

INSTITUT DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES AVANCÉES D'HAÏTI
(ISTEAH)

CONCEPTION D'UN DOUBLE SYSTÈME D'ASSAINISSEMENT DES EAUX PLUVIALES
ET DES USÉES ADAPTÉ AUX IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES : CAS
DE LA CITÉ DU SAVOIR, HAÏTI.

SERGE DESROSIERS

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MAÎTRISE EN
SCIENCES
SPÉCIALITÉ : GÉNIE DES RESSOURCES HYDRIQUES

AVRIL 2024

INSTITUT DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES AVANCÉES D'HAÏTI

(ISTEAH)

Ce mémoire intitulé :

CONCEPTION D'UN DOUBLE SYSTÈME D'ASSAINISSEMENT DES EAUX PLUVIALES
ET DES USÉES ADAPTÉ AUX IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES: CAS DE
LA CITÉ DU SAVOIR, HAÏTI.

Présenté par : DESROSIERS Serge

en vue de l'obtention du diplôme de : Maitrise en Sciences a

A été dument accepté par le jury d'examen constitué de :

Mme SMITH Rose-Michelle, Ph. D., présidente

M. ROSSI Luca, Ph. D., directeur de recherche et membre

M. FUAMBA Musandji, Ph. D., membre

M. NELSON Valentino, Ph. D., représentant de la Direction des affaires académiques

DÉDICACE

À mon pays,
à ma femme Nadège Destiné DESROSIERS,
à toute ma famille,
à mes collègues et
à mes ami-e-s

REMERCIEMENTS

J'exprime ma gratitude à mon directeur de mémoire M. Luca **ROSSI**, Ph.D, de m'avoir fait confiance et qui m'a soutenu quant à la réalisation de ce mémoire et à M. Musandji **FUAMBA**, Ph.D, mon professeur et tuteur de stage à l'Université Polytechnique de Montréal.

Je tiens à remercier ma belle femme qui est toujours à mes côtés, mon épouse Nadège Destiné **DESROSIERS**, l'irremplaçable, modèle de labeur, de persévérance, pour sa prévenance et bienveillance continue durant mes cycles d'études.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude aux membres de ma belle-famille pour leur soutien inconditionnel et support inestimable, particulièrement à mon admirable mère, Bertha, tatie Madeleine, mon beau père, ma belle-mère, à mes belles-sœurs Stéphanie, Carline et Rébéca, modèles de persévérance pour leur réconforts, leurs prières et pour m'avoir enseigné l'assiduité.

Je remercie M. Samuel **PIERRE**, Ph.D, Président de l'ISTEAH, pour son temps dans ma formation académique.

Merci à Affaires Mondiales Canada pour l'octroi d'une bourse de recherche dans le cadre du Programme des Futurs Leaders dans les Amériques (PFLA), à l'École Polytechnique de Montréal pour m'avoir reçue comme stagiaire de recherche dans son Laboratoire de Réseautique et d'Informatique Mobile (LARIM) et au département de Génie Civil et des Mines, et à toutes les personnes qui y ont facilité mon intégration, ont contribué au succès de mon stage et agrémenté mon séjour de souvenirs mémorables.

Je remercie M. Pierreman-Fils **PIERRE**, le président des associations des étudiants de l'ISTEAH, pour ses premiers grains de semence dans la gestion optimale, ses conseils et sa disponibilité.

Merci aux familles Alexandre-Jacquet qui, à leur manière, ont grandement facilité cette expérience. Merci également à mes amies: Marie Carria **POGNON** et Maeva **CIPRIEN**, pour leurs encouragements continuels; et ceux de mes communautés professionnelles.

À toute la communauté de **ISTEAH**, merci pour l'opportunité et la qualité de l'enseignement. Enfin, à vous qui prenez le temps de lire ce mémoire, un grand merci !

RÉSUMÉ

Le double système d'assainissement des eaux pluviales et des eaux usées de la Cité du Savoir en Haïti représente une solution innovante pour améliorer la qualité de vie des habitants et renforcer la résilience face aux effets des changements climatiques. L'étude menée prévoit une diminution des précipitations, ce qui nécessite l'adoption de mesures d'adaptation telles que la récupération des eaux de pluie et des eaux usées en vue de leur réutilisation comme stratégie efficace contre la sécheresse et d'autres problèmes environnementaux. La mise en œuvre d'un système efficace de gestion des eaux usées et de pratiques adéquates de gestion des boues peut également avoir des effets positifs et contribuer à un avenir plus stable.

Le modèle utilisé par la Cité du Savoir est centré sur la gestion des eaux de pluie et des eaux usées, avec un accent particulier sur la collecte et la réutilisation de ces ressources dans une installation de récupération centralisée. L'application de la méthode du bilan hydrique permet d'illustrer concrètement les principes théoriques abordés. Le double système d'assainissement des eaux pluviales et des eaux usées présenté à la Cité du Savoir constitue une solution innovante pour améliorer la qualité de vie des habitants et renforcer la résilience face aux changements climatiques.

Malgré les fluctuations du climat haïtien, la Cité du Savoir fera preuve de résilience face aux changements climatiques. La construction d'une ville verte nécessitera le détournement des eaux de ruissellement vers un bassin de stockage et l'évacuation des eaux usées vers une installation de traitement. Cela permettra d'éviter le rejet de millions de mètres cubes d'eau contaminée dans la mer, dans l'atmosphère, et potentiellement de provoquer des inondations. L'eau récupérée pourra être utilisée pour la production d'eau potable, la pêche, l'élevage et l'agriculture sans avoir recours aux sources d'eau souterraines. Ce mémoire présente un modèle de gestion des eaux de drainage qui peut être adapté à différents types de projets dans le pays. Il est conçu pour faciliter la transition vers un paradigme de développement durable et une économie circulaire. La proposition suggère l'utilisation du biogaz comme moyen de s'adapter au changement climatique, d'assurer la durabilité, de maintenir la viabilité de l'écosystème, de réduire la quantité d'eau utilisée par les ménages et de recycler et réutiliser cette eau. Le coût du projet est estimé à 34 million euros.

ABSTRACT

The Cité du Savoir's dual rainwater and wastewater treatment system in Haiti represents an innovative solution for improving the quality of life of residents and strengthening resilience to the effects of climate change. The study predicts a decrease in rainfall, necessitating the adoption of adaptation measures such as the recovery of rainwater and wastewater for reuse as an effective strategy against drought and other environmental problems. Implementing an effective wastewater management system and proper sludge management practices can also have positive effects and contribute to a more stable future.

The model used by Cité du Savoir focuses on rainwater and wastewater management, with particular emphasis on the collection and reuse of these resources in a centralized reclamation facility. The application of the water balance method provides a concrete illustration of the theoretical principles discussed. The dual rainwater and wastewater treatment system presented at the Cité du Savoir is an innovative solution for improving the quality of life of residents and strengthening resilience in the face of climate change.

Despite the fluctuations of the Haitian climate, the Cité du Savoir will be resilient in the face of climate change. The construction of a green city will require the detour of run-off water to a storage basin and the evacuation of wastewater to a treatment facility. This will prevent millions of cubic meters of contaminated water from being discharged into the sea and atmosphere, and potentially causing flooding. The reclaimed water can be used for drinking water production, fishing, livestock and agriculture, without having to resort to groundwater sources. This brief presents a drainage water management model that can be adapted to different types of projects in the country. It is designed to facilitate the transition to a sustainable development paradigm and a circular economy. The proposal suggests the use of biogas as a means of adapting to climate change, ensuring sustainability, maintaining ecosystem viability, reducing the amount of water used by households and recycling and reusing this water. The cost estimate for the project is 34 million euros.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	ii
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS	xii
LISTE DES SYMBOLE	xiv
CHAPITRE 1	1
INTRODUCTION.....	1
1.1 Définitions et concepts de bases	1
1.1.1 Système d’assainissement des eaux pluviales	1
1.1.2 Système d’assainissement des eaux usées.....	2
1.1.3 Impacts des changements climatiques.....	3
1.1.4 Étude de cas.....	4
1.1.5 Évaluation des coûts.....	4
1.2 Éléments de problématique.....	4
1.2.1 Inadéquation des infrastructures hydrauliques	5
1.2.2 Dégradation de la qualité de l’eau.....	5
1.2.3 Mauvaise exploitation des ressources en eau	6
1.2.4 Questions de recherche.....	8
1.3 Objectifs de la recherche	8
1.4 Plan du mémoire	8
CHAPITRE 2	10
REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	10
2.1 Revue des cadres juridiques de l’assainissement en Haïti.....	10

2.1.1 Législations actuelles en termes d'assainissement des eaux en Haïti	10
2.1.2 Infiltration.....	11
2.1.3 Eaux souterraines.....	12
2.2 Revue de la littérature du changement climatique	12
2.3 Revue de la littérature de l'évolution du climat d'Haïti	17
2.3.1 Climatologie d'Haïti.....	17
2.3.2 Température.....	17
2.3.3 Température de la Cité du Savoir.....	18
2.3.4 Pluviométrie de la zone d'étude	19
2.3.5 État actuel du Climat	20
2.4 Revue de la littérature des systèmes d'assainissement	21
2.5 Critique de la littérature des systèmes d'assainissement	23
CHAPITRE 3	25
MÉTHODOLOGIE	25
3.1 Conception d'un système de gestion durable des eaux pluviales pour la Cité	25
3.1.1 Paramètres de conception du système de gestion des eaux pluviales	25
3.2 Conception d'un système de gestion durable des eaux usées pour la Cité du Savoir .	40
3.2.1 Évaluation des eaux sanitaires.....	40
3.2.2 Évaluation des débits d'eaux usées	42
3.3 Évaluation du coût des deux systèmes et l'impact environnemental	45
3.3.1 Évaluation du coût des deux systèmes	45
3.3.2 Impact environnemental	47
CHAPITRE 4	48
APPLICATION À L'ÉTUDE DE CAS.....	48
4.1 Présentation de la zone d'étude	48
4.1.1 Situation géographique de la Cité du Savoir	48

4.1.2 Topographie et Hydrographie	51
4.1.3 Situation socio-économique de la zone	51
4.1.4 Cité du Savoir et ses infrastructures	52
4.1.5 Choix des données.....	53
4.2 Conception d'un système de gestion durable des eaux pluviales pour la Cité	54
4.2.1 Architecture du système d'assainissement proposée.....	65
4.3 Conception d'un système de gestion durable des eaux usées pour la Cité du Savoir..	69
4.3.1 Phase d'évaluation des eaux sanitaires.....	69
4.3.2 Calcul des débits d'eaux usées	73
4.3.3 Phase d'évaluation de la quantité des eaux vannes et les boues	76
4.4 Interprétation des résultats et analyse du modèle au cas d'étude	77
4.5 Évaluation du coût des deux systèmes et l'impact environnemental	83
4.5.1 Évaluation du coût des deux systèmes	83
4.5.2 Impact environnemental	84
4.6 Solution de traitement des eaux usées et gestion des boues d'épuration	85
CHAPITRE 5	87
CONCLUSION	87
5.1 Synthèse des travaux.....	87
5.2 Limitations des travaux	88
5.3 Travaux futurs.....	89
RÉFÉRENCES.....	91
ANNEXES	101
ANNEXE – A	101
Annexe-1-1 : Indice d'aridité annuel d'Emmanuel. De MARTONNE.....	101
Annexe-1-2 : Gamme usuelle de valeurs pour le coefficient de ruissellement en fonction du type d'occupation du sol (adapté de ASCE/WEF, 1992)	102
Annexe-1-3: Coefficients de régression de Montana	103

Annexe - 1- 4 : Coefficient Climatique	104
Annexe -1- 5: Pourcentage quotidien moyen (p) des heures de jour annuelles	105
Annexe -1- 6: Dotation de consommation domestique	106
Annexe -1- 7: Facteurs de pointe annuelle pour les débits de consommation d'eau totale.	107
ANNEXE – B : Calcul de l'évapotranspiration	108
Annexe-2-1 : Valeurs du coefficient climatique k en fonction de la température moyenne, du pourcentage d'éclairement et de l'évapotranspiration mensuelle pour l'année 2024	108
Annexe-2-2 : Valeurs du coefficient climatique k en fonction de la température moyenne et de l'évapotranspiration mensuelle pour l'année 2030	112
Annexe-2-3 : Valeurs du coefficient climatique k en fonction de la température moyenne et de l'évapotranspiration mensuelle pour l'année 2050	115
ANNEXE – C : Résultat de la simulation	118-122

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Système d’assainissement des eaux usées.....	3
Figure 2.1 Moyenne mondiale des anomalies de la température en surface, combinant les terres émergées et les océans	14
Figure 2.2 Changement de la température global moyenne annuelle observée et simulée incluant les facteurs humains et naturels (1850-2020)	15
Figure 2.3 Zone climatique d’Haïti.....	17
Figure 2.4 Température moyenne en ° C.....	19
Figure 2.5 Précipitation mensuelle de la zone d’étude	20
Figure 3.1 Schématisation du bilan hydrique	27
Figure 3.2 Modèle de Horton	34
Figure 4.1 Carte de la zone d’étude	49
Figure 4.2 Situation de Génipailler.....	50
Figure 4.3 Situation de la Cité du Savoir.....	50
Figure 4.4 Réseau hydrographique de la zone d’étude.....	51
Figure 4.5 Aménagement de la Cité du Savoir.....	53
Figure 4.6 Variation des précipitations annuelles.....	56
Figure 4.7 Variation du débit de ruissellement annuel	59
Figure 4.8 Variation de l’évapotranspiration annuel	64
Figure 4.9 Architecture du système d’assainissement des eaux pluviales.....	65
Figure 4.10 Profil en long des nœuds J ₁ -J ₂ de la profondeur d’eau.....	66
Figure 4.11 Profil en long des nœuds J ₁ -J ₃ de la profondeur d’eau.....	66
Figure 4.12 Profil en long des nœuds J ₁ -J ₄ de la profondeur d’eau.....	67
Figure 4.13 Profil en long des nœuds J ₁ -Out ₁ de la profondeur d’eau	67
Figure 4.14 Profil en long du débits des conduites C ₁ , C ₂ , C ₃ et C ₄	68
Figure 4.15 Variation de la population annuelle de la Cité du Savoir.....	70
Figure 4.16 Variation des consommations domestiques.....	73
Figure 4.17 Volumes d’eaux sanitaires maximales	76
Figure 4.18 Présentation du bilan hydrique pour l’année 2024.....	77
Figure 4.19 Modèle de gestion des eaux pluviales et des eaux usées pour l’année 2024.....	78
Figure 4.20 Présentation du bilan hydrique pour l’année 2030.....	79

Figure 4.21 Modèle de gestion des eaux pluviales et des eaux usées pour l'année 2030.....	80
Figure 4.22 Présentation du bilan hydrique pour l'année 2050	81
Figure 4.23 Modèle de gestion des eaux usées et des eaux pluviales pour l'année actuelle	82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Température de la zone d'étude	18
Tableau 2.2 Pluviomètre de la zone d'étude	19
Tableau 3.1 Augmentation de température pour le scénario SSP2-4.5	29
Tableau 3.2 Paramètres d'infiltration de Horton	35
Tableau 4.1 Variation des températures actuelle et future.....	54
Tableau 4.2 Variation des températures et précipitations annuelles	56
Tableau 4.3 Estimation des superficies.....	57
Tableau 4.4 Estimation de l'écoulement de surface	59
Tableau 4.5 Estimation de l'écoulement souterrain.....	60
Tableau 4.6 Estimation de précipitations et infiltration moyennes annuelles	61
Tableau 4.7 Valeurs des températures mensuelles du coefficient climatique et du pourcentage d'éclairement.....	62
Tableau 4.8 Valeurs de l'évapotranspiration pour l'année actuelle.....	62
Tableau 4.9 Valeurs des températures mensuelles du coefficient climatique et du pourcentage d'éclairement.....	63
Tableau 4.10 Valeurs de l'évapotranspiration pour l'année actuelle.....	63
Tableau 4.11 Valeurs des températures mensuelles du coefficient climatique et du pourcentage d'éclairement.....	63
Tableau 4.12 Valeurs de l'évapotranspiration pour l'année actuelle.....	64
Tableau 4.13 Fréquence d'écoulement à l'exutoire	69
Tableau 4.14 Estimation de la consommation domestique.....	72
Tableau 4.15 Volumes des eaux sanitaires maximales	75

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

AEP	Alimentation en eau potable
BID	Banque interaméricaine de développement
CC	Changement climatique
CIAT	Comité interministériel d'aménagement du territoire
COP	Conférence des nations unies sur les changements climatiques
CPE	Centre de la petite enfance
CCNUCC	Convention cadre des nations unies sur les changements climatiques
DINEPA	Direction nationale de l'eau potable et de l'assainissement
EAH	Eau, Assainissement et hygiène
EPA SWWM	Modèle de gestion des eaux pluviales de l'eau potable et de l'assainissement
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GRANH	Groupe de réflexion et d'action pour la reconstruction d'Haïti
IHSI	Institut haïtien de statistique et d'informatique
ISTEAH	Institut des sciences, des technologies et des études avancées d'Haïti
JMP	Joint monitoring programme
MSPP	Ministère santé publique et de la population
MDE	Ministère de l'environnement
MCG	Modèle climatique global
MTPTC	Ministère des travaux publics, transports, communications et de l'énergie
MARNDR	Ministère de l'Agriculture des Ressources Naturelles et du Développement Rural
NASA	Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace
ODD	Objectif du développement durable
OURANOS	Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques
OMS	Organisation mondiale de la santé

ONU	Organisation des nations unies
ONU-HABITAT	Programme des Nations unies pour les établissements humains
OXFAM	Comité d'Oxford pour soulager la famine
PIGRaN	Pôle d'innovation du grand nord
PNH	Parc national historique d'Haïti
PNR	Plan d'exécution du programme national de recherche
PNUD	Programme nations unies pour le développement
RE4	Quatrième rapport d'évaluation
RCP	Profils représentatifs d'évolution de concentration de GES
THE	Toilettes à haute efficace
STEU	Stations de traitement des eaux usées
SAEU	Système d'assainissement des eaux usées
UBV	Ultrabas volume
UNICEF	Fonds des nations unies pour l'enfance

LISTE DES SYMBOLE

A	Superficie du bassin
%	Pourcentage
°C	Degré Celsius
CO ₂	Dioxyde de carbone
j	Jour
E	Évapotranspiration
E _v	Quantité d'eau de chasse annuel
FP _{max}	Facteur de pointe maximal
F	Infiltration
ha	Hectare
I	Intensité de pluie
i	Indice d'aridité annuel
k	Coefficient climatique
Kg	Kilogramme
Kg/ha	Kilogramme par hectare
Km ²	Kilomètre carré
l/an	Litre par année
l/chasse	Litre par chasse
l/j	Litre par jour
l/kg	Litre par kilogramme
l/m ² /j	Litre par mètre carré par jour
l/p/j	Litre par personne par jour
p	Pourcentage d'éclairement
P _m	Variation des facteurs de pointe
P	Précipitation
P ₀	Population actuelle
P _n	Population future
m	Mètre
m ³ /s	Mètre cube par seconde

m^3/j	Mètre cube par jour
m^3/an	Mètre cube par année
m^3/ha	Mètre cube par hectare
$m^3/ha.j$	Mètre cube par habitant par jour
mm	Millimètre
mm/j	Millimètre par jour
mm/mois	Millimètre par mois
N	Nord
n	Nombre d'année
Q	Débit
$Q(j)_{moy}$	Débit moyen journalier de consommation
$Q(j)_{max}$	Débit maximum de consommation journalier
$Q_{[h(m^3/y)]}$	Débit d'eau usée horaire
$Q(t_c)$	Débit de ruissellement
r	Taux d'accroissement annuel
R	Coefficient de ruissellement
t	Période considérée
T	Température
W	Ouest

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Haïti, et plus spécifiquement le département du Nord, est confronté depuis plusieurs années à des difficultés pour la maîtrise correctement des eaux pluviales et la gestion des eaux usées. Ce pays est placé au quatrième rang des pays les plus affectés par les risques climatiques sur la période comprise entre 1998 et 2017 avec 77 évènements climatiques majeurs, occasionnant de nombreuses pertes en vie humaines et des destructions considérables [1]. Ce qui est inquiétant, le développement de villes résilientes est fortement influencé par les changements climatiques. Il est évident dans tout le Nord du pays, l'accès à un système d'assainissement des eaux pluviales et des usées devient de plus en plus difficile. Ce mémoire vise comme objectif de concevoir un double système d'assainissement des eaux pluviales et des eaux usées adapté aux impacts du changement climatique: cas de la Cité du Savoir, Haïti. En effet, la suite de ce chapitre traitera d'abord des définitions et des concepts de base tels que : le système d'assainissement des eaux pluviales, le système d'assainissement des usées, les impacts des changements climatiques, l'étude de cas et l'évaluation des coûts. Ensuite, la problématique, les objectifs de recherche et le plan de mémoire seront présentés.

1.1 Définitions et concepts de bases

Pour bien appréhender le sujet que nous voulons traiter, il est essentiel de comprendre comment certains auteurs définissent les mots-clés qui suivent : système d'assainissement des eaux pluviales, système d'assainissement des eaux usées, impacts des changements climatiques, étude de cas et évaluation des coûts.

1.1.1 Système d'assainissement des eaux pluviales

Dans le concept de base, pour une meilleure compréhension, il faut dans un premier temps définir un système. Ce dernier est un ensemble d'interactions entre différents éléments, qui perdurent dans le temps, ce qui permet de distinguer le système de son environnement extérieur, mais dont la nature varie, ce qui confère au système un statut dynamique et adaptatif [2].

L'assainissement est le concept de base pour comprendre les enjeux actuels de la gestion des eaux pluviales et des eaux usées. Partant de la compréhension des écrits de certains auteurs [3] :

« Pendant longtemps, l'assainissement, aussi bien pour les eaux pluviales que pour les eaux usées a été considéré comme une conséquence de l'urbanisme. Il s'agissait d'évacuer les eaux pluviales, pour éviter les inondations des zones urbaines, et d'acheminer les eaux usées vers le milieu récepteur; les conditions dominantes dans la mise en œuvre des ouvrages étant les capacités des collecteurs et les coûts des aménagements ».

Tenant compte des deux définitions précédentes :

« Le système d'assainissement comprend l'ensemble des réseaux de collecteurs et émissaires (qui servent à la collecte et au transport), ainsi que les ouvrages annexes et spéciaux (destinés à stocker, transporter, diriger, traiter et évacuer les eaux) tels que les déversoirs d'orage, bassins de retenue, pompes de relèvement, stations anti-crue et stations de traitement des eaux usées (STEU) [4] ».

Il est considéré comme des réseaux critiques en raison des services rendus (évacuer et traiter les eaux usées avant de les rejeter dans le milieu récepteur) qui permettent de réduire les épidémies dues aux maladies hydriques. Ainsi, le système d'assainissement doit permettre, après traitement des eaux usées et pluviales d'un territoire, l'évacuation vers le milieu de manière à assurer un niveau d'hygiène satisfaisant [5], [6], [7].

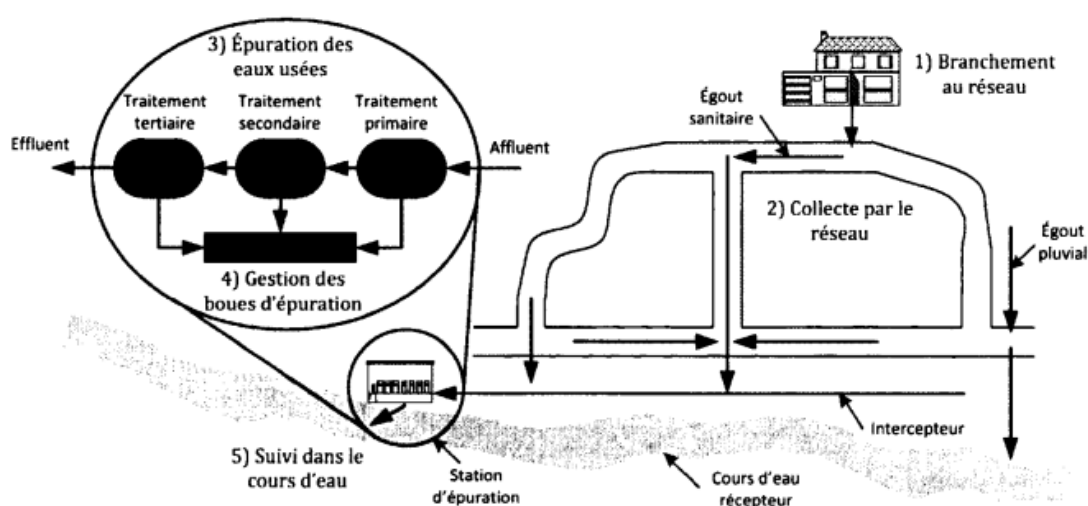
En ce sens, le terme d'eaux pluviales est utilisé pour les eaux de pluie après qu'elles aient touché le sol ou une surface construite ou naturelle susceptible de les intercepter ou de les récupérer (toiture, terrasse, chaussée, arbre...) [8].

Donc, le système d'assainissement des eaux pluviales est longtemps considéré comme propre et simplement évacuées les eaux vers les milieux naturels [9]. Il est aujourd'hui reconnue par la loi, des moyens humains et financiers sont désormais à mobiliser pour garantir une bonne efficacité de la gestion des eaux pluviales qu'elle soit publique ou privée [10].

1.1.2 Système d'assainissement des eaux usées

Compte tenu des définitions des différents concepts : système, assainissement et système d'assainissement, ceci nous ramène à la définition systématiquement des eaux usées. Les eaux utilisées pour satisfaire les besoins domestiques ou industriels deviennent après utilisation des «

eaux usées », qui ne peuvent être rejetées dans le milieu naturel sans avoir été épurées [8]. Autrement dit, les eaux usées (ou eaux polluées) sont des eaux qui ont été altérées par l'activité humaine. Il peut ainsi s'agir d'eaux polluées provenant d'usines ou d'eau de ruissellement provenant d'un parc de stationnement [11]. Donc, un système d'assainissement des eaux usées (SAEU) est habituellement composé de cinq éléments : le branchement des bâtiments au réseau; le réseau de collecte des eaux usées; la station d'épuration des eaux usées; le traitement des boues récupérées durant le traitement; et le suivi des impacts de l'effluent dans le cours d'eau récepteur. La configuration des SAEU est illustrée à la figure 1.1 ci-après [2].



Source : © Bruno Gagnon et al.- 2012

Figure 1.1 *Système d'assainissement des eaux usées*

1.1.3 Impacts des changements climatiques

Il est à souligner que les impacts des changements climatiques sont dus à l'augmentation importante du nombre de phénomènes météorologiques extrêmes et de leur intensité [12]. Ils se propagent par le biais des processus internationaux, tels que le commerce mondial, les flux financiers et les réseaux d'approvisionnement [13]. Ils entraînent des modifications de la fréquence, de l'intensité, de l'étendue spatiale, de la durée et de l'occurrence dans le temps des phénomènes météorologiques extrêmes, pouvant aboutir à des extrêmes sans précédent [14].

1.1.4 Étude de cas

Il existe de nombreuses définitions du terme de cas. Pour un spécialiste du raisonnement à base de cas, le cas a pu être défini comme la méthode inédite pour vérifier empiriquement des hypothèses de recherche [15]. Il consiste donc à rapporter un événement à son contexte et à le considérer sous cet aspect pour voir comment il s'y manifeste et s'y développe. En d'autres mots, il s'agit, par son moyen, de saisir comment un contexte donne acte à l'événement que l'on veut aborder [16]. Ce même auteur a bien souligné ces exigences :

« En effet, par définition, l'étude de cas fait appel à diverses méthodes, que ce soit l'observation, l'entrevue semi-directive et l'une ou l'autre des techniques d'analyse du contenu (...). La variété des méthodes s'inscrit dans ce but de croiser les angles d'étude ou d'analyse. »

Pour un psychologue, le cas, dit aussi « objet clinique », est décrit autant que possible comme une totalité, avec un désir d'exhaustivité utopique, mais insistant [17]. En se référant à un mot à la mode, on peut donc dire que le cas est un événement situé [18]. Enfin, elle vise non seulement à trouver une solution au cas particulier considéré, mais à dégager aussi le principe de cette solution exploitable à l'étude d'autres cas [19].

1.1.5 Évaluation des coûts

À la base, l'évaluation des coûts implique le processus d'évaluation et de quantification des dépenses associées à diverses activités au sein d'une organisation. Cela comprend l'identification des coûts directs, tels que la main-d'œuvre et les matériaux, ainsi que les coûts indirects, tels que les frais généraux et administratifs [20].

1.2 Éléments de problématique

La gestion des eaux de pluie et des eaux usées est d'une grande importance pour Haïti afin de garantir la durabilité de cette ressource dans le contexte du débat actuel sur le changement climatique. Compte tenu des diverses façons dont l'eau est utilisée dans notre vie quotidienne, y compris pour l'assainissement, la production alimentaire, les loisirs, la sécurité civile et l'industrie agroalimentaire, sa gestion représente une responsabilité et un défi importants pour tous les ordres de gouvernement, tant actuels que futurs. En effet, les risques liés à l'inadéquation des infrastructures hydrauliques, à la dégradation de la qualité de l'eau et la mauvaise exploitation des

ressources en eau, sont parmi les principaux défis de l'heure pour la valeur de l'eau dans ce contexte.

1.2.1 Inadéquation des infrastructures hydrauliques

Les infrastructures sont des éléments physiques qui disciplinent la matérialité de l'eau. Les effets dévastateurs de la pandémie de COVID-19 nous rappellent l'importance de l'accès aux services d'eau, d'assainissement et d'hygiène, et soulignent le fait qu'un trop grand nombre de personnes n'en disposent toujours pas. Les services écosystémiques qui contribuent à soutenir la résilience ou à réduire les risques n'ont pas été considérés à leur juste valeur [21]. En effet, on constate que de nombreux risques de catastrophe sont exacerbés par la perte de services écosystémiques importants, étant donné que ces services jouaient un rôle essentiel dans la prévention des catastrophes. Actuellement, l'essentiel de l'infrastructure de gestion des eaux pluviales et des eaux usées dans de nombreuses villes à croissance rapide fait défaut, est sous-dimensionné ou obsolète. Cette infrastructure étant dépassée, n'est pas conçue pour répondre aux conditions locales, est mal entretenue et totalement incapable de suivre le rythme de la croissance des différentes populations.

La modification au sein de la dynamique du climat génère de plus en plus de fortes précipitations locales ou régionales qui livrent de grandes quantités d'eau en très peu de temps. L'inadéquation des infrastructures hydrauliques existantes ne permet pas d'avoir les moyens de récupérer les eaux pluviales et de les évacuer en toute sécurité. Dans le contexte du changement climatique, les risques liés à l'eau peuvent entraîner des coûts plus élevés, des bénéfices plus faibles et des pertes financières considérables [21]. Les activités humaines sur le territoire, les différentes pratiques en matière d'aménagement et d'urbanisme peuvent avoir des impacts importants sur la gestion des eaux pluviales et des eaux usées [22]. Dans la situation actuelle presque toutes les zones urbaines et rurales rencontrent des difficultés régulières sur la question d'un service adéquat dans le secteur d'eau potable et d'assainissement.

1.2.2 Dégradation de la qualité de l'eau

Sans eau, il n'existe pas de vie sur terre, par contre la gestion des eaux pluviales et des eaux usées ayant atteint « un seuil critique, affectant la qualité de la vie et les conditions d'existence de bon nombre de nos concitoyens tant en milieu rural qu'urbain [23]. Les eaux pluviales et les eaux usées présentent un risque sanitaire direct de par la présence d'organismes pathogènes, comme des bactéries (p. ex., choléra, salmonella, shigella), de virus (p. ex., virus de l'hépatite, entérovirus,

poliovirus, virus de Norwalk) et de parasites (p. ex., protozoaires tels Giardia et Cryptosporidium et helminthes) [24], [25]. Le fait que certaines zones rurales et urbaines ne sont pas desservies par un système de traitement des eaux résiduelles ou bien ne possèdent pas des stations d'épuration constitue un enjeu majeur pour avoir une eau de bonne qualité. Selon les données de juin 2015 du WHO / UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP) for Water Supply and Sanitation, 19 % de la population haïtienne (respectivement 8 % en milieu urbain et 35 % en milieu rural) n'a pas accès à des toilettes et pratique la défécation à l'air libre [26]. Même dans le cas des pays en développement, plus de 90 % des eaux usées urbaines sont directement rejetées dans les eaux de surface, sans traitement [25].

Dans un article du Nouvelliste publié le 8 août 2017, selon l'auteur : *« lorsqu'on n'a pas fait une bonne gestion des systèmes d'assainissement n'importe qui peut faire usage sans respecter la réglementation. Il a clairement démontré que 39 pays ayant un système d'assainissement et un traitement inadéquat des eaux résiduelles enregistrent conséquemment une forte mortalité par des maladies liées à cette dégradation de la qualité de l'eau. Cette étude réaffirme la nécessité d'un traitement de ces eaux afin d'alléger le fardeau de la morbidité et la mortalité dû aux contaminants [27] ».*

Aux risques pour la santé humaine des rejets d'eaux usées domestiques s'ajoutent ceux de l'environnement, la croissance économique, réduit la production de denrées alimentaires et exacerbe la pauvreté dans le pays. En conséquence, on observe la quasi-totalité des eaux usées urbaines, y compris les déchets industriels qui sont déversées dans les nappes souterraines et également dans les eaux de surfaces sans aucun processus de traitement, et se révèlent être des sources de contamination conduisant à la pollution de l'écosystème. L'insalubrité de l'eau pose des risques de santé très graves et la population est toujours en quête d'une eau de qualité pour son besoin.

1.2.3 Mauvaise exploitation des ressources en eau

Contrôler la manière dont est établie la valeur de l'eau, c'est aussi contrôler son utilisation [21]. Une mauvaise gestion des ressources crée un système d'inefficacités qui compromet la stabilité et le développement des villes résilientes. La gestion inefficace en matière d'exploitation des ressources en eau crée de plus en plus une crise dangereuse pour la population et n'apporte pas la stabilité. Dans les zones habitables, les besoins essentielles des gens en eau sont devenus de plus

en plus difficiles et leur premier recours est bien l'exploitation des nappes. Certain auteur affirme que la durabilité des ressources en eau dépend de la qualité de leur gestion [28]. D'autre nous fait savoir que la gestion durable des eaux permet de restreindre les impacts de l'urbanisation [29]. Bien sûr, en ce qui concerne la gestion des ressources en eau, la *loi sur l'eau* détermine qu'elle doit être réalisée de façon intégrée et concertée, en tenant compte des principes du développement durable [23]. Le problème de gestion efficace de l'eau peut compromettre la pérennité de cette ressource et pourrait avoir un impact global sur le cycle de l'eau dans l'ensemble d'une région. Le manque d'économie de l'eau demeure une composante principale d'ingérence de cette ressource tant précieuse. Les eaux usées et les eaux de drainage constituent actuellement des ressources négligeables. Les impacts des actions humaines sur les processus naturels sont de plus en plus variés et fréquents. Avec l'expansion urbaine, l'accroissement de la population et les nouveaux styles de vie, les besoins en eau tendent à surpasser le captage des points d'eau facilement mobilisables [30]. En général, ils ont recouru à l'exploitation de l'eau souterraine au premier regard et laissé les eaux de pluviales et les eaux usées à la dérive. Les habitants exercent une forte pression sur l'or bleu puisqu'ils ont la difficulté de trouver d'autre moyen pour procurer de cet élément vital à leur robinet pour leur bien-être [31].

