

Outil vers un plan d'adaptation aux changements climatiques : priorisation du ruissellement urbain

MÉTHODE



OBVMR

organisme de bassin versant
MATAPÉDIA-RESTIGOUCHE
watershed organization

1	Construction d'un modèle	3
1.1	Définition du modèle	
1.2	Choix des modélisations à réaliser	
1.3	Choix des paramètres physiques et numériques	
2	Modèles climatiques	11
2.1	Référence de modélisation	
2.2	Analyse des périodes de référence	
2.3	Pertinence des séries temporelles	
3	Analyse et rendus	15
3.1	Résultats étudiés	
3.2	Réduction des incertitudes	
3.3	Accessibilité de l'étude	

OUTIL DE PRIORISATION

PRÉLIMINAIRE

Introduction

L'étude du ruissellement urbain dans la vallée de la Matapédia est réalisée par l'OBVMR pour le projet Rés-Alliance en collaboration avec la firme LaSalleNHC. La Rés-Alliance, coordonnée par le Regroupement des Organismes de Bassins Versants du Québec (ROBVQ), a pour objectif de promouvoir des méthodes d'adaptation aux nouvelles réalités climatiques qui affectent la ressource en eau. La démarche des OBV du Québec est alors de doter les territoires de plans d'adaptation aux changements climatiques à venir.

L'OBVMR s'est donné pour objectif de cibler les vulnérabilités face aux changements climatiques du territoire, en particulier concernant la production de matière en suspension (MES) dans les milieux aquatiques. Pour sept municipalités, les comportements hydrologiques des bassins urbains sont donc analysés en climat historique et futur. Celles-ci sont : Amqui, Causapsca, Lac au Saumon, Matapédia, Sayabec, Sainte-Florence et Val Brillant.

Le présent rapport décrit la méthodologie physique suivie par l'OBVMR pour la réalisation de cette étude et s'adresse aux acteurs désireux de reproduire la méthode. Pour chaque municipalité étudiée, une carte dynamique ainsi qu'un récapitulatif des résultats obtenus est également produit à l'intention des élus et citoyens.

OUTIL DE PRIORISATION

PRÉLIMINAIRE

1. Construction d'un modèle

L'objectif étant la mise à disposition d'un outil d'aide à la décision pour l'élaboration d'un plan de gestion saine des eaux de pluie, il s'agit de savoir cibler avec précision les zones à risques en terme de production de particules fines. Pour ce faire, le recours au code de calcul SWMM 5.1, développé par l'EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*) a semblé le plus évident. Puissant outil de modélisation des écoulements environnementaux optimisé pour l'étude des pratiques de *Low Impact Development*¹, celui-ci est l'outil parfait pour la réalisation de cette étude.

1.1 Définition du modèle

Le logiciel utilisé consiste en un *code de calcul* uniquement, qui n'est pas un SIG. Son interface graphique rudimentaire n'est qu'un afficheur/interpréteur qui permet de manipuler les variables, afficher et trier les résultats. Celui-ci est donc différent de ses cousins payants (PCSWMM par exemple), basés sur le même code, qui sont souvent des logiciels d'édition. SWMM 5.1 résout des problèmes à une dimension uniquement. Les paramètres qui lui sont fournis peuvent représenter un problème multidimensionnel, mais la simulation est effectuée en 1D : l'agencement spatial n'est pas pris en compte. Cela peut être comparé au fonctionnement d'un système électrique ; l'important est de brancher les fils au bon endroit qu'importe l'emplacement de l'ampoule.

Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est assez analogue à la méthode basique de calcul de ruissellement (via

une feuille de calcul). Connaissant en entrée les données caractérisant un bassin hydrologique, et grâce à quelques paramètres clés, il est possible de calculer le débit à l'exutoire du bassin. Seulement ici le code tient compte de l'effet d'hystérésis du système réel (mémoire des événements passés) : l'évolution temporelle de la perméabilité d'un sol saturé par exemple. Ainsi, si le recours à un tel code de calcul peut sembler difficile au premier abord, la précision de la modélisation et la fiabilité des résultats le justifie.

Le calcul du ruissellement généré lors d'une pluie est fait **séparément** sur chacun des bassins versants délimités *géomatiquement*. Cela ne pose pas de problème car logiquement toute la pluie entrant sur un bassin n'en sort qu'à l'exutoire : il n'y a pas d'interaction entre les bassins réels (*i.e.* les bassins hydrologiques).

Un bassin versant est caractérisé par son pourcen-

1. Aménagement du territoire réfléchi pour la gestion optimale des eaux de ruissellement.

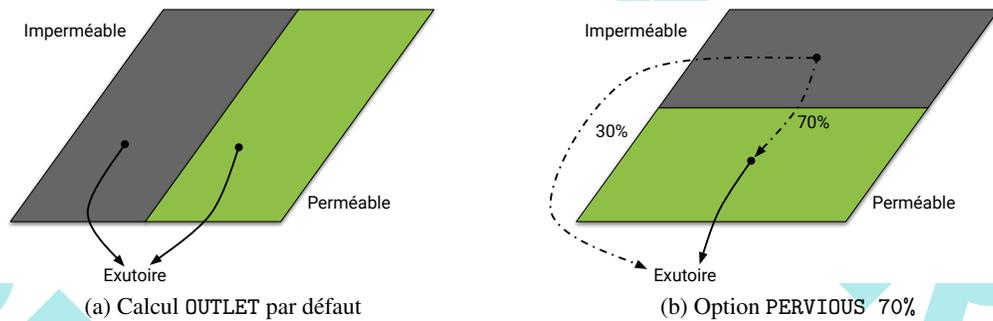


Figure 1.1 – Méthode de calcul de base de SWMM 5.1

tage de surface perméable et les paramètres physiques qui caractérisent ces surfaces (Coefficient de MANNING n , pente moyenne s , largeur d'écoulement ℓ , surface totale S). Le calcul du ruissellement est effectué séparément sur chaque type de surface, puis sommé à l'exutoire (Figure 1.1a). Il est assez clair que cela peut poser problème puisqu'il est admis qu'une grande part de l'écoulement sur surface perméable passe par les surfaces imperméables avant de se rendre à l'exutoire et inversement. Il est cependant possible de diriger l'écoulement de l'un des deux types de surface vers un autre (Figure 1.1b).

REMARQUE : Dans la modélisation, l'agencement spatial n'a pas d'importance car, par défaut il n'y a pas d'interaction entre les surfaces. Il s'agit donc de porter une attention toute particulière au choix de nos bassins, car pour une bonne rigueur physique, le « chemin » de l'écoulement proposé doit avoir un sens physique. ■

On comprend ainsi par ces quelques considérations, l'importance de caractériser précisément les sols pour que l'étude reflète la réalité des municipalités étudiées. C'est l'utilisation de l'outil géomatique qui permet une telle caractérisation.

