

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|--|------|
| SOMMAIRE | i |
| ABSTRACT | ii |
| REMERCIEMENTS..... | iii |
| LISTE DES TABLEAUX..... | viii |
| LISTE DES FIGURES | x |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES | xiv |
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 NOTIONS ET CONCEPTS DE BASE..... | 3 |
| 1.1 Hydrologie et modélisation hydrologique | 4 |
| 1.1.1 Cycle hydrologique..... | 4 |
| 1.1.2 Modélisation hydrologique..... | 6 |
| 1.2 Classification générale des modèles d'hydrologie..... | 6 |
| 1.2.1 Le modèle déterministe..... | 7 |
| 1.2.1.1 Modèles globaux..... | 7 |
| 1.2.1.2 Modèles conceptuels..... | 7 |
| CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS | 9 |
| 2.1 Problème de la modélisation hydrologique distribuée..... | 9 |
| 2.2 L'intégration de données d'humidité du sol dans le processus de modélisation hydrologique est elle un ajout?..... | 10 |
| 2.3 L'assimilation des données d'humidité du sol : comment intégrer intelligemment ces données dans le processus de modélisation? | 13 |
| CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU TERRITOIRE..... | 15 |
| 3.1 Bassin de la rivière Châteauguay | 15 |
| 3.1.1 Généralités | 15 |
| 3.1.2 Caractéristiques du bassin versant | 16 |
| 3.2 Bassin de la rivière des Anglais | 18 |
| 3.2.1 Description du bassin..... | 18 |
| 3.2.1.1 Topographie | 18 |
| 3.2.1.2 Géologie..... | 19 |
| 3.2.1.3 Démographie et utilisation du territoire..... | 19 |
| 3.2.1.4 Caractéristiques du réseau hydrographique | 20 |
| 3.2.2 Problèmes hydrologiques..... | 22 |
| 3.2.2.1 Les inondations | 22 |
| 3.2.2.2 L'étiage | 22 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 3.2.3 | Données hydrométéorologiques disponibles : le réseau Mésonet-Montréal..... | 23 |
| 3.2.3.1 | Origines..... | 23 |
| 3.2.3.2 | Objectifs..... | 24 |
| 3.2.3.3 | Description du réseau..... | 24 |
| 3.2.3.4 | Description et acquisition des données disponibles..... | 25 |
| 3.2.3.5 | Description de l'appareil de mesure « moisture point »..... | 27 |
| CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE..... | | 28 |
| 4.1 | Choix du modèle..... | 29 |
| 4.2 | Description du modèle des Anglais..... | 29 |
| 4.3 | Choix des événements pluvieux..... | 31 |
| 4.4 | Approches de la modélisation..... | 32 |
| 4.4.1 | Méthode d'infiltration de Green et Ampt..... | 33 |
| 4.4.2 | Méthode 1 : Utilisation des Indices de Précipitation Antécédente (IPA)..... | 35 |
| 4.4.3 | Méthode 2 : Utilisation des données d'humidité..... | 37 |
| 4.4.4 | Méthode 3 : Utilisation des données d'humidité avec paramètres de sol distribués..... | 38 |
| 4.4.5 | Méthode 4 : Rétroaction entre les débits simulés et observés..... | 38 |
| 4.4.6 | Pluie uniforme..... | 38 |
| 4.4.7 | Modèle distribué..... | 39 |
| CHAPITRE 5 PRÉSENTATION DES DONNÉES ET DES RÉSULTATS..... | | 41 |
| 5.1 | Traitement et exploitation des données Mésonet-Montréal..... | 41 |
| 5.1.1 | Les données de précipitation..... | 41 |
| 5.1.2 | Les données d'humidité..... | 46 |
| 5.1.3 | Les données de débit..... | 53 |
| 5.2 | Résultats des différentes méthodes d'infiltration de Green et Ampt..... | 54 |
| 5.2.1 | Méthode 1 : Utilisation des Indices de Précipitation Antécédente (IPA)..... | 54 |
| 5.2.2 | Méthode 2 : Utilisation des données d'humidité..... | 61 |
| 5.2.3 | Méthode 3 : Utilisation des données d'humidité avec paramètres de sol distribués..... | 68 |