L'exploitation des ressources en eau se fait sans tenir compte des conséquences environnementales de l'abattage systématique des arbres et de l'absence de protection contre la pollution. Cette situation peut avoir de graves conséquences pour la population, tant dans le présent que dans l'avenir. À mesure que les besoins s'intensifient, la nécessité de la mauvaise exploitation de l'eau deviendra de plus en plus évidente. La population est confrontée à des défis importants en raison de la diminution des ressources en eau et du déficit de précipitations qui en résulte. Cela représente un défi important pour la gestion durable des ressources en eau. Conformément aux critères de durabilité des eaux souterraines, le rapport entre l'utilisation de l'eau et la recharge ne doit pas dépasser 10 % [32]. Compte tenu de l'ampleur de l'échelle et du facteur temporel en jeu, on peut affirmer que cette variable d'influence devient un facteur dominant dans l'interaction entre l'homme, l'équilibre écologique et la sécurité des ressources en eau, d'où l'économie écologique [33], [34].

1.2.4 Questions de recherche

Entre l'existant et la demande croissante apparaît les signes d'une aggravation de la gestion durable de la ressource en eau, ce qui permet de formuler les contours de la problématique de ce mémoire sous forme d'une question principale suivante :

Quelles sont les dispositions nécessaires pour concevoir un système d'assainissement des eaux pluviales et des eaux usées adapté aux impacts des changements à l'ombre de la croissance des activités économiques ?

L'analyse de ces défis nous amène à nous interroger sur les moyens indispensables à la conception d'un système d'assainissement des eaux usées et des eaux pluviales. Plus particulièrement nous sommes intéressés à découvrir :

1. Comment concevoir un système d'assainissement des eaux pluviales pour la Cité du Savoir ?
2. Comment concevoir un système d'assainissement des eaux usées pour la Cité du Savoir ?
3. Quels sont les coûts financiers et leur impact environnemental pour la réalisation de ces deux systèmes ?

1.3 Objectifs de la recherche

L'objectif général de cette recherche est de concevoir un double système d'assainissement des eaux pluviales et des eaux usées adapté aux impacts du changement climatique, cas de la Cité de Savoir, Haïti. De façon spécifique, ce mémoire vise à :

- 1.3.1 Concevoir un système d'assainissement des eaux pluviales pour la Cité du Savoir ;
- 1.3.2 Concevoir un système d'assainissement des eaux usées pour la Cité du Savoir ;
- 1.3.3 Évaluer les coûts de ces deux systèmes et leur impact environnemental.

1.4 Plan du mémoire

Le travail de ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres. Après le premier chapitre d'introduction vient le deuxième chapitre qui passe en revue les cadres juridiques de l'assainissement en Haïti, les travaux les plus pertinents sur le changement climatique, la revue du climat d'Haïti et les technologies des systèmes d'assainissement existante. Le troisième chapitre définit le développement de la méthodologie qui va permettre de répondre aux objectifs

spécifiques. Le quatrième chapitre présente l'application de l'étude de cas de la Cité du savoir. Enfin, le cinquième chapitre, en guise de conclusion, présente la synthèse des travaux, en expose les limites et offre quelques indications de recherche future.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre de revue de la littérature est structuré en quatre sections. La première section porte sur le cadre juridique, suivie d'une section sur le changement climatique. La troisième section se concentre sur le climat d'Haïti, en particulier celui du Nord. La dernière section passe en revue les systèmes d'assainissement existants.

2.1 Revue des cadres juridiques de l'assainissement en Haïti

Cette section passera en revue l'ensemble de normes référentielles utilisées dans le domaine d'assainissement des eaux.

2.1.1 Législations actuelles en termes d'assainissement des eaux en Haïti

L'assainissement en Haïti est très difficile surtout dans le contexte de la bidonvilisation avec une population majoritairement analphabète. En 2014, la DINEPA, avec la participation du Ministère de la Santé Publique et de la Population (MSPP) et du Ministère de l'Environnement (MDE) dans le cadre du partenariat pour l'assainissement, avait présenté un document d'orientation stratégique pouvant avoir des données nécessaires référentielles qu'on doit utiliser.

« Il a fait savoir que l'assainissement en Haïti est non collectif. Le cadre légal du secteur est désuet et éparpillé dans plusieurs textes de lois relatifs à l'urbain, au rural, à l'hygiène et aux attributions des communes ainsi qu'à celles des secteurs des Travaux Publics et de la Santé. Il n'existe aucune donnée chiffrée sur les installations sanitaires publiques, la vidange et le traitement des boues et des eaux usées. Et La couverture en assainissement ne tient pas compte de l'ensemble de la filière de l'assainissement et est assimilée uniquement à celle des systèmes d'assainissement individuels dans les familles [35] ».

Selon le document de stratégie, la DINEPA a entrepris la mise en place de directives d'assainissement, établissant les principes de dimensionnement et de réalisation incluant des fascicules techniques pour guider les choix des systèmes, des fiches techniques et des dossiers de consultation.

Le sous-secteur de l'assainissement est actuellement régi par un ensemble de textes de lois dont les plus importants se retrouvent dans les documents suivants [35]:

- ❖ Code de l'urbanisme- Juillet 1937 et mai 1963;
 - ✓ Loi du 29 mai 1960, eaux usées et assainissement.
- ❖ Code de l'hygiène- Juin 1942;
 - ✓ Loi du 24 février 1919, service national d'hygiène publique et son arrêté du 12 Avril 1919 comportant les règlements sanitaires à son article 1^{er} définissant les règlements sanitaires et l'article 2 rappelant les sanctions y relatifs [35].
 - ✓ Loi du 5 Juin 1942 et son arrêté d'application du 4 Juillet 1942 officiers sanitaires/ contravention à la Santé Publique.
- ❖ Code rural- 1960 ;
 - ✓ Loi No XV [34] sur hygiène rurale à ses articles 297, 302, 303, 305, 309, 310 définissant les règlements sanitaires liés aux maisons en milieu rural. Les articles 297 à 310. Ces articles touchent i) les interdictions liées à : la disposition d'excréments humains (297) ; à l'utilisation inadéquate des sources et aux réservoirs d'eau potable (302) ; au forage de puits (303) ; aux périmètres de protection des sources (305) ; ii) les dispositions relatives aux nouvelles constructions rurales (309) ; les règlements sanitaires liées aux maisons en milieu rural (310) :
- ❖ Lois sur l'attribution du Ministère des Travaux Publics- juillet 1978 ;
- ❖ Lois sur l'attribution des communes- Septembre 1937.

Ce cadre législatif et réglementaire est caractérisé par :

- la vétusté et l'inadéquation des textes de lois ;
- l'absence de décrets d'application actualisés ;
- la méconnaissance par le grand public ;
- l'absence de mesure et de mécanismes en place pour garantir l'application des textes.

En effet, la situation actuelle des filières de l'assainissement, à savoir la collecte, les eaux grises ne sont pas généralement évacuées à travers des canaux, par la mauvaise habitude des habitants et la faiblesse de ce service nuisent à la fois la santé publique et l'environnement.

2.1.2 Infiltration

Par rapport aux constats réalisés durant les phénomènes de précipitation, l'eau se ruisselle beaucoup puisqu'ils n'ont été prévus dans le dimensionnement des ouvrages de drainage des eaux

pluviales. Elles sont également évacuées à même le sol à proximité des habitations ou dans les arrière-cours des maisons et bâtiments. Ces pratiques favorisent entre autres les inondations, la formation de gîtes larvaires et l'infiltration d'eaux contaminées dans la nappe phréatique [35].

2.1.3 Eaux souterraines

Cette ressource qui constitue la réserve se trouve dans l'impasse et est mal exploitée d'ailleurs anarchiquement. Pour les exploitants, elles sont bien la première visée. Ces ressources en eau souterraines si précieuses sont mieux réparties dans l'espace grâce à la présence de formations aquifères généralisées [1].

Ils continuent pour dire que :

« La mise en valeur des eaux souterraines n'est pas non plus exempte de difficultés : les ouvrages de captages et les équipements de pompage réclament un entretien ; l'exploitation des aquifères demande un suivi pour prévenir les effets non désirables comme la baisse des niveaux piézométriques, l'invasion des eaux salées et les risques de pollution [1] ».

Pourtant la loi du 17 juillet 1974, réglementant l'usage des eaux souterraines profondes, en son article 146 stipule que : *« Aucune maison d'habitation, aucune fosse d'aisance, aucune étable ou écurie, aucun cimetière ne peuvent être érigés au bassin d'alimentation d'une source à l'intérieur du périmètre de protection qui sera fixé par les Départements de l'Agriculture et des Travaux Publics ».* Par contre, l'Organisation Mondiale de la santé (OMS) fixe une limite soit minimale et/ou maximale à ne pas dépasser pour avoir une eau qui répondre suivant les critères de potabilité : les réglementations sur les constituants inorganiques, organiques et pesticides, en générale, les paramètres microbiologiques et les paramètres physico-chimiques [36].

2.2 Revue de la littérature du changement climatique

Cette section de revue de la littérature propose une synthèse d'analyse des rapports de GIEC de l'année 2014, suivie d'OURANOS, de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques et de la NASA.

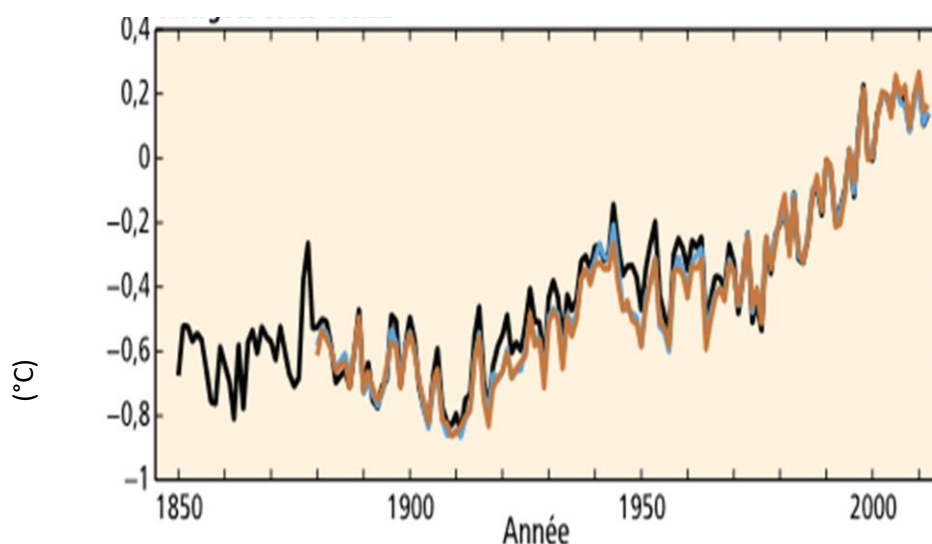
Dans son rapport de synthèse, GIEC montre que le réchauffement du système climatique est sans équivoque et que l'homme est sans doute à une grande influence sur le malheur du monde entier. Autrement dit, il est désormais certain à 95 % que l'homme est la première cause du réchauffement planétaire actuel. Les activités humaines perturbent de façon instantanée le climat dans lequel

l'humanité vit et provoquent des risques généralisées, irréversibles pour chaque personne et les écosystèmes. Il est manifeste de plus en plus forte par rapport à ses incidences que l'on observe sur tous les continents et dans tous les océans. Vers les années 1950, les scientifiques ont observé beaucoup de changements sans précédent depuis des dizaines d'années, voire des millénaires. En effet, ce changement d'altérations peut se faire sur une longue durée et tous les éléments liés au climat sont élevés. Le changement de la température moyenne à la surface du globe pour la période 2016-2035 relativement à 1986-2005, analogue pour les quatre RCP, sera probablement compris entre 0,3 °C et 0,7 °C (degré de confiance moyen) [37].

Le comité avance sa thèse en disant que : « *les trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850. Les années 1983 à 2012 constituent probablement la période de 30 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord depuis 1 400 ans (degré de confiance moyen). La moyenne globale de la température de surface à une tendance linéaire combinant les terres émergées et les océans indique un réchauffement de 0,85 [0,65 à 1,06] °C² au cours de la période 1880–2012, pour laquelle il existe plusieurs jeux de données indépendants* ». Ce qui constitue une grande variabilité de la température moyenne à la surface du globe aux échelles décennales et interannuelle et qui se superpose à un réchauffement multi décennal considérable. La sensibilité climatique à l'équilibre est une mesure de la réponse du système climatique à un forçage radiatif constant [37].

Depuis la parution du quatrième rapport d'évaluation du GIEC (RE4) [37], les éléments suggérant une influence humaine sur le système climatique sont devenus plus probants. Il est extrêmement probable que plus de la moitié de l'augmentation observée de la température moyenne à la surface du globe entre 1951 et 2010 est due à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre d'origine anthropique et à d'autres forçages anthropiques conjugués. Au cours des dernières décennies, l'évolution observée du climat, quelles que soient ses causes, a eu un impact sur tous les océans et sur les systèmes naturels et humains de tous les continents, ce qui témoigne de la sensibilité de ces systèmes au changement climatique. Les conséquences de phénomènes climatiques extrêmes survenus récemment : vagues de chaleur, sécheresses, inondations, cyclones et incendies de forêt, l'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, et le niveau des mers s'est élevé mettent en évidence la grande vulnérabilité et le degré élevé d'exposition des écosystèmes de façon général et de nombreux systèmes humains à la variabilité actuelle du climat. Dans le cas de sa poursuite, les émissions de gaz à effet de serre

provoqueront un réchauffement supplémentaire et une modification durable de toutes les composantes du système climatique, ce qui augmentera la probabilité de conséquences graves non uniformes, généralisées et irréversibles pour les populations et les écosystèmes. Ce qui pourrait la cause de déplacement massive de populations privées de ses ressources, accroître les risques de conflits violents que sont la pauvreté et les chocs économiques. Pour limiter l'ampleur des changements climatiques, il faudrait réduire fortement et durablement les émissions de gaz à effet de serre, ce qui, avec l'adaptation, est susceptible de limiter les risques liés à des changements de températures comme le montre la figure 2.1 ci-après.

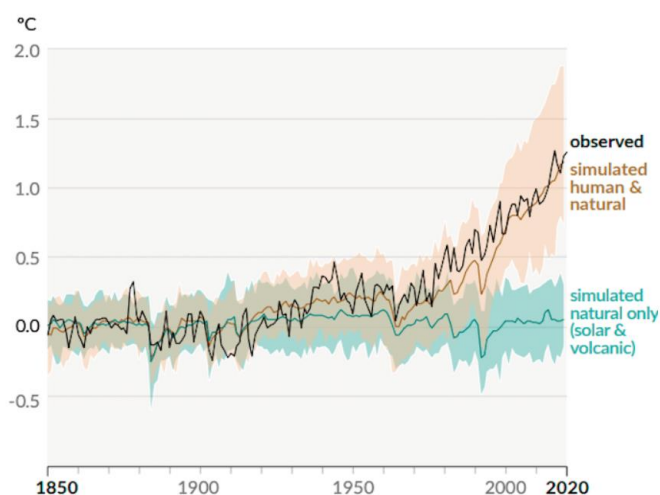


Source : © GIEC, 2014-Rapport de synthèse Changements climatique, p. 3

Figure 2.1 Moyenne mondiale des anomalies de la température en surface, combinant les terres émergées et les océans

Ouranos [38] fait comprendre que le climat de notre planète est en évolution et les effets des changements climatiques sont perceptibles, notamment par l'accroissement de la récurrence et de la violence des aléas naturels ainsi que des changements dans les moyennes de températures et de précipitations. Ainsi, malgré la présence des facteurs naturels qui influencent le climat, sans les activités humaines, il n'y aurait probablement pas de réchauffement global actuellement, comme démontré par la figure ci-après, proposée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [38]. Les changements climatiques modifieront grandement les quantités de précipitations moyennes et extrêmes ainsi que leur fréquence. Ceci aura inévitablement des répercussions sur l'ampleur et la fréquence des inondations, des sécheresses et entrainera des

impacts sur le cadre bâti, la production hydroélectrique, le drainage urbain et les divers usages de l'eau si des actions d'adaptation ne sont pas mises de l'avant. Cependant, réduire la quantité de gaz à effet de serre (GES) que l'humanité génère ne suffit plus pour lutter contre les changements climatiques, estime l'organisation québécoise Ouranos, à la lumière du plus récent rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Avec l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre provenant des activités humaines, les océans n'arrivent plus à assurer leur fonction de régulation du carbone. Ils subissent ainsi une hausse dramatique de leur température, contribuant de manière significative aux changements climatiques en référence à la figure 2.2. Alors qu'ils sont réputés pour leur capacité à absorber d'importantes quantités de dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère, agissant ainsi comme un puits de carbone essentiel.



Source: IPCC, 2021: Summary for Policymakers In-Climate Change

Figure 2.2 Changement de la température globale moyenne annuelle observée et simulée incluant les facteurs humains et naturels (1850-2020)

La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques de 1992 [39] nous permet de comprendre que : « *les changements de climat sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables* ». Le programme de développement durable à l'horizon 2030, l'ONU reconnaît que les changements climatiques représentent « l'un des plus grands défis de notre temps [40]. Les parties à la CCNUCC et à son Accord de Paris reconnaissent que le changement climatique est un défi mondial auquel tous sont confrontés, avec des dimensions locales, infranationales, nationales,

régionales et internationales. Aujourd'hui, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau favorisent toute sorte de perturbation anthropique dangereuse du système climatique et la hausse de la température atteint des niveaux dangereux qui causerait des dommages irréversibles aux populations et les écosystèmes.

Quant à la NASA [41], les signes immédiats des changements climatiques sont les suivants : hausse de la température dans le monde, réchauffement des océans, recul des nappes glaciaires et des glaciers, diminution de la couverture neigeuse, élévation du niveau de la mer, diminution de la glace marine arctique, phénomènes météorologiques extrêmes et acidification des océans. Elle a montré, à travers une étude dévoilée en 2012, que « *les gaz à effet de serre générés par l'activité humaine et non les changements de l'activité solaire sont la force motrice du réchauffement climatique* ».

La nature à laquelle l'humanité entière vit montrée un déséquilibre dénommé changement climatique par les spécialistes, il est dû à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère qui modifie le climat de la planète, provoquant des températures extrêmes, des inondations, des sécheresses, des feux de forêt et une augmentation de l'appauvrissement de la biodiversité en référence à canada.ca consulté le 20 septembre 2023. Le changement climatique actuellement à l'œuvre menace à la fois les services d'approvisionnement en eau, l'assainissement et la pérennité de cette ressource. Les risques climatiques associés à l'eau se répercutent sur les systèmes alimentaires, énergétiques, urbains et environnementaux [42]. Les services EAH doivent dès lors s'adapter aux défis imposés par le réchauffement de la planète et les catastrophes naturelles et climatiques qui en découlent [43]. En ce sens, en citant le gouvernement du Canada: « *des solutions naturelles permettraient d'atténuer les effets des changements climatiques et de s'y adapter* », puisque l'homme constitue une fin en soi.

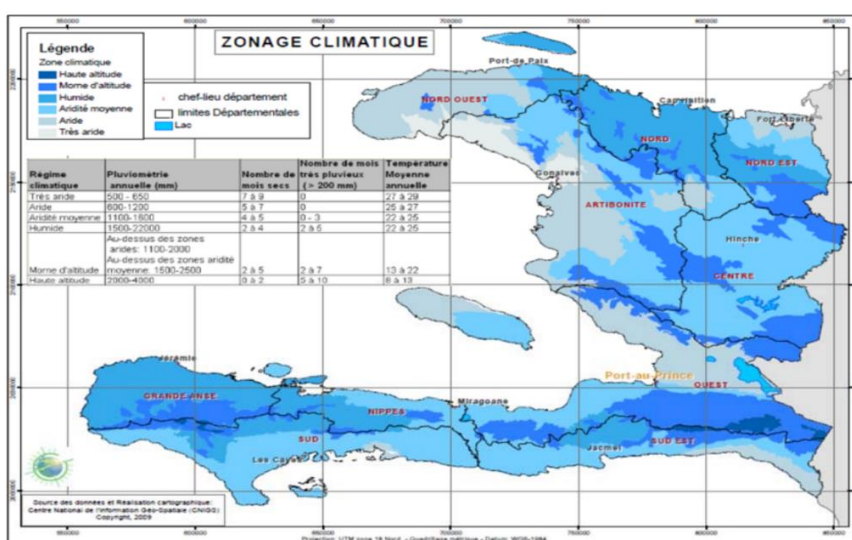
Tout compte fait, cette force motrice active au quotidien les aléas climatique grâce à son énergie révèle un défi pour l'homme entier, en particulier travaillé à la diminution de la hausse des températures. Ce réchauffement peut provoquer une diminution considérable de la disponibilité en eau, l'augmentation du risque de sécheresse, des incendies etc.

2.3 Revue de la littérature de l'évolution du climat d'Haïti

Cette partie passera en revue le climat d'Haïti de façon générale, plus particulièrement la température de Milot, la pluviométrie de Milot où se trouve la Cité du Savoir et une synthèse de la climatologie actuelle.

2.3.1 Climatologie d'Haïti

Haïti, un pays extrêmement vulnérable aux impacts des changements climatiques. Ce pays est menacé par la montée des eaux, la sécheresse, les inondations, la salinisation des sols et toutes sortes de risques dus à ce phénomène [1]. La figure 2.3 ci-après illustre le zonage climatique national.



Source : Copyright © 2020-Plan de Contingence Hydrométéorologique National

Figure 2.3 Zone climatique d'Haïti

2.3.2 Température

Le climat est considéré tropical maritime. Haïti est une île qui bénéficie d'un fort ensoleillement, avec de fortes chaleurs, tout au long de l'année avec son climat tropical. C'est une des régions les plus ensoleillées des Antilles [44].

Sur les plaines [44], la température annuelle moyenne est 27 degrés Celsius (81 degrés Fahrenheit), pendant que dans les montagnes, la température annuelle moyenne est 16 degrés Celsius (61 degrés

Fahrenheit). La variation de température saisonnière est seulement de 4 à 5 degrés Celsius (8 à 10 degrés Fahrenheit).

Entre décembre et mars, débute la saison sèche. Les pluies sont peu abondantes et tombent essentiellement la nuit. La chaleur est modulée par les alizés qui soufflent du nord-est. À Port-au-Prince, les températures maximales oscillent entre 25 °C en janvier, mois le moins chaud, et 30 °C en mars. La température de la mer reste chaude, avec une eau qui atteint les 26 °C. La plaine centrale de l'île est aride tandis que les côtes Nord et les versants nord-est sont moins secs, car plus exposés au vent et à la pluie, comme sur les hauteurs [44].

D'avril à octobre, commence la saison des pluies. La chaleur est un peu plus forte, avec des températures qui montent jusqu'à 32 °C dans la capitale. Le ciel est souvent dégagé durant ces mois, mais de violents orages tropicaux surviennent brusquement, avec des pluies courtes mais intenses, surtout en fin d'après-midi [44]. La chaleur alliée à la forte humidité rend l'atmosphère lourde, l'air étouffant, ce qui est difficilement supportable. De juillet à novembre, commence la période des ouragans, particulièrement destructeurs.

2.3.3 Température de la Cité du Savoir

Dans la zone d'étude sa température moyenne pour l'année 2023 est de 29.1 °C [44]. Le mois le plus chaud est juillet 30.7 °C. Le mois de janvier est le plus froid de l'année. L'amplitude des températures tout au long de l'année est de 3.2 °C [44]. Le tableau 2.1 et la figure 2.4 ci-après présente la température mensuelle de la zone.

Tableau 2.1: Température de la zone d'étude

Mois	Janv	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Température Moyenne en °C	27.5	27.8	28.3	28.7	29.1	30.1	30.7	30.5	29.9	29.3	28.8	27.9

Source : <https://fr.weatherspark.com>

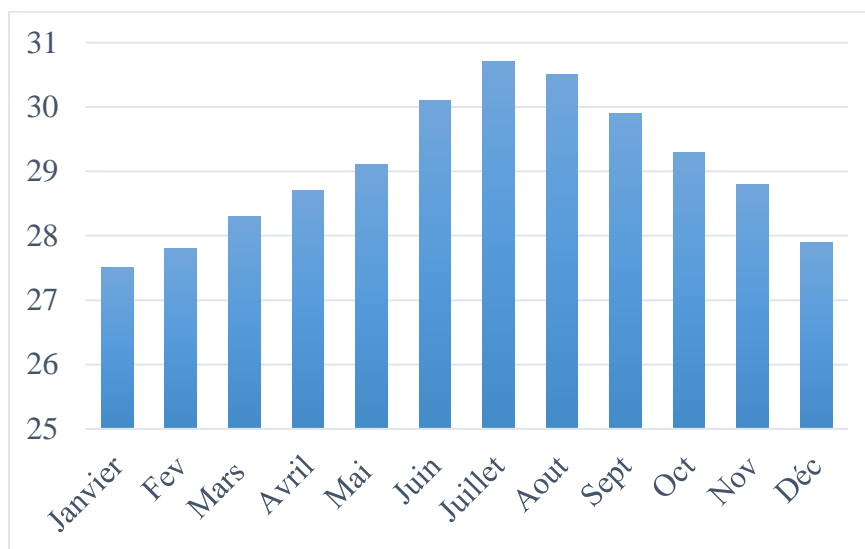


Figure 2.4 Température moyenne en °C

2.3.4 Pluviométrie de la zone d'étude

Par rapport au phénomène des changements climatiques, provoquant les phénomènes el Nino et la Nina, le régime pluviométrique est grandement perturbé et les cycles de pluie ne permettent plus de différencier les saisons pluvieuses des saisons sèches en Haïti en général et la commune de Milot en particulier de la Cité du Savoir. Cette dernière est caractérisée par une saison pluvieuse allant de mars à mai une autre d'août à novembre. Des précipitations moyennes de 22.2 mm font du mois de décembre le mois le plus sec. En septembre, les précipitations sont les plus importantes de l'année avec une moyenne de 120.2 mm. Le tableau 2.2 et la figure 2.5 illustrent les précipitations moyennes mensuelles de la commune [44].

Tableau 2.2 Pluviomètre de la zone d'étude

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Précipitation en mm	31.5	29.2	55.1	79.5	84.4	50.5	57.3	88.8	120.2	72.2	95.3	22.2

Source : <https://fr.weatherspark.com>

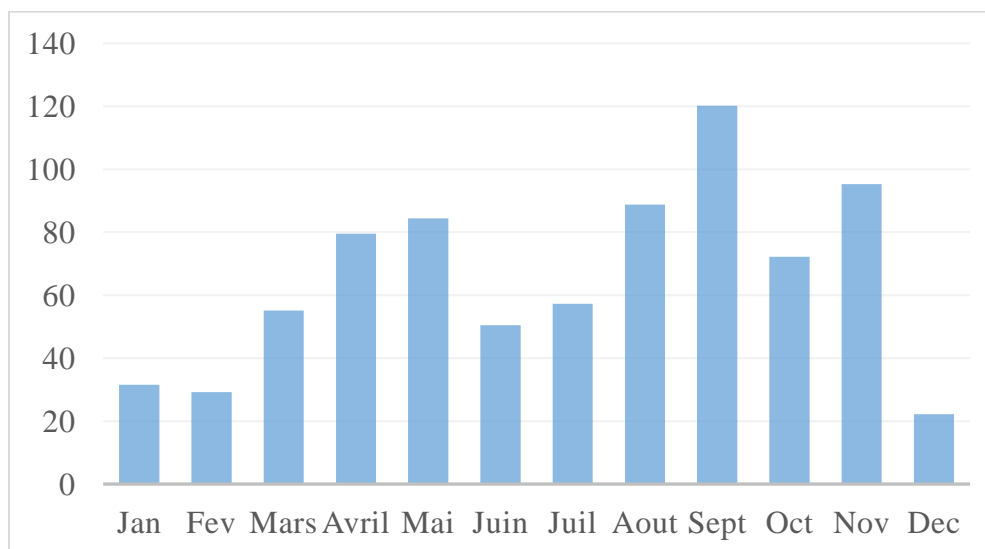


Figure 2.5 Précipitation mensuelle de la zone d'étude

2.3.5 État actuel du Climat

Aujourd'hui, ce pays subit une dégradation écologique ayant atteint un seuil critique, qui affecte la qualité de la vie et les conditions d'existence de bon nombre de nos concitoyens tant en milieu rural qu'urbain. Ces conditions de précarité aggravent la vulnérabilité du pays et sont les causes profondes d'un environnement salubre. De tous les secteurs d'activité touchés, le secteur d'assainissement et d'une gestion durable des eaux sont le plus exposé et le plus vulnérable pour aujourd'hui et demain. Les déséquilibres créés par les changements climatiques provoquent des sécheresses et des inondations et affectent « le régime des pluies, la température et la disponibilité en eau de surface et souterraine dans les zones vulnérables [45] ». Durant la période pluvieuse, faute des contrainte environnementale, il y a une perte en eau. Car la majorité des eaux se ruissellent pour remplir les dépressions superficielles et les océans. Dans ces conditions, l'adaptation de concevoir un système d'assainissement et gestion durables des eaux en Haïti plus particulièrement dans la cité du Savoir devrait être l'une des priorités d'État Haïtien pour promouvoir la résilience.

Le pays éprouve aussi un taux d'évaporation élevé par rapport à la monté de la température durant ces derniers jours. Pendant plusieurs années, il y a une diminution marquée dans la précipitation c'est-à-dire une sorte d'accalmie. La perturbation du climatique par les composantes humaines provoque un problème majeur dans la gestion de l'eau. L'écart de la température et ou des précipitations sont des effets négatifs des conditions climatiques en cours et de la variabilité du climat par exemple la conversion d'une forêt en zone non forestière.

La manifestation la plus probante de cette évolution climatique est une augmentation de la température moyenne planétaire déjà perceptible dans les relevés récents. Malgré cela, la zone d'étude possède un climat de savane à hiver sec selon la classification de Köppen-Geiger, une commune avec des précipitations importantes. Même pendant le mois le plus sec, il pleut beaucoup.

2.4 Revue de la littérature des systèmes d'assainissement

Cette section propose un bilan des systèmes d'assainissement particulièrement des études menées permettant d'avoir des outils de développement complémentaires pour le secteur de l'assainissement, parmi les études des systèmes d'assainissement cinq (5) retiennent notre attention dans le document de EAWAG, WSSCC et IWA. Tous ces systèmes seront analysés dans les sections qui suivent.

2.4.1 Système avec fosse unique et production de boue

Dans ce système, les auteurs [46] montrent qu'il a été construit avec une fosse unique à la base pour collecter et stocker les excréments. Il peut être utilisé avec ou sans eau selon la limite de l'utilisateur et rassemble tous les produits entrant à savoir l'urine, les fèces, l'eau de nettoyage anal, l'eau de chasse et les matériaux de nettoyage sec. Ce qu'il faut retenir de ce système c'est que la quantité d'eau utilisée dépendra de la disponibilité en eau et des habitudes locales. C'est un système qui peut être utilisé soit en des toilettes sèches ou des toilettes à chasse manuelle et l'utilisation d'un urinoir. Ceci permet de relier l'interface de l'utilisateur à une technologie de collecte et de stockage/traitement qui résulte par une fosse unique ou une fosse ventilée améliorée.

Ils avancent en disant que le système avec fosse unique et production de boue est adapté aux milieux rural et périurbain où le sol est approprié au creusage d'une fosse et à l'absorption des percolats. Il n'est pas recommandé dans les zones soumises à de fortes pluies ou à des inondations pouvant faire déborder la fosse. Les eaux grises peuvent aider à la dégradation de l'environnement et peuvent remplir rapidement la fosse ou conduire à une infiltration excessive. Même s'il est parmi les moins chers à construire en termes de coûts d'investissement. Cependant, les coûts d'entretien peuvent être considérables selon la fréquence et la méthode de vidange de la fosse. Il présente plusieurs options d'élimination lorsque la fosse est pleine. S'il y a de l'espace et la superstructure

est amovible, on peut la combler avec de la terre et plantée des arbres fruitiers et une nouvelle fosse sera creusée. Dans le cas contraire, les boues générées doivent être enlevées et transportées dans une station de traitement, mais il faut éviter que ces boues avant traitement ne soient pas en contact avec l'être humain et l'agriculture. Ces boues peuvent être valorisées après un traitement approprié soit utilisées dans l'agriculture, soit envoyées vers un site de stockage (mise en décharge) [46].

2.4.2 Système avec chasse manuelle sans production de boue

Ces auteurs [46] montrent que ce système est approprié dans des zones rurales et périurbaines utilisant une toilette à chasse et des fosses doubles pour produire un produit partiellement digéré, semblable à de l'humus qui est bien plus hygiénique que les boues brutes non digérées et peut être employé pour l'amendement des sols. Ce système n'est pas recommandé si on a un sol argileux ou compact mais doit être installé que lorsque la surface libre de la nappe est profonde et ne risque pas d'être contaminée par les fosses. Il est bien adapté au nettoyage anal avec de l'eau et la fosse double tapissée d'un matériel poreux au liquide de s'infiltrer, tandis que les solides s'accumulent et se dégradent au fond de la fosse. Pendant qu'une des fosses se remplit d'eaux noires, l'autre est hors service. Quand la première fosse est pleine, elle est couverte et temporairement mise hors service. Quand la deuxième fosse est pleine, la première fosse est ré-ouverte et le contenu vidangé.

2.4.3 Système sec avec séparation d'urines

Ce système peut être utilisé n'importe où selon ces écrivains [46], mais il est particulièrement approprié pour les sols rocheux difficiles à creuser et dans les régions à faibles ressources en eau. Il a un succès qui dépend de la séparation efficace de l'urine et des fèces et peut être fabriqué localement à partir des matériaux disponibles. On peut utiliser constamment de cendres, de chaux, de terre ou de sciure pour couvrir les fèces. Lorsqu'il y a un climat sec et chaud ça peut contribuer considérablement à la déshydratation rapide des fèces. Il exige le port d'une protection personnelle adaptée pendant la vidange, le transport et l'usage. Il faut nécessairement un système séparé pour les eaux grises, puisque celles-ci ne peuvent pas être introduites dans les bacs de déshydratation et le matériau retiré devrait être sain et sous forme utilisable, mais s'il n'existe pas de besoin agricole et/ou si l'utilisation de l'urine n'est pas acceptée, cette dernière peut être infiltrée directement dans le sol ou dans un puits d'infiltration.