Définition géomatique de la zone d'étude

La modélisation des performances hydrologiques d'un territoire passant nécessairement par la caractérisation physique de la zone étudiée, et puisque les conditions de ruissellement varient principalement selon le type de couverture du sol étudié (Pavé ou Pelouse par exemple) et selon la pente, il est nécessaire d'en faire l'inventaire exhaustif.

Dans le cadre de ce projet, un important travail de caractérisation géomatique a donc été réalisé dans ce but.

Raisonnement par Aire de Drainage

Dans chaque municipalité sont définies des Aires de Drainage (AD), dont le découpage est régi par des critères topographiques et hydrauliques. Chacune est définie comme un bassin versant artificiel à petite échelle : toute quantité d'eau entrant dans une AD en ressort en un unique exutoire, qui peut être naturel ou bien une sortie du réseau de drainage pluvial.

Ces AD permettent une approche hydrologique physiquement correcte puisqu'elles se comportent comme des bassins versants. Alors l'analyse du comportement de chacune de ces entités peut être faite indépendamment. L'outil géomatique permet ensuite d'améliorer la caractérisation des aires urbaines d'un point de vue physique (couverture du sol) et informatif (utilisation du sol). Plusieurs types de surface distincts sont définis afin d'en connaître la composition et donc pouvoir définir des paramètres physiques cohérents pour le modèle SWMM.

Type de surface

La distinction des différents types de surface s'est faite en cinq catégories, ayant chacune des propriétés physiques propres qui impactent différemment le ruissellement :

- Toits
- Asphalte
- Gravier
- Pelouse
- Boisé

Un critère pertinent est ajouté dans cette distinction ; la pente locale, qui peut être **Faible** ($< 10\%$)

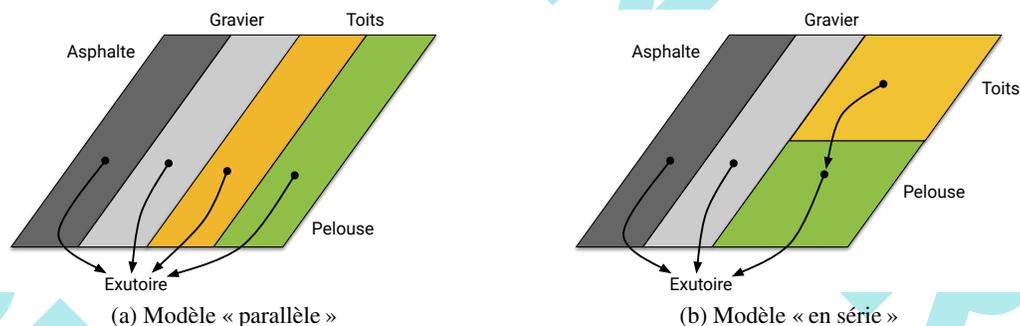


Figure 1.2 – Méthode de calcul étendue pour la caractérisation des types de surface.

ou **Forte** (> 10%). Cela permet d'ajuster les valeurs de certains paramètres physiques (le coefficient de MANNING en particulier), principalement pour les surfaces très imperméables : les Toits, l'Asphalte et le Gravier.

REMARQUE : Contrairement aux AD les surfaces définies par ce procédé ne sont pas indépendantes hydrologiquement parlant. ■

Utilisation du sol

Tout comme pour le détail des surfaces, on sépare l'utilisation du sol en plusieurs catégories :

- Agroforestier
- Commercial
- Industriel
- Institution
- MTQ
- Municipal
- Résidentiel
- Voie Ferrée
- Voirie

Pour concilier toutes ces informations et attribuer les caractéristiques physiques propre à chaque utilisation de sol définie ci dessus, plusieurs couches géomatiques sont réalisées, dont la fusion fournit une combinaison « AD / Type de surface / Utilisation du sol » unique.

REMARQUE : Les critères d'utilisation de sol n'ont qu'une vocation d'urbanisme et absolument aucune signification physique. ■

Application à la présente étude

L'inventaire des types de surface ayant été réalisé, le modèle est doté d'une bonne connaissance des para-

mètres physiques régissant les écoulements pluviaux. Ces paramètres sont explicités dans la section 1.3.

Désirant ici connaître la part de ruissellement produite par chaque type de surface (Asphalte, Boisé etc.) et chaque secteur d'activité (Résidentiel, Commercial, Industriel etc.) la méthode « de base » présentée précédemment doit être étendue, car la caractérisation par bassins hydrologiques n'est pas assez précise pour fournir l'information souhaitée. En effet, puisque les bassins définis numériquement sont traités séparément, il s'agit de créer artificiellement des sous-bassins pour chaque type de surface, afin de sommer leurs débits à l'exutoire (Figure 1.2a). Alors, puisqu'il est possible de diriger l'eau d'un sous-bassin vers un exutoire ou dans un autre sous-bassin (Figure 1.2b), en partie ou totalement,² une modélisation très détaillée du système réel peut être réalisée.

REMARQUE : La redirection des eaux de ruissellement d'une surface sur une autre étant très long à réaliser manuellement sur l'ensemble du territoire étudié et manquant de précision en l'absence d'un calibrage suffisamment précis, il s'agira de réaliser des modèles « prototypes » très précis sur des superficies plus faibles, qui serviront à calibrer les interactions entre chaque type de surface et ajuster alors les résultats des modèles les plus grossiers. ■

Il s'agit donc de définir chaque utilisation de sol comme un sous-bassin qui lui même sera divisé en plusieurs types de surface. Cette façon de procéder permet d'obtenir des résultats pour chaque catégorie étudiée (Figure 1.3). Ces résultats sont ensuite

2. Consulter <https://swmm5.org/2013/08/05/runoff-routing-options-definition-in-swmm-5/> pour plus de précisions sur la méthode.

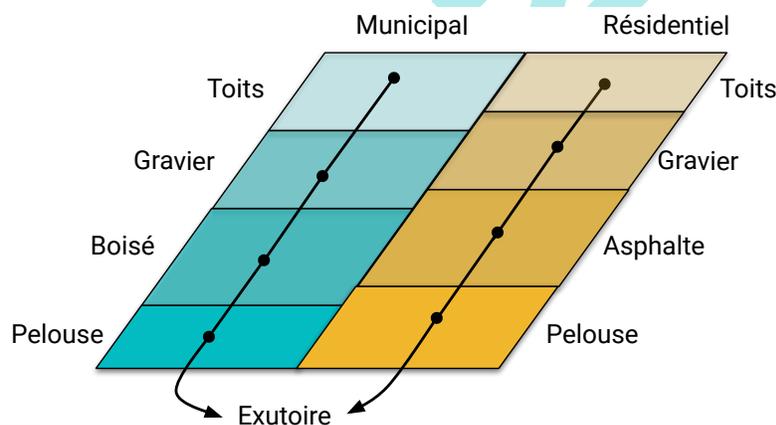


Figure 1.3 – Exemple de séparation des types de surface selon l'utilisation du sol.

sommés entre eux selon le schéma qui nous intéresse afin de connaître l'impact précis d'une combinaison donnée de bassins. Par exemple la quantité d'eau de ruissellement générée par les toits résidentiels dans une municipalité donnée.

