

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL DE 2002 À 2010  
ET RISQUES HYDROLOGIQUES  
CAS DU VERSANT NORD DU MORNE L'HÔPITAL  
(PORT-AU-PRINCE, HAÏTI)

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR  
MICANORD EXILIEN

NOVEMBRE 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

*Dédicaces*

*Spécialement :*

*À Dieu qui m'a tout donné*

*À la mémoire de ma sœur aînée regrettée Monique E. JOSEPH,  
ayant succombé lors du séisme du 12 janvier 2010 à Port-au-Prince*

*À la mémoire de mon ami et compère regretté Michelet CÉTOUTE,  
ayant également succombé lors du séisme du 12 janvier 2010 à Port-au-Prince*

*À ma tante et marraine Marcelle M. FÉNÉLON, ainsi que sa famille*

*À mes sœurs : Marie Nicaise EXILIEN et Marie-Grâce EXILIEN*

*À mon frère, Romual EXILIEN*

*À mon père, Méliquez EXILIEN*

*À mon beau-frère, Jean-Claude JOSEPH.*

## REMERCIEMENTS

La réalisation de cette étude a été rendue possible grâce aux soutiens techniques et financiers du Programme Canadien des Bourses de la Francophonie (PCBF) et de l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI).

Mes expressions de gratitude s'adressent particulièrement :

- À Monsieur Mohamed BERRAJA et Monsieur Claude CODJIA, respectivement directeur et codirecteur de recherche, pour leur encadrement durant cette étude ;
- À Monsieur Carlo PRÉVIL, pour ses précieux conseils et ses encouragements ;
- Au personnel du Programme Canadien des Bourses de la Francophonie, spécialement la gestionnaire Madame Jeanne GALLAGHER ;
- À Monsieur Boby E. PIARD, responsable du Centre National de l'Information Géospatiale (CNIGS) d'Haïti ;
- À Monsieur Wilfried JONGERIUS du groupement LGL SA/SNC-Lavalin en Haïti ;
- Aux Frères de l'Instruction Chrétienne (FIC) en Haïti ;
- À Monsieur Gérald JEAN-BAPTISTE et Monsieur Gary DOLISCAR du Comité Interministériel d'Aménagement du Territoire (CIAT) d'Haïti, pour la disponibilité des supports logistiques lors de la collecte de données sur le terrain d'étude ;
- À Monsieur Gérard NOZINE de l'Organisme de Surveillance et d'Aménagement du Morne l'Hôpital (OSAMH) d'Haïti, pour l'accompagnement et les supports techniques lors des visites de terrain ;
- Aux révérends Jean Jacques SAINT-LOUIS et Ciné SYRIAQUE des Pères Montfortains en Haïti, pour l'hospitalité lors du séjour de collecte des données sur le terrain d'étude ;
- À Monsieur Jean Renaud PIERRE-LOUIS, pour ses supports pendant toute la durée de l'étude.

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES .....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xiii
RÉSUMÉ .....	xiv
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I	
CONDITIONS NATURELLES ET ANTHROPIQUES.....	5
Introduction.....	5
1.1. Les conditions naturelles du terrain de recherche .....	5
1.1.1. Localisation du versant nord.....	5
1.1.2. Aspects climatiques du milieu .....	6
1.1.2.1. Pluviométrie.....	7
1.1.2.2. Précipitations intenses.....	7
1.1.2.3. Température .....	8
1.1.2.4. Humidité relative.....	8
1.1.2.5. Évapotranspiration de référence.....	9
1.1.3. Aspects géomorphologiques du bassin versant.....	10
1.1.3.1. Formation de surface.....	10
1.1.3.1. Morpho tectonique .....	10
1.1.3.1. Caractéristiques hydrogéologiques .....	11
1.2. Les aspects anthropiques du milieu .....	13
1.2.1. Évolution de la population .....	13

1.2.2.	Utilisation de l'espace.....	13
1.2.3.	Exploitation d'eau de boisson.....	14
1.2.4.	Aménagement et mesures de protection.....	15
	Conclusion.....	15

## CHAPITRE II

	MÉTHODOLOGIE.....	16
	Introduction.....	16
2.1.	Méthodes utilisées.....	16
2.1.1.	Échelles de temps et de lieu.....	16
2.1.2.	Moyens d'investigation.....	17
2.2.	Étude du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne.....	20
2.2.1.	Données et matériels utilisés.....	20
2.2.2.	Détermination des caractéristiques morphométriques et hydrographiques.....	20
2.3.	Évaluation des ressources hydrologiques du bassin.....	21
2.3.1.	Données exploitées.....	21
2.3.2.	Analyse fréquentielle des données pluviométriques.....	21
2.3.2.1.	Calcul des valeurs caractéristiques des échantillons.....	22
2.3.2.2.	Tests d'hypothèse.....	22
2.3.2.3.	Test d'ajustement des lois de probabilité.....	22
2.3.2.4.	Test d'adéquation du Chi-deux.....	22
2.3.2.5.	Comparaison du degré d'ajustement des lois.....	23
2.3.2.6.	Détermination du nombre optimal de pluviomètres.....	23
2.3.3.	Calcul du bilan hydrique annuel.....	23
2.3.4.	Calcul de la lame d'eau maximale.....	23
2.3.5.	Calcul des pertes de sol théoriques.....	23
2.4.	Détermination de l'évolution d'occupation du sol.....	24
2.1.1.	Données et matériels utilisés.....	24
2.1.2.	Obtention d'images exploitables.....	24
2.1.2.1.	Capture d'images à l'écran de visualisation.....	24
2.1.2.2.	Correction géométrique et mosaïquage.....	26

2.1.2.3.	Rééchantillonnage des mosaïques.....	27
2.1.2.4.	Zonage de l'image de chaque période.....	27
2.1.3.	Cartographie de l'occupation du sol en 2002 et 2010.....	28
2.1.4.	Détermination des changements d'occupation du sol.....	28
2.5.	Évaluation des risques hydrologiques.....	29
2.5.1.	Données et matériels utilisés.....	29
2.5.2.	Détermination des aléas hydrologiques.....	29
2.5.3.	Géographie des risques hydrologiques.....	30
	Conclusion.....	31
CHAPITRE III		
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....		
	Introduction.....	32
3.1.	Présentation des résultats.....	32
3.1.1.	Les caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin.....	32
3.1.1.1.	Caractéristiques géométriques.....	32
3.1.1.2.	Altitudes caractéristiques.....	36
3.1.1.3.	Caractéristiques orographiques.....	37
3.1.1.4.	Réseau hydrographique.....	40
3.1.1.5.	Synthèse des caractéristiques du bassin.....	42
3.1.2.	Ressources hydrologiques du bassin versant.....	43
3.1.2.1.	Pluviométrie du bassin.....	43
3.1.2.2.	Hydrologie du bassin.....	56
3.1.2.3.	Les pertes en sols potentielles.....	59
3.1.3.	Évolution de l'occupation du sol.....	60
3.1.3.1.	Modes d'occupation du sol en 2002 et 2010.....	60
3.1.3.2.	Les changements d'occupation du sol entre 2002 et 2010.....	62
3.1.4.	Les risques hydrologiques du bassin versant.....	65
3.1.4.1.	Risques d'érosion superficielle.....	65
3.1.4.2.	Risques de glissement de terrain.....	66
3.1.4.3.	Risques d'inondation.....	67

3.1.4.4. Risques de contamination d'eau .....	68
4.1 Discussion des résultats .....	70
4.1.1 Relation entre les résultats obtenus et les données exploitées .....	70
4.1.2 Limites et alternatives dans l'interprétation des résultats .....	70
4.1.3 Comparaison des résultats.....	71
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	73
APPENDICE A	
DONNÉES CLIMATIQUES ET TRAITEMENTS INTERMÉDIAIRES.....	75
APPENDICE B	
ÉTAPES ET PRODUITS DE LA CLASSIFICATION DES IMAGES.....	83
APPENDICE C	
IMAGES DES CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE PORT-AU-PRINCE .....	86
APPENDICES D	
COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT ET DÉNIVELÉE SPÉCIFIQUE.....	91
BIBLIOGRAPHIE.....	92

## LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 1.1 Localisation du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne. ....	6
Figure 1.2 Température mensuelle moyenne de 1961 à 1990. ....	8
Figure 1.3 Humidité relative mensuelle moyenne de 1961 à 1990. ....	9
Figure 1.4 Évapotranspiration de référence moyenne de 1961 à 1990. ....	9
Figure 1.5 Description géologique du bassin versant de la Bois-de-Chêne. ....	10
Figure 1.6 Les classes hydrogéologiques et les sources captées dans le bassin. ....	12
Figure 2.1 Schéma de la démarche méthodologique du travail de recherche. ....	19
Figure 3.1 Le réseau hydrographique de la ravine Bois-de-Chêne. ....	33
Figure 3.2 Rectangle équivalent du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne. ....	34
Figure 3.3 Courbe hypsométrique du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne. ....	35
Figure 3.4 Les classes de pentes du bassin versant de Bois-de-Chêne. ....	39
Figure 3.5 Profil en longueur de la ravine Bois-de-Chêne. ....	41
Figure 3.6 La série temporelle de la pluie totale en fonction de l'année. ....	43
Figure 3.7 La hauteur totale annuelle de pluie observée par ordre croissant. ....	44
Figure 3.8 Le graphique de l'ajustement des lois à la pluie totale annuelle. ....	47

Figure 3.9 Les séries temporelles de la pluie maximale de Juvénat et du Centre-ville.....	49
Figure 3.10 Les valeurs maximales des pluies annuelles observées pour les deux stations. .	50
Figure 3.11a Ajustement des lois à la pluie maximale annuelle de Juvénat. ....	53
Figure 3.11b Ajustement des lois à la pluie maximale annuelle du Centre-ville.....	54
Figure 3.12 La pluie et la variation d'eau mensuelles du bassin versant. ....	57
Figure 3.13 Occupation du sol de 2002 du bassin versant.....	61
Figure 3.14 Occupation du sol de 2010 du bassin versant.....	62
Figure 3.15 Variation des classes d'occupation du sol entre 2002 et 2010. ....	63
Figure 3.16 Carte des risques d'érosion hydrique du bassin versant. ....	65
Figure 3.17 Carte des risques de mouvement en masse de sols du bassin.....	67
Figure 3.18 Carte des zones à risques d'inondation en aval du bassin versant.....	68
Figure 3.19 Carte des facteurs de risques de contamination de l'eau souterraine.....	69

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau 1.1 Les récents ouragans qui ont frappé la région de Port-au-Prince.....	8
Tableau 1.2 La caractérisation des sources captées dans le bassin .....	13
Tableau 1.3 Utilisation du sol du versant nord du Morne l'Hôpital en 2002.....	14
Tableau 1.4 Les sources captées par la CAMEP sur le versant nord du Morne l'Hôpital ....	14
Tableau 2.1 Tableau des concepts de base, des variables et des indicateurs de l'étude.....	18
Tableau 3.1 Les valeurs des classes de superficie en fonction de l'élévation.....	36
Tableau 3.2 Caractéristiques physiographiques du bassin versant de Bois-de-Chêne.....	42
Tableau 3.3 Les valeurs caractéristiques de la pluie totale annuelle.....	44
Tableau 3.4 Les statistiques des tests d'hypothèse pour la pluie totale annuelle.....	45
Tableau 3.5 Les paramètres des lois ajustées à la pluie totale annuelle.....	46
Tableau 3.6 Valeurs de Chi-deux pour les lois ajustées à la pluie totale annuelle.....	47
Tableau 3.7 Comparaison des critères BIC et AIC pour la pluie totale annuelle .....	48
Tableau 3.8 Les valeurs caractéristiques des pluies maximales annuelles .....	51
Tableau 3.9 Les statistiques des tests d'hypothèse pour les pluies maximales annuelles.....	51
Tableau 3.10 Les paramètres des lois ajustées aux pluies maximales annuelles .....	53

Tableau 3.11	Valeurs de Chi-deux pour les lois ajustées aux pluies maximales annuelles ..	54
Tableau 3.12	Les critères BIC et AIC pour la pluie maximale de Juvénat .....	55
Tableau 3.13	Les critères BIC et AIC pour la pluie maximale du Centre-ville .....	55
Tableau 3.14	Optimisation du réseau pluviométrique .....	57
Tableau 3.15	Lames d'eau théoriques en fonction des pluies maximales annuelles .....	58
Tableau 3.16	Érosion hydrique moyenne annuelle du bassin versant.....	59
Tableau 3.17	Variation des classes d'occupation du sol entre 2002et 2010 .....	63
Tableau 3.18	Effets de l'occupation du sol sur la végétation en 2010.....	64
Tableau 3.19	Effets de l'occupation du sol sur le périmètre interdit des sources .....	64

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

AIC	Akaike Information Criterion
BIC	Baysian Information Criterion
CAMEP	Centrale Autonome Métropolitaine d'Eau Potable
CGIAR-CSI	Consultative Group for international Agriculture - Consortium for Spatial Information
CNIGS	Centre National de l'Information Géo-Spatiale
DGACTA	Direction Générale de l'Aménagement et la Conservation des Terres Agricoles
DINEPA	Direction Nationale de l'Eau Potable
ETP	Évapotranspiration potentielle
EV	Extrem Values
FAMV	Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIC	Frères de l'Instruction Chrétienne
HYFRAN	Hydrological Frequency Analysis
IHSI	Institut Haïtien de Statistique et d'Informatique
MTPTC	Ministère des Travaux Publics du Transport et de la Communication
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ORSTOM	Office de Recherche Scientifique d'Outre-mer
OSAMH	Organisme de Surveillance et d'Aménagement du Morne l'Hôpital
SAM	Sundy Averages Method
UTM	Univeral Transverse Mercator
WGS	World Geodesic System
ZIC	Zone Intertropicale de Convergence

## RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel où les intempéries tropicales sont devenues de plus en plus fréquentes et agressives, les constats sur l'état environnemental du versant nord du Morne l'Hôpital à Port-au-Prince nous pousse à y effectuer le présent travail de recherche sur d'éventuels risques hydrologiques pouvant y avoir lieu.

Après la description des conditions naturelles et sociales du milieu, nous procédons à une étude particulière du bassin versant de l'une de ses plus importantes ravines, soit Bois-de-Chêne. Cette particularité, nécessitant l'application de certaines méthodes dont celles d'hydrologie statistique et de classification d'images, consiste à la détermination des caractéristiques morphométriques et hydrographiques, à l'évaluation des ressources hydrologiques, à la détermination du changement d'occupation sol entre les années 2002 et 2010, et aussi à l'évaluation des risques hydrologiques.

Suivant les résultats obtenus à propos du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, le bilan hydrique présente des périodes de déficit et de surplus d'humidité en alternance suivant le mois ; entre les années 2002 et 2010, un gain de la proportion de l'espace imperméabilisé de 4,25 % et un retrait de celle de la végétation de 4,77 % ; et les niveaux des aléas hydrologiques combinés à la présence d'une forte population sont favorables à d'éventuels risques hydrologiques. Ainsi, les risques d'érosion superficielle y sont à un niveau moyen au nord, ceux d'érosion en masse y sont élevés surtout suivant la direction SO-NE, ceux des inondations y sont plus évidents à l'embouchure de la ravine et ceux de contamination d'eau y sont élevés surtout à la proximité des sources captées et sur les karsts.

**Mots-clés** : Occupation du sol, bassin versant, hydrographie, hydrologie, risques hydrologiques, érosion, inondation, contamination d'eau, Morne l'Hôpital, Port-au-Prince.

## INTRODUCTION

### 1. Mise en contexte

Le centre-ville de Port-au-Prince, la capitale de la République d'Haïti, n'offre pas à ses résidents un espace de vie agréable ; « après chaque averse, les rues de certains quartiers sont devenues impraticables aux usagers à cause des tas de gravats, de boue et d'ordures se trouvant sur leur passage » (Victor, 2005). Ces entraves à la circulation lors des saisons pluvieuses ont permis de pointer du doigt le versant nord du Morne l'Hôpital qui a fait l'objet d'une urbanisation récente et d'où a pris naissance la ravine Bois-de-Chêne serpentant les quartiers résidentiels (David et al., 1999). Cette situation, qui va en s'empirant par l'expansion des bidonvilles vers le sommet en grignotant le vert et en mettant la roche à nue (Victor, *loc.cit.*), avait toujours attiré l'attention de beaucoup de chercheurs dans les domaines de la géographie et de l'environnement. C'est ainsi que R. Odile (1985) avait effectué une analyse socio-spatiale de cette région en vue d'y mettre en évidence la question foncière urbaine.

### 2. Problématique

Se situant dans la Caraïbe, Haïti, ainsi que Port-au-Prince qui est une ville côtière, fait partie des territoires les plus exposés à des cyclones tropicaux (Lestuzzi, 2010). Ces derniers provoquent de fortes précipitations et l'agitation de la masse d'eau marine lors de leur passage (Michel, 2004). Selon T. Turgeon (2009), plusieurs scientifiques ont estimé une progression de l'intensité et de la fréquence de ces phénomènes météorologiques en raison des changements climatiques. Cette similarité entre l'évolution des phénomènes anthropiques sur le versant nord du Morne l'Hôpital et celle des conditions météorologiques régionales a

suscité notre curiosité à se pencher sur d'éventuels risques<sup>1</sup>, ou encore des événements catastrophiques pouvant en découler. Ainsi, il est devenu pertinent d'analyser l'hydrographie<sup>2</sup> et l'hydrologie<sup>3</sup> du versant en fonction de ses conditions physiques, ainsi que la dynamique de l'occupation du sol<sup>4</sup> y évoluant. De plus, c'est une première sur le plan scientifique ; aucune étude précédente n'a pu aborder le problème sous cet angle.

Afin d'apporter des éléments de réponse nous permettant de nous prononcer sur ces éventuels risques, qui sont particulièrement hydrologiques, nous nous sommes proposés de poursuivre les objectifs suivants :

- a) Déterminer les caractéristiques morphométriques et hydrographiques du versant nord du Morne l'Hôpital.
- b) Évaluer les ressources hydrologiques à travers de sa pluviométrie, son hydrologie et ses pertes de sol.
- c) Déterminer les modes d'occupation du sol des années 2002 et 2010 afin d'en saisir la dynamique.
- d) Mettre en relation l'hydrographie, l'hydrologie et le type d'occupation du sol de 2010 du versant afin d'y évaluer les risques d'érosion, d'inondation et de contamination de l'eau souterraine.

---

<sup>1</sup> Le risque est un concept reposant sur deux notions : l'aléa qui représente le phénomène physique par son amplitude et sa période de retour, et la vulnérabilité qui représente l'ensemble des biens et des personnes pouvant être touchés par un phénomène naturel (Manche, 1999).

<sup>2</sup> L'hydrographie est l'application au traitement de l'étude et de mesures relatives aux plans et aux cours d'eau (Association française de normalisation, 2007).

<sup>3</sup> L'hydrologie fait référence, dans ce cas, à la disponibilité en eau, ainsi que sa répartition (Llamas, 1993).

<sup>4</sup> L'occupation du sol est la répartition des implantations d'activités humaines et de résidences dans un espace donné (George et Verger, 2006 ; Houle, 2009).

### 3. Cadre opératoire

Cette étude, ayant pour but d'étudier l'évolution de l'occupation sol entre 2002 et 2010 et les risques hydrologiques sur le versant nord du Morne l'Hôpital à Port-au-Prince, comprend cinq chapitres.

Le premier chapitre traite les aspects généraux du milieu d'étude comme les conditions naturelles et les contraintes anthropiques. Les conditions naturelles concernent la description du milieu physique et les caractéristiques de ces différentes composantes climatiques et géomorphologiques. Les aspects anthropiques, par contre, concernent l'usage et les modifications du milieu.

Le deuxième chapitre présente la méthodologie utilisée pour effectuer ce travail de recherche. Ainsi, elle comprend la présentation des données qui sont mises à notre disposition et les méthodes utilisées. Ces dernières concernent : 1) les caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant<sup>5</sup> de la ravine Bois-de-Chêne par la description et la mesure des formes de son relief ; 2) les ressources en eau du bassin versant, par l'analyse fréquentielle des précipitations, afin de dresser le bilan hydrique annuel, la lame d'eau maximale et les pertes de sol annuelles ; 3) le changement d'occupation du sol suite à la variation de la proportion de différentes classes d'occupation entre 2002 et 2010, par l'application des procédés de classification et de traitements et ; 4) la détermination des aléas liés à l'érosion<sup>6</sup>, l'inondation<sup>7</sup> et la contamination de l'eau souterraine<sup>8</sup> en fonction de l'hydrographie, de l'hydrologie et du type d'occupation du sol en 2010 pour enfin évaluer les risques hydrologiques par rapport à la vulnérabilité de la population.

---

<sup>5</sup> C'est la région dans laquelle toutes les eaux de précipitation se dirigent vers la ravine. Les lignes de partage le séparant des autres bassins adjacents forment ses limites (Moureau et Brace, 2000).

<sup>6</sup> C'est un processus naturel qui abaisse toutes les montagnes, mais en même temps, qui engraisse les vallées (FAO, 1994).

<sup>7</sup> C'est l'écoulement d'une masse liquide ou semi-liquide relativement grande ou l'envahissement par les eaux d'une zone qui n'est pas normalement submergée (Manche, *op. cit.*).

<sup>8</sup> C'est l'envahissement de l'eau souterraine par des germes pathogènes (Auzou, 2000).

Le troisième chapitre aborde, d'une part, les résultats obtenus suite au traitement des informations suivant les méthodes citées précédemment. Ces résultats concernent les caractéristiques hydrographiques du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, ses ressources en eau, le changement d'occupation du sol entre les deux périodes et les risques hydrologiques. D'autre part, il présente la discussion sur la corrélation entre les données utilisées et les résultats obtenus, ainsi que les limites et la comparaison des résultats avec d'autres études semblables.

Et en fin de compte, une partie est réservée à la conclusion du travail. Celle-ci est suivie des annexes, soit les appendices et les références bibliographiques.

## CHAPITRE I

### CONDITIONS NATURELLES ET ANTHROPIQUES.

#### Introduction

Les conditions naturelles du milieu d'étude impliquent les aspects géomorphologiques et climatiques. Les aspects anthropiques concernent les usages du milieu et l'exploitation de ses ressources naturelles.

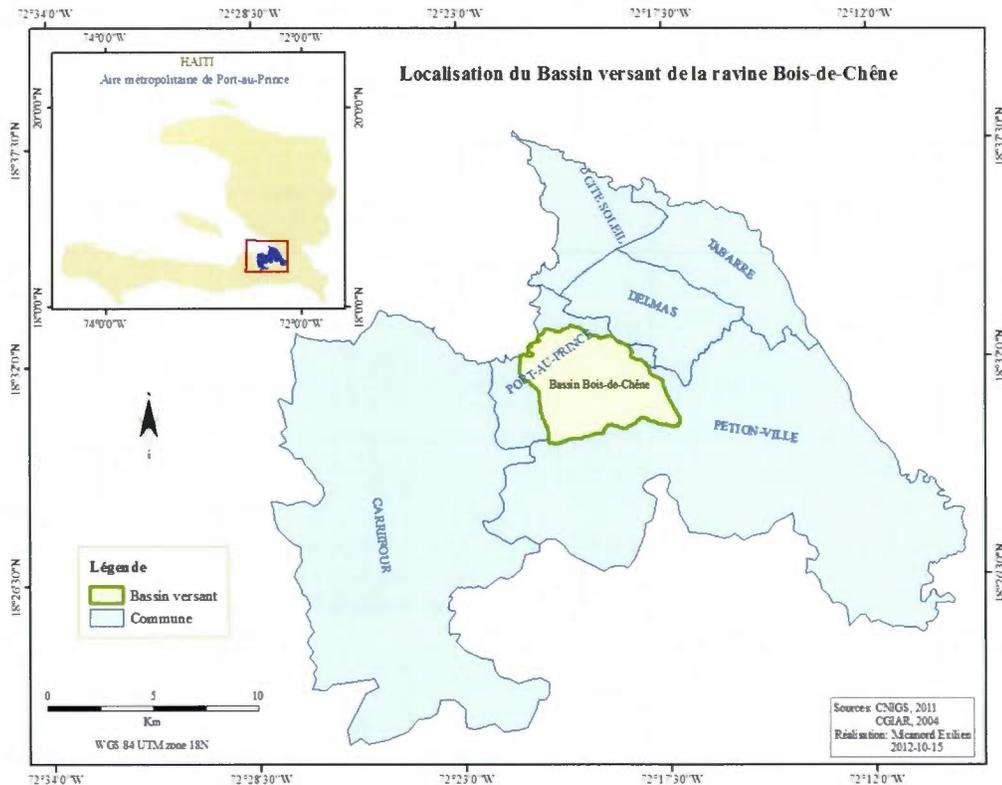
#### 1.1. Les conditions naturelles du terrain de recherche

##### 1.1.1. Localisation du versant nord

Sur le plan administratif, le Morne l'Hôpital appartient à l'arrondissement de Port-au-Prince, dans le département de l'Ouest en Haïti, et plus précisément au cœur de l'« Aire métropolitaine<sup>9</sup> ». Se trouvant au sud de la ville de Port-au-Prince suivant la direction nord-est, son versant nord donne naissance à une vingtaine de ravines dont les plus importantes sont les affluents de la ravine Bois-de-Chêne (David et al, 1999). Notre étude s'intéresse surtout au bassin versant de cette dernière se situant entre 18° 26' 00" et 18° 33' 00" de latitude nord, et 72° 16' 45" et 72° 21' 30" de longitude ouest avec une superficie de 25.9 km<sup>2</sup> (fig. 1.1).

---

<sup>9</sup> L'Aire Métropolitaine comprend les villes de Port-au-Prince, de Delmas, de Cité Soleil, de Tabarre, de Carrefour et de Pétion-Ville (IHSI, 2009).



**Figure 1.1** Localisation du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne.

### 1.1.2. Aspects climatiques du milieu

En Haïti, pays semi-tropical aux climats extrêmement variés, la longueur du jour varie de 10 h 54 mn à 13 h 12 mn à la 19° de latitude nord (FAMV, 1990). Ainsi, comme tout le reste du territoire national, cette longueur est beaucoup moins perturbée dans la région métropolitaine de Port-au-Prince que dans les régions tempérées. Selon les aspects climatiques de cette région, le versant nord du Morne l'Hôpital, s'y trouvant, peut être classé dans la zone dominée par les climats tropicaux pluvieux dans lesquels la température moyenne du mois le moins chaud est supérieure à 18°C, et plus précisément dans celui à saison sèche et saison humide (Fournier, 1960).

### 1.1.2.1. Pluviométrie

Port-au-Prince se trouve dans une région climatique ayant une distribution classique de quatre saisons cumulant en moyenne 1250 mm de pluie par an. Ainsi, le versant nord du Morne l'Hôpital est sous l'influence d'un régime pluviométrique bimodal où les saisons humides correspondent approximativement aux passages de soleil au zénith, soit le 13 mai et le 30 juillet (FAMV, *op. cit.*, p. 29). Ainsi pour cette région, on a :

- La grande saison de faible pluviométrie qui, du mois de novembre au mois de mars, correspond à la Zone Intertropicale de Convergence (ZIC) étant dans l'hémisphère sud ;
- La première saison pluvieuse du mois d'avril à la mi-juin correspondant au passage du soleil au zénith ;
- La petite saison de faible pluviométrie centrée sur le mois de juillet ; la ZIC remonte vers le nord jusqu'au tropique du Cancer ;
- La seconde saison pluvieuse qui s'étale entre août et octobre, correspondant au retour de la ZIC vers l'équateur.

### 1.1.2.2. Précipitations intenses

Comme l'ensemble du bassin de la Caraïbe, Haïti est principalement soumis à des ondes et des perturbations tropicales au cours de la saison des pluies et plus particulièrement au cours de la saison cyclonique. Ces perturbations sont parfois influencées par la ZIC, et véhiculées d'est en ouest par les alizés et les ondes tropicales (Haïti, 2010).

À une basse pression, elles peuvent évoluer vers une cyclogenèse tropicale et donner naissance à des systèmes cycloniques générateurs d'abondantes précipitations et de vent intenses (*Ibid.*). Au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, Haïti a connu les passages de beaucoup d'ouragans tropicaux dont quatre ont frappé de façon considérable les régions de Port-au-Prince (*Id.*, 2003, *Présentation synthétique des Études de Vulnérabilité et d'Adaptation aux Conditions climatiques extrêmes en Haïti et dans la Caraïbe*). Ces quatre cyclones sont : *Hazel* en 1954, *Inez* en 1966, *Gordon* en 1994 et *Georges* en 1998 (tabl. 1.1).