2.4.4 Système avec transport des eaux noires vers un traitement semi-centralisé

Quant à ce système, les auteurs [46] argumentent en montrant qu'il convient particulièrement bien aux environnements denses, périurbains et urbains et non pas aux zones rurales où la densité de logements est faible, car il faut qu'il ait une volonté et une capacité élevées de payer pour l'investissement et les coûts d'entretien. Il requière de l'eau en permanence et a une caractérisation importante qui est la non-collecte et stockage/ traitement. Les produits entrant de ce système incluent également les eaux pluviales. Ces dernières peuvent être collectées et envoyées vers le réseau d'égouts gravitaires, mais cela diluera les eaux usées et nécessitera des débordements d'eaux pluviales. Enfin, lorsqu'il existe peu ou pas de place pour des technologies de stockage sur site ou les vidanges l'intégration des eaux grises dans la technologie de transport empêche des accumulations de solides dans les égouts.

2.4.5 Système utilisant le biogaz

Selon ces auteurs [46], ce système convient mieux aux zones rurales et périurbaines, là où existe un espace suffisant. Il est à la base de son utilisation comme réacteur le biogaz et ce dernier biogaz est bon pour faire cuisiner. Il fonctionne avec deux technologies d'interface utilisateur : des toilettes à chasse manuelle ou si une demande d'urine à utiliser dans l'agriculture existe, des toilettes à chasse avec séparation des urines. Un urinoir peut également être utilisé. L'interface utilisateur est directement reliée à un réacteur à biogaz. Tous les produits humains y compris les déchets animaux entrants dans le système.

2.5 Critique de la littérature des systèmes d'assainissement

Différents systèmes ont été proposés tenant compte du contexte dans lequel s'effectue cette recherche, est-ce pour cela que nous allons faire une analyse critique de ses limites et leur applicabilité.

La revue des travaux présentés et des systèmes utilisés dans l'assainissement des eaux a permis de mettre en relief les limites de ces derniers. On a pu relever que :

- Le système à fosse unique et production de boue doit être choisi uniquement là où il y a suffisamment d'espace pour creuser continuellement de nouvelles fosses et n'est pas recommandé dans les zones soumises à de fortes pluies ou à des inondations pouvant faire déborder la fosse [46]. C'est un système à superstructure amovible. Les eaux grises

pourraient servir comme des vecteurs polluants et à la dégradation de l'environnement. Comparativement le système à chasse manuelle sans production de boue avec une fosse double n'est pas recommandé dans des sols argileux ou compact. C'est un système à risque de contamination de la nappe.

- Le système sec avec séparation d'urines est une bonne méthode et ne requière dans des régions qui a une faible ressource en eau. Pour sa meilleure exploitation, il faut avoir des sols rocheux difficiles à creuser, cependant il faut avoir un climat sec et chaud peut également contribuer considérablement à la déshydratation rapide des fèces et sa déshydratation peut provoquer la propagation des agents pathogène dans l'environnement.
- Le système avec transport des eaux noires vers un traitement semi-centralisé exige un niveau de nappe très élevé et de l'eau en permanence pour éviter le colmatage des égouts. Exigeant dans son applicabilité par système séparé pour éviter le refoulement des eaux pluviales dans des égouts.

Tout cela nous permet de déduire que le système biogaz conviendrait mieux et pourrait jouer un grand rôle dans la lutte contre la pollution. Plusieurs spécialistes font cette constatation au moment où la COP2, soulignant l'apport du biogaz pour une meilleure biodiversité [47]. Pour eux, selon leur rapport, l'utilisation de biocarburants et de ses sous-produits est essentielle à l'atteinte des objectifs mondiaux de réduction des émissions GES. Cet allié sans pareil a la capacité de mieux répondre aux besoins grandissants en énergie verte [47]. Pour les secteurs difficiles, il permet la de-carbonisation et à fortes émissions comme ceux des transports, du chauffage et de l'agriculture. Le digestat est riche en matières organiques et en nutriments, pratiquement sans odeur, et les agents pathogènes sont partiellement inactivés [46]. Grâce à la valorisation du biogaz par le chauffage du réacteur biologique séquentiel, en se référant au Comité de vigilance- LET de Drummondville, on peut traiter les eaux usées, et les déversent dans les milieux aquatiques sans compromettre les usages tels que : recharge de nappe, l'élevage, la pêche et l'agro-industrie [48].

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente les méthodes permettant d'atteindre les objectifs définis d'une manière techniquement réalisable, économiquement rentable et respectueuse de l'environnement, dans le contexte du changement climatique. Il met en évidence les approches qui devraient être adoptées pour comprendre, expliquer, prévoir ou transformer les différents processus impliqués [49]. La question principale est traitée dans une section qui met l'accent sur l'application d'une approche développée pour l'étude de cas de la Cité du Savoir afin de répondre à des questions spécifiques. Ce chapitre traite de la conception d'un système durable de gestion des eaux pluviales pour la Cité du Savoir et de la conception d'un système durable de gestion des eaux usées pour le même site. Le coût et l'impact environnemental des deux systèmes ont également été évalués.

3.1 Conception d'un système de gestion durable des eaux pluviales pour la Cité du Savoir

La conception d'un système de gestion des eaux pluviales est une étape clé car elle détermine le fonctionnement durable d'un réseau [50]. Dans cette section, nous évaluons les paramètres de la conception du système de gestion des eaux pluviales puis le choix du logiciel de simulation, en tenant compte des perspectives d'évolution de l'environnement et du degré de protection contre les inondations.

3.1.1 Paramètres de conception du système de gestion des eaux pluviales

De nombreuses méthodes ont été développées dans la littérature pour produire des informations hydrologiques qui ne sont pas disponibles sur la base des seules données hydrométéorologiques. Bons nombres d'entre elles se basent sur des modèles hydrologiques. Certains de ces modèles ont été développés pour simuler les débits qui résultent des sollicitations météorologiques, et en particulier des sollicitations pluviométriques [51]. Ces modèles sont divers et variés, la plupart d'entre eux permettent, par exemple, d'émettre une prévision de débits sur la base de prévision météorologiques, d'autres de produire les scénarios hydrologiques correspondant à des scénarios climatiques définis [52].

De ce point de vue, il est courant de distinguer trois approches de modélisation. La première est une approche physique qui comprend des lois de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement qui s'expriment sous forme d'équation aux dérivés partielles par rapport au temps et l'espace. La deuxième empirique, repose sur des relations observées entre les entrées et des sorties de l'hydrosystème considéré. La dernière approche dite conceptuelle est basée sur la perception, à priori, que l'hydrologue a du comportement hydrologique du bassin [51], [52].

Dans le cadre de ce mémoire, le choix se porte sur l'approche conceptuelle. Afin de garantir la clarté et la cohérence, le modèle conceptuel offre l'avantage de la simplicité dans le développement et la mise en œuvre. L'hydrosystème est conceptualisé comme une combinaison de réservoirs fictifs représentant ses différents compartiments hydrologiques, reliés entre eux par des fonctions d'échange simples [51], [52]. Ils cherchent à représenter les principaux processus de la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. Ces limites sont directement liées à la nécessité de conceptualiser la relation pluie-débit au sein du modèle dont on veut fixer les paramètres. Cette conceptualisation peut entraîner des interactions entre les valeurs de certains paramètres. Par conséquent, lorsque plusieurs paramètres exercent une influence sur le débit d'eau au sein du modèle, leurs valeurs ne seront pas totalement indépendantes, malgré la nature indirecte de la relation associée [53]. De plus, chaque réservoir est associé à une équation de continuité. Cette équation, également appelée équation du bilan hydrique (équation (1)), exprime le fait que la variation du volume d'eau stocké dans le système sur un intervalle de temps donné est égale à la différence entre la somme des volumes entrants et sortants sur cet intervalle de temps [51], [52].

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - O(t) \quad (1)$$

Où

$S(t)$ Stock au temps t [m^3] ;

$\frac{dS(t)}{dt}$ Variation du stock [m^3/s] ;

$I(t)$ Variation des débits entrants [m^3/s] ;

$O(t)$ Variation des débits sortants [m^3/s].

Les auteurs de l'ouvrage « *Hydrologie 2, une science pour l'ingénieur* » parlent des facteurs qui influencent l'importance des différents termes du bilan hydrique à une plus grande échelle à savoir

l'hétérogénéité dans l'espace des caractéristique du milieu et du contexte hydrométéorologique [52]. Alors le bilan hydrique peut s'exprimer de la façon simplifiée comme illustre l'équation (2) et la figure 3.1:

$$\Delta S = P - Q - F - E \quad (2)$$

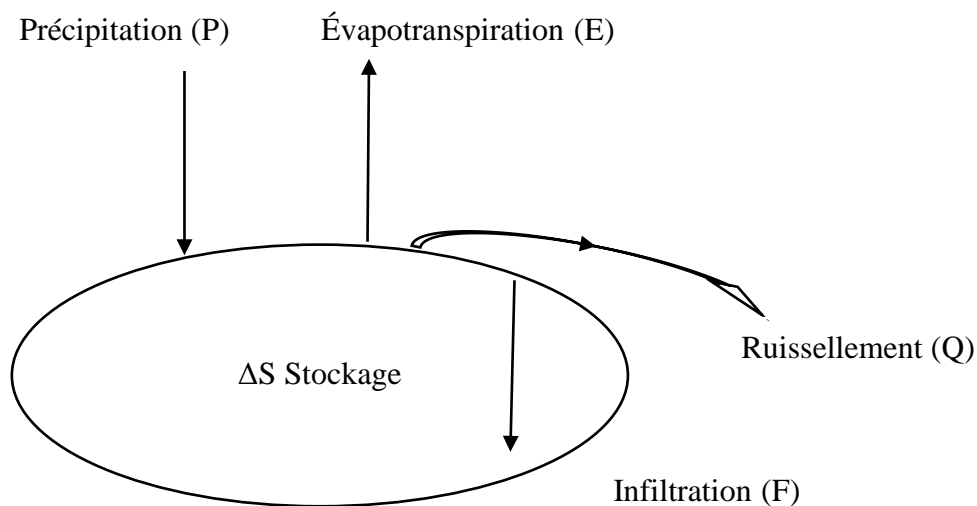
ΔS : est la variation de stockage en [mm] ;

P : est la précipitation totale tombant sur le bassin en [mm] ;

Q : est le ruissellement direct atteignant l'exutoire en [mm] ;

F : est la quantité d'eau perdue par infiltration en [mm] ;

E : est la quantité d'eau perdue par évaporation et transpiration en [mm].



Source : © www. <https://www.aquaportail.com>

Figure 3.1 Schématisation du bilan hydrique

Le bilan hydrique est basé sur deux hypothèses pour ce travail :

- ✓ pas de neige ;
- ✓ les conversions annuelles, mensuelles et quotidiennes sont basées sur 365 jours par an et 30.42 jours par mois.

3.1.2 Évaluation des paramètres du bilan hydrique

Dans cette sous-section, nous présentons le bilan hydrologique pour évaluer des quantités d'eau qui contribuent aux différentes étapes du cycle de l'eau : la précipitation, le ruissellement de surface, l'infiltration et l'évapotranspiration.

Estimation de la précipitation

Suivant la longueur de la série de données dont on dispose, la densité du réseau de mesure, et la variation du champ pluviométrique, pour le calcul des précipitations, on utilise préférentiellement l'une des trois méthodes: la méthode de la moyenne arithmétique, le calcul de moyennes pondérées avec l'utilisation, par exemple, de la méthode des polygones de Thiessen, et finalement les méthodes d'interpolation comme l'utilisation d'isohyètes [51]. Les méthodes les plus simples et les plus couramment utilisées pour calculer la pluie moyenne sur le bassin sont les méthodes d'interpolation des données pluviométriques collectées sur le bassin ou à proximité de celui-ci.

Dans la littérature un géographe [54] utilise une méthode qui offre le moyen de mesurer avec assez de précision l'aridité du climat qui est un indicateur déterminant la précipitation annuelle en fonction de la température. Son évaluation est possible non seulement par zone de latitude, mais pour une région déterminée, en général pour toute station où ont été mesurées les températures. De plus, elle est susceptible d'applications à bien des questions de géographie physique et même économique. Elle permet de déterminer si le climat est aride ou non [53], [55].

La formule proposée par Martone pour l'estimation des précipitations est sujette à certaines limitations. Ces limitations sont dues au fait que la formule n'est basée que sur deux variables (la variabilité spatiale et temporelle des données) et que les données nécessaires à son application ne sont pas toujours facilement disponibles [54]. En conséquence, les estimations d'aridité basées sur les moyennes annuelles peuvent ne pas refléter avec précision les conditions réelles sur le terrain. Il est de la plus haute importance de faire preuve de prudence lors de l'utilisation de cette formule et d'envisager l'intégration de variables supplémentaires afin d'obtenir un profil pluviométrique plus complet. La formule ne prend en compte que les précipitations annuelles et la température moyenne, négligeant d'autres facteurs qui peuvent avoir un impact sur les précipitations, tels que l'évapotranspiration potentielle, l'humidité relative, la vitesse du vent et la topographie. L'estimation des précipitations ne peut être réalisée en utilisant uniquement la température moyenne et les précipitations ; une approche plus complète est nécessaire [54].

Dans le cas présent, malgré les limites inhérentes à cette méthode, nous avons choisi de l'utiliser pour calculer les différentes valeurs des précipitations conformément à la relation (3), qui est une fonction de l'indice d'aridité annuel et de la température moyenne annuelle.

$$P = i (T+10) \quad (3)$$

Où

i : Indice d'aridité annuel en [mm/°C], (voir Annexe 1-2) ;

T : Température moyenne annuelle en [°C] ;

P : Précipitation moyenne annuelle en [mm].

Nous partons avec l'hypothèse que l'année actuelle est humide, les années 2030 futures semi-humide Sur cette base nous trouverons les indices d'aridité pour chaque scénario. L'humidité dépend de la variation de la température. Le tableau 3.1 présente les risques d'augmentation de la température de 0.50 °C pour l'année 2024, 1.25 °C pour l'année 2030 et 1.75 °C pour l'année 2050 lié à la transition climatique de scénario avec des émissions de GES intermédiaires : SSP2-4.5 [56].

Tableau 3.1 Augmentation de température pour le scénario SSP2-4.5

Année	2024	2030	2050
Changement de Température moyenne annuelle (°C)	0.75	1.25	1.75

Dans cette perspective, nous pouvons calculer la variabilité des températures futures à partir de la température moyenne annuelle actuelle 29.1 °C [57] ajoutée par le changement des différents scénarios en fonction de l'année 2030 et 2050. Les données de température utilisées mettent en avant une tendance temporelle à l'augmentation. Les évaluations de la température moyenne réalisées tant ex-ante et ex-post permettent d'avoir les bases factuelles solides pour avoir les différentes précipitations.

De façon succincte les hypothèses de calcul :

- ✓ pour la transition climatique de scénario avec des émissions de GES intermédiaires : la température augmente de 0.75 °C pour l'année actuelle et les années 2030 et 2050 respectivement 1.25 °C et 1.75 °C;
- ✓ la température moyenne de l'année 2023 est : 29.1°C;
- ✓ Partant que la zone d'étude est humide avec un taux d'humidité relative compris entre 58 % et 65 %, le taux moyen d'humidité est 60.2 % pour l'année 2023.

L'année actuelle 2024 est humide, et les années 2030 et 2050 semi-humide. Donc on retient l'indice d'aridité annuel qui se trouve dans l'intervalle [30, 40] pour l'année actuelle et [20, 30] pour le futur.

Pour trouver la précipitation en volume, il suffit de faire la conversion de la valeur précipitée en m et faire le produit de cette valeur par la superficie du bassin convertie en m².

Estimation du ruissellement

Il existe de nombreux modèles de transformation pluie-débit, mais les suivants sont les plus utilisés : La méthode Caquot pour calculer les débits de pointe dans des sous-bassins spécifiques, qui sont ensuite comparés à la méthode rationnelle. La méthode dite superficielle, adaptée aux milieux urbains et souvent utilisée pour de petits projets, et la méthode dite rationnelle [58]. Cette dernière permet d'estimer les taux de ruissellement maximum pour des précipitations uniformes sur de petits bassins versants dans un laps de temps relativement court [59], [60]. Elle est l'une des premières techniques de transformation des précipitations en ruissellement et dite rationnelle en ce sens qu'elle relie le ruissellement par unité de surface à l'intensité des précipitations, par opposition aux techniques purement empiriques qui établissent une corrélation entre le débit de pointe et les caractéristiques du bassin versant [61].

Bien que la méthode rationnelle soit un outil précieux pour comprendre le monde qui nous entoure, elle a ses limites. Ces limites sont la conséquence de la subjectivité de la perception humaine, de la complexité de certains phénomènes, des limites de la logique formelle, et sont basées sur ce que nous savons déjà et ce que nous pouvons observer. Il est donc primordial de reconnaître ces limites et d'utiliser des méthodologies alternatives et complémentaires afin de parvenir à une compréhension plus complète et plus enrichissante des phénomènes en question [60], [61]. Ainsi,

pour le calcul de l'écoulement superficiel la formulation de l'équation (4) suivante [62] est utilisée :

$$Q(t_c) = \sum_{k=1}^n A_k I R_k \quad (4)$$

Avec :

$Q(t_c)$: Débit de ruissellement en $[m^3/s]$;

t_c : Temps de concentration en minute ;

I : Intensité de pluie en $[mm/h]$;

R_k : Coefficient de ruissellement, grandeur sans dimension en $[%]$;

Puisque $\sum_{k=1}^n A_k$ représente en fait la superficie du bassin versant en hectare, on peut réécrire cette équation précédente [59], [63] sous la forme de l'équation (5) :

$$Q = KAIR \quad (5)$$

K : coefficient de proportionnalité sans unité est égal à $(1/360)$;

A : superficie du bassin en $[km^2]$;

I : intensité de pluie en $[mm/h]$;

R : coefficient de ruissellement en $[%]$, grandeur sans dimension représente la proportion des précipitations qui s'écoulent effectivement en surface ;

Q : débit de ruissellement en $[m^3/s]$.

Toutes les pertes par infiltration, rétention et évapotranspiration sont ramenées à un coefficient dite coefficient de ruissellement qui est constant dans le temps par hypothèse. Il est un paramètre important dans la modélisation des processus hydrologiques, car il affecte directement l'écoulement de surface et, par conséquent, le risque d'inondation [64]. C'est un paramètre dont l'évaluation demeure la plus subjective dans l'application de la méthode, une quantification adéquate requiert donc un bon nombre de jugement et une expérience minimale de la part du concepteur. Ce coefficient dépend principalement de la nature des terrains, de la pente du bassin, de l'intensité de la pluie, et des conditions atmosphériques antérieures et varie au cours de la pluie [64]. Dans l'application de la méthode rationnelle, celui considéré est un coefficient pondéré qui tient compte du pourcentage relatif de chaque type de surface par rapport à la surface totale. Il est possible de l'obtenir de la façon suivante (6) :

$$R_{\text{pondéré}} = \frac{A_1 * R_1 + A_2 * R_2 + \dots + A_n * R_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (6)$$

Partant de l'approche la plus simple pour avoir le coefficient de ruissellement, il faut de l'associer à un type de surface (voir Annexe 1-3) [64], par hypothèse :

- ✓ secteur agricole, $R = 0.20$ (zone industrielle légère) ;
- ✓ secteur scolaire $R = 0.8$ (zone commerciale) ;
- ✓ secteur service : $R = 0.6$ (zone maison de ville) ;
- ✓ secteur universitaire, $R = 0.70$ (bloc appartement).

$I_{(t_c, T)}$, est l'intensité de pluie en mm/h pour une durée égale au temps de concentration t_c , calculée pour les périodes de retour T . L'un des modèles du type Montana-Talbot associés est appliqué, choisie parmi quelques modèles IDF usuels issus de la littérature [66]. Il est formulé pour le calcul selon la relation (7) suivante:

$$I_{(t_c, T)} = a(t_c + b)^{-c} \quad (7)$$

En considérant le domaine de validité des coefficients de Montana utilisés pour les temps de concentration (1heure-24 heures) [67] ; a , b et c sont des paramètres régionaux du Québec choisis du modèle IDF (voir annexe 1-3) en raison des manques de données disponible pour Haïti.

Pour les contrôles associés aux récurrences ci-après, les données pluviométriques de base sont également celles en climat futur.

- pour l'année actuelle, l'intensité de pluie est établie en prenant 205 jours de la quantité d'une durée d'une heure. Ce qui permet d'avoir les valeurs de $a = 447,4998$, $b = 0$ et $c = 0,6912$;
- Pour l'année 2030, l'intensité de pluie est établie en prenant 150 jours de la quantité de pluie d'une durée d'une heure. Les valeurs de a , b et c se détermine par la méthode interpolation linéaire de Lagrange (8) entre 5 ans et 10 ans du coefficient de Montana.

On connaît la fonction f aux points x_0 et x_1 , donc f_0 et f_1 . On écrit ensuite les deux fonctions cardinales comme suit : $l_0 \frac{x-x_1}{x_1-x_0}$ et $l_1 \frac{x-x_0}{x_1-x_0}$ et on construit alors le polynôme d'interpolation comme :

$l_0(x) = \sum_{i=0}^n f_i l_i$ et on obtient la droite d'interpolation (8) de la méthode de Lagrange [68] comme :

$$l_1(x) = f_0 l_0 + f_1 l_1 = f_0 \frac{x-x_1}{x_1-x_0} + f_1 \frac{x-x_0}{x_1-x_0} \quad (8), \text{ Interpolation de Lagrange d'ordre 1}$$

La formule classique de la méthode interpolation se présente dans l'équation (9) :

$$P(x) = f(a) + [(f(b) - f(a)) \frac{x-a}{b-a}] \quad (9)$$

Avec $a < b$, et $a \leq x \leq b$.

- ✓ Pour l'année 2050, elle est établie en prenant des valeurs pour une quantité de pluie de 110 jours sur une durée d'une heure. Les valeurs de a, b et c se déterminent par la méthode interpolation linéaire de l'équation (9) entre 25 ans et 50 ans du coefficient de Montana.

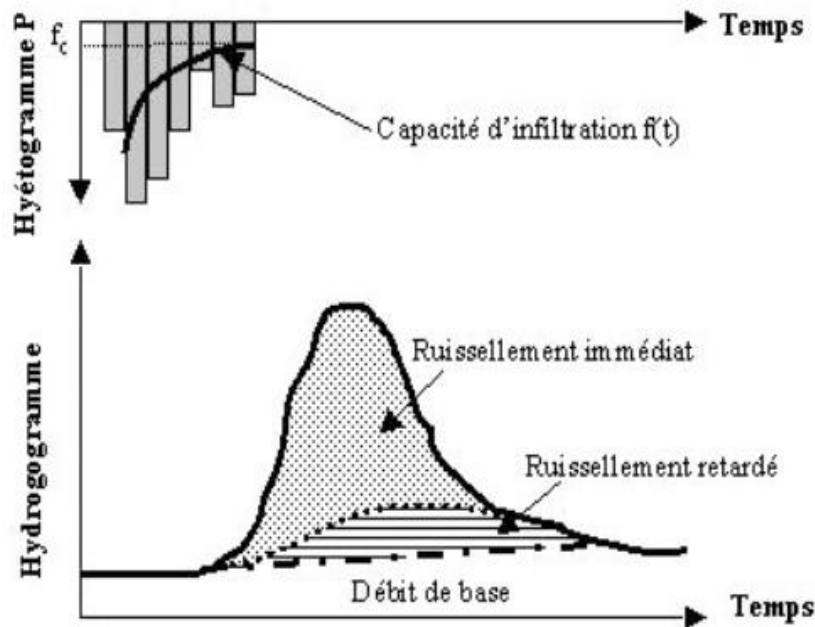
Estimation de l'infiltration

L'infiltration de l'eau dans le sol est un paramètre important à considérer pour l'analyse du ruissellement, tant pour des secteurs ruraux que pour des secteurs urbanisés. C'est une composante dont la valeur varie dans le temps avec les apports d'eau et la plupart des modèles de simulation, contrairement à la méthode rationnelle. Pour le calcul de l'infiltration, il y a une approche empirique ou hydrologique (avec les modèles du NRCS (anciennement SCS) et de Horton) ou une approche basée sur une approximation des modèles physiques (modèle de Green-Ampt) [69]. Ces approches peuvent se définir comme étant intermédiaires si on considère leur niveau de complexité et surtout le nombre de paramètres qu'elles requièrent pour leur application dans des situations concrètes de conception. La plupart des modèles couramment utilisés en hydrologie urbaine ont recours à une de ces trois approches pour simuler l'infiltration [70], [71]. Dans le cadre de ce travail, l'approche empirique du modèle de Horton est utilisée.

Le modèle proposé est le plus couramment utilisé en hydrologie urbaine pour l'analyse de l'infiltration. L'application généralisée du modèle peut être attribuée à sa capacité à atteindre un équilibre entre la simplicité et une description acceptable des processus physiques d'infiltration. Bien que le modèle de Horton soit un outil utile pour estimer les taux d'infiltration, il est essentiel d'être conscient de ses limites lorsqu'on l'applique à des scénarios réels. L'équation proposée par Horton n'est valable que dans le cas où le potentiel est à tout moment inférieur à la pluviométrie. Ces limites incluent des difficultés dans l'estimation des paramètres, des hypothèses sur les conditions d'humidité du sol, une applicabilité limitée à tous les types de sols et de paysages, ainsi que la variation temporelle et la dépendance à l'égard de l'échelle de temps. Les limitations susmentionnées peuvent être résolues par la mise en œuvre d'approches alternatives ou de

modifications, qui peuvent ensuite améliorer la précision et la fiabilité des calculs d'infiltration dans une multitude de conditions de terrain. Ainsi, les différentes mesures et analyses de Horton durant les années 1930 l'ont conduit à proposer l'équation (10) suivante [70] :

$$F = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (10)$$



Source : © Jean Albergel, et al., 2003

Figure 3.2 *Modèle de Horton*

F : capacité d'infiltration [mm/h] ;

f_c : capacité d'infiltration ultime ou d'équilibre en [mm/h] ;

f_0 : capacité d'infiltration initiale [mm/h] ;

k : taux de décroissance dans la capacité d'infiltration (s^{-1}) est homogène du temps ;

Pour obtenir l'infiltration cumulative, on procède à l'intégration de l'équation (11) :

$$F(t) = f_{ct} + \frac{(f_0 - f_c)}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (11)$$

Les valeurs des paramètres de Horton varient en fonction de la nature du sol. Chaque type de sol a une capacité d'infiltration spécifique. Il estime [64] comme suit le tableau 3.2, les paramètres de Horton :

Tableau 3.2 Paramètres d'infiltration de Horton

Catégorie de sol	A	B	C	D
f_0 (mm/h)	250	200	125	75
f_c (mm/h)	25	12	6	2.5
k (s ⁻¹)	2 à 5	2 à 5	2 à 5	2 à 5

Où :

A: faible possibilité de ruissellement (sable et gravier bien drainés);

B : taux d'infiltration moyen (texture moyennement fine à moyennement grosse; sable) ;

C: faible taux d'infiltration (texture assez fine, sols contenant de l'argile);

D : forte possibilité de ruissellement (argiles, nappes constamment hautes).

Hypothèse de calcul :

- Nous considérons les 4 catégories pour le calcul des taux d'infiltration moyen.
- $k = \frac{2+5}{2} = 3.5$ (1/h);
- supposons le même temps pour les années actuelle et futures, et on prend $t = 15$ minutes pour le calcul de l'infiltration cumulée;

Pour trouver l'infiltration en volume, il suffit de convertir la valeur perdue en m et faire le produit de cette valeur par la superficie du bassin convertie en m².

Estimation de l'évapotranspiration

De nombreuses formules ont été établies pour calculer l'évapotranspiration à partir de quatre éléments climatiques fondamentaux: température, humidité relative, insolation et vitesse du vent. En se référant aux auteurs de l'ouvrage « *Hydrologie 2, une science pour l'ingénieur* » lorsque le stockage sur le feuillage est supérieur ou égal à sa capacité maximum de stockage, l'évaporation à partir du couvert végétal E se fait à un taux égal à l'évaporation potentielle [49]. D'où le concept d'évapotranspiration potentielle a probablement été introduit par Thornthwaite et Brutsaert [72].

Elle désigne tous les processus par lesquels l'eau en phase liquide ou solide à la surface de la terre devient de la vapeur d'eau. Elle combine évaporation et transpiration mais aussi du vent et de l'humidité atmosphériques par des relations plus complexes [73], [74]. Mais, bon nombre de méthodes existent telles que Perman-Monteith, Priestley-Taylor, Turc, Primault, Blaney et Criddle [75]. Mais l'accent est mis sur la méthode de Blaney et Criddle.

Le modèle de Blaney-Criddle est un outil précieux pour estimer l'évapotranspiration en particulier dans les régions où les données météorologiques sont limitées. Il est simple, accessible et fiable dans certaines conditions. Il fait intervenir la température moyenne mensuelle et le pourcentage d'éclairement du mois considéré [75], [76]. Cependant, il est important de tenir compte de ses limitations et de l'utiliser avec prudence. Il présente plusieurs limites qui peuvent affecter sa précision. Ces limites comprennent l'hypothèse d'un coefficient d'évapotranspiration constant, l'absence de prise en compte de la vitesse du vent, l'applicabilité limitée dans les régions humides, la surestimation de l'évapotranspiration pendant les saisons fraîches et la dépendance à l'égard des données empiriques [76]. Pour des estimations plus précises, d'autres modèles plus complexes peuvent être utilisés. Dans le cadre de ce travail, l'équation (12) de Blaney et Criddle [76] nous aide à évaluer l'évapotranspiration annuelle pour les différents horizons d'études.

$$E = k (8.13 + 0.46 T)p \quad (12)$$

E : évapotranspiration mensuel en [mm/j] ;

k : est une constante, un coefficient variable sans unité qui intègre tous les autres facteurs non analysés, et qui dépend de la température. (voir Annexe-1-6); ils sont obtenus par la méthode interpolations linéaire ;

T : température [°C] ;

p : rapport entre le nombre moyen d'heures de jour pour un mois donné et le nombre total d'heures de jour pour l'année [%], en fonction de la latitude (voir Annexe-1-6) de la zone d'étude qui est 19 °N. Pour déterminer ce pourcentage d'éclairement qui se trouve entre 15° et 20°, il suffit d'utiliser l'équation (9) proposée de la méthode interpolation dans l'abaque de Brouwer & Heibloem.

Pour trouver l'évapotranspiration en volume, il suffit de convertir la valeur perdue en m et faire le produit de cette valeur par la superficie du bassin convertie en m².

Choix du logiciel de modélisation

Partant de la disponibilité des données, la seconde étape importante demeure le choix du logiciel de modélisation. Il convient de noter que le logiciel commercial Environmental projection Agency Storm Water Management Model (EPA SWMM) ne serait idéal pour la modélisation et l'analyse. Ce logiciel est un système informatisé d'aide à la prise de décisions, contient un module de ruissellement, un module hydraulique, un module climatologique et un module sanitaire, est l'un des modèles les plus couramment utilisés pour la gestion des eaux pluviales, des eaux usées et la modélisation des bassins versants [77]. Ce modèle représente le bassin versant sous la forme des sous bassins versant, les nœuds et les conduites. Ce logiciel utilise l'équation de Barré de Saint Venant pour simuler les écoulements à surface libre. Les modèles basés sur ces équations permettant de bien d'écrire le comportement hydraulique [78].

Les équations sont écrites sous la forme de lois de conservation, avec une variation temporelle, un terme de flux et un terme source [78] :

✓ Équation de la conservation de la masse : $\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$

✓ Équation dynamique (Conservation de la quantité de mouvement ou de l'énergie) : $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} +$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + j = 0$$

Où

Q : débit [m^3/s];

x : abscisse;

t : temps [s];

S: Surface mouillée [m^2];

V : vitesse [m/s];

H : charge hydraulique [m];

j : perte de charge unitaire, calculée avec la formule de Manning-Strickler [m/m];

i : pente de radier;

y : tirant d'eau [m];

z : cote du radier [m].

L'équation dynamique s'écrit sous la forme : $\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + j - i = 0$

Où les deux premiers termes sont des termes d'inertie : accélération locale $\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t}$ et accélération convective $\frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x}$.

Le terme $\frac{\partial y}{\partial x} - i$ représente la pente de la surface libre. i représente la pente du radier et j la pente de la ligne de charge.

Les modèles disponibles de logiciel correspondent à différents degrés de simplification utilisés dans la résolution numérique des équations de Barré de Saint Venant [78]. Dans le cadre de travail le modèle de l'onde dynamique est opté pour la simulation.

Le modèle susmentionné fournit une solution complète pour simuler avec précision l'écoulement de l'eau dans une multitude de scénarios. Il peut être appliqué à n'importe quel réseau, représentant avec précision les débits, les situations de débordement et l'impact du stockage. L'intégration des variations temporelles et spatiales des précipitations et des débits améliore la précision du modèle, ce qui permet d'obtenir des résultats plus réalistes. Cela en fait un outil précieux pour l'étude et la gestion des inondations urbaines, car il peut simuler les phénomènes hydrologiques de manière dynamique et fournir des données pour la formulation de stratégies éclairées de réduction des risques d'inondation. De plus, ce modèle peut être intégré à d'autres outils de modélisation pour faciliter la gestion des eaux pluviales et des eaux usées [78], [79]. Il est essentiel de reconnaître ses limites inhérentes, notamment la nécessité de disposer de données de terrain précises et d'une expertise technique pour la configuration et le calibrage. Ceux qui n'ont pas les connaissances requises peuvent rencontrer des difficultés. En outre, la structure complexe du modèle peut nécessiter un investissement plus important en temps et en ressources informatiques, ce qui pourrait limiter son applicabilité dans des scénarios spécifiques [79]. De plus, pour l'écoulement en charge dans les conduites circulaires l'équation de d'Hazen-Williams ou celle de Darcy-Weisbach est utilisée [78]. Dans ce travail, la dernière équation est retenue.

Cette équation est un outil largement utilisé pour l'analyse des pertes de charge dans une variété de conditions d'écoulement, y compris les écoulements laminaires et turbulents. La polyvalence de l'équation découle de son applicabilité à une gamme variée de types d'écoulement. L'équation

est fondée sur des principes physiques fondamentaux et a été validée par des études expérimentales, ce qui garantit la précision des calculs de perte de charge. En outre, elle est adaptable, ce qui permet de modifier des paramètres tels que le coefficient de perte de charge ou le diamètre de la conduite pour tenir compte de différents scénarios. Bien qu'initialement perçue comme complexe, l'équation de Darcy-Weisbach offre une méthodologie cohérente et standardisée pour évaluer les pertes de charge, simplifiant ainsi les calculs d'ingénierie hydraulique. Par essence, l'universalité, la précision, l'adaptabilité et la cohérence de l'équation en font un outil précieux pour l'analyse des pertes de charge dans une variété de situations d'écoulement [80], [81].