Limites et ouvertures

La méthode de modélisation proposée ici souffre de plusieurs limites, que ce soit en raison de la taille du territoire étudié ou bien du manque de données mesurées *in situ*. Adaptable, cette méthode peut évidemment voir ces limites disparaître.

Limites sur la définition des AD

Selon la taille et les particularités géographiques et urbaines de chaque municipalité, un certain nombre d'AD est défini. Celles-ci sont de tailles et de formes très disparates. Il est donc admis que chaque aire de drainage démontre des propriétés suffisamment homogènes selon sa taille et ses caractéristiques. Plus les AD seront homogènes plus les résultats seront fidèles à la réalité.

Évaluation de la qualité des eaux

L'objectif principal de cette étude étant l'évaluation de l'impact des zones urbanisées dans les rejets de matières en suspension dans les milieux aquatiques, une modélisation de la qualité des eaux à l'exutoire peut être réalisée avec ce modèle. Il s'agit

de modéliser la qualité de l'eau en sortie de chaque « polygone » correspondant à un type de surface ou une utilisation de sol donnée. Le but étant de quantifier l'apport de MES par qualification entrée/sortie : il pleut sur *telle surface*, ce qui génère *telle quantité de ruissellement*, et transporte *telle masse de particules fines*.

Si ces résultats ne peuvent être utilisés comme des données « fiables » au sens d'un dimensionnement (en particulier en l'absence de calibrage par des mesures réelles), elles permettent toutefois de cerner avec une certaine précision la participation relative de chaque type de surface et utilisation du sol pour cibler au mieux les zones problématiques.

Si aucun calibrage n'est réalisé, des paramètres fixes de qualité des eaux (c'est à dire de production de MES) pourront être utilisés mais avec précaution. Si un calibrage a été réalisé (quantification de la masse de particules fines produite par chaque type d'utilisation de sol) celui ci pourra être utilisé. Dans le cas présent, aucun calibrage n'ayant été fait il a été jugé plus pertinent de se concentrer uniquement sur l'analyse des résultats hydrologiques, qui sont déjà de bons indicateurs de l'impact relatif de chaque type de surface. Le choix des paramètres analysés est précisé dans la section 3.1.

1.2 Choix des modélisations à réaliser

D'après les considérations de la section précédente, émerge un protocole optimisant à la fois la durée de traitement et la précision des résultats.

Modélisation hydrologique grossière

Dans cette première caractérisation, les bassins hydrologiques réels de chaque municipalité sont utilisés pour caractériser chaque secteur dans son entièreté. Des paramètres moyens fournis par la littérature [4] décrivent les surfaces au sol (distinction **perméable/imperméable** uniquement). Ces bassins étant correctement définis, ils sont indépendants et les résultats obtenus sont analysés séparément. Cette caractérisation permet une première estimation de la différence entre les débits de ruissellement historiques et les projections à la fin du siècle pour chaque bassin urbain. La compréhension des résultats obtenus permet alors de cibler en première approche certaines zones critiques et comprendre les mécanismes en jeu.

Si la modélisation de bassins « homogénéisés » est déconseillée par le *Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales* [4], il est essentiel de savoir cibler les zones prioritaires sur une telle superficie en se basant sur un modèle fiable, même si sa précision laisse à désirer. C'est pourquoi cette première caractérisation est nécessaire.

Modélisation selon le type de surface

Après une première caractérisation du ruissellement, et puisque l'étude porte sur la compréhension de l'impact de chaque secteur économique au sein des municipalités, il s'agit de s'intéresser au modèle détaillé construit à partir d'une analyse géomatique (voir 1.1). Chaque combinaison unique *Utilisation de sol / Type de surface* se voit attribuer un « polygone », identifié indûment à un bassin hydrologique dans le modèle. Les interactions n'étant alors pas modélisées, une correction doit cependant être appliquée pour coller au mieux à la réalité du système à l'étude. L'existence d'une modélisation hydrologique grossière permet de vérifier que ce nouveau modèle est fiable si les tendances de résultats concordent.

Modélisation hydrologique détaillée

Si la modélisation détaillée de la municipalité respectant l'agencement relatif des « polygones », c'est à dire les interactions entre chaque types de surface et utilisation de sol, est complexe, elle a déjà été réalisée pour plusieurs bassins versants dans la vallée. Puisque cette précision ne peut être atteinte pour toute la zone à l'étude il s'agit d'étendre les résultats de ces modélisations hydrologiques détaillées aux autres bassins afin de corriger les erreurs et approximations imposées par les choix de modélisation.

Une comparaison des résultats obtenus par les deux modèles (grossier et détaillé) sur un même bassin permet d'ajuster les valeurs des volumes d'eau générés via un facteur correctif et donc préciser les résultats à l'échelle de toute la zone d'étude.

REMARQUE : En l'absence de modèles suffisamment détaillés, la méthode de caractérisation simple peut être suffisante puisque tient déjà compte des caractéristiques physiques de chaque type de surface, et seules les interactions entre ces surfaces sont ignorées. ■

Personnalisation de la méthode

Le protocole décrit ici a été établi en accord avec la firme LaSalle|NHC à partir des données en possession de l'OBVMR. Il est évident que ce protocole ne se prête pas nécessairement à tous les cas d'étude, et peut même être considéré trop lourd selon la précision souhaitée. Heureusement, la documentation sur le sujet est abondante et des travaux de tous niveaux sur le sujet sont accessibles. En particulier le mémoire de maîtrise *Gestion des eaux pluviales : Qualité des eaux et contrôle en temps réel* (PARÉ-BOURQUE, 2008, [6]) permet non seulement de vérifier que le protocole proposé ici respecte les conditions de validité, puisque celui ci se base sur une méthode similaire, mais peut également permettre d'établir d'autres protocoles plus aisément applicables. Il est également intéressant de s'inspirer du très complet manuel d'utilisation du logiciel [3].

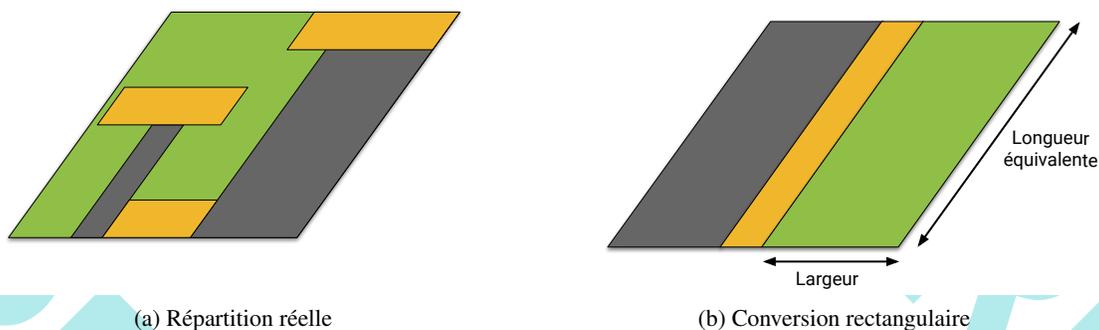


Figure 1.4 – Approximation rectangulaire des AD : choix de la largeur d'écoulement ℓ

1.3 Choix des paramètres physiques et numériques

Pour la simulations, les seuls paramètres fournis par l'analyse géomatique ne sont pas suffisants. Il faut définir un contexte physique cohérent et représentatif de la réalité. Les paramètres nécessaires à la modélisation **pour chaque polygone** sont répertoriés dans le tableau 1.1 (d'après *User's guide to SWMM 5* [3]). On distingue les paramètres systémiques (la donnée d'entrée) des paramètres physiques qui doivent être calibrés et/ou choisis avec précaution.

