des caractéristiques semblables en terme de profondeur de l'horizon restrictif ou de la nappe, du taux de percolation, de la texture, de la structure situé dans une même région climatique présente des ruissellements semblables en cas de saturation. Les groupes sont basés sur les facteurs suivants :

- La capacité d'infiltration et de percolation sous les conditions les plus humides de l'année ;
- Le sol n'est pas gelé ;
- Le sol est nu ;
- Le sol est sous les conditions de plus grand gonflement pour les argiles gonflantes.

La pente du sol n'est pas considérée dans la classification des sols. Dans sa plus simple expression, le groupe est déterminé en fonction de l'horizon le moins perméable, la profondeur de l'horizon considéré comme imperméable et la profondeur de la nappe lorsque présente.

2.2.2 Pente moyenne d'un BV

La pente moyenne donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct donc sur le temps de concentration et influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

2.2.3 Occupation du territoire

C'est une thématique qui renvoie aux formes de couverture physique du sol observable par des vues aériennes ou satellitaires, et à leur structure ; elle inclut la végétation, naturelle ou plantée. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), l'occupation de sol désigne la couverture biophysique de la surface des terres émergées et donc le type d'usage ou de non-usage fait des terres par l'homme. La mosaïque paysagère est cartographiée en identifiant les types homogènes de milieux (ex : zones artificialisées, zones agricoles, forêts, zones humides, zones bâties etc...).

La couverture du sol est très diversifiée sur l'ensemble du globe terrestre et peut varier d'un pays à un autre. Et de plus, à l'intérieur d'un pays, l'occupation du sol peut être variable d'une région à une autre. Ainsi, en Haïti l'occupation du sol est hétérogène et l'institution responsable de sa classification est le CNIGS.

2.2.3.1 *Typologie de classification de l'occupation du territoire au CNIGS*

En fonction de la réalité haïtienne en termes d'occupation du sol, le CNIGS propose les différentes classes d'OCS suivante :

➤ **Territoires artificialisés**

Ce sont des surfaces édifiées, pavées ou profondément modifiées par l'homme, avec les zones associées. Ce type de territoire est composé de :

- 1) **Zone urbanisées (Zones bâties)** : Surfaces occupées principalement par des aires édifiées, pavées ou profondément altérées par l'homme pour l'habitation, le commerce, l'industrie, le transport et les services publics.
- 2) **Zones industrielles, commerciales ou publiques** : ce sont des territoires occupés strictement par des activités industrielles ; territoires commerciaux accueillant du public ; territoires publics.
- 3) **Réseaux de communication** : Ensemble de voie ayant une largeur admissible (supérieure ou égale à 3m environ). Le réseau routier, les routes urbaines, les canalisations urbaines, les réseaux d'assainissement, les gares etc. en font partie.
- 4) **Mines, décharges et chantiers** : Zone de gisement naturel ou zone d'exploitation des matériaux de construction, ou de sites réservés à l'entreposage des déchets, ou des sites en construction. Saline.

- 5) **Espaces verts artificialisés et autres espaces urbains** : Surface aménagée en milieu urbain, essentiellement constituée par de la végétation, mais aussi par des équipements pour le public (aire de jeux).

➤ **Territoires agricoles**

L'ensemble des surfaces a terres arables, cultures ligneuses agraires, fourragère permanentes, jardins et vergers de famille annexes aux entreprises agricoles. Ce territoire se divise en :

- 1) **Cultures agricoles sans couvert arboré** : Zones utilisées pour les cultures ou en jachère, généralement selon un schéma de rotation (culture vivrière ou alimentaire). Ces espaces peuvent contenir quelques arbres d'un pourcentage maximum de 5%.
- 2) **Cultures agricoles avec couvert arboré** : Zones contenant quelques arbres épars pouvant être estimés entre 5% et 30%, utilisées pour les cultures ou en jachère, généralement selon un schéma de rotation : Culture vivrière ou alimentaire. Cette surface se diffère des systèmes agro-forestiers par la fréquence des arbres.
- 3) **Système Agro-forestiers** : Ensemble de systèmes et de techniques d'utilisation des terres où des plantes ligneuses sont délibérément associées aux cultures ou à la production animale sous forme d'un arrangement spatial ou d'une séquence temporelle prenant place sur une même unité de gestion de la terre.
- 4) **Arboriculture** : Surfaces occupées par des cultures ligneuses agraires arborées ou arbustives, généralement dense, permanentes, régulièrement disposées, avec une couverture a plus de 65%.

➤ **Végétation naturelles et semi-naturelles terrestre**

Ce sont des surfaces essentiellement occupées par une végétation naturelle ou semi-naturelle. Elles constituent principalement par :

- 1) **Végétation arborée** : ce sont des surfaces occupées par une végétation naturelle ou semi-naturelle arborée représentant une proportion a plus de 40%.
- 2) **Végétations arbustives** : Surfaces occupées par une végétation naturelle ou semi-naturelle de type arbustive à plus de 40% et occupées par moins de 40% d'arbres.

- 3) **Végétation à dominance herbacée** : Surfaces occupées par une végétation naturelle de type herbacée a plus de 4% moyennant que arbres et arbustes sont inférieure a 40% chacun.

➤ **Végétation des zones humides**

Dans ce type d'espace on trouve :

- 1) **Zones humides intérieures** : Surface imprégnée d'eau et occupée à plus de 4% par une végétation qui peut être arbustive ou herbacée en dehors des zones de balancement des marées des cotes de basses.
- 2) **Zones humides côtières et marine** : Surface imprégnée d'eau, occupée à plus de 4% par une végétation qui se développe dans la zone de balancement des marées de cotes basses (mangrove)

➤ **Zones sans végétation**

Cette zone se compose seulement d'espace ouvert sans ou avec très peu de végétation. Ce sont des sols nus et/ou des zones couvertes par affleurement de roches, cailloux, « badlands », etc. ; Zones occupées par les lits des rivières et les dépôts alluvionnaires associés ; Zones occupées par les plages et du sable, en générales au bord de la mer.

➤ **Surface en eau**

Ce sont des surfaces où l'on trouve :

- 1) **Eaux continentales** : Surfaces correspondantes à des cours d'eau situés au-dessus du niveau moyen des marées. Dans le cas des rivières, l'extension est définie par le lit des rivières.
- 2) **Eaux marine** : Surfaces correspondantes à de l'eau salée.
- 3) **Zones intertidales** : Zones affectées par une régulière augmentation et diminution du niveau de la mer. En l'absence d'eau la surface est occupée par un sol nu.

3 METHODOLOGIE

Ce chapitre trace les différentes démarches méthodologiques et étapes respectives qui ont été effectuées pour que cette étude soit bien conduite.

3.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

3.1.1 Situation géographique

De coordonnées $74^{\circ}01'42''\text{O}$ et $18^{\circ}22'16''\text{N}$, la Ravine du Sud est un cours d'eau localisé dans la péninsule de Tiburon, dans l'arrondissement des Cayes (département du Sud, Haïti). La Ravine du Sud prend sa source dans les contreforts du Pic Macaya situé dans le massif de la Hotte. Elle s'écoule vers l'Est et traverse la ville de Camp-Perrin. Elle s'oriente ensuite vers le Sud pour rejoindre la mer des Caraïbes au niveau de la ville portuaire des Cayes, en face de l'île à Vache. Le BV de la Ravine du Sud a une superficie d'environ de 129.78km^2 .

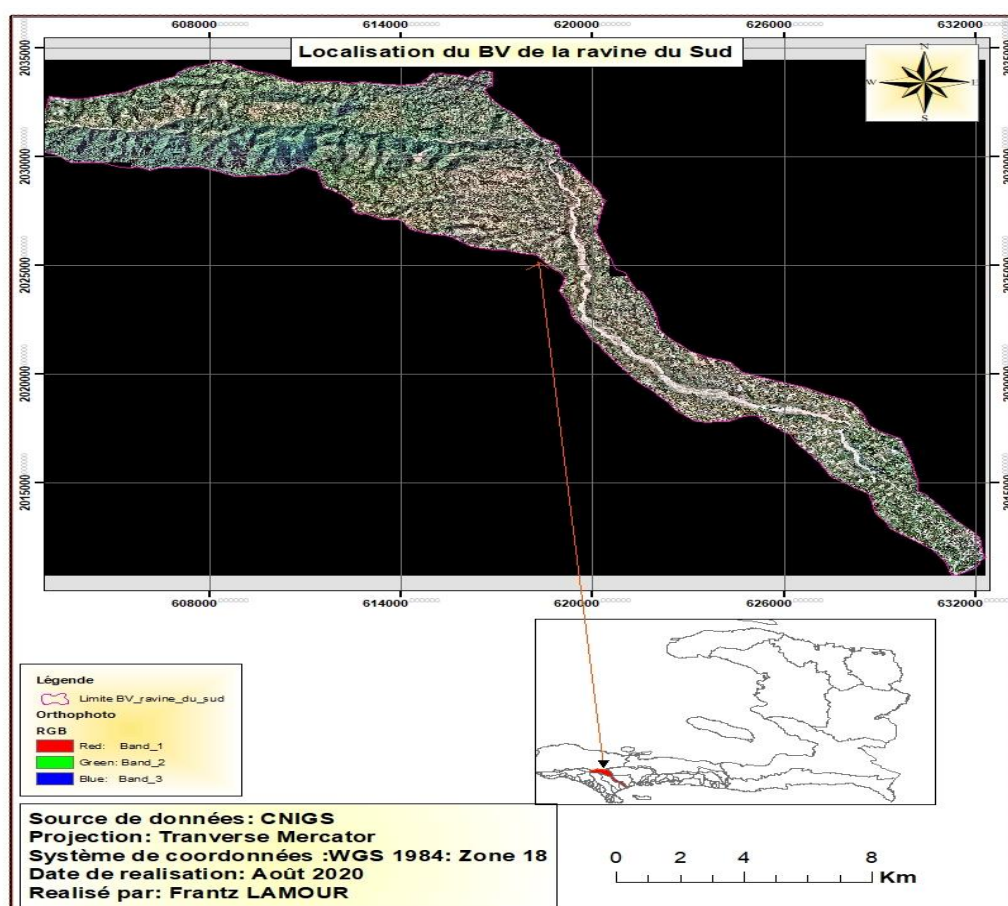


Figure 1 : limite du BV de la Ravine du Sud

3.1.1.1 Le relief

Constituée de faible pente, une partie de la Plaine des Cayes forme l'aval de ce bassin versant et s'élève de 0 à 34m d'altitude tandis qu'en amont de ce bassin versant, l'altitude varie de 34 à 1700m (massif de la Hotte) avec des pentes très fortes. Le Pic Macaya, deuxième morne le plus élevé du pays (environ 2347m d'altitude), donne une idée sur la hauteur du haut BV de la Ravine du Sud.