L'équation de Darcy-Weisbach a été louée pour les avantages susmentionnés, mais elle n'est pas sans limites. Tout d'abord, comme tout modèle mathématique, elle est basée sur des approximations qui peuvent entraîner des divergences entre les résultats théoriques et réels. Ensuite, la précision de l'équation dépend des conditions initiales, telles que la rugosité des parois du conduit ou la viscosité du fluide, ce qui peut limiter sa fiabilité dans des scénarios spécifiques. Enfin, bien que l'équation soit applicable aux écoulements turbulents, elle peut se heurter à des contraintes dans les cas extrêmes où les effets non linéaires deviennent significatifs, ce qui nécessite des corrections supplémentaires. Il est important de prendre en compte ses limites liées aux approximations, aux conditions initiales et aux scénarios extrêmes lorsqu'on l'applique dans des situations pratiques [80], [81].

Pour la simulation, il existe trois approches : empirique, conceptuelle et mécaniste ou déterministe [78]. Dans le contexte de cette recherche, l'approche conceptuelle est choisie pour l'analyse. Elle est conçue pour établir une relation solide entre les entrées et les sorties du système en utilisant des variables d'état qui peuvent ou non avoir une signification physique. De plus, elle offre une compréhension globale du comportement d'un système d'assainissement urbain, tout en offrant une flexibilité dans la modélisation de scénarios en intégrant différents paramètres et conditions spécifiques à l'étude. Il est essentiel de reconnaître ses contraintes en ce qui concerne la précision et sa capacité à représenter avec exactitude les complexités des processus qui se produisent dans le système [77] – [79]. Elle permet par ailleurs d'utiliser soit l'équation de Green-Ampt, soit celle de Horton ou celle du NRCS pour tenir compte de l'infiltration cumulée dans le sol, de manière à faire évoluer adéquatement la capacité résiduelle d'infiltration du sol en fonction du temps [82]. Dans le cadre de ce travail, le modèle de Horton est retenu pour évaluer ce dernier.

Pour faciliter la conception du modèle et pour obtenir les diamètres de chaque secteur, nous avons sélectionné la valeur de pluie la plus élevée sur le bassin versant.

3.2 Conception d'un système de gestion durable des eaux usées pour la Cité du Savoir

La conception d'un système de gestion des eaux usées consiste à évaluer des débits d'eaux sanitaires et d'eaux usées.

3.2.1 Évaluation des eaux sanitaires

Dans cette sous-section, nous estimons d'abord la population, puis les différents types de consommation : domestique, industrielle, commerciale, publique et pertes.

Estimation des populations

Elle va nous permettre d'avoir la quantité des personnes actuelles et futures. On utilise la méthode de Léonard Euler qui est dénommée « croissance exponentielle soit $y = a \cdot b^{t \ n}$ ». Ce modèle est un outil puissant qui offre plusieurs avantages tels que la représentation précise de la croissance rapide, les prédictions précises, la compréhension des phénomènes complexes, l'identification des points d'inflexion et l'application dans divers domaines pour comprendre et prédire le comportement de divers phénomènes [83]. Cependant, il est important de noter que le modèle exponentiel présente également des limites. Il ne tient pas compte des facteurs limitants et si le modèle n'est pas correctement calibré ou si les conditions changent, les prédictions peuvent être inexactes. Ce modèle retenue pour comprendre et prédire la croissance rapide de la population, peut être exprimé par l'équation (13) si on connaît le pourcentage de croissance annuelle de la population [84], où $b = 1+r$.

$$P_n = P_0 (1 + r)^n \quad (13)$$

P_n : représente la valeur population future après n périodes ;

P_0 : population actuelle ;

r : taux d'accroissement de la population [%] ;

n : nombre d'année.

Ensuite, la retenue de la période de référence de 2012 selon les données de l'IHSI qui va nous permettre de trouver le taux d'accroissement avec une population estimée à 8 586 habitants aux estimations établies à partir de 2015 [85].

Après avoir défini la population, on cherche à connaître également les besoins en eau domestique, industrielle, commerciale et publique.

Évaluation de la consommation domestique

Pour évaluer la consommation en eau dans les méthodes de détermination, on peut distinguer trois courants majeurs. Le premier est basé sur des modèles de « logiques intuitives », axés sur des outils qualitatifs pour l'analyse des dynamiques d'évolution du système d'Alimentation en Eau Potable (AEP) [86]. Le deuxième est lié à des approches probabilistes. L'analyse porte sur les probabilités de dévier dans l'avenir des tendances d'évolution observées jusqu'à présent en déterminant la probabilité d'occurrence d'un événement particulier. Enfin, le troisième appelé « la prospective » utilise des modèles qui permettent d'imaginer les multiples futurs possibles à partir de la mise en œuvre d'une stratégie ou de mesures des consommations antérieures.

Dans notre cas, la deuxième approche est utilisée pour déterminer les débits. L'approche probabiliste offre plusieurs avantages, tels que la puissance prédictive, la mesure de l'incertitude et la flexibilité interdisciplinaire. Cependant, elle présente également des limites, tels que la complexité, la dépendance aux données de haute qualité, la sensibilité aux hypothèses et les coûts de calcul. Par conséquent, les chercheurs et les praticiens devraient évaluer soigneusement les avantages et les inconvénients de l'utilisation des approches probabilistes dans leur contexte spécifique, en fonction des objectifs, des données et des ressources disponibles [87], [88].

Pour évaluer les besoins en eau de consommation domestique, il faut faire intervenir la dotation par habitant. Cette dernière varie considérablement selon que les pays soient en voie de développement ou industrialisés et selon le milieu est rural ou urbain [65]. La dotation domestique 100 l/p/j est optée pour le calcul de l'eau potable en se référant aux critères de la DINEPA (voir Annexe-1-7) pour des zones de faible densité ou haut standing [89].

Le débit total trouvé doit affecter par un coefficient appelé variation des facteurs de pointe selon la dimension de l'agglomération. La méthode permettant d'aboutir à la consommation maximale de pointe est la formule empirique de Goodrich de l'équation (14). Cette dernière permet de

calculer le pourcentage par lequel on doit multiplier le débit moyen d'une certaine période t (jours d'une année).

$$P_m = 180 t^{-0.10} \quad (14)$$

P_m : variation des facteurs de pointe ;

t : temps dans l'équation (14) [heures].

Pour ce travail, nous utilisons les facteurs de pointe en fonction des agglomérations proposées par F. G. Brière pour le calcul du débit de pointe horaire maximal annuel (voir Annexe 1-8). Les débits moyens journaliers sont affectés du coefficient choisi pour avoir les débits journaliers maximaux et horaire maximal de l'année.

Consommation commerciale, industrielle, publique et pertes

Dans le cadre de ce travail, pour les consommations commerciale et industrielle nous optons la répartition de la consommation que propose François G. Brière 2.5 à 6.1 l/ (m²/j) pour la consommation commerciale et industrielle du type entreprise agricole de maïs de dotation est 1200 l/1000 kg et de l'élevage (abattoirs 15 000 l/1000 kg animaux vivant) [84].

Hypothèses de calcul :

- pour la consommation commerciale on retient une dotation de 2.5 l/ (m²/j) et d'une superficie de 2 ha = 20 000 m²;
- pour la consommation industrielle, entreprise d'exploitation agricole de culture maïs 3 fois par année à raison de 20 kilos par hectare [90]. Le périmètre à irriguer est de 6 ha et de l'élevage de 1750 kg animaux vivant;
- pas de consommation publique et pertes.

L'étape suivante consiste à connaître les variations des débits d'eaux usées.

3.2.2 Évaluation des débits d'eaux usées

Cette section est utilisée pour évaluer les flux d'eaux usées provenant des sources suivantes : domestiques, industrielles et commerciales, suivies d'une évaluation de la quantité des eaux de vannes et des boues produites.

Eaux usées d'origine domestique

En ce qui concerne ce point, le volume d'eaux usées domestiques déversées dans les égouts sanitaires représente généralement 60 à 80 % du volume total d'eau potable distribué. Pour l'évaluation des eaux usées domestiques, une valeur de 80 % a été retenue, avec le facteur de pointe sousmentionné est appliqué au débit moyen, ce qui permet d'obtenir le débit horaire. Ce facteur de pointe de $FP_{max} = 2$ est utilisé, comme proposé dans la référence [91] compte tenu de la variation considérable du débit des eaux usées domestiques au cours de la journée, en fonction de la zone géographique et des caractéristiques de la population.

Eaux usées d'origine industrielle

Pour le cas des eaux usées industrielle, on utilise l'abaque présenter par Brière dans son ouvrage donnant un débit moyen d'eaux usées pour une entreprise dont le procédé de fabrication ne requiert pas d'eau (vêtement, matériel de transport). La valeur pour un (1) mètre cube par hectare dans une journée est 10 [84], [91]. Dans ce cas, on va multiplier le nombre hectare considérée pour une entreprise par cette valeur pour avoir le débit des eaux usées d'origine industrielle.

Eaux usées d'origine commerciale

En considérant que le secteur concerné comprend des résidents et petites commerces et que l'on veut courir à la notion de la population équivalente, on évalue leur débits à des fins commerciales soit $75 \text{ m}^3/\text{ha.j}$ [84], [91]. Cependant, on doit calculer la superficie des diverses surfaces utilisées à des fins commerciales pour qu'on puisse trouver la valeur du débit correspondant.

De ce fait pour effectuer les calculs relatifs à la quantité d'eaux usées sanitaires, on utilise la relation (15) suivante qui est la somme de toutes les consommations :

$$Q_{\text{(sanitaire)}} = Q_{\text{(eaux usées domestiques)}} + Q_{\text{eaux usées industrielle}} + Q_{\text{eaux usées commerciales}} \quad (15)$$

$Q_{\text{(sanitaire)}}$: Débit sanitaire moyen [m^3/s ou m^3/an];

$Q_{\text{(eaux usées domestiques)}}$: Débit d'eau usées horaire domestique [m^3/s ou m^3/an] ;

$Q_{\text{eaux usées industrielle}}$: Débit d'eau usée industrielle [m^3/s ou m^3/an] ;

$Q_{\text{eaux usées commerciales}}$: Débit d'eaux usées commerciales [m^3/s ou m^3/an].

Évaluation de la quantité des eaux vannes

La réduction des consommations d'eau est essentielle pour une gestion optimale de l'eau au contexte de changement climatique. Il existe des toilettes dites ultrabas volume (UBV) qui consomment 6 l/chasse et lorsque la consommation moyenne est de 4,8 l ou moins (y compris les toilettes à double chasse 3 et 6 l), elles sont dites toilettes à haute efficacité (THE). D'ailleurs, les modèles certifiés WaterSense® de 4,8 l/la chasse ou moins et les toilettes de 3 l/chasse [92] sont déjà mise en place en Ontario. Ce système présente un meilleur avantage dans la consommation d'eau. Pour ce travail, nous partons avec l'idée du modèle certifié de WaterSense® qui utilise de 4.8 l/chasse dans l'équation (16) pour une fréquence journalière de l'excrétion fécale qui est en moyenne dans les ménages, 5.2 /personne/jour en semaine [93] et en se basant que chaque ménage contient deux (2) toilettes.

$$E_v = 4.8\text{l/chasse} * \text{Nbre de ménage} * \text{Nbre de toilette} * 5.2 \text{ /personne/jour} * 365 \quad (16)$$

E_v : quantité d'eau de chasse annuelle par personne [litre/personne/année]

Calcul des volumes de boues produites

Dans le cas de la filière d'assainissement, le calcul du volume de boues produites dans une localité est toujours approximatif, en particulier parce que certaines données chiffrées sont difficiles à obtenir de manière précise, comme la fréquence de vidange des fosses chez les ménages ou encore le volume de ces dernières [94]. Plusieurs manuels comportent des formules permettant de calculer le volume de boues en fonction du type de toilettes utilisé. L'élément commun à toutes ces formules de calcul est le nombre d'utilisateurs. Une étude réalisée par Eawag au Burkina Faso a comparé quatre méthodes de calcul [46]. Mais dans le cadre de ce travail, l'accent est mis sur la méthode de calcul de la production spécifique de l'équation (17).

$$C = NU_{FS} * \frac{q_{LS}}{1000} + NU_{LS} * \frac{q_{LS}}{1000} \quad (17)$$

Où

C : production de boues annuelle [m^3/an] ;

NU_{FS} : nombre d'utilisateurs de fosses septiques ;

q_{LS} : production spécifique de boues de vidange des fosses septiques (= 365 l/habitant/an dans l'étude du Burkina Faso) [95] ;

NU_{LS} : nombre d'utilisateurs de latrines sèches ;

q_{LS} : production spécifique de boues de vidange des latrines sèches (= 73 l/habitant/an dans l'étude du Burkina Faso) [95].

Avec hypothèse :

- ✓ Pas de production spécifique de boues de vidange des latrines sèches.

Alors l'équation (17) devient:

$$C = NU_{FS} * \frac{q_{LS}}{1000} \quad (18)$$

3.3 Évaluation du coût des deux systèmes et l'impact environnemental

Plusieurs approches ont été développées et utilisées pour évaluer les coûts et des bénéfices environnementaux d'un projet. Dans cette section, nous développons une évaluation des coûts et des impacts environnementaux des deux systèmes.

3.3.1 Évaluation du coût des deux systèmes

Une estimation des coûts implique un calcul de toutes les dépenses d'un projet, du début à la fin. Elle précise des coûts à la réussite du projet, qu'il s'agisse de la construction d'un double système d'assainissement ou du développement d'un logiciel [96]. Elles permettent d'atteindre les objectifs du projet dans le temps et le budget impartis. L'évaluation des coûts du système est essentielle pour déterminer les dépenses d'achat et d'entretien. Il s'agit d'évaluer les coûts associés à chaque composante du projet. Une analyse déterminera les avantages économiques des mesures prises pour lutter contre le changement climatique par des modèles mathématiques. En conséquence, le choix d'une méthode d'estimation dépend du niveau d'information disponible. Nous utilisons des modèles mathématiques basés sur des paramètres spécifiques, tels que le débit et la surface du bassin pour estimer les coûts des composants du double système d'assainissement. Il y a plusieurs méthodes permettant d'évaluer le coût d'un projet, telles que [96] :

Méthode de similitude ou de prorata de capacité

Elle permet de fournir un budget de type « ordre de grandeur » et qui a pour avantage de nécessiter peu d'information et d'être rapide à mettre en œuvre. Elle s'applique lorsque les unités comparées sont de conception similaire et de capacités pas trop différentes. Elle doit tenir compte de facteurs

d'ajustements liés à la localisation et à la date de référence (indexation, localisation...) qui seront présentés par la suite [96].

Méthode modulaire

Elle est basée sur l'existence d'un rapport entre le coût d'un équipement et celui de tout ce qui doit lui être associé. Elle suppose un niveau d'information plus précis et s'appuie sur des études techniques suffisantes pour déterminer. Il existe en fait plusieurs variantes de cette méthode comme nous allons le voir maintenant.

- ✓ Méthode de Lang est ancienne et assez sommaire. Elle permet d'estimer le coût total en multipliant le somme des coûts des équipements principaux par un facteur modulaire global ;
- ✓ Méthode de Hand permet d'estimer les coûts par type d'équipement principal. Le facteur modulaire pour chaque type d'équipement principal prend en compte :
 - Le coût des matériels secondaires : tuyauteries, électricité, instrumentation...
 - Le coût des matériels et matériaux de chantiers ;
 - Le coût de la main d'œuvre de chantiers ;
 - Les transports, taxes et assurances ;
 - Les services d'ingénierie ou d'entretien et coûts indirects.

Méthode analytique

Elle utilise les données issues des systèmes d'information comptable de l'entreprise. L'estimation des coûts par la méthode analytique est utilisée dans les phases de développement du produit et de production en série pour estimer le coût de production du produit nouveau [96], [97].

Dans le cadre de ce mémoire, l'accent est mis sur la méthode modulaire de Land. En conséquence, le coût total du projet est estimé par l'équation (19) ci-après:

$$C_{\text{projet}} = \sum_{i=1}^n (M_i \Psi_i) \quad (19)$$

Où

C_{projet} : coût du projet [€] ;

M_i : coûts respectifs en supposant que l'ouvrage est composé de n équipements principaux [€];

Ψ : étant le facteur modulaire.

Lang a proposé des tables de facteurs multiplicatifs [96].

- 3.10 pour le procédé traitement des produits solides ;
- 3.63 pour les procédés traitant des produits solides et liquides ;
- 4.74 pour le procédé traitant des liquides.

3.3.2 Impact environnemental

L'évaluation environnementale d'un projet est une démarche interactive d'intégration des enjeux environnementaux et de santé humaine qui se matérialise dans la rédaction du rapport d'évaluation environnementale appelé « étude d'impact » [98].

En ce qui concerne l'impact environnemental, cette analyse se tient compte dans sa globalité : population et santé humaine, biodiversité, terres, sol, eau, air et climat, ainsi que les interactions entre ces éléments. Cette analyse nous aidera à comprendre les enjeux climatiques en identifiant les facteurs naturels qui interviennent.

CHAPITRE 4

APPLICATION À L'ÉTUDE DE CAS

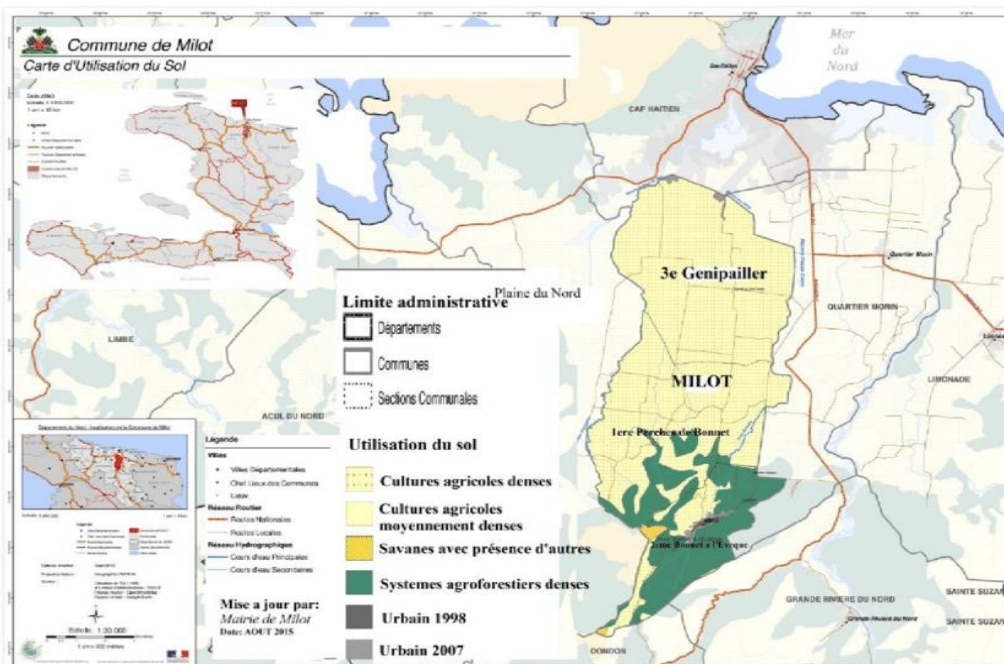
Ce chapitre consiste à présenter l'application de la méthode au cas d'étude de la Cité du Savoir. Dans un premier temps, nous présentons la zone d'étude, le choix des données recueillies : de l'IHSI, du responsable de la collectivité territoriale (Mairie), des responsables de projet, en l'occurrence : des coordonnateurs des organisations, des chefs de projets, de la DINEPA, de PIGRaN, des données du MDE et de MARNDR sur la climatologie. Ces données sont utilisées pour les calculs représentés dans la partie méthodologique. Les résultats sont interprétés notamment en lien avec le changement climatique. Ils permettent le choix du système d'assainissement qui répond mieux à ce contexte.

4.1 Présentation de la zone d'étude

La situation géographique de la Cité du Savoir, sa population, sa topographie, son bassin hydrographique, sa situation économique et également la situation de ses infrastructures sont détaillés dans cette section.

4.1.1 Situation géographique de la Cité du Savoir

La Cité de Savoir est un projet de développement urbain de l'une des trois sections communales de Milot. Cette commune du département du nord d'Haïti (coordonnées 19°36'33" N et 72°12'48" W,) <https://earth.google.com>, située au sud-ouest de l'arrondissement d'Acul-du-nord et au sud de la deuxième plus grande ville d'Haïti, le Cap-Haïtien fondée en 1670, connue comme l'ancienne capitale de la colonie française de Saint-Domingue, portant alors le nom de Cap-Français. C'est l'une des communes du pays la plus visitée par les touristes haïtiens et étrangers [99]. Cette commune qui s'étend sur un territoire d'environ 76.41 km² est occupée par une population estimée à 30 000 habitants, soit une densité égale à 345 habitants par kilomètre carré [99] et en référence PIGRaN, elle est divisée en trois sections communales : Perches-du-bonnet, Bonnet-à-l'Évêque et Génipallier.

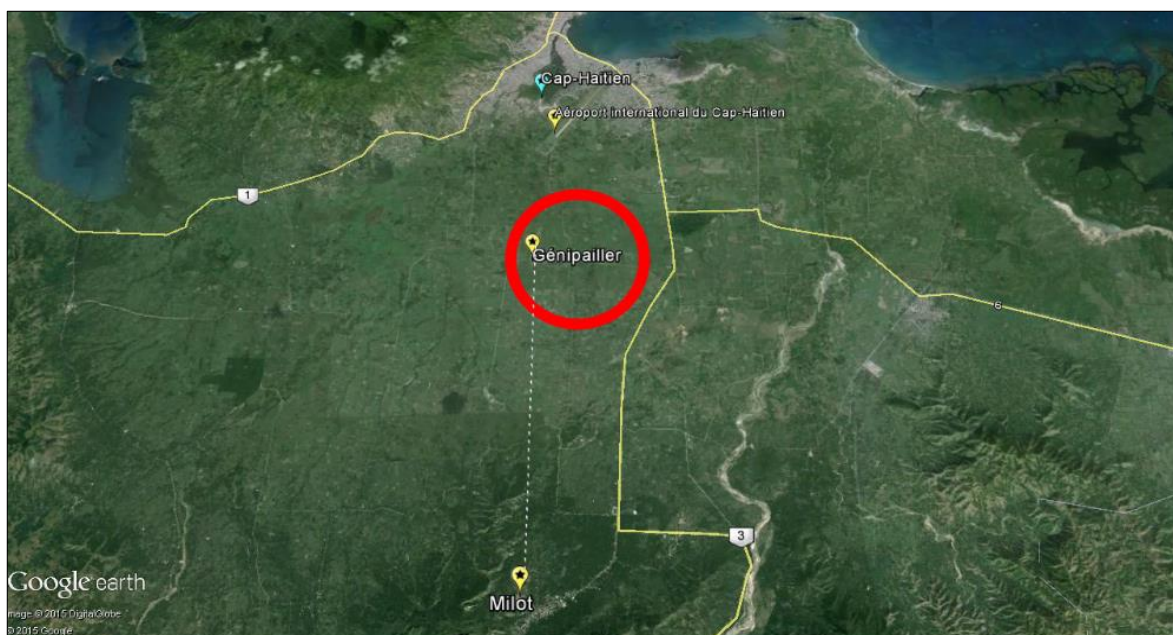


Source : Copyright © 2015- Mairie de Milot-Urbanisme et Aménagement

Figure 4.1 Carte de la zone d'étude

Selon PIGraN, Milot est le lieu d'un symbolisme universel dans l'histoire d'Haïti en ce qu'elle accueille le parc national historique d'Haïti (PNH) classé patrimoine mondial de l'UNESCO et constitué de trois éléments architecturaux d'exception du 19^{ème} siècle, œuvre du Roi Henri Christophe: la Citadelle Laferrière bâtie pour repousser une éventuelle invasion française, le Palais Sans-Souci et les bâtiments des Ramiers.

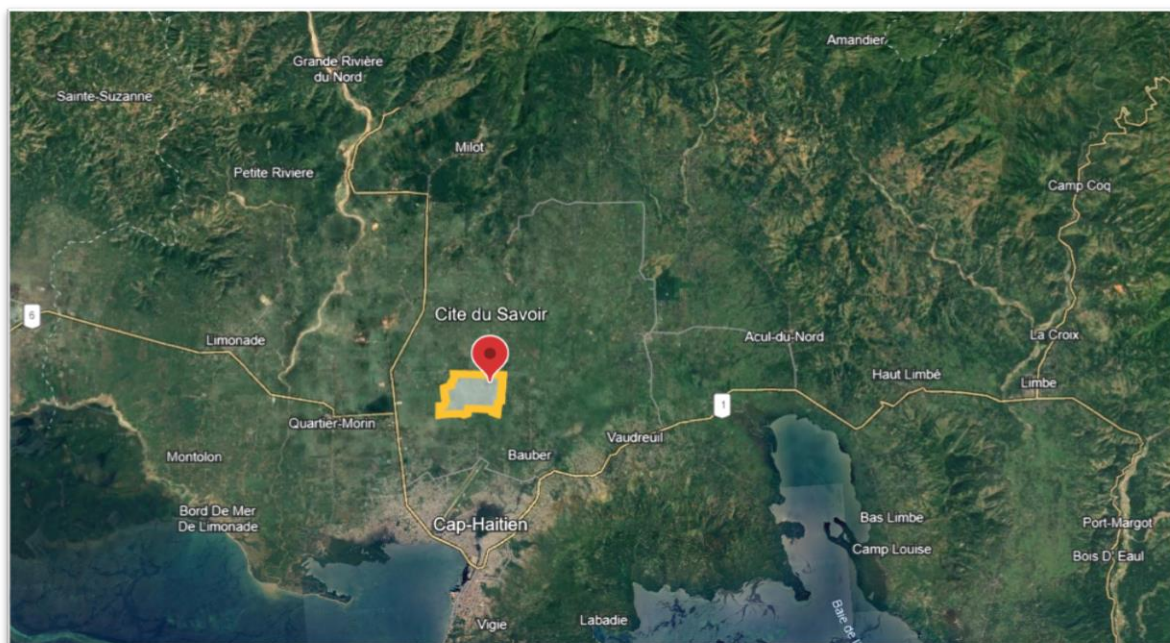
C'est à Génipailler, troisième section communale de 8 872 habitants de la commune de Milot dont 80 % vivent en milieu rural et près de 50 % ont moins de 18 ans [100], non loin du deuxième aéroport du pays, que se développe le Pôle d'innovation du Grand Nord (PIGraN)-Cité du savoir, sur un terrain de 31 ha mis à disposition par l'État d'après Catherine Florès en 2018 à Magazine Poly. « *Il s'agit d'un véritable campus qui accueillera des bâtiments de l'ISTEAH, mais aussi des écoles primaire et secondaire, un centre de santé communautaire, un secteur agricole comprenant entre autres une ferme et des serres, sans oublier de nombreuses PME* », explique Samuel Pierre. Située en plaine à 19°41'30" N et 72°12'17" W, Génipailler est la section communale qui présente le moins de risques de catastrophes naturelles ou d'aléas climatiques.



Copyright © 2015 - Powered by GRAHN-Monde

Figure 4.2 Situation de Génipaller

Le 11 Novembre 2021 Jean-Michel Leprince a fait savoir sur la Radio-Canada que la **CITÉ DU SAVOIR**, se trouve dans une zone rurale à Milot, encouragé par les succès de l'ISTEAH, GRAHN-Monde lance un projet de pôle d'innovation qui devrait s'avérer particulièrement structurant pour le développement socio-économique d'Haïti.



Source : © 2023 – Google Earth

Figure 4.3 Situation de la Cité du Savoir

4.1.2 Topographie et Hydrographie

La zone d'étude a une altitude moyenne de 212 mètres. C'est une ville intérieure, son relief se compose d'une alternance de plaines et de collines, le climat y est tropical. Elle a pour originalité de posséder 120 canaux [99]. La commune dispose de deux rivières qui sont captées et distribuées, l'une pour les services de la population de Milot et l'autre pour la population de la 3^{ème} section communale à savoir Génipallier.

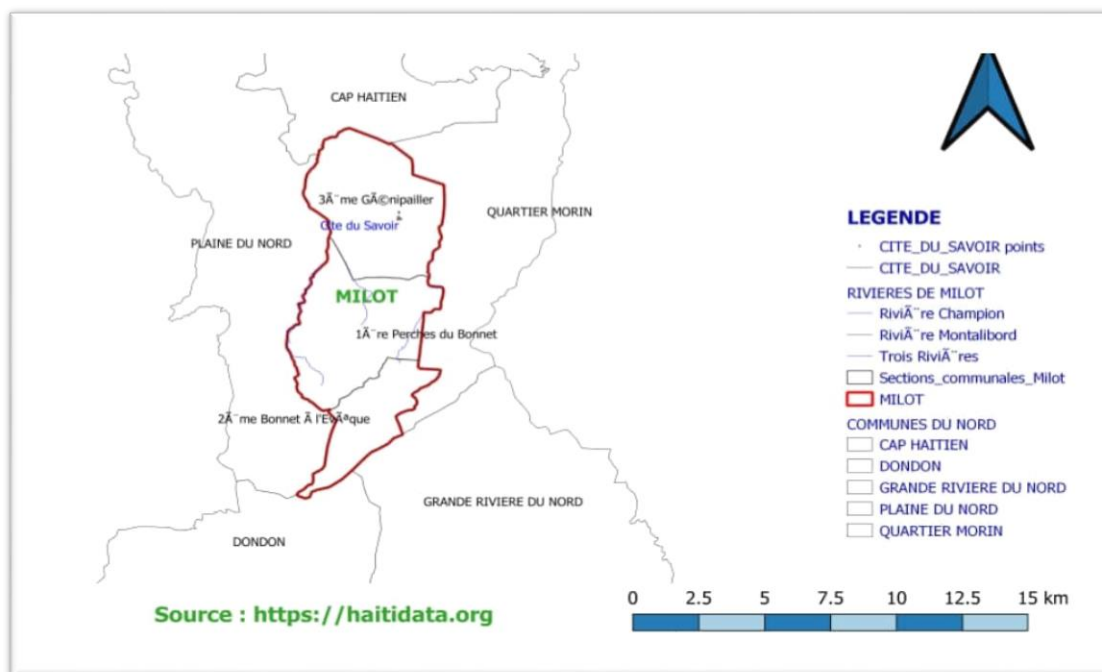


Figure 4.4 Réseau Hydrographique de la zone d'étude

4.1.3 Situation socio-économique de la zone

Dans le rapport Haïti profil urbain de Milot, ses auteurs [99] rapportent les 2 principales ressources de la commune de Milot sont le tourisme et l'agriculture. Si la ville ne s'organise pas, elle ne pourra ni répondre à l'arrivée massive de touristes, ni à l'afflux de familles à la recherche d'opportunités professionnelles. La commune de Milot est une zone d'agriculture vivrière très diversifiée. Selon le MARNDR, l'agriculture est considérée comme un secteur stratégique pouvant contribuer à la stabilité sociale, à l'autosuffisance alimentaire et à la régénération de l'environnement [101]. Les cultures se font sur de petites parcelles. Les productions sont l'igname, le véritable, les bananes, le maïs, le café, les chadèques et les oranges. L'emploi informel constitue plus des trois-quarts des actifs. Elle réunit souvent les populations les plus en difficultés : les

femmes, les migrants, les personnes âgées et les personnes peu scolarisées. La branche d'activité dominante est le commerce (tous commerces de produits primaires et manufacturés confondus). Il faut mentionner que la 3^{ième} section communale de Milot (Génipailler) est une zone orientée surtout vers l'élevage bovin [101].

4.1.4 Cité du Savoir et ses infrastructures

Comme a souligné M. Samuel Pierre dans une interview sur Radio-Canada en août 2021 : « Haïti ne possédant pas encore les infrastructures nécessaires ». La cité du savoir n'est pas exemptée de ce constat, car elle n'a pas encore des infrastructures pouvant répondre aux problèmes environnementaux qui ont de sérieuses répercussions sur l'ensemble de la population. Les infrastructures, en tant qu'outil de gestion de l'eau en milieu urbain, représentent un acquis considérable, leur rôle et leur importance, de même que le niveau de dépendance de nos sociétés face à ces équipements, exigent que leur performance soit l'objet d'une attention continue et sans faille [99]. Il n'y a aucune institution en charge des problèmes environnementaux et les questions environnementales ne sont pas prises en considération dans les plans de développement. Cette zone, principalement agricole, produit très peu et est très mal desservie : carence en puits artésiens, en eau potable, en sources d'électricité, premier lieu de ravitaillement à 10 km et peu de services éducatifs et de soins de santé primaire en référence à GRAHN-Monde [100].

Aménagement de la zone d'étude

L'aménagement de la zone d'étude est divisé selon les classes suivantes: secteur universitaire, secteur scolaire, secteur services et secteur agriculture. Ainsi, on fait choix de la superficie du site de manière à savoir la quantité de périmètres d'occupation en termes de qualité et quantité pour la détermination de l'endroit à implémenter un modèle type qui représentent 28 hectares en référence à PIGRaN et sera constituée de plus d'une quinzaine d'édifices étalés dans les quatre (4) secteurs ci-mentionnés.



Copyright © 2015 - Powered by GRAHN-Monde

Figure 4.5 Aménagement de la Cité du Savoir

4.1.5 Choix des données

Les données des différents secteurs du site ont été reprises d'études antérieures qui ont été préférées pour ce mémoire. Ceci a permis de se concentrer uniquement sur la partie prédiction par des outils mathématiques. Cette approche nous assure également que le choix des secteurs est validé. À ce titre, les données de l'IHSI et de GRAHN-monde ont été utilisées dans la présentation des résultats. Ces données permettent de calculer les différentes composantes du bilan hydrologique débit ayant cours pendant toute la durée de l'étude, produire des représentations graphiques du bilan estimé en fonction du temps pendant les horizons de l'étude. Les résultats de cette recherche sont présentés de manière quantitative, qualitative ou mixte ce qui permet de comprendre les conséquences du phénomène climatologique sur la gestion des ressources en eau et ainsi, de choisir le système d'assainissement adapté à la Cité du Savoir.

4.2 Conception d'un système de gestion durable des eaux pluviales pour la Cité du Savoir

Dans cette section, nous présentons les étapes de l'implémentation de la conception du système de gestion des eaux pluviales. Cette implémentation simule autour de deux phases : la première présente les paramètres du bilan hydrique et la deuxième la simulation du modèle.

4.2.1 Paramètres de conception du système de gestion des eaux pluviales

Elles tiennent compte des calculs d'éléments du bilan hydrologique à savoir : les précipitations actuelle et future, le ruissellement de surface et souterrain également les valeurs des évapotranspirations actuelle et future et enfin les résultats de la simulation.