| 5.2.4 | Méthode 4 : Rétroaction entre les débits simulés et observés..... | 75 |
| 5.2.4.1 | Objectifs de la méthode..... | 75 |
| 5.2.4.2 | Processus de la simulation..... | 77 |
| 5.2.5 | Essai avec fractionnement des événements 2 et 4..... | 84 |
| 5.2.5.1 | Choix des événements « fractionnés »..... | 84 |
| 5.2.5.2 | Méthode 1 : Utilisation des IPA..... | 85 |
| 5.2.5.3 | Méthode 2 : Utilisation des données d'humidité..... | 90 |
| 5.2.5.4 | Méthode 3 : Utilisation des données d'humidité avec paramètres de sol distribués..... | 92 |
| 5.2.5.5 | Méthode 4 : Rétroaction entre les débits simulés et observés..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| CHAPITRE 6 ANALYSE DES RÉSULTATS | 95 |
| 6.1 Comparaison entre les résultats simulés et observés | 95 |
| 6.1.1 Récapitulatifs | 95 |
| 6.1.2 Analyse des résultats et remarques sur les événements 1 et 3 | 97 |
| 6.1.3 Causes éventuelles des imprécisions | 99 |
| 6.2 Comparaison entre les résultats des différentes méthodes..... | 100 |
| 6.2.1 Passage de la méthode 1 à la méthode 2 | 100 |
| 6.2.2 Passage de la méthode 2 à la méthode 3 | 102 |
| 6.2.3 Passage de la méthode 3 à la méthode 4 | 103 |
| 6.2.4 Bilan de la comparaison des résultats des différentes méthodes | 104 |
| 6.2.5 Analyse des résultats relatifs aux méthodes employant les événements fractionnés | 104 |
| CONCLUSION..... | 109 |
| RECOMMANDATIONS | 111 |
| ANNEXE 1 Conversion de la mesure du temps de propagation en humidité volumétrique | 113 |
| ANNEXE 2 Méthode des polygones de Thiessen..... | 122 |
| ANNEXE 3 Données hydrométéorologiques..... | 124 |
| ANNEXE 4 Comparaison des débits simulés et observés après fractionnement des événements | 139 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 148 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | Page |
|---------------|---|------|
| Tableau I | Utilisation de la portion québécoise du bassin de la rivière des Anglais..... | 20 |
| Tableau II | Caractéristiques du bassin versant de la rivière des Anglais | 21 |
| Tableau III | Caractéristiques de la rivière des Anglais | 21 |
| Tableau IV | Liste des stations | 26 |
| Tableau V | Liste des requêtes..... | 26 |
| Tableau VI | Caractérisation du modèle distribué..... | 40 |
| Tableau VII | Indices de Précipitation Antécédente (en mm) | 46 |
| Tableau VIII | Humidité Howick Événement 1 (2 jours) | 47 |
| Tableau IX | Description du tableau d'humidité | 48 |
| Tableau X | Valeur de Dthéta (Pluie uniforme)..... | 55 |
| Tableau XI | Évaluation des critères : Méthode 1 | 61 |
| Tableau XII | Valeurs des paramètres Green et Ampt Méthode 2 – Pluie Uniforme..... | 64 |
| Tableau XIII | Évaluation des critères : Méthode 2..... | 67 |
| Tableau XIV | Évaluation des critères : Méthode 2 avec Pluie distribuée | 68 |
| Tableau XV | Paramètres du modèle..... | 69 |
| Tableau XVI | Valeurs des paramètres Green et Ampt Méthode 3 – Paramètres distribués | 72 |
| Tableau XVII | Évaluation des critères : Méthode 3 | 75 |
| Tableau XVIII | Évaluation des critères : Méthode 4..... | 83 |
| Tableau XIX | Description des sous événements..... | 85 |
| Tableau XX | IPA après fractionnement | 86 |
| Tableau XXI | Dthéta après fractionnement | 86 |
| Tableau XXII | Valeur des paramètres Green et Ampt Méthode 1 après fractionnement | 87 |
| Tableau XXIII | Évaluation des critères : Méthode 1 après fractionnement | 90 |
| Tableau XXIV | Valeur des paramètres de Green et Ampt Méthode 2 après fractionnement | 90 |