Superficie et répartition des surfaces

Par définition la superficie de chaque polygone est définie par le terrain. La part de zone imperméable est également très simple à définir puisque d'après le protocole (section 1.2) chaque polygone est assimilé à un sous-bassin, et donc la part de zone imperméable est 0% ou 100% selon le type de surface étudié (comme cela a déjà été expliqué, chaque polygone modélisé correspond à un type de surface et une utilisation de sol unique dans l'AD étudiée).

Largeur d'écoulement

La largeur d'écoulement (superficie divisée par longueur caractéristique) doit être définie car le code de calcul ne tient pas compte de l'agencement relatif des polygones ni de leur forme. Il faut donc traduire numériquement les caractéristiques topographiques du bassin étudié, et cette grandeur est un bon indicateur. Ces zones sont donc traduites comme des bassins équivalents rectangulaires, ce qui peut introduire de

grandes incertitudes car les surfaces réelles ne sont évidemment pas rectangulaires. D'où l'intérêt définir des AD les plus homogènes possibles. En effet, sous l'hypothèse d'une répartition des surfaces homogène (un quartier résidentiel par exemple), considérer que la longueur d'écoulement est la même pour toutes les surfaces semble cohérent (voir figure 1.4) puisque la distance maximale parcourue est sensiblement la même pour chaque type de surface. Dans cette étude, la largeur d'écoulement utilisée est telle que :

$$\ell = \sqrt{S} \quad (1.1)$$

avec

- ℓ , largeur d'écoulement (m)
- S , superficie de l'AD (m²)

REMARQUE : Le cas des toits est particulier car ils sont considérés ici comme une unique surface à l'échelle de chaque AD, ce qui est loin d'être la réalité. Il est possible de définir une largeur d'écoulement adaptée telle que $\ell = \frac{S}{L}$ où L est la longueur moyenne d'un toit (de l'ordre de 3 ou 4 mètres). Dans le cas présent, cela n'a pas été fait, car l'existence des modèles détaillés permet d'ajuster les résultats donnés par le modèle « grossier » et donc de corriger les éventuelles erreurs. ■

Pente

La pente est définie à l'échelle d'une AD. C'est une moyenne qui est souvent mesurée le long de che-

3. Le chemin d'écoulement doit être linéaire et suivre le moins possible les routes et zones imperméables. En effet, le chemin que prendra l'eau sera défini numériquement par la modélisation et non physiquement par la topographie.

min d'écoulement³. Elle se calcule par la formule simple :

$$s = \frac{S}{\ell} \cdot \frac{1}{\Delta z} \quad (1.2)$$

avec

- $\frac{S}{\ell}$, longueur d'écoulement (m)
- Δz , variation d'altitude dans l'AD (m)

Selon la variabilité de la pente au sein de l'AD (qui dépend de la superficie du bassin), l'erreur accumulée est plus ou moins grande. Privilégier des AD de petites taille permet donc de réduire cette incertitude.

Coefficient de MANNING

Ce coefficient noté n , décrit la rugosité des surfaces sur lesquelles l'eau ruisselle. Etant l'un des paramètres les plus classiques pour l'évaluation d'un écoulement sur une surface, celui ci peut être facilement trouvé dans la littérature. Puisque chaque polygone ne représente qu'un seul type de surface, il suffit de trouver la valeur correspondante (voir tableau 1.2).

Modélisation de l'infiltration

Le logiciel utilisé donne plusieurs alternatives pour la modélisation de l'infiltration dans les sols poreux. Ici, le modèle de HORTON est choisi principalement en raison de la profusion d'information disponibles dans la littérature. Voir par exemple les tables de paramètres dans *User's Manual : Water Quality Capture Optimization and Statistics Model*, [2], ou bien les recommandations du *Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales*.

Le modèle de HORTON est empirique et se comprend facilement : l'infiltration débute à un taux donné $f_{(0)}$ et décroît de façon exponentielle avec le temps. Après un temps, quand la saturation du sol atteint une certaine valeur seuil, le taux d'infiltration reste constant à la valeur f_c .

$$f_{(t)} = f_c + (f_{(0)} - f_c) \cdot e^{-\kappa \cdot t} \quad (1.3)$$

avec

- $f_{(t)}$, taux d'infiltration à l'instant t ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
- $f_{(0)}$, taux d'infiltration initial ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
- f_c , taux d'infiltration du sol saturé ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
- κ , temps caractéristique (h^{-1})

Évaporation

L'évaluation de l'évaporation est possible via SWMM. Les méthodes restent cependant très basiques, et la pertinence de la prise en compte de ce phénomène physique à l'échelle de précision souhaitée pour l'étude est contestable. L'évaporation n'a pas été modélisée dans cette étude, ayant été considérée négligeable, mais également en l'absence de relevés de température suffisants.

Transport de MES

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact du ruissellement sur les MES transportées, il peut être pertinent de modéliser ce phénomène directement. Comme cela a déjà été précisé ce n'est pas le choix fait ici, en raison d'un cruel manque de données de calibrage pour le transport des particules fines sur la zone étudiée. SWMM permet de modéliser ce transport en caractérisant l'accumulation de matière puis le lessivage. L'ouvrage *Gestion des eaux pluviales : Qualité des eaux et contrôle en temps réel* permet une première approche des techniques courantes et est donc une référence pertinente pour quiconque s'y intéresserait.

Stockage par dépression

Les surfaces étudiées ont par définition une topographie imparfaite et les dépressions locales modifient le débit en sortie de façon significative (retenues d'eau localisées qui induisent un retard de causalité plus élevé). Des dépressions locales arbitraires peuvent être introduites dans le modèle via le paramètre *Depression Storage*, noté D_{store} qui représente la profondeur moyenne des dépressions des surfaces perméables et des surfaces imperméables. Les valeurs de référence de ce paramètre qui dépendent du type de surface étudié peuvent être trouvées dans la littérature [3], [4].