3.1.1.2 Le climat

Le climat du BV de la Ravine du Sud se présente par sa pluviométrie ainsi que sa température.

3.1.1.2.1 Pluviométrie

Les précipitations moyennes les plus faibles sont enregistrées en décembre avec 82 mm seulement. En octobre, les précipitations sont les plus importantes de l'année avec une moyenne de 317 mm. La variation des précipitations entre le mois le plus sec et le mois le plus humide est de 235 mm.

3.1.1.2.2 Température

La plaine des Cayes a un climat tropical. La classification de Köppen-Geiger est de type Af. En moyenne la température est de 26.7°C. Entre la température la plus basse et celle la plus élevée de l'année, la différence est de 3.0 °C.

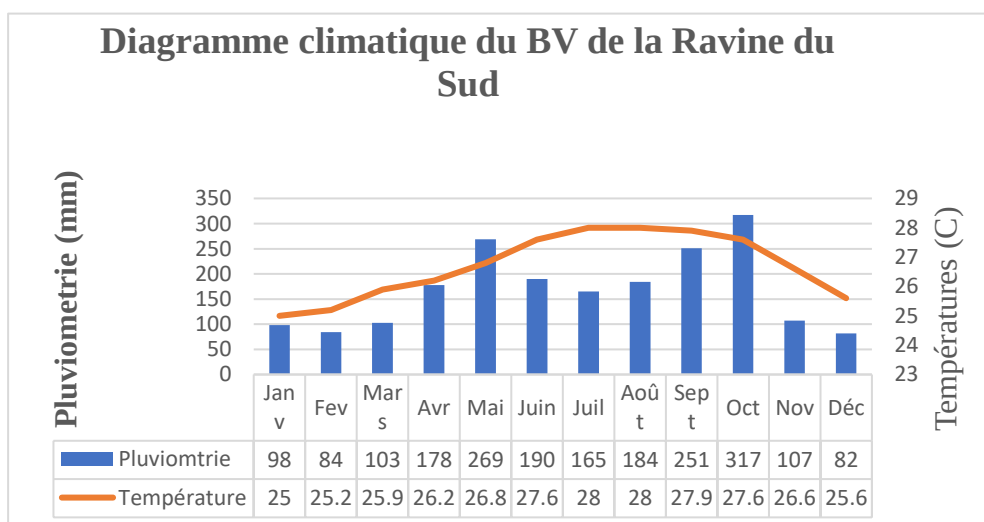


Figure 2 : Représentation de la Pluviométrie température mensuelle des Cayes

(Source : CLIMAT-DATA)

3.1.2 Végétation

La partie amont du BV de la Ravine du sud contenant le Parc national protège la forêt tropicale humide qui recouvre une partie du massif de la Hotte. De ce fait, la végétation est luxuriante et constituée d'une forêt accrochant des nuages qui entourent le massif montagneux. Le Parc Macaya constitue pour Haïti et les Caraïbes l'une des plus importants espaces de conservation de la biodiversité avec plusieurs espèces d'arbres forestiers.

3.2 METHODE DE TRAVAIL

La démarche adoptée dans ce travail pour aboutir à l'estimation du coefficient de ruissellement se décline en 3 grandes phases : la revue bibliographique, la collecte et le traitement des données géospatiales (ortho photo, couche topographique, limite BV, OCS, pente...) et l'analyse spatiale de l'estimation du Coefficient de ruissellement.

3.2.1 Revue et analyse bibliographiques

À ce niveau un ensemble de documents disponibles sur le bassin versant sous étude ont été consultés. Il s'agit notamment des documents relatifs au comportement du régime hydrologique et l'occupation du sol dans le bassin versant de la Ravine du Sud. D'autres documents analogues sur d'autres bassins versants ont été également consultés. Cette étape nous a permis de rassembler les informations générales relatives au ruissellement sur les bassins versants.

Cette étape est fondamentale pour le recensement de méthodes préexistantes permettant d'estimer le coefficient de ruissellement et aussi pour l'établissement de critères permettant de faire un choix optimal de la méthode à adopter pour la détermination du coefficient de ruissellement sur le BV de la Ravine du Sud.

3.2.2 Collecte et traitement de données géo-spatiales

Des données cartographiques de base ont été collectées ou produites au CNIGS et dans le cadre du projet RO. Il s'agit de constituer une base de données géographiques, exploitables sur les logiciels GIS, avec tous les paramètres dépendre le calculer du coefficient de ruissellement sur un bassin versant donné. Au fin d'analyse et de comparaison, nous avons choisi de collecter et de produire des données sur deux périodes différentes (2002 et 2018).

Les données collectées concernent essentiellement la ***pente*** et l'***occupation du sol***, ainsi que des données hydrologiques de base (limites BV, réseau hydro, etc.).

3.2.2.1 Description des différents types de données collectées et produites

1) Données d'occupation des sols (OCS)

Pour produire l'OCS nous avons utilisé des images sous format raster disponibles au CNIGS et sur le site RO :

- Image pléiades 2018 (pour la préparation de la couche d'OCS de la date récente), 60 cm de résolution ;
- Ortho photo de 2002 à 1 m (pour la préparation de la couche d'OCS de référence).

2) Données topographiques et hydrographiques : Ce sont des données vectorielles qui sont déjà disponibles au CNIGS.

- *Données hydrographiques* : ce sont des données utiles pour la délimitation de la zone d'étude (les limites des Bassins Versants, des sous Bassins versants et des zones hydrographiques)
- *Données topographiques* : classes de pente préalablement générées à partir d'un MNT à 30 m.

3.2.3 Matériel utilisé

Images :

- Des images ortho photo 2002 ont été obtenues du CNIGS et des images 2018 ont été obtenues à partir des données pléiade du site RO ;

Logiciels :

- "Ecognition Developer" pour la segmentation et classification des images ortho-photos afin d'extraire les différentes classes d'occupation du sol ;
- Le logiciel Excel pour effectuer certains calculs ;
- Le logiciel "ArcGIS", version 10.4, pour l'analyse spatiale et l'estimation du Cr, ainsi que la cartographie de présentation finale.

- Global Mapper pour convertir les images ortho photos au format adapté avec le logiciel ‘‘Ecognition Developer’’.

3.2.4 Traitement des images de télédétection

Les images ont été transportées sur un logiciel de télédétection (Ecognition Developer) afin d’en extraire la plus grande quantité d’informations disponibles en termes d’occupation des sols du BV de la Ravine du Sud. Cette étape nous a permis d’évaluer quantitativement la variation du changement de superficie des différentes classes d’occupation du sol pour la période étudiée.

3.2.5 Analyse spatiale et Estimation du Cr

Comme il existe différentes méthodes pour évaluer le coefficient de ruissellement, on a dû préalablement, à partir des modèles empiriques existant, synthétiser un modèle en fonction de la typologie de l’OCS utilisée par le CNIGS.

Il suffit donc d’appliquer et de cartographier, à partir d’un logiciel SIG (ArcGIS), la méthode réadaptée pour le calcul de l’estimation du Cr dans le cas de la Ravine du Sud.

Des interprétations et recommandations finales, à partir de cette cartographie du Cr, ont été faites sur l’état du BV de la Ravine du Sud et sur le niveau des risques liés à l’aléa inondation.

3.3 SCHEMA RESUME DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE

En fonction de l’objectif fixé pour arriver à terme ce travail, nous avons définis un ensemble de démarche méthodologique qui se résumant dans la figure 3. Cette figure résume la méthodologie en trois grandes partie : la revue bibliographique, la collecte et traitement de données géo-spatiales et Analyse spatiale et discussion.

3.3.1 Description de la méthodologie reprise dans le schéma ci-contre

Le schéma résumant la méthodologie concerne :

- **La revue bibliographique** : cette étape est utile pour la mise en place d’une méthode permettant d’estimer le coefficient de ruissellement au niveau du bassin versant de la Ravine du Sud. Dans cette partie, des documents ayant rapport avec notre sujet d’étude ont été consultés pour pouvoir choisir un modèle de Cr relativement adapter aux conditions d’occupation du sol haïtien.

- **Collecte et traitement des données géo-spatiale :** cette étape est intéressante car elle a permis de mettre en place les différentes cartes nécessaires pour arriver à terme de cette étude.
- **Analyse spatiale et discussion :** Pour faire suite au traitement des données, cette étape a permis d'estimer le Cr puis le cartographier, pour enfin discuter les résultats et faire des conclusions en rapport à notre hypothèse de départ