**Tableau 1.1**  
Les récents ouragans qui ont frappé la région de Port-au-Prince

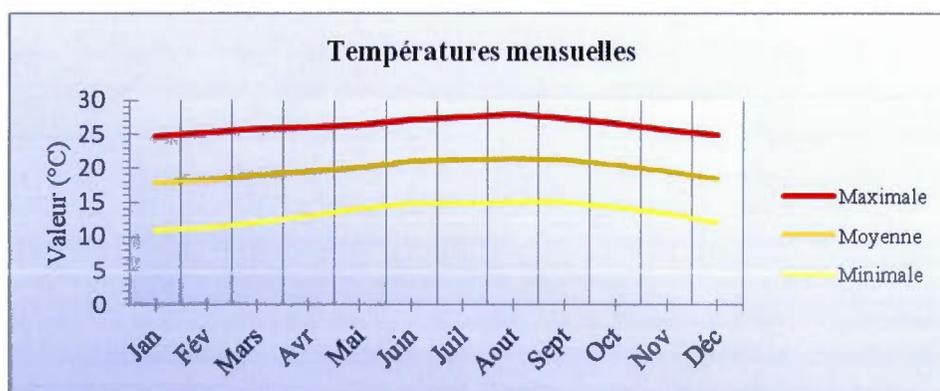
Ouragan	Date
Hazel	12/10/1954
Inez	29/09/1966
Gordon	13/11/1994
Georges	22/09/1998

### 1.1.2.3. Température

Août est le mois de plus chaud à Port-au-Prince avec une température moyenne de 21,4°C et la plus basse est celle du mois de janvier, soit 18°C (fig. 1.2) (FAO, 2012). Selon G. Holly (1999), la température moyenne mensuelle y varie de 20°C à 35°C et décroît régulièrement pour un gradient de 0,75°C par 100 m d'élévation.

### 1.1.2.4. Humidité relative

L'humidité relative mensuelle de l'aire à Port-au-Prince connaît une variation semblable à celle de la pluviométrie moyenne mensuelle (fig. 1.3). Ses valeurs extrêmes sont de 76,3 % et 80 % respectivement durant les mois de juillet et d'octobre (FAO, *loc. cit.*).



**Figure 1.2** Température mensuelle moyenne de 1961 à 1990<sup>a</sup>.

<sup>a</sup> Valeurs de températures tirées de la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) en 2012 sur le site <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>, (voir app. A, p.74).

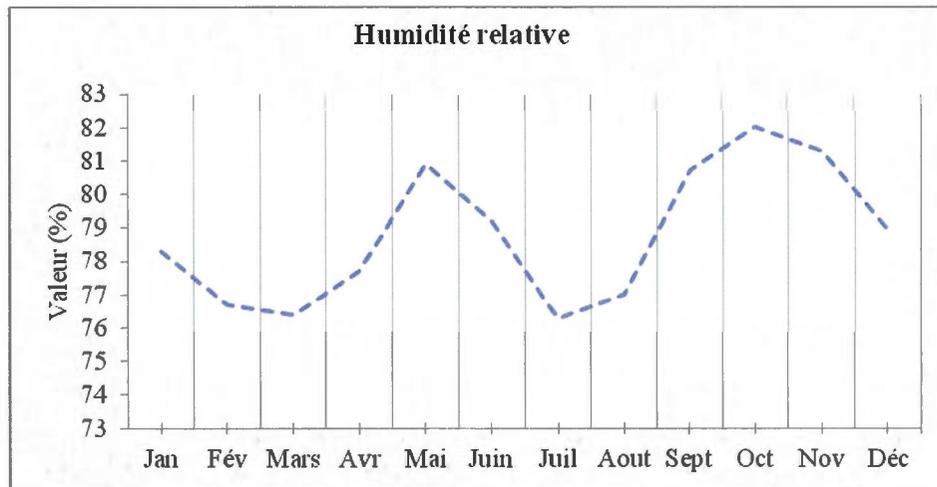


Figure 1.3 Humidité relative mensuelle moyenne de 1961 à 1990<sup>b</sup>.

#### 1.1.2.5. Évapotranspiration de référence

À Port-au-Prince la valeur mensuelle de l'évapotranspiration potentielle varie de 90 mm en décembre à 139,5 mm en juillet (fig. 1.4). Aussi appelée évapotranspiration de référence, sa valeur totale annuelle est de 1 372,3 mm (*Ibid.*).

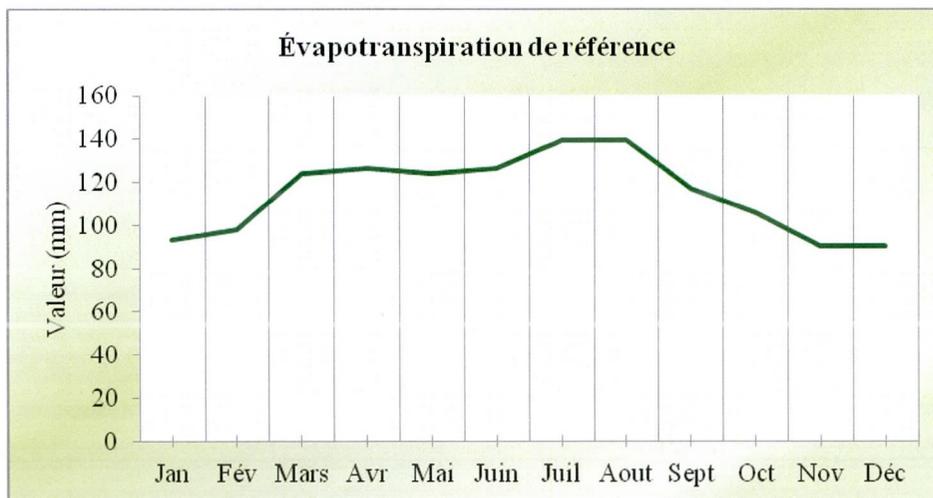


Figure 1.4 Évapotranspiration de référence moyenne de 1961 à 1990<sup>c</sup>.

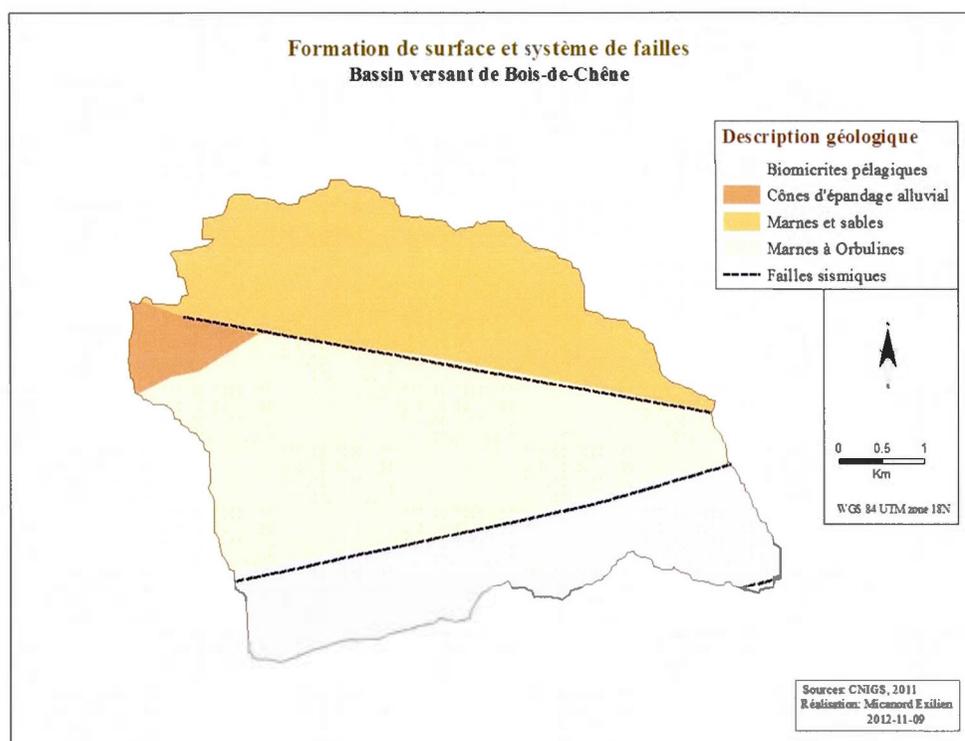
<sup>b</sup> Réfère à la note (a).

<sup>c</sup> Réfère à la note (a).

### 1.1.3. Aspects géomorphologiques du bassin versant

#### 1.1.3.1. Formation de surface

Pour le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, la formation de surface est surtout dominée par des marnes (fig. 1.5). Ainsi, on trouve des sables marneux dans sa partie nord, de marnes à orbulines en grande proportion au centre, et des biomicrites pélagiques au sud.



**Figure 1.5** Description géologique du bassin versant de la Bois-de-Chêne.

#### 1.1.3.1. Morpho tectonique

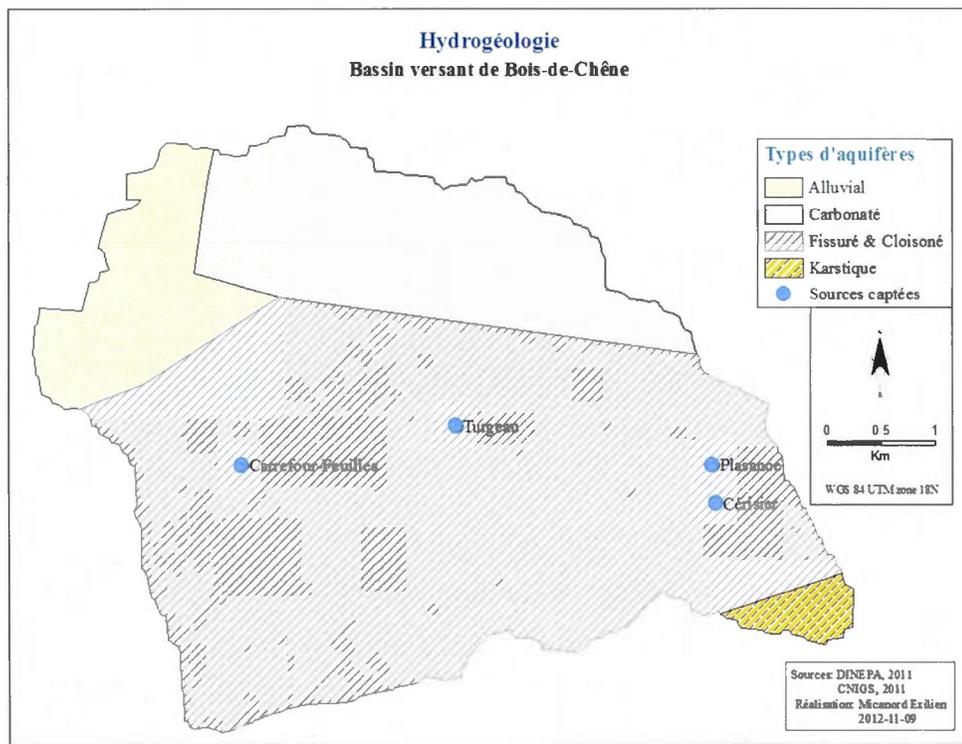
Constitué d'un massif calcaire datant de l'Éocène, le Morne l'Hôpital est l'une des formations de la septième des dix provinces morphotectoniques l'île d'Haïti (David et al., *op. cit.*).

À hauteur du Morne l'Hôpital, la région métropolitaine de Port-au-Prince est traversée par le système de failles actives *Enriquillo* qui mesure près de 250 km de long suivant la direction est-ouest (Calais, 2002). De ce dernier, trois failles traversent le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, dont l'une suivant la direction SE-NO et les deux autres, parallèles, suivant celle NE-SO (fig. 1.5). Selon Bakun et al (2010), le séisme meurtrier du 12 janvier 2010 de magnitude M7.0 sur l'échelle de Richter aurait marqué le début d'un nouveau cycle de grands séismes sur ce système. Au point de coordonnées géographiques 18° 33' 03,51" de latitude nord et 72° 19' 13,34" de longitude ouest, soit à moins de 1 km au nord du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, s'était trouvé l'épicentre du séisme de magnitude M6,6 qui avait considérablement endommagé la région de Port-au-Prince le 21 novembre 1751 (*Ibid.*).

#### **1.1.3.1. Caractéristiques hydrogéologiques**

Les grandes potentialités hydrogéologiques du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne en fonction de la capacité d'emmagasinement en eau sont représentées par plusieurs types d'aquifères dont les plus importants sont les suivants (fig. 1.6) :

- 1) Des aquifères karstiques en petite proportion dans le sud-est. Étant à la fois relief, hydrosystème et ressource en eau, le karst est un milieu particulier ; la dissolution des roches carbonatées accroît la perméabilité du massif. Il s'y produit des remobilisations de sédiments accumulés par la turbulence des écoulements, et aussi des changements du sens de flux d'échanges par l'alternance de période de basses eaux et de crues. Ainsi, l'aléa des pollutions physiques et microbiologiques y est très variable, car l'absence de filtration due à l'ouverture majeure des structures inférieures facilite le transport des métaux lourds, des bactéries et des virus lors des périodes de crue (Gilli et al., 2008).



**Figure 1.6** Les classes hydrogéologiques et les sources captées dans le bassin.

- 2) Des aquifères carbonatés fissurés et cloisonnés à productivité variée dans la plus grande proportion. Ces aquifères présentent une grande vulnérabilité et un faible emmagasinement par le fait qu'ils sont peu profonds et discontinus. Par contre, la grande variabilité de leurs flux de recharge leur permet de réguler les recharges interannuelles mieux que les eaux de surface et poser des problèmes pour l'estimation des bilans hydriques (*Ibid.*).

Ainsi, différents points d'eau comme ceux de Carrefour-Feuilles, de Turgeau, de Cerisier et de Plaisance (tabl. 1.2) y sont captés par la Centrale Autonome Métropolitaine d'Eau Potable (CAMEP)<sup>10</sup> (Haïti, 2011). Ce bassin représente aussi un lieu de collecte d'eau pour les banlieues situées au nord de la région de Port-au-Prince, car l'aquifère de la grande plaine du Cul-de-Sac est en étroite interrelation avec le versant nord du Morne l'Hôpital (Prévil, 2003).

<sup>10</sup> La CAMEP est l'ancienne dénomination de la Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (DINEPA).

**Tableau 1.2**  
La caractérisation des sources captées dans le bassin

Captage	Latitude (UTM)	Longitude (UTM)	Altitude (m)
Carrefour-Feuilles	780 930	204 98 61	190
Turgeau	782 902	205 01 89	220
Plaisance	785 308	204 98 27	267
Cerisier	785 279	204 94 86	259

## 1.2. Les aspects anthropiques du milieu

### 1.2.1. Évolution de la population

Selon le résultat du recensement général de la population et de l'habitat en 2003, la population totale de l'Aire métropolitaine était estimée à 2 041 395 habitants. De cet effectif, celle de la commune de Port-au-Prince a représenté 34.44 % pour un total de 703 023 habitants (Haïti, 2004). En 2009, les effectifs des populations de l'Aire métropolitaine et de la commune de Port-au-Prince ont augmenté et sont passés respectivement à 3 664 620 et 897 859 habitants (*Id.*, 2009). Ainsi, le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne s'est trouvé sous l'influence directe de la population de Port-au-Prince, car il s'étend sur l'ensemble de la commune du même nom. Avec une augmentation de 27.7 % en six ans, la densité moyenne de la population à l'intérieur du bassin s'est rendu en 2009 à une estimation de 34.67 hab./m<sup>2</sup>.

### 1.2.2. Utilisation de l'espace

Selon le CNIGS (2011) (*voir* app. C, p. 90), au début de la décennie 2000, le type d'utilisation du versant nord du Morne l'Hôpital a affiché un espace complètement diversifié (tabl. 1.3) : une couverture végétale dominée par des savanes avec présence d'arbres sur une proportion de 78 % ; un espace urbanisé, donc imperméabilisée avec une superficie occupant 15 %, une proportion de 4 % de sols nus et des affleurements rocheux à cause de l'agriculture sarclée et aussi du déboisement ; une proportion de 2 % laissée au pâturage lié aux pratiques d'élevage libre et, enfin, des carrières de granulats à des fins de construction sur le 1 % restant.

**Tableau 1.3**  
Utilisation du sol du versant nord du Morne l'Hôpital en 2002

Utilisation du sol	Occupation (%)
Savanes avec présence d'arbres	78
Espace urbanisé	15
Affleurement de roches et sols nus	4
Pâturage	2
Carrières	1

Parmi les principales activités exercées au niveau du versant nord du Morne l'Hôpital, l'exploitation de granulats pour la construction reste la plus pratiquée et remonte aux années 1950 et 1955 (Haïti, 2007).

### 1.2.3. Exploitation d'eau de boisson

L'exploitation des potentialités hydriques du versant nord du Morne l'Hôpital a débuté dès l'année 1920. Ainsi, des ouvrages de captage d'eau potable ont été installés par la CAMEP dans les communes de Pétion-Ville, de Port-au-Prince et de Carrefour (tabl. 1.4). Ces ouvrages ont été protégés par deux périmètres dont le premier d'un rayon moyen de 50 m est infranchissable, et le second de 150 m de rayon sert de zone de protection (Toussaint, 2011).

**Tableau 1.4**  
Les sources captées par la CAMEP sur le versant nord du Morne l'Hôpital

Commune	Sources	Année d'exploitation	Débit (l/s)
Pétion-Ville	Tête de l'eau	1943	25.2
	Cerisier-Plaisance	1920	52.5
Port-au-Prince	Turgeau	1920	22.9
	Carrefour-Feuilles	1940	38.4
	Leclerc	1920	22.0
Carrefour	Diquini	1921	44.0
	Mahotièrè	1969	109.6
	Mme Baptiste	1969	40.7

#### 1.2.4. Aménagement et mesures de protection

Dans le but de protéger la ville de Port-au-Prince contre l'écoulement des eaux pluviales venant du versant nord du Morne l'Hôpital, plusieurs activités d'aménagement y avaient été entreprises dont le « Projet de drainage des eaux pluviales de Port-au-Prince » en 1980 par le Ministère des Travaux Publics des Transports et de la Communication (MTPTC) (Haïti, 1980, *Projet de drainage des eaux pluviales de Port-au-Prince*). De plus, par le décret du 6 novembre 1986, l'Organisme de Surveillance et d'Aménagement du Morne l'Hôpital (OSAMH) fut créé en vue de protéger la ville de Port-au-Prince contre les éventuelles inondations pouvant être provoquées par l'érosion du Morne l'Hôpital (*Id.*, 1986).

#### Conclusion

Suivant la description des différents aspects naturels du versant nord du Morne l'Hôpital, au niveau duquel se trouve le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, le milieu jouit d'un climat chaud avec une alternance de saisons sèches et humides souvent sous l'influence de cyclones tropicaux, et aussi, présente une grande diversité morphogéologique caractérisée par la dominance de marnes, une forte activité tectonique et une grande potentialité hydrogéologique. Également, a fait l'objet d'une artificialisation progressive marquée par le captage des sources, l'exploitation des carrières de sables et l'expansion urbaine due à une forte augmentation de la population. Ainsi, cette dernière, se traduisant par la présence de vies et de biens, indique un niveau de vulnérabilité considérable. Alors, à travers le chapitre suivant, nous allons évaluer les aléas hydrologiques par l'application de certaines méthodes tenant compte des informations disponibles.

## **CHAPITRE II**

### **MÉTHODOLOGIE**

#### **Introduction**

Ce chapitre du travail de recherche concerne l'application de certaines méthodes qui, en fonction des matériels, des outils et des informations disponibles, ont permis d'évaluer l'hydrographie, l'hydrologie, les changements d'occupation du sol et les risques hydrologiques comme l'érosion, l'inondation et la pollution d'eau dans la zone d'étude.

#### **2.1. Méthodes utilisées**

##### **2.1.1. Échelles de temps et de lieu**

Cette étude s'intéresse à l'intervalle de temps compris entre les années 2002 et 2010 sur le versant nord du Morne l'Hôpital à Port-au-Prince en Haïti, car la disponibilité des informations utiles à l'étude spatiale du milieu est limitée à cet intervalle. Elle se focalise sur le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne. Les calculs effectués n'ont tenu compte que de ce dernier, car c'est précisément à cet endroit que les phénomènes hydrologiques se sont effectivement déroulés.

### 2.1.2. Moyens d'investigation

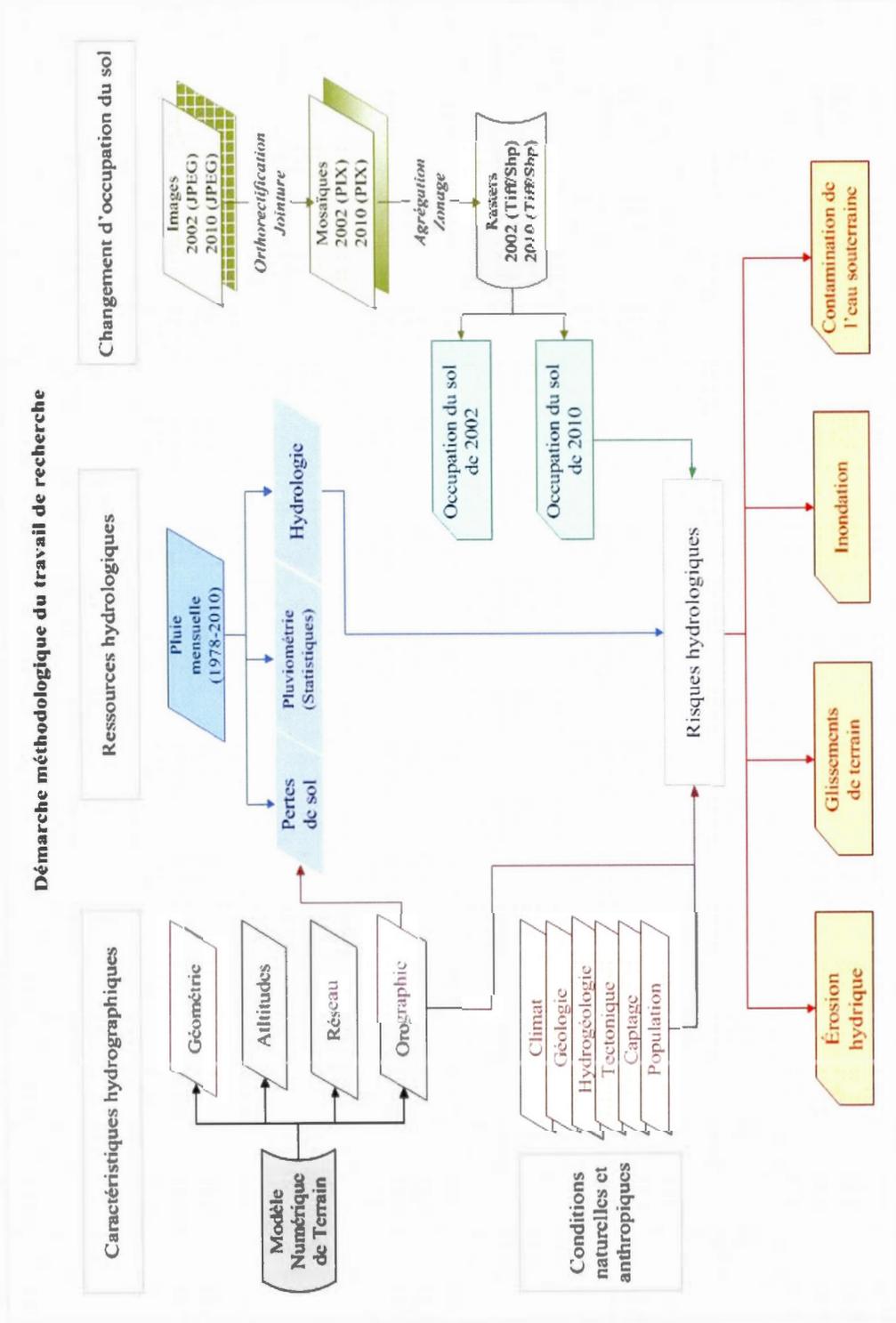
À partir des données mises à notre disposition pour effectuer la recherche, nous nous proposons d'évaluer les concepts comme « Caractéristiques hydrographiques », « Ressources hydrologiques », « Occupation du sol » et « Risques hydrologiques » (tabl. 2.1), selon la démarche suivante (fig. 2.1) :

- 1) L'étude des caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant à travers le calcul de ses caractéristiques géométriques ou dans le plan, de ses caractéristiques d'altitude, de ses caractéristiques orographiques et de son réseau hydrographique.
- 2) L'évaluation des ressources en eau du bassin par l'analyse fréquentielle de sa pluviométrie, ainsi que le calcul de son bilan hydrique, de la lame d'eau maximale et des pertes potentielles de sol.
- 3) La détermination du changement d'occupation du sol entre les deux périodes 2002 et 2010 par l'application de méthodes et techniques permettant de déduire la variation de la proportion des différentes classes d'occupation dans le bassin.
- 4) La détermination des aléas d'érosion superficielles et en masse, d'inondation et de contamination de l'eau souterraine dans le bassin versant par la combinaison des informations liées à l'hydrographie, l'hydrologie et l'occupation du sol en 2010 afin d'y évaluer les risques hydrologiques compte tenu de la présence de la population comme vulnérabilité.

Tableau 2.1

Tableau des concepts de base, des variables et des indicateurs de l'étude

Concepts	Variables	Indicateurs	
Caractéristiques hydrographiques	a) Géométrie	Superficie / longueur	
	b) Altitudes	Hauteur	
	c) Orographie	Courbe hypsométrique	
	d) Réseau	Densité de drainage	
Ressources hydrologiques	a) Pluviométrie annuelle	Hauteur	
	b) Pluviométrie maximale annuelle	Hauteur	
	e) Bilan hydrique	Hauteur	
	f) Lamme d'eau maximale	Hauteur	
	g) Pertes de sol	Volume	
Occupation du sol	a) Bois dense	Superficie	
	b) Bois clairsemé	Superficie	
	c) Agriculture-Landscaping	Superficie	
	d) Bâti	Superficie	
Risques hydrologiques	2. Érosions	Hauteur Pente / hauteurs Texture - Structure Population	
	3. Inondation	2.1. Pluviosité	Hauteur
		2.2. Facteurs orographiques	Pente / hauteurs
		2.3. Facteurs géologiques	Texture - Structure
	4. Contamination de l'eau souterraine	2.4. Vulnérabilité	Population
		3.1. Perméabilité du sol	Proportion
		3.2. Élévation marine	Hauteur
	Risques hydrologiques	3.3. Vulnérabilité	Population
		3.1. Facteurs hydrogéologiques	Type d'aquifères
		3.2. Périmètres de points de captage	Niveau d'invasion
		3.3. Vulnérabilité	Population



**Figure 2.1** Schéma de la démarche méthodologique du travail de recherche.

## 2.2. Étude du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne

Cette étude concerne la description et la mesure des formes du relief de l'espace couvert par les 25.9 km<sup>2</sup> du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne comme étant l'unité hydrographique.

### 2.2.1. Données et matériels utilisés

Le modèle numérique de terrain de 90 m de résolution élaboré par le CGIAR-CSI (2004) et le plan de drainage de la ville de Port-au-Prince de SNC-Lavalin (1999) ont été exploités pour la détermination des caractéristiques du bassin versant (*voir* app. C, p.88 et 89). Ainsi, dans la projection *UTM zone 18 Nord* et la référence géographique *WGS 84*<sup>11</sup>, les outils du logiciel *ArcGIS Desktop 10 d'ESRI* ont été utilisés pour effectuer les opérations.

### 2.2.2. Détermination des caractéristiques morphométriques et hydrographiques

Les principales caractéristiques hydrographiques du bassin versant auxquelles l'étude s'est intéressée sont les suivantes :

- Les caractéristiques géométriques : la superficie, la forme et le rectangle équivalent ;
- Les caractéristiques des altitudes : la courbe hypsométrique, et les altitudes moyennes, médianes et extrêmes ;
- Les caractéristiques orographiques : l'indice global de pente, la dynamique de versant, la dénivelée spécifique et le coefficient orographique ;
- Le réseau hydrographique : la densité de drainage, le profil longitudinal et le temps de concentration des eaux de pluie.

---

<sup>11</sup> Ce sont les systèmes de référence et de projection géographiques utilisés en Haïti par le CNIGS.

## 2.3. Évaluation des ressources hydrologiques du bassin

### 2.3.1. Données exploitées

Les données exploitées pour les calculs hydrologiques sont les hauteurs de la pluie totale mensuelle prélevées de deux stations pluviométriques<sup>12</sup> à l'intérieur du bassin versant. La première se trouve à une altitude de 18,4 m au centre-ville de Port-au-Prince au point de coordonnées géographiques 18° 32' 49,942'' de latitude nord et 72° 20' 35,425'' de longitude ouest. La seconde est à 303,66 m d'altitude dans les hauteurs de Pétion-Ville, à 18° 31' 15,089'' de latitude nord et 72° 17' 40,198'' de longitude ouest. Combinées aux résultats de cette évaluation, certaines informations provenant des caractéristiques du bassin ont été aussi utilisées pour l'estimation des pertes de sols et de la lame d'eau maximale.

Dans le cadre cette analyse, les outils du logiciel *Hydrological Frequency Analysis (HYFRAN)* ont été utilisés (Chaire en hydrologie statistique, 1998).

### 2.3.2. Analyse fréquentielle des données pluviométriques

Étant un traitement statistique des données, l'analyse fréquentielle a permis de s'assurer de leur qualité et de leur représentativité (Musy, 2005). Également, elle a été utilisée comme méthode consistant à étudier les événements passés ainsi que leurs caractéristiques afin de prédire les probabilités d'apparition future. Cette prédiction s'est basée sur l'ajustement d'une loi de probabilité à la série des observations passées (Béliveau, 2006). Pour l'analyse de la pluviométrie du bassin versant, deux catégories de données ont été prises en compte :

- 1) La pluie totale annuelle, représentant la moyenne de celles des deux stations et obtenue par l'application de la méthode des polygones de Thiessen, pour une période allant de 1978 à 2010, soit 33 ans sur le bassin (*voir app. A, p. 75 à 77*).
- 2) La pluie maximale annuelle, soit la plus grande valeur de pluie enregistrée en un mois au cours de l'année. Ainsi, de chacune des deux stations a été tirée une série pour la même période allant de 1978 à 2010 (*voir app. A, p.80*).