REMARQUE : Dans le cas de bassins versant urbanisés, certaines surfaces peuvent être considérées parfaitement lisses c'est à dire n'ayant pas de stockage par dépression (les toits en tôle par exemple). Cela peut être renseigné dans le logiciel par le paramètre % *Zero-Imperv* (pourcentage de zone parfaitement lisse). Si aucun calibrage expérimental n'est réalisé les valeurs utilisées par défaut sont satisfaisantes (Tableau 1.3) ■

Nom	Description
X & Y-Coordinate	Lieu de représentation du sous bassin : aucune influence sur le calcul
Rain Gage	Pluie en entrée : ponctuelle ou temporelle
Outlet	Lieu vers lequel se dirige l'eau
Area	Superficie du sous-bassin (ha)
Width	Largeur caractéristique du trajet d'écoulement (m). Superficie divisée par la longueur moyenne maximale d'écoulement (ℓ), obtenue par moyenne de plusieurs chemins différents qui doivent refléter un écoulement lent (surfaces perméables) plutôt que rapide
% Slope	Pente moyenne du sous-bassin
% Imperv	Pourcentage du terrain imperméable
N-Imperv	Coefficient de MANNING n pour les surfaces imperméables
N-Perv	Coefficient de MANNING n pour les surfaces perméables
Dstore-Imperv	Profondeur des dépressions dans les surfaces imperméables (mm)
Dstore-Perv	Profondeur des dépressions dans les surfaces perméables (mm)
% Zero-Imperv	Pourcentage des surfaces imperméables sans dépression.
Subarea Routing	Chemin interne du ruissellement (Outlet, Pervious ou Impervious)
Percent Routed	Part de ruissellement prenant le chemin indiqué par Subarea Routing.
Infil. Method	Choix de la méthode de calcul pour l'infiltration du sol

Tableau 1.1 – Paramètres nécessaires à la simulation dans un sous-bassin [3].

Type de surface	$n (s \cdot m^{-1/3})$	Type de surface	$n (s \cdot m^{-1/3})$
Asphalte lisse	0.011	Surface graveleuse	0.024
Béton lisse	0.012	Sol en jachère	0.05
Finition de béton	0.013	Sol cultivé	0.06 – 0.17
Bois	0.014	Pelouse courte	0.15
Brique & ciment	0.014	Pelouse dense	0.24
Argile vitrifiée	0.015	« Bermuda Grass »	0.41
Fonte	0.015	Sous bois léger	0.40
Tôle	0.024	Sous bois dense	0.80

Tableau 1.2 – Valeurs typiques du coefficient n [3]

Type de surface	Profondeur de dépression
Imperméable	1.27 – 2.54 mm
Pelouses	2.54 – 5.08 mm
Paturages	5.08 mm
Boisé	7.62 mm

Tableau 1.3 – Valeurs classiques de la profondeur de dépression Dstore [3]

2. Modèles climatiques

La modélisation du ruissellement urbain demande d'analyser les rejets pluviaux au regard d'un climat donné. L'analyse du ruissellement dans le contexte climatique historique est pertinent pour estimer l'impact des infrastructures dans les conditions actuelles. Cependant dans le contexte de changements climatiques rapide, il semble nécessaire d'analyser également les projections pluviométriques futures pour se préparer au mieux aux effets des changements climatiques et en tenir compte pour le dimensionnement des aménagements à réaliser pour lutter contre le ruissellement.

2.1 Référence de modélisation

Les séries pluviométriques temporelles utilisées sont basées sur les projections de deux modèles climatiques, créés respectivement par les laboratoires *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*, **GFDL** et *Max Planck Institut*, **MPI**. Ces modèles, qui ne peuvent pas prévoir avec certitude les évolutions climatiques, fournissent nécessairement des résultats différents, même si les tendances restent similaires. L'analyse est donc faite selon deux modèles distincts, ce qui permet de vérifier que les tendances observées sont cohérentes l'une avec l'autre.

Climat historique

Souhaitant analyser le climat historique autant que le climat futur, il s'agit de se doter de séries temporelles pour le climat passé. Si l'utilisation de données mesurées *in situ* peut être envisagée, il est rare

de les avoir à disposition. De plus l'analyse du climat futur étant basée sur des projections et donc sur des hypothèses simplificatrices¹ il semble plus cohérent de baser l'analyse historique sur des résultats produits par le même modèle.

REMARQUE : La conception d'un modèle climatique passe par un calibrage des phénomènes physiques basé sur des observations passées. Celui-ci n'est valide qu'une fois que les résultats produits par la modélisation correspondent aux observations réelles sur une période donnée. Alors utiliser les résultats des modèles **GFDL** et **MPI** sur une période passée est cohérente car les tendances réelles sont respectées, même si les résultats au jour le jour ne sont pas nécessairement strictement conforme à la réalité. Ce n'est même jamais le cas avec un modèle physique aussi complexe. ■

1. Un modèle climatique ne peut décrire exhaustivement tous les phénomènes physiques ni toutes les conditions socio-économiques ayant une influence sur le climat. C'est d'ailleurs pourquoi deux modèles ne peuvent donner des résultats parfaitement similaires.

Climat futur

L'analyse de la pluviométrie future réside nécessairement sur les projections climatiques. La période simulée est la décennie 2090 – 2100. Le choix est fait de se placer dans le pire cas d'évolution climatique possible, à savoir le scénario **RCP 8.5**. Celui-ci correspond au cas où le développement économique et industriel reste fidèle aux tendances historiques et aucune mesure de protection environnementale ou de réduction des gaz à effet de serre n'est appliquée. Dans le contexte de cette étude, il est cohérent de se placer dans ce scénario, puisque son but est précisément d'initier les changements dans les politiques urbaines souhaitées pour réduire l'impact anthropique sur les milieux naturels.

Choix d'une période de référence

Les périodes historiques et futures choisies couvrent chacune une décennie complète. Or modéliser une aussi longue période n'est pas intéressant du point de vue du temps de calcul et s'avère redondant car les cycles pluviométriques annuels sont très similaires d'une année à l'autre à l'échelle d'une décennie. Ainsi une seule année d'analyse suffit pour conclure sur les tendances du système, que ce soit en climat historique ou futur. Cependant il faut tout de même choisir une année de référence au sein de la période. Pour cela, le critère retenu est la pluviométrie annuelle totale : l'année médiane dans la décennie est arbitrairement choisie comme référence.

REMARQUE : Le scénario **RCP 8.5** correspond à un forçage radiatif à la surface du globe augmenté de $8.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ entre 2000 et 2100. Basé sur des considérations socio-économiques réalisées par le *Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC)*, il s'agit d'une manière de quantifier les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Pour plus d'information sur la définition des scénarios **RCP**^a, voir *Climate Change : The Physical Science Basis – Evaluation of Climate Models*, [1] ou encore *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC*, [5]. ■

a. **RCP** : Representative Concentration Pathway

2.2 Analyse des périodes de référence

Les années de références diffèrent d'un modèle climatique à l'autre, car comme cela a déjà été explicité les résultats ne peuvent être similaires. Les séries temporelles choisies pour les climats historiques et futurs pour les modèles **GFDL** et **MPI**, présentées sur les figures 2.2 et 2.3, expriment l'intensité pluviométrique en fonction du temps durant une année.