| | | |
|-----------------|---|-----|
| Tableau XXV | Évaluation des critères : Méthode 2 après fractionnement | 91 |
| Tableau XXVI | Évaluation des critères : Méthode 2 avec pluie distribuée..... | 92 |
| Tableau XXVII | Valeur des paramètres de Green et Ampt Méthode 3 après fractionnement | 93 |
| Tableau XXVIII | Évaluation des critères : Méthode 3 après fractionnement | 93 |
| Tableau XXIX | Évaluation des critères : Méthode 4 après fractionnement | 94 |
| Tableau XXX | Récapitulatif des différentes méthodes | 96 |
| Tableau XXXI | Récapitulatif des critères d'efficacité pour les événements 2 et 4..... | 97 |
| Tableau XXXII | Récapitulatif des critères d'efficacité après fractionnement..... | 105 |
| Tableau XXXIII | Paramètres de calibration initiaux..... | 117 |
| Tableau XXXIV | Paramètres A et B | 118 |
| Tableau XXXV | Précipitation Howick Événement 1 | 128 |
| Tableau XXXVI | Précipitation Howick Événement 2 | 129 |
| Tableau XXXVII | Précipitation Howick Événement 3 | 130 |
| Tableau XXXVIII | Précipitation Howick Événement 4 | 131 |
| Tableau XXXIX | Débit à l'exutoire Événement 1 | 135 |
| Tableau XL | Débit à l'exutoire Événement 2 | 136 |
| Tableau XLI | Débit à l'exutoire Événement 3 | 137 |
| Tableau XLII | Débit à l'exutoire Événement 4 | 138 |