<sup>12</sup> Ces stations sont la propriété des Frères de l'Instruction Chrétienne (F.I.C.) en Haïti.

### 2.3.2.1. Calcul des valeurs caractéristiques des échantillons

Les valeurs caractéristiques ont été les valeurs du premier type des échantillons comme la moyenne, la médiane, le maximum et le minimum, et aussi les valeurs de dispersion telles que l'écart-type, le coefficient d'aplatissement, le coefficient de dissymétrie et le coefficient de variation (Llamas, 1993).

### 2.3.2.2. Tests d'hypothèse

Les tests d'hypothèse ont permis d'évaluer les critères d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité de l'échantillon (Musy, *op. cit.*). Ainsi, nous avons utilisé le test d'indépendance de Wald-Wolfowitz, le test d'homogénéité à l'échelle annuelle de Wilcoxon et le test de stationnarité de Kendall.

### 2.3.2.3. Test d'ajustement des lois de probabilité

Selon Llamas (*op. cit.*, p. 117), l'objectif de l'ajustement a été de conduire à trouver une fonction analytique qui représente fidèlement les caractéristiques statistiques d'un échantillon. Il s'est fait suivant la méthode du Maximum de vraisemblance, étant l'une des plus consistantes afin d'estimer les paramètres de position, d'échelle et de forme des fonctions (Laborde, 2009).

Ainsi, l'échantillon de pluie totale annuelle a été soumis à trois lois de distribution parmi les plus fréquemment utilisées telles la loi normale, la loi log-normale et la loi Pearson-III. Par contre, la distribution log-normale, la loi *Extrem Values(EV)* de Gumbel et la distribution log-Pearson-III ont été appliquées pour l'échantillon de pluie maximale annuelle, car depuis longtemps c'est à travers elles que l'analyse de la fréquence des valeurs maximales s'est effectuée (Llamas, *op. cit.*, p. 108).

### 2.3.2.4. Test d'adéquation du Chi-deux

Puisque les paramètres des lois de distribution ont été tirés par rapport à un seul échantillon connu de la pluviométrie du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne dans chacun des cas, il a été nécessaire de savoir laquelle des lois est effectivement représentative

et avec quelle probabilité. Ainsi, le test du  $X^2$  de K. PEARSON est utilisé ; c'est le plus pratique (*Ibid.*, p. 74).

#### **2.3.2.5. Comparaison du degré d'ajustement des lois**

En fin de compte, les lois de distribution ont été évaluées suivant leurs *Bayesian information criterion (BIC)* et *Akaike information criterion (AIC)*. Ces critères ont permis de comparer le degré d'ajustement des différentes lois, en tenant compte du nombre de leurs paramètres, car les meilleurs ajustements ont dû correspondre aux plus faibles valeurs de ces statistiques (Béliveau, *op. cit.*, p. 9).

#### **2.3.2.6. Détermination du nombre optimal de pluviomètres**

Cette opération a permis de savoir le nombre optimal de pluviomètres à installer à l'intérieur du bassin versant de Bois-de-Chêne pour une meilleure représentativité du réseau pluviométrique (Abderrahman, 1993).

#### **2.3.3. Calcul du bilan hydrique annuel**

Selon Musy (*op. cit.*), c'est le bilan d'eau fondé sur le principe que pendant l'intervalle de 12 mois, le total des apports liquides au bassin versant doit être égal à celui des sorties ajoutées de la variation du volume d'eau stocké dans le bassin.

#### **2.3.4. Calcul de la lame d'eau maximale**

La lame d'eau est la partie de la pluie étant réellement ruisselée et pouvant générer la crue (Laborde, *op. cit.*, p. 157). La lame maximale théorique pour chaque station pluviométrique a été déterminée en fonction de la projection théorique de la pluie maximale annuelle pour différentes périodes de retour et à des probabilités de non-dépassement.

#### **2.3.5. Calcul des pertes de sol théoriques**

C'est la quantité de sols pouvant être déplacée sous l'action de l'eau au cours d'une année. Selon F. Fournier (*op. cit.*, p. 194), l'érosion du sol par l'eau est conditionnée par deux éléments du milieu naturel qui sont la concentration pluviale et l'intensité du relief.

## **2.4. Détermination de l'évolution d'occupation du sol**

### **2.1.1. Données et matériels utilisés**

Afin de faire face à la non-disponibilité de données pour les deux périodes, des images publiées en ligne sur *Google Earth*, par *Ogle Earth* selon Geens (2011), ont été exploitées. Cette interface est demeurée un moyen de partage des données et des résultats, car en se basant sur les avantages qu'elle offre tel que l'acquisition gratuite des images, leur disponibilité permanente et l'amélioration de leur résolution par la régularité de leur mise à jour, *Google Earth* fait aujourd'hui partie du bagage commun des chercheurs et de nombreuses disciplines (Venard, 2010). Aussi, une photographie de 2002 orthorectifiée à 1 m de résolution par le CNIGS a été utilisée comme référence pour l'échantillonnage des points de repère lors de la correction géométrique (voir app. C, p. 86).

Dans la projection *UTM zone 18 Nord* et la référence géographique *WGS 84*, le traitement a été effectué en utilisant les logiciels *Geomatica10.3* de *PCI Geomatics* pour l'orthorectification des images captées et l'*ArcGIS10* d'*ESRI* pour la cartographie.

### **2.1.2. Obtention d'images exploitables**

#### **2.1.2.1. Capture d'images à l'écran de visualisation**

##### **A. Couverture de la zone de travail**

Afin d'avoir une meilleure couverture de la zone de travail pour chacune des deux périodes, plusieurs portions en ont été extraites de *Google Earth*, puis enregistrées en format *JPEG*, car la possibilité de zoomer en avant et en arrière a permis de visualiser de plus ou moins grandes surfaces de terrain.

##### **B. Résolution de la capture à l'écran**

La résolution des images captées a résulté de celle de l'écran utilisé pour la visualisation, soit le nombre de lignes et de colonnes de l'image (*Ibid.*). Notre objectif a été

d'enregistrer des captures de résolution de 1 m. Ainsi, la résolution de l'image dépendait de deux paramètres :

- a) La résolution fixe de l'écran de l'opérateur générant une image. Celle utilisée dans le cadre de cette étude a été de 1 388 lignes pour 948 colonnes;
- b) La distance de visualisation variable de l'image dans *Google Earth* qui est donnée par la barre d'état, en bas à droite de l'écran. Celle correspondant à la résolution voulue est de 1,21 km.

L'outil « règle » proposé par *Google Earth* a permis de mesurer la longueur et la largeur de l'image visualisée en équivalence réelle : 1 m pour 1pixel. En fonction de la résolution de l'écran, la visualisation a été ajustée pour obtenir la relation suivante.

$$\frac{1\ 388\ m}{1\ 388\ pixels} = 1\ \text{ou}\ \frac{948\ m}{948\ pixels} = 1$$

Pour la couverture complète de la zone de travail, soit le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, 147 captures ont été effectuées pour chacune des deux périodes. Ce qui en a donné un total de 294 en format *JPEG* avec les trois bandes spectrales : *Bleu*, *Vert* et *Rouge*.

### C. Caractéristiques des images

Les images diffusées par *Google Earth* ont été fournies par *Digitalglobe* (Geens, *op. cit.*). Les caractéristiques principales de ces images ont été les suivantes :

- Zone de recherche : Port-au-Prince, Haïti,
- Centre de l'image : 18° 32' 23'' (N) et 72° 20' 11'' (O),
- Capteur : *GeoEye-1*,
- Date de couverture :
  - 1) Période 2002 : 17 septembre 2002,
  - 2) Période 2010 : 08 novembre 2010.

Ainsi, les images ont été prises au cours de la deuxième saison pluvieuse de la région de Port-au-Prince comprise entre les mois de septembre et novembre.

### 2.1.2.2. Correction géométrique et mosaïquage

A ce stade, il s'agissait d'effectuer la rectification géométrique des images captées pour ensuite les joindre dans le but de produire des images uniformes couvrant la zone de travail pour les deux périodes 2002 et 2010. En utilisant l'outil *Ortho Engine* de *Geomatica*, ces opérations ont entraîné une modification implicite des images de sorte que, lors d'une restitution analogique ou d'un traitement numérique, elles soient proches d'une planimétrie cartographique.

#### A. Transformation polynomiale

C'est une transformation de réseau de points image d'un système, non géoréférencé exprimé en unité de pixels, en un autre réseau correspondant dans un système géoréférencé dont les axes de coordonnées sont généralement ceux de la cartographie locale (Caloz et. al, 2001). Dans le cadre de ce travail de recherche, on a recours à la « transformation affine » ou « polynomiale ». Ce modèle mathématique simple, a effectué des calculs à partir des points de contrôle de référence (ou *amers*) à deux dimensions<sup>13</sup> sur une image de référence, a donné le meilleur accès pour corriger mathématiquement une image en deux dimensions (PCI Geomatics, 2009).

#### B. Correction géométrique

À l'aide des outils *GCP Collection* et *Geometric Correction* de *Geomatica*, un rééchantillonnage a eu lieu pour l'obtention des images géoréférencées. La correction a été faite par l'interpolation cubique, car elle a permis de conserver assez bien la dynamique de l'image et ne provoque pas lissage, et à l'aide de plusieurs polynômes du troisième degré ajustés sur quatre points image de la ligne ou de la colonne (Caloz et. al, *op. cit.*, p. 100).

Comme les images originales de format *JPEG*, celles géoréférencées de formats *PIX* de *PCI* résultant de la correction géométrique comportaient aussi les trois bandes spectrales Bleu, Vert et Rouge (*voir app. B, p.82*).

---

<sup>13</sup> Les deux dimensions sont la latitude et la longitude ou X et Y (UTM).

### C. Mosaïquage des images corrigées

Par le processus de mosaïquage, avec l'outil *Mosaic* de l'*Ortho Engine*, plusieurs images géoréférencées ont été assemblées pour créer une image unique. Suite à l'application de la normalisation *Across image 1st order*, la disparition des jointures dans le même système de projection et de référence spatiale a été effectuée. Ainsi, on a obtenu deux images géoréférencées avec les trois canaux de 8 bits non signés de format *PIX* et une résolution de 1 m pour les deux périodes de 2002 et 2010 (voir app. B, p.83).

#### 2.1.2.3. Rééchantillonnage des mosaïques

Dans le but d'éliminer des détails non pertinents pouvant provenir de la conversion des images d'un format à l'autre, il a été nécessaire de procéder à une analyse de généralisation (ARCGIS, 2012). On a procédé aux techniques de sous-échantillonnage pour ramener la résolution spatiale des images à un niveau pouvant faciliter la classification de l'occupation du sol pour les deux périodes par l'application de la technique d'agrégation moyenne en utilisant l'outil *Aggregate* du logiciel *ArcGIS*. Cette dernière a permis de produire des pixels dont la valeur exprime la luminance moyenne de toute sa surface. Ainsi, on est passé d'une résolution spatiale des images géoréférencées de 1 m à celle de 20 m, car cette réduction a été obtenue en diminuant le nombre de pixels de l'image tout en conservant son aspect visuel (voir app. B, p. 84).

#### 2.1.2.4. Zonage de l'image de chaque période

Il s'agissait de regrouper les pixels pour former des zones où la luminance spectrale est l'information de base de l'image numérique. Ce qui a nécessité la division l'espace en classes d'occupations du sol avec le souci de respecter autant que possible la géométrie des contours (Caloz et. al, *op. cit.*, p. 274).

#### A. Classes d'occupation du sol

Les classes d'occupation du sol à travers lesquelles l'évolution de l'espace du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne a été étudiée ont été les quatre suivantes :

1. Boisé dense, pour les espaces de végétation dense et dominée par les arbres ;
2. Boisé clairsemé, pour les espaces de végétation clairsemée et dominée par des arbustes avec la présence d'arbres ;
3. Agriculture-*landscaping*, pour les espaces cultivés l'intérieur de la zone de couverture végétale et (ou) les pelouses dans les proximités de l'espace urbanisé ;
4. Bâti, pour les espaces urbanisés

## **B. Classification des images**

Dans le cadre de notre étude, la classification dirigée selon le Maximum de vraisemblance a été exploitée pour obtenir les classes d'occupation du sol de 2002 et 2010 en utilisant l'outil *Likelihood Maximum Classification* d'*ArcGIS*. À travers cette classification se basant sur la disponibilité des informations sur la zone d'étude, les classes thématiques à extraire ont été définies au préalable et sont identifiées par classes d'intérêt, et selon la signature spectrale choisie, les pixels ont été ainsi affectés à la classe qui correspond le mieux à ses caractéristiques spectrales (Caloz et. al, *op. cit.*, p. 277)..

### **2.1.3. Cartographie de l'occupation du sol en 2002 et 2010**

Les *rasters* obtenus par le zonage ont été ensuite traités pour cartographier la répartition spatiale des différentes classes d'occupation du sol pour chaque période par :

- 1) Le filtrage majoritaire des *rasters*,
- 2) La conversion des *rasters* en vecteurs ;

### **2.1.4. Détermination des changements d'occupation du sol**

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

- 1) Le résumé statistique des champs de surface de 2002 et de 2010 ;
- 2) La quantification du changement opéré en huit ans ;
- 3) L'impact probable du type d'évolution sur la végétation et les sources d'eau potable.

## 2.5. Évaluation des risques hydrologiques

### 2.5.1. Données et matériels utilisés

L'évaluation des risques hydrologiques a impliqué l'exploitation des informations géologiques de 1987 et hydrogéologiques 1990 (*voir* app. C, p. 86 et 87), des coordonnées géographiques des sources captées de la DINEPA (*voir* tabl. 1.2, p. 13), de l'occupation du sol de 2010 ainsi que certaines données tirées des caractéristiques hydrographiques et des ressources en eau du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne. Ainsi, la superposition de ces couches d'informations a permis de réaliser des cartes d'aléas hydrologiques.

### 2.5.2. Détermination des aléas hydrologiques

#### A. Érosion superficielle

Pour l'érosion en surface, on s'est basé sur des recommandations de la FAO (1993) selon lesquelles les pentes de plus de 10 % nécessitent la création de terrasses en gradins et de cultures vivrières boisées, et celles de plus de 40 % conviennent aux cultures arbustives permanentes et sous couvert forestier. Car, l'un des objectifs de la fixation biologique des petits bassins reste la réduction du débit solide et la régulation des écoulements (FAO, 1987 ; *Ibid.*). Ce qui a impliqué l'utilisation des variables comme la géologie et l'utilisation du sol dans cette évaluation.

#### B. Érosion en masse

Dans les Caraïbes, les glissements en série sont déclenchés par les séismes, une forte pluie associée aux ouragans ou des précipitations prolongées au-dessus de la moyenne durant la saison des pluies (DeGraff 1991, Ahmad 1995 ; Plamandon, 2006). En plus de ces facteurs géographiques, il en existe d'autres d'ordre structurel comme la présence de couche superficielle marneuse sur une structure sommitale calcaire (Campy et Macaire. *op. cit.*). Selon R. Desbiens (1976), les causes de déclenchement peuvent être naturelles comme l'inclinaison du talus où le décrochement affecte surtout les talus raides supérieurs à 36 %, et (ou) anthropiques tels que les surcharges sur le replat et le déboisement favorisant l'érosion et

la présence de ravine. Ainsi, l'évaluation des aléas de glissement de terrain a fait appel aux variables suivantes : la pente la géologie de surface et l'utilisation du sol.

### **C. Inondation**

L'aléa d'inondation a concerné les éventuelles possibilités d'immersion anormales de certains espaces situés en aval du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, suivant la définition donnée par Manche (1999). Pour cela, l'occupation du sol et les éventuelles conditions extrêmes de cyclones tropicaux et d'élévation du niveau de mer sous l'influence de la vitesse et la direction du vent ont été considérées comme variables d'évaluation.

### **D. Contamination de l'eau souterraine**

Selon Holly (1999), une fraction importante de la population de Port-au-Prince, étant privée d'installation sanitaire, recourent à l'usage de fosse d'aisance. Ce qui a laissé une grande possibilité aux coliformes fécaux de s'infiltrer dans l'eau potable et contaminer les réseaux de distribution. C'est là une contamination microbiologique liée aux maladies provoquées par la présence de micro-organismes pathogènes dans l'eau de boisson. Ces derniers tels que *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli* et *Salmonella typhi* causent respectivement le choléra, la diarrhée et la fièvre typhoïde. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, ils proviennent de l'urine et des selles des personnes infectées et sont facilement véhiculés par l'eau (OMS, 2010). Ainsi, les risques de contamination d'eau dans le bassin ont été évalués en fonction des critères suivants : l'existence d'aquifères, l'existence de point de captage d'eau potable et l'utilisation du sol.

#### **2.5.3. Géographie des risques hydrologiques**

Selon l'effectif et (ou) la densité de la population se trouvant et représentant des vies et des biens dans le bassin versant, soit la vulnérabilité, les risques hydrologiques y ont été automatiquement évalués par sa mise en relation avec des aléas hydrologiques déterminés. Ainsi, des cartes des risques d'érosion hydrique, de glissement de terrain, d'inondation et de contamination d'eau ont été élaborées afin de présenter la répartition géographique des différents niveaux de risques. Les niveaux retenus sont : faible, moyen et élevé.

## **Conclusion**

À travers ces opérations concernant le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, les caractéristiques hydrographiques ont été étudiées, les ressources hydrologiques ont été évaluées et les changements effectués dans l'occupation du sol entre 2002 et 2010 ont été déterminés afin d'y évaluer les aléas hydrologiques. Ces derniers ont, par la suite, été mis en relation avec la vulnérabilité représentée par la population dans le but d'y répartir les risques hydrologiques tels que l'érosion du sol, le glissement de terrain, l'inondation et la contamination d'eau. Ainsi, les informations tirées de ces opérations ont été présentées dans chapitre dédié à la présentation des résultats et des discussions.

## **CHAPITRE III**

### **RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

#### **Introduction**

Ce chapitre on présente d'abord les résultats obtenus, à partir des opérations effectuées dans celui de la méthodologie, à propos des caractéristiques morphométriques et hydrographiques, les ressources en eau, le l'évolution d'occupation du sol des deux périodes et les risques hydrologiques du bassin versant.

Les résultats présentés sont, par la suite, suivis de discussions concernant leur relation relativement aux données utilisées, puis on identifie les limites et les alternatives dans leur interprétation pour enfin les comparer avec ceux d'autres études semblables.

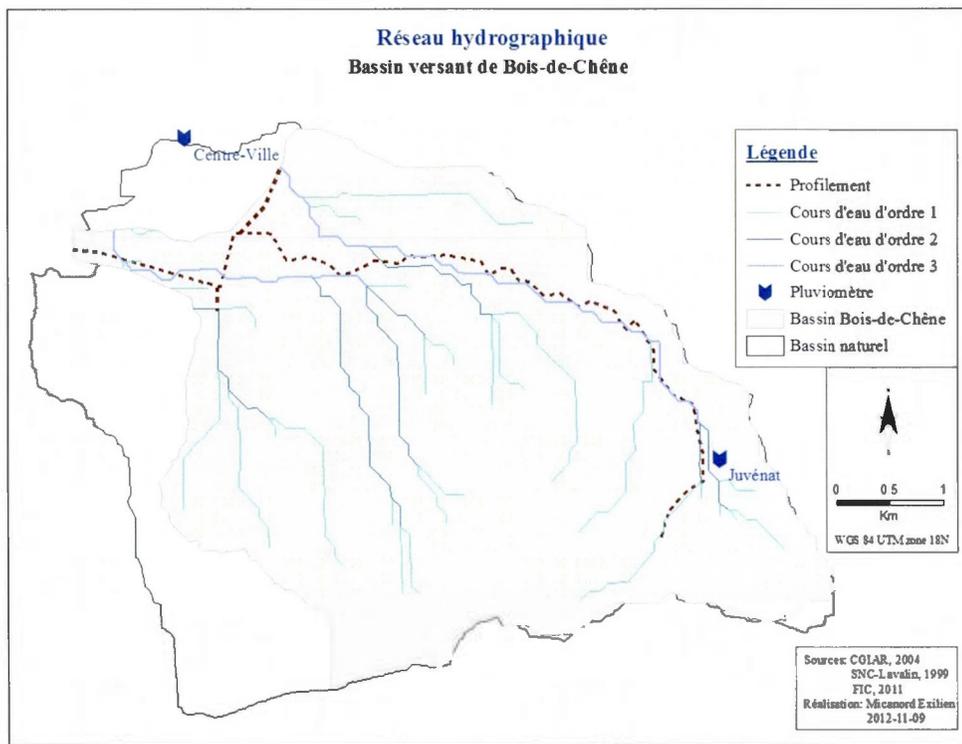
#### **3.1. Présentation des résultats**

##### **3.1.1. Les caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin**

###### **3.1.1.1. Caractéristiques géométriques**

###### **A. La superficie**

Le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne possède une superficie plane de 25,9 km<sup>2</sup>. Suite à des travaux d'aménagement aboutissant au profillement de la ravine, son efficience de drainage naturel est réduite à 79,2 %. Ainsi, on retient uniquement la surface représentant l'unité hydrologique effectivement drainée cette ravine, soit celle de 20,5 km<sup>2</sup> (fig. 3.1).



**Figure 3.1** Le réseau hydrographique de la ravine Bois-de-Chêne.

## B. La forme

La caractéristique de la forme la plus utilisée est l'indice de compacité de Gravélius ( $K_g$ ). Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin versant à celui du cercle ayant la même surface (Laborde, *op. cit.*, p. 75). Avec une valeur de 1 pour des bassins circulaires, 1,128 pour ceux carrés et 3 pour ceux très allongés (Llamas, *op. cit.*, p. 53), il est déterminé ainsi :

$$K_g = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec,

$K_g$  : Indice de compacité de Gravélius,

$P$  : Périmètre du bassin de Bois-de-Chêne (km),

$A$  : Superficie de bassin (km<sup>2</sup>).

Avec un indice de compacité  $K_c = 1,39$ , le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne possède une forme allongée.

### C. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent se définit comme le rectangle qui a la même surface et la même périmètre que le bassin versant. Selon Musy (*op. cit.*), il est déterminé par la relation suivante ;

$$2(L + l) = \frac{K_c \sqrt{A}}{0,28} \quad L * l = A$$

$$A = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right]$$

Avec,

$A$  : Superficie du bassin ( $\text{km}^2$ ),

$L$  : Longueur du rectangle équivalent (km),

$l$  : Largeur du rectangle équivalent (km).

Ainsi, pour le rectangle équivalent de la figure 3.2, la longueur est  $L = 8,92$  km et la largeur est  $l = 2,30$  km.

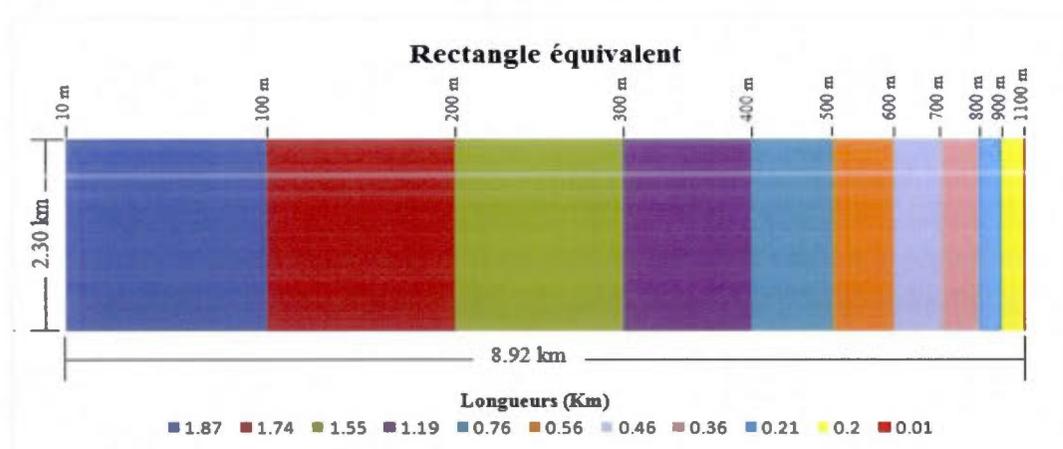


Figure 3.2 Rectangle équivalent du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne.

#### D. La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique exprime le pourcentage de superficie du bassin au-delà d'une certaine élévation ; c'est aussi un reflet de son état d'équilibre dynamique potentiel (Llamas, *op. cit.*, p. 55). L'allure de celle du bassin versant de Bois-de-Chêne présente une forme concave (fig. 3.3). Les classes de superficies en fonction de l'élévation pour ce bassin sédimentaire en phase de *monadnock* ou de vieillesse sont données par le tableau 3.1.

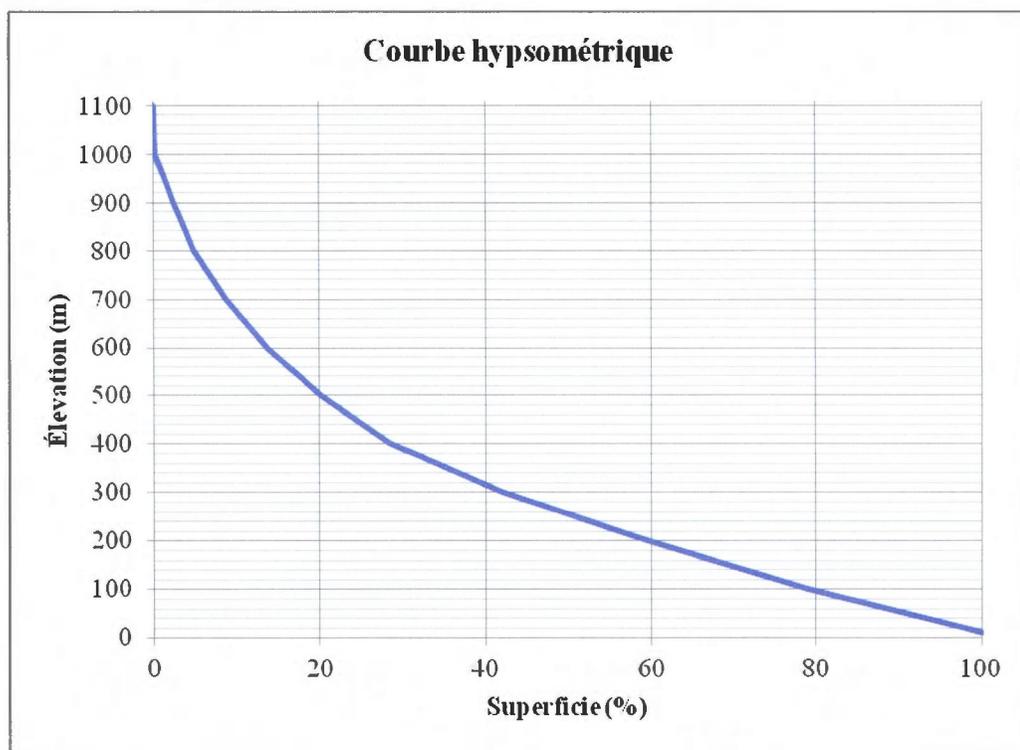


Figure 3.3 Courbe hypsométrique du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne.

**Tableau 3.1**  
Les valeurs des classes de superficie en fonction de l'élévation

Élévation (m)	Superficie entre les courbes (km <sup>2</sup> )	Pourcentage du total (%)	Pourcentage au-dessous de la limite inférieure (%)
10 -100	4.29	21.000	100
100 - 200	4.00	19.53	79.00
- 300	3.57	17.44	59.49
- 400	2.76	13.20	42.05
- 500	1.73	8.47	28.56
- 600	1.30	6.34	20.10
- 700	1.04	5.06	13.75
- 800	0.80	3.89	8.69
- 900	0.49	2.41	4.79
- 1000	0.46	2.25	2.38
- 1100	0.03	0.13	0.13

### 3.1.1.2. Altitudes caractéristiques

#### A. L'altitude moyenne

Étant utile dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques, l'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique (Musy, *op. cit.*).

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \cdot H_i}{A}$$

Avec,

$H_{moy}$ : Altitude moyenne du bassin (m),

$A_i$ : Aire du strate  $i$  entre deux isolignes (km<sup>2</sup>),

$H_i$ : Altitude moyenne entre les deux isolignes du strate  $i$  (m).

L'altitude moyenne est  $H_{moy} = 310$  m pour le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne.

## B. L'altitude médiane

C'est l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la surface totale du bassin versant, sur la courbe hypsométrique (*Ibid.*). Pour le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, elle est de 350 m (*voir* fig. 3.3). Ainsi, la pente moyenne du bassin versant est plus ou moins régulière ; les altitudes moyenne et médiane se sont écartées de 40 m.

## C. L'altitude des extrêmes

Les principales altitudes extrêmes sont les suivantes :

- L'altitude minimale est :  $H_{min} = 10$  m ;
- L'altitude maximale est :  $H_{max} = 1\ 010$  m ;
- La hauteur à 5 % de la surface totale est :  $H_{5\%} = 12$  m ;
- La hauteur à 95 % de la surface totale est :  $H_{95\%} = 900$  m.