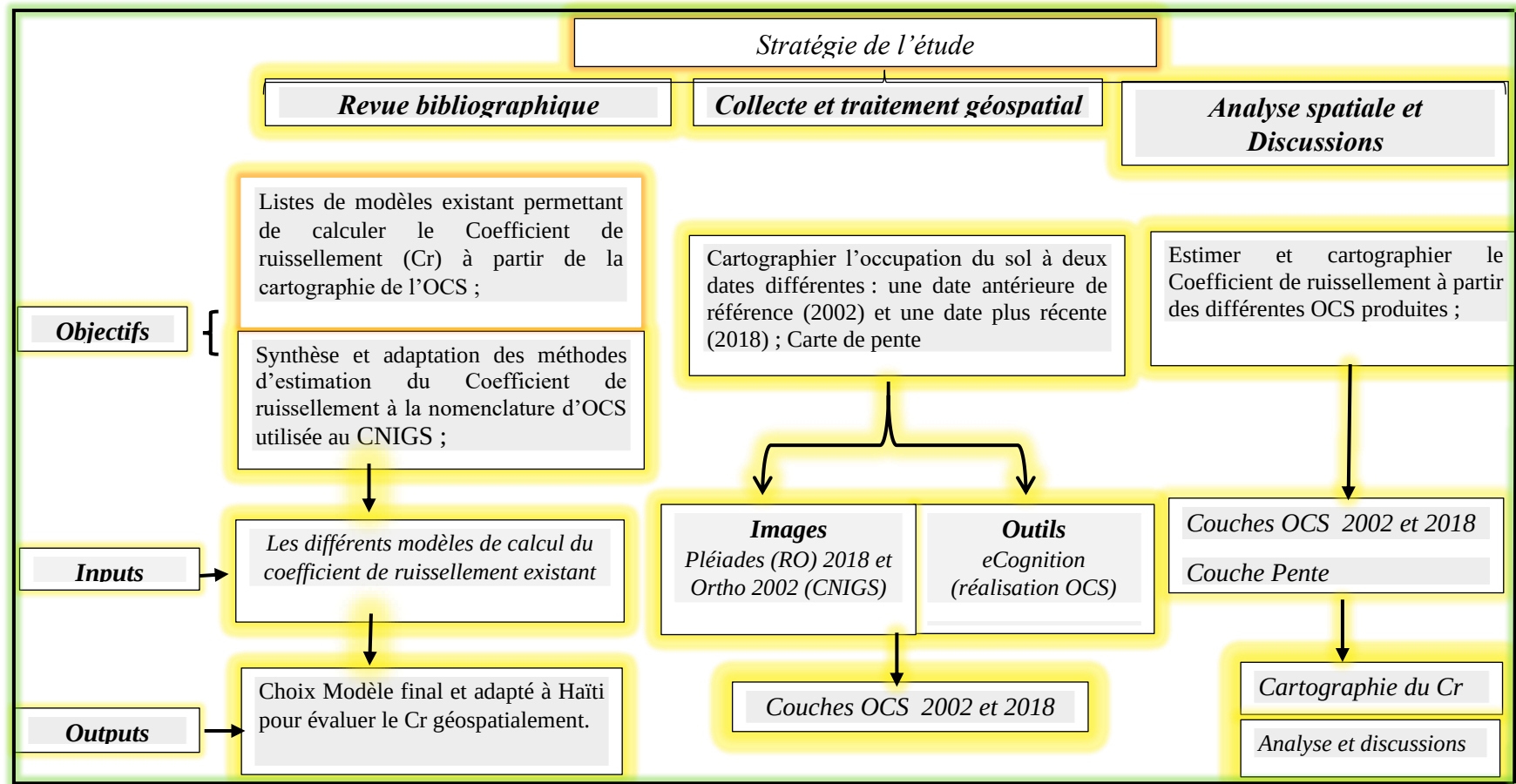


Figure 3 : Schéma simplifié de la méthodologie

3.4 LES ETAPES DE TRAITEMENT DES IMAGES SUR ECOGNITION DEVELOPER

Les différentes cartes d'occupation du sol (au niveau du bassin versant de la Ravine du Sud) sont issues d'une classification complètement automatique réalisée sur des orthophotos (2002 et 2018), dans le logiciel "eCognition Developer". La méthode de classification adoptée est la méthode dite « supervisée » utilisant une approche de classification « par plus proche voisin ».

La procédure de classification dans eCognition est une procédure dite « orientée objets », qui se fait donc en deux étapes : La segmentation et la classification.

➤ Segmentation

Les étapes suivantes doivent être suivies pour segmenter une image ortho photo sur eCognition :

- a. Lancer du logiciel ;
- b. Sélectionner l'image à segmenter dans l'onglet "Create New project"

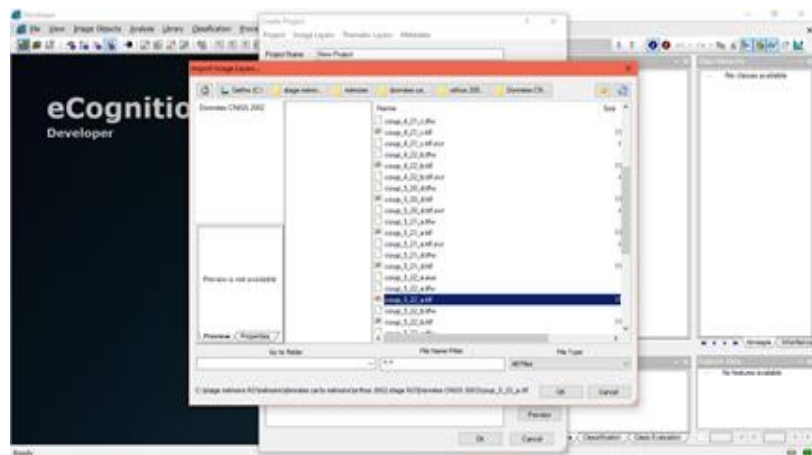


Figure 4 : Deuxième étape de la segmentation

- c. Donner les paramètres de segmentation à l'image dans : *process tree* → *append new* → *insert child* → dans *algorithm* choisir '*Multiresolution Segmentation*'. Puis dans la fenêtre '*Algorithm Parameter*' dans '*Segmentation Settings*' on choisit l'échelle de segmentation, dans notre cas elle est de 200. Puis dans '*Composition of homogeneity criterion*' nous choisissons 0.1 pour *shape* et 0.5 pour *compactness*. On exécute.
- d. Résultat de segmentation de l'image

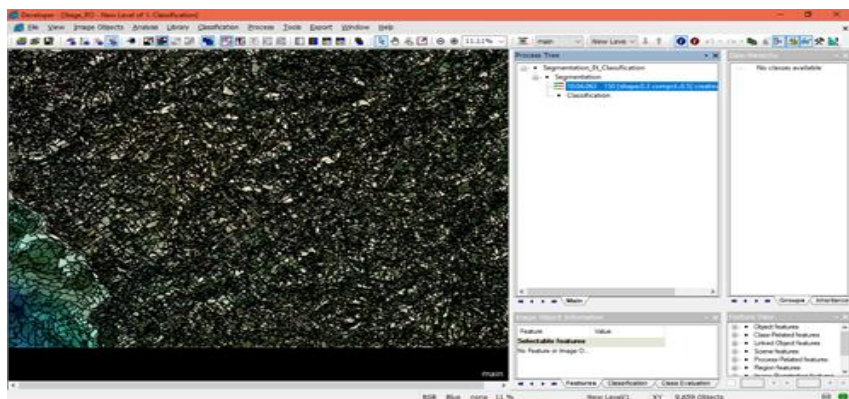


Figure 5 : Dernière étape de la segmentation

➤ Classification de l'image (ou codification des polygones)

La classification fait suite à la segmentation. Pour ce faire on utilise l'algorithme '*classification*'.

- e. Ajouter les classes d'occupation des sols que vous voulez dans l'onglet *classification* → *class Hierarchy* → clic droit pour ajouter les classes l'une après l'autre en répétant les mêmes actions ;
- f. Activer la procédure de classification « par plus proche voisin » à partir de l'onglet '*Nearest Neighbor*' → '*Apply Standard NN To Classes*' ;

- g. Choisir les zones d'entraînement ou échantillons pour chacune des classes, qui vont servir de modèle à l'algorithme de classification : '*sample*' → '*select sample*' ;

On execute.

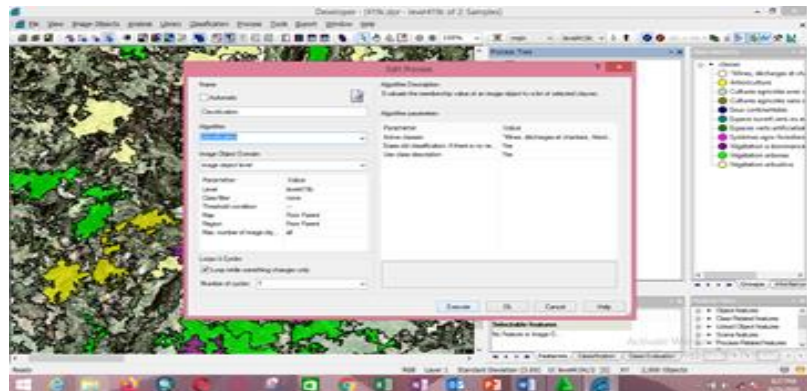


Figure 6 : Quatrième étape de la classification

4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats obtenus concernent non seulement l'évolution de l'occupation du sol durant la période allant de 2002 à 2018, mais également les risques hydrologiques du bassin versant (en terme de crue liée au ruissellement pluvial ; stagnation de l'eau en aval du BV). Dans les lignes qui suivent nous avons présentés les résultats et discussions à propos de la relation qui existe entre les résultats et les données utilisés puis l'identification des limites et des alternatives dans l'interprétation de ces résultats.

4.1 PRESENTATION DES RESULTATS

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail se situent donc à deux niveaux :

- Un premier niveau purement « méthodologique » qui consiste à analyser les méthodes connues pour l'estimation du Cr afin de trouver une méthode finale adaptée à la nomenclature d'OCS du CNIGS ;
- Un deuxième niveau qui renvoie à l'application de cette méthode finale qui a permis de déboucher sur la cartographie du Cr dans l'ensemble du bassin versant.

4.1.1 Modèles préexistants d'évaluation du Cr à partir de l'OCS.

Nous avons recensé quatre (4) modèles traditionnellement connus, permettant d'évaluer le coefficient de ruissèlement à partir de la typologie de l'OCS.

4.1.1.1 Coefficient de ruissellement dans la méthode rationnelle

➤ Méthode des tableaux

Cette méthode combine deux facteurs essentiels pour estimer le coefficient de ruissellement : la nature du couvert végétale et la pente du terrain. Le tableau 1 présente le coefficient de ruissellement dans la méthode rationnelle.

Tableau 1 : Coefficient de ruissellement dans la méthode rationnelle

Nature de la couverture végétale	Valeur de C en pourcentage							
	Petits Bassins de 0 à 10km ²				Grands bassins de 10 à 100km ²			
	Intervalle de pente en %				Intervalle de pente en %			
	< 5	5-10	10-30	>30	< 5	5-10	10-30	>30
Plates-formes et chaussées de routes ; cours...	95	»	»	»	»	»	»	»
Végétation non couvrante	80	85	90	95	70	75	80	85
Cultures couvrante, terrain de parcours, Petit brousse clairsemé	75	80	85	90	52	60	72	80
Prairie....., brousse dense, savane a sous-bois	70	75	80	85	30	36	12	50
Foret ordinaire en futaie.....	30	50	60	70	13	20	25	30
Sous-bois touffus.....								
Grande forêt primaire	20	25	30		15	18	22	25

Source : document de cours d'hydrologie du Dr. Nyankona GONOMY

La méthode rationnelle donne un coefficient de ruissellement en fonction de la nature de l'occupation du sol, de la classe de pente et de la taille du bassin versant.