REMARQUE : L'intensité pluviométrique est la différentielle temporelle de la hauteur de pluie cumulée, h :

$$i_{(t)} = \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_{(t)} = \frac{h_{(t+\delta t)} - h_{(t)}}{\delta t} \quad (2.1)$$

Soit pour un modèle discret de pas de temps Δt , sans facteur de conversion d'unité :

$$i_k = \frac{h_{k+1} - h_k}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Les hyétoigrammes pour les périodes historiques et futures présentent des similitudes dans le régime de pluie : il pleut plus durant les mois d'été que durant les mois d'hiver. Les événements intenses semblent voir leur fréquence augmenter, ce qui est corroboré par l'apparition plus fréquente de « pics d'intensité » ($i_{(t)} > 20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) en climat futur qu'en climat historique. De plus, l'intensité moyenne de ces épisodes extrêmes augmente.

Il semble donc que la tendance pluviométrique dans la vallée de la Matapédia pour le siècle à venir soit favorable à des pluies de plus en plus intenses, ainsi qu'une augmentation du volume de pluie annuel.



Figure 2.1 – Évolution des précipitations (en moyenne des deux modèles) selon le scénario **RCP 8.5** (en milliers de m³) entre 1990 et 2090

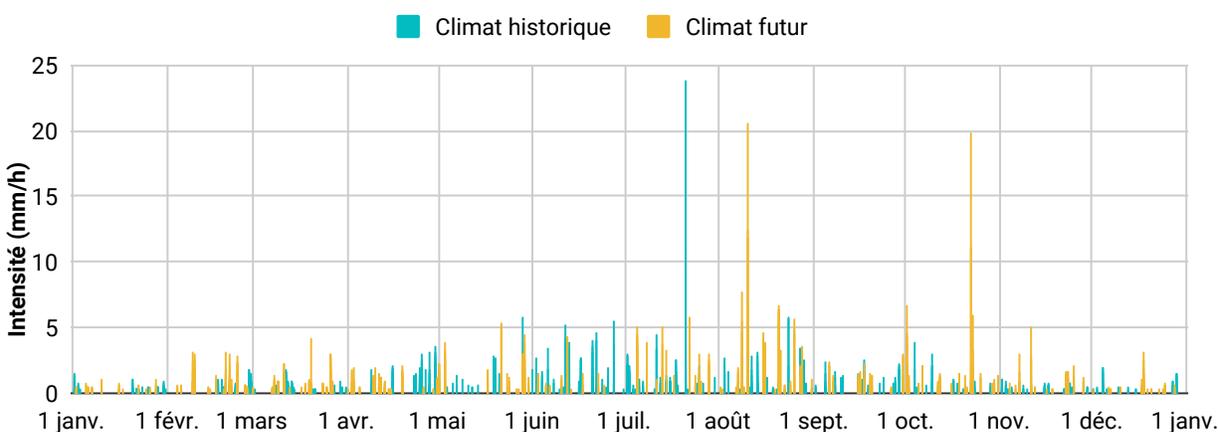


Figure 2.2 – Années de référence en climat historique et climat futur selon le modèle **GFDL**.

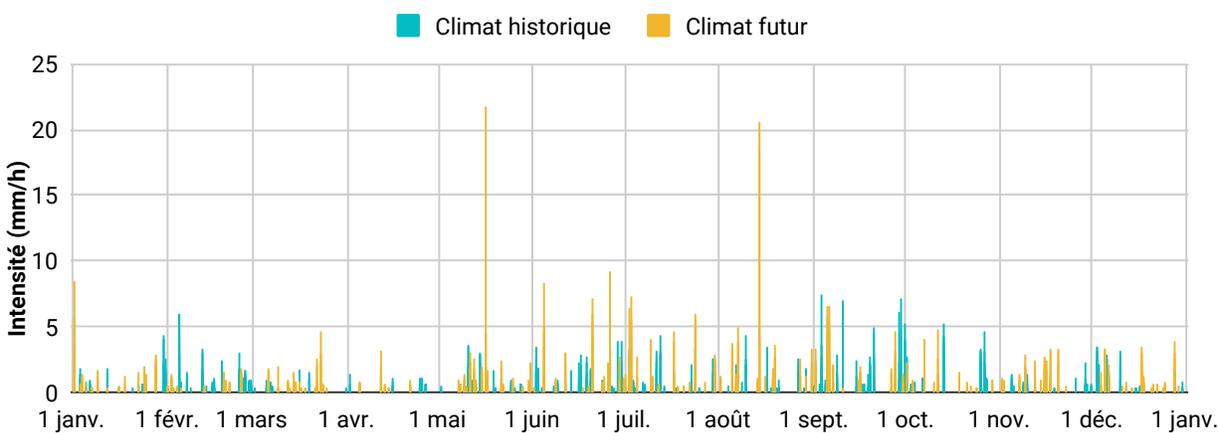


Figure 2.3 – Années de référence en climat historique et climat futur selon le modèle **MPI**.

REMARQUE : Il est important de se souvenir que ces données sont obtenues via des modèles numériques et ne représentent donc pas la réalité. Il s'agit uniquement de représenter des tendances d'évolution, et le cas choisi est une moyenne de résultats obtenus par un modèle climatique. Il n'est donc pas question d'interpréter ces figures comme des mesures du passé ou comme des prévisions météorologiques à long terme.

2.3 Pertinence des séries temporelles

Séries annuelles

Le choix de séries pluviométriques annuelles est motivé par plusieurs points. Les projections climatiques à la fin du siècle présentant de grandes différences avec les séries historiques, il est nécessaire de traduire ces différences dans les séries pluviométriques utilisées dans le modèle. Si ces différences peuvent être assez bien quantifiées, elles concernent beaucoup d'aspects, tels que la durée moyenne d'une pluie, son intensité, la fréquence d'apparition des événements « rares », le nombre de jours consécutifs en climat sec ... Autant de paramètres qui ne sont pas nécessairement bien traduits par les *pluies de conception*, soit les pluies de référence souvent utilisées pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques.

En effet, des modèles typiques de pluie tels que les pluies de conception du SCS sont fréquemment utilisés. Ce sont des modèles mathématiques qui représentent l'évolution de l'intensité pluviométrique dans le temps pour une pluie donnée. Connaissant la hauteur d'eau cumulée après la pluie pour une période de retour donnée, on peut alors reconstituer l'intensité de la pluie à chaque instant en se basant sur l'un de ces modèles. Évidemment chaque modèle ne peut être valide partout et ne représente qu'une approximation basée sur des observations. Cet outil est cependant très efficace dans beaucoup de cas. En particulier au Québec, le modèle SCS type II est entre autre privilégié par le « Guide du promoteur : Données pluviométriques et critères de conception » [7] pour la conception d'ouvrages de gestion pluviale.

Dans le cas présent, l'objectif n'étant pas une étude de conception d'ouvrage ou de réseau, l'utilisation d'un tel modèle semble moins appropriée. Puisqu'il s'agit plutôt d'une caractérisation de la réponse hydrologique d'un bassin versant sur une longue durée et non lors d'un événement précis, recourir à des séries pluviométriques de longue durée (ici une année) paraît le plus pertinent. En effet, plusieurs facteurs ne peuvent être traduits par les pluies de conception mais sont pourtant bien importants.