LISTE DES FIGURES

| | | Page |
|-----------|--|------|
| Figure 1 | Cycle hydrologique..... | 4 |
| Figure 2 | Critère d'efficacité en fonction de la fréquence des mesures d'humidité..... | 12 |
| Figure 3 | Situation du bassin versant de la rivière Châteauguay..... | 17 |
| Figure 4 | Profil du bassin versant de la rivière des Anglais..... | 25 |
| Figure 5 | Triangulation du bassin versant..... | 30 |
| Figure 6 | Précipitation Howick..... | 31 |
| Figure 7 | Processus d'infiltration selon Green et Ampt..... | 34 |
| Figure 8 | Fichier original de précipitation pour la station Howick..... | 42 |
| Figure 9 | Hyétogrammes de précipitation journalière de chaque station de mi-avril à fin novembre et débit à l'exutoire..... | 43 |
| Figure 10 | Précipitation Howick..... | 44 |
| Figure 11 | Précipitation Uniforme..... | 45 |
| Figure 12 | Humidité 0-15 cm Howick et Précipitation..... | 49 |
| Figure 13 | Humidité Howick à chaque segment..... | 50 |
| Figure 14 | Caractéristiques du profil hydrique..... | 51 |
| Figure 15 | Exemple de profil d'humidité Howick..... | 52 |
| Figure 16 | Débit à l'exutoire pour l'ensemble des quatre événements..... | 53 |
| Figure 17 | Comparaison débit simulé et observé avec décalage Méthode 1 – Événement 1 – Pluie Uniforme..... | 57 |
| Figure 18 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 1 – Événement 1 – Pluie Uniforme..... | 58 |
| Figure 19 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 1 – Événement 2 – Pluie Uniforme..... | 58 |
| Figure 20 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 1 – Événement 3 – Pluie Uniforme..... | 59 |
| Figure 21 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 1 – Événement 4 – Pluie Uniforme..... | 59 |
| Figure 22 | Profil hydrique station Howick Événement 1 Pic 1..... | 62 |
| Figure 23 | Profil moyen de Green et Ampt Événement 1 Pic 1..... | 63 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figure 24 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 2 – Événement 1 – Pluie uniforme | 65 |
| Figure 25 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 2 – Événement 2 – Pluie uniforme | 65 |
| Figure 26 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 2 – Événement 3 – Pluie uniforme | 66 |
| Figure 27 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 2 – Événement 4 – Pluie uniforme | 66 |
| Figure 28 | Profil du bassin versant de la rivière des Anglais avec séparation Terre Noire - Argile..... | 70 |
| Figure 29 | Profil moyen de Green et Ampt Événement 1 Pic 1 Terre Noire..... | 71 |
| Figure 30 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 3 – Événement 1 – Paramètres distribués | 73 |
| Figure 31 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 3 – Événement 2 – Paramètres distribués | 73 |
| Figure 32 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 3 – Événement 3 – Paramètres distribués | 74 |
| Figure 33 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 3 – Événement 4 – Paramètres distribués | 74 |
| Figure 34 | Principes de la rétroaction..... | 76 |
| Figure 35 | Comparaison humidité moyenne simulée et observée sur les 15 premiers centimètres sur une des mailles du modèle et sans remise à jour (Événement 1) | 78 |
| Figure 36 | Comparaison humidité moyenne simulée et observée sur les 15 premiers centimètres sur une des mailles du modèle et avec remise à jour (Événement 1)..... | 80 |
| Figure 37 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 4 – Événement 1 – Remise à jour | 81 |
| Figure 38 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 4 – Événement 2 – Remise à jour | 81 |
| Figure 39 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 4 – Événement 3 – Remise à jour | 82 |
| Figure 40 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 4 – Événement 4 – Remise à jour | 82 |
| Figure 41 | Fractionnement des événements 2 et 4 | 84 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figure 42 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 1 Événement 2-1 | 87 |
| Figure 43 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 1 Événement 2-2 | 88 |
| Figure 44 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 1 Événement 2-3 | 88 |
| Figure 45 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 1 Événement 4-1 | 89 |
| Figure 46 | Comparaison débit simulé et observé Méthode 1 Événement 4-2 | 89 |
| Figure 47 | Tendances opposées entre les événements | 101 |
| Figure 48 | Précipitation Artifice..... | 125 |
| Figure 49 | Précipitation Ruisseau Cranberry | 125 |
| Figure 50 | Précipitation Russeltown | 126 |
| Figure 51 | Précipitation St-Chrysostome | 126 |
| Figure 52 | Précipitation Ste-Clothilde..... | 127 |
| Figure 53 | Précipitation St-Michel | 127 |
| Figure 54 | Humidité Artifice..... | 132 |
| Figure 55 | Humidité Ruisseau Cranberry..... | 132 |
| Figure 56 | Humidité Russeltown..... | 133 |
| Figure 57 | Humidité St-Chrysostome..... | 133 |
| Figure 58 | Humidité St-Michel | 134 |
| Figure 59 | Humidité Ste-Clothilde..... | 134 |
| Figure 60 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 2 Événement 2-1 | 140 |
| Figure 61 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 2 Événement 2-2 | 140 |
| Figure 62 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 2 Événement 2-3 | 141 |
| Figure 63 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 2 Événement 4-1 | 141 |
| Figure 64 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 2 Événement 4-2 | 142 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figure 65 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 3 Événement 2-1 | 142 |
| Figure 66 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 3 Événement 2-2 | 143 |
| Figure 67 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 3 Événement 2-3 | 143 |
| Figure 68 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 3 Événement 4-1 | 144 |
| Figure 69 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 3 Événement 4-2 | 144 |
| Figure 70 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 4 Événement 2-1 | 145 |
| Figure 71 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 4 Événement 2-2 | 145 |
| Figure 72 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 4 Événement 2-3 | 146 |
| Figure 73 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 4 Événement 4-1 | 146 |
| Figure 74 | Comparaison des débits simulés et observés Méthode 4 Événement 4-2 | 147 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

| | |
|--------------------------|--|
| DRAME | Développement et recherche appliquée en modélisation environnementale; |
| Dthéta | Déficit initial en humidité à saturation (en m^3/m^3); |
| Dthéta _{argile} | Déficit initial en humidité à saturation en terre argileuse (en m^3/m^3); |
| Dthéta _{orga} | Déficit initial en humidité à saturation en terre noire (en m^3/m^3); |
| ÉTS | École de technologie supérieure; |
| Hc | Charge de succion au front mouillant (en m); |
| HYMAP | Regroupement stratégique en hydrométéorologie appliquée; |
| IPA | Indice de Précipitation Antécédente (en mm); |
| Ksat | Conductivité hydraulique à saturation (en mm/h); |
| Linit | Hauteur initiale du front mouillant (en m); |
| MRC | Municipalités Régionales de Comté; |
| TDR | Time Domain Reflectometry; |
| SCABRIC | Société de conservation et d'aménagement du bassin de la rivière Châteauguay; |
| θ_{sat} | Contenu volumétrique à saturation (en m^3/m^3). |