### 3.1.1.3. Caractéristiques orographiques

#### A. L'indice de pente globale

L'indice de pente globale ( $I_g$ ) décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente et est l'un des plus utilisés (Laborde, *op. cit.*, p. 7). Il permet de déterminer la dénivelée spécifique du bassin et se définit ainsi :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

Avec,

$I_g$  : Indice de pente globale (%),

$D$  : Dénivelée  $H_{5\%} - H_{95\%}$  (m),

$L$  : Longueur du rectangle équivalent (km).

Pour le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, la valeur de l'indice est  $I_g = 0,08$ .

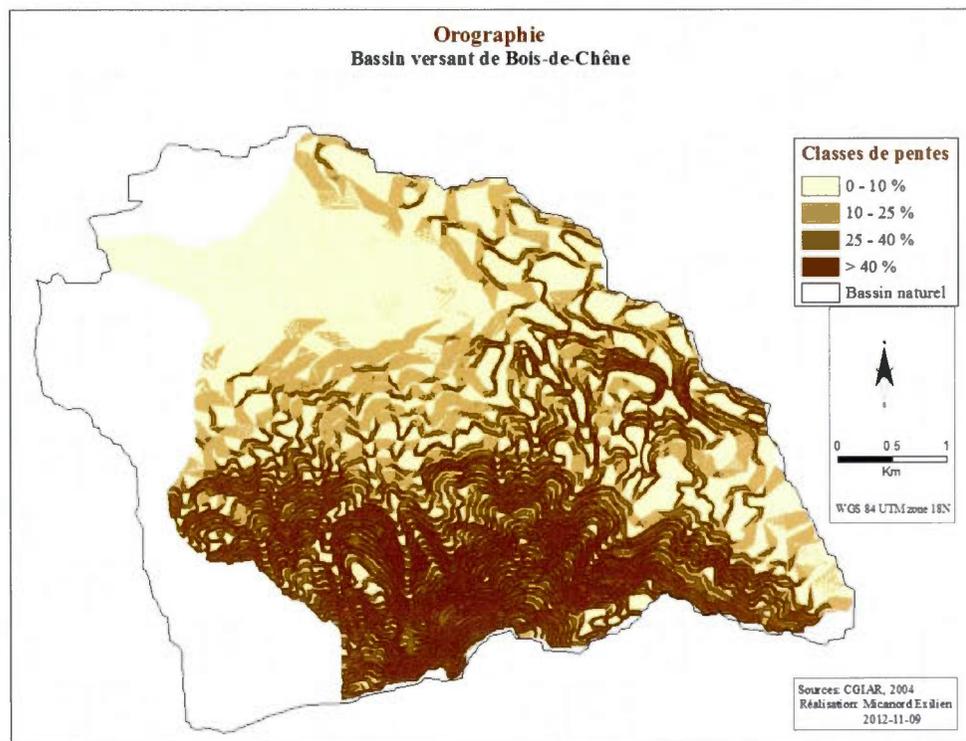
## B. La dynamique des versants

Le versant nord du Morne l'Hôpital, comme tout autre versant en général, est caractérisé par une pente où s'exercent des forces gravitaires. Sa dynamique fait intervenir des facteurs passifs liés à la nature du substrat et des facteurs actifs liés au climat et l'action biologique, et dont l'action conjuguée concourt à son érosion (Campy et Macaire, 1989). Selon la FAO (1994), cette dernière peut se présenter sous deux principales formes : les érosions hydriques superficielles et les mouvements de masse.

Parmi les érosions hydriques superficielles, on peut citer celle aréolaire où le ruissellement en nappe transporte des matériaux fins détachés et celle linéaire lorsque le ruissellement entaille le sol pour emporter des particules de plus en plus grosses (*Ibid.*). Les mouvements de masse ou glissement, caractérisés par le déplacement d'un volume à l'intérieur de la couverture pédologique, sont régis par deux facteurs particuliers : la pesanteur et l'eau (Gilli et al., 2008). Suivant une classification de J.C.Flageollet (1989), on peut en distinguer plusieurs types dont le glissement en cuillère se faisant sur place et en rotation sur une surface de rupture de forme concave, le glissement par translation sur discontinuité préexistante entre un sol et la roche mère, et les éboulements dont les causes immédiates de déclenchement sont les précipitations et les tremblements de terre.

Suivant la répartition des classes de pentes dans le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne (fig. 3.4), on en identifie :

- Des pentes de moins de 10 % qui dominent le nord-ouest. Dans cette partie du bassin versant, le terrain est relativement plat.
- Des pentes de 10 % à 40 % dans la partie est et dans les lignes partant de l'ouest vers le sud-est. Celles-ci sont favorables aux érosions hydriques superficielles.
- Des pentes de plus de 40 % qui, dominant la partie sud et surtout le sud-ouest, donnent lieu tant aux érosions hydriques superficielles qu'aux mouvements de masse.



**Figure 3.4** Les classes de pentes du bassin versant de Bois-de-Chêne.

### C. La dénivelée spécifique

Selon J.P. Laborde (*op. cit*, p. 8), la dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief suivant la classification de l'Office de Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (ORSTOM) (*voir app. D*, p. 89), elle est définie ainsi :

$$D_s = I_g * A^{1/2}$$

Avec,

$D_s$  : Dénivelée spécifique (m),

$I_g$  : Indice de pente globale (%),

$A$  : Surface du bassin (km<sup>2</sup>).

La dénivelée spécifique du bassin de la ravine Bois-de-Chêne est de 362 m (> 250), donc son relief est fort et favorable au risque d'érosion..

#### D. Le coefficient orographique

Le coefficient orographique combine les deux variables essentielles du relief : sa hauteur qui influe sur l'énergie potentielle de l'eau, et sa pente qui exerce une action sur l'écoulement dont l'effet complète les effets produits par les précipitations. La pente est dite accentuée pour un coefficient supérieur à 6, et peu accentuée dans le cas contraire (Fournier, *op. cit.*). Son expression est la suivante :

$$C_M = H, Tg \delta$$

Avec,

$C_M$  : Coefficient orographique,

$H$  : Hauteur moyenne du relief du bassin versant (m),

$Tg \delta$  : Coefficient de massivité sans unité. C'est le quotient de la division de la hauteur moyenne du bassin versant par sa surface projetée.

Le coefficient de massivité  $C_M$  est de 10,7 (> 6). Donc, le relief du bassin versant de Bois-de-Chêne est accentué.

#### 3.1.1.4. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué de l'ensemble de chenaux qui drainent les eaux de surface vers un exutoire (*voir* fig. 3.1). Dans le cas de notre étude, la ramification du réseau a été ordonnée suivant la numérotation ou l'ordre de Strahler (Laborde, *op. cit.*, p. 9).

##### A. La densité de drainage

La densité de drainage est le rapport de la longueur totale des canaux d'écoulement à la superficie du bassin versant. Elle reflète la dynamique du bassin (Llamas, *op. cit.*, p. 61).

$$D_d = \frac{L_t}{A}$$

Avec,

$D_d$  : Densité de drainage du bassin versant ( $\text{km}^{-1}$ ).

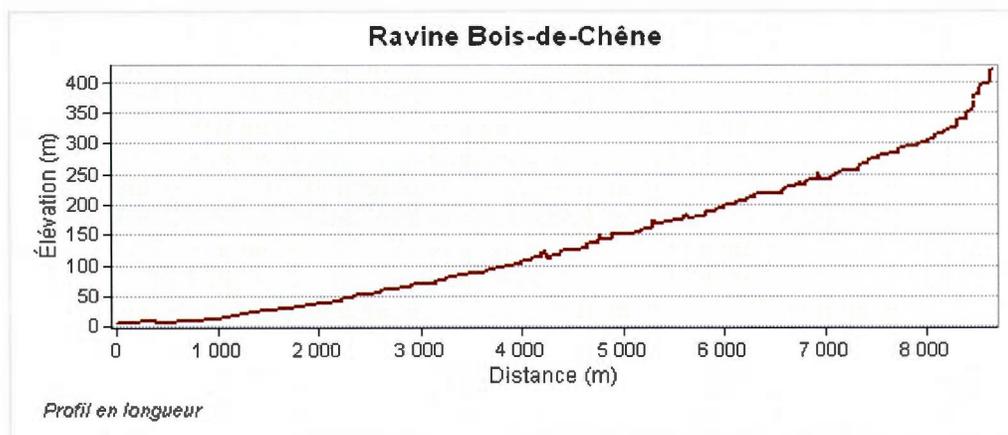
$L_t$  : Longueur totale des cours d'eau (km),

$A$  : Superficie du bassin versant ( $\text{km}^2$ ).

Pour un réseau hydrographique d'une longueur totale de 40,6 km linéaire, la densité de drainage du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne est :  $D_d = 1,98 \text{ km}^{-1}$ .

### B. Le profil longitudinal

C'est un graphique représentant les différentes élévations du fond du cours d'eau principal en fonction de la distance à l'embouchure (*Ibid.*, p. 64). Celui du talweg de la ravine Bois-de-Chêne, d'une longueur de 10,5 km, est représenté à la figure 3.5.



**Figure 3.5** Profil en longueur de la ravine Bois-de-Chêne.

### C. Temps de concentration des eaux de pluie

Ici, le temps de concentration se réduit au temps que met une particule d'eau provenant de la partie amont la plus éloignée du bassin versant pour parvenir à l'exutoire et est déterminé par la relation de GIANDOTTI (DGAETA<sup>11</sup>, 1995 ; Souadi, 2011).

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L_t}{0.8 \sqrt{\frac{H_{max} - H_{min}}{2}}}$$

Avec,

$T_c$  : Temps de concentration (h),

$A$  : Superficie du bassin ( $\text{km}^2$ ),

<sup>11</sup> DGAETA est la Direction Générale de l'Aménagement et la Conservation des Terres Agricoles.

$L_t$  : Longueur du talweg principal (km),

$M_{max}$  : Altitude maximale (m),

$M_{min}$  : Altitude minimale (m).

Le temps de concentration  $T_c$  du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne est d'une durée de 1,13 h.

### 3.1.1.5. Synthèse des caractéristiques du bassin

Toutes les caractéristiques hydrographiques du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne sont reprises dans le tableau de synthèse suivant (tabl. 3.2).

**Tableau 3.2**  
Caractéristiques physiographiques du bassin versant de Bois-de-Chêne

Paramètres		Unités	Valeurs
Superficie		km <sup>2</sup>	20,5
Périmètre		km	22,5
Indice de Gravélius		--	1,4
Rectangle équivalent	Longueur	km	8,9
	Largeur	km	2,3
Altitude maximale		m	1 010,0
Altitude minimale		m	10,0
Hauteur 5%		m	120,0
Hauteur 95%		m	900,0
Hauteur moyenne		m	310,0
Hauteur médiane		m	350,0
Indice global de pente		%	0,1
Dénivelé spécifique		-	362,0
Coefficient orographique		-	10,7
Longueur du thalweg		km	10,5
Temps de concentration		h	1,1

### 3.1.2. Ressources hydrologiques du bassin versant

#### 3.1.2.1. Pluviométrie du bassin

La formule de Weibull, étant celle utilisée par les chercheurs des États-Unis d'Amérique (Chaire en hydrologie statistique, *op. cit.*) est appliquée pour déterminer la probabilité empirique au non-dépassement des échantillons de pluie (*voir app. A, p. 78 à 80*). La formule est écrite de la façon suivante :

$$F(x_{(r)}) = \frac{r}{N + 1}$$

Avec:

$F(x_{(r)})$  : Fonction de probabilité empirique au non-dépassement,

$r$  : Valeur de rang dans l'ordre croissant,

$N$  : Taille de l'échantillon.

#### A. La pluie totale annuelle

##### – Les statistiques de base et résultats d'hypothèse

La figure 3.6 illustre la série temporelle de la pluie totale (en mm) en fonction de l'année. Pour l'instant, elle ne suggère la présence d'aucune aberrance dans les observations.

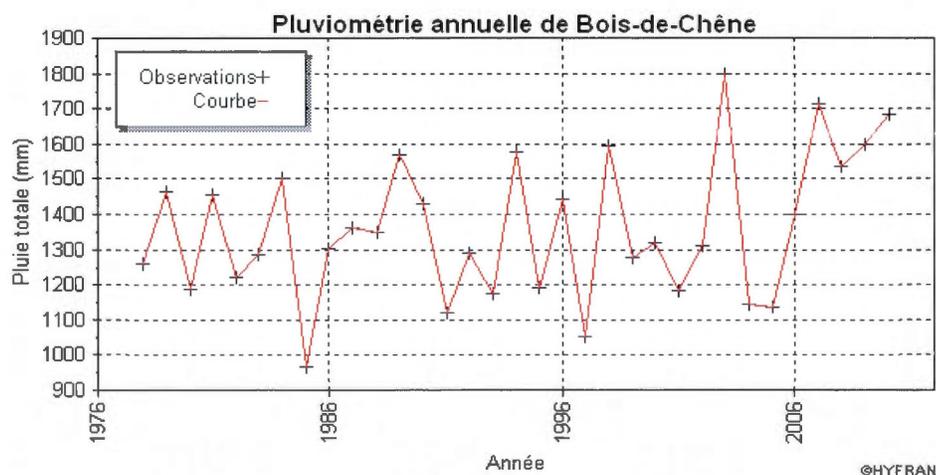


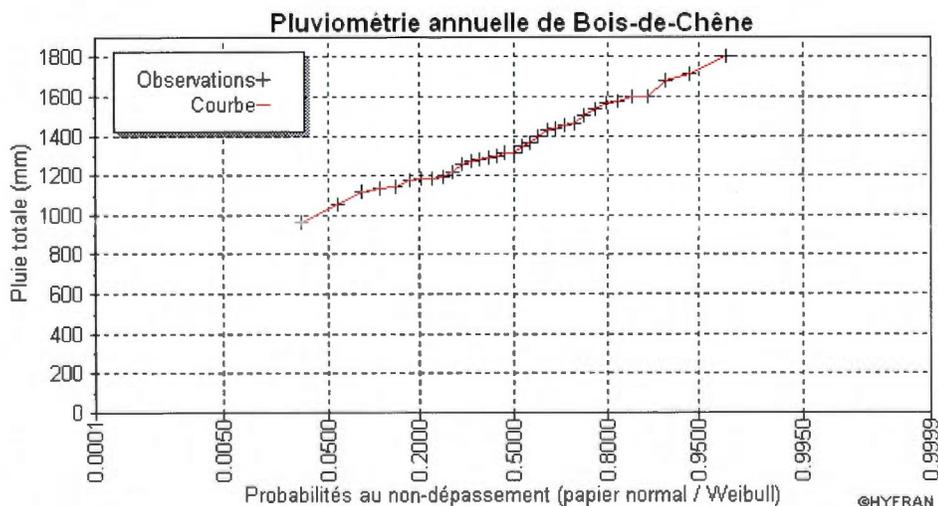
Figure 3.6 La série temporelle de la pluie totale en fonction de l'année.

**Tableau 3.3**  
Les valeurs caractéristiques de la pluie totale annuelle

Caractéristiques	Unité	Valeurs
Nombre de données	—	33,00
Minimum	mm	968,68
Maximum	mm	1799,01
Moyenne	mm	1360,82
Médiane	mm	1319,44
Écart-type	—	200,44
Coefficient d'aplatissement	—	-0,50
Coefficient de dissymétrie	—	0,28
Coefficient de variation	—	0,15

Selon les valeurs caractéristiques de l'échantillon présentées dans le tableau 3.3, les coefficients d'aplatissement et de dissymétrie indiquent que la distribution est plus étalée que celle normale et légèrement asymétrique.

La figure 3.7 présente par ordre croissant la hauteur totale annuelle de pluie observée (en mm) suivant la probabilité empirique au non-dépassement de Weibull sur le papier normal.



**Figure 3.7** La hauteur totale annuelle de pluie observée par ordre croissant.

**Tableau 3.4**  
Les statistiques des tests d'hypothèse pour la pluie totale annuelle

Tests d'hypothèse	Statistique	Seuil observé
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz	$ U  = 0,57$	0,5702
Test d'homogénéité à l'échelle annuelle de Wilcoxon	$ W  = 1,14$	0,2547
Test de stationnarité de Kendall	$ K  = 1,44$	0,1496

Suivant les résultats des tests d'hypothèse affichés dans le tableau 3.4, l'échantillon de la pluviométrie totale annuelle est indépendant, homogène et stationnaire à un niveau de signification de 5 %.

– *Les résultats de l'ajustement des lois*

Les fonctions utilisées pour l'ajustement à la pluie totale annuelle sont les suivantes :

- 1) La distribution normale ou loi de Gauss (Llamas, 1983 ; Moumi, 1989) :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Avec :} \quad \mu = \frac{x_i - x_0}{\sigma}$$

Avec,

$f(x)$  : Fonction de répartition,

$x_i$  : Valeur de la pluviométrie annuelle de l'année  $i$  (mm),

$\mu$  : Variable réduite de Gauss (mm),

$x_0$  : Paramètre de tendance centrale : valeur moyenne, ou mode, ou médiane (mm),

$\sigma$  : Paramètre d'échelle : écart-type, positif, différent de zéro.

- 2) La distribution log-normale ou loi de Galton (Dubreuil, 1974 ; Abderrahman, *op. cit.* p.75) :

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \text{Avec :} \quad \ln \mu = \frac{\ln x_i - \ln x_0}{\ln s}$$

Avec,

$x_i$  : Valeur de la pluviométrie annuelle de l'année  $i$  (mm),

$\mu$  : Variable réduite de Gauss (mm),

$x_0$  : Paramètre de position : borne inférieure (mm),

$s$  : Paramètre d'échelle : positif, différent de zéro,

$\sigma$  : Paramètre de forme : positif, différent de zéro.

3) La distribution de Pearson-III (Laborde, *op. cit.*, p. 88) :

$$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} (x - m)^{\lambda-1} e^{-\alpha(x-m)} \quad \text{Avec : } m = \frac{x_i - x_0}{s}$$

Avec,

$x_i$  : Valeur de la pluviométrie annuelle de l'année  $i$  (mm),

$m$  : Variable réduite (mm),

$x_0$  : Paramètre de position : borne inférieure (mm),

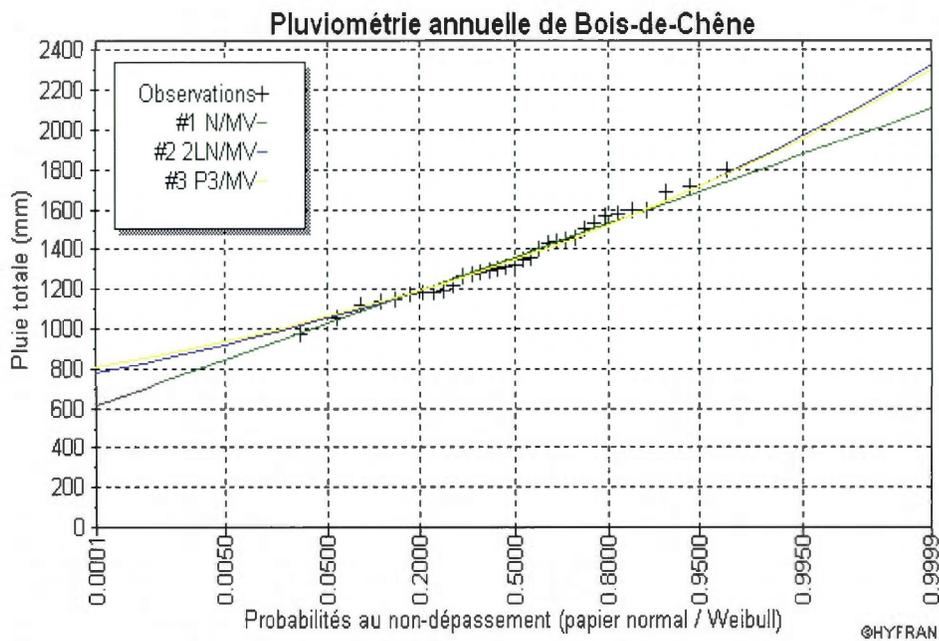
$s$  : Paramètre d'échelle : positif, différent de zéro,

$\lambda$  : Paramètre de forme : positif, différent de zéro.

Selon le tableau 3.5, pour un nombre de 33 observations, les valeurs des paramètres de la loi de Gauss sont  $\mu = 1\,360,821$  mm et  $\sigma = 200,443$ , celles de ceux de la distribution de Galton sont  $\mu = 7,205$  mm et  $\sigma = 0,147$ , et pour la loi de Pearson-III :  $\alpha = 0,022$  mm,  $\lambda = 19,115$  mm et  $m = 419,93$  mm.

**Tableau 3.5**  
Les paramètres des lois ajustées à la pluie totale annuelle

Distribution	Paramètres	unité	Valeur
Loi normale	$\mu$	mm	1 360,821
	$\sigma$	----	200,443
Loi log-normale	$\mu$	mm	7,205
	$\sigma$	----	0,147
Loi de Pearson-III	$\alpha$	mm	0,022
	$\lambda$	mm	19,115
	$m$	mm	491,932



**Figure 3.8** Le graphique de l'ajustement des lois à la pluie totale annuelle.

La superposition des valeurs théoriques des distributions normale (en vert), log-normale (en bleu) et gamma-incomplète (en jaune) est présentée sur un graphique de la figure 3.8. Le calcul des valeurs théoriques et de l'intervalle de confiance asymptotique est effectué à un pourcentage de 95%.

Pour un niveau de signification de 5%, l'échantillon de la pluviométrie totale annuelle observée s'ajuste parfaitement aux trois lois de distribution normale, log-normale et de Pearson-III suivant les valeurs de Chi-deux ( $X^2$ ) des tests d'adéquation affichées par le tableau 3.6

**Tableau 3.6**  
Valeurs de Chi-deux pour les lois ajustées à la pluie totale annuelle

Distribution	Nombre de classes	Degrés de liberté	Seuil	$X^2$
Loi Normale	8	5	0,6074	3,61
Loi de Galton	8	5	0,8931	1,67
Loi Pearson-III	8	4	0,7968	1,67

**Tableau 3.7**  
 Comparaison des critères BIC et AIC pour la pluie totale annuelle

Modèle	Paramètres	BIC	AIC
Log-normale (Maximum de vraisemblance)	2	448,84	445,85
Normale (Maximum de vraisemblance)	2	449,48	446,48
Pearson-III (Maximum de vraisemblance)	3	452,24	447,75

En se basant sur les résultats de comparaison affichés par le tableau 3.7, on admet que la loi log-normale (courbe en bleu sur la figure 3.8) de paramètres  $\mu = 7,205$  m et  $\sigma = 0,147$  présente le meilleur compromis pour l'ajustement de la variable pluie totale annuelle, car ses critères BIC et AIC produits par la méthode du maximum de vraisemblance sont minimums.

## B. La pluie maximale annuelle

### – Les statistiques de base de la pluie maximale annuelle

Pour les deux stations, la série temporelle de la pluie maximale (en mm) en fonction de l'année est illustrée par la figure 3.9. Dans la figure 3.10, le graphique représente la hauteur par ordre croissant suivant la probabilité empirique au non-dépassement de Weibull sur le papier de Gumbel.

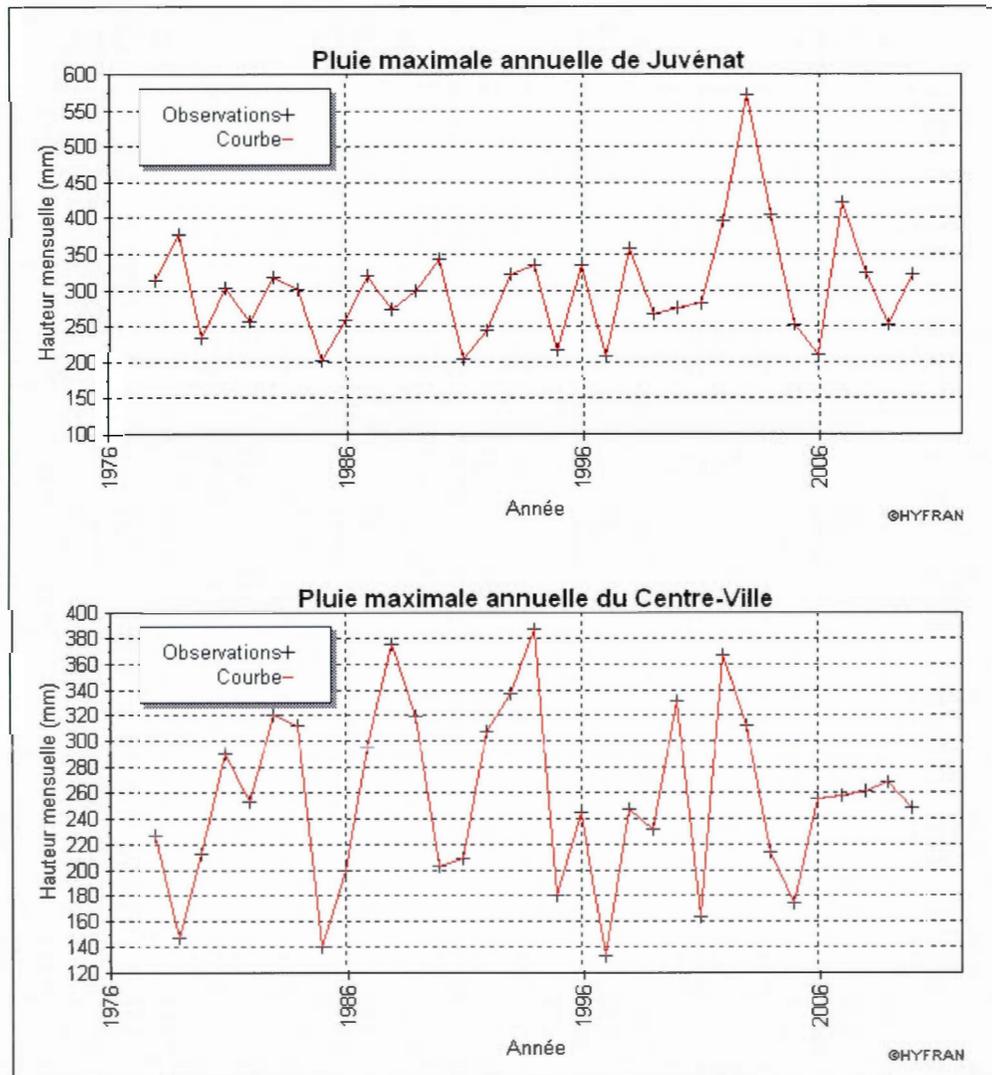
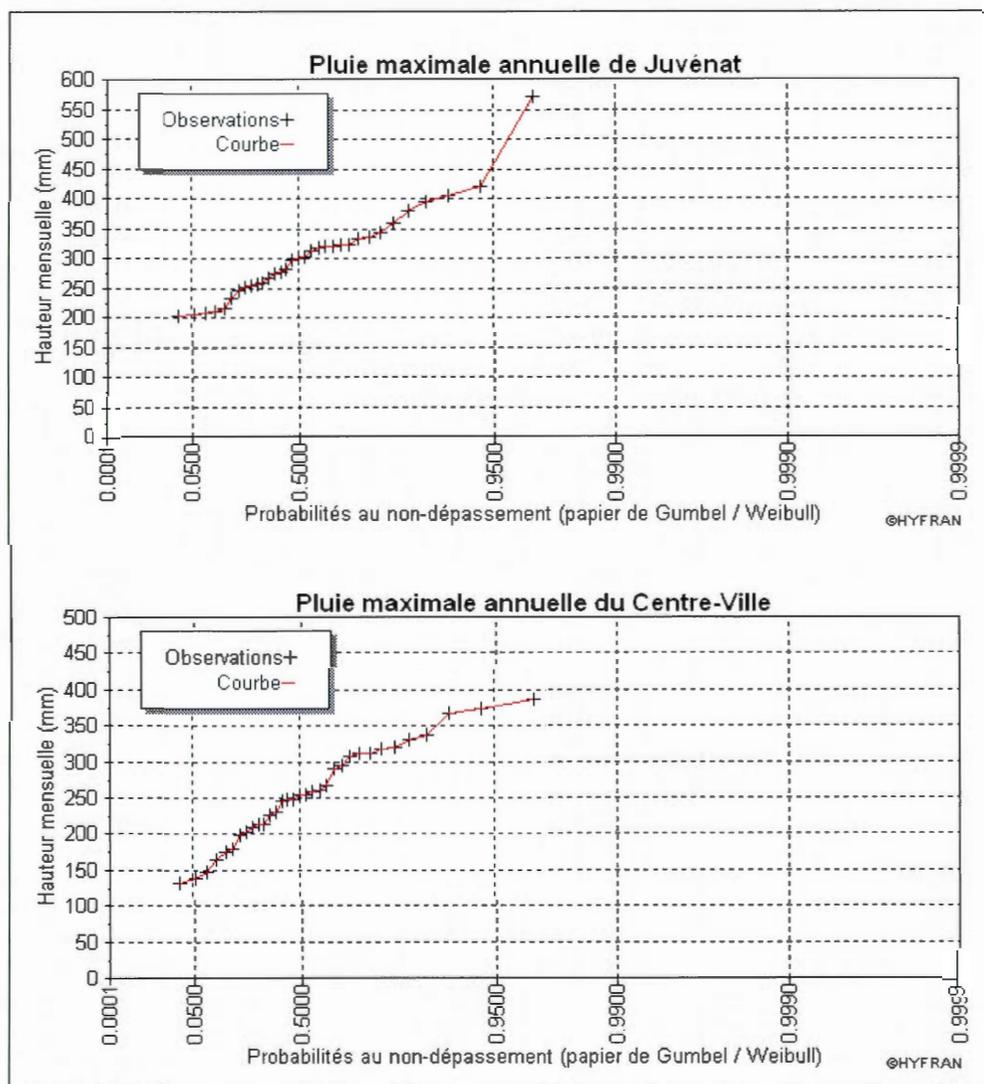


Figure 3.9 Les séries temporelles de la pluie maximale de Juvénat et du Centre-ville.