Calcul des précipitations actuelles et futures

Pour le calcul des précipitations, nous avons considéré l'équation (3) et les hypothèses suivantes:

- ✓ la transition climatique de scénario avec des émissions de GES intermédiaires : la température augmente de 0.75 °C pour l'année actuelle et les années futures 2030 et 2050 respectivement 1.25 °C et 1.75 °C;
- ✓ la température moyenne se calcule en faisant la somme de la température de 2023 augmenté de la variation annuelle de chaque horizon d'étude.

Les résultats des températures moyennes pour les scénarios retenus sont donnés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Variation de la température actuelle et future

Année	2023	2024	2030	2050
Changement de Température moyenne annuelle (°C)		0.50	1.25	1.75
Température moyenne (°C)	29.1	29.6	30.35	30.85

- ✓ L'année actuelle 2024 est humide et le futur semi-humide, donc on retient l'indice d'aridité annuel qui se trouve dans l'intervalle [30, 40] pour l'année actuelle et [20, 30] pour le futur ;

- ✓ La superficie du site de manière à savoir la quantité de périmètres d'occupation représente 29 hectares et sera constituée de quatre (4) secteurs selon les données de PIGRaN en référence à GRAHN-Monde.

Pour l'année 2024, on retient $i = 35$, considéré comme la moyenne.

$$P_{2024} = 35(29.6+10)$$

$$P_{2024} = 1,386 \text{ mm}$$

Convertir la précipitation annuelle en m^3

$$P_{2024} = 1\,386 * 10^{-3} \text{ m} * 290 * 10^3 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{P_{2024} = 401\,940 \text{ m}^3}$$

Pour l'année 2030, considérant $i = 28$

$$P_{2030} = 28 (30.35+10)$$

$$P_{2030} = 1,130 \text{ mm}$$

Convertir la précipitation annuelle en m^3

$$P_{2030} = 1\,130 * 10^{-3} \text{ m} * 290 * 10^3 \text{ m}^2$$

$$P_{2030} = 327\,700 \text{ m}^3$$

Pour l'année 2050, prenons $i = 23$

$$P_{2050} = 23 (30.85+10)$$

$$P_{2050} = 940 \text{ mm}$$

Convertir la précipitation annuelle en m^3

$$P_{2050} = 940 * 10^{-3} \text{ m} * 290 * 10^3 \text{ m}^2$$

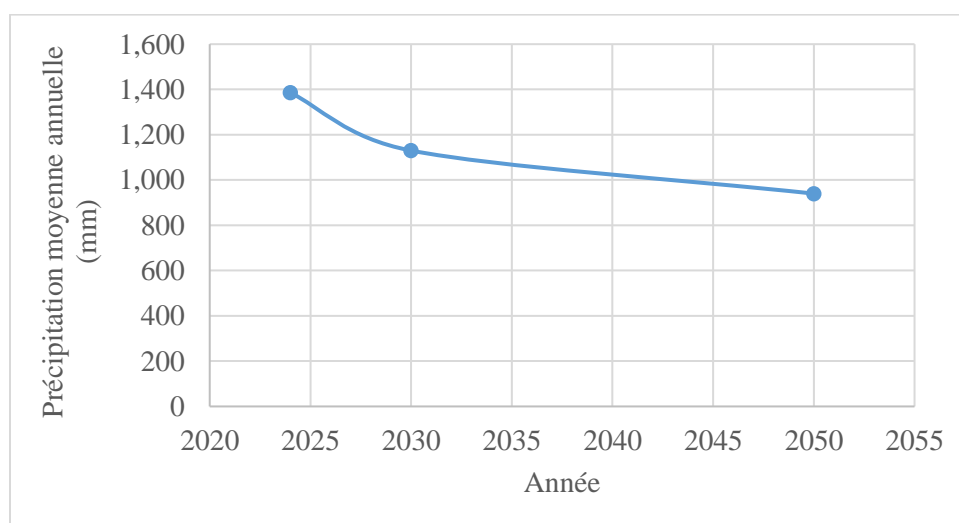
$$\mathbf{P_{2050} = 272\,600 \text{ m}^3}$$

Tableau 4.2 Variation des températures et précipitations annuelles

Année	2024	2030	2050
Température moyenne (°C)	29.6	30.35	30.85
Précipitation moyenne annuelle (mm)	1,386	1,130	940
Précipitation moyenne annuelle (m ³)	401 940	327 700	272 600

Les résultats montrent que la température ne cesse d'augmenter et le futur sera plus chaud que ce soit pour le scénario SSP2-4.5, la température pourrait atteindre 30.85 °C en 2050.

En comparaison, les rapports de PNUD daté 2014 et BID, 2015, indiquent à la fois des résultats contradictoires avec des hausses et des baisses dans les quantités de pluie. Les données présentées dans le tableau 4.2 et la figure 4.6 montrent une tendance décroissante des précipitations annuelles moyennes pour le futur. Pour 2030, les précipitations sont encore plus étendues et plus fréquentes. Pour 2050, des probabilités pointent plus vers des précipitations plus étendues. Au contexte des CC, les précipitations sont susceptibles de devenir de plus en plus imprévisible en termes de durée et d'intensité, avec des augmentations de la fréquence des événements extrêmes - sécheresses et inondations. Le besoin en eau de consommation augmente proportionnellement. L'eau sera en déficit.

**Figure 4.6 Variation des précipitations annuelles**

Évaluation du ruissellement de surface

Le ruissellement est une force motrice générée par l'eau de pluie. L'un des paramètres pris en compte du bilan hydrique qui permet d'avoir une idée de sa variation. Le calcul du ruissellement se base sur l'équation (5). Les surfaces considérées sont données dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Estimation des superficies

Superficie secteur agricole (ha)	Superficie secteur scolaire (ha)	Superficie secteur service (ha)	Superficie secteur universitaire (ha)	Superficie Totale
6	3	9	11	29

Source : © PIGRaN, (2021)

- ✓ Les différentes valeurs de l'intensité de pluie se calculent à l'aide de l'équation (7);
- ✓ pour l'année actuelle avec un temps de concentration égale à 1 h.

$$I_{2024} = 0.65 * 447.4998 (60+0)^{-0.6912}$$

$$I_{2024} = \mathbf{19.81 \text{ mm/h}}$$

- ✓ Pour l'année 2030 avec un temps de concentration égale à 1 h.

Les valeurs de a, b et c se déterminent par la méthode interpolation :

$$\frac{10 - 5}{6 - 5} = \frac{782.6589 - 622.4614}{a - 622.4614}$$

$$(10 - 5)(a - 622.4614) = (6 - 5)(782.6589 - 622.4614)$$

$$a = 654.5009; b = 0;$$

$$(10 - 5)(c - 0.7011) = (6 - 5)(0.7164 - 0.7011)$$

$$c = 0.7042$$

$$\text{Alors: } I_{2030} = 654.5009 (60+0)^{-0.7042}$$

$$I_{2030} = \mathbf{36.62 \text{ mm/h}}$$

Pour l'année 2050 avec un temps de concentration égale à 1 h.

Les valeurs de a, b et c se déterminent par interpolation :

$$(50 - 25)(a - 1039.7140) = (26 - 25)(1289.1977 - 1039.7140)$$

$$a = 1049.6933;$$

$$(50 - 25) (b - 0.00) = (26-50) (0.70 - 0.00)$$

$$b = 0.028$$

$$(50 - 25) (c - 0.7396) = (26-25) (0.7587 - 0.7396)$$

$$c = 0.7404$$

$$\text{Alors: } I_{2050} = 1049.6933 (60+0.028)^{-0.7404}$$

$$\mathbf{I_{2050} = 50.63 \text{ mm/h}}$$

Dans le cadre de ce mémoire, la zone d'étude est divisée en catégories suivantes pour faciliter la conception en référence à la subdivision de PIGRaN, soient les secteurs : agriculture, scolaire, universitaire et service lesquels inclus les entrées résidentielles. Cela permet de considérer les différentes composantes de tels aménagements et d'avoir une meilleure compréhension du ruissellement des eaux en fonction des différentes surfaces.

- ✓ secteur agricole, R= 0.20 (zone industrielle légère);
- ✓ secteur scolaire R= 0.8 (zone commerciale);
- ✓ secteur service : R= 0.6, (zone maison de ville);
- ✓ secteur universitaire, R = 0.70 (bloc appartement).

Le coefficient de ruissellement pondéré :

$$R_{\text{pondéré}} = \frac{(6*0.2+3*0.80+9*0.60+11*0.7)}{6+3+9+11} = 0.60$$

Pour l'année actuelle, la valeur du débit de ruissellement est :

$$Q (t_c) = [(1/360) * 0.29 * 26.41 * 0.60]$$

$$\mathbf{Q (t_c) = 12.76*10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$Q = 12.76*10^{-3}\text{m}^3/\text{s} * 86400\text{s} * 205$$

$$\mathbf{Q = 226\ 005 \text{ m}^3/\text{an}}$$

Pour l'année 2030, la valeur du débit de ruissellement est :

$$Q (t_c) = [(1/360) * 0.29 * 36.62 * 0.60]$$

$$\mathbf{Q (t_c) = 17.7*10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$Q = 17.7*10^{-3}\text{m}^3/\text{s} * 86400\text{s} * 150$$

$$Q = 229\,392 \text{ m}^3/\text{an}$$

Pour l'année 2050, la valeur du débit de ruissellement est :

$$Q(t_c) = ((1/360) * 0.29 * 50.63 * 0.60)$$

$$Q(t_c) = 24.5 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 24.5 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} * 86400 \text{ s} * 110$$

$$Q = 232\,848 \text{ m}^3/\text{an}$$

Tableau 4.4 Estimation de l'écoulement de surface

Année	2024	2030	2050
Débit de ruissellement (m ³ /s)	12.76*10 ⁻³	17.7*10 ⁻³	24.5*10 ⁻³
Débit de ruissellement annuel (m ³)	226 005	229 392	232 848

Le tableau 4.4 fournit les valeurs de base des débits d'eaux de pluies calculées prenant en compte le coefficient de ruissellement pondéré qui dépend de la perméabilité et l'imperméabilité du sol de la Cité du Savoir. La tendance de l'écoulement de surface va vers la hausse avec un taux de 1 % en 2030 à 3 % en 2050 comme montre la figure 4.7. Les changements climatiques pourraient accélérer l'érosion hydrique des sols. Les écoulements importants des cours d'eau sont autant d'événements liés au climat qui ont une incidence sur la dégradation des sols. Pour le futur, un ruissellement de surface et des inondations surviendront plus fréquemment tant qu'il y a précipitations. Cette eau pourra être collectée, évacuée et également traitée pour être réutilisée.

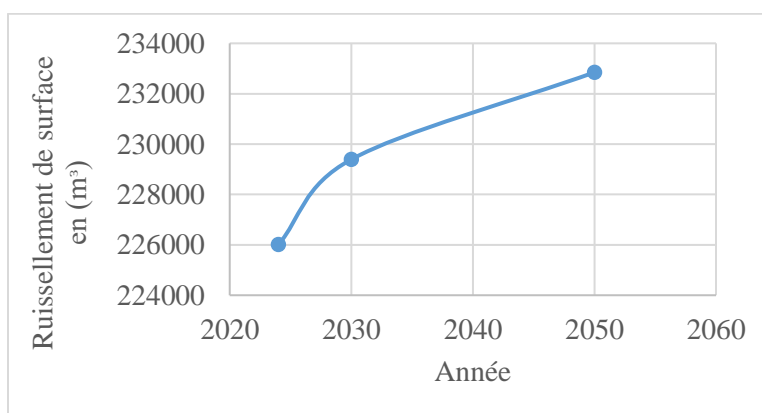


Figure 4.7 Variation du débit de ruissellement annuel

Évaluation du ruissellement souterrain (infiltration)

Sur la base de l'équation (11), la capacité d'infiltration sur le site est calculée de la manière suivante pour :

✓ un sol de catégorie A :

$$F(t) = f_c t + \frac{(f_0 - f_c)}{k} (1 - e^{-kt})$$

$$F(0.25) = 25 * (0.25) + \frac{(250 - 25)}{3.5} (1 - e^{-3.5 * 0.25})$$

$$F(0.25) = 43 \text{ mm} = 43 * 10^{-3} \text{ m}$$

En volume pour l'ensemble du bassin de 29 ha ou 290 000 m²

$$F = 290\,000 \text{ m}^2 * 43 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$\mathbf{F = 12\,470 \text{ m}^3}$$

✓ un sol de catégorie B :

$$F(t) = f_c t + \frac{(f_0 - f_c)}{k} (1 - e^{-kt})$$

$$F(0.25) = 12 * (0.25) + \frac{(200 - 12)}{3.5} (1 - e^{-3.5 * 0.25})$$

$$F(0.25) = 34 \text{ mm} = 34 * 10^{-3} \text{ m}$$

En volume pour l'ensemble du bassin de 29 ha ou 290 000 m²

$$F = 290\,000 \text{ m}^2 * 34 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$\mathbf{F = 9\,860 \text{ m}^3}$$

Tableau 4.5 Estimation de l'écoulement souterrain

Catégorie de sol	A	B	C	D
f₀(mm/h)	250	200	125	75
f_c (mm/h)	25	12	6	2.5
k (1/h)	2 à 5	2 à 5	2 à 5	2 à 5
F(mm)	43	34	21	13
F(m³)	12 470	9 860	6 090	3 770

Pour le sol de catégorie A, comme montre le tableau 4.5 de synthèse, l'infiltration est plus élevée et les autres qui suivent sont plus faible. La quantité d'eau infiltrée varie pour les différentes intensités utilisées et en fonction des catégories de sol. Ce qui signifie que les autres catégories de

sol ne seront plus capables d'infiltrer l'ensemble de pluie, un ruissellement de surface et des inondations surviendront plus fréquemment avec les changements climatiques, sur la base de ces résultats obtenus.

Cependant, sur la base d'une autre étude menée en Haïti, on peut estimer de manière très globale et à l'échelle du pays, ce potentiel d'infiltration annuel. Dans les bassins versants « naturels », qu'environ 30 % des précipitations s'infiltrent [102]. Le tableau 4.6 présente les différentes valeurs retenues pour établir le bilan d'infiltration.

Tableau 4.6 Estimation de l'écoulement des précipitations et infiltrations moyennes annuelles

Année	2024	2030	2050
Précipitation moyenne annuelle (mm)	1,386	1,130	940
Infiltration moyenne annuelle (mm)	416	339	282
Infiltration moyenne annuelle (m ³)	120 640	98 310	81 780

L'impact du changement climatique sur les taux d'infiltration peut influencer la recharge des eaux souterraines sur une base annuelle et affecter la capacité des systèmes de collecte des eaux usées. Dans le domaine agricole, pour le futur, une réduction de l'infiltration peut entraîner une baisse du rendement des cultures en raison d'un approvisionnement en eau inadéquat. En outre, dans l'écosystème, cela peut affecter la biodiversité en favorisant certaines espèces au détriment d'autres. Enfin, pour la gestion de l'eau, une réduction de l'infiltration peut entraîner une augmentation du ruissellement, ce qui peut ensuite contribuer à l'apparition d'inondations et à un risque accru d'érosion du sol. Une augmentation de la variabilité des précipitations peut entraîner une réduction de la recharge des nappes phréatiques, car des précipitations plus fortes et plus fréquentes peuvent dépasser la capacité d'infiltration du sol.

Évaluation des évapotranspirations actuelle et future

L'évapotranspiration se calcule à l'aide de l'équation (12). Les paramètres suivants sont utilisés dans le calcul de l'annexe B.

- ✓ Le tableau 4.7 présente les hypothèses des températures mensuelles pour l'année 2024 soit en moyenne 29.6 °C, les valeurs calculées du coefficient climatique (k) et les valeurs du pourcentage d'éclairement (p) pour calculer l'évapotranspiration mensuelle du tableau 4.8.

Tableau 4.7 Valeurs des températures mensuelles, du coefficient climatique et du pourcentage d'éclairement

Mois	Janv	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Température Moyenne en °C	27.5	27.8	28.3	28.9	29.9	32.1	31.7	31.3	31.1	29.6	28.9	28.1
k	1.05	0.96	1.08	1.04	0.87	1.23	1.13	1.18	1.20	1.1	0.84	1.11
p	0.258	0.26	0.27	0.28	0.29	0.298	0.298	0.288	0.28	0.258	0.248	0.25

Tableau 4.8 Valeurs de l'évapotranspiration pour l'année actuelle

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Total (mm)	Total (m ³)
Évapotranspiration (mm)	171	159	171	153	156	188	233	233	299	188	136	178	2 265	65 6705

- ✓ Le tableau 4.9 présente les hypothèses des températures mensuelles pour l'année 2030 soit en moyenne 30.35 °C, les valeurs calculées du coefficient climatique (k) permettant de calculer l'évapotranspiration mensuelle du tableau 4.10 pour les mêmes valeurs de p du tableau 4.7.

Tableau 4.9 Valeurs des températures mensuelles, du coefficient climatique et du pourcentage d'éclairement

Mois	Janv	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Température Moyenne en °C	28.7	28.6	28.9	30.3	30.7	32.6	32.5	32.1	32	29.8	29.2	28.8
k	1.04	1.07	0.84	1.156	1.1	1.185	1.20	1.26	1.23	1.02	1.133	0.99

Tableau 4.10 Valeurs de l'évapotranspiration pour l'année 2030

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Total (mm)	Total (m ³)
Évapotranspiration (mm)	174	180	148	217	216	248	251	253	239	175	184	161	2446	709 340

- ✓ Le tableau 4.11 présente les hypothèses des températures mensuelles pour l'année 2050 soit en moyenne 30.85 °C, les valeurs calculées du coefficient climatique (k) pour calculer l'évapotranspiration mensuelle du tableau 4.12 en utilisant les mêmes valeurs de p du tableau 4.7.

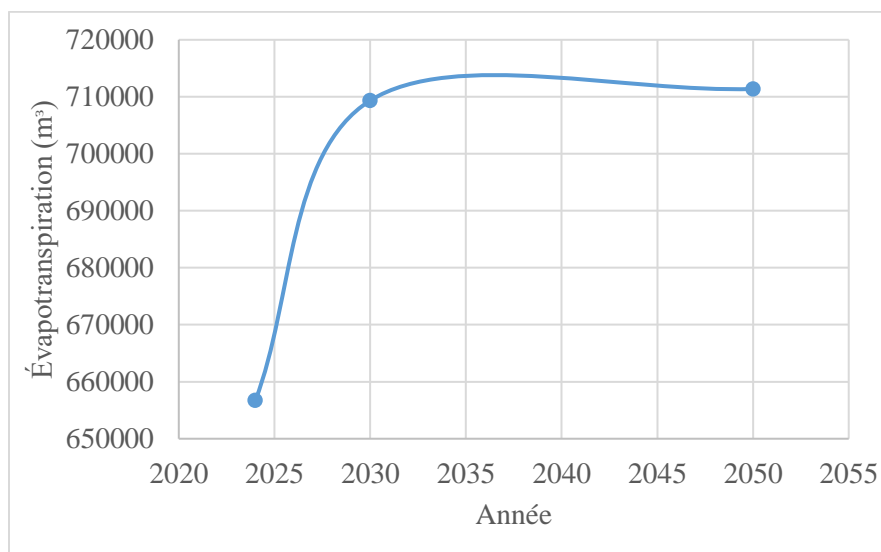
Tableau 4.11 Valeurs des températures mensuelles, du coefficient climatique et du pourcentage d'éclairement

Mois	Janv	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Température Moyenne en °C	28.8	28.7	30.1	30.8	31.8	32.9	32.7	32.3	32.1	31.6	29.5	28.9
k	0.99	1.04	1.167	1.05	1.08	1.11	1.16	1.22	1.26	1.155	1.11	0.84

Tableau 4.12 Valeurs de l'évapotranspiration pour l'année 2050

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Total (mm)	Total (m ³)
Évapotranspiration (mm)	166	175	202	199	217	234	244	246	246	205	182	137	2453	711 370

L'évapotranspiration, facteur important de perte en eau du bilan hydrique impliquant le transfert d'eau vers l'atmosphère à partir de surfaces telles que les eaux libres, les sols nus, et la végétation, montre un accroissement constant de 10 % respectivement pour l'année 2030 et 2050 par rapport à l'année actuelle comme montre la figure 4.8. Cela laisse à comprendre dans les années futures il y aura une perte 1 % à chaque précipitation.

**Figure 4.8 Variation de l'évapotranspiration annuelle**

L'ETP est soumise à un certain nombre d'influences externes, notamment l'humidité atmosphérique, le rayonnement net, la vitesse du vent et la température. Les projections indiquent que l'ETP est susceptible d'augmenter en général en raison de la hausse des températures. Il est primordial de reconnaître que, si les températures plus élevées augmentent initialement la

vaporisation, elles ne conduisent pas invariablement à une augmentation des précipitations. Cela permet de conclure que l'impact de l'ETP entraînera une réduction des ressources en eau disponibles pour les habitants de la Cité du Savoir, l'agriculture et les écosystèmes. En outre, elle contribuera à une augmentation de la sécheresse et de la désertification, ainsi qu'à des altérations des cycles hydrologiques qui affecteront les précipitations.

4.2.1 Architecture du système d'assainissement proposée pour la gestion des eaux pluviales

Le modèle représentatif ci-après d'un système d'assainissement de gestion des eaux pluviales en hydrologie de la Cité du Savoir est simulé par les pluies synthétiques de l'année 2024 et future. Les eaux pluviales pour le secteur un (1) sont passées par une conduite DN150 mm pour rejoindre celles du secteur deux (2) en une conduite 300, du secteur trois (3) en nœud J₄ par une conduite 125 mm pour leur combiner en passant par une canalisation de 400 mm à partir du nœud J₄ vers l'exutoire ou le bassin récupérateur.

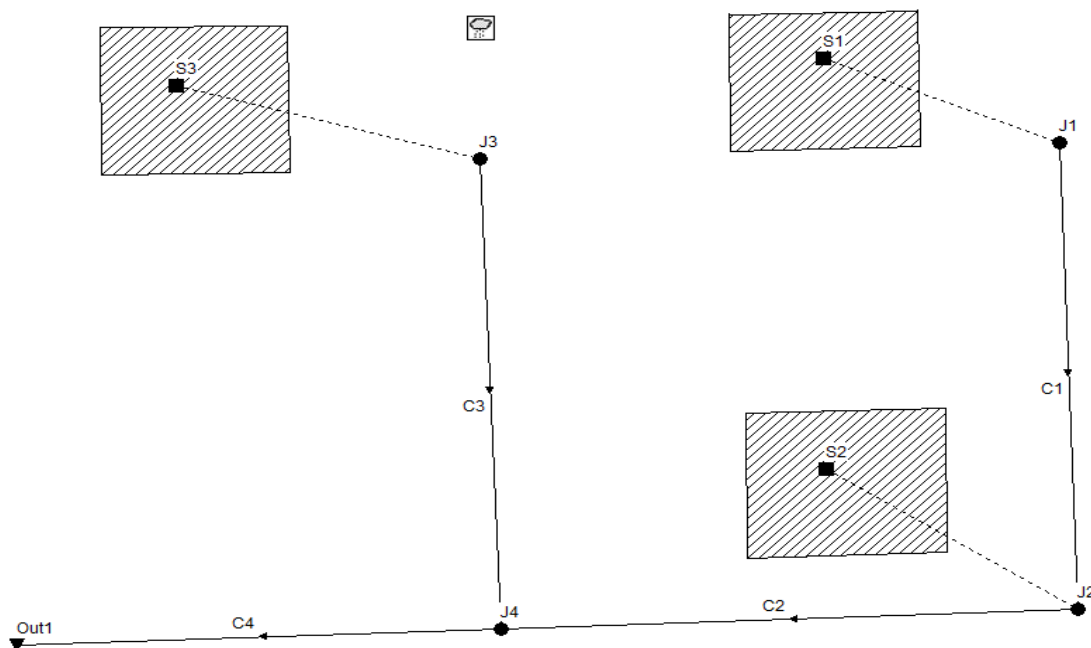


Figure 4.9 Architecture du système d'assainissement des eaux pluviales

Profil en long de la variation de l'eau dans le collecteur

Les profils des figures 4.10 à 4.11 montrent la variation des eaux pluviales du nœud J₁ à la sortie adaptée à l'environnement de l'étude, avec le pourcentage le plus élevé d'erreurs de continuité de flux aux nœuds deux (2) et (4). Les profondeurs d'eau dans les tuyaux sont variables,

respectivement, en référence à l'annexe C des résultats de la simulation. Les débits de toutes les conduites sont stables, tandis que les conduites C₃ et C₄ sont surchargées. Le tuyau C₁ a un débit légèrement supérieur à celui de C₃, le tuyau C₂ à un débit supérieur à celui des tuyaux ci-dessus et un débit inférieur à celui du tuyau C₄, en référence à la figure 4.13.