INTRODUCTION

La variabilité spatiale et temporelle des niveaux des nappes phréatiques, l'accumulation des phénomènes de sécheresse et d'inondation représentent tous des phénomènes liés au réchauffement planétaire et mettent aujourd'hui l'accent sur l'importance à accorder à l'amélioration de la gestion des ressources en eau ainsi que de la précision des prévisions hydrologiques.

Toutefois, même si la modélisation hydrologique paraît représenter une solution prometteuse et à fort potentiel, cette dernière présente encore bien des lacunes et imperfections notamment en terme de précision pouvant être expliquées entre autres par le manque ou l'imprécision des données. Par ailleurs, outre l'exactitude des données météorologiques utilisées, la qualité des prévisions est étroitement liée à une bonne connaissance de l'état du bassin versant. Parmi les paramètres les plus influents se retrouve l'humidité du sol qui, de par son caractère variable dans le temps et dans l'espace reste difficile à estimer.

Dès lors, l'objectif de la présente étude sera de montrer qu'une meilleure précision de ce paramètre et l'assimilation de ce dernier parmi les variables du modèle contribueraient à améliorer la qualité et la fiabilité des prévisions. La démarche adoptée pour l'élaboration de ce projet peut être alors résumée telle que suit. Tout d'abord, un modèle hydrologique a été choisi en fonction de nombreux critères retenus puis les données nécessaires ont été recueillies, évaluées puis traitées. Parmi ces dernières se retrouvent les données de précipitation observées correspondant aux données d'entrée du modèle, puis les données de débit observées avec lesquelles seront comparées les données sortantes du modèle, et enfin, les données d'humidité fournissant les paramètres régulateurs du modèle. Quatre approches différentes, toutes basées sur l'utilisation des paramètres de Green et Ampt en tant que variables principales, furent considérées afin d'évaluer au mieux l'impact que peut avoir l'assimilation des données d'humidité du sol sur la qualité de la prévision.

Enfin, un critère de précision sera utilisé afin d'évaluer les performances de chaque méthode pour le même modèle.

Le premier chapitre fournit au lecteur les notions et concepts de base nécessaires à la compréhension du rapport. Une description des différents types de modèles existants ainsi que la terminologie associée seront ensuite fournies.

Le second chapitre expose la problématique associée à l'assimilation des données d'humidité ainsi que les objectifs de l'étude.

Le troisième chapitre consiste en la description du territoire à l'étude c'est-à-dire du bassin de la rivière Châteauguay et en particulier de son sous bassin de la rivière des Anglais. Par ailleurs, le réseau hydrométéorologique du Mésonet-Montréal sera également décrit pour ensuite proposer un inventaire de l'ensemble des stations météorologiques et hydrométriques ciblées procurant les données représentatives nécessaires du bassin.

La méthodologie relative au projet est décrite dans le quatrième chapitre où chacune des différentes étapes de l'étude, les outils et données utilisés ainsi que les différentes approches de modélisation employées seront énumérées.

Le cinquième chapitre présente l'ensemble des résultats obtenus, ces derniers étant analysés et interprétés lors du sixième chapitre.

En conclusion, les principaux résultats de l'étude seront soulignés et certaines recommandations seront proposées.