Selon Bennis (2003), le coefficient de ruissellement c'est le paramètre de la méthode rationnelle le plus difficile à déterminer. Généralement, comme le bassin a une surface hétérogène en terme d'occupation du sol, la procédure est de calculer un coefficient de ruissellement pondéré à appliquer dans la formule suivante :

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n C_i * A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

C_p : Coefficient de ruissellement pondéré pour la surface totale de la zone

C_i : Coefficient de ruissellement partiel relatif à chaque mode d'occupation (à chaque surface homogène)

A_i : Surface correspondante au coefficient C_i

n : Nombre de surface homogène

La méthode rationnelle fait l'hypothèse d'une pluie constante sur l'ensemble du bassin.

➤ Méthode avec la hauteur de ruissellement

La méthode de coefficient de ruissellement suppose que le ruissellement est proportionnel à la précipitation.

$$C = H_{ru} / P$$

C : coefficient de ruissellement **H_{ru}** : hauteur de ruissellement

P : Précipitation

Cette formule ne peut être utilisée pour évaluer le coefficient de ruissellement pour le BV de la ravine du Sud puisqu'il n'y a pas de données sur la hauteur de ruissellement pour cette zone.

4.1.1.2 Coefficient de ruissellement dans le Modèle du Ministère des Travaux du Québec (MTQ)

Le Ministère des Travaux du Québec (MTQ, 1995), propose une méthode de détermination du coefficient de ruissellement basé sur le système de classification des sols au Québec. Cette méthode s'appuie sur les différents horizons du sol, la pente et l'occupation du sol pour le milieu rural. Le tableau 2 présente le coefficient de ruissellement dans la méthode du ministère du Québec en zone rurale.

Tableau 2 : coefficient de ruissellement avec la méthode du Ministère des Transports du Québec en zone rurale

Végétation	Pente	Classification hydrologique				
		AB	B	BC	C	CD
Culture						
Plat	< 3 %	0,30	0,36	0,41	0,47	0,51
Vallonnée	3 - 8 %	0,34	0,43	0,51	0,59	0,67
Montagneux	> 8 %	0,43	0,51	0,61	0,67	0,73
Pâturage						
Plat	< 3 %	0,12	0,17	0,25	0,34	0,43
Vallonnée	3 - 8 %	0,17	0,25	0,33	0,43	0,51
Montagneux	> 8 %	0,22	0,39	0,47	0,56	0,64
Boisé						
Plat	< 3 %	0,09	0,15	0,21	0,29	0,37
Vallonnée	3 - 8 %	0,12	0,19	0,26	0,34	0,43
Montagneux	> 8 %	0,18	0,26	0,34	0,43	0,51
Lac et marécage	0,05					

Source : MTQ,1995

Ce modèle ne peut pas utiliser dans cette étude malgré ses multiples paramètres, en raison du manque de données sur la classification hydrologique des sols en Haïti notamment sur le BV de la ravine du Sud.

4.1.1.3 Méthode de Wischmeier

Le coefficient de ruissellement est influencé additivement par un facteur topographique, un facteur sol et un facteur couvert végétal :

$$C = 1 - [a + b + c]$$

C = coefficient de ruissellement

a = facteur topographique b = facteur de sol c = facteur de couvert végétal. Le tableau 3 donne le coefficient de ruissellement dans la méthode de Wischmeier.

Tableau 3 : paramètres a, b et c dans la méthode de Wischmeier

	Type de surface	Valeur de Cr
Topographie : facteur a	Terrain plat, pente moyenne de 0.2 à 0.5 (m/km)	0.30
	Terrain vallonné, pente moyenne de 2 à 4 (m/km)	0.20
	Terrain montagneux, pente moyenne de 25 à 50 (m/km)	0.10
Sol : Facteur b	Argile compacte, imperméable	0.10
	Mélange d'argile et de loam	0.20
	Loam sableux bien aéré	0.40
Couvert végétal : Facteur c	Terrains cultivés	0.10
	Boisés	0.20

Source : Schwab (1957)

4.1.1.4 Modèles ASCE/WEF

Ce modèle stipule que pour des bassins avec des occupations de sol variées, on peut combiner les différents coefficients de chaque type de surface en tenant compte du pourcentage occupé par chacun. Le modèle donne une gamme usuelle de valeurs de coefficient de ruissellement pour des secteurs ruraux et urbains (ASCE/WEF, 1992). Le tableau 4 présente le coefficient de ruissellement dans le modèle ASCE/WEF.

Tableau 4 : coefficient de ruissellement dans le modèle ASCE/WEF

Type d'OCS		Coefficient de ruissellement
Zone commerciale	Centre-ville	0.70-0.95
	Banlieue	0.50-0.70
Résidentielle	Maisons de banlieue	0.25-0.40
	Maisons détachées	0.30-0.50
	Unités jumelées	0.40-0.60
	Maisons de ville	0.60-0.75
	Blocs appartement	0.50-0.70
Industrielle	Légère	0.50-0.80
	Lourde	0.60-0.90
Parque cimetière		0.10-0.25
Terrain de jeux		0.20-0.35
Champs		0.10-0.30
zone cultivées		0.30-0.43
Forêt		0.01-0.10
chaussées, parking, voies piétonnes		0.70-0.90
espace vert		0.10-0.25
Terrain boisé		0.09-0.34

Source : Adapté de ASCE/WEF

4.1.2 Proposition d'une méthode finale d'estimation du Cr pour Haïti

4.1.2.1 Analyse des modèles préexistants

Les deux modèles qui semblent refléter le mieux la réalité haïtienne en termes de typologie d'utilisation du sol sont la méthode rationnelle et le modèle ASCE/WEF. Toutefois chacune de ces méthodes prise séparément ne couvrent pas l'ensemble des classes représentées dans notre zone d'étude, d'où notre choix méthodologique finale qui porte sur la compilation de ces deux modèles. Ainsi, leur combinaison permet d'aboutir à une méthode finale couvrant tous les aspects de la réalité haïtienne en termes d'occupation du sol.

Le tableau 5 présente les méthodes de calculs du coefficient de ruissellement relatives au contexte haïtien.

Tableau 5 : Identification des méthodes compatible au contexte haïtien

Méthode rationnelle									
Nature de la couverture végétale	Valeur de Cr en %								
	Petits Bassins de 0 à 10km ²				GB de 10 à 100km ²				
	Intervalle de pente en %				Intervalle de pente en %				
	< 5	5-10	10-30	>30	< 5	5-10	10-30	>30	
Plates-formes et chaussées de routes ; cours...	95	»	»	»	»	»	»	»	»
Cultures non couvrante	80	85	90	95	70	75	80	85	
Cultures couvrante, terrain de parcours, Petit brousse clairsemé	75	80	85	90	52	60	72	80	
Prairie....., brousse dense, savane a sous-bois	70	75	80	85	30	36	12	50	
Foret ordinaire en futaie.....	30	50	60	70	13	20	25	30	
Sous-bois touffus.....									
Grande forêt primaire	20	25	30	40	15	18	22	25	
Modèle ASCE/WEF									
Désignation du type d'OCS	Valeur de Cr en pourcentage								
Centre-ville d'agglomération importante				80				95	
Espace vert				10				25	
Zone cultivée				30				43	
Terrain Boisé				9				34	

Les autres méthodes pourraient bien plus adaptées puisqu'elles tiennent compte beaucoup plus de paramètres (par exemple le modèle du MTQ) mais par manque de données sur le bassin versant de l'étude, on se donne d'utiliser la méthode rationnelle (très utilisée comme méthode d'estimation du coefficient de ruissellement pour la conception de nombreux ouvrages hydrauliques dans le monde) et celle de (ASCE/WEF) pour estimer le coefficient de ruissellement sur le BV de la ravine du Sud.

Pour certains bassins versants hétérogènes, on pourra être amené à pondérer plusieurs coefficients « Cr » par les surfaces correspondantes pour obtenir le coefficient « Cr » moyen du bassin versant considéré. Pour le BV de la ravine du Sud un Cr Pondéré a été estimé en raison de l'hétérogénéité de l'occupation des sols.

Selon ASCE/WEF, 2012, le coefficient de ruissellement est aussi fonction de la saturation du sol, il varie donc au cours d'une pluie, c'est pourquoi afin de pallier cette évolution du coefficient, il est d'usage de prendre la valeur maximale correspondant à un sol déjà saturé (tableau 4 : modèle ASCE/WEF).

4.1.2.2 Harmonisation de la méthode finale (estimation Cr) avec la nomenclature OCS du CNIGS.

Pour pouvoir évaluer le coefficient de ruissellement sur le BV de la ravine du Sud, il est important d'établir une correspondance entre les classes OCS utilisées dans le modèle compilé que nous avons mis au point (en 4.1.2.1) et les classes d'occupation du sol dans la nomenclature du CNIGS. Toutefois, nous avons dû agréger plusieurs classes de la nomenclature du CNIGS en une seule pour faciliter cette mise en correspondance. Le tableau 6 présente l'analogie entre la méthode finale retenue à la nomenclature de l'OCS du CNIGS.

Tableau 6 : méthode finale d'estimation du coefficient de ruissellement (version adaptée avec l'OCS du BV de la ravine du Sud).

Classe OCS issues des modèles préexistants (synthèse de la méthode rationnelle et du modèle ASCE /WEF)	classes OCS du CNIGS	Cr en pourcentage			
		Intervalle de pente en %			
		< 5	5-10	10-30	>30
Centre-ville d'agglomération importante	Zones Urbaines ou bâties	95	»	»	»
Cultures non couvrante	Cultures agricoles sans couvert arboré	70	75	80	85
Chaussées, voies piétonnes, parkings	Réseaux de communication	95	95	95	95
Espace vert	Espaces verts artificialisés et autres espaces urbains	25	25	25	25
Zone industrielle	Zone industrielle	13	20	25	30
Cultures couvrantes	Cultures agricoles avec couvert arboré	52	60	72	80
Terrain boisée	Système agro-forestier Végétation arborée Arboriculture Végétation arbustive	15	18	22	25
Prairie....., brousse dense, savane a sous-bois	Végétation à dominante herbacée	30	36	42	50

4.1.3 Détermination multi-date de l'occupation du sol (2002 et 2018)

Pour mettre en évidence les changements de l'occupation des sols entre 2002 et 2018, nous avons utilisé des images de télédétection correspondant à chacune de ces dates, via un logiciel de traitement d'images permettant de générer une cartographie de l'OCS complètement automatisée, grâce à une approche dite « orientée objets » (deux étapes : segmentation et classification).

Une analyse des changements issus de ces deux classifications permet de tirer des conclusions en termes de variation du Cr d'une date à l'autre. Les deux étapes du traitement des images passent par d'autres étapes intermédiaires chacune.