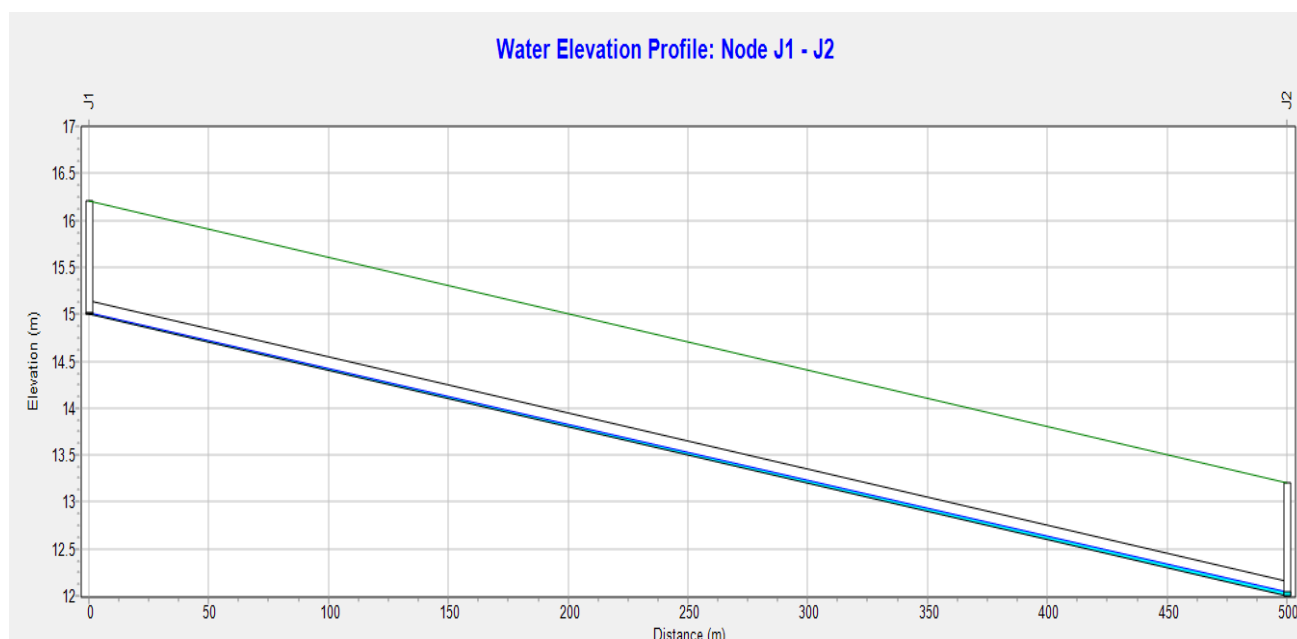


Figure 4.10 Profil en long des nœuds J1- J2 de la profondeur d'eau

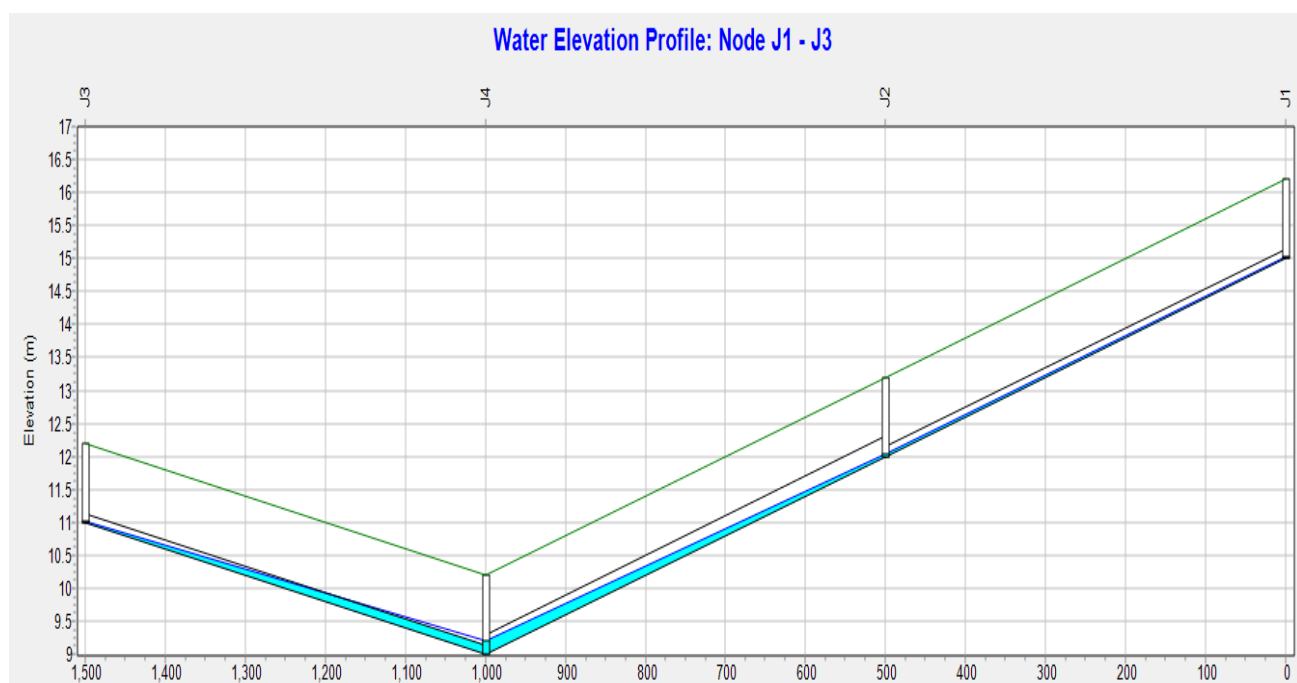


Figure 4.11: Profil en long des nœuds J1- J3 de la profondeur d'eau

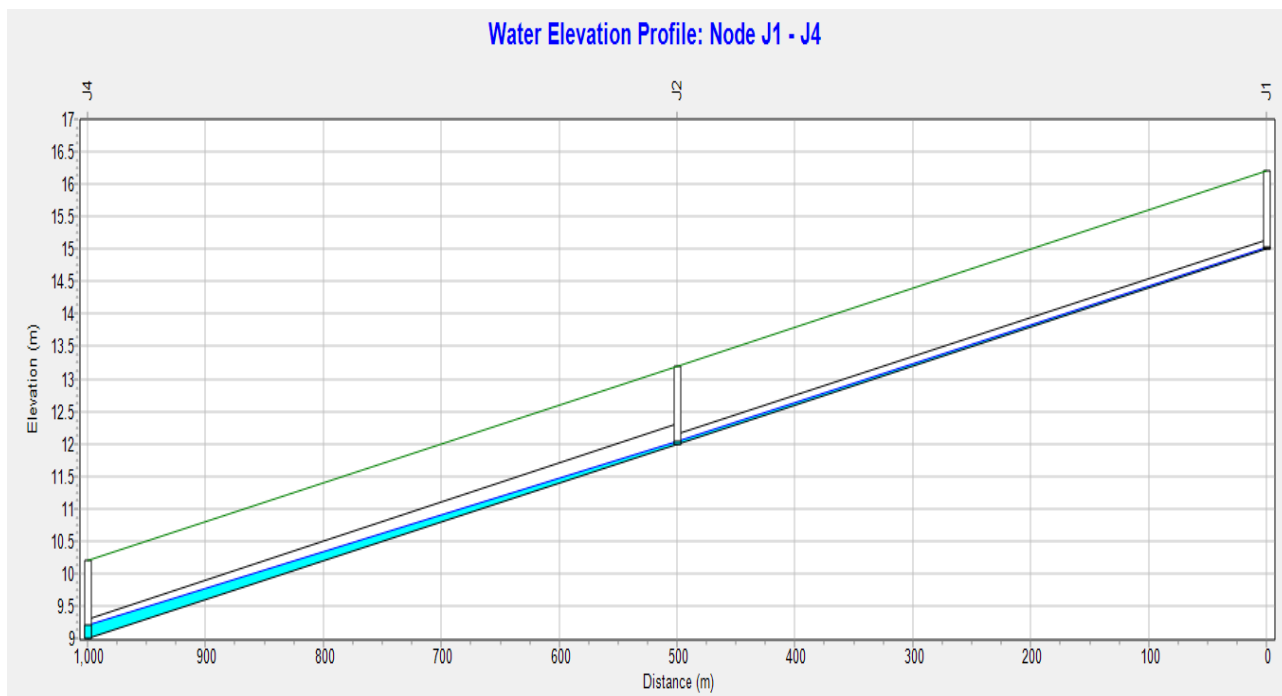


Figure 4.12 Profil en long des nœuds J1- J4 de la profondeur d'eau

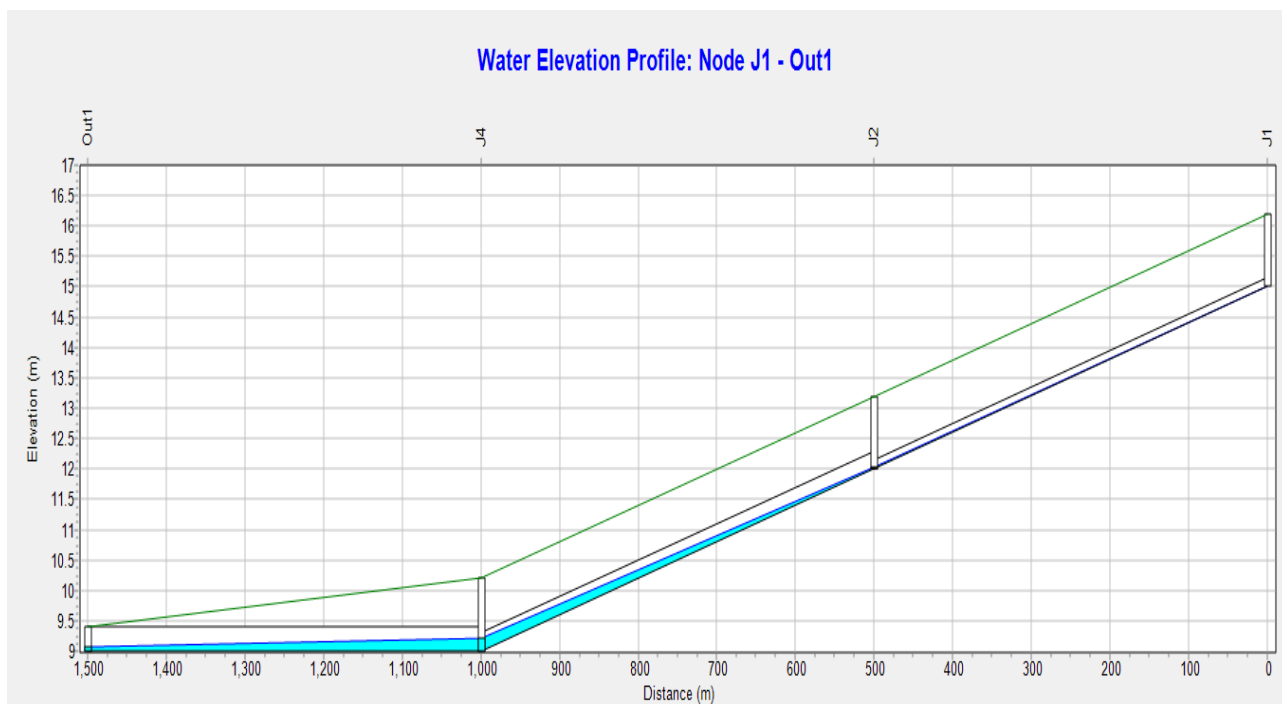


Figure 4.13 Profil en long des nœuds J1- J4 de la profondeur d'eau

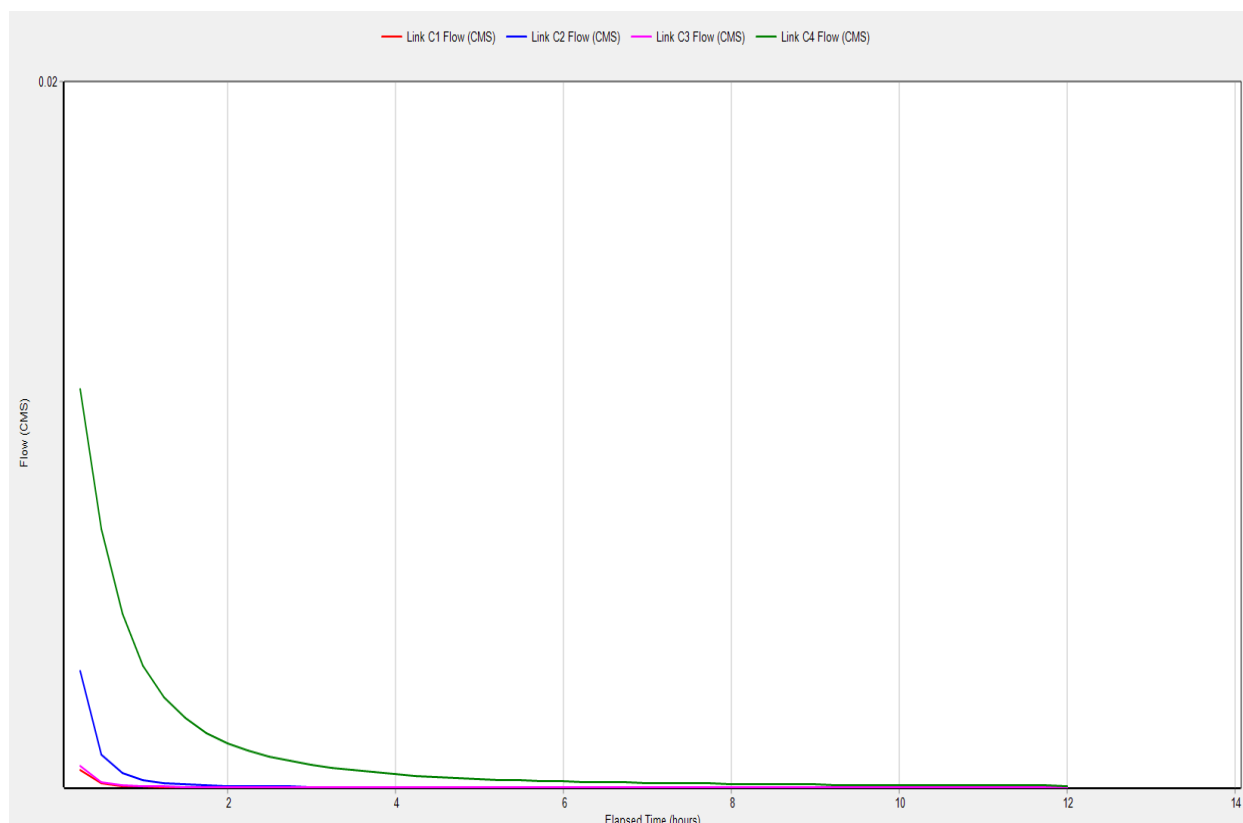


Figure 4.14 Profil en long du débit des conduites C1, C2, C3 et C4

La figure 4.14 et le tableau 4.13 montrent que ce modèle représente une approche optimale de la protection de l'environnement contre les inondations, ainsi que de la gestion du volume d'eau entrant et des pertes associées. Le volume total du débit entrant est de $4,4 \times 10^6$ litres, 100 % du débit étant dirigé vers l'exutoire. Le débit maximal est de 0,013 mètre cube par seconde. On peut en conclure qu'il n'y aura pas de perte d'écoulement. La vitesse maximale dans la conduite (1), qui est remplie à 65 %, est de 1,06 mètre par seconde. Cela pourrait entraîner une augmentation de l'écoulement des eaux souterraines vers la sortie. De telles modifications peuvent influencer la quantité d'eau disponible pour l'infiltration, ce qui pourrait ensuite avoir un impact sur l'écoulement des eaux souterraines. L'écoulement des eaux souterraines à 100 % de l'exutoire indique des modifications hydrologiques résultant d'un changement environnemental continu.

Tableau 4.13 Fréquence d'écoulement à l'exutoire

Outfall Node	Flow Freq. Pcnt.	Avg. Flow CMS	Max. Flow CMS	Total Volume 10 ⁶ ltr
Out1	100.00	0.001	0.013	0.044

4.3 Conception d'un système de gestion durable des eaux usées pour la Cité du Savoie

Cette section présente les phases de calcul des eaux sanitaires, le calcul des débits d'eaux usées et la phase d'évaluation de la quantité des eaux vannes et les boues.

4.3.1 Phase d'évaluation des eaux sanitaires

Cette phase tient compte de l'évaluation de la population actuelle et future, de la consommation domestique, commerciale et industrielle.

Estimation de la population actuelle et future

Cette mémoire tient compte du rapport IHSI pour avoir la population future suivant des différents scénarios de la Cité du Savoie. Il convient de comprendre l'évolution la croissance démographique aujourd'hui, sur sept (6) ans soit 2030 et 27 ans soit 2050 pour une meilleure gestion de la ressource en eau. Les calculs ci-après présentent l'évolution de la population du cas d'étude.

$$P_{2015} = P_{2012} (1+r)^3 \rightarrow (1+r)^3 = \left(\frac{P_{2015}}{P_{2012}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$1+r = \left(\frac{P_{2015}}{P_{2012}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$r = \left(\frac{P_{2015}}{P_{2012}}\right)^{\frac{1}{3}} - 1$$

$$r = \left(\frac{8875}{8586}\right)^{\frac{1}{3}} - 1$$

$$r = 0.011$$

$$P_{2024} = P_{2015} (1+r)^9 \rightarrow P_{2024} = 8875 (1+0.011)^9$$

P₂₀₂₃ = 9 793 Habitants

$$P_{2030} = P_{2015} (1+r)^{15}$$

$$P_{2030} = 8875 (1+0.011)^{15}$$

P₂₀₃₀ = 10 458 Habitants

$$P_{2050} = P_{2015} (1+r)^{35}$$

$$P_{2050} = 8875 (1+0.011)^{35}$$

P₂₀₅₀ = 13 016 Habitants

De là, la probabilité de la croissance de la Cité du Savoir suivant les années retenues pour ce cas d'étude est présentée par la figure 4.15.

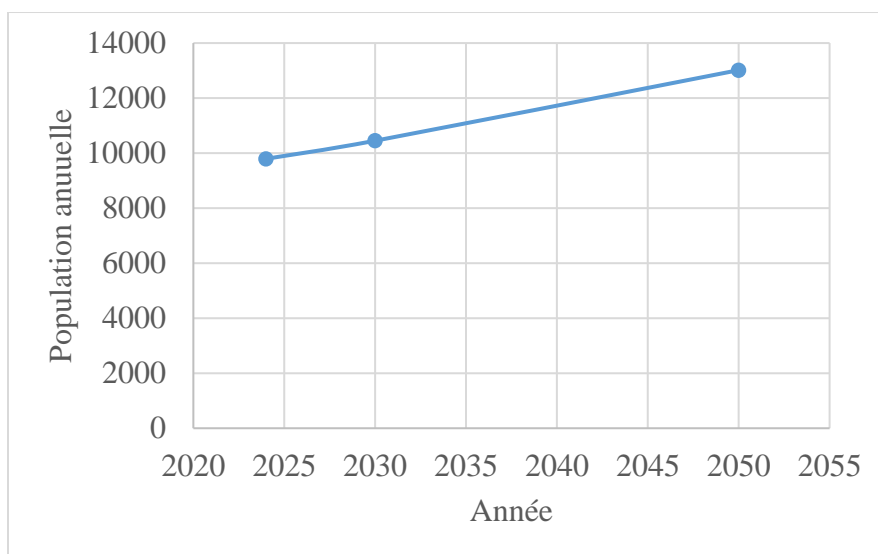


Figure 4.15 Variation de la population annuelle de la Cité du Savoir

La croissance de la population est un facteur important du changement climatique. La population actuelle de la Cité du Savoir est de 9 793 habitants, et devrait atteindre 13 016 habitants d'ici 2050, soit un taux de croissance annuel de 1,1 %. Une augmentation de la population se traduira inévitablement par une plus grande demande de ressources, qui à son tour entraînera une augmentation de la demande d'eau pour l'usage domestique, la production alimentaire et l'industrie. Il s'agit là d'un élément crucial du phénomène plus large des changements climatiques.

Estimation de la consommation domestique

Consommation totale = Nbre de personnes * dotations

Pour l'année actuelle, le débit de consommation domestique est :

$$Q (j)_{\text{moy}} = 9\,793 * 100 \text{ l/j}$$

$$Q(j)_{\text{moy}} = 979\,300 \text{ l/j ou } 979 \text{ m}^3$$

Le débit journalier maximal de l'année actuelle avec FP = 2 d'une population entre 3 001 et 10 000 pour une année de 365 jours est :

$$Q(j)_{\text{max annuel}} = 2 * 365 \text{ j} * 979\,300 \text{ l/j}$$

$$Q(y)_{\text{max annuel}} = 714\,889\,000 \text{ l/année ou } 714\,889 \text{ m}^3$$

Le débit journalier maximal horaire maximal de l'année actuelle avec FP = 3 d'une population entre 3 001 et 10 000 pour une année de 365 jours est:

$$Q(h)_{\text{max annuel}} = 3 * 365 \text{ j} * 979\,300 \text{ l/j}$$

$$Q(h)_{\text{max}} = 1\,072\,333\,500 \text{ l/année ou } 1\,072\,334 \text{ m}^3$$

Pour l'année 2030, le débit de consommation domestique est :

$$Q(j)_{\text{moy}} = 10\,450 * 100 \text{ l/j}$$

$$Q(j)_{\text{moy}} = 1\,045\,000 \text{ l/j ou } 1\,045 \text{ m}^3$$

Le débit journalier maximal de l'année avec FP = 1.90 d'une population entre 10 001 et 25 000 pour une année de 365 jours est :

$$Q(j)_{\text{max annuel}} = 1.90 * 365 * 1\,045\,000 \text{ l/j}$$

$$Q(j)_{\text{max annuel}} = 724\,707\,500 \text{ l/année ou } 724\,708 \text{ m}^3$$

Le débit journalier maximal de l'année avec FP = 3 d'une population entre 10 001 et 25 000 pour une année de 365 jours : est :

Pour une année de 365 jours :

$$Q(h)_{\text{max annuel}} = 3 * 365 \text{ j} * 1\,045\,000 \text{ l/j}$$

$$Q(h)_{\text{max annuel}} = 1\,144\,275\,000 \text{ l/année ou } 1\,144\,275 \text{ m}^3$$

Pour l'année 2050, le débit de consommation domestique est :

$$Q(j)_{\text{moy}} = 13\,016 * 100 \text{ l/j}$$

$$Q(j)_{\text{moy}} = 1\,301\,600 \text{ l/j ou } 1\,302 \text{ m}^3$$

Le débit journalier maximal de l'année avec FP = 2.85 d'une population entre 10 001 et 25 000 pour une année de 365 jours est :

$$Q(j)_{\text{max annuel}} = 365 * 1.90 * 1\,301\,600 \text{ l/j}$$

$$Q(j)_{\text{max annuel}} = 902\,659\,600 \text{ l/année ou } 902\,660 \text{ m}^3$$

Le débit horaire maximal de l'année avec FP = 3 d'une population entre 10 001 et 25 000 pour une année de 365 jours est :

$$Q(h)_{\text{max annuel}} = 365 \text{ j} * 3 * 1\,301\,600 \text{ l/j}$$

$$Q(h)_{\text{max annuel}} = 1\,425\,252\,000 \text{ l/année ou } 1\,425\,252 \text{ m}^3$$

Tableau 4.14 Estimation de la consommation domestique

Année	2023	2030	2050
Population	9 793	10 450	13 016
Q (d) moy m ³	979	1 045	1 302
Q (d) max annuel (m ³)	714 889	724 708	902 660
Q (h) max annuel (m ³)	1 072 334	1 144 275	1 425 252

Estimation de la consommation commerciale et industrielle

- ✓ la consommation commerciale

$$C_c = 6.1 \text{ l/ (m}^2\text{/j)} * 20\,000 \text{ m}^2$$

$$C_c = 122\,000 \text{ l/j}$$

$$C_c = 122 \text{ m}^3 * 365$$

$$C_c = 44\,530 \text{ m}^3$$

- ✓ La consommation Agro-industrielle du type agricole production de maïs se calcule de la manière suivante :

$$C_i = 1\,200 \text{ l/1 000 kg} * 20 \text{ kg/ha} * 6 \text{ ha} * 3 + 15\,000 \text{ l/1 000 kg} * 1\,750 \text{ kg}$$

$$C_i = 432 \text{ l} + 26\,250 \text{ l} = 26\,682 \text{ litres} = 27 \text{ m}^3$$

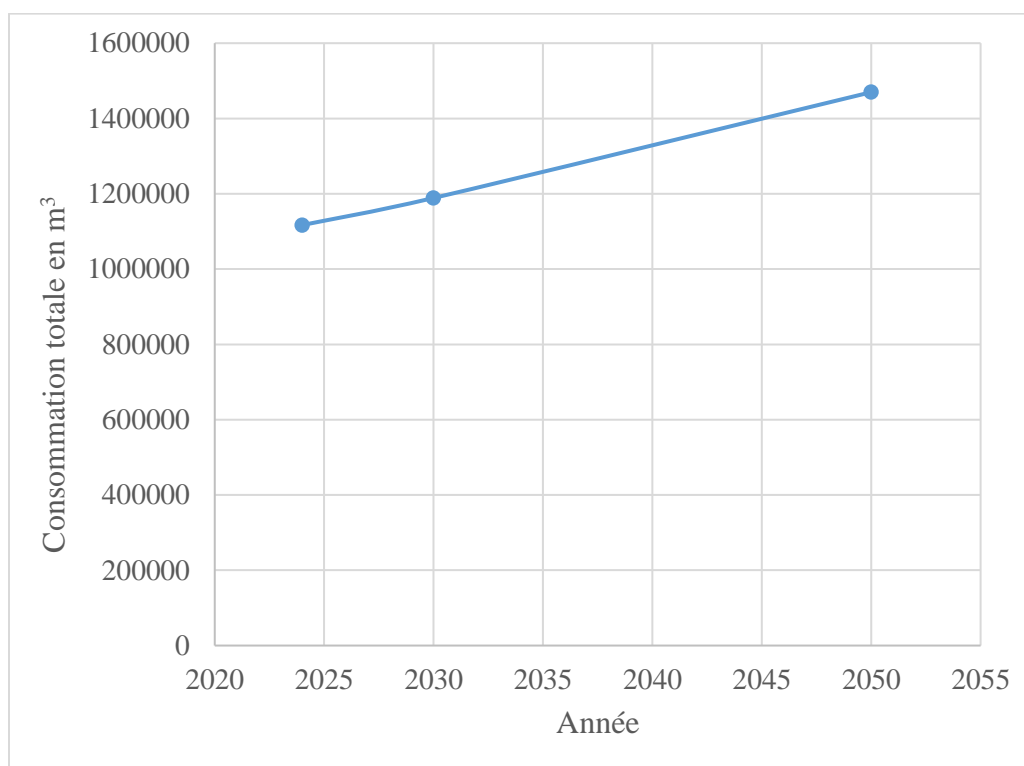


Figure 4.16 Variation des consommations domestiques

La population de la Cité du Savoir a des besoins en eau très diversifiés et en constante augmentation. Du fait des changements climatiques doivent s'adapter à des modifications de leur milieu de vie. Le tableau 4.14 et la figure 4.16 illustrent la probabilité des besoins futurs de consommation horaire moyenne annuelle. Les données indiquent que la population actuelle aura besoin de 1 168 911 mètres cubes d'eau par an pendant les heures de pointe, ce qui équivaut à 3 060 mètres cubes d'eau par jour pendant une année de 365 jours. Les projections sont basées sur un taux de croissance de 3 % en 2030 et de 14 % en 2050, par rapport à la base de référence de 2024. La quantité d'eau potable disponible pour l'usage domestique pourrait s'avérer insuffisante pour répondre aux besoins de l'ensemble de la population. L'augmentation prévue du nombre de personnes souffrant de stress hydrique vers les années 2050 pourrait entraîner des niveaux élevés de pollution des eaux usées et de l'environnement.

4.3.2 Calcul les débits d'eaux usées

Cette section met en phase l'évaluation des débits des eaux usées d'origine domestique, commerciale et industrielle.

Évaluation du débit des eaux usées d'origine domestique

La quantité d'eaux usées produites par personne et par jour augmente généralement avec la taille de la zone urbaine. Cela s'explique par les différences de mode de vie, de niveau de développement et d'horizons.

Pour l'année actuelle, le débit d'eau usée moyenne est :

$$Q_{(moy)} = 714\,889 * 0.80$$

$$Q_{(moy)} = \mathbf{571\,911\ m^3/an}$$

Le débit d'eau usée horaire est :

$$Q_{[h]} = 2 * 587\,511$$

$$Q_{[h]} = \mathbf{1\,143\,822\ m^3/an}$$

Pour l'année 2030, le débit d'eau usée moyenne est :

$$Q_{(my)} = 724\,708 * 0.80$$

$$Q_{(moy)} = \mathbf{579\,766\ m^3/an}$$

Le débit d'eau usée horaire est :

$$Q_{[h]} = 2 * 579\,766$$

$$Q_{[h]} = \mathbf{1\,159\,532\ m^3/an}$$

Pour l'année 2050, le débit d'eau usée moyenne est :

$$Q_{(moy)} = 902\,660 * 0.80$$

$$Q_{(moy)} = \mathbf{722\,128\ m^3/an}$$

Le débit d'eau usée horaire est :

$$Q_{[h]} = 2 * 722\,128$$

$$Q_{[h]} = \mathbf{1\,444\,256\ m^3/an}$$

Évaluation du débit des eaux usées d'origine industrielle

$$10\ m^3/ha * 6\ ha * 365 = 21\,900\ m^3$$

Évaluation du débit des eaux usées d'origine commerciale

$$75\ m^3/ha * 2\ ha * 365 = 54\,750\ m^3$$

Évaluation des volumes d'eaux sanitaires totaux

$$Q_{\text{(sanitaire) moyen}} \text{ pour l'année 2024} = 571\,911 \text{ m}^3 + 21\,900 \text{ m}^3 + 54\,750 \text{ m}^3 = \mathbf{648\,561 \text{ m}^3/\text{an}}$$

$$Q_{\text{(sanitaire) moyen}} \text{ pour l'année 2030} = 579\,766 \text{ m}^3 + 21\,900 \text{ m}^3 + 54\,750 \text{ m}^3 = \mathbf{656\,416 \text{ m}^3/\text{an}}$$

$$Q_{\text{(sanitaire) moyen}} \text{ pour l'année 2050} = 722\,128 \text{ m}^3 + 21\,900 \text{ m}^3 + 54\,750 \text{ m}^3 = \mathbf{798\,778 \text{ m}^3/\text{an}}$$

Tableau 4.15 Volumes des eaux sanitaires maximales

Année	2023	2030	2050
Q _{moyen} (m ³ /an)	648 561	656 416	798 778
Q _{(sanitaire) horaire} (m ³ /an)	1 220 472	1 236 182	1 520 906

L'utilisation de l'eau dépend d'une multitude de variables, y compris les variations démographiques, les habitudes alimentaires, les politiques économiques, les progrès technologiques et les valeurs culturelles et sociales attachées à ces éléments. Ces débits sont des estimations de la quantité d'eaux usées à rejeter en fonction de la croissance démographique, en tenant compte des variations journalières. Les facteurs socio-économiques influenceront la capacité à gérer correctement les ressources en eau. La figure 4.17 présente les débits annuels maximaux d'eau sanitaire qui vont à la hausse annuellement. Le débit d'eaux usées moyen pour l'année en cours est de 648 561 mètres cubes et celui horaire est de 1 220 472 mètres cubes, avec une augmentation prévue de 1 % d'ici 2030 et de 11 % d'ici 2050.

Le changement climatique a un impact significatif sur la société et sur les eaux usées à plusieurs égards. Tout d'abord, les précipitations plus fréquentes et plus intenses peuvent entraîner un afflux d'eaux usées dans les systèmes de traitement des eaux usées, ce qui peut les surcharger et provoquer des débordements. Deuxièmement, des températures plus élevées peuvent accélérer la croissance des bactéries et des virus dans les eaux usées, ce qui peut entraîner une augmentation des maladies liées à l'eau.

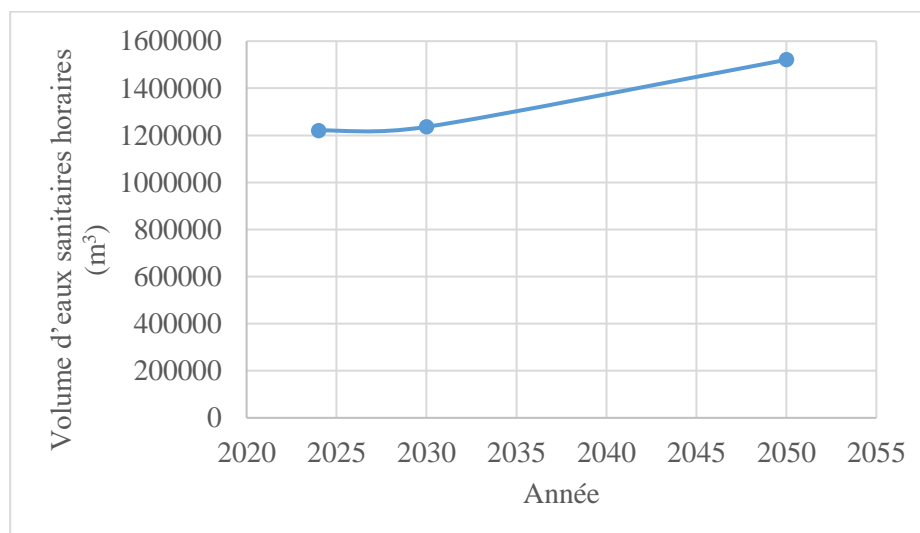


Figure 4.17 Volumes des eaux sanitaires maximales

4.3.3 Phase d'évaluation de la quantité des eaux vannes et les boues

Cette phase d'évaluation tient compte de la quantité des eaux de vannes et des boues.

Évaluation de la quantité des eaux vannes

L'évaluation de la quantité des eaux vannes se fait par l'équation (16) :

$$E_v = 4.8 \text{ l/chasse} * \text{Nbre de personnes} * \text{Nombre de toilettes/ ménages} * 5.2/\text{personne/jour} * 365$$

$$E_{v2024} = 4.8 \text{ l/chasse} * 9\,793 * 2 * 5.2 * 365 = 178\,436\,294 \text{ litres} = 178\,436 \text{ m}^3$$

$$E_{v2030} = 4.8 \text{ l/chasse} * 10\,450 * 2 * 5.2 * 365 = 190\,407\,360 \text{ litres} = 190\,407 \text{ m}^3$$

$$E_{v2050} = 4.8 \text{ l/chasse} * 13\,016 * 2 * 5.2 * 365 = 237\,161\,933 \text{ litres} = 237\,162 \text{ m}^3$$

Évaluation de la quantité de boues produites

L'équation (18), nous permet d'évaluer la quantité de boues produites

✓ pour l'année 2024

$$C_{2024} = 9\,793 * 5.2 * 0.365$$

$$C_{2024} = 18\,587 \text{ m}^3/\text{an}$$

✓ pour l'année 2030

$$C_{2030} = 10\,450 * 5.2 * 0.365$$

$$C_{2030} = 19\,834 \text{ m}^3/\text{an}$$

✓ pour l'année 2050

$$C_{2050} = 13\,016 * 5.2 * 0.365$$

$$C_{2050} = 24\,705 \text{ m}^3/\text{an}$$

4.4 Interprétation des résultats et analyse du modèle au cas d'étude

La militante écologiste Greta Thunberg estime que la dégradation de l'environnement constitue une menace importante pour nos vies, notre culture et notre identité. Cependant, il est important de noter qu'il s'agit d'une évaluation subjective. L'environnement de la Cité du Savoir doit servir de référence pour le développement afin d'éviter la dégradation de son identité tant au niveau local que national. Le rapport présente des statistiques sommaires basées sur les résultats trouvés à chaque étape de calcul, qui aidera à analyser les problèmes de gestion des ressources en eau dans l'étude de cas.

✓ Pour l'année actuelle

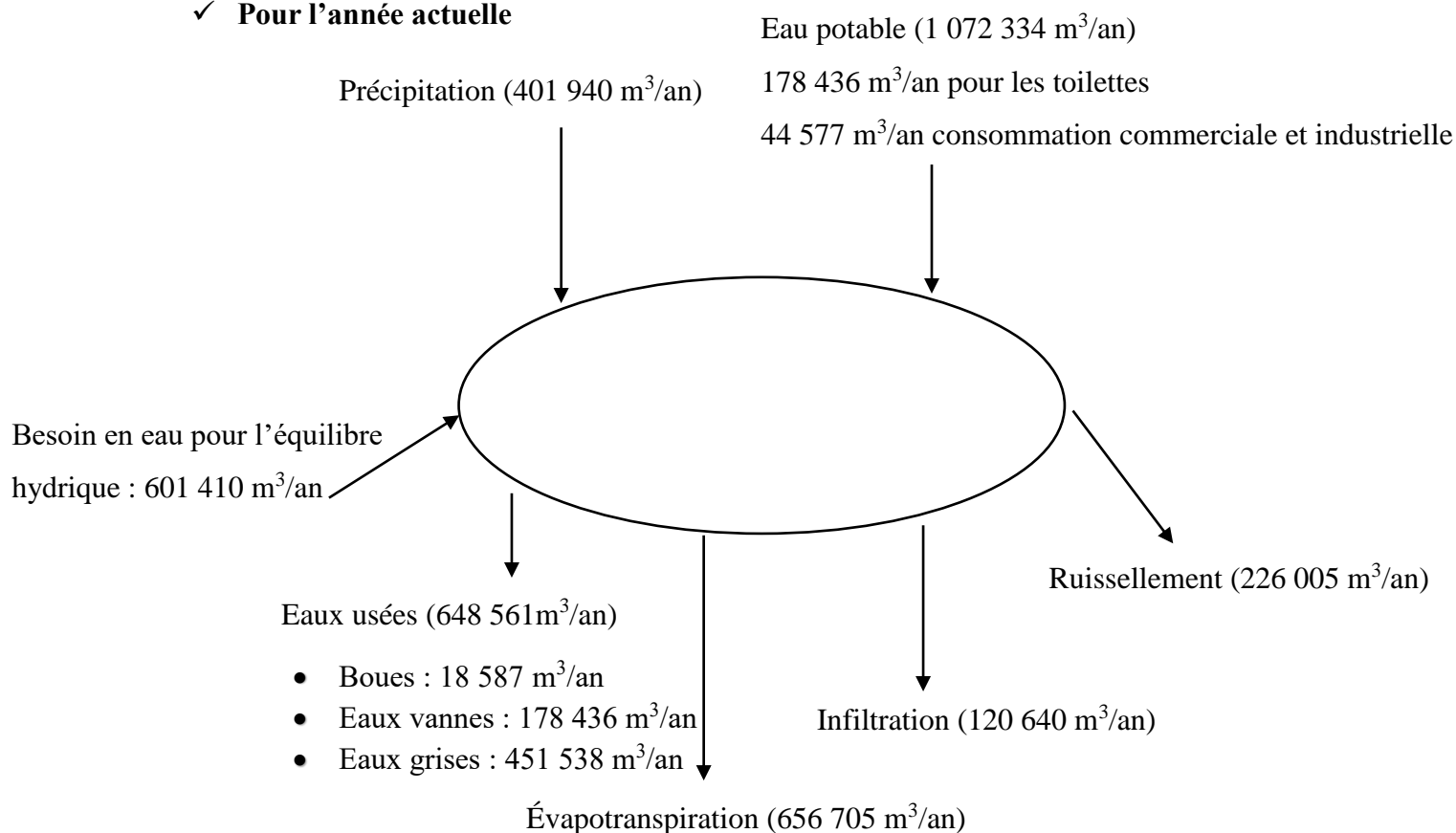


Figure 4.18 Présentation du bilan hydrique pour l'année 2024

L'analyse des données indique que l'évapotranspiration augmente rapidement, ce qui est préoccupant. La zone d'étude connaît un déficit de précipitations de 60 % en raison du réchauffement climatique, ce qui entraîne un assèchement généralisé et un déficit de l'équilibre hydrique. Au total, 12 % de l'eau s'infiltré, 23 % ruisselle et 65 % est perdue par évapotranspiration. L'intensification des précipitations entraîne un ruissellement qui peut provoquer des inondations et une dégradation de l'environnement. Associé aux réchauffements climatiques, ce phénomène explique comment le risque de sécheresse agricole et hydrologique augmentera même si la quantité de précipitations reste constante. Cela représente une menace croissante pour la sécurité alimentaire et exerce une pression supplémentaire sur les ressources en eaux souterraines. Le phénomène des changements climatiques a un effet profond sur les régimes de précipitations et l'évapotranspiration, ce qui montre une perturbation dans l'équilibre naturel de l'eau.

En ce sens, une gestion optimale de l'eau dans ce contexte permettrait de capter les 226 005 m³/an d'eaux de ruissellement susceptibles de provoquer des inondations et une dégradation de l'environnement, et de les acheminer vers une station d'épuration pour les traiter et les réutiliser comme eau potable. Le ruissellement représente 25 % de la consommation d'eau potable et 35 % du volume des eaux usées.

Parmi les eaux usées et les eaux pluviales collectées et éliminées, 20 %, soit 178 436 m³/an, sont utilisés pour les chasses d'eau, 5 %, soit 44 577 m³/an, sont utilisés à des fins commerciales et industrielles, 25 % pour l'usage de l'eau potable et les 451 538 m³/an restants, soit 50 %, peuvent être utilisés pour l'irrigation ou la recharge des nappes phréatiques après traitement, comme l'indique la figure 4.19 ci-dessous. Pour compenser le besoin en eau potable, nous pouvons forer dans la nappe.

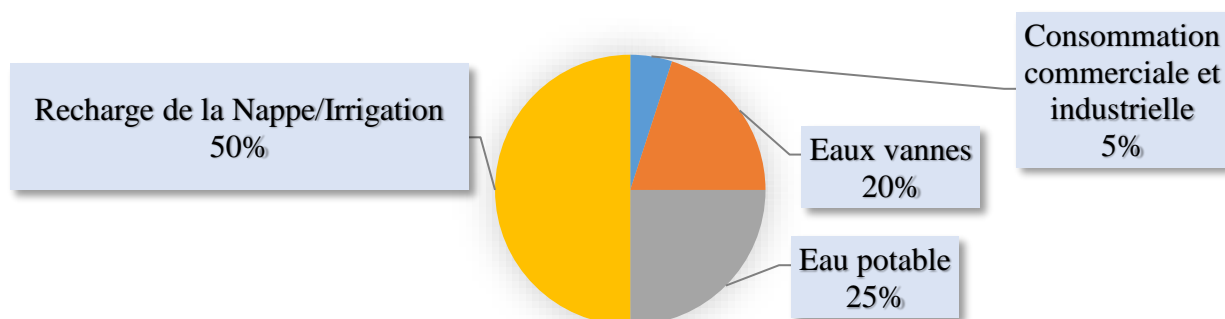


Figure 4.19 Modèle de gestion des eaux pluviales et des eaux usées pour l'année 2024 de la Cité du Savoir

✓ Pour l'année 2030

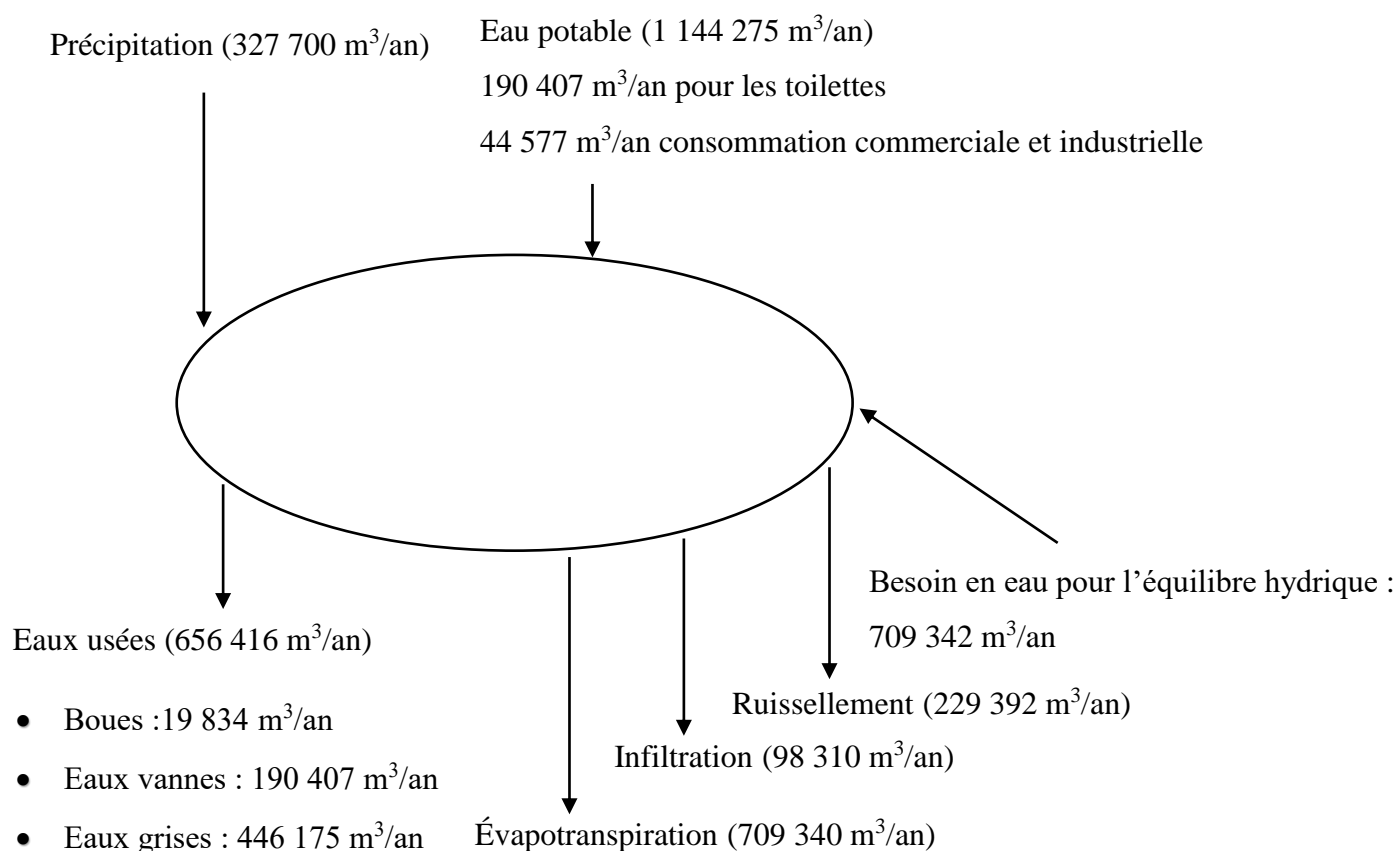


Figure 4.20 Présentation du bilan hydrique pour l'année 2030

L'analyse nous permet de comprendre le comportement hydrologique et climatologique des différents secteurs ou sous-bassins de la Cité du Savoir, qui est soumise à un schéma de précipitations très complexe dans la mesure où nous observons une diminution de 18 % par rapport à l'année en cours. La quantité de précipitations extrêmes de courte durée (un jour ou moins) devrait augmenter, l'augmentation la plus importante correspondant à un réchauffement plus prononcé. Comme le montre la figure 4.20, il y a un déficit de précipitations de 68 %, représentant 32 % du bilan hydrique, ou une légère augmentation de 1 % du ruissellement, ce qui pourrait entraîner des inondations et des sécheresses en toutes saisons par rapport à l'année en cours. Les pertes dues à l'infiltration sont de 9 %, l'évapotranspiration de 68 % et le ruissellement de surface de 22 % du bilan.