CHAPITRE 1

NOTIONS ET CONCEPTS DE BASE

Le Canada possédant probablement l'une des superficies de lacs des plus grandes au monde, l'eau est ainsi naturellement devenue l'une des ressources les plus importantes et peut être même la plus utilisée au pays, ceci à des fins aussi diverses que variées telles qu'agricoles, industrielles ou encore récréatives. Dans un contexte environnemental et climatologique actuel difficile et changeant, de multiples efforts sont fournis aujourd'hui afin d'acquérir de nouvelles méthodes de protection et de gestion des ressources en eau en Amérique du nord. L'évolution actuelle des connaissances scientifiques, tant sur le plan hydrologique qu'informatique amène aujourd'hui à privilégier une solution axée sur la modélisation hydrologique. Bien entendu, l'élaboration d'un tel instrument requiert de posséder une connaissance et une compréhension approfondie du cycle hydrologique. Toutefois, les bienfaits et apports d'un tel outil en terme de prévention et de prévision des risques d'inondation notamment seront loin d'être négligeables. En particulier, l'évolution du risque hydrologique et plus spécifiquement de l'humidité du sol du sous bassin de la rivière des Anglais représente le principal thème de la présente étude.

Le chapitre suivant a ainsi pour principal objectif de présenter des notions de base sur le cycle hydrologique, sur la modélisation hydrologique ainsi que sur les différents modèles disponibles. En somme, cela permettra d'établir une révision des notions théoriques à connaître afin de faciliter la compréhension des processus et modèles évoqués ultérieurement.

1.1 Hydrologie et modélisation hydrologique

1.1.1 Cycle hydrologique

Principe fondamental en hydrologie, le cycle hydrologique peut être défini comme étant l'ensemble de tous les processus de transformation de l'eau sur la terre, cette dernière étant présente sous trois états différents : liquide, solide ou gazeux (SCABRIC, 2004). L'ensemble de tous les mécanismes intervenant lors du cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi concomitants c'est-à-dire qu'ils se produisent simultanément, tout en dépendant l'un de l'autre.

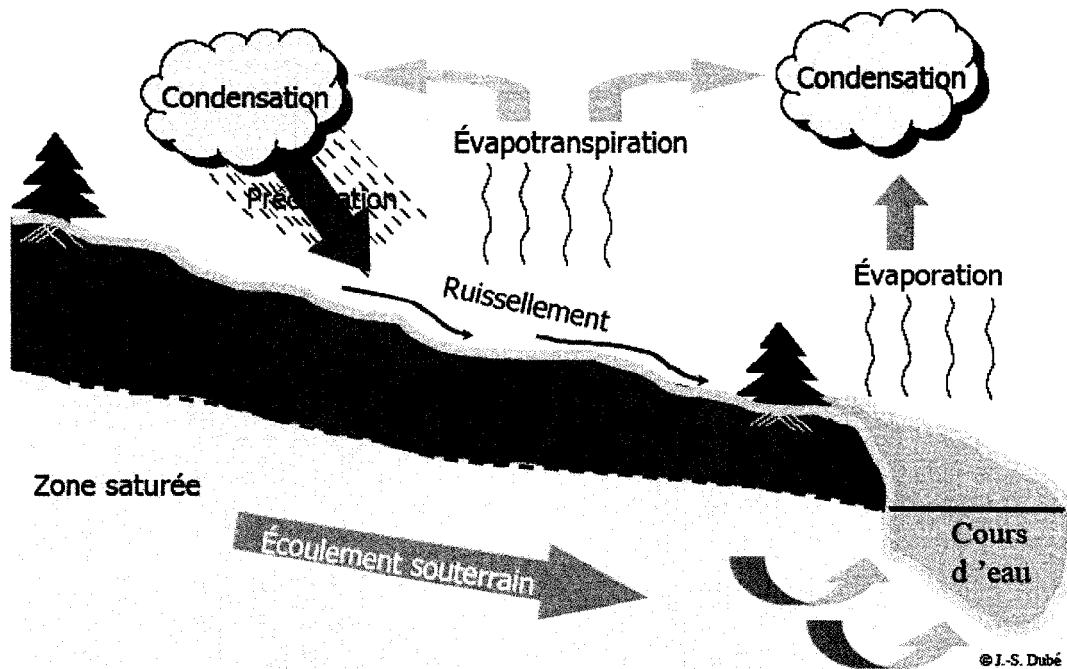


Figure 1 Cycle hydrologique

(Tiré du cours MGC-860 par J.-S. Dubé, 2005)

Le cycle de l'eau est illustré de façon schématique grâce à la figure 1 où sont ainsi discernées les phases principales de ce dernier comme résumé par Lamas (Lamas, 1993) :

- a. L'**évaporation** d'eau des océans, du sol et des plantes;
- b. La formation dans l'atmosphère de nuages, de brouillards et leur transport par le vent;
- c. La **condensation** de l'eau et les **précipitations** sous forme de pluie, de neige, de grêle, etc.;
- d. Le **ruissellement** de surface, l'**infiltration**, la **percolation**, l'écoulement souterrain et le retour en surface (sources, puits, etc.);
- e. La formation de courants de surface, de rivières, de fleuves et leur décharge dans les lacs, les mers et les océans;
- f. L'évaporation et la répétition du cycle.