Par exemple, les variations des régimes de pluie dans l'année sont pris en compte dans le cas présent,

ce qui a un impact important sur les modèles car la variabilité intra – annuelle des pluies a un fort effet sur le ruissellement. Le nombre de jours consécutifs sans pluie par exemple impacte la perméabilité des sols et donc le ruissellement. De la même façon, des pluies plus courtes et plus intenses produisent plus de ruissellement que des pluies longues pour la même quantité cumulée d'eau. Puisqu'il est difficile de calibrer l'évolution des durées, de l'intensité, (etc.) il paraît très complexe d'ajuster un modèle de conception dans le cas de cette étude et en prenant en compte les projections climatiques.

De plus, l'évolution de l'intensité $i(t)$ durant une pluie pouvant très bien varier d'ici à 2090, les modèles de conception actuellement valables au Québec ne le seront peut être plus d'ici là. Il est donc finalement plus aisé de réaliser un bilan annuel du ruissellement en se basant sur des séries annuelles, en dépit des incertitudes sur leur validité, plutôt qu'en utilisant des modèles de référence qui ne sauront traduire fidèlement toutes les conditions pluviométriques qui nous intéressent.

Incertitudes sur la pluviométrie

Du fait de l'utilisation de *modèles* pluviométriques, ainsi que du choix *quasi* arbitraire des périodes de référence, les données obtenues présentent une incertitude certaine quoique difficilement estimable. Or l'objectif de cette étude étant de qualifier l'évolution du ruissellement, et non de le chiffrer précisément, cela n'a que peu d'importance. Ces modélisations cherchent à atteindre la « pire tendance d'évolution possible » en se basant sur le scénario **RCP 8.5**, il n'est donc pas choquant que les quantités utilisées dans le modèle soient des estimations et non des prévisions. En effet, l'objectif est principalement de mettre en évidence les zones les plus vulnérables. Aussi, bien que les valeurs obtenues soient sujettes à incertitudes, les tendances générales dégagées sont fiables et confirmées par les prévisions climatiques générales (augmentation de la pluviométrie moyenne dans la région, de la fréquence des événements climatiques extrêmes ...).

3. Analyse et rendus

Les résultats obtenus par la méthode décrite précédemment permettent une analyse basée sur plusieurs grandeurs physiques caractérisant le transport de matière en suspension par le ruissellement. Si l'évaluation précise de la quantité de matière n'est pas directement possible en l'absence d'une campagne de mesure précise (et donc d'un calibrage des modèles numériques) l'étude du ruissellement pluvial est un très bon indicateur de l'impact de chaque zone sur la production de MES au sein d'une municipalité.

Cette partie vise à décrire le choix des paramètres analysés et leur intérêt dans le cas de cette étude. Une méthode de réduction des incertitudes par corrélation avec un modèle détaillé est décrite. Les rendus produits durant ce projet sont également présentés et commentés relativement à leur pertinence vis à vis de la démocratisation de politiques d'urbanisation plus résilientes, aptes à faire face aux changements climatiques à l'œuvre.

3.1 Résultats étudiés

La multitude de résultats qu'il est possible d'obtenir via la modélisation permet une grande diversité d'analyse. Dans la cas présent il a été choisi de se concentrer sur deux paramètres principaux des bassins : le volume d'eau ruisselé et le coefficient de ruissellement.

Volume ruisselé sur l'aire de drainage

En l'absence de calibrage pour simuler la production de MES, le premier paramètre à étudier est la production en volume de ruissellement de chaque aire de drainage et de chaque secteur d'activité.

La quantité de MES mobilisée est relié à ce volume de ruissellement par une relation de proportionnalité qui fait bien entendu intervenir d'autres para-

mètres de la zone considérée (pente locale, propriété des sols, disponibilité en sédiments, etc.). Cependant, l'analyse de la répartition des volumes de ruissellement est déjà largement suffisante pour cibler les surfaces les plus vulnérables à l'érosion ou l'inondation ainsi que les secteurs d'activité les plus producteurs de ruissellement.

Le calcul des volumes de ruissellement produits par une surface peut d'ailleurs être réalisé autrement, par le recours à une méthode rationnelle, non dynamique et donc bien moins complexe. Pour plus de renseignements sur l'élaboration d'un tel modèle consulter l'ouvrage `mapaq_aac` [`mapaq_aac`].

Coefficient de ruissellement

Ce coefficient sans unité, noté C_r , est calculé par la relation 3.1 :

$$C_r = \frac{V_{rui}}{S} \times \frac{1}{h_{pluie}} \quad (3.1)$$

avec

- V_{rui} , volume non infiltré ruissellant (m^3)
- S , superficie de l'aire étudiée (m^2)
- h_{pluie} , quantité d'eau tombée sur le bassin (m)

Ce paramètre décrit la capacité d'une zone à capter et infiltrer l'eau de pluie puisque représente la proportion d'eau de pluie qui ruissellera au lieu d'être captée. Celui-ci dépend de la nature des sols étudiés, mais également des pentes locales, ce qui permet une autre caractérisation des aires de drainage que celle apportée par le volume de ruissellement : C_r tient compte de paramètres autres que le volume ruisselé.

Si dans le cas de cette étude les coefficients de ruissellement ont été obtenus par la modélisation et donc en interprétant les quantités d'eau mises en jeu, il est possible de déterminer grossièrement un coefficient de ruissellement par une caractérisation géomatique des territoires. En effet, le coefficient de ruissellement étant une propriété qui dépend de la porosité d'un

sol, de sa rugosité et de sa pente, il est possible de classer chaque typologie de couverture de sol pour obtenir une valeur moyenne de C_r . Le tableau 3.1 présente quelques valeurs classiques des coefficients de ruissellement attribuées à chaque couverture de sol.

Le coefficient de ruissellement d'une zone donnée (une aire de drainage complète par exemple) est donc la moyenne des coefficients des différents types de sols de cette surface, pondérés par la superficie.

$$C_{r,AD} = \frac{\sum C_{r,i} \times S_i}{S_{AD}} \quad (3.2)$$

avec

- $C_{r,AD}$, coefficient de ruissellement de l'AD
- $C_{r,i}$, coefficient de ruissellement de la surface i
- S_i , superficie de la surface i (m^2)
- S_{AD} , superficie de l'AD (m^2)

L'analyse de ce coefficient permet donc, même sans réaliser d'étude dynamique (utilisation d'un modèle SWMM), de cibler des zones vulnérables puisque dotées d'un fort coefficient de ruissellement. C'est une donnée qui sera d'ailleurs nécessaire pour l'élaboration d'un modèle par la méthode rationnelle. Ce paramètre permet en définitive d'analyser la « performance » d'une zone, notion qui peut passer inaperçue en s'intéressant uniquement au volume de ruissellement V_{rui} .