L'avantage de ce modèle réside dans sa structure pour améliorer la gestion des ressources en eau de la Cité du Savoir en termes de quantité. Il nous offre une vision simplifiée pour réduire cette complexité et résoudre ce problème afin d'éviter les inondations et le gaspillage. Les eaux usées et les eaux pluviales peuvent être évacuées, traitées et réutilisées comme montre la figure 4.21. Les eaux de ruissellement représentent 25 % de la consommation d'eau potable, 21 % pour les eaux de vannes, 5 % pour les consommations commerciales et industrielles et 49 % vont à l'agriculture.

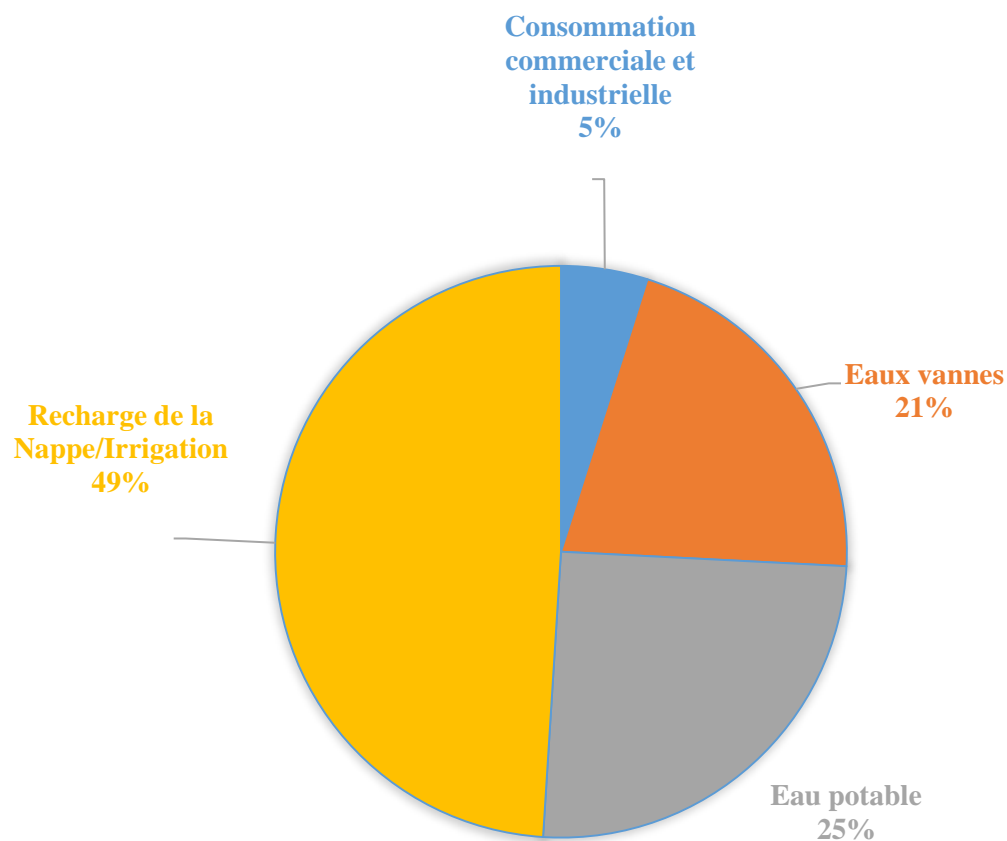


Figure 4.21 Modèle de gestion des eaux pluviales et des eaux usées de la Cité du Savoir pour l'année 2030

✓ Pour l'année 2050

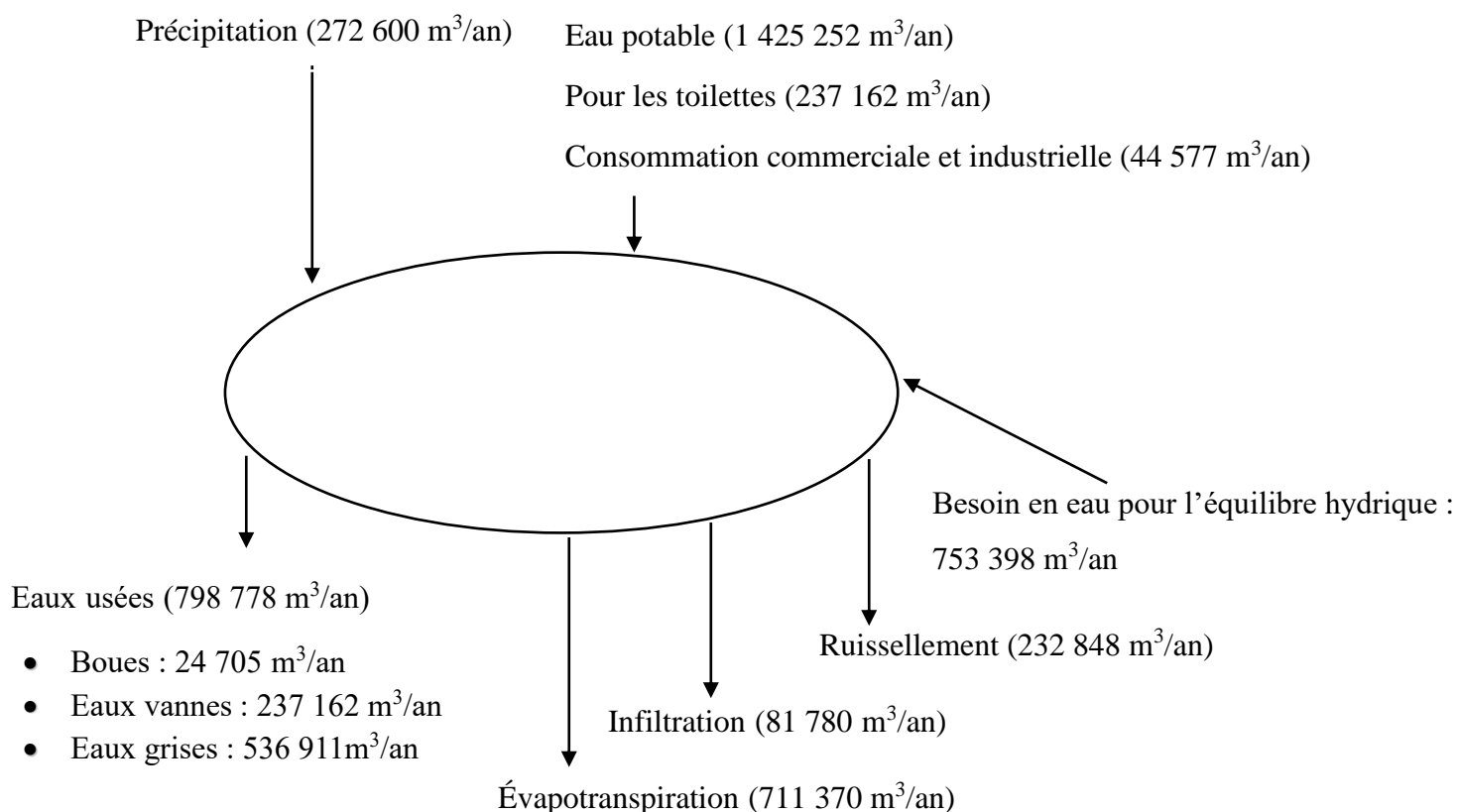


Figure 4.22 Présentation du bilan hydrique pour l'année 2050

En analysant les données, les divergences sont plus importantes pour les précipitations, notamment sur les différentes intensités au cours de l'horizon. En référence à la hausse de la température les précipitations diminuent de 32 % par rapport à l'année actuelle et de 32 % par rapport à 2030. Les précipitations présentent une pente descendante au cours des années en fonction de la variation de la température. Quant à l'écoulement de surface une augmentation de 1 % des eaux pluviales est constatée par rapport à l'année actuelle et de 3 % par rapport à l'année 2030. Cela suggère une probabilité d'insatisfaction en ce qui concerne les ressources en eau futures.

L'incertitude que nous avons est liée à la variabilité du climat, où ces modifications affectent le changement initial de la température, et tout changement de cette dernière conduit à des précipitations variées. Ces phénomènes, dits de rétroaction, jouent un rôle clé dans l'estimation de l'amplitude du réchauffement climatique [103]. En effet, le phénomène du changement climatique devient de plus en plus inévitable, provoquant cet impact négatif sur l'environnement dans lequel nous vivons et sur le bien-être des populations urbaines. Une mauvaise gestion de l'eau peut

entraîner des pertes humaines, des pertes agro-industrielles et une diminution de la recharge des nappes phréatiques. La figure 4.23 montre comment la ressource disponible peut être gérée pour combattre ce fléau de l'humanité et éviter ses conséquences néfastes pour la ville. Les eaux usées peuvent être traitées et utilisées pour l'eau potable, soit 22 % de la demande en eau potable, ce qui équivaut à 28 % des flux d'eaux sanitaires et pluviales, 4 % des eaux usées commerciales et industrielles, 23 % pour les chasses d'eau et 51 % pour la recharge des nappes phréatiques ou l'irrigation après traitement.

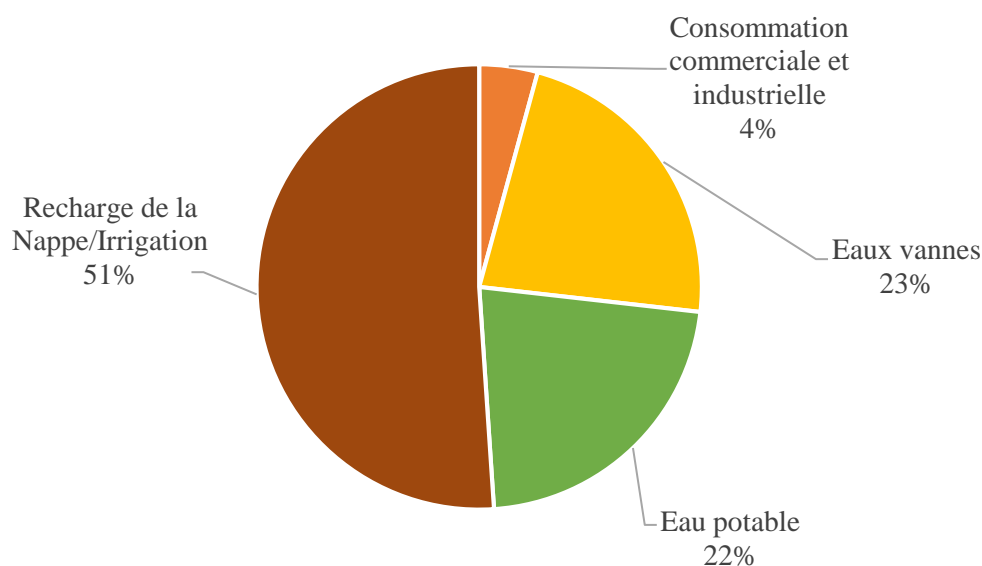


Figure 4.23 Modèle de gestion des eaux pluviales et des eaux usées pour l'année 2050

En effet, la modélisation spatiale des précipitations pour chaque saison prévoit des tendances variées, notamment une diminution des précipitations et une augmentation de l'évapotranspiration en raison de la hausse des températures. Pour l'année en cours, une augmentation des précipitations est prévue, suivie d'une diminution relative à l'avenir. Cette réduction des précipitations entraînera un déficit du bilan hydrique, ce qui pourrait avoir des conséquences importantes sur l'approvisionnement en eau, la production agricole et l'écosystème de la région de Cité du Savoir. Par conséquent, pour chaque scénario, il y a plus de sorties que d'entrées d'eau, ce qui pourrait avoir un impact négatif sur les réseaux de transport, contaminer les sources d'eau et perturber l'accès et les chaînes d'approvisionnement. Les projections indiquent que la zone d'étude continuera à subir les effets de la sécheresse.

Ce modèle illustre la fonction critique de la gestion des ressources dans l'atténuation des changements climatiques, qui sont une nécessité fondamentale pour la survie de l'humanité sur Terre. Il est de la plus haute importance de renforcer les pratiques de gestion de l'eau. Ces mesures peuvent inclure la réduction des pertes d'eau, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la mise en œuvre d'une planification de la demande d'eau. En outre, des mesures d'adaptation peuvent être mises en œuvre pour faire face aux impacts des changements climatiques sur l'équilibre hydrologique. Ces stratégies peuvent inclure la conservation de l'eau, la réutilisation de l'eau, la gestion des bassins versants et la protection des zones humides.

Afin d'atténuer les effets du changement climatique, il est impératif de passer à des sources d'énergie renouvelables et de promouvoir des pratiques durables. En outre, un modèle a été utilisé pour évaluer la gestion des ressources en eau sur les lieux, facilitant ainsi l'évacuation sécurisée et le traitement distinct des eaux pluviales et des eaux usées. L'évacuation des eaux pluviales peut se faire par le biais du réseau d'égouts pluviaux, qui nécessite un niveau de traitement relativement réduit par rapport à celui requis pour les eaux usées. Cependant, il existe un risque de transmission d'agents pathogènes lorsque les eaux usées domestiques sont déversées dans l'intercepteur. Il est primordial de traiter l'eau dans des centres de traitement spécialisés afin de prévenir tout impact négatif sur l'environnement et de faciliter sa réutilisation.

4.5 Évaluation du coût des deux systèmes et l'impact environnemental

4.5.1 Évaluation du coût des deux systèmes

Selon les projections démographiques calculées à partir des données de l'IHSI, la population actuelle est 9 697 personnes et devrait augmenter jusqu'à 13 016 en 2050. La capacité des deux systèmes est 1 658 100 m³ annuellement. En moyenne toutefois, le prix de l'eau est estimé à 4,3 € / m³, au 1^{er} janvier 2021 soit 2,11€ / m³ pour l'eau potable et 2,19 € / m³ pour l'assainissement, (chiffres publiés dans le dernier rapport du SISPEA en juillet 2022).

Le prix de construction, d'opération et entretien des doubles systèmes se calcule à partir de l'équation (19) en $\Psi_i = 4.74$ pour le procédé traitant des liquides.

$$C_{\text{projet}} = 1\,658\,100 \text{ m}^3 * 4.3 \text{ € / m}^3 * 4.74$$

Le coût du projet s'élève en moyenne à 34 M € en moyenne soit 21 €/m³.

Le degré élevé d'incertitude entourant les changements climatiques et ses impacts sur les régimes de précipitations ainsi que l'augmentation de l'évaporation entraîne des coûts importants pour les systèmes de gestion de l'eau. Il peut être judicieux d'investir dans des infrastructures de contrôle et de drainage des crues dans la zone d'études où les inondations sont un phénomène récurrent. L'augmentation des températures et des taux d'évaporation entraînerait une réduction des réserves d'eau douce et une intensification des conditions de sécheresse, ce qui peut à son tour augmenter les coûts des systèmes d'irrigation, d'approvisionnement en eau et de traitement de l'eau. En outre, l'incertitude entourant la disponibilité et la demande d'eau engendre des coûts supplémentaires dans les secteurs des eaux pluviales et des eaux usées. Des changements significatifs dans la fréquence des inondations et des sécheresses, en plus de la quantité et de la qualité de l'eau disponible, peuvent imposer des charges financières considérables aux systèmes de gestion de l'eau, ce qui pourrait en fin de compte empêcher la mise en œuvre d'un tel projet.

4.5.2 Impact environnemental

Un impact environnemental est défini comme tout changement dans l'environnement, qu'il soit négatif ou bénéfique, résultant des activités, produits ou services d'une installation [104]. Le projet a un impact global important sur :

- les composants humains

Pour rejoindre l'un des cibles du sixième objectif de ODD pour 2030 en référence à canada.ca qui est : « *assurer l'accès de tous à des services d'assainissement et d'hygiène adéquats et équitables et mettre fin à la défécation à l'air libre, en accordant une attention particulière aux besoins des femmes, des filles et des personnes en situation vulnérable* » [105]. L'évaluation des doubles systèmes permet d'accorder de la valeur à la ressource qui subit l'impact dans le sens de limiter au maximum les surfaces imperméabilisées, et que toutes les eaux pluviales et les eaux usées vont effectivement à leur destination finale pour éviter des inondations, la perte de vie humaine et la contamination des flux hydriques. Afin d'améliorer la qualité de l'eau, en réduisant la pollution, en éliminant les déversements, en minimisant les rejets de produits chimiques et de matières dangereuses, en réduisant de moitié la proportion d'eaux usées non traitées et en augmentant sensiblement le recyclage et la réutilisation sans danger au niveau locale.

- les composants biophysiques (l'eau et les flux hydriques et rareté ou unité des espèces ou des écosystèmes) ;

La pénurie d'eau est un facteur important d'extinction des espèces. Ce dossier présente une méthodologie pour l'organisation des eaux de pluie et des eaux usées, dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de minimiser la pollution de l'eau et de promouvoir une économie circulaire. La mise en œuvre d'un système réglementaire transparent est proposée comme moyen d'assurer un partage équitable de l'eau entre tous les usages et la valorisation des boues à des fins agricoles.

4.6 Solution de traitement des eaux usées et gestion des boues d'épuration

Les contraintes d'hier sont les opportunités d'aujourd'hui : les boues naturellement produites par les stations d'épuration représentent aujourd'hui une ressource à exploiter. Le traitement adéquat des boues et des eaux usées contribue directement à réduire les coûts d'exploitation d'une station d'épuration en offrant un débouché économique à une partie des biodéchets produits par les processus de dégradation et de décantation [106]. Les eaux usées et les boues contiennent de nombreux polluants et substances préoccupantes, notamment des poussières grossières, des débris, des solides en suspension, des agents pathogènes, des déchets organiques en décomposition, des nutriments et des centaines de produits chimiques qui pénètrent dans la station principalement à partir des eaux usées industrielles et des eaux pluviales.

Néanmoins, l'eau doit subir un ou plusieurs traitements pour éliminer les contaminants avant de pouvoir être réutilisée [107]. Ce mémoire propose le potentiel du traitement membranaire comme solution pour la filtration des eaux usées et l'élimination des contaminants par les membranes, offrant ainsi une alternative aux méthodes de traitement conventionnelles.

Diverses technologies, dont la digestion anaérobie, l'hydrolyse thermique, la co-digestion et le séchage thermique, peuvent être employées pour le traitement des boues dans le but de les convertir en une source d'énergie précieuse, en fonction des prix de l'énergie en vigueur dans chaque pays [106]. Ce mémoire examine les avantages de la stabilisation des boues par digestion anaérobie et la propose comme technique innovante de traitement des boues. La digestion anaérobie crée des conditions optimales pour que les micro-organismes dégradent les boues en l'absence d'oxygène, ce qui entraîne la production de digestat (matière organique partiellement stabilisée) et de biogaz dans un digesteur. Ce processus permet non seulement de réduire les émissions de méthane, mais aussi de contribuer à la production d'énergie propre [108]. Le biogaz peut être utilisé pour la production d'électricité et/ou de chaleur, ou peut être utilisé comme biocarburant pour la Cité du

Savoir. De plus, le système présente un risque insignifiant de transmission de pathogènes à l'environnement.

Deuxièmement, les boues d'épuration sont de plus en plus considérées comme une source potentielle de sous-produits de valeur et d'intrants agricoles pouvant contribuer aux stratégies d'atténuation du changement climatique. Ce processus permet de réduire les volumes de déchets et d'améliorer la fertilité des sols. Il est de la plus haute importance de réduire la production de boues d'épuration à la source. Les objectifs susmentionnés peuvent être atteints en mettant en œuvre des pratiques de consommation durable qui réduisent la consommation d'eau.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Ce mémoire de maîtrise est motivé par l'émergence de nouvelles technologies de conservation des eaux de pluie et des eaux usées, l'intensification des phénomènes climatiques et, de manière générale, les risques sanitaires liés à l'eau. Dans un contexte d'inertie climatique, l'adaptation au changement climatique est donc nécessaire pour limiter son impact sur les activités socio-économiques et sur l'environnement. Par conséquent, l'étude de cas de la Cité du Savoir, qui a impliqué la conception d'un modèle de gestion des eaux de pluie et des eaux usées, a été développée dans l'intention d'être appliquée à la protection des écosystèmes, avec pour objectif une mise en œuvre aux niveaux local et national. Ce chapitre est divisé en trois sections. La première section présente une synthèse des travaux, la deuxième met en évidence les limites de la recherche et la troisième propose des pistes de recherche pour l'avenir.

5.1 Synthèse des travaux

Comme indiqué précédemment, l'impulsion de ce mémoire provient de l'émergence du changement climatique, qui a eu un impact préjudiciable sur la ressource fondamentale et universelle qu'est l'eau et sur l'environnement au sens large. L'objectif est de proposer un double système de gestion des eaux pluviales et des eaux usées qui soit résilient aux effets du changement climatique, avec un accent particulier sur le cas de la Cité du Savoir en Haïti. Cette section présente les étapes qui ont mené à leur aboutissement tout en révélant la démarche méthodologique qui a été suivie.

La revue de la littérature existante a permis d'avoir une vue d'ensemble des différentes contributions scientifiques traitant de la question du changement climatique et de son impact sur l'environnement et le cycle de l'eau. Le troisième chapitre présente les aspects méthodologiques de l'étude, en décrivant les méthodes et les activités employées pour atteindre les objectifs de la recherche. Le quatrième chapitre présente la mise en œuvre du modèle proposé, qui a consisté à simuler la dynamique des précipitations dans différentes conditions afin d'évaluer les performances du modèle. L'infiltration de l'eau aide à rétablir une meilleure régulation de ses flux. La régulation du ruissellement de surface permet la prévention et la gestion des inondations, la

préservation et la protection des ressources en eau, et la performance des systèmes de traitement des eaux usées.

Le texte présente des solutions potentielles pour la création d'une Cité du Savoir verte. Ces solutions incluent la gestion des eaux de pluie et des eaux usées, ce qui pourrait se traduire par des avantages environnementaux et économiques significatifs. L'utilisation de solutions naturelles pour la gestion des eaux de pluie renforcera la résilience de la zone d'étude face au changement climatique. De plus, les résultats démontrent que le modèle proposé prévient efficacement la perte de précipitations et assure une distribution plus équitable des précipitations et des eaux usées dans la zone d'étude.

En conclusion, la conception d'un double système d'assainissement des eaux pluviales et des eaux usées représente un défi important dans le contexte du changement climatique, nécessitant le développement de solutions innovantes pour assurer la résilience à long terme. Néanmoins, l'intégration des principes de gestion intégrée des ressources en eau, des stratégies d'adaptation au changement climatique et des technologies innovantes peut faciliter le développement d'infrastructures résilientes, permettant ainsi de relever les défis actuels et futurs liés au climat. La séparation des eaux pluviales et des eaux usées permet de mettre en œuvre des pratiques durables de gestion des eaux pluviales, telles que l'infiltration des sols et la réutilisation de l'irrigation, qui contribuent à préserver les ressources en eau. Il est recommandé d'utiliser des systèmes de biogaz pour atténuer les effets du changement climatique. L'objectif de ces approches est d'optimiser l'utilisation des ressources en eau et d'aligner les activités opérationnelles sur les attentes de la communauté. Pour garantir une gouvernance efficace des eaux pluviales et des eaux usées, il est essentiel de mettre en œuvre une approche stratégique globale et des mécanismes de financement innovants, tant au niveau national que municipal [102]. En outre, la restauration des zones humides et la plantation d'arbres peuvent favoriser une infiltration accrue et une réduction du risque d'inondation.

5.2 Limitations des travaux

Compte tenu de l'état déplorable du système d'approvisionnement en eau en Haïti, il n'a pas été possible de réaliser une étude exhaustive de toute la région nord, et encore moins de l'ensemble du pays, qui couvre dix départements. Elle se concentre sur la Cité du Savoir et propose des solutions innovantes pour faciliter la gestion des eaux de pluie et des eaux usées, domestiques et industrielles

vers un niveau d'utilisation approprié pour le traitement et la réutilisation à l'adaptation des changements climatiques. Néanmoins, cette étude n'aborde pas la question de la qualité de l'eau, des boues ou des méthodes de traitement.

Dans cette section on retrouve :

- ✓ la qualité des eaux : La qualité de l'eau n'est actuellement pas suffisamment prise en compte ou contrôlée en raison des difficultés à mesurer certains paramètres. Il s'agit d'un facteur crucial pour la santé publique. Cependant, par rapport à la pollution, l'eau qui passe dans l'atmosphère devient polluée, et les eaux usées sont également une source de contamination. Cette étude est basée sur des données futures projetées, plutôt que sur des données de qualité existantes. Ces dernières pourraient être estimées avant le rejet ou la réutilisation pour la recharge des nappes phréatiques, l'utilisation agricole ou d'autres objectifs.
- ✓ la qualité des boues de vidange : Bien que la réduction des gaz à effet de serre soit essentielle pour atténuer le changement climatique, ce mémoire n'aborde pas la question de l'élimination des boues. Il existe plusieurs technologies de traitement des boues, notamment le lagunage, la digestion anaérobie et la phytoépuration. Ce mémoire n'en tient pas compte.
- ✓ l'influence du contexte de la zone : Il ne traite pas l'influence du contexte de cette zone sur les exigences en matière de traitement et sur l'ensemble du processus de gestion des boues de vidange.
- ✓ méthode de conception à chaque étape du traitement des boues : le sujet traité n'englobe pas l'étude des différentes méthodes employées à chaque étape du processus de traitement, qui comprend le dépôt, le prétraitement, le fractionnement des composants solides et liquides, les solutions de traitement anaérobie et aérobie, ainsi que la transformation agricole et énergétique qui s'ensuit.

5.3 Travaux futurs

À la lumière de ces résultats et des limites de cette mémoire, on peut conclure que le présent travail est incomplet et qu'une analyse plus approfondie est nécessaire. Néanmoins, ce travail académique a apporté une modeste contribution à la conception d'un double système de gestion des eaux pluviales et des eaux usées. En outre, il a permis d'identifier les outils et les approches adoptés par

l' « ÉTAT », la DINEPA, les organisations, les municipalités et les institutions de protection de l'environnement qui pourraient faciliter le développement d'un double système de gestion des eaux pluviales et des eaux usées.

Il serait avantageux pour les organisations environnementales de procéder à une étude plus complète du domaine de l'assainissement environnemental. Les économistes auraient intérêt à entreprendre des recherches plus approfondies sur les aspects économiques de la gestion des eaux pluviales et des eaux usées. Inversement, les spécialistes des sciences sociales pourraient souhaiter étudier l'impact des comportements sociaux des communautés locales sur l'assainissement des eaux pluviales et des eaux usées dans le contexte du changement climatique. Enfin, la question de l'optimisation qualitative reste sans réponse et doit faire l'objet de recherches plus approfondies à l'avenir.

RÉFÉRENCES

- [1] E. Evens et al., « *Regards sur la situation des ressources en eau de la République d'Haïti* », Laboratoire de Qualité de l'Eau et de l'Environnement (LAQUE) Université Quisqueya, BP 796, Port-au-Prince, Haïti, 2000.
- [2] B. Gagnon et al., « *Intégration des principes du développement durable à la conception en ingénierie* », la conception durable appliquée aux systèmes municipaux d'assainissement des eaux usées. Sherbrooke (Québec). Bibliothèque et Archives Canada. Direction du Patrimoine de l'édition, 2012.
- [3] M. Bernard et al., « *Un modèle mathématique de simulation adapté à la conception et à la gestion des réseaux d'assainissement : le programme CAREDAS* ». In : L'assainissement de demain. L'hydraulique des eaux pluviales et usées. Rapport IV.11 : Compte-rendu des XVIIes journées de l'hydraulique. Tome 2. Nantes, septembre 1982. [En ligne]. Disponible https://www.persee.fr/doc/jhydr_0000-0001_1982_act_17_2_4825.
- [4] A. Moatty et al., « *Le système d'assainissement en Ile-de-France* » entre ressource et facteur aggravant pour la gestion d'une inondation majeure. Published in Cybergeog: European Journal of Geography, Space, Society, and Territory. Article 940, avril 2020. [En ligne]. DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeog.34634>.
- [5] C. Laurent. et al., « *Comportement du réseau d'assainissement parisien en période de crue majeure de la Seine* ». Novatech, p. 91-98, 2007.
- [6] F. Renard, et al., « *Analyse territorialisée du risque de débordements de réseau d'assainissement liés aux eaux pluviales* » Application au Grand Lyon , *Norois*, No. 208, p.45-60, 2008. [En ligne]. Disponible : [10.4000/norois.2181](https://doi.org/10.4000/norois.2181).
- [7] A. Moatty et al., « *Infrastructures critiques, vulnérabilisation du territoire et résilience* » Assainissement et inondations majeures en Ile-de-France , *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 18(3), décembre 2018. [En ligne]. Disponible : <http://journals.openedition.org/vertigo/23554>.

- [8] B. Gildas et al., « *Guide d'accompagnement des services de l'ANC* » Outil d'aide au contrôle, 2014. [En ligne]. Disponible : <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/recueil.php>.
- [9] A. Roy et al., « *Impediments and Solutions to Sustainable, Watershed-Scale Urban Stormwater Management* » Environmental Management. Lessons From Australia and the United States. PubMed. 42 (2), p. 34-59, avril 2008. [En ligne]. Disponible : 10.1007/s00267-008-9119-1.
- [10] C. Sénéchal et al., « *Pérenniser la gestion des eaux pluviales à la parcelle* » Cinq propositions à destination des législateurs, des gestionnaires d'ouvrages et des aménageurs. 7ème Conférence internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, Lyon, France. Novatech. 2010, p.1-10.
- [11] D. Ballay, et al., « *Le traitement des eaux usées* ». Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 11, p. 77–86. 1998. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.7202/705331ar>.
- [12] <https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/planeconomieverte/actions-lutter-contre-changements-climatiques/comprendre-changements-climatiques/impacts>.
- [13] D. Acemoglu et al., « *The network origins of aggregate fluctuations* », Econometrica, Vol. 80 (5), p.1977–2016, sept. 2012. [En ligne]. Disponible: <https://doi.org/10.3982/ECTA9623>.
- [14] V. Masson-Delmotte et al., « *Climate Change: The Physical Science Basis* ». Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, GIEC, Cambridge University Press, Royaume-Uni, sous presse, 2021.
- [15] L. Albarello, « *Choisir l'étude de cas comme méthode de recherche* » De Boeck : Bruxelles p.144, 2011. ISBN:978-2-8041-6588-8.
- [16] J. Hamel, *Étude de cas et sciences sociales*, Paris, L'Harmattan, 1997.
- [17] D. Widlocher, « *La psychologie clinique et pathologique* ». Psychologie Française, 44 (3), p. 227-232, 1999.

- [18] L. Jacques, « *De l'étude de cas à l'analyse de l'activité* », Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, p.4-2, 2002. [En ligne]. Disponible: <https://doi.org/10.4000/pistes.3658>.
- [19] I. Bichindaritz, « *Incremental concept learning and case-based reasoning* », for a cooperative approach. In, I.D, Watson (Ed.), *Progress in case-based reasoning*, Berlin, Springer, p. 91-106, 1995.
- [20] C. Riveline. « *Exemples d'application In : Évaluation des coûts* » Éléments d'une théorie de la gestion. Paris : Presses des Mines, 2005 [en ligne]. Disponible : <http://books.openedition.org/pressesmines/482>.
- [21] Organisation des Nations Unies, « *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau* », UNESCO, Paris, 2021.
- [22] B. Mario et al., « *Gestion intégrée des ressources en eau : cadre de référence* ». Guide La prise de décision en urbanisme. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec, 2018.
- [23] C. A. Béliard et al., « *La Dégradation de l'environnement haïtien* », Association nationale des agro-professionnels haïtiens, Port-au-Prince, 1999, p.5.
- [24] World Bank, « *World Development Report* ». Investing in Health, Volume1. Washington, D.C: World Bank, 1993. [En ligne]. Disponible: <https://doi.org/10.1596/0-1952-0890-0>.
- [25] World Bank-Washington, DC, US, « *World Resources Reports: a guide to the global environment* »: The urban environment. Volume 1. Oxford University Press, 1996-97.
- [26] WHO / UNICEF, *Joint Monitoring Programme (JMP) for Water Supply and Sanitation*, 2015.
- [27] X. Ilaman, « *L'absence du traitement des eaux résiduelles en Haïti : un danger méconnu* », 2017. [En ligne]. Disponible : <https://lenouvelliste.com/article/174509/labsence-du-traitement-des-eauxresiduelles-en-haiti-un-danger-meconnu>.
- [28] Issam Nouiri, *Outils d'aide à la décision pour la gestion optimale des ressources en eau*, 2016, p 7, par.5.