Différentes sources sont à l'origine du mouvement de l'eau dans la nature tout comme l'attraction lunaire, la pression atmosphérique, les forces intermoléculaires, les réactions chimiques, nucléaires, les activités biologiques ou enfin les activités humaines (Lamas, 1993). Néanmoins, à l'échelle du bassin, l'énergie thermique solaire et la gravité restent les mécanismes fondamentaux les plus importants.

En somme, le cycle hydrologique est un processus très complexe, d'autant plus qu'il est également influencé par plusieurs paramètres tels que le climat, la topographie, les propriétés du sol et le type d'occupation du territoire. Par ailleurs, l'activité humaine peut également avoir une influence importante sur le régime hydrologique pour répondre notamment à leur besoin en eau de consommation, d'irrigation ou même de drainage (Latham, 1990).

1.1.2 Modélisation hydrologique

Selon le ministère de l'Environnement du Québec (2004), le modèle hydrologique peut être défini comme suit :

« Un modèle d'hydrologie est une représentation mathématique et informatique des processus hydrologiques qui influencent le mouvement de l'eau à la surface et dans le sol de même que dans les cours d'eau, et qui permet de simuler de façon simplifiée le comportement d'un bassin versant sous l'effet de la chronologie des événements météorologiques. »

Dédié à l'origine principalement à la planification, à la conception et à la gestion des ressources en eau, l'utilisation d'un modèle hydrologique tend de plus en plus à l'évaluation et la quantification des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau nationale et sur l'agriculture (Singh & Woolhiser, 2002). Bien entendu, une grande variété de modèles existe. C'est pourquoi il est important de bien les différencier en y distinguant les possibilités, avantages et inconvénients de chaque afin de pouvoir déterminer le modèle le plus approprié aux besoins de l'étude.

1.2 Classification générale des modèles d'hydrologie

Il existe ainsi plusieurs types de modèles ayant chacun des caractéristiques spécifiques se distinguant principalement de par leur échelle temporelle ou leur discrétisation spatiale des différents processus. Par ailleurs, deux grands types de modèles d'hydrologie existent, soit les modèles stochastiques et déterministes (Leconte, 2001).

Un modèle est dit stochastique s'il inclut une ou plusieurs variables aléatoires auxquelles est associée une distribution de probabilité; dans le cas contraire, il est dit déterministe. Dans la mesure où le modèle déterministe répond le mieux aux objectifs de l'étude, seul ce dernier sera évoqué par la suite.

1.2.1 Le modèle déterministe

Les modèles déterministes se subdivisent en deux catégories, soit les modèles globaux et les modèles conceptuels (Llamas, 1993).

1.2.1.1 Modèles globaux

Les modèles déterministes globaux sont empiriques et ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité du bassin c'est-à-dire des variations spatiales et temporelles des caractéristiques du bassin et des précipitations.

1.2.1.2 Modèles conceptuels

Les modèles déterministes conceptuels permettent quant à eux de considérer, à un niveau variable, l'hétérogénéité des différents paramètres. Ces modèles sont ainsi nécessairement distribués, c'est-à-dire qu'ils permettent une répartition géographique du milieu et de l'hydrologie. Le bassin versant est donc découpé en plusieurs sous-bassins de sorte de pouvoir tenir compte de la variabilité spatiale de la topographie, de l'occupation du sol, des types de sols et de la météorologie (Llamas, 1993).

Il faut également distinguer par ailleurs parmi les modèles conceptuels, ceux étant à mode événementiel ou à mode continu, le premier étant utilisé pour représenter un unique événement, qu'il dure quelques heures ou quelques jours alors que le deuxième est destiné à simuler une période temps beaucoup plus longue tenant entre autre compte de l'assèchement du bassin entre les averses.