Couverture du sol	C_r
Boisé	0.13
Pelouse	0.25
Gravier	0.75
Asphalte	0.9
Toit plat	0.9
Toit incliné	0.95

Tableau 3.1 – Valeurs typiques du coefficient de ruissellement C_r .

3.2 Réduction des incertitudes

S'il a déjà été expliqué que les incertitudes sont très difficiles à calculer dans cette étude (variabilité des projections, définition des modèles, évolution des conditions d'urbanisation, etc.), on sait qu'elles peuvent être assez importantes. Il est cependant pos-

sible de les réduire en améliorant la précision du modèle, c'est à dire en le calibrant le plus précisément possible. Cette manipulation a déjà été évoquée : il s'agit d'établir, pour une zone donnée, un coefficient de corrélation entre un modèle très finement

détaillé et notre modèle « grossier ». Une fois cette corrélation quantifiée, la correction par ce facteur peut être appliquée à toutes les quantités intervenant dans les résultats fournis par le modèle grossier.

Dans le cas de cette étude l'aire **RUE BLAIS**, à Amqui, a servi de référence. Décrite très finement dans un modèle, puis soumise aux séries pluviométriques historiques et projetées, les volumes de ruissellement totaux sont comparés aux résultats obtenus par la modélisation grossière. Ces écarts s'expliquent par les relations entre les surfaces : dans le modèle détaillé la pelouse reçoit l'eau de ruissellement en provenance des toits, ce qui augmente son bilan. Moins d'eau transite par les surfaces de pelouse dans le modèle grossier. Or ce passage des eaux de ruissellement par deux types de surface (Toits puis Pelouses) augmente le taux d'infiltration total dans la municipalité : à l'échelle de l'air complète une moins grande quantité d'eau est infiltrée, ce qui explique un écart relatif positif.

Application des corrections

La correction mise en avant à l'échelle de l'AD doit être appliquée sur tous les résultats du modèle

grossier. En revanche, aucune correction n'est appliquée sur les couvertures de sol individuellement (c'est à dire sur les surfaces de pelouse). En effet, l'étude menée ici cherche à qualifier les secteurs et couvertures de sol les plus **productrices**, et non pas celles sur lesquelles le plus d'eau transite. Ainsi, appliquer le coefficient d'augmentation de 11.5% du ruissellement des surfaces engazonnées revenant à modifier le bilan hydrologique du site, cela ne doit pas être fait¹. Finalement, il s'agit donc d'effectuer des corrections uniquement sur les bilans à l'échelle de chaque bassin hydrologique, qui ne reçoivent par définition même aucun apport extérieur.

Notons que les deux modèles présentent des résultats sensiblement égaux, ce qui laisse présager d'une bonne représentation physique du phénomène pour le modèle grossier. L'écart relatif est plus important en climat futur qu'en climat historique : cela est attribué à une plus grande variabilité dans les intensités de pluie et des événements rares plus fréquents, dont le traitement par deux modèles numériques distincts ne réagit nécessairement pas de la même manière. Il semble que ce sont les variabilités internes des séries pluviométriques qui induisent des écarts plus importants.

Couverture du sol	Climat historique	Climat futur
Asphalte	≈ 0%	≈ 0%
Gravier	≈ 0%	≈ 0%
Toits	≈ 0%	≈ 0%
Pelouse	-11.5 %	-12.6%
Boisé	≈ 0%	≈ 0%
AD complète	2.7%	3.4%

Tableau 3.2 – Comparaison d'un modèle grossier à un modèle de référence finement détaillé : écarts relatifs pour le volume ruisselé.

1. La modification du volume ruisselé sur un seul type de surface ne prend pas en compte que la quantité d'eau entrant sur celle-ci a également été modifiée : la surface de pelouse reçoit l'eau provenant des toits. Le ruissellement qu'elle **produit** à proprement parler est indépendant du comportement hydrologique des autres types de surface. Il s'agit donc de ne pas modifier séparément les résultats des couvertures de sol distinctes.

3.3 Accessibilité de l'étude

L'étude du ruissellement urbain dans la vallée de la Matapédia est restituée sous la forme de deux rapports globaux et sept bilans ainsi qu'une carte dynamique.

- Les bilans, un par municipalité, s'attachent à analyser les aires et secteurs d'activité prioritaires et fortement urbanisés car ce sont les plus vulnérables. A destination des élus et des citoyens, ceux ci sont des *outils de priorisation* permettant l'aide à la décision ;
- Un rapport de résultats, restitue les résultats à l'échelle des sept municipalités. Celui ci reprend entre autre les bilans individuels.
- Le rapport méthodologique s'adresse aux ac-

teurs souhaitant reproduire une étude similaire car présente toute la méthodologie et les protocoles employés par l'OBVMR durant ce projet ;

- Une restitution de l'étude complète, qui synthétise les motivations, les bilans, et la méthode suivie ;
- La carte dynamique permet de rendre les résultats principaux accessibles à tous. Elle est disponible sur le site de l'OBVMR et illustre le découpage et la classification du territoire en aires de drainages plus ou moins prioritaires. Celle ci présente également les principaux résultats chiffrés.

Bibliographie

- [1] GIEC. *Climate Change : The Physical Science Basis – Evaluation of Climate Models*. 2013 (cf. page 12).
- [2] Urban Watersheds Research INSTITUTE. *User's Manual : Water Quality Capture Optimization and Statistics Model*. Octobre 2012 (cf. page 9).
- [3] William JAMES, Lewis E. ROSSMAN et W. R. C. JAMES. *User's guide to SWMM 5*. 905 p. CHI, Guelph, 2010 (cf. pages 7–10).
- [4] MDDELCC. *Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales*. 102 p. et annexes. 2017 (cf. pages 7, 9).
- [5] MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE. *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC*. 2011 (cf. page 12).
- [6] Marie PARÉ-BOURQUE. *Gestion des eaux pluviales : Qualité des eaux et contrôle en temps réel*. Faculté des études supérieures de l'Université Laval, 2008 (cf. pages 7, 9).
- [7] Ville de QUÉBEC. « Guide du promoteur : Données pluviométriques et critères de conception ». In : (2012) (cf. page 14).

Réalisation :

Mireille Chalifour
Valérie Delisle – Gagnon
Youri Paupe
Élodie Pujas

Rédaction :

Youri Paupe
Élodie Pujas

Révision :

Mireille Chalifour
Valérie Delisle – Gagnon

Extraction des données climatiques et soutien dans l'élaboration des modèles :

de la firme Lasalle|NHC
Gilles Rivard, ing. M. Sc.
Jean-Luc Martel, ing. Ph. D.
Simon Deslauriers, ing. M. Ing.

Nous remercions la collaboration d'Ouranos

Ce document peut être cité de la façon suivante :

« Outil vers un plan d'adaptation aux changements climatiques : priorisation du ruissellement urbain – Méthode. » 20 p., OBVMR 2019.



**Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques**



La Rés-Alliance est un projet financé par le Fonds vert dans le cadre d'Action-Climat Québec, un programme du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques découlant du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques.

Les propos tenus dans ce document n'engagent que les auteurs.