**Figure 3.10** Les valeurs maximales des pluies annuelles observées pour les deux stations.

Les valeurs caractéristiques des échantillons de pluie maximale annuelle de Juvénat et du Centre-ville sont affichées au tableau 3.8. Ainsi, les coefficients d'aplatissement et de dissymétrie indiquent que la distribution des hauteurs est plus étalée que celle normale et asymétrique dans les deux cas, avec un fort décalage pour celle de Juvénat.

**Tableau 3.8**  
Les valeurs caractéristiques des pluies maximales annuelles

Caractéristiques	Unité	Valeurs	
		Juvénat	Centre-Ville
Nombre de données	—	33,0	33,0
Minimum	mm	202,2	133,4
Maximum	mm	571,4	386,4
Moyenne	mm	303,2	255,3
Médiane	mm	300,5	253,3
Écart-type	—	76,1	68,6
Coefficient d'aplatissement	—	0,3	0,3
Coefficient de dissymétrie	—	1,4	0,1
Coefficient de variation	—	5,5	2,1

– *Les résultats d'hypothèse pour la pluie maximale annuelle*

Suivant les résultats des tests d'hypothèse, les échantillons de pluviométries maximales annuelles des deux stations sont indépendants, homogènes et stationnaires à un niveau de signification de 5 %. Ainsi, le tableau 3.9 affiche les résultats des trois tests utilisés.

**Tableau 3.9**  
Les statistiques des tests d'hypothèse pour les pluies maximales annuelles

Tests d'hypothèse	Juvénat		Centre-ville	
	Statistique	Seuil observé	Statistique	Seuil observé
Test d'indépendance (Wald-Wolfowitz)	$ U  = 1,019$	0,3080	$ U  = 0,7044$	0,4812
Test d'homogénéité (Wilcoxon)	$ W  = 1,284$	0,1993	$ W  = 0,6931$	0,4882
Test de stationnarité (Kendall)	$ K  = 1,038$	0,2992	$ K  = 0,4803$	0,6310

– *Les résultats de l'ajustement des lois pluie maximale annuelle*

Les fonctions utilisées pour l'ajustement à la pluie maximale annuelle sont les suivantes :

1) La distribution log-normale (Abderrahman, *op. cit.*) :

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \text{Avec : } m = \frac{x_i - x_0}{s}$$

Avec des paramètres précédemment définis (*voir p. 45*).

2) La loi *Extrem Values (EV)* de Gumbel (Llamas, *op. cit.*, p. 109) :

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$$

Avec,

$f(x)$  : Fonction de répartition,

$x$  : Valeur de la pluviométrie (mm),

$u$  : Paramètre de position : borne inférieure (mm),

$\alpha$  : Paramètre d'échelle : positif, différent de zéro.

3) La distribution log-Pearson-III (*Ibid.*)

$$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)_x} (\ln x - m)^{\lambda-1} \exp[-\alpha(x - m)]$$

Avec,

$x$  : Variable aléatoire (mm),

$m$  : Variable réduite (mm),

$x_0$  : Paramètre de position : borne inférieure (mm),

$s$  : Paramètre d'échelle : positif, différent de zéro,

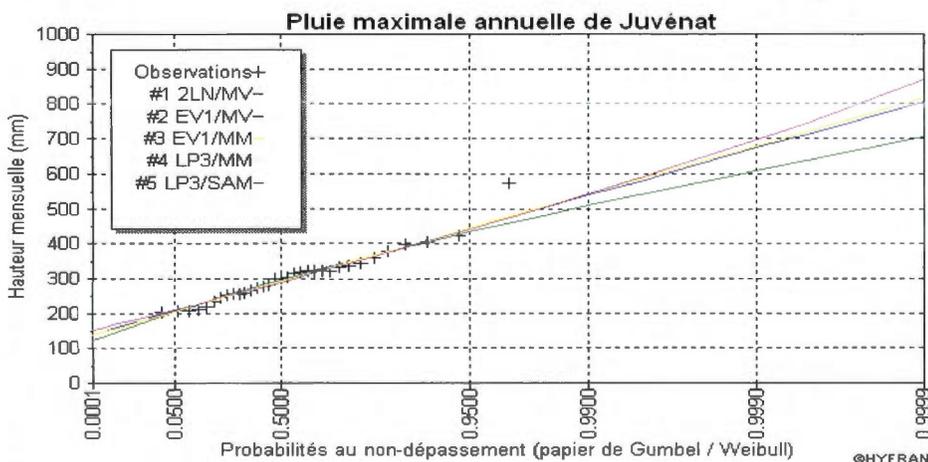
$\lambda$  : Paramètre de forme : positif, différent de zéro

Les valeurs des paramètres déterminées suivant le maximum de vraisemblance, la méthode des moments et le *Sundry Averages Method (SAM)* pour l'ajustement des lois log-normale, *EV* de Gumbel et log-Pearson-III sont affichées dans le tableau 3.10.

**Tableau 3.10**  
Les paramètres des lois ajustées aux pluies maximales annuelles

Distribution	Unité	Juvénat		Centre-ville	
		Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
Loi log normale (Maximum de vraisemblance)	mm	$\mu$	5,687	$\mu$	5,505
	—	$\sigma$	0,234	$\sigma$	0,285
Loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance)	mm	$\mu$	269,349	$\mu$	221,128
	—	$\alpha$	58,366	$\sigma$	63,842
Loi de Gumbel (Méthode des moments)	mm	$\mu$	269,005	$\mu$	224,437
	—	$\alpha$	59,309	$\sigma$	53,509
Loi logPearson-III (Méthode des moments)	mm	$\alpha$	45,296	$\alpha$	-21,341
	mm	$\lambda$	20,619	$\lambda$	7,105
	mm	$m$	2,015	$m$	2,723
Loi logPearson-III (SAM)	mm	$\alpha$	45,681	$\alpha$	-36,781
	mm	$\lambda$	20,953	$\lambda$	20,029
	mm	$m$	2,011	$m$	2,935

La superposition des valeurs théoriques des distributions log-normale, *EV* de Gumbel et log-Pearson-III est présentée pour chacun des échantillons sur les graphiques des figures 3.11a et 3.11b. Pour chacun des cas, le calcul des valeurs théoriques et de l'intervalle de confiance asymptotique est effectué à un pourcentage de 95% suivant le maximum de vraisemblance, la méthode des moments et le *SAM*.



**Figure 3.11a** Ajustement des lois à la pluie maximale annuelle de Juvénat.

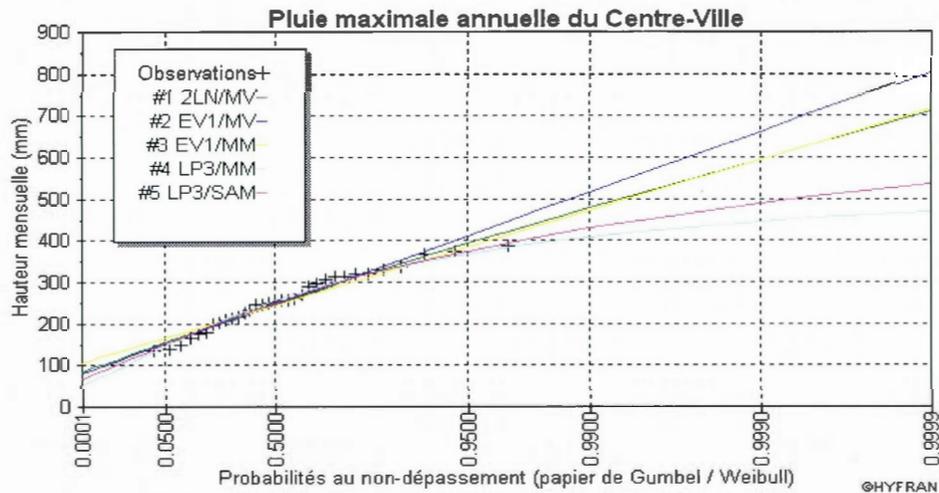


Figure 3.11b Ajustement des lois à la pluie maximale annuelle du Centre-ville.

Suivant les valeurs de Chi-deux ( $X^2$ ) des tests d'adéquation affichées par le tableau 3.11 pour un niveau de signification de 5%, l'échantillon de la pluviométrie totale annuelle observée s'ajuste aux trois lois de distribution lois log-normale, *EV* de Gumbel et log-Pearson-III.

Tableau 3.11

Valeurs de Chi-deux pour les lois ajustées aux pluies maximales annuelles

Distribution	Nombre de classes	Degré de liberté	Juvénat		Centre-ville	
			Seuil	$X^2$	Seuil	$X^2$
Loi log normale (Maximum de vraisemblance)	8	5	0,41	5,06	0,26	6,52
Loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance)	8	5	0,30	6,03	0,13	8,45
Loi de Gumbel (Méthode des moments)	8	5	0,30	6,03	0,04	11,36
Loi log-Pearson-III (Méthode des moments)	8	4	0,19	6,03	0,71	2,21
Loi log-Pearson III (SAM)	8	4	0,19	6,03	0,39	4,09

En se basant sur les résultats de comparaison des critères d'information bayésien (BIC) et de Akaike (AIC) on a conclu que :

- 1- La distribution *EV* de Gumbel (courbe en bleu sur la figure 3.11a) de paramètres  $\mu = 269,349$  m et  $\alpha = 58,366$  présente le meilleur compromis pour l'ajustement de la variable pluie maximale annuelle de Juvénat ; suivant le tableau les critères BIC et AIC produits par la méthode du maximum de vraisemblance sont minimums (tabl. 3.12).
- 2- Pour la variable pluie maximale annuelle du Centre-ville, la loi log-normale (courbe en vert sur la figure 3.11b) de paramètres  $\mu = 5,687$  m et  $\sigma = 0,234$ , par la méthode du maximum de vraisemblance, présente le meilleur compromis suivant le tableau 3.13.

**Tableau 3.12**  
Les critères BIC et AIC pour la pluie maximale de Juvénat

Modèle	Paramètres	BIC	AIC
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	378,34	375,34
Gumbel (Méthode des moments)	2	378,41	375,42
Lognormale (Maximum de vraisemblance)	2	379,20	376,21
Log-Pearson-III (SAM)	3	381,56	377,07
Log-Pearson- III (Méthode des moments)	3	381,56	377,07

**Tableau 3.13**  
Les critères BIC et AIC pour la pluie maximale du Centre-ville

Modèle	Paramètres	BIC	AIC
Log-normale (Maximum de vraisemblance)	2	380,19	377,19
Log-Pearson-III (Méthode des moments)	3	381,25	376,76
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	381,28	378,29
Log-Pearson-III (SAM)	3	381,92	377,43
Gumbel (Méthode des moments)	2	383,29	380,30

### C. Optimisation du réseau pluviométrique

L'optimisation passe d'abord par le calcul de l'erreur de l'estimation de la quantité moyenne précipitée sur le bassin (Abderrahman, *op. cit.*, p 49 ). Cette dernière est déterminée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{Cv}{\sqrt{N_p}}$$

Avec:

$\rho$ : Erreur d'estimation en (%),

$Cv$ : Coefficient de variation,

$N_p$  : Nombre de pluviomètres.

Pour les deux stations pluviométriques, l'erreur de calcul est de 10,42 %. En fixant celle acceptable à un seuil de 5 % on obtient une correspondance d'optimisation de 8 stations. Donc pour améliorer les mesures pluviométriques dans le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, on doit y installer 6 stations de plus (tabl. 3.14).

#### 3.1.2.2. Hydrologie du bassin

##### A. Le bilan hydrique annuel

Étant donnée la non-disponibilité des informations sur la quantité d'eau stockée, l'équation du bilan hydrique, proposé par Musy (*op. cit.*), est ainsi exprimée dans la forme la plus simple pour le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne :

$$P_p = \Delta h + E$$

Avec,

$P_p$  : Précipitations de la période en question (mm),

$\Delta h$  : Variation d'humidité : ruissellement ou sécheresse (mm),

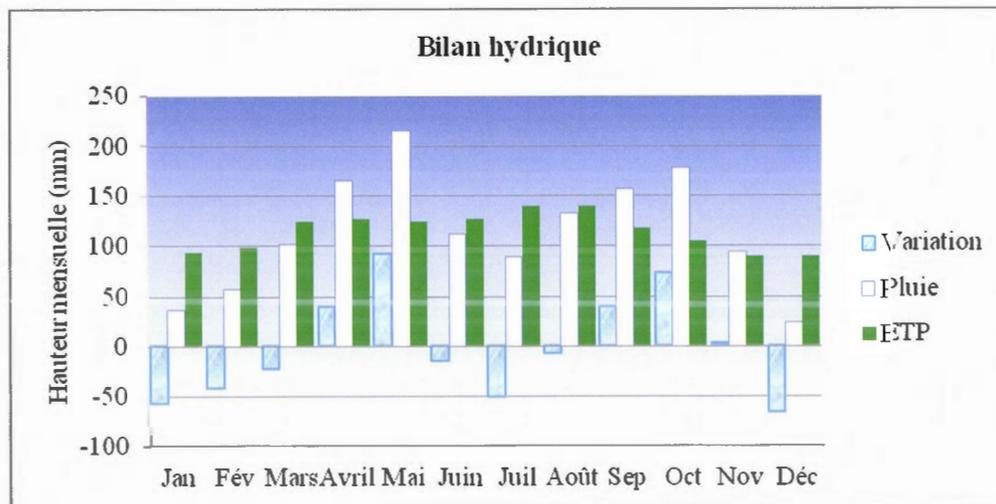
$E$  : Évapotranspirations potentielles de la période (mm).

**Tableau 3.14**  
Optimisation du réseau pluviométrique

Nombre de pluviomètres	Erreur d'estimation (%)
2	10,42
8	5,21

Suivant les données pluviométriques fournies par les deux stations à l'intérieur du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne, la précipitation totale annuelle est de 1 360,82 mm en moyenne sur les 33 ans. Pour une évapotranspiration potentielle annuelle est de 1 372,31 mm (voir chap. 1, par. 1.1.2.5) représentant la demande de l'atmosphère, l'apport annuel présente un déficit hydrique de 11 mm.

À l'échelle mensuelle, le bilan affiche une alternance d'excédent et de manque d'humidité suivant que la variation prenne de valeurs positives ou négatives. Ainsi, on a deux périodes sèches dont la première est de décembre à mars et la seconde de juin à août, et aussi, deux périodes d'excédent de pluies allant respectivement du mois d'avril à mai et de septembre à novembre (fig. 3.12).



**Figure 3.12** La pluie et la variation d'eau mensuelles du bassin versant.

### B. La lame d'eau maximale rattachée à l'inondation

Cette la lame d'eau théorique est déduite par le produit de la pluie théorique et du coefficient de ruissellement (*voir* app. D, p. 89). Ce dernier est pondéré à la proportion du type d'occupation du sol à qui il est attribué. Ainsi, l'utilisation du sol de 2010 est utilisée pour la pondération. Selon Ray K. (1982), la distribution de Gumbel est largement utilisée, par contre celle log-Pearson-III recommandée aux États-Unis. Ainsi, on sélectionne les valeurs provenant de cette dernière suivant la méthode des moments qui donne un ajustement exact théoriquement (Chow et al., 1964).

Dans le tableau 3.15, les hauteurs d'eau sont affichées pour différents temps de retour allant de 2 à 10 000 ans et différentes probabilités au non-dépassement. Ainsi, elles varient entre 0,162 et 0,486 m par mois avec la pluie théorique de Juvénat, et de 0,142 à 0,262 m par mois avec celle du Centre-ville.

**Tableau 3.15**  
Lames d'eau théoriques en fonction des pluies maximales annuelles

Période de retour (an)	Probabilité au non dépassement	Juvénat		Centre-ville	
		Pluie (m)	Lame (m)	Pluie m	Lame (m)
10000	0,9999	0,87	0,486	0,47	0,262
2000	0,9995	0,75	0,417	0,45	0,253
1000	0,999	0,70	0,389	0,44	0,248
200	0,995	0,59	0,328	0,42	0,235
100	0,99	0,54	0,303	0,41	0,228
50	0,98	0,50	0,279	0,39	0,219
20	0,95	0,44	0,247	0,37	0,205
10	0,9	0,40	0,223	0,34	0,192
5	0,8	0,36	0,199	0,31	0,175
3	0,7	0,32	0,179	0,28	0,159
2	0,5	0,29	0,162	0,25	0,142

### 3.1.2.3. Les pertes en sols potentielles

Dans le cas d'un bassin à relief accentué comme celui à l'étude, cette perte naturelle annuelle en terre est donnée par la relation suivante :

- 1) Formule de Fournier (*op. cit.*)

$$\log A_s = 2.65 \log \frac{P_m^2}{P_a} + 0.46 \log C_M - 1.56$$

Avec,

$A_s$  : Apport en sol moyen naturel (t/km<sup>2</sup>/an),

$P_m$  : Pluviosité maximale mensuelle (mm),

$P_a$  : Pluviosité annuelle en (mm),

$C_M$  : Coefficient orographique.

- 2) Formule de Frigui (Frigui, 1996 ; Souadi, *op. cit.* , p. 44)

$$A_s = 49.8 * L_r^{0.89} * S_b^{-0.26}$$

Avec,

$A_s$  : Apport en sol moyen naturel (t/km<sup>2</sup>/an),

$L_r$  : Lamme d'eau moyenne ruisselée (mm),

$S_b$  : Superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>).

Les modèles de Fournier et de Frigui donnent respectivement de 7 225,81 t/km<sup>2</sup>/an et de 5 353,85 t/km<sup>2</sup>/an (tabl. 3.16) pour une valeur moyenne de 6 754,77 t/km<sup>2</sup>/an. Ce qui correspond à une érosion spécifique moyenne annuelle par l'eau de 138 472,8 t/an.

**Tableau 3.16**  
Érosion hydrique moyenne annuelle du bassin versant

Formule	Apport annuel moyen en sol (t/km <sup>2</sup> /an)
Fournier	7 225,81
Frigui	5 353,85
Valeur moyenne	6 754,77

### 3.1.3. Évolution de l'occupation du sol

#### 3.1.3.1. Modes d'occupation du sol en 2002 et 2010

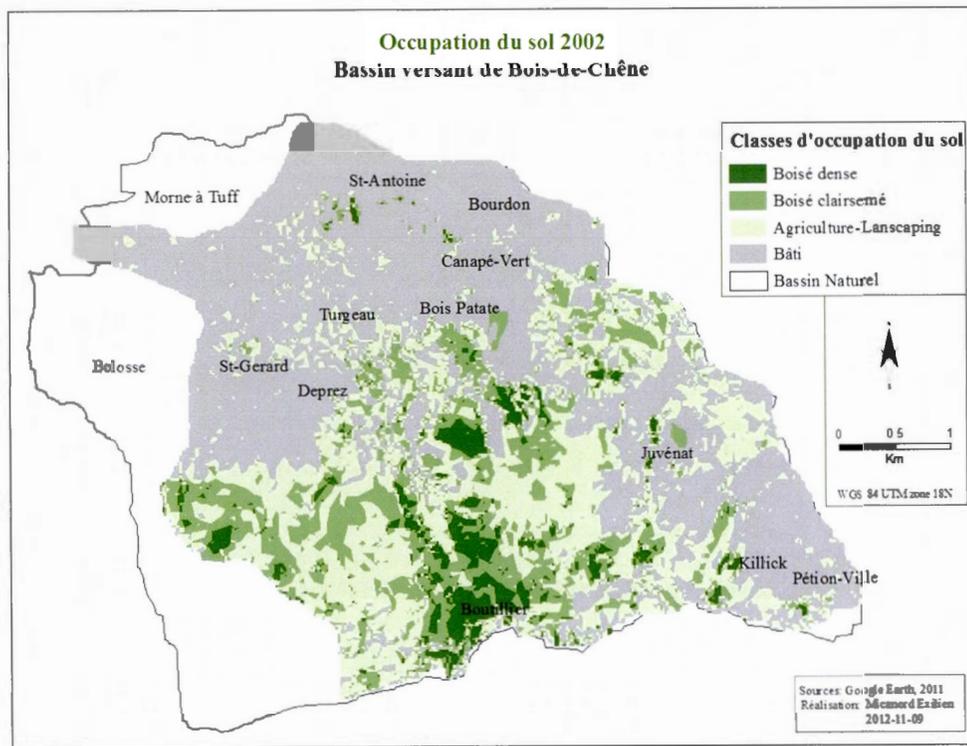
Les modes (ou types) d'occupation du sol des deux périodes sont obtenues à travers leur cartographie impliquant :

- 1) Le filtrage majoritaire des *rasters* obtenus par le processus de zonage. Avec l'outil *Majoritary filter* d'*ArcGIS*, il consiste à replacer les pixels dans un autre à partir du principe selon lequel  $\frac{3}{4}$  ou  $\frac{5}{8}$  de ceux connectés peuvent avoir la même valeur. Ainsi, le nombre de pixels dans chaque classe est obtenu.
- 2) La conversion des pixels en données vectorielles qui, en utilisant l'outil *Raster to polygon* d'*ArcGIS*, donnent aussi le périmètre et la superficie des polygones, ainsi que leur appartenance aux différentes classes.

#### A. Pour l'année 2002

Suivant la figure 3.13, la répartition est ainsi en 2002 sur le bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne:

- Le Bâti occupe en grande partie le nord avec les quartiers comme Saint-Antoine, Bourdon, Canapé-Vert, Turgeau, Saint-Gérard et Deprez, et l'est avec le quartier de Juvénat et la ville de Pétion-Ville.
- Le couvert végétal, y compris le Boisé dense, le Boisé clairsemé et l'Agriculture-*Landscaping*, est par contre concentré dans la partie du sud-ouest, surtout dans les hauteurs de Boutilliers.

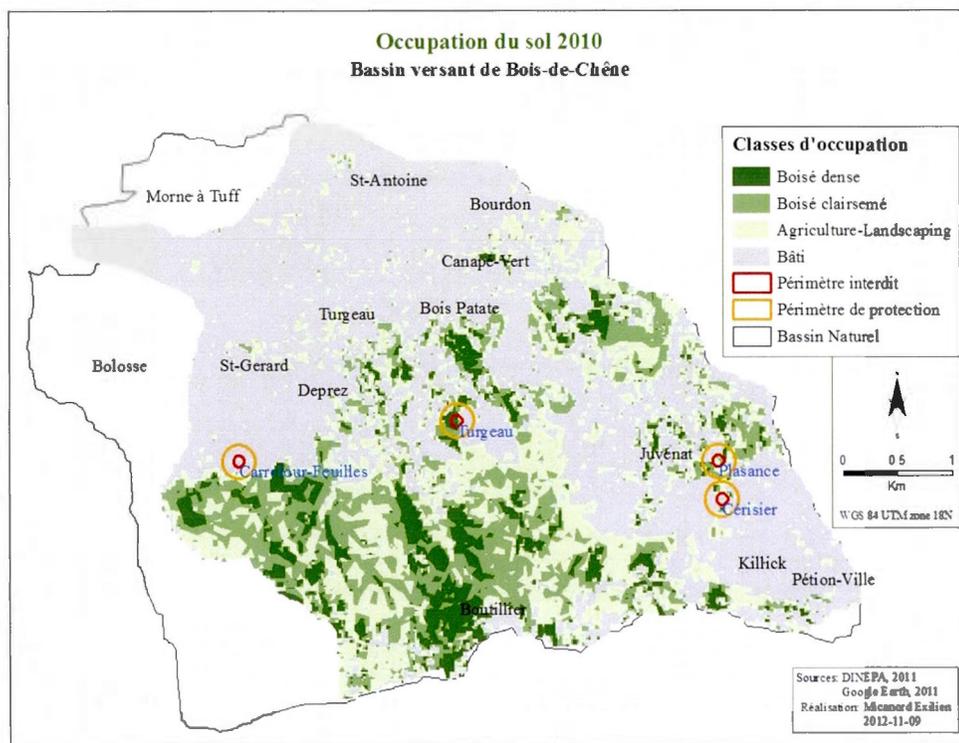


**Figure 3.13** Occupation du sol de 2002 du bassin versant.

### B. Pour l'année 2010

Selon la figure 3.14, en 2010, la répartition est la suivante à l'intérieur du bassin versant :

- Le Bâti couvre les mêmes parties qu'en 2002, avec l'ajout des quartiers de Bois-Patate dans le nord et de Killick dans l'est.
- Le couvert végétal est encore concentré dans la partie du sud-ouest, avec un certain recul.



**Figure 3.14** Occupation du sol de 2010 du bassin versant.

### 3.1.3.2. Les changements d'occupation du sol entre 2002 et 2010

À partir des tableaux accompagnant les polygones, la quantification du changement pour chaque classe d'occupation du sol a impliqué :

- 1) Le résumé statistique des tableaux des polygones, avec l'outil *Summary statistics* d'*ArcGIS*, pour avoir la superficie de chaque classe.
- 2) La comparaison des tableaux des pour les deux périodes afin de déterminer la variation de la superficie de chaque classe.
- 3) L'évaluation de son empiétement sur la végétation et les périmètres des sources.

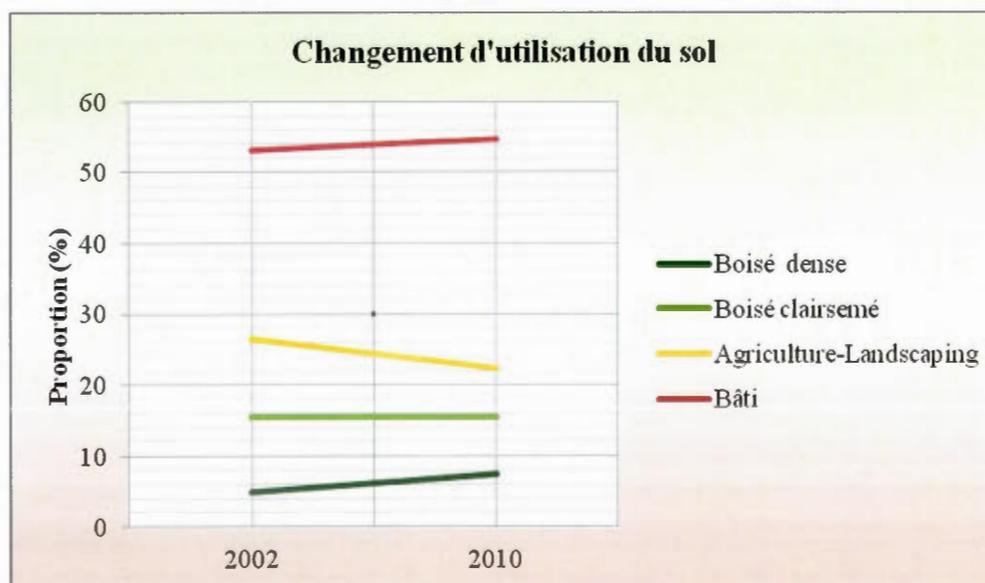
Ainsi, le tableau 3.18 affiche la proportion des différentes classes d'occupation du sol en 2002 sur les 20,5 km<sup>2</sup> du bassin versant ; le Boisé dense est de 4,9 % ; le Boisé clairsemé de 15 % ; l'Agriculture-Landscaping de 26 % et le Bâti de 53 %.

**Tableau 3.17**  
Variation des classes d'occupation du sol entre 2002 et 2010

Classe	Proportion en 2002 (%)	Proportion en 2010 (%)	Variation (%)
Boisé dense	4,9	7,3	50,29
Boisé clairsemé	15	16	0,79
Agriculture-Landscaping	26	22	-15,8
Bâti	53	55	2,99
Total	100	100	-----

Tandis qu'en 2010, la situation est la suivante dans l'aire totale du bassin versant : le Boisé dense est de 7,3 % ; le Boisé clairsemé de 16 % ; Agriculture-Landscaping de 22 % et le Bâti de 55 % (tabl. 3.17).

Ce qui donne, durant ces huit ans, une augmentation du Boisé dense de 50,29 % ; une augmentation du Boisé clairsemé de 0,79 % ; une diminution de l'Agriculture-Landscaping de 15,8 % et une augmentation du Bâti de 2,99 % (fig. 3.14).



**Figure 3.15** Variation des classes d'occupation du sol entre 2002 et 2010.

Dans l'ensemble, entre 2002 et 2010, la Végétation est passée d'une proportion de 46,8 % à 44,5 % de la superficie totale, et le Bâti de 53,2 % à 55,5 %. Ainsi, la Végétation et le Bâti ont connu une variation respective de (- 4,77) % et de 4,25 % (tabl. 3.18).