- [29] Boucher, I. « *La gestion durable des eaux de pluie* », Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT), 2010. [En ligne]. Disponible <https://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1308>.
- [30] Evens EMMANUEL & Per LINDSKOG (2000) citèrent Saleth et Dinar, 1997.
- [31] Andrew Thow, « *Les services climatiques peuvent inverser la spirale infernale* », Étude de cas : Haïti, 59(2), Bulletin de l'OMM à la p. 89, 2010.
- [32] Conseil des académies canadiennes. « *La gestion durable des eaux souterraines au Canada* ». Rapport intégral, 2009.
- [33] Plan d'exécution du programme national de recherche, « *Gestion durable de l'eau* », Fonds National de la Recherche Suisse, PNR 61, octobre 2008.
- [34] G. Olivier, « *Le Développement durable : Paysage Intellectuel* », Natures sciences sociétés, 2 (4), p.322, 1994.
- [35] DINEPA, « *Document D'orientation Stratégique Pour L'assainissement* », Haïti, 2014.
- [36] Organisation mondiale de la Santé, « *Directives de qualité pour l'eau de boisson* », 2ed, 1998.
- [37] R. K. Pachauri et al., « *Changements climatiques, Rapport de synthèse* ». Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC. Genève, Suisse, 2014.
- [38] L. Walczak, L., et al., « *Stratégies durables d'adaptation aux changements climatiques à l'échelle d'une MRC* », quels processus de gouvernance? Quelles démarches résilientes? Rapport de recherche, Montréal, Ouranos, Janvier 2021.
- [39] Ministère de l'Environnement et du Changement climatique. « *Recueil des engagements du Canada aux accords et instruments internationaux sur l'environnement* ». Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et l'Accord de Paris, Canada, 2020.

[40] United Nations, « *Programme de développement durable à l'horizon 2030* », Transformer notre monde, septembre 2015. [En ligne]. Disponible : <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.

[41] D. Thomas, « *Le changement climatique dû aux variations de l'orbite terrestre ?* » La Nasa n'a jamais défendu cette théorie, sujet TF1 Info, France, septembre 2022.

[42] P. Jud, « *Étude de faisabilité d'un aménagement hydro-électrique sur les rivières non jaugées* » : cas de la rivière de l'Estère dans l'Artibonite. Département de génie des ressources hydrique, ISTEAH, 2021. [En ligne]. Disponible : <http://hdl.handle.net/123456789/389>.

[43] F. Lavie-Derande et al., « *Changement Climatique Et Services* », Eau, Assainissement Et Hygiène, Solidarité Internationale, Publié le jeudi 24 mars 2022.[En ligne]. Disponible : <https://www.internal-displacement.org/database/displacement-data>.

[44] <https://www.partir.com/Haiti/quand-partir.html>.

[45] T. Joseph Ronald, « *Évaluation Environnementale et des Changements Climatiques* », Rapport pour la préparation du programme d'Options Stratégiques pour Haïti 2013-2018, FIDA, EECC No. 3217-HT, mai 2012.

[46] E. Tilley et al., « *Compendium of Sanitation Systems and Technologies* ». 2nd Revised Edition. 2016.

[47] Audrey. « *Le Biogaz* », Un allié sans pareil contre les changements climatiques, 2018. [En ligne]. Disponible: <https://www.biogasworld.com/fr/news/biogazchangementsclimatiques/>.

[48] Ministère de l'environnement, de la lutte contre les changements climatiques, de la faune et des parcs, rapport sur l'état des ressources en eau et des écosystèmes aquatiques, © Gouvernement du Québec, 2020.

[49] C. Drucker et al., « *Manage Sup, Méthodes de recherche en mangement* ». 4^e éditions, Dunod, Paris, 2014.

- [50] Marché publics de travaux. « *Cahier des clauses techniques générales* ». La conception d'un réseau collectif. Fascicule n° 70, Éd. Direction des Journaux Officiels 26 rue Desaix - 75727 PARIS Cedex 15, Novembre 2003.
- [51] F. Anctil et al, « *Hydrologie-Cheminement de l'eau* ». Deuxième édition, Presses internationales Polytechnique. Canada, 2012.
- [52] B. Hingray et al., « *Hydrologie 2* ». Une science pour l'ingénieur, première édition. Presses Polytechniques et universitaires romandes, 2009.
- [53] C. Laurent, « *Les modèles hydrologiques conceptuels sont-ils robustes face à un climat en évolution ?* » Diagnostic sur un échantillon de bassins versants français et australiens, thèse de doctorat, Dép. des sciences de la terre, AgroParisTech, 2013. Français. [En ligne]. Disponible : 2013AGPT0030ff. ffpastel-00879090f.
- [54] M. Emmanuel, « *L'indice d'aridité* ». In: Bulletin de l'Association de géographes français, N°9, p. 3- 5, mai 1926.
- [55] J. Keyantash, « *The quantification of drought : an evaluation of drought indices* », Bulletin of the American Meteorological Society, 83(8), p. 1167-1180, 2002.
- [56] K. Mintenbeck, « *Impacts, Adaptation and Vulnerability* ». Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3–33, 2022. [En ligne]. Disponible: 10.1017/9781009325844.001.
- [57] Météo et climat à Milot en Haïti, a-contresens, visité en ligne novembre 2023, <https://planificateur.a-contresens.net>.
- [58] D. Roger, « *Cours-Hydraulique* », dimensionnement des réseaux d'eau pluviales, UFA-LYCEE DES METIERS, MC, 2020.
- [59] F. Anctil, « *Hydrologie* » cheminements de l'eau. Presses internationales Polytechnique, Montréal, 2012.

- [60] J. Tribut, « Détermination du débit de pointe à prendre en compte pour la desserte en eau potable de petits groupements de foyers ». TSM, p.305-316, Octobre 1969.
- [61] B. Chocat et al., « *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement* », Paris: Technique et documentation-Lavoisier, 1997.
- [62] D.E Lloyd-Davies, « *The Elimination of Storm-Water from Sewerage Systems* », Proceeding, Institute of Civil Engineers, 1906.
- [63] US joint Committee on Rural Sanitation, « *Approvisionnement en eau des zones rurales et des petites agglomérations* », Organisation mondiale de la santé, Genève, 1961.
- [64] S. Bennis, « *Hydraulique et hydrologie* ». Montréal, École de technologie supérieure, 2003.
- [65] American Society of Civil Engineers (ASCE) and Water Environment Federation (WEF), « *Design and construction of stormwater management systems* », Manuel de pratique, New York, p. 6-38, 1992.
- [66] ANRH, « *Étude des pluies de courtes durées* », Élaboration de programmes relatifs à l'étude Intensité, Durée-Fréquence, Rapport n°1, Département: Hydrologie. Service: Climatologie, Algérie, 1993.
- [67] T. SCHUELER, « *Technical Support for the Bay-Wide Runoff Reduction Method* », Baltimore, Chesapeake Stormwater Network, Ville de Québec, 2008.
- [68] F. Boulier. « *Calcul Numérique* », Algèbre Linéaire, Technical report, Université Lille 1, 59655, Villeneuve d'Ascq, France, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://pro.univ-lille.fr/francois-boulier>.
- [69] R. E. Horton, « The role of infiltration in the hydrologic cycle », Trans. American Geophys. Union, Vol. 14, p. 446-460, 1933.
- [70] R. E Horton, « *An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity* », Proc. Soil Sci. Soc. Am., Vol. 5, p. 399-417, 1940.
- [71] H. U. Farid et al., « Estimation of infiltration models parameters and their comparison to simulate the onsite soil infiltration characteristics », Int J Agric & Biol Eng, 12(3), p.84-91, 2019.

- [72] W. Brutsaert, « Evaporation into the Atmosphere », D. Reidel Publishing Company, Dodrecht, p.299, 1982.
- [73] H. L. Penman, « *Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London* ». Series A. Mathematical and Physical Sciences, 193(1032), p.120–145, 1948.
- [74] XU.C-Y, « Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration », and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany Hydrological Processes N°19, p.3717–3734, 2005.
- [75] P. Calanca, et al., « *L'évapotranspiration de référence et son application en agrométéorologie* ». Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zurich. Recherche Agronomique Suisse 2 (4), p.76–183, 2011.
- [76] H. F. Blaney, « Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data », United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, p.48, 1950.
- [77] T. Marion, « *Storm Water Management Model* », User's Manuel, 2010.
- [78] C. Sidali, « *Modélisation d'un réseau d'assainissement unitaire Via logiciel EPA-SWMM05* », cas du collecteur OUED OUCHAIAH. ENP 10, Avenue Hassen Badi, BP.186 El Harrach, ALGER, 2013.
- [79] S. Elga, et al., « Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions », Journal of Hydrology 529, p.62–81, 2015. [En ligne]. Disponible: 10.1016/j.jhydrol.2015.06.028.
- [80] M. W. Frank et al., « *Fluid Mechanics* », 9th Éd, McGraw-Hill Education, 2020.
- [81] J. H. Robert J. et al., « *Hydraulic Engineering: Fundamental Concepts* », 4th Éd. Pearson College Div, 2009.
- [82] R. Gilles et al., « *Guide de gestion des eaux pluviales* ». Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain. Avec la participation de : Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, Québec, 2003.

- [83] E. R. Pianka, « *Exponential population growth* », The human overpopulation crisis, 2007.
- [84] F. Brière, « *Distribution et collecte des eaux* », troisième édition. Presse internationales Polytechnique, Canada, Juin 2012.
- [85] IHSI, « *Population totale de 18 ans et plus, ménages et densité* », p.131, 2015.
- [86] J. Tribut, « Détermination du débit de pointe à prendre en compte pour la desserte en eau potable de petits groupements de foyers ». TSM, pp.305-316, octobre 1969.
- [87] K. P. Murphy, « *Probabilistic Modeling and Inference* », the MIT Press, 2012.
- [88] E. Carl « *Statistical Machine Learning* » A Probabilistic Perspective, MIT Press, 2006.
- [89] C. KAIHATSU CO, « *Rapport de l'étude préparatoire du projet de rétablissement du système d'approvisionnement en eau pour la reconstruction de la ville de Leogane en Haïti* », LTD, Agence Japonaise de Coopération International (JICA), République d'Haïti Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement, Mars 2014.
- [90] Observatoire National de l'Emploi et de la Formation Professionnelle (ONEF), « Compte d'exploitation d'un hectare de maïs », Études sur les créneaux porteurs, Burkina Faso, p. 78. juin 2007.
- [91] Gouvernement du Québec, ministère de l'Environnement, Directive 004, p. 6.1.7. octobre 1989.
- [92] W. Matrix, «High Efficiency Toilets 3 L/Flush ». [En ligne]. Disponible : <http://www.watermatrix.com/products.php> (consulté le 1 janvier 2024), 2010.
- [93] L. Rossi et al., Journal of Environmental Management, vol. 90, p. 1909–1917, 2009.
- [94] R. Franceys, « Guide to Development of Onsite Sanitation », World Health Organization, Geneva, 1992.
- [95] P. Blunier et al., « *Quantification des boues de vidange* », Exemple de la ville de Ouahigouya, Burkina Faso, p. 3-4, 2004.
- [96] F. Gautier et al., « *Le contrôle de gestion des projets : estimation, coûténance et analyse des risques* », Éd. Pearson - Village Mondial, Librairie Eyrolles - Paris 5^e. p. 236, novembre 2006.

- [97] W. Fabrycky et al., « *Life-cycle Cost and Economic Analysis Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering* ». Éd. Prentice Hall, l'Université du Michigan, 1991.
- [98] B. Romain et al., « *Prise en compte des émissions de gaz à effet de serre dans les études d'impact* », Guide méthodologique, Éd. Service de l'économie verte et solidaire commissariat général au développement durable. © Ministère de la Transition écologique/Terra, octobre 2022.
- [99] M. Alain , « *Impacts et enjeux liés aux changements climatiques en matière de gestion des eaux en milieu urbain* », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 2005. [En ligne]. DOI: <https://doi.org/10.4000/vertigo.1931>.
- [100] M. A. Danilia, « *Institut Haïtien De Statistique Et D'informatique* », Population totale de 18 ans et plus, ménages et densité, Bibliothèque Nationale. p. 37, Mars 2015.
- [101] V. Marc-Donald, « *Esquisse de Plan de gestion du Parc National Historique Citadelle/Sans-Souci/Ramiers* », (PNH-CSSR), Mairie de Milot, 2017.
- [102] J. Gonel, « *Étude du potentiel des eaux de surface à Haïti pour répondre aux problèmes de pénurie d'eau potable* », Université du Québec INRS-ETE, 2006.
- [103] B. Pascale et al., « *Analyse et modélisation du changement climatique* » 2^o édition du Livre blanc Escrime. Société Météorologique de France; Météo-France, pp.79, 2009.
- [104] US EPA. Environmental Aspects. August 7, 2015 [En ligne]. Disponible : http://www.epa.gov/sectors/sectorinfo/sectorprofiles/shipbuilding/module_05.pdf.
- [105] <https://www.canada.ca/fr/emploi-developpement-social/programmes/programme-2030/eau-propre.html>.
- [106] « *Valorisation des boues* », dans, veoliawatertechnologies, 15 janvier 2024. [En ligne]. Disponible : www.veoliawatertechnologies.fr/fr/applications/traitement-des-boues.
- [107] « *Gestion des eaux usées et développement durable* », dans greenfacts, 16 janvier 2024. [En ligne]. Disponible : <https://www.greenfacts.org/fr/gestion-eaux-usees/index.htm>.
- [108] B. Mélodie, « *La gestion des boues des stations d'épurations* », Ministère de l'Europe et des affaires Étrangères. pS-Eau, 2020.

ANNEXES

ANNEXE – A

Annexe-1-1 : Indice d'aridité annuel d'Emmanuel. De MARTONNE

Valeur de I	Type de climat
0 – 5	Hyper aride
5 – 10	Aride
10 – 20	Semi-aride
20 – 30	Semi-humide
30 – 40	Humide
40 – 55	Hyper humide

Annexe-1-2 : Gamme usuelle de valeurs pour le coefficient de ruissellement en fonction du type d'occupation du sol (adapté de ASCE/WEF, 1992)

Types d'occupation du sol	Coefficient de ruissellement
Commercial	
Centre vile	0.70 à 0.95
Banlieue	0.50 à 0.70
Résidentielle	
Maisons de banlieue	0.25 à 0.40
Maisons détachées	0.30 à 0.50
Unités jumelées	0.40 à 0.60
Maisons de ville	0.60 à 0.75
Blocs appartement	0.50 à 0.70
Industrielle	
Légère	0.50 à 0.80
Lourde	0.60 à 0.90
Autres	
Parcs, cimetières	0.10 à 0.25
Terrains de jeux	0.20 à 0.35
Champs	0.10 à 0.30

Annexe-1-3: Coefficients de régression de Montana de Québec

Pour une durée de 5 minutes à 1heure						
Coefficient de régression	Récurrance					
	2ans	5ans	10ans	25ans	50ans	100ans
a	734.0396	1000.4820	1 206.8776	1309.0436	1 346.4169	1 359.5606
b	4.80	5.50	6.10	5.70	5.10	4.30
c	0.7899	0.7938	0.7990	0.7774	0.7569	0.7341
Pour une durée 1 heure jusqu'à 24 heures						
Coefficient de régression	Récurrance					
	2ans	5ans	10ans	25ans	50ans	100ans
a	447.4998	622.4614	782.6589	1039.7140	1289.1977	1695.3524
b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	3.70
c	0.6912	0.7011	0.7164	0.7396	0.7587	0.7878

Source: SCHUELER, T. Technical Support for the Bay-Wide Runoff Reduction Method, Baltimore, Chesapeake Stormwater Network, 2008. Ville de Québec.

Annexe - 1- 4 : Coefficient Climatique

Le Coefficient Climatique					
Les valeurs du coefficient climatique k en fonction de la température moyenne					
t = température en degré centigrade					
t	k	t	k	t	k
+2	0.30	+14	0.69	+26	1.05
+3	0.34	+15	0.71	+27	1.08
+4	0.37	+16	0.74	+28	1.11
+5	0.40	+17	0.77	+29	1.14
+6	0.43	+18	0.80	+30	1.17
+7	0.46	+19	0.83	+31	1.20
+8	0.49	+20	0.86	+32	1.23
+9	0.52	+21	0.89	+33	1.26
+10	0.55	+22	0.92	+34	1.30
+11	0.58	+23	0.95	+35	1.33
+12	0.61	+24	0.99	+36	1.36
+13	0.64	+25	1.02	+37	1.39

Annexe -1- 6: Dotation de consommation domestique de la DINEPA

Critères pour la dotation domestique	
Zone	dotation domestique
Faible densité ou haut standing	100litres/personne/jour
Moyenne densité ou moyen standing	70litres/personne/jour
Forte densité ou bas standing	50litres/personne/jour

Source : JICA, Mars 2014

Annexe -1- 7: Facteurs de pointe annuelle pour les débits de consommation d'eau totale

Population	Facteurs de Pointe		
	Journalier maximal de l'année	Horaire maximal de l'année	Horaire minimal de l'année
Moins de 500	3.00	4.50	0.40
500 – 1 000	2.75	4.13	0.40
1 001 – 2 000	2.50	3.75	0.45
2 001 – 3 000	2.25	3.38	0.45
3 001 – 10 000	2.00	3.00	0.50
10 000 – 25 000	1.90	2.85	0.60
25 001 – 50 000	1.80	2.70	0.65
50 001 – 75 000	1.75	2.62	0.65
75 001 – 150 000	1.65	2.48	0.70
Plus de 150 000	1.50	2.25	0.80

Source: Ontario Environment Ministry, Guidelines for the Design of Water Storage Facilities, Water Distribution Systems, Sanitary Sewage and Storm Sewers, mai 1979, p. A-1

ANNEXE – B : Calcul de l'évapotranspiration

Annexe-2-1 : Valeurs du coefficient climatique k en fonction de la température moyenne, du pourcentage d'éclairement et de l'évapotranspiration mensuelle pour l'année 2024

Pour $t = 27.5^{\circ}\text{C}$

$$(28-27) (1.11-1.08) = (28-27.5) (1.11-k)$$

$$0.03 \ 0.5 (1.1-k)$$

$$0.03 = 0.55-0.5k$$

$$k = 1.05$$

$$p = 0.258$$

$$E = 1.05*(8.13 + 0.46 *27.5)*0.258$$

$$E = 5.63 \text{ mm/j} *30.42 \text{ j}$$

$$E = 171.30 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 27.8^{\circ}\text{C}$

$$(28-27) (1.11-1.08) = (28-27.8) (1.11-k)$$

$$k = 0.96$$

$$p = 0.26$$

$$E = 0.96*(8.13+0.46 *27.8)*0.26$$

$$E = 5.22 \text{ mm/j} *30.42 \text{ j}$$

$$E = 158.80 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 28.3^{\circ}\text{C}$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.3) (1.14-k)$$

$$k = 1.08$$

$$p = 0.27$$

$$E = 1.08*(8.13+0.46*28.3)*0.27$$

$$E = 6.17 \text{ mm/j}$$

$$E = 6.17 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 187.70 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 28.9^{\circ}\text{C}$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.9) (1.14-k)$$

$$k = 0.84$$

$$p = 0.28$$

$$E = 0.84 * (8.13 + 0.46 * 28.9) * 0.28$$

$$E = 8.82 \text{ mm/j}$$

$$E = 5.04 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 153.30 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 29.9^\circ\text{C}$$

$$(30-29) (1.17-1.14) = (30-29.9) (1.17-k)$$

$$k = 0.87$$

$$p = 0.29$$

$$E = 0.87 * (8.13 + 0.46 * 29.9) * 0.27$$

$$E = 5.14 \text{ mm/j}$$

$$E = 5.14 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 156.40 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 32.1^\circ\text{C}$$

$$(33-32) (1.26-1.23) = (33-32.1) (1.26-k)$$

$$k = 1.23$$

$$p = 0.298$$

$$E = 1.23 * (8.13 + 0.46 * 32.1) * 0.298$$

$$E = 8.39 \text{ mm/j}$$

$$E = 8.39 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 187.70 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 31.7^\circ\text{C}$$

$$(32-31) (1.23-1.20) = (32-31.7) (1.23-k)$$

$$k = 1.13$$

$$p = 0.298$$

$$E = 1.13 * (8.13 + 0.46 * 31.7) * 0.298$$

$$E = 7.65 \text{ mm/j}$$

$$E = 7.65 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 232.70 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 31.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$(32-31) (1.23-1.20) = (32-31.3) (1.23-k)$$

$$k = 1.18$$

$$p = 0.288$$

$$E = 1.18 * (8.13 + 0.46 * 31.3) * 0.288$$

$$E = 7.66 \text{ mm/j}$$

$$E = 7.66 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 233 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 31.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$(32-31) (1.23-1.20) = (32-31.1) (1.23-k)$$

$$k = 1.20$$

$$p = 0.28$$

$$E = 1.20 * (8.13 + 0.46 * 31.1) * 0.28$$

$$E = 7.54 \text{ mm/j}$$

$$E = 7.54 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 229.40 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 29.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$(30-29) (1.17-1.14) = (30-29.6) (1.17-k)$$

$$k = 1.1$$

$$p = 0.258$$

$$E = 1.1 * (8.13 + 0.46 * 29.6) * 0.258$$

$$E = 6.17 \text{ mm/j}$$

$$E = 6.17 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 187.70 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 28.9^{\circ}\text{C}$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.9) (1.14-k)$$

$$k = 0.84$$

$$p = 0.248$$

$$E = 0.84 * (8.13 + 0.46 * 28.9) * 0.248$$

$$E = 4.50 \text{ mm/j}$$

$$E = 4.50 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 135.80 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 28.1 \text{ }^\circ\text{C}$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.1) (1.14-k)$$

$$k = 1.11$$

$$p = 0.25$$

$$E = 1.11 * (8.13 + 0.46 * 28.1) * 0.25$$

$$E = 5.84 \text{ mm/j}$$

$$E = 5.84 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 177.70 \text{ mm/mois}$$

Annexe-2-2 : Valeurs du coefficient climatique k en fonction de la température moyenne et de l'évapotranspiration mensuelle pour l'année 2030

Pour $t = 28.7^{\circ}\text{C}$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.7) (1.14-k)$$

$$k = 1.04$$

$$E = 1.04 * (8.13 + 0.46 * 28.7) * 0.258$$

$$E = 5.72 \text{ mm/j}$$

$$E = 5.72 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 174 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 28.6^{\circ}\text{C}$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.6) (1.14-k)$$

$$k = 1.07$$

$$E = 1.07 * (8.13 + 0.46 * 28.6) * 0.26$$

$$E = 5.92 \text{ mm/j}$$

$$E = 5.92 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 180 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 28.9^{\circ}\text{C}$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.9) (1.14-k)$$

$$k = 0.84$$

$$E = 0.84 * (8.13 + 0.46 * 28.9) * 0.27$$

$$E = 4.86 \text{ mm/j}$$

$$E = 4.86 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 148 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 30.3^{\circ}\text{C}$

$$(31-30) (1.20-1.17) = (31-30.3) (1.20-k)$$

$$k = 1.157$$

$$E = 1.157 * (8.13 + 0.46 * 30.3) * 0.28$$

$$E = 7.15 \text{ mm/j}$$

$$E = 7.15 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 217 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 30.7^\circ\text{C}$$

$$(31-30) (1.20-1.17) = (31-30.7) (1.20-k)$$

$$k = 1.1$$

$$E = 1.1*(8.13+0.46*30.7)*0.29$$

$$E = 7.10 \text{ mm/j}$$

$$E = 7.10 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 216 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 32.6^\circ\text{C}$$

$$(33-32) (1.26-1.23) = (33-32.6) (1.26-k)$$

$$k = 1.185$$

$$E = 1.185*(8.13+0.46*32.6)*0.298$$

$$E = 8.2 \text{ mm/j}$$

$$E = 8.2 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 248 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 32.5^\circ\text{C}$$

$$(33-32) (1.26-1.23) = (33-32.5) (1.26-k)$$

$$k = 1.2$$

$$E = 1.2*(8.13+0.46*32.5)*0.298$$

$$E = 8.3 \text{ mm/j}$$

$$E = 8.3 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 251 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 32.1^\circ\text{C}$$

$$(33-32) (1.26-1.23) = (33-32.1) (1.26-k)$$

$$k = 1.26$$

$$E = 1.26*(8.13+0.46*32.1)*0.288$$

$$E = 8.3 \text{ mm/j}$$

$$E = 8.3 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 253 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 32 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$k = 1.23$$

$$E = 1.23 \cdot (8.13 + 0.46 \cdot 32) \cdot 0.28$$

$$E = 7.7 \text{ mm/j}$$

$$E = 7.7 \text{ mm/j} \cdot 30.42 \text{ j}$$

$$E = 239 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 29.8 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$(30-29) (1.17-1.14) = (30-29.8) (1.17-k)$$

$$k = 1.02$$

$$E = 1.02 \cdot (8.13 + 0.46 \cdot 29.8) \cdot 0.258$$

$$E = 5.70 \text{ mm/j}$$

$$E = 5.70 \text{ mm/j} \cdot 30.42 \text{ j}$$

$$E = 175 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 29.2 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$(30-29) (1.17-1.14) = (30-29.2) (1.17-k)$$

$$k = 1.133$$

$$p = 0.248$$

$$E = 1.133 \cdot (8.13 + 0.46 \cdot 29.2) \cdot 0.248$$

$$E = 6.10 \text{ mm/j}$$

$$E = 6.10 \text{ mm/j} \cdot 30.42 \text{ j}$$

$$E = 184 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 28.8 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.8) (1.14-k)$$

$$k = 0.99$$

$$p = 0.25$$

$$E = 0.99 \cdot (8.13 + 0.46 \cdot 28.8) \cdot 0.25$$

$$E = 5.30 \text{ mm/j}$$

$$E = 5.30 \text{ mm/j} \cdot 30.42 \text{ j}$$

$$E = 161 \text{ mm/mois}$$

Annexe-2-3 : Valeurs du coefficient climatique k en fonction de la température moyenne et de l'évapotranspiration mensuelle pour l'année 2050

Les valeurs du coefficient climatique k en fonction de la température moyenne :

Pour $t = 28.8^{\circ}\text{C}$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.8) (1.14-k)$$

$$k = 0.99$$

$$E = 0.99*(8.13+0.46*28.8)*0.258$$

$$E = 5.5 \text{ mm/j}$$

$$E = 5.5 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 166 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 28.7^{\circ}\text{C}$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.7) (1.14-k)$$

$$k = 1.04$$

$$E = 1.04*(8.13+0.46*28.7)*0.26$$

$$E = 5.77 \text{ mm/j}$$

$$E = 5.77 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 175 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 30.1^{\circ}\text{C}$

$$(31-30) (1.20-1.17) = (31-30.1) (1.20-k)$$

$$k = 1.16$$

$$E = 1.167*(8.13+0.46*30.1)*0.27$$

$$E = 6.9 \text{ mm/j}$$

$$E = 6.9 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 202 \text{ mm/mois}$$

Pour $t = 30.8^{\circ}\text{C}$

$$(31-30) (1.20-1.17) = (31-30.8) (1.20-k)$$

$$k = 1.05$$

$$E = 1.05*(8.13+0.46*30.8)*0.28$$

$$E = 6.6 \text{ mm/j}$$

$$E = 6.6 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 199 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 31.8^\circ\text{C}$$

$$(32-31) (1.23-1.20) = (32-31.8) (1.23-k)$$

$$k = 1.08$$

$$E = 1.08 * (8.13 + 0.46 * 31.8) * 0.29$$

$$E = 7.13 \text{ mm/j}$$

$$E = 7.13 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 217 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 32.8^\circ\text{C}$$

$$(33-32) (1.26-1.23) = (33-32.8) (1.26-k)$$

$$k = 1.11$$

$$E = 1.11 * (8.13 + 0.46 * 32.8) * 0.298$$

$$E = 7.7 \text{ mm/j}$$

$$E = 7.7 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 234 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 32.7^\circ\text{C}$$

$$(33-32) (1.26-1.23) = (33-32.7) (1.26-k)$$

$$k = 1.16$$

$$E = 1.16 * (8.13 + 0.46 * 32.7) * 0.298$$

$$E = 8.01 \text{ mm/j}$$

$$E = 8.01 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 244 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 32.3^\circ\text{C}$$

$$(33-32) (1.26-1.23) = (33-32.3) (1.26-k)$$

$$k = 1.22$$

$$E = 1.22 * (8.13 + 0.46 * 32.3) * 0.288$$

$$E = 8.10 \text{ mm/j}$$

$$E = 8.10 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 246 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 32.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$k = 1.26$$

$$E = 1.26 * (8.13 + 0.46 * 32.1) * 0.28$$

$$E = 8.10 \text{ mm/mois}$$

$$E = 8.10 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 246 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 31.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$(32-31) (1.23-1.20) = (32-31.6) (1.23-k)$$

$$k = 1.155$$

$$E = 1.155 * (8.13 + 0.46 * 31.6) * 0.258$$

$$E = 6.8 \text{ mm/j}$$

$$E = 6.8 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 205 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 29.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$(30-29) (1.17-1.14) = (30-29.5) (1.17-k)$$

$$k = 1.11$$

$$E = 1.11 * (8.13 + 0.46 * 29.5) * 0.248$$

$$E = 5.97 \text{ mm/j}$$

$$E = 5.97 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 182 \text{ mm/mois}$$

$$\text{Pour } t = 28.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$(29-28) (1.14-1.11) = (29-28.9) (1.14-k)$$

$$k = 0.84$$

$$E = 0.84 * (8.13 + 0.46 * 28.9) * 0.25$$

$$E = 4.50 \text{ mm/j}$$

$$E = 4.50 \text{ mm/j} * 30.42 \text{ j}$$

$$E = 137 \text{ mm/mois}$$

ANNEXE – C : Résultat de la simulation

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.1 (Build 5.1.015)

Projet de gestion des eaux pluviales de la Cite du Savoir

WARNING 09: time series interval greater than recording interval for Rain Gage Pluvio1

WARNING 04: minimum elevation drop used for Conduit C4

NOTE: The summary statistics displayed in this report are based on results found at every computational time step, not just on results from each reporting time step.

Analysis Options

Flow Units CMS

Process Models:

Rainfall/Runoff Yes

RDII No

Snowmelt No

Groundwater No

Flow Routing Yes

Ponding Allowed No

Water Quality No

Infiltration Method Horton

Flow Routing Method Dynwave

Surcharge Method Exrant

Starting Date 04/14/2024 00:00:00

Ending Date 04/14/2024 12:00:00

Antecedent Dry Days 0.0

Report Time Step 00:15:00

Wet Time Step 00:05:00
 Dry Time Step 01:00:00
 Routing Time Step 60.00 sec
 Variable Time Step YES
 Maximum Trials 8
 Number of Threads 1
 Head Tolerance 0.001500 m

*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Total Precipitation	0.000	0.000
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	0.000	0.000
Surface Runoff	0.000	0.000
Final Storage	0.000	0.000
Continuity Error (%)	0.000	

*****	Volume	Volume
Flow Routing Continuity	hectare-m	10 ⁶ ltr
*****	-----	-----
Dry Weather Inflow	0.000	0.000
Wet Weather Inflow	0.000	0.000
Groundwater Inflow	0.000	0.000
RDII Inflow	0.000	0.000
External Inflow	0.000	0.000
External Outflow	0.004	0.044

Flooding Loss	0.000	0.000
Evaporation Loss	0.000	0.000
Exfiltration Loss	0.000	0.000
Initial Stored Volume	0.008	0.082
Final Stored Volume	0.000	0.002
Continuity Error (%)	44.446	

Highest Continuity Errors

Node J2 (-238.03%)

Node J4 (-199.42%)

Time-Step Critical Elements

None

Highest Flow Instability Indexes

All links are stable.

Routing Time Step Summary

Minimum Time Step : 59.50 sec

Average Time Step : 59.92 sec

Maximum Time Step : 60.00 sec

Percent in Steady State	:	0.00
Average Iterations per Step	:	2.00
Percent Not Converging	:	0.00
Time Step Frequencies	:	
60.000 - 23.031 sec	:	100.00 %
23.031 - 8.841 sec	:	0.00 %
8.841 - 3.393 sec	:	0.00 %
3.393 - 1.303 sec	:	0.00 %
1.303 - 0.500 sec	:	0.00 %

Summary Results							
Topic: Node Depth		Click a column header to sort the column.					
Node	Type	Average Depth Meters	Maximum Depth Meters	Maximum HGL Meters	Day of Maximum Depth	Hour of Maximum Depth	Maximum Reported Depth Meters
J1	JUNCTION	0.00	0.11	15.11	0	00:00	0.02
J2	JUNCTION	0.00	0.09	12.09	0	00:00	0.04
J3	JUNCTION	0.00	0.12	11.12	0	00:00	0.02
J4	JUNCTION	0.06	0.22	9.22	0	00:06	0.21
Out1	OUTFALL	0.01	0.08	9.08	0	00:07	0.07

Summary Results							
Topic: Link Flow		Click a column header to sort the column.					
Link	Type	Maximum [Flow] CMS	Day of Maximum Flow	Hour of Maximum Flow	Maximum [Velocity] m/sec	Max / Full Flow	Max / Full Depth
C1	CONDUIT	0.013	0	00:00	1.06	0.85	0.65
C2	CONDUIT	0.017	0	00:00	0.50	0.17	0.49
C3	CONDUIT	0.008	0	00:00	0.63	1.00	1.00
C4	CONDUIT	0.013	0	00:07	0.30	6.19	0.39

Summary Results					
Topic: Conduit Surcharge		Click a column header to sort the column.			
Conduit	Hours Both Ends Full	Hours Upstream Full	Hours Dnstream Full	Hours Above Normal Flow	Hours Capacity Limited
C3	0.01	0.01	1.05	0.01	0.01
C4	0.01	0.01	0.01	1.42	0.01

Topic: Link Flow		Click a column header to sort the column.					
Link	Type	Maximum [Flow] CMS	Day of Maximum Flow	Hour of Maximum Flow	Maximum [Velocity] m/sec	Max / Full Flow	Max / Full Depth
C1	CONDUIT	0.013	0	00:00	1.06	0.85	0.65
C2	CONDUIT	0.017	0	00:00	0.50	0.17	0.49
C3	CONDUIT	0.008	0	00:00	0.63	1.00	1.00
C4	CONDUIT	0.013	0	00:07	0.30	6.19	0.39