Enfin, il est important de mentionner l'apparition d'un nouveau type de modèle dérivant directement du déterministe conceptuel : le modèle numérique à bases physiques. Ce dernier s'apparente au modèle déterministe conceptuel traditionnel car il est discrétisé en

mailles. En effet, l'utilisation du modèle consiste à morceler le bassin versant en unités spatiales homogènes et à leur attribuer une valeur typique d'un paramètre. L'amélioration apportée consiste à effectuer sur chacune des unités une vérification de la conservation de la masse et de l'énergie à tous les pas de temps de calcul (Minville, 2004).

De par sa nature et de par les différentes fonctions qu'il possède, le modèle déterministe conceptuel répond au mieux aux attentes de notre étude. En effet, ce choix s'est également basé sur la capacité de ce dernier à pouvoir satisfaire aux objectifs et à solutionner les différentes problématiques du projet, ces derniers étant discutés lors du prochain chapitre.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

2.1 Problème de la modélisation hydrologique distribuée

L'utilisation d'un modèle hydrologique distribué présente de nombreux avantages dont principalement celui de pouvoir mieux représenter et prendre en compte la variabilité spatiale des caractéristiques physiques d'un bassin versant comme celle des données de précipitation, de température, d'occupation du sol, de type de sol, d'altitude, et des observations des variables d'états comme l'humidité et la neige au sol (Cui, Vieux, Neeman, & Moreda, 2005; Turcotte, Lacombe, Dimnik, & Villeneuve, 2004). Quant au prix à payer à recourir à un tel type de modèle, ceci à des résolutions spatiales et temporelles fines, ce dernier serait principalement la lourdeur de sa mise en place et le risque d'une paramétrisation excessive, paramètres pouvant par ailleurs être altérés lors de la phase de calibration. Ainsi, la recherche du juste compromis entre cette lourdeur et les besoins dans la finesse des résultats constitue l'un des défis principaux du développement d'un système de prévision.

Toutefois, en ce qui concerne la présente étude, le défi principal auquel il a fallu faire face est non pas celui d'une paramétrisation excessive mais au contraire celui du manque probable de données disponibles. En effet, dépendamment bien entendu du site étudié et du nombre de stations réparties sur ce dernier, les recherches peuvent fréquemment être complexifiées dans le cas où il manquerait cruellement de données disponibles, ces dernières ne se révélant de plus pas toujours être de qualité suffisante pour être exploitables.

En particulier, le manque de données relatives à l'humidité du sol constitue actuellement une limitation majeure au développement de la modélisation et de la compréhension des

processus d'interactions sol-plante-atmosphère, ayant comme conséquence un manque de précision quant aux prévisions et conversions des données de précipitation en débits. Néanmoins, dans le cas présent, un grand nombre de stations et d'informations sont disponibles, la précision et la qualité de ces dernières devant tout de même être discutées. Il est également important de remarquer pour finir que l'utilisation de la télédétection ouvre aujourd'hui de nouvelles perspectives pour étudier la dynamique de l'humidité des sols sur de grandes superficies, ceci contrairement aux mesures au sol qui donnent seulement des valeurs ponctuelles (Ressources naturelles Canada, 2006).

2.2 L'intégration de données d'humidité du sol dans le processus de modélisation hydrologique est elle un ajout?

L'humidité du sol est une mesure importante voire indispensable pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle permet de déterminer le potentiel de production d'une culture au Canada comme dans des pays souvent menacés de sécheresse. En effet, la modélisation de l'humidité du sol permettrait d'évaluer la quantité d'eau présente dans les premiers mètres du sol, de détecter rapidement les conditions d'assèchement pour permettre ainsi d'améliorer la production agricole et de faire des prévisions quant au volume et à la qualité des récoltes. D'autre part, l'humidité du sol est un paramètre important dans la modélisation du drainage qui peut fournir de l'information sur le potentiel hydroélectrique et d'irrigation d'un bassin. Enfin et surtout, l'humidité du sol aide aussi dans la prédiction d'inondations, car un sol saturé ne peut pas absorber plus de pluie ou d'eau de ruissellement