**Tableau 3.18**  
Effets de l'occupation du sol sur la végétation en 2010

Classe	Proportion 2002 (%)	Proportion 2010 (%)	Variation (%)
Végétation	46,8	44,5	-4,77
Bâti	53,2	55,5	4,25
Total	100	100	

En 2010, on y observe également un empiètement des différentes classes d'occupation du sol sur les périmètres de sécurité des sources d'eau potable (voir fig. 3.14). Ainsi, suivant le tableau 3.19, la proportion de chaque classe à l'intérieur du rayon de 50 m, soit la zone interdite, des différentes sources est la suivante :

- 1) Pour celui de Carrefour-Feuille : l'entièreté, soit les 100 % de la surface totale est transformée en Bâti ;
- 2) Pour celui de Turgeau : 65 % en Boisé dense, 12 % en Boisé clairsemé, 10 % en Agriculture-Landscaping et 13 % en Bâti ;
- 3) Pour celui de Cérissier : 0 % en Boisé dense, 0 % en Boisé clairsemé, 10 % en Agriculture-Landscaping et 90 % en Bâti ;
- 4) Pour celui de Plaisance : 2,6 % en Boisé dense, 33,6 % en Boisé clairsemé, 42,4 % en Agriculture-Landscaping et 21,4 % en Bâti.

**Tableau 3.19**  
Effets de l'occupation du sol sur le périmètre interdit des sources

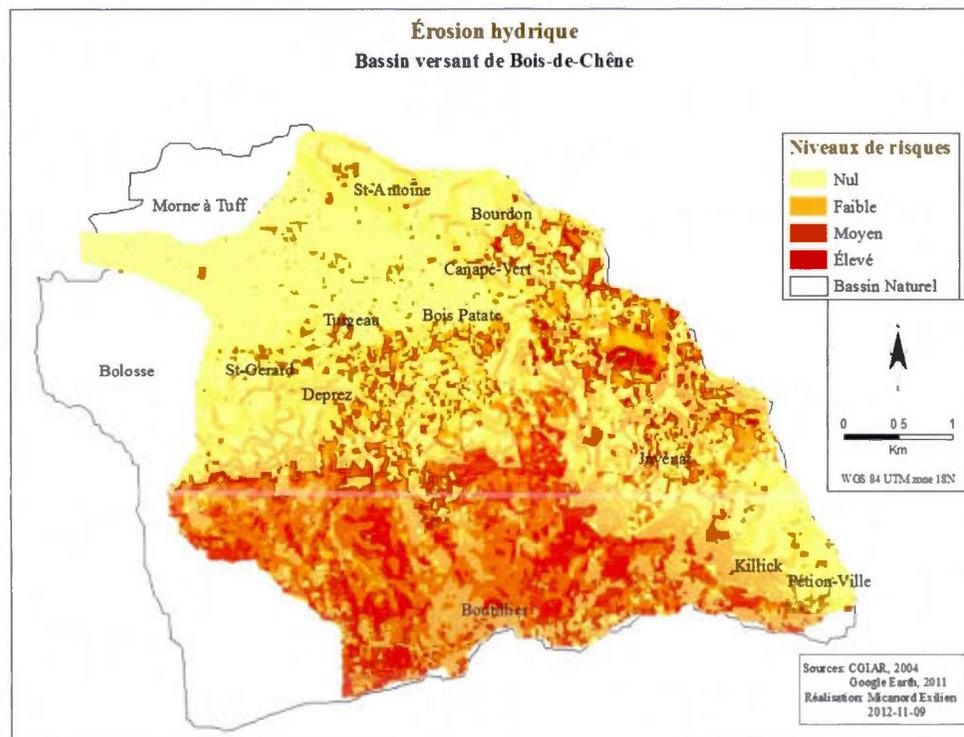
Classe	Carrefour-Feuilles (%)	Turgeau (%)	Cérissier (%)	Plaisance (%)
Boisé dense	0	65	0	2,6
Boisé clair	0	12	0	33,6
Agriculture-Landscaping	0	10	10	42,4
Bâti	100	13	90	21,4
Total	100	100	100	100

### 3.1.4. Les risques hydrologiques du bassin versant

#### 3.1.4.1. Risques d'érosion superficielle

La superposition des couches d'informations pour la détermination des risques d'érosion superficielle a impliqué les étapes suivantes :

- 1) Affichage de la couche des classes des pentes du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne réalisée à partir du MNT élaboré par le CGIAR-CSI;
- 2) Affichage de la couche d'occupation du sol de 2010 réalisée à partir des images de *Google Earth* ;
- 3) Évaluation des éventualités de l'érosion du sol par l'eau selon des niveaux faible, moyen et élevé, et aussi suivant leur répartition spatiale.



**Figure 3.16** Carte des risques d'érosion hydrique du bassin versant.

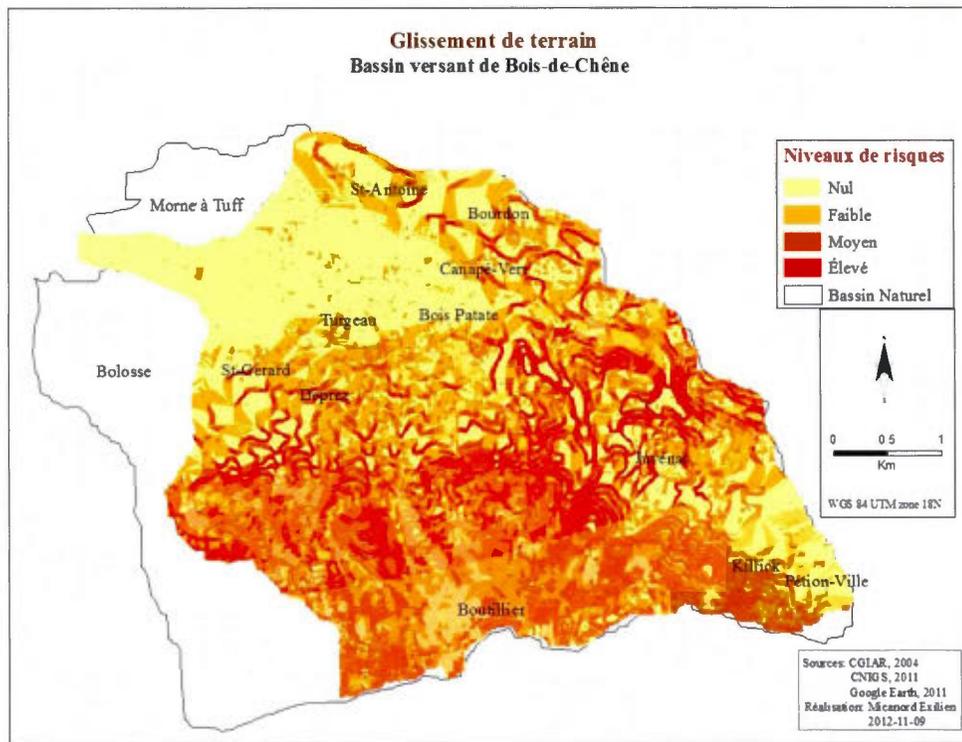
Ainsi, les risques sont repartis dans la figure 3.16 suivant quatre niveaux dans: nul, faible, moyen et élevé. Ils sont nuls en grande partie dans le nord-ouest du bassin. Leur niveau est moyennement faible dans la partie est et moyennement élevé dans celle du sud-ouest.

#### **3.1.4.2. Risques de glissement de terrain**

Le processus permettant d'évaluer les risques de glissement de terrain a été le suivant :

- 1) Affichage de la couche de géologie de surface du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne provenant du CNIGS ;
- 2) Affichage de la couche des classes des pentes du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne réalisée à partir du MNT élaboré par le CGIAR-CSI;
- 3) Affichage de la couche d'occupation du sol de 2010 réalisée à partir des images de *Google Earth* ;
- 4) Évaluation des éventualités de l'érosion en masse selon des niveaux faible, moyen et élevé, et aussi suivant leur répartition spatiale.

Selon la figure 3.17, les risques d'érosion en masse comme les glissements de terrain et les éboulements sont aussi repartis en quatre niveaux : nul, faible, moyen et élevé. Dans la partie du nord-ouest et dans l'extrémité du sud-est, ils sont plutôt nuls et faibles. Dans le nord-est comprenant les quartiers de Saint-Antoine, Bourdon et Canapé-Vert, et le centre suivant la direction NE-SO, une grande partie du bassin est confronté à des niveaux moyen et élevé. Ainsi, les quartiers de Deprez, de Juvénat, de Kilick et de Boutilliers sont aussi à des risques moyennement élevés.



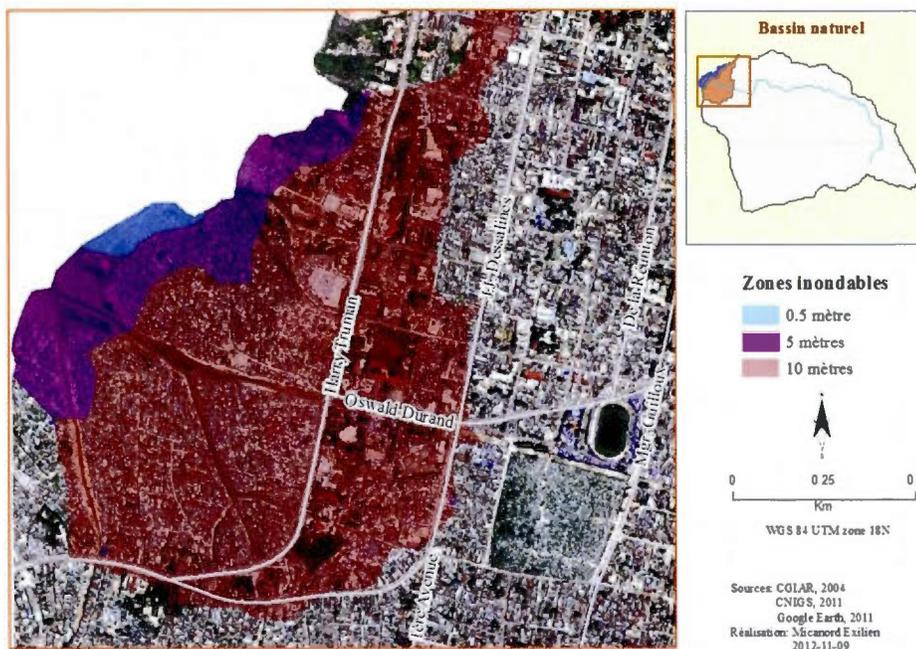
**Figure 3.17** Carte des risques de mouvement en masse de sols du bassin.

### 3.1.4.3. Risques d'inondation

Pour la détermination des risques d'érosion superficielle, les principales étapes du processus ont été les suivantes :

- 1) Affichage de la couche des courbes de niveau du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne réalisée à partir du MNT élaboré par le CGIAR-CSI;
- 2) Affichage de la couche d'occupation du sol de 2010 réalisée à partir des images de *Google Earth* ;
- 3) Identification des secteurs en aval du bassin pouvant être immergés par des élévations de l'eau de mer suivant des niveaux de 0.5 m, de 5.0 m et de 10.0 m.

**Risques d'inondations**  
**Bassin versant de Bois-de-Chêne**



**Figure 3.18 :** Carte des zones à risques d'inondation en aval du bassin versant.

Ainsi, selon la figure 3.18, on a trois niveaux de risques correspondant à des altitudes de 0.5 m, de 5.0 m et de 10.0 m correspondant à des courbes de niveau. Le premier niveau de 0.5 m couvre le littoral, et les autres niveaux de 5.0 m et de 10.0 m concernent les quartiers situés en aval du boulevard J.J. Dessalines et correspondent à des élévations de la masse d'eau marine pour des temps et des probabilités de réussite non définis.

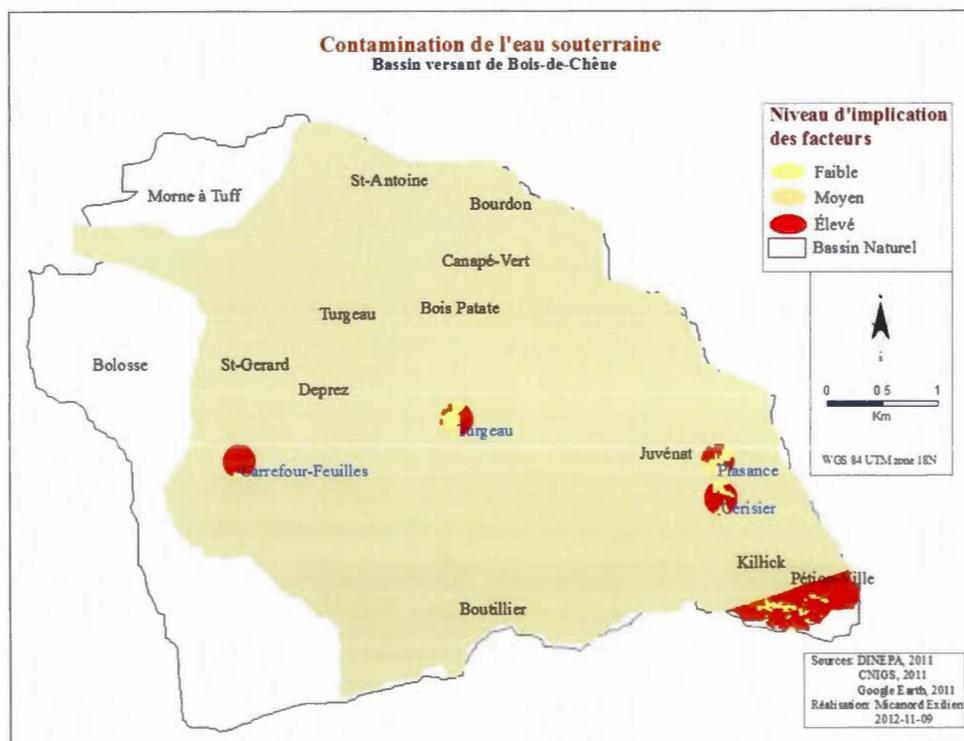
#### 3.1.4.4. Risques de contamination d'eau

La superposition des couches d'information pour la détermination des risques de contamination d'eau a impliqué les étapes suivantes :

- 1) Affichage de la couche des coordonnées géographiques des sources de la DINEPA;
- 2) Affichage de la couche d'hydrogéologie du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne provenant du CNIGS

- 3) Affichage de la couche d'occupation du sol de 2010 réalisée à partir des images de *Google Earth* ;
- 4) Évaluation des risques de contamination de l'eau souterraine suivant les niveaux d'implication et la localisation des facteurs favorables.

Suivant les constats précédents, toute l'aire du bassin occupée par le bâti peut favoriser la pollution des nappes phréatiques. Compte tenu des paramètres utilisés, deux catégories de facteurs sont identifiés comme étant ceux pouvant conduire mieux aux risques de contamination d'eau souterraine : la domination des périmètres de sécurité des sources d'eau potable par le bâti et l'urbanisation de Pétiou-Ville au-dessus d'un aquifère karstique. La figure 3.19 présente la répartition spatiale de la variation du degré d'implication des facteurs suivant trois niveaux : faible, moyen et élevé. Ainsi, le niveau d'implication des facteurs est complètement élevé pour Pétiou-Ville et les sources de Carrefour-Feuilles de Cérurier. Il est à un degré moyen pour celles de Turgeau et de Plaisance.



**Figure 3.19** Carte des facteurs de risques de contamination de l'eau souterraine.

## **4.1 Discussion des résultats**

La discussion concerne la relation entre les données exploitées et les informations obtenues, les limites et les alternatives dans l'interprétation des résultats, et leur comparaison avec ceux d'autres études de mêmes intérêts.

### **4.1.1 Relation entre les résultats obtenus et les données exploitées**

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

- Les caractéristiques physiographiques du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne ont été complètement obtenues à partir du modèle numérique de terrain du CGIAR-CSI et du plan de drainage provenant de la SNC-Lavalin ;
- Les potentialités hydrologiques du bassin versant ont été calculées à partir des données pluviométriques provenant des FIC et dont la fiabilité a été vérifiée au préalable.
- Le changement d'occupation du sol entre les années 2002 et 2010 a été déterminé par l'utilisation des images tirées de la base de données de *Google Earth* suite à une correction géométrique à partir de l'ortho photo de 2002 du CNIGS ;
- Les aléas et les risques hydrologiques ont été déterminés par la superposition des informations géologiques, hydrogéologique, topographique et de celles de l'occupation du sol de 2010. Ainsi, les risques hydrologiques ont été évalués par leur mise en relation avec la population comme vulnérabilité.

### **4.1.2 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 données pluviométriques ont indiqué la hauteur totale mensuelle, donc de celle totale de l'année aussi. Ce qui ne nous a pas permis d'effectuer de calcul des crues et des risques d'inondation à l'échelle journalière.

- La quantité de sols effectivement érodée n'a pas pu être calculée, car il nous faudrait du temps nécessaire à l'acquisition des données morphopédologiques ainsi que leur manipulation pour en tirer les facteurs de l'érosion.
- Les images de trois bandes spectrales (Bleu, Vert, Rouge) ne nous ont pas permis d'avoir plus de détails que ceux obtenus lors de l'échantillonnage. Ainsi lors de la classification, il n'a pas été possible de séparer les toitures en tôles oxydées et (ou) en tuiles des zones bâties des sols fraîchement sarclées pour l'agriculture. C'était le même cas pour les toitures en béton armé et les affleurements du calcaire dans le sommet des versants.

#### **4.1.3 Comparaison des résultats**

La comparaison des résultats de notre recherche à ceux d'autres études, avec lesquelles elle a des intérêts communs, nous permet de mieux nous prononcer sur les éventuels risques hydrologiques sur le versant nord du Morne l'Hôpital, compte tenu du changement d'occupation du sol, l'existence d'aléas hydrologiques à l'intérieur du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne et sa forte population.

##### **A. Les risques d'érosions**

L'érosion superficielle est évidente sur le versant du morne l'Hôpital, car on a assisté en même temps à la suppression du boisé, à l'artificialisation des sols et à l'élimination des structures pouvant maximiser l'infiltration des eaux de pluie (Prévil, *loc. cit.*). Ce qui est confirmé par l'observation des sédiments accumulés dans la ravine Bois-de-Chêne. Ces derniers sont spécialement constitués de fragments de calcaires, et de roches volcaniques issus d'une érosion poussée jusqu'au démantèlement du cœur du Massif de la Selle (Tingue, 2010).

Pas mal de cas d'érosion en masse sont déjà enregistrés sur le versant nord du Morne l'Hôpital. Ainsi, le 11 décembre 1987, un glissement de terrain sur la route reliant Port-au-Prince et Pétion-ville au niveau de Bourdon-Reinbold a causé l'effondrement de la route. Aussi, lors des glissements de terrain du 5 au 6 octobre 2003 à Boulard-Acacia au niveau de Bourdon, une trentaine de maisons ont été fissurées (Haïti, 2012a)

## **B. Les risques d'inondations**

Par des crues débordantes, la ravine Bois-de-Chêne ayant déjà causé des dégâts dans les quartiers du bas du Morne Calvaire, à la vallée du Bourdon à Turgeau, à Bas-peu-de-chose et à Carrefour-Feuilles, a endommagé en totalité et en partie certaines maisons lors d'une crue du 5 octobre 2003 (*Id.*, 2003). De plus, les conditions sont tout à fait réunies pour que des séismes tsunamigènes se produisent en Haïti, en particulier des zones côtières comme la partie aval du bassin versant de la ravine, car les forts séismes des Grandes Antilles ont le plus souvent leur épicentre en mer et sont en relation avec les grandes fosses situées au nord de Porto-Rico et Hispaniola (*Id.*, 2012b, *Le phénomène de Tsunami*).

## **C. Les risques de contamination d'eau**

La potabilité de l'eau souterraine fournie par le Morne l'Hôpital est loin d'être assurée, car la présence des coliformes totaux et fécaux dans l'eau des sources captées a montré qu'elle ne répond pas aux normes établies par l'OMS. De plus, le niveau de pollution tend à augmenter avec le temps (Toussaint, *op. cit.* p. 57).

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les perturbations de l'espace sont tout à fait évidentes à l'intérieur du bassin versant de la ravine Bois-de-Chêne durant la période séparant les années 2002 et 2010. Ainsi, malgré la faible augmentation de l'ensemble du boisé, qui met en évidence l'existence de la mise en place de certaines activités afin de préserver la couverture végétale du versant nord du Morne l'Hôpital, l'expansion urbaine y ayant dominé ne laisse aucun doute quant aux éventuels risques hydrologiques.

Pour l'érosion de surface, les risques sont minces en fonction de la progression relative de l'espace du bâti entraînant du même coup le revêtement de la surface du sol. Il est aussi vrai sur l'espace de végétations si l'on se base sur la progression des proportions de boisé dense et de boisé clairsemé. Mais, le revêtement de la surface entraîne inéluctablement une diminution du taux d'infiltration de l'eau de pluie pour l'alimentation des nappes phréatiques. Quant aux risques de glissement de terrain, ils sont assez élevés ; dans les zones de fortes pentes allant au-delà de 40% se trouvent des couches superficielles marneuses qui peuvent décrocher à tout moment sur le sommet calcaire. Il lui suffit d'avoir un niveau d'humidité et (ou) de vibration nécessaire pour le déclenchement. Ce qui n'est pas étrange à cette zone où les concepts « ouragan » et « séisme » font désormais partie du vocabulaire courant.

La topographie du bassin liée à l'excédent d'humidité lors des saisons pluvieuses est favorable au ruissellement dont le débit peut être réduit par la présence de couverture végétale tout en facilitant le processus d'infiltration jusqu'à alimenter les nappes phréatiques. Dans les cas du bassin à l'étude, il est évident de penser à l'augmentation de ce débit, car les perturbations la couverture végétale au fil du temps sont susceptibles de provoquer l'imperméabilisation du sol. Ainsi, il est possible d'affirmer un niveau élevé des risques

d'inondation de certains quartiers du centre-ville de Port-au-Prince situés en aval suite à des crues débordantes et l'agitation de l'eau de mer lors des intempéries tropicales.

En plus de ses influences sur les quantités de terres et d'eau de ruissellement qui devraient être déplacées par les processus naturels à l'intérieur du bassin versant, l'occupation du sol 2010 est très inquiétante pour la qualité de l'eau infiltrée. Au dessus des aquifères karstiques très productifs et aussi de ceux fissurés d'où les points d'eau sont captés, le bâti a eu son empreinte. Ainsi, les risques de pollution et de contamination d'eau de boisson sont considérablement élevés avec des conséquences graves, prévisibles et de grande envergure, car ce versant nord du Morne l'Hôpital alimente des nappes phréatiques pouvant échanger de flux avec d'autres.

Alors, il est devenu nécessaire de recommander certaines pistes de prise de décisions pouvant conduire à mieux élaborer des plans de mitigation de ces risques hydrologiques dans le moyen et le long terme.

1. Étant donné que l'OSAMH est une institution légalement reconnue et créée exclusivement pour répondre aux besoins du Morne l'Hôpital, les recommandations suivantes font état de ce qui lui est nécessaire :
  - Attribution d'un budget adéquat pour l'acquisition de matériels logistiques, des équipements et aussi pour le recrutement du personnel ;
  - Disposition de cadres compétents pour la réflexion sur les complexités socio-économiques et environnementales de la région et aussi, pour la proposition de plans d'aménagement tenant compte de la réalité du terrain ;
  - Mise en place d'une mutualité permanente avec les forces de l'ordre pour la sécurité du personnel, des équipements, des actions et des biens sur le terrain.
2. Pour une meilleure estimation des ressources en eau des différents bassins sur le versant nord Morne l'Hôpital, la disponibilité de certaines informations cruciales nécessitent :
  - La mise en place de stations météorologiques locales pour la collecte de certaines données à l'échelle journalière ;
  - L'acquisition des certains instruments pour mesurer le débit de ruissellement et celui de crues solides lors des périodes pluvieuses.

## APPENDICE A

### DONNÉES CLIMATIQUES ET TRAITEMENTS INTERMÉDIAIRES

**Tableau A1**

Données climatiques moyennes de Port-au-Prince de 1961 à 1990

Mois	Pluviométrie mensuelle (mm)	Température Moyenne (°C)	Température maximale (°C)	Température minimale (°C)	Humidité relative (%)	ETP mensuelle (mm)
Latitude : 18,524°      Longitude : -72,341°      Altitude : 1 122 m						
Janvier	35,5	17,9	24,8	11,0	78,3	93
Février	47,3	18,3	25,4	11,3	76,7	98
Mar	83,4	18,9	25,9	12,0	76,4	124
Avril	158,6	19,5	26,1	13,0	77,7	126
Mai	309,9	20,2	26,4	14,1	80,9	124
Juin	207,8	21,1	27,3	14,9	79,2	126
Juillet	150,1	21,2	27,7	14,8	76,3	139
Aout	221,2	21,4	27,9	15,0	77,0	139
Septembre	262,6	21,2	27,4	15,0	80,7	117
Octobre	259,5	20,5	26,7	14,4	82,0	105
Novembre	124,2	19,5	25,7	13,4	81,3	90
Déc.	39,7	18,5	25,0	12,0	78,9	90
<b>Total</b>	<b>1 899,8</b>					<b>1 372,3</b>

(Sources : FAO, 2012)

**Tableau A2**  
Hauteur de pluie mensuelle totale en mm de Juvénat de 1978 à 2010

Année	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Totale
1978	77	20	91	314	186	44	93	43.5	224	125	51	0	1268.5
1979	13	97.7	71.6	133.7	378.3	180.2	126	99.4	106.1	164.5	92.4	0	1462.9
1980	43.5	16	42.5	233	217.3	93.3	91	161.6	202	116.9	61.3	41	1319.4
1981	37.9	84.9	70.7	150.7	256.8	122.8	107.1	116.3	103.9	303.6	43.9	50	1448.6
1982	43.5	15.7	75	256.3	242.9	112.9	12.3	92.1	125.2	183.9	73.8	2.3	1235.9
1983	9.9	86.9	96.6	123.5	317.8	148	27.1	170.3	203.9	115.6	55.5	0.1	1355.2
1984	103.5	65.4	58.2	126.3	300.5	238.7	116.1	79.7	192.8	165.3	93.7	27.9	1568.1
1985	17.4	4.4	143.7	182	190.3	63.2	54.8	59.4	202.2	48.7	70.4	0	1036.5
1986	186.5	65.6	102.7	258.3	202.4	48.9	15.4	88.5	92.8	223.9	136.1	15.1	1436.2
1987	8.5	23.9	34.2	179.7	321.1	142.2	191.5	16.3	173.7	217.5	50.6	66.3	1425.5
1988	2.7	79.7	65.7	171.3	205.4	194.6	77.9	78.8	274.7	86	24.8	7	1268.6
1989	44.3	7.9	209.3	112.2	298.1	49	114.1	237.6	71.6	291.9	59.8	13.5	1509.3
1990	11.3	124.8	116.8	185.9	89.5	227.6	28.5	96	302.9	343.9	64.2	4.2	1595.6
1991	0	28.5	138.7	204.5	194.9	48.7	36.7	143.8	113.2	136.8	90.8	0	1136.6
1992	18.1	24.6	76.1	103.5	245	24.4	54.6	72.6	215.6	211.7	169.8	10.5	1226.5
1993	39.7	61.5	171.3	55.2	322.7	36.6	33	88.9	84.2	98.5	73.7	52.4	1117.7
1994	12.9	74	241.6	244.4	165.9	15	21.6	161.5	56.3	187.8	335.5	5.8	1522.3
1995	11.9	194.1	160.8	61.5	216	103.9	83.8	188.2	72.7	170	46.4	36.6	1345.9
1996	12.5	180.6	79	140.1	334.6	51.2	33.5	210.9	84.6	161	89.2	53.4	1430.6
1997	73.1	44.7	84.8	56.4	134.5	78.8	77.3	65.7	123.7	207.2	191.6	31.4	1169.2
1998	27.6	162.8	117.6	63.6	191.3	312.4	144.3	219.2	359.2	40.3	14.3	7.8	1660.4
1999	0	0	0	132	267.3	201.8	121.5	116.6	72.3	207.4	69.3	4.2	1192.4
2000	9.2	33.5	43.2	195.7	198.3	42.9	116.2	146.2	276.5	201.2	17.5	59.4	1339.8
2001	27	18	68.3	133.2	281.9	86.6	160.6	104.4	94.2	76.9	75.7	89	1215.8
2002	5	32	177.6	395.8	116.8	119.9	117.2	67.7	81.2	107.4	74.7	23.5	1318.8
2003	57.6	3.5	92.1	264.6	102.8	184	179	221.3	196.6	571.4	29.6	9.1	1911.6
2004	10.9	80.7	57.8	154.1	404.4	12	90	62.5	175.4	145.7	6.6	42	1242.1
2005	35.6	0.2	0.3	93	253.1	228.7	68.6	219.7	134.3	197.9	53.8	20.1	1305.3
2006	45.2	16.6	123	211.1	131.7	202.3	138.4	214.7	91.6	155.7	143.2	20.6	1494.1
2007	33.5	85.2	279.4	72.3	421.4	99.8	263.6	64.9	225.2	262	75.8	1.7	1884.8
2008	5.2	18.4	60.2	323.7	204.6	56.1	74.8	321.1	265.6	167	143.9	11.2	1651.8
2009	43.2	158.2	252.2	176.6	217.4	182.3	56	112	185.7	105.2	167.2	0	1656.0
2010	65.6	51.3	71.7	98.8	303.5	190	215.7	150.9	101.4	321.6	148.6	75	1794.1

(Source : FIC, 2011)