4.1.3.1 Cartographie de l'OCS en 2002 et 2018

Les vecteurs obtenus ont été enfin utilisés pour la détermination des changements effectués dans l'aire du bassin versant de la ravine du Sud de la façon suivante :

- La quantification du changement opéré pendant cette période ;
- L'impact probable du type d'évolution de l'OCS sur le coefficient de ruissellement. Suivant la figure 7, la répartition de l'utilisation du sol est ainsi en 2002 sur le bassin versant de la ravine du Sud :

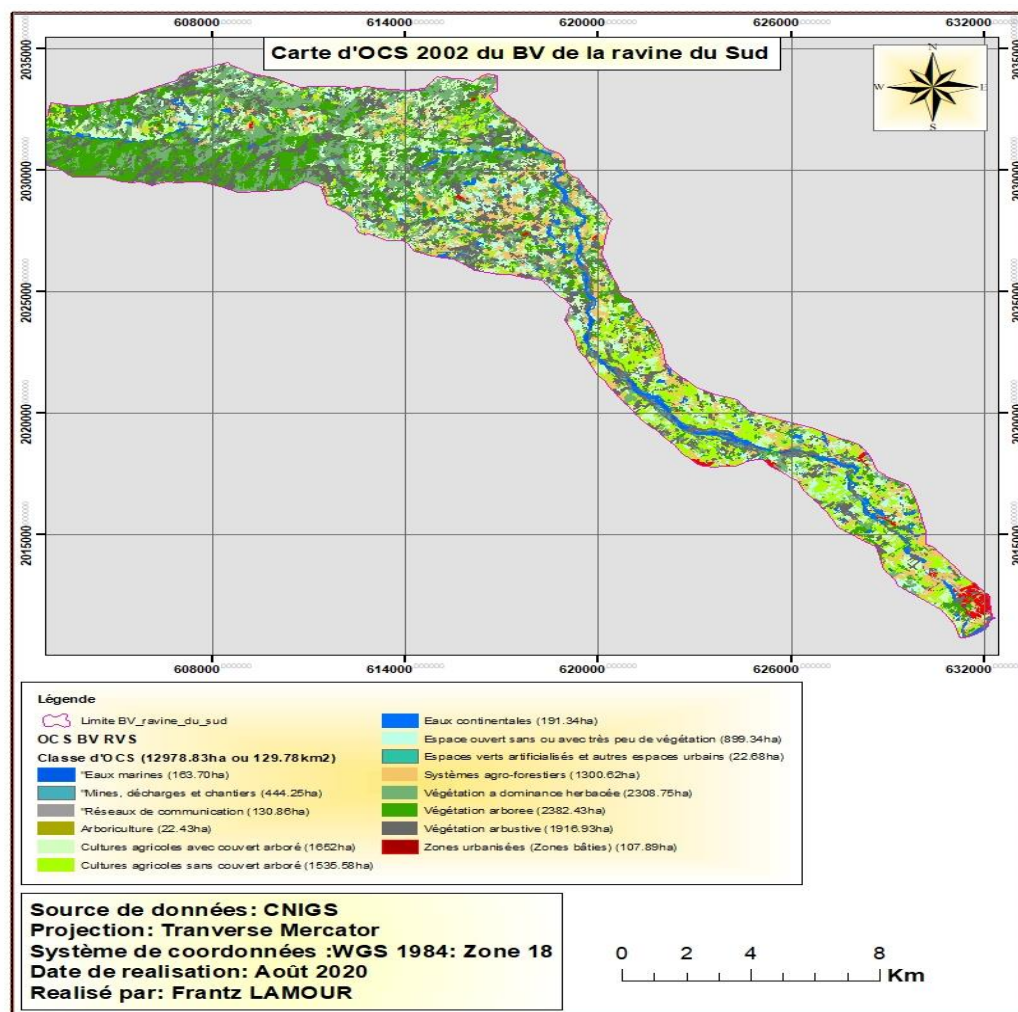


Figure 7 : OCS 2002

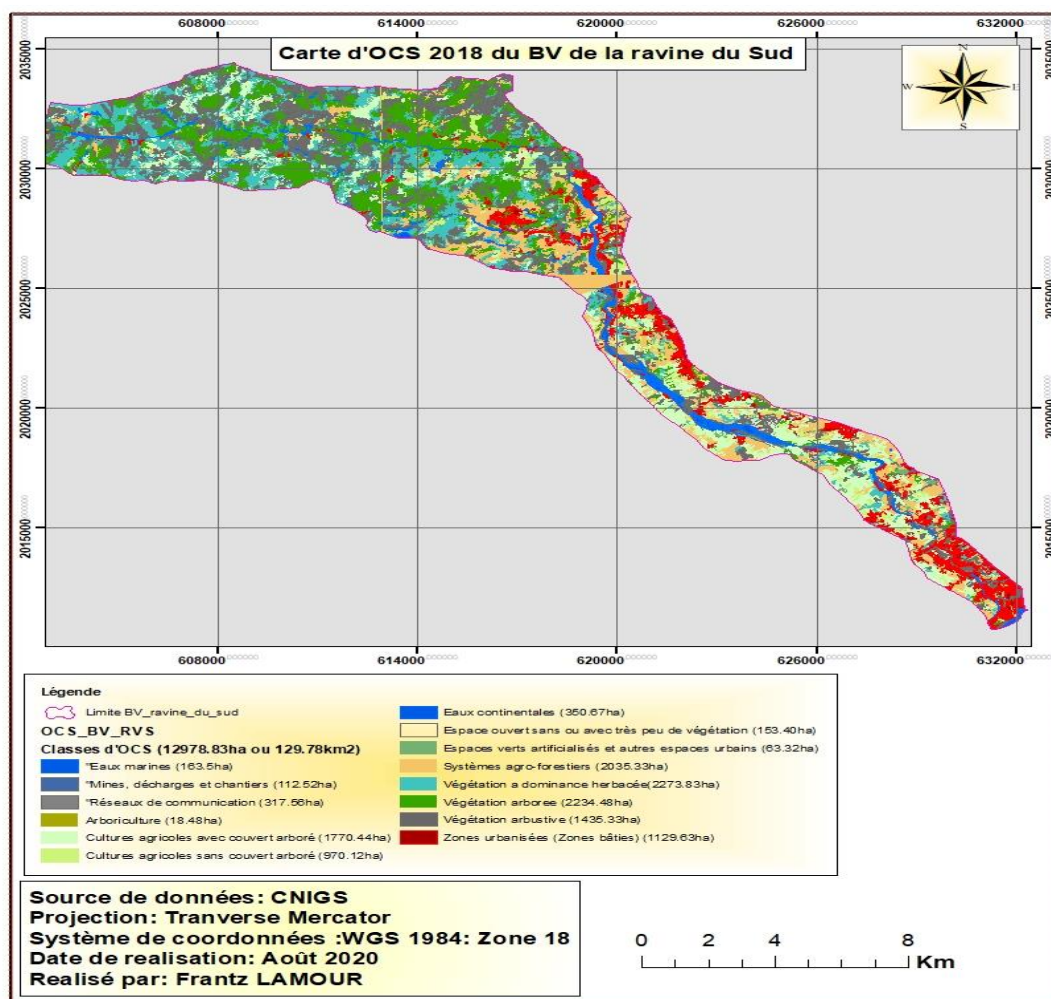


Figure 8 : OCS 2018

Le couvert végétal dans sa globalité est distribué de manière continue dans l'aire du BV de la ravine du Sud, sauf dans la partie aval qu'on peut remarquer la présence d'une urbanisation très dense mais dans une proportion faible par rapport aux autres types d'occupation des sols.

La figure 8 montre la répartition de l'OCS à l'intérieur du bassin versant de la ravine du Sud en 2018 :

En aval le bâti augmente de superficie alors que le couvert végétal est concentré dans la partie amont du BV. Un simple regard sur les figures 7 et 8, on peut remarquer que les changements observés en terme d'utilisation du sol dans le BV de la ravine du sud ont été très importants entre 2002 et 2018.

4.1.3.2 Analyse du changement de l'OCS entre 2002 et 2018

A partir des données de l'OCS de ces deux dates, le tableau 7 permet de voir clairement le changement opéré dans chaque classe d'occupation des sols.

Tableau 7 : évolution de l'OCS en fonction de la superficie

Classe d'OCS	Superficie en ha		Variation de superficie (ha)
	2002	2018	
Végétation arborée	2282.43	2234.48	-47.95
Système agro-forestier	1300.62	1435.33	134.71
Végétation arbustive	1916.93	1977.01	60.08
Arboriculture	22.43	18.48	-3.95
Zones Urbaines ou bâties	207.89	1129.63	921.74
Cultures agricoles sans couvert arboré	1652	970.12	-681.88
Réseaux de communication	130.86	317.56	186.7
Espaces verts artificialisés et autres espaces urbains	22.68	63.32	40.64
Cultures agricoles avec couvert arboré	1652	1770.44	118.44
Eaux continentales	191.34	350.67	159.33
Mines, décharges et chantiers	444.25	112.52	-331.73
Végétation à dominance herbacée	2308.75	2273.83	-34.92

Ce tableau montre facilement le changement opéré pendant environ 16 ans dans le micro BV de la Ravine du Sud en termes d'occupation du sol. Prenons par exemple pour l'année 2002, les cultures agricoles sans couvert arboré ont occupées une superficie de 1652 ha pourtant en 2018 elles ont perdu 681.88ha en faveur d'autres types d'occupation de sol. Alors que l'urbanisation qui était de 207.89 ha en 2002 passe à 1129.63 ha en 2018 ce qui donne une augmentation de 921.74 ha.

Ainsi, le BV a subi une perturbation majeure qui se traduit par :

- 1) L'évolution de l'agriculture incluant : des changements liés aux assolements (cultures permanentes devenues des zones agricoles hétérogènes) ; la mise en culture de nouvelles terres (boisé en culture agricoles non couvrante ou couvrante) ; un abandon de l'agriculture vers d'autres types d'utilisation du sol.
- 2) Une urbanisation croissante, correspondant à une arrivée importante et continue de population dans la Plaine des Cayes au cours de la période allant de 2002 à 2018. Ces extensions urbaines sont faites au détriment de l'agriculture.

4.1.4 Carte de pente du BV de la ravine du Sud

Cette carte a été réalisée à partir d'une couche appelée Modèle Numérique de Terrain (MNT) mise en place par le CNIGS pour la détermination des différentes classes de pentes en Haïti.