**Tableau A3**  
Hauteur de pluie mensuelle totale en mm du Centre-ville de 1978 à 2010

Année	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Totale
1978	62.8	123.3	58.4	226.9	174.1	72.4	72.6	94.4	163.4	140.7	62.4	0	1251.4
1979	8.7	62.7	89.1	192.4	217.6	166.2	98.4	171.4	165.1	247.6	42.2	0	1461.4
1980	5.8	3.2	25.3	212.9	163.9	72.9	59.8	149.1	100.3	99.5	46.6	41.3	980.6
1981	109.5	90.6	58.3	227.7	291.2	106.5	79.4	139.9	29.1	263.6	38	29.3	1463.1
1982	72.2	9	83.9	155.6	253.3	149.6	24.4	101.4	106.6	204.4	35.8	2.5	1198.7
1983	19.7	8.3	50.4	57.7	320.5	137	29.4	150.9	225.3	117.1	55.9	0	1172.2
1984	151	55.6	36	97.5	209.1	312.5	52.7	60.7	195.6	97.4	102.8	27.6	1398.5
1985	55	59	126.8	139.7	127.6	56.9	44	58.1	72.2	35.4	87.9	0	862.6
1986	135.4	35.9	140.4	156.7	199.1	38.8	32.7	45.8	47.2	149	98	12.7	1091.7
1987	22.2	16.5	36.2	105.2	156.3	160.2	178.5	15.2	139.5	295.5	19.5	116.3	1261.1
1988	2	27.2	33.5	100.1	32	141	122.5	89.4	242.9	287	375	18	1470.6
1989	77.5	8	273.4	135.4	163.2	64.8	97	319	136	314	66	10.8	1665.1
1990	0	68	94	156	48	55.7	37	152.8	202.5	188.2	163.1	8.2	1173.5
1991	0	18.5	152.6	208.4	207.9	68.3	13.4	101.2	124.6	102.4	95.2	0.2	1092.7
1992	29.9	39.8	56.7	73.8	236.5	47.2	74.5	84	136.9	308	275.7	24.5	1387.5
1993	40.5	43.2	86	337.6	204.1	47.6	24	59.3	196	76.4	146.3	3.5	1264.5
1994	23	52.4	145.7	304.6	177.9	55.5	29.5	193.5	104.8	168.4	386.4	19.5	1661.2
1995	16.7	108.1	100.2	51.8	111.9	19.9	78.9	180.1	86.8	47.3	101.6	52.7	956.0
1996	7	224.2	165.7	126.8	245	51.4	43.5	231.3	119.6	123.8	74.9	44.2	1457.4
1997	103.2	26.2	87.8	38.7	133.4	52.5	52.5	48.3	106.6	125.9	90.2	10.1	875.4
1998	39.7	98.9	168.8	121.5	67.6	206	75.4	182.6	247.3	115	78.3	95.3	1496.4
1999	80.9	126.3	231.4	80.2	120.4	169.6	113.5	103.6	139.4	129.8	107.3	5.4	1407.8
2000	11	75.5	12	128.2	237.8	56.7	88.3	180.5	330.6	112.4	29.5	25.1	1287.6
2001	37.1	15.8	68.2	163.5	57.2	136.2	153.2	132.2	105.5	99	70.6	95.2	1133.7
2002	0.4	35.9	165.3	366.8	166.4	89.8	58.2	128.8	47.5	128.8	105.6	7.4	1300.9
2003	63	56.1	92.2	138.9	106.5	102.9	115.3	312.4	284.3	309.5	31.7	10.1	1622.9
2004	21.3	59.5	53.9	180.5	212.4	2.5	71.3	63.4	95.8	214.3	11.8	13.4	1000.1
2005	7.8	2.2	0	69.5	152.4	93.7	89.3	138.5	109.7	174.9	33.9	3.6	875.5
2006	14.7	23.3	61.4	255.1	178.2	113	137.2	128.2	69.3	109.1	136	26.1	1251.6
2007	25.2	41.5	161.9	90.6	257.6	39.6	199.5	80.2	241.8	155	148.3	0	1441.2
2008	9.2	22.8	83.7	233.8	168.2	68.7	37.1	261.2	235.4	192.1	39.9	1.3	1353.4
2009	6.9	83.7	142.7	167.8	221.2	183.5	59.6	78.9	268.1	161.2	139.7	0	1513.3
2010	30.9	0	45.2	117.8	247.9	152.2	158.8	207.4	146	223.8	91.6	92.2	1513.8

(Source : FIC, 2011)

**Tableau A4**  
Pluviométrie totale annuelle moyenne en mm selon les polygones de Thiessen

Année	Juvénat (61 %)	Centre-ville (39 %)	Moyenne pondérée
1978	773.785	488.046	1261.831
1979	892.369	569.946	1462.315
1980	804.834	382.434	1187.268
1981	883.646	570.609	1454.255
1982	753.899	467.493	1221.392
1983	826.672	457.158	1283.83
1984	956.541	545.415	1501.956
1985	632.265	336.414	968.679
1986	876.082	425.763	1301.845
1987	869.555	491.829	1361.384
1988	773.846	573.534	1347.38
1989	920.673	649.389	1570.062
1990	973.316	457.665	1430.981
1991	693.326	426.153	1119.479
1992	748.165	541.125	1289.29
1993	681.797	493.155	1174.952
1994	928.603	647.868	1576.471
1995	820.999	372.84	1193.839
1996	872.666	568.386	1441.052
1997	713.212	341.406	1054.618
1998	1012.844	583.596	1596.44
1999	727.364	549.042	1276.406
2000	817.278	502.164	1319.442
2001	741.638	442.143	1183.781
2002	804.468	507.351	1311.819
2003	1166.076	632.931	1799.007
2004	757.681	390.039	1147.72
2005	796.233	341.445	1137.678
2006	911.401	488.124	1399.525
2007	1149.728	562.068	1711.796
2008	1007.598	527.826	1535.424
2009	1010.16	590.187	1600.347
2010	1094.401	590.382	1684.783
<b>Moyenne</b>			<b>1360.8</b>

**Tableau A5**  
 Probabilité empirique de la pluie totale annuelle par la méthode Weibull

Ordre	Pluie totale annuelle	Identification	Probabilité empirique
1	968.68	1985	0.0294
2	1054.6	1997	0.0588
3	1119.5	1991	0.0882
4	1137.7	2005	0.1176
5	1147.7	2004	0.1471
6	1175.0	1993	0.1765
7	1183.8	2001	0.2059
8	1187.3	1980	0.2353
9	1193.8	1995	0.2647
10	1221.4	1982	0.2941
11	1261.8	1978	0.3235
12	1276.4	1999	0.3529
13	1283.8	1983	0.3824
14	1289.3	1992	0.4118
15	1301.8	1986	0.4412
16	1311.8	2002	0.4706
17	1319.4	2000	0.5000
18	1347.4	1988	0.5294
19	1361.4	1987	0.5588
20	1399.5	2006	0.5882
21	1431.0	1990	0.6176
22	1441.1	1996	0.6471
23	1454.3	1981	0.6765
24	1462.3	1979	0.7059
25	1502.0	1984	0.7353
26	1535.4	2008	0.7647
27	1570.1	1989	0.7941
28	1576.5	1994	0.8235
29	1596.4	1998	0.8529
30	1600.3	2009	0.8824
31	1684.8	2010	0.9118
32	1711.8	2007	0.9412
33	1799.0	2003	0.9706

(Source : FIC, 2011)

**Tableau A6**  
Probabilité théorique de la pluie totale annuelle

Distribution	Période retour (année)	Probabilité	Pluie théorique (mm)	Écart- type	Intervalle de confiance (95%)
Loi de Gauss	10000	0.9999	2106.3	99.50	1911.2 - 2301.4
	2000	0.9995	2020.4	89.53	1844.9 - 2195.9
	1000	0.999	1980.3	84.93	1813.8 - 2146.8
	200	0.995	1877.2	73.38	1733.4 - 2021.1
	100	0.99	1827.2	67.94	1694.0 - 1960.4
	50	0.98	1772.6	62.18	1650.7 - 1894.5
	20	0.95	1690.6	54.01	1584.7 - 1796.5
	10	0.9	1617.7	47.42	1524.8 - 1710.7
	5	0.8	1529.5	40.77	1449.6 - 1609.4
	3	0.7	1447.1	36.52	1375.5 - 1518.7
Loi de Galton	2	0.5	1360.8	34.89	1292.4 - 1429.2
	10000	0.9999	2235.4	137.65	1965.6 - 2505.3
	2000	0.9995	2118.5	119.64	1884.0 - 2353.0
	1000	0.999	2065.2	111.64	1846.4 - 2284.1
	200	0.995	1968.7	106.25	1760.4 - 2177.0
	100	0.99	1897.6	94.83	1711.7 - 2083.5
	50	0.98	1822.9	83.37	1659.5 - 1986.3
	20	0.95	1716.2	68.17	1582.6 - 1849.9
	10	0.9	1626.7	56.74	1515.5 - 1737.9
	5	0.8	1526.0	43.97	1439.8 - 1612.2
Loi de Pearson III	3	0.7	1440.5	37.99	1366.1 - 1515.0
	2	0.5	1351.1	34.73	1283.0 - 1419.2
	10000	0.9999	2300.3	256.17	1798.1 - 2802.5
	2000	0.9995	2166.4	205.21	1764.1 - 2568.7
	1000	0.999	2106.1	183.70	1746.0 - 2466.2
	200	0.995	1957.5	135.21	1692.4 - 2222.6
	100	0.99	1888.7	115.22	1662.8 - 2114.6
	50	0.98	1815.9	96.03	1627.7 - 2004.2
	20	0.95	1711.5	72.57	1569.2 - 1853.7
	10	0.9	1623.3	57.16	1511.2 - 1735.3
5	0.8	1522.2	45.14	1433.7 - 1610.7	
3	0.7	1435.3	39.34	1358.1 - 1512.4	
2	0.5	1345.8	36.67	1274.0 - 1417.7	

**Tableau A7**  
 Probabilité empirique de la pluie maximale annuelle (mm) par la méthode Weibull

Ordre	Juvénat			Centre-ville		
	Pluie maximale	Identification	Probabilité empirique	Pluie maximale	Identification	Probabilité empirique
1	202.2	1985	0.0294	133.4	1997	0.0294
2	204.5	1991	0.0588	139.7	1985	0.0588
3	207.2	1997	0.0882	147.6	1979	0.0882
4	211.1	2006	0.1176	163.5	2001	0.1176
5	216	1995	0.1471	174.9	2005	0.1471
6	233	1980	0.1765	180.1	1995	0.1765
7	245	1992	0.2059	199.1	1986	0.2059
8	252.2	2009	0.2353	202.5	1990	0.2353
9	253.1	2005	0.2647	208.4	1991	0.2647
10	256.3	1982	0.2941	212.9	1980	0.2941
11	258.3	1986	0.3235	214.3	2004	0.3235
12	267.3	1999	0.3529	226.9	1978	0.3529
13	274.7	1988	0.3824	231.4	1999	0.3824
14	276.5	2000	0.4118	245	1996	0.4118
15	281.9	2001	0.4412	247.3	1998	0.4412
16	298.1	1989	0.4706	247.9	2010	0.4706
17	300.5	1984	0.5000	253.3	1982	0.5000
18	303.6	1981	0.5294	255.1	2006	0.5294
19	314	1978	0.5588	257.6	2007	0.5588
20	317.8	1983	0.5882	261.2	2008	0.5882
21	321.1	1987	0.6176	268.1	2009	0.6176
22	321.6	2010	0.6471	291.2	1981	0.6471
23	322.7	1993	0.6765	295.5	1987	0.6765
24	323.7	2008	0.7059	308	1992	0.7059
25	334.6	1996	0.7353	312.4	2003	0.7353
26	335.5	1994	0.7647	312.5	1984	0.7647
27	343.9	1990	0.7941	319	1989	0.7941
28	359.2	1998	0.8235	320.5	1983	0.8235
29	378.3	1979	0.8529	330.6	2000	0.8529
30	395.8	2002	0.8824	337.6	1993	0.8824
31	404.4	2004	0.9118	366.8	2002	0.9118
32	421.4	2007	0.9412	375	1988	0.9412
33	571.4	2003	0.9706	386.4	1994	0.9706

**Tableau A8**  
Probabilité théorique de la pluie maximale annuelle en mm de Juvénat

Période retour	Probabilité	Lognormal (M-V)	Gumbel (M-V)	Gumbel (M-M)	LogPearsonIII (M-M)	LogPearsonIII (SAM)
10000	0.9999	705.1	806.9	815.3	870.7	868.8
2000	0.9995	637.7	713	719.8	747	745.7
1000	0.999	608.5	672.5	678.7	697.1	696
200	0.995	539.4	578.4	583.1	587.8	587.2
100	0.99	508.8	537.8	541.8	543.1	542.7
50	0.98	477.3	497.1	500.4	499.5	499.2
20	0.95	433.7	442.7	445.2	442.9	442.7
10	0.9	398.3	400.7	402.5	400	400
5	0.8	359.3	356.9	358	355.9	355.9
3	0.6667	326.3	322	322.5	321.8	321.8
2	0.5	295	290.7	290.7	290.1	290.1
Chi-2		5.06	6.03	6.03	6.03	6.03
Seuil d'acceptabilité		5%	5%	5%	5%	5%

**Tableau A9**  
Probabilité théorique de la pluie maximale annuelle en mm du Centre-ville

Période retour	Probabilité	Lognormal (M-V)	Gumbel (M-V)	Gumbel (M-M)	LogPearsonIII (M-M)	LogPearsonIII (SAM)
10000	0.9999	710.5	809.1	717.3	470	536.3
2000	0.9995	628.8	706.4	631.1	453.9	504.6
1000	0.999	593.9	662.1	594	445.5	489.5
200	0.995	512.8	559.2	507.8	421.4	449.6
100	0.99	477.6	514.8	470.6	408.4	429.9
50	0.98	441.8	470.2	433.2	393.1	408.2
20	0.95	393.2	410.8	383.4	368.2	375.5
10	0.9	354.4	364.8	344.9	344.5	346.7
5	0.8	312.6	316.9	304.7	314.3	312.5
3	0.6667	278	278.8	272.7	285.3	282
2	0.5	245.9	244.5	244	254.5	251
Chi-2		6.52	8.45	11.36	2.15	4.09
Seuil d'acceptabilité		5%	5%	1%	5%	5%

Avec :

M-V : Maximum de vraisemblance,

MM : Méthode des Moments,

SAM : Sundry Averages Method.

**Tableau A10**  
Bilan hydrologique de la ravine Bois-de-Chêne

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
<b>Pluie</b>	36.2	56.6	102	165	216	112	88.8	132.0	157	178.0	93.5	23.8
<b>ETP</b>	93.0	98.0	124	126	124	126	139.5	139.5	117	105.4	90.0	89.9
<b>Variation</b>	-57.0	-41.0	-22	39	62	-14	-51.0	-7.6	40	73.0	3.5	-66.0

## APPENDICE B

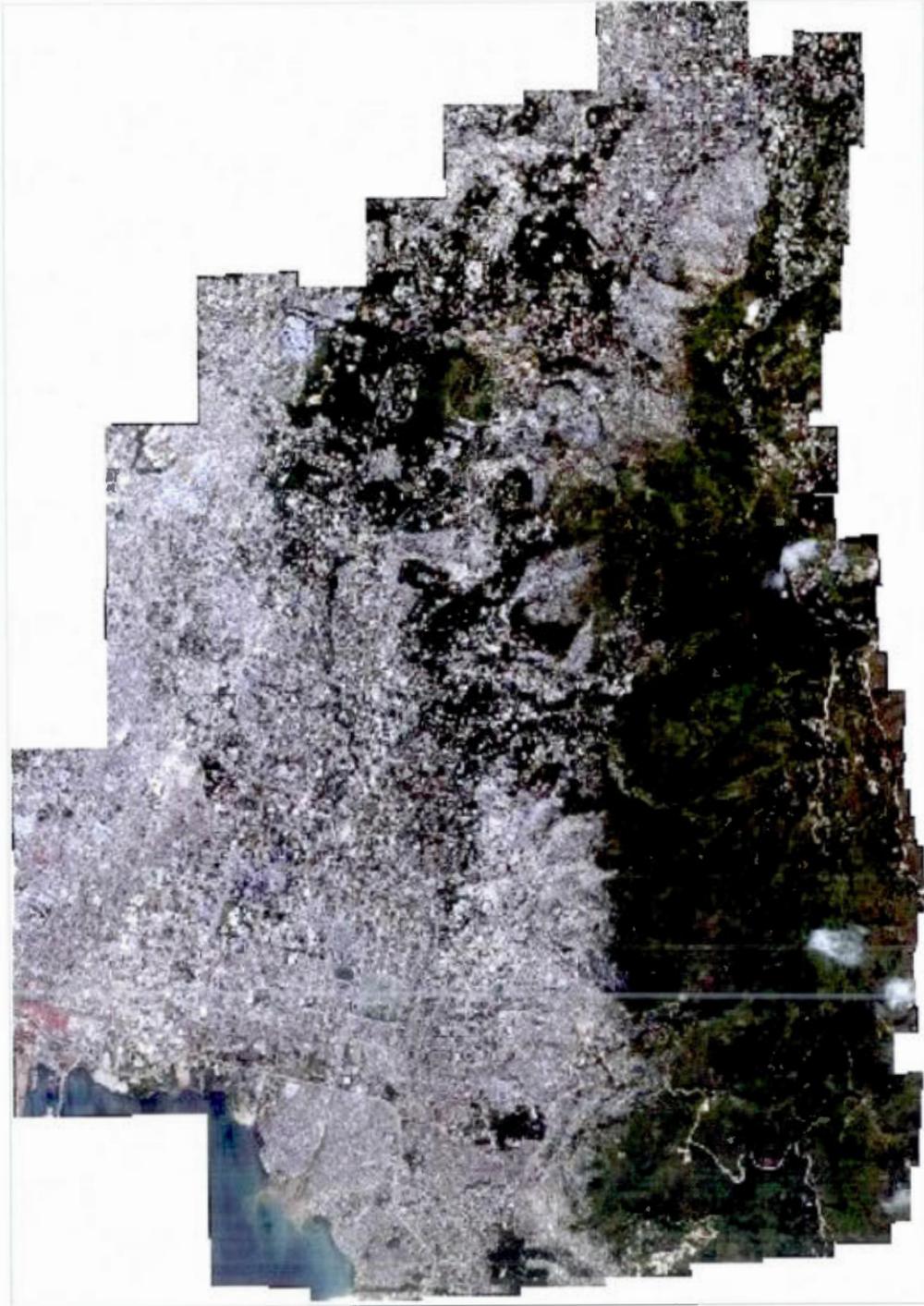
### ÉTAPES ET PRODUITS DE LA CLASSIFICATION DES IMAGES



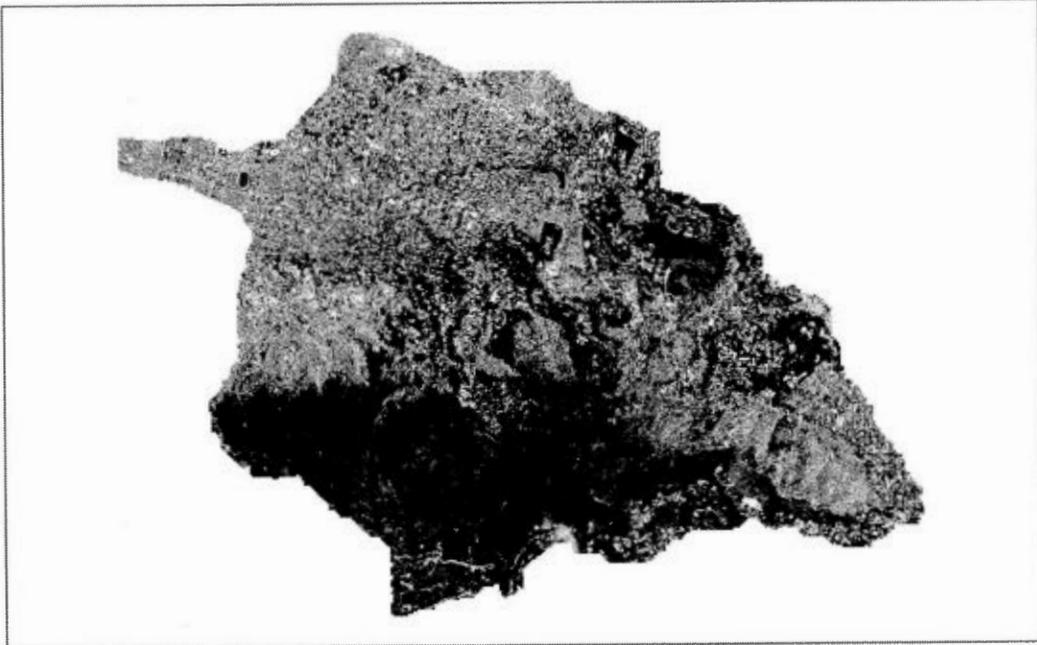
**Figure B1** : Une image de 2002 (Sources : Google Earth, 2011).



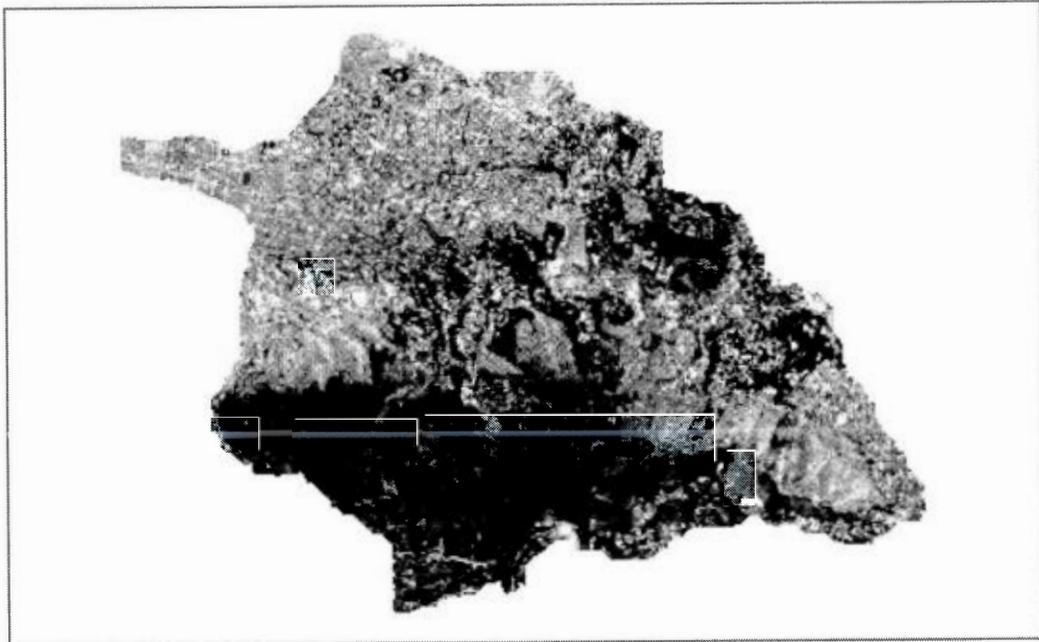
**Figure B2** : La même image de 2002: après correction géométrique.



**Figure B3** : Image de couverture de 2010 après mosaïquage.



**Figure B4 :** Image de 2010 coupée et rééchantillonnée à 1 m de résolution



**Figure B5 :** Images de 2010 coupée et rééchantillonnée à 20 m de résolution

## APPENDICE C

### IMAGES DES CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE PORT-AU-PRINCE

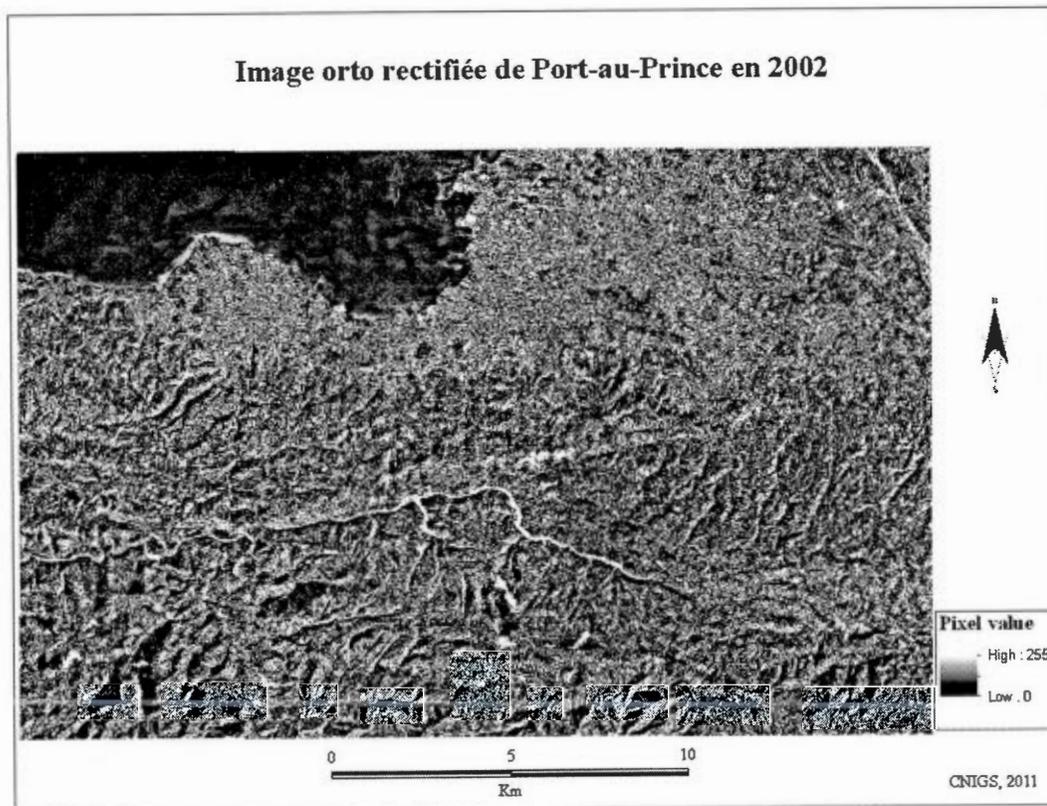
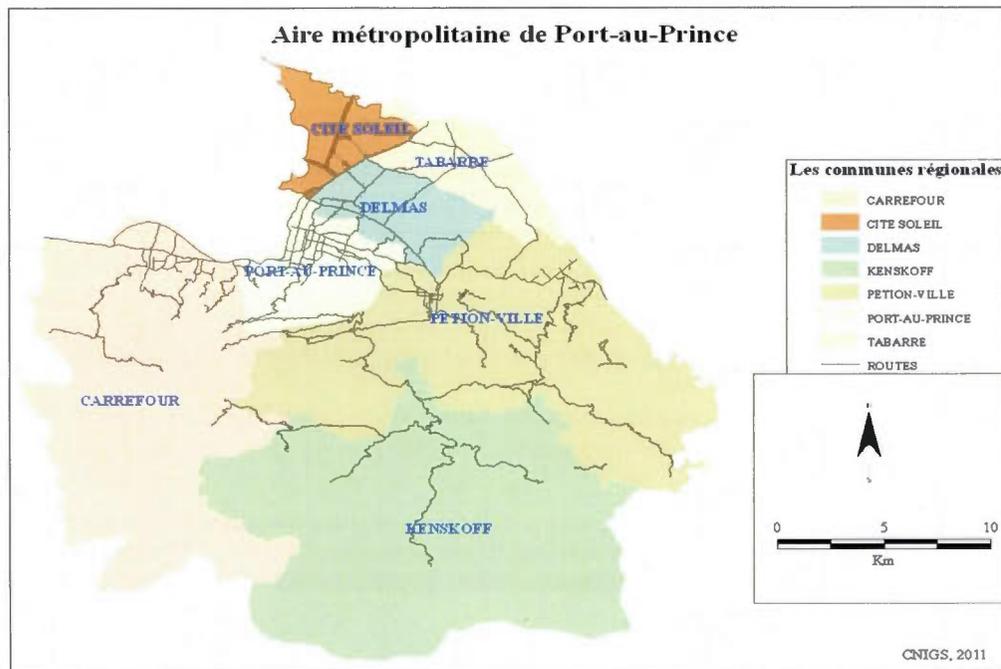
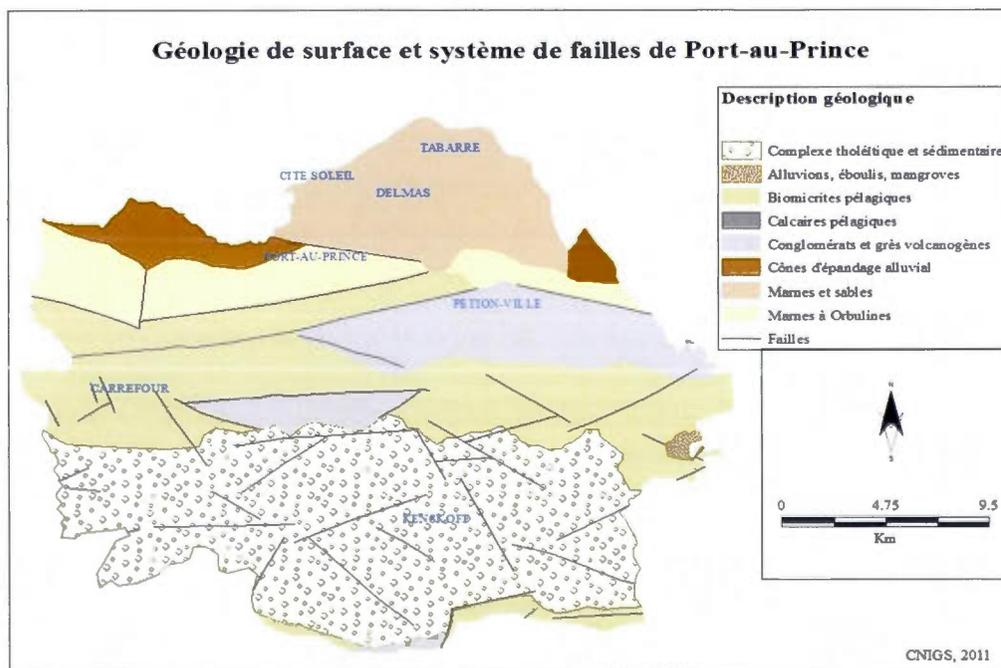


Figure C1 : Image de 2012 ortho rectifiée de référence (Sources : CNIGS, 2011).