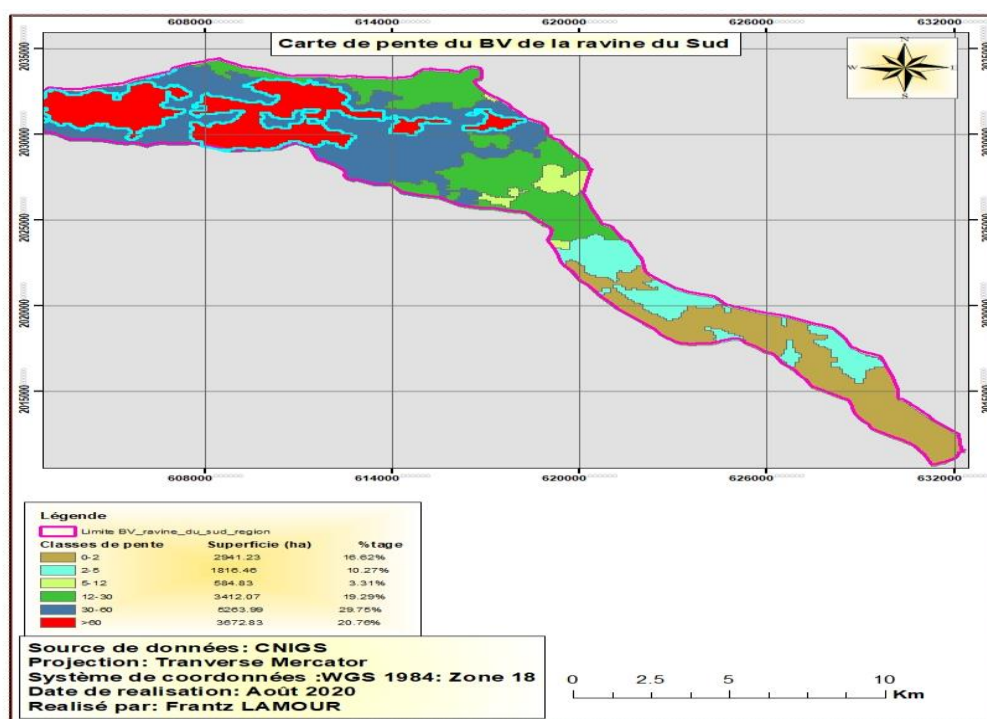


Figure 9 : Carte de pente du BV de la ravine du Sud

Cette carte des pentes en pourcentage a fait l'objet d'une classification en six classes selon le CNIGS. La surface réelle du BV de la ravine du Sud est de 12978.83 ha ou 129.78 km². Pour une pente comprise entre zéro (0) et cinq (5) on est dans la partie aval du BV avec une proportion de 26.89% de la superficie totale, pour une pente comprise entre cinq (5%) et douze (12%) on a une proportion seulement de 3.31% de la superficie totale du BV.

Ces résultats montrent qu'on a un relief plat en aval et un relief accidenté en amont du BV, ce qui pourrait faciliter le ruissellement en amont et l'infiltration ou la stagnation de l'eau en aval.

Selon Colmar (2006), lorsque les pentes sont plus faibles, la sensibilité à l'érosion est plus limitée. En effet, les faibles pentes favorisent le phénomène d'inondation en absence d'un sol très perméable.

4.1.5 Estimation du Cr dans le BV à partir des facteurs OCS et pente

Les couches OCS et Pente étant disponibles, nous avons dû estimer (et cartographier), toujours dans le SIG, le coefficient de ruissellement dans l'ensemble du bassin versant selon le modèle conçu en amont (en 4.1.2.2).

Les tableaux 8 et 9 donnent les différents Cr pour chaque classe d'OCS et en fonction des classes de pente. Un Cr pondéré ou global (Cr moyen pour le BV pris dans son ensemble) est calculé à la fin suivant la formule présentée ci-devant (voir en 4.1.1.1).

Tableau 8 : coefficient de ruissellement pondéré de la ravine du Sud 2002

Classe d'OCS	Cr/Classe de pente			
	>30	12 à 30	5 à 12	>5
Urbanisation	0.006448	0.00269	0.000715	0.080736
Zone boisée	0.191222	0.056837	0.011321	0.010224
végétation herbacée	0.513165	0.121921	0.032893	0.053746
espace vert	0.019199-	0.020972	-	0.209829
Réseau de Communication	0.1013	0.1545	0.2705	0.4236
Culture agricole sans CA	0.181495	0.106109	0.0207	0.438328
Culture agricole Avec CA	0.366627	0.205665	0.02707	0.109168
Espace ouvert	0.187281	0.032872	0.027079	0.082884
Cr pondéré : 0.3020				

Cr : Coefficient de ruissellement ; CA : Couverture Arborée ; OCS : Occupation des sols

Tableau 9 : Coefficient pondéré du BV de la ravine du Sud de 2018

Classe OCS	Cr/Classe de Pente			
	>30	12 à 30	5 a12	5>
Urbanisation	0.064514	0.222284	0.053892	0.609311
Zone boisée	0.137966	0.062392	0.018615	0.025671
Végétation herbacée	0.518984	0.111977	0.025004	0.066331
espace vert	0.003771	-	-	0.246229
Réseaux de communication	0.031553	0.04942	0.21248	0.656534
Culture Agricole sans CA	0.272276	0.08632	0.06746	0.337268
Culture Agricole Avec CA	0.392819	0.05956	0.01593	0.207835
Espace ouvert	0.0239	0.0068	0.0013	0.2673
Cr pondéré : 0.3466				

A partir des tableaux 8 et 9, on peut remarquer que le coefficient de ruissellement a subi une faible augmentation au cours de la période 2002-2018 (passe de 0.30 en 2002 à 0.34 en 2018) pour l'ensemble du bassin versant de la ravine du sud, mais il augmente significativement en aval du BV (dans les zones où la pente est inférieures à 5%).

4.1.5.1 Distribution spatiale du coefficient de ruissellement au niveau du BV de la Ravine du Sud

Le modèle d'estimation du coefficient de ruissellement conçu a permis de spatialiser le Cr au niveau du BV de la Ravine du Sud. Cette spatialisation se fait en fonction des différentes classes d'occupation du sol.

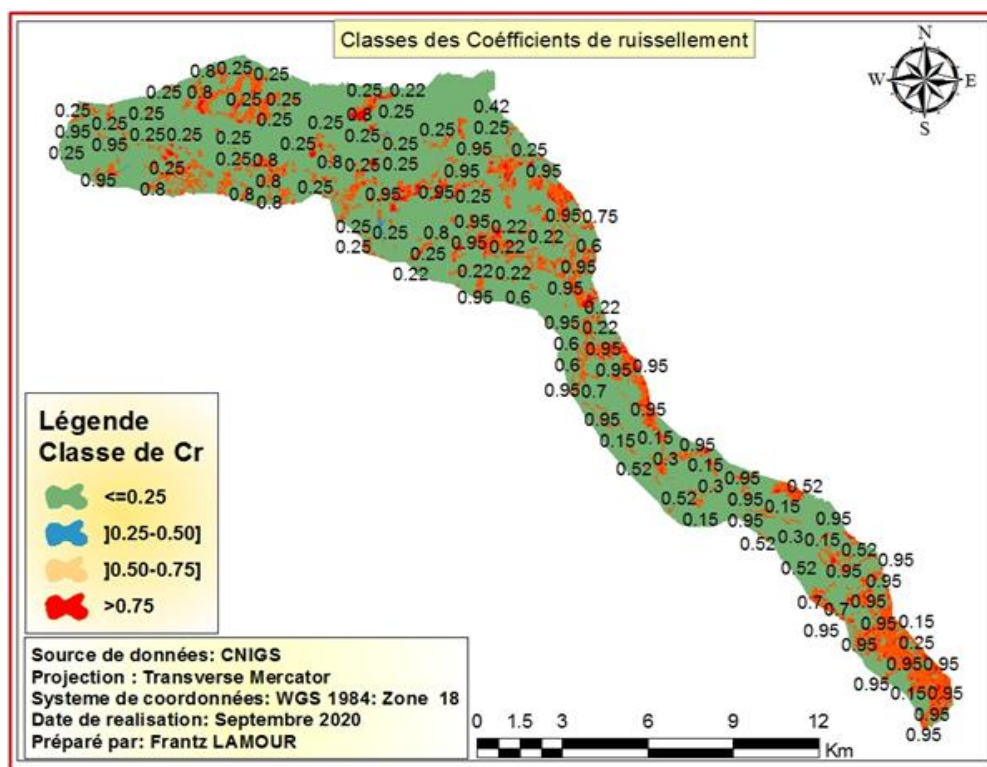


Figure 10 : Répartition spatiale du coefficient de ruissellement dans le BV Ravine du Sud

Cette carte montre la repartition des differentes classes de coefficient de ruissellement sur le BV de la ravine du Sud. La classe la plus dominante est celle inferieur ou egale à 0.25% et elle est repartie sur tout le bassin versant. A partir de ces classes de Cr, le coefficient moyen ou pondéré du BV a été calculé.

4.1.5.2 Estimation des Cr pondérés par classe de pente

Pour estimer le coefficient de ruissellement il convient de prendre en compte les paramètres tels que les classes d'OCS et leurs surfaces correspondantes et les classes de pentes pour pouvoir utiliser facilement le modèle d'évaluation du Cr synthétisé. Cette estimation est passée par une confrontation de la couche d'OCS avec celle de la pente pour finalement obtenir un Cr pour chaque classe de pente et le Cr pondéré pour l'ensemble du bassin versant.

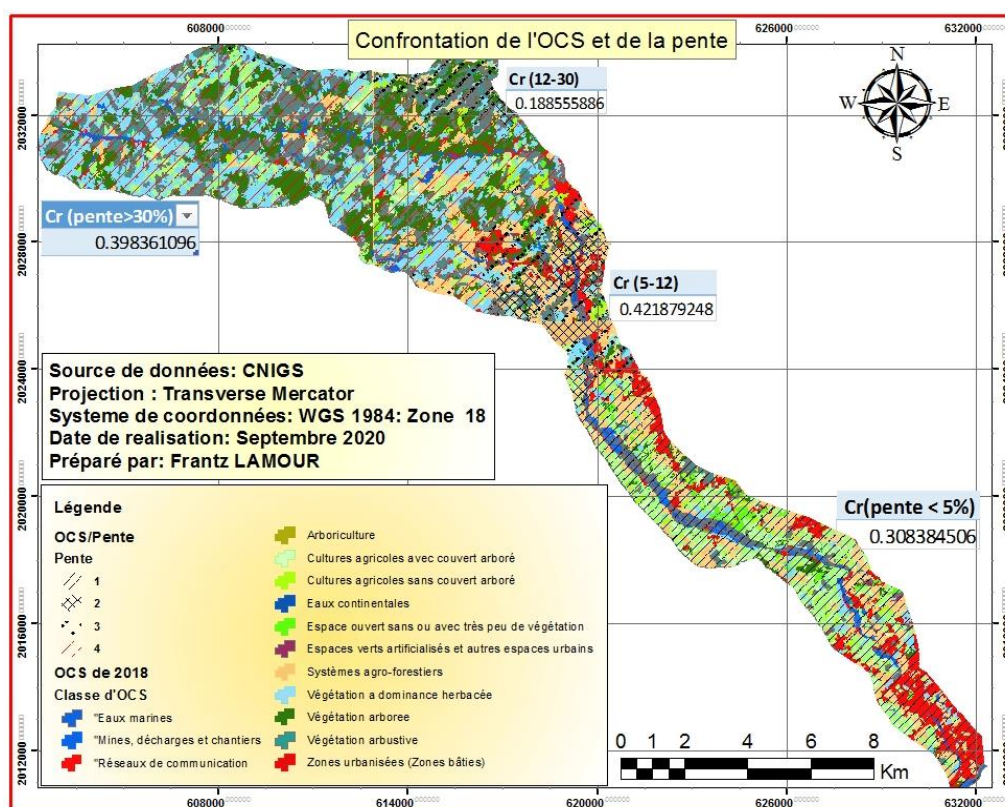


Figure 11 : Carte de Cr par confrontation d'OCS et de pente

Pour une pente supérieure à 30% on a un Cr de 0.39 alors que pour une pente comprise entre 5 et 12% on a un Cr de 0.42, ce qui montre que l'occupation des sols joue un rôle très important dans le processus de ruissellement sur un bassin versant.

L'urbanisation montre clairement son impact sur le ruissellement, malgré qu'on a une faible pente en aval du BV qui pourrait favorable à l'infiltration mais on a un Cr relativement élevé.

4.2 INTERPRETATION DES RESULTATS

4.2.1 Evolution de l'occupation du sol

Le tableau 10 permet de déterminer pendant cette période, la variation de la superficie de chaque classe d'occupation du sol en termes de proportion. Ainsi, les différentes classes d'occupation du sol les plus dynamique du micro bassin versant de la Ravine du Sud se répartissent de la manière suivante en 2002 : l'urbanisation était de 0.83 % de la superficie totale ; les zones boisées étaient de 43.31 % ; la culture agricole non couvrante était de 12.60 % et le réseau routier était de 1.01%.

Pourtant cette même superficie en 2018 a subi une évolution dans l'utilisation de son espace : l'urbanisation est de 8.70 % de la superficie totale ; les zones boisées occupent une proportion de 44.11 % de la superficie totale ; la culture agricole non couvrante est de 7.47 % et le réseau routier est de 2.44 %.

Ce qui donne pour l'ensemble du BV, durant ces 16 ans une augmentation des zones urbanisées de 7.87 %, une augmentation des zones boisées de 0.79 %, une diminution des cultures agricoles non couvrantes de 5.12 % et une augmentation des réseaux routiers de 1.43 %. Le tableau 10 présente l'évolution de l'OCS.

Tableau 10 : Evolution de l'OCS en termes de proportion

Classes d'OCS	Proportion en 2002 (%)	Proportion en 2018 (%)	Variation (%)
Urbanisation	0.830198	8.706139	7.875941
Zone Boisée	43.31523	44.11507	0.799841
Vegetation herbacées	17.78935	17.50774	-0.28161
espace verts	0.184608	0.643602	0.458994
Réseau de communication	1.007949	2.445059	1.43711
Culture Agricole sans couvert végétale	12.60029	7.475019	-5.12527
Cultures agricoles avec couvert végétale	12.77842	13.64098	0.862558
Espace ouvert	9.274103	1.297575	-7.97653

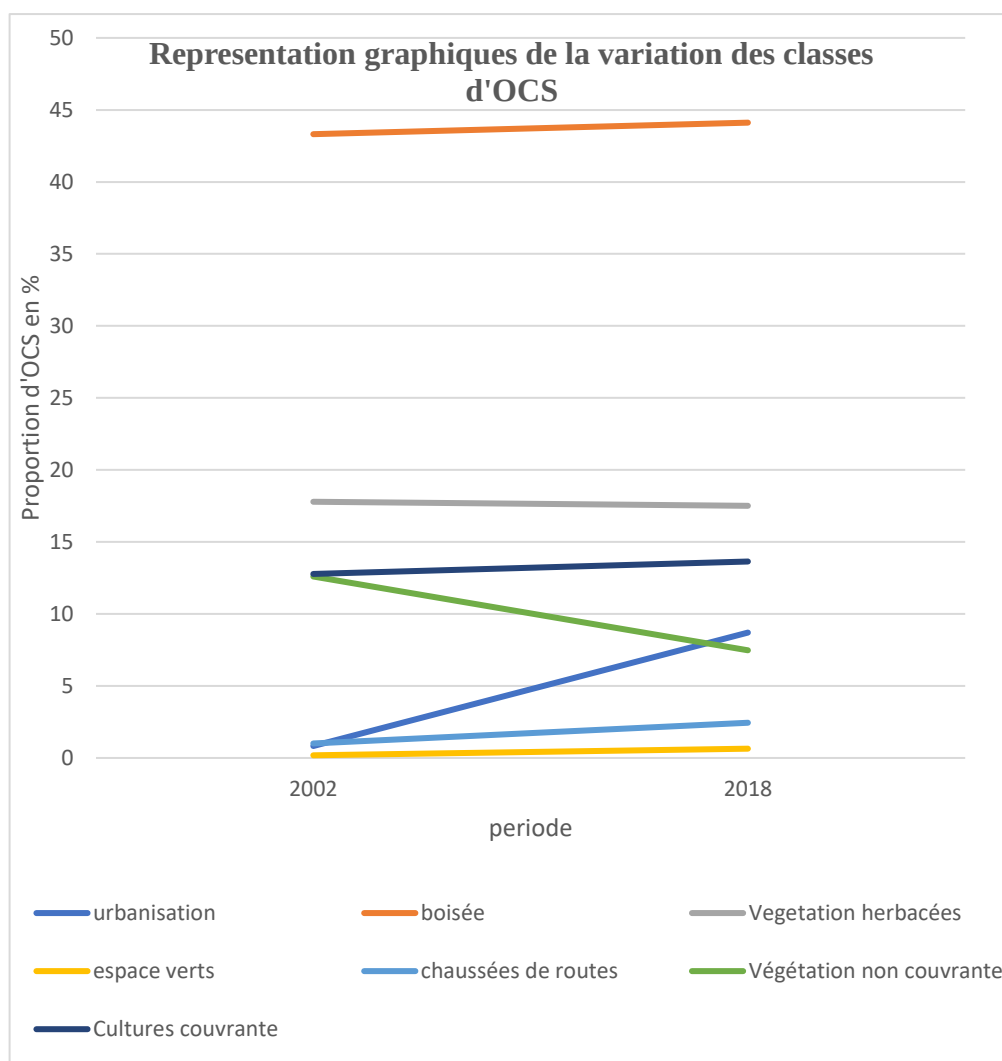


Figure 12 : Variation des classes d'occupation du sol entre 2002 et 2018

La figure 12 montre les classes d'OCS qui varient de manière très rapide au cours de la période allant de 2002 à 2018. On peut remarquer là où l'urbanisation et le réseau routier augmente de plus en plus en sortant de 2002 pour arriver en 2018, les cultures couvrantes diminuent pour cette même période. Le boisé dans son ensemble ne varie pas significativement selon la figure 12 mais en réalité il y a variation au sein des différentes classes qui le compose.

4.2.1.1 Evolution de l'occupation du sol en aval

Comme montre la carte d'OCS de 2018 (figure 8), l'occupation du sol en aval du bassin versant de la Ravine du Sud est évoluée significativement par rapport à celle en amont, plus particulièrement les surfaces urbanisées.

4.2.2 Impacte de l'évolution de l'OCS sur le Cr (2002 à 2018)

Pendant la période allant de 2002 à 2018, nous pouvons remarquer que le Cr sur l'ensemble du bassin versant est quasiment le même (tableaux 8 et 9).

Mais en aval (pente<5%) du BV ce coefficient change significativement avec la variation de l'OCS en fonction de la superficie échangée par chaque type d'occupation des sols (tableau 11). Dans la classe de l'urbanisation, un coefficient de ruissellement de 0.08 pour une superficie de 107.75 ha en 2002 est passé à 0.60 pour une superficie de 724.73 ha en 2018. Le coefficient pondéré pour la partie aval du BV de la ravine du sud a plus que doublé pendant cette période, où il est passé de 0.12 à 0.30.

Le tableau 11 montre la variation du Cr en Aval du BV de la Ravine du Sud

Tableau 11 : Variation du Cr en aval du BV en fonction des classes d'OCS

Année OCS	2002		2018		Variation	
	sup	Cr	Sup	Cr	Δ OCS (%)	Δ Cr
Urbanisation	107.75	0.0807	724.73	0.6093	12.96806	0.5286
Zone boisée	442.13	0.0102	1130.63	0.2446	14.47131	0.2344
Végétation herbacée	145.99	0.0537	177.323	0.0663	0.658576	0.0126
Espace verts	20.11	0.2098	82.272	0.25	1.306558	0.0402
Réseau de communication	58.34	0.4237	219.31	0.6565	3.383365	0.2328
Culture agricole sans couvert arborée	1024.04	0.4383	467.44	0.3373	-11.699	-0.101
Cultures agricole avec couvert arborée	707.51	0.1092	348.18	0.2578	-7.55261	0.1486
Espace ouvert	150.08	0.0829	332.55	0.2673	3.835265	0.1844
Cr pondéré	4757.69	0.1236	4757.6	0.3083		0.1846

Ce tableau montre pour la majorité des classes d'OCS le coefficient de ruissellement est augmenté en 2018 en aval du BV sauf pour la végétation non couvrante qu'il est inférieur à celui de 2002. En effet, en aval du BV de la ravine du Sud pour une pluie de même intensité, on pourrait obtenir un plus grand volume d'eau qui ruisselle en 2018 qu'en 2002.

4.3 DISCUSSION DES RESULTATS

La discussion concerne la relation entre les données exploitées et les informations obtenues, les limites et les alternatives dans l'interprétation des résultats.

4.3.1 Relation entre les résultats obtenus et les données exploitées

La mise en relation des résultats obtenus à travers cette étude et les données sur lesquelles ils s'appuient nous ont permis d'avancer ce qui suit :

- Le coefficient de ruissellement a été obtenu par l'utilisation du modèle rationnel et celui de ASCE/WEF par la mise en place d'un modèle synthétisé ;

- Le changement d'occupation du sol entre les années 2002 et 2018 a été déterminé par l'utilisation des images pléiades 2018 et l'ortho photo de 2002 du CNIGS suite à leurs segmentations et classifications sur le logiciel eCognition Developer.
- Les risques hydrologiques ont été déterminés par la superposition d'une carte de pente avec celles de l'occupation du sol de 2002 et de 2018.

4.3.2 Limites et alternatives dans l'interprétation des résultats

Notre étude a dû faire face à la difficulté de tirer certaines précisions compte tenu de la qualité des informations qui ont été mises à notre disposition :

Les différentes classes de sol utilisées dans les modèles empiriques pour évaluer le coefficient de ruissellement ne correspondent pas totalement à la typologie des classes de sol mise en place par le CNIGS. Ainsi, le coefficient de ruissellement a été estimé en faisant des combinaisons de quelques classes d'OCS en une seule classe.

- Le coefficient de ruissellement est estimé seulement en fonction de l'occupation du sol et la topographie du terrain et non avec l'intensité de la pluie et la nature du sol par manque de données (sur la nature du sol, la hauteur d'eau ruisselé et la pluviométrie journalière).
- Le niveau de vulnérabilité en aval du BV de la Ravine du Sud n'a pas pu être évalué de manière effective, car il nous faudrait du temps nécessaire à l'acquisition des données pluviométriques et cartographiques ainsi que leur manipulation pour en tirer les facteurs de l'inondation.

4.3.3 Relation entre pente, OCS et coefficient de ruissellement

L'analyse de la superposition de la carte de pente et d'OCS, permet d'observer que le boisé se trouve en plus grande quantité en amont du BV. En effet cette couverture boisée qui se trouve là où la pente est la plus forte, diminue donc l'amplification du ruissellement. À l'opposé, les zones urbanisées qui se trouvent en plus grande proportion en aval, provoquent l'imperméabilisation de ces espaces et donc, augmentent le coefficient de ruissellement malgré sa faible pente.

En somme, la forte pente peut provoquer de l'érosion des sols en amont et la faible pente et le type de couverture du sol peuvent à la base d'une inondation en aval du BV de la Ravine du Sud dans les saisons pluvieuses. D'une part, les zones agricoles agissent comme des zones tampons avec des coefficients de ruissellement relativement faibles (Il a toutefois été remarqué sur les ortho photos, des ravines dans certaines zones à forte pente du BV). D'autre part, la zone urbaine, aux sols imperméabilisés, accélère le processus du ruissellement.

5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La perturbation de l'espace est tout à fait évidente à l'intérieur du bassin versant de la Ravine du Sud durant la période allant de 2002 à 2018. Ainsi, malgré l'augmentation de la couverture boisée en amont, qui assure une bonne infiltration dans cette partie du bassin, l'expansion urbaine en aval ne laisse aucun doute quant aux éventuels risques hydrologiques.

Toutefois, en amont du BV, les risques de ruissellement ne sont pas tout à fait écartés comme l'invite à penser la quasi-constance de la couverture végétale, et ceci en raison de la topographie dans cette partie du BV (zone de forte pente). De ce fait, l'érosion hydrique n'est pas négligeable en amont du BV de la Ravine du Sud comme on peut le remarquer dans les ortho photos des images pléiades 2018. L'aggravation du ruissellement de surface en aval du BV est très remarquable en raison de l'augmentation du coefficient de ruissellement de 2002 à 2018. Par contre, avec la faible pente en aval il se pourrait qu'il y ait une infiltration très significative, mais malheureusement, le revêtement de la surface par le réseau routier et l'urbanisation entraîne inéluctablement une diminution du taux d'infiltration de l'eau de pluie pour l'alimentation des nappes phréatiques. Pour toutes ces raisons, il va sans dire que le phénomène d'inondation pourrait être très fréquent au niveau du BV de la Ravine du Sud, principalement en aval du bassin.

En Somme, la cartographie de l'occupation du sol à partir d'une analyse diachronique permet de prévoir les effets hydrologiques de l'évolution de l'utilisation du sol au niveau d'un bassin versant sans se rendre sur le terrain, par conséquent les risques d'inondation en aval du bassin versant. Toutefois la validité du modèle que nous venons de tester sur le cas « La Ravine du Sud » nécessiterait une confirmation empirique basée sur des mesures ou de simples observations de terrain. L'idée serait de confirmer le lien entre le niveau de ruissellement et le type d'occupation du sol spécifique, dans le contexte local.

Quoiqu'il en soit, cette approche théorique suffit pour faire certaines recommandations devant conduire à la mise en place de plans de mitigation de ces risques hydrologiques au niveau de la Ravine du Sud (en termes d'aménagement du territoire surtout) sur le moyen et le long terme.

Par rapport aux problèmes observés sur la Ravine du Sud :

La principale recommandation serait donc la mise en place d'un plan de réaffectation (ou ré-allocation des sols) qui tienne compte des classes de pente et types d'utilisation appropriés pour réduire au mieux le ruissellement en différents points du BV, et par conséquent les phénomènes d'érosion hydrique (en amont) et d'inondation (en aval).

Tenant compte de toutes les contraintes pour maîtriser le ruissellement de l'eau pluviale dans un bassin versant par rapport à sa complexité, la carte de coefficient de ruissellement de la (figure 10) peut être une piste de solution dans la mitigation des désastres naturels au niveau du BV de la Ravine du Sud. Ainsi, dans les zones sur la carte où le Cr est supérieur à 0.75 (zones en rouges de la carte), le développement de systèmes agroforesteries en amont et la mise en place d'un bon système de drainage en aval doivent être encourager par les décideurs locaux ou les meneurs de projets.

Par rapport à la méthode appliquée :

Concernant de la validité et la généralisation de la méthode utilisée, il est nécessaire d'envisager une phase expérimentale dans le but de confirmer les valeurs obtenues en vue de calibrer la méthode. En effet, dans le contexte de la Ravine du Sud, on estime de manière globale le coefficient de ruissellement paraît légèrement sous-estimé par rapport à ce qu'on sait de la réalité hydrologique de la majorité des BV en Haïti. Cela peut être dû soit à un problème de calibration du modèle ou encore à un manque de précision des données utilisées à l'entrée. Par exemple, utiliser un MNT (pente) à 1 mètre de résolution au lieu de 30 mètres pourrait faire toute la différence, tout comme une couche d'OCS déjà validée et plus précise. Quoi qu'il en soit il est nécessaire d'affiner le modèle si on veut pourvoir la généralisé et avoir des résultats plus réalistes.

De plus, pour une analyse diachronique plus pertinente, il faut une conformité de résolution des données d'une année à l'autre.

6 BIBLIOGRAPHIE

- 1) (A. Colmar & al 2006) *étude de sensibilité sur le département de l'Hérault* J.F. Desprats, A. Bourguignon, O. Cerdan ;
- 2) ASCE & WPCF (1969). *Design and construction of sanitary and storm sewers. American society of civil engineers, Water pollution control federation;*
- 3) Beven, K. J.; Woods, E. F.; Sivapalan M. (1988): *On hydrological heterogeneity, Catchment morphology and catchment response, Journal of Hydrology*, vol.100, issue.1-3, pp.353-375, 1988;
- 4) (CERTU, 2016) : *Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (Les collectivités locales et le ruissellement pluvial de France ;*
- 5) American Society of Civil Engineers and Water Environment Federation (ASCE/WEF) (1992). *Design and construction of stormwater management systems, Manuel de pratique, New York;*
- 6) Bennis. (2003). *Hydraulique et hydrologie*. Montréal : École de technologie supérieure 370 pages ;
- 7) BERNADOTTE Guy, 2006 : *la méthode rationnelle généralisée : analyse de sensibilité et performance du modèle ;*
- 8) Grimaldi, S., Petroselli, A. (2015). *Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins;*
- 9) Julien V. 2007. *Proposition d'indicateurs de performance environnementale pour un projet de réserve de biosphère en Haïti*. Essai présenté en vue de l'obtention du grade de maitre en environnement. Centre Universitaire de Formation en Environnement. Sherbrooke.Quebec. Canada.102 p
- 10) Merot P. (1988) : Les zones de sources à surface variable et la question de leur localisation. *Hydrologie Continentale*, 105-115. ISSN 0246-1528 ;
- 11) Ministère de l'environnement (MDE). 1999. *Plan d'Action pour l'Environnement (PAE)*. Port-au-Prince.
- 12) Michel LE QUENTREC, Jean-Louis RAVARD, Pierre VERDEAUX : *Le ruissellement urbain et les inondations soudaines ;*
- 13) Ministère des Transports du Québec (MTQ) (1995). *Manuel de conception des ponceaux, Service de l'hydraulique, Québec ;*

- 14) Ministère Du Tourisme (MDT), (2007). Bureau d'Aménagement Touristique Sud, *Révision du plan Directeur Tourisme*, 196 page ;
- 15) MPCE : Ministère de la Planification et de la Coopération Externe, direction départementale du sud : *éléments de problématique départementale du sud* ;
- 16) Ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des parcs et le Ministère des affaires municipales, des régions et de l'occupation du territoire (MDDEFP & MAMROT) (2014). *Guide de gestion des eaux pluviales.*;
- 17) Pilgrim. D.H., Cordery, I. (1993): Flood runoff. In Maidment, D.T. *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New-York, USA ;
- 18) Pelt J. M. 2005. *Nouveau tour du monde d'un écologiste*, Fayard, 273p.
- 19) USDA-NRCS (2009). Hydrologic Soil Groups ;
- 20) Valbrun O. 2007. *Diagnostic du bassin versant de la Rivière Canari (Ouanaminthe) et propositions en vue de l'élaboration d'un plan d'aménagement*. Mémoire d'Ingenieur-Agronome.FAMV.UEH.Damien. Haiti.76p
- 21) VITAL Sainfort, 2017 : *Diagnostic de la dégradation du micro bassin versant de Fort Royal dans la commune de Petit-Goâve) en vue de l'élaboration d'un plan d'aménagement*. Mémoire d'Ingenieur-Agronome.FAMV.UEH.Damien. Haiti.108p
- 22) *Zonage des eaux pluviales*, 2012 : Article L.2224-10 du code général des collectivités territoriales ;