**Figure C1 : Délimitation administrative de Port-au-Prince (Sources: CNIGS, 2011).**



**Figure C2 : Géologie de Port-au-Prince (Sources: CNIGS, 2011).**

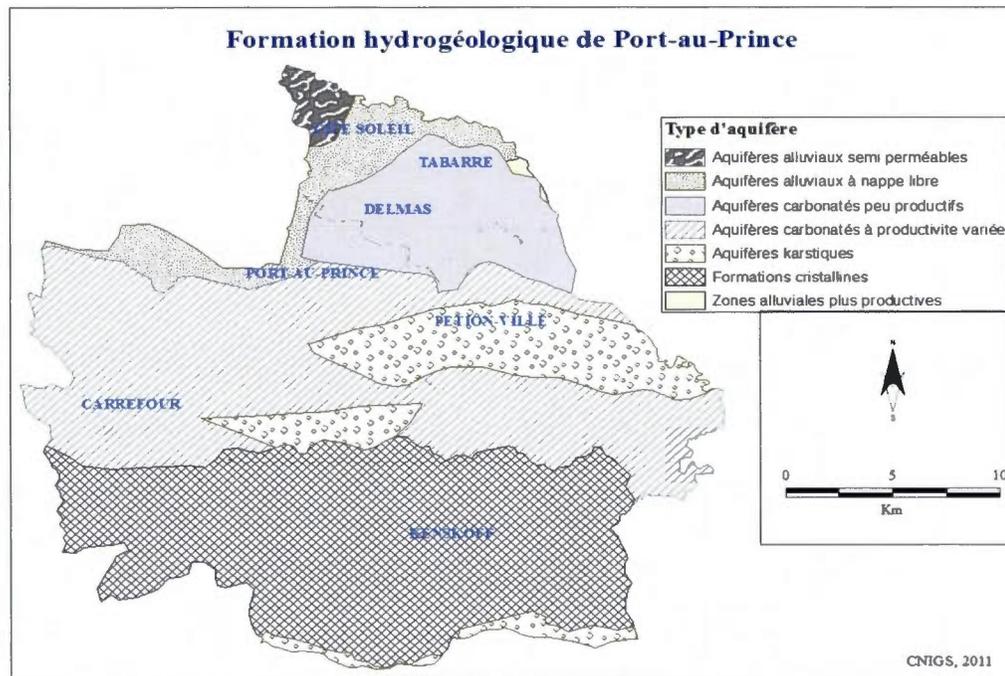


Figure C3 : Hydrogéologie de Port-au-Prince (Sources : CNIGS, 2011).

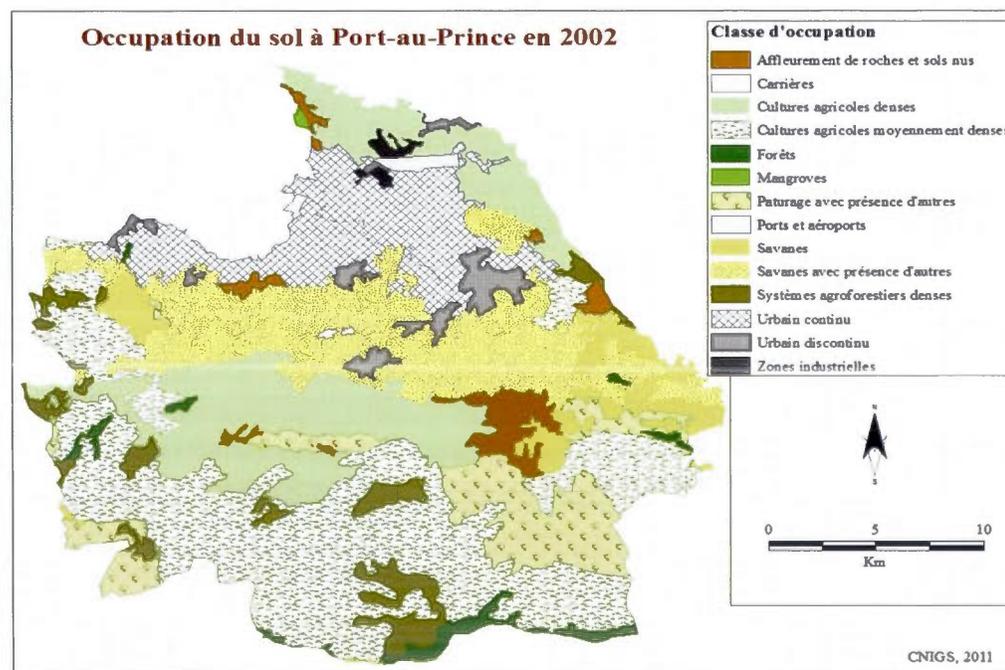
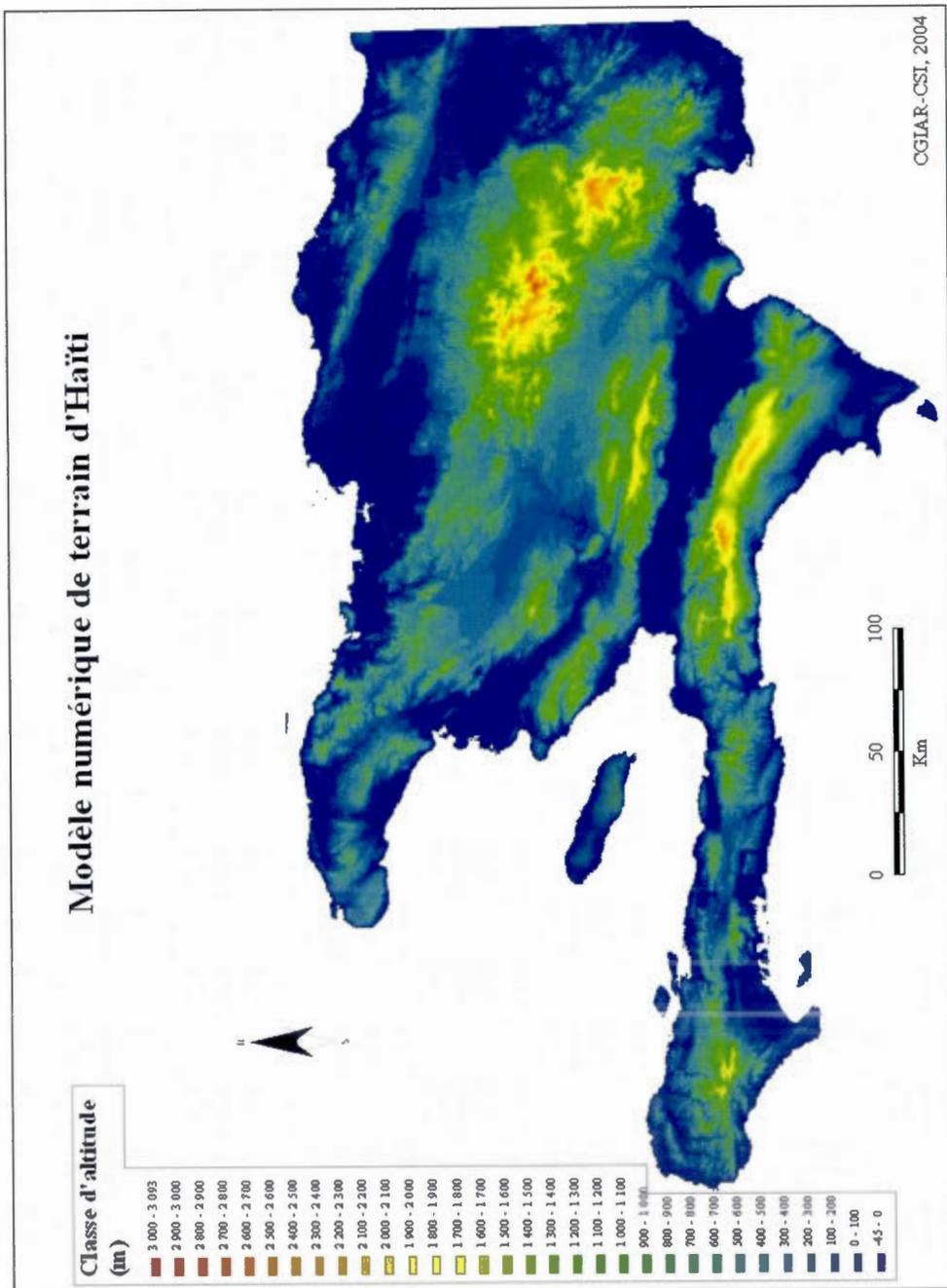
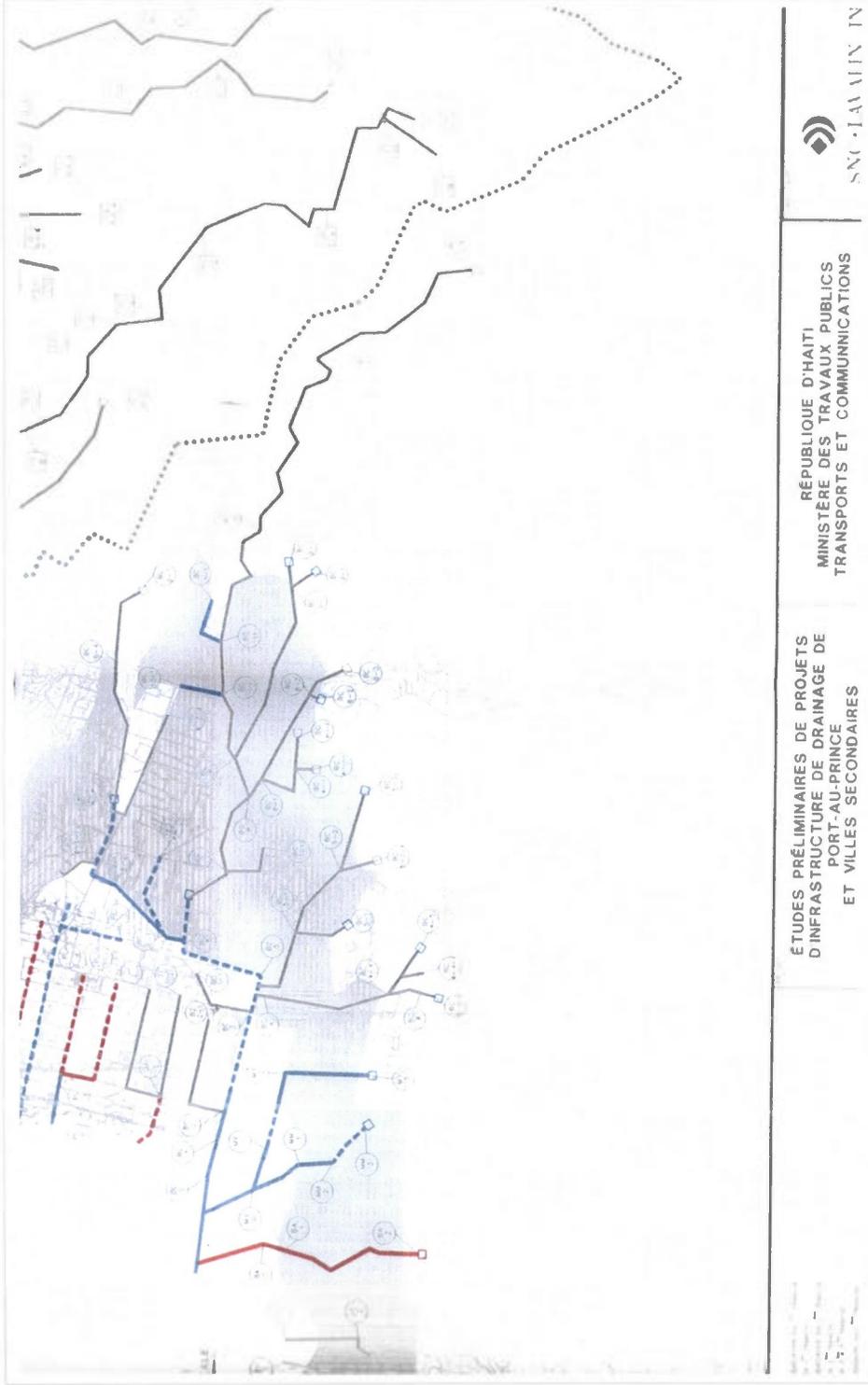


Figure C4: Occupation du sol en 2002 à Port-au-Prince (Sources : CNIGS, 2011).



**Figure C5 :** Modèle numérique de terrain d'Haïti (Sources : CGIAR-CSI, 2004).



## APPENDICES D

### COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT ET DÉNIVELÉE SPÉCIFIQUE

**Tableau D1**  
Coefficient de ruissellement pour différents secteurs

Secteur	Coefficient
Secteur commercial	
Centre-ville	0,70 – 0,95
Banlieue	0,50 – 0,70
Secteur résidentiel	
Unifamilial	0,30 – 0,50
Unités multiples (détachées)	0,40 – 0,60
Unités multiples (en rangée)	0,60 – 0,70
Banlieue (peu développé)	0,10 – 0,25
Banlieue	0,25 – 0,40
Appartements	0,50 – 0,70
Secteur industriel	
Léger	0,50 – 0,80
Dense	0,60 – 0,90
Parcs, Cimetières, Prairie	0,10 – 0,25
Terrains de jeux	0,20 – 0,35
En friche	0,10 – 0,30

(Sources: Musy, 2005)

**Tableau D2**  
Classification de relief en fonction de la dénivelée spécifique de l'ORSTOM

Valeurs de $D_s$			Classe de reliefs
	$D_s <$	10 m	Relief très faible
10 m	$< D_s <$	25 m	Relief faible
25 m	$< D_s <$	50 m	Relief assez faible
50 m	$< D_s <$	100 m	Relief modéré
100 m	$< D_s <$	250 m	Relief assez fort
250 m	$< D_s <$	500 m	Relief fort
500 m	$< D_s$		Relief très fort

(Source : Laborde, 2000)

## BIBLIOGRAPHIE

- ABDERRHAMAN, A. (1993). *Modélisation et gestion des ressources en eau évaluation des impacts des débits extrêmes dans le bassin versant d'Ourika (Haut-Atlas, Maroc) : probabilités, grandeurs et coût*. Montréal, Université du Québec à Montréal, Département de Géographie, mémoire de maîtrise, 252 pages + XV.
- AHMAD, R. (1995). «Landslide in Jamaica: extent, significance and geological zonation», in Barker, David and Duncan F.M. McGregor (eds). *Environment and development in the Caribbean - Geographical perspectives*. p. 147-169. Kongston, The Press, University of the West Indies. [En ligne].  
(<http://www.artibonite.org/attachments/article/16/Rapport%20diagnostic%20haut%20bassin%20versant%20-%20OXFAM%20Quebec.pdf>).  
Page consultée le 15 janvier 2011.
- ARCGIS : *What's new in ArcGIS10.1*, version 10. Redlands (California) : Esri, 2012.  
[En ligne]. ([http://resources.arcgis.com/en/help/pdf/whats\\_new\\_in\\_arcgis.pdf](http://resources.arcgis.com/en/help/pdf/whats_new_in_arcgis.pdf)).  
Page consulté le 10 février 2012.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (2007). *Dictionnaire de l'Environnement*. 2<sup>e</sup> éd. Paris, AFNOR, 262 p.
- AUZOU, P et al (2000). *Le médical Auzou dictionnaire : A-Z*. Paris, Auzou, 203 p.
- BAKUN et al (2010). «Significant Earthquakes on the Enriquillo Fault system, Hispaniola, 1500 – 2010: implication for seismic hazard», in *Bulletin of the Seismological Society of America*, [En ligne].  
([http://woodshole.er.usgs.gov/staffpages/utenbrink/my%20publications/Haiti\\_BSSA\\_in\\_press.pdf](http://woodshole.er.usgs.gov/staffpages/utenbrink/my%20publications/Haiti_BSSA_in_press.pdf)). Page consultée le 02 avril 2012.
- BELIVEAU, J. (2006). *Analyse fréquentielle multivariée de la pointe, du volume et de la durée de la crue*. Québec, Université Laval, Département de Mathématiques, mémoire de maîtrise, 50 pages + X
- CALAIS, E. (2002). *L'aléa sismique en Haït : Cadre géographique et temporel*. West Lafayette, Purdue University, Department of Earth and Atmospheric Sciences.  
[En ligne].  
([http://www.franceseisme.fr/donnees/presse/Alea\\_sismique%20HAITI2.pdf](http://www.franceseisme.fr/donnees/presse/Alea_sismique%20HAITI2.pdf)).  
Page consulté le 02 avril 2012.

- CALOZ, R. (dir.) (2001). *Précis de télédétection*, vol 3, Sainte-Foy (Québec), Presse de l'Université du Québec, 386 p.
- CAMPY, M. et MACAIRE, J.J. (1989). *Géologie des formations superficielles : géodynamique-faciès – utilisation*. Paris, Masson, 433 p.
- CHAIRE EN HYDROLOGIE STATISTIQUE, CRSNG/Hydro-Québec/ALCAN (1998). *HYFRAN*, version 1.2 bêta 1.3, Québec, Institut National de la Recherche Scientifique-Eau Terre et Environnement, Université du Québec.
- CHOW, V. T. et al (1964). *Handbook of applied hydrology: a compendium of water-resources technology*. Vol 1. Illinois, McGraw-Hill, 1467 p.
- DAVID, J. (1999). « Le Morne de l'Hôpital », in G. HOLLY (dir.), *Les problèmes environnementaux de la région métropolitaine de Port-au-Prince*. p. 41-58, Port-au-Prince, Collection du 250<sup>e</sup> anniversaire.
- DEGRAFF, J.V. (1991). *Determining the significance of landslide activity: examples from the Eastern Caribbean*. Caribbean Geography. [En ligne]. (<http://www.artibonite.org/attachments/article/16/Rapport%20diagnostic%20haut%20bassin%20versant%20-%20OXFAM%20Quebec.pdf>). Page consultée le 15 janvier 2011.
- DESBIENS, R. (1976). *Le glissement de yamaska (samedi, 2 novembre 1974)*, Montréal, Presses de l'Université du Québec.
- FACULTE D'AGRONOMIE ET DE MEDECINE VETERINAIRE (1990). *Manuel d'agronomie tropicale appliqué à l'agriculture haïtienne*. Damien (Port-au-Prince), Université d'État d'Haïti, 490 p.
- FLAGEOLLET, J.C. (1989). *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Paris, Masson, 224 p.
- FAO (1987). *Techniques biologiques et conservation des sols en Haïti*. Ch. Lilin et P. Koohafkan, Rome. [En ligne]. (<http://www.fao.org/docrep/006/T0165F/T0165F00.HTM>). Page consultée le 10 mars 2011.
- \_\_\_\_\_ (1993). *Guide pratique d'aménagement des bassins versants: Étude et planification*. T.C. Sheng, Rome. [En ligne]. (<http://www.fao.org/docrep/006/T0165F/T0165F00.HTM>). Page consultée le 10 mars 2011.
- \_\_\_\_\_ (1994). *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*. Montpellier, E. Roose. [En ligne]. (<http://www.fao.org/docrep/T1765F/t1765f00.htm>). Page consultée le 15 avril 2011.
- FOURNIER, F. (1960). *Climat et érosion. La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques*. Paris, Presses universitaires de France, 201 p.

- GEENS, S. (2011). « About Ogle Earth », in *Ogle Earth*.  
[En ligne]. (<http://ogleearth.com/author/admin>). Page consultée le 15 Octobre 2011.
- GOERGE, P et VERGER, F. (2006). *Dictionnaire de la géographie*. Paris, Presses universitaires de France.
- GILLI, E. et al. (2008). *Hydrogéologie : Objets, méthodes, applications*, 2<sup>e</sup> éd. Paris, Dunod, 339 p
- HAÏTI. Ministère des Travaux Publics Transport et de la Communication (1980). *Projet de drainage des eaux pluviales de Port-au-Prince*. Haïti.
- \_\_\_\_\_. (1986). « Décret du 06 novembre 1986 », *Le moniteur* (Haïti), 141<sup>e</sup> Année, No 90, p 3224-3234.
- \_\_\_\_\_. Ministère de l'Environnement (2003). *Présentation synthétique des Études de Vulnérabilité et d'Adaptation aux Conditions climatiques extrêmes en Haïti et dans la Caraïbe*. R. Louis, Haïti. [En ligne].  
([http://www.napa-ana.org/extranapa/UserFiles/File/country/Haiti/Haiti%20Synthesis\\_vulnerability\\_Dec.2003.pdf](http://www.napa-ana.org/extranapa/UserFiles/File/country/Haiti/Haiti%20Synthesis_vulnerability_Dec.2003.pdf)). Page consulté le 02 février 2011.
- \_\_\_\_\_. Ministère de la Planification et de la Coopération Externe (2004). *Carte de pauvreté d'Haïti*. Haïti.
- \_\_\_\_\_. Institut Haïtien de Statistique et d'Informatique (2005). « Répartition de la Population par groupe d'âge et sexe selon la commune de résidence habituelle et le milieu de résidence », in *Le 4<sup>ème</sup> Recensement Général de la Population et de l'Habitat*. Haïti. [En ligne]. (<http://www.ihsi.ht/tableau/population2.htm>). Page consultée le 10 février 2011.
- \_\_\_\_\_. Bureau des Mines et de l'Énergie (2007). *Exploitation des granulats dans le Département de l'Ouest*. Haïti.
- \_\_\_\_\_. Institut Haïtien de Statistique et d'Informatique (2006). Population totale, population de 18 ans et plus : ménages et densités estimés en 2009. Haïti. [En ligne].  
([http://www.ihsi.ht/pdf/projection/POPTOTAL&MENAGDENS\\_ESTIM2009.pdf](http://www.ihsi.ht/pdf/projection/POPTOTAL&MENAGDENS_ESTIM2009.pdf)). Page consultée le 10 février 2011.
- \_\_\_\_\_. Direction de la Protection Civile (2010). *Analyse des menaces naturelles multiples en Haïti*. 26 mars 2010, Port-au-Prince. Haïti. [En ligne].  
(<http://haiti.cridlac.org/XML/fre/doc18838/doc18838-contenido.pdf>). Page consulté le 15 janvier 2011.
- \_\_\_\_\_. Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (2011), *Projet de récupération des périmètres de protection immédiats des sources captées du système d'alimentation en eau potable de la région métropolitaine de Port-au-Prince*. Haïti.

- \_\_\_\_\_. Bureau des Mines et de l'Énergie (2012a). *Connaissons mieux les glissements de terrain*. C. Prépetit, Haïti. [En ligne]. ([http://www.bme.gouv.ht/risques%20 geologiques/ Les%20glissements%20de%20 terrain.pdf](http://www.bme.gouv.ht/risques%20geologiques/Les%20glissements%20de%20terrain.pdf)). Page consultée le 20 janvier 2012.
- \_\_\_\_\_. Bureau des Mines et de l'Énergie (2012a). *Le phénomène de Tsunami*. C. Prépetit, Haïti. [En ligne]. (<http://www.bme.gouv.ht/risques%20geologiques/Le%20TSUNAMI%20.pdf>). Page consultée le 20 janvier 2012.
- HOLLY, G. (dir.) (1999). « Eau potable et assainissement », chap. in *Les problèmes environnementaux de la région métropolitaine de Port-au-Prince*. p. 59-88, Port-au-Prince, Collection du 250<sup>e</sup> anniversaire.
- HOULE, C. (2009). *Évolution de l'occupation du sol du territoire de l'île de Montréal entre 1989 et 2001 et ses effets sur la formation d'îlots de chaleur*. Montréal, Université du Québec à Montréal, Département de Géographie, Rapport de projet, 124 pages + XIV.
- LABORDE, J.P. (2009). *Éléments d'hydrologie de surface*. Nice, Université de Nice– Sophia Antipolis, Département Hydroinformatique et Ingénierie de l'Eau. [En ligne]. ([http://hydrologie.org/BIB/manuels/Laborde\\_2009.pdf](http://hydrologie.org/BIB/manuels/Laborde_2009.pdf)). Page consulté 17 septembre 2011.
- LLAMAS, J. (1993). *Hydrologie générale : Principes et applications*. 2<sup>e</sup> éd, Boucherville, Gaëtan Morin, 527 p.
- LESTUZZI, P. et al (2010). *Haïti: Analyses et leçons d'un désastre*. Lausanne, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire d'informatique et de mécanique appliquées à la construction. [En ligne]. (<http://infoscience.epfl.ch/record/150393>). Page consultée le 14 novembre 2010.
- MANCHE, Y. (1999). «Risques naturels en montagne et analyse spatiale», *Cybergeog*, Dossiers, 4èmes Rencontres de Théo Quant, Besançon, France 11-12 février 1999. [En ligne]. (<http://cybergeog.revues.org/5170>). Page consultée le 03 mars 2011.
- MICHEL, Y. (2004). «Île de la Réunion: Les cyclones», in *Horizo* [En ligne]. ([Http://www.horizo.com/reunion/reunion cyclones.htm](http://www.horizo.com/reunion/reunion_cyclones.htm)). Page consultée le 13 novembre 2010.
- MOUMI, M. (1988). *Mode d'utilisation, évaluation, et aménagement des ressources en eau, à la montagne cas de l'Ourika, (Maroc)*. Montréal, Université du Québec à Montréal, Département de Géographie, mémoire de maîtrise, 290 pages + XVIII.
- MOUREAU, M. et BRACE, G. (2000). *Dictionnaire des sciences de la terre anglais- français, français-anglais = Comprehensive dictionary of earth science : English-French, French-English*. Paris, Technip.

- MUSY, A. (2005) *Hydrologie générale*. [En ligne]. (<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>). Page consultée le 03 novembre 2010.
- ODILE, R. (1985). *Port-au-Prince pour une analyse socio-spatiale de la question foncière urbaine*. Montréal, Université du Québec à Montréal, Département de Géographie, thèse de maîtrise, 105 pages + VI.
- OMS (2010). « Eau, assainissement et santé : Les maladies liées à l'eau ». [En ligne]. ([http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/diseases/diseasefact/fr/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/diseasefact/fr/index.html)). Page consultée le 20 septembre 2012.
- PCI GEOMATICS: Fly ! User guide*, version 10.3. Richmond Hill (Ontario): PCI Geomatics Enterprises, Inc.
- PLAMANDON, A. (2006). *Projet binational de réhabilitation du bassin versant du fleuve Artibonite, dans la zone frontalière entre Haïti et la République dominicaine - Projet no 4456/A-031937 : Rapport de l'étude diagnostique*. [En ligne]. (<http://www.artibonite.org/attachments/article/16/Rapport%20diagnostic%20haut%20bassin%20versant%20-%20OXFAM%20Quebec.pdf>). Page consultée le 15 janvier 2011.
- PRÉVIL, C. et al (2003). «Salinisation des nappes aquifères en Haïti : état de la situation», *L'Écho du ROCAHD*. [En ligne]. ([http://www.rocahd.org/NOUVELLES\\_du\\_DEVELOPPEMENT/PDF/EchoDuROCAHD\\_v06no02\\_030601.pdf](http://www.rocahd.org/NOUVELLES_du_DEVELOPPEMENT/PDF/EchoDuROCAHD_v06no02_030601.pdf)). Page consultée le 30 mars 2011.
- RAY K, L. et al (1982). *Hydrology for Engineers*. 2<sup>nd</sup> Ed. New York, McGraw-Hill, 508 p.
- SNC-LAVALIN, (1999). *Études préliminaires des infrastructures de drainage de Port-au-Prince et Villes secondaires*. Pétiion-Ville, Haïti.
- SOUADI, Y. (2011). *L'érosion hydrique au Maghreb, étude d'un cas : le bassin versant de l'oued Barbara (Tunisie septentrionale)*. Montréal, Université du Québec à Montréal, Département de Géographie, thèse de maîtrise, 130 pages + IX.
- TINGUÉ, W. et al (2010). «Mineralogical and geotechnical characterization of dredged sediments from the canal Bois-de-Chêne», *Aqua-LAC*. [En ligne]. ([http://www.unesco.org/uy/ci/fileadmin/phi/aqualac/Tingue\\_et\\_al.pdf](http://www.unesco.org/uy/ci/fileadmin/phi/aqualac/Tingue_et_al.pdf)). Page consultée le 03 mars 2011.
- TOUSSAINT, D. (2011). *Analyse de la qualité de l'eau distribuée a Port-au-Prince(Haïti) en vue de son amélioration*. Liège, Université de Liège, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, mémoire de maîtrise, 79 pages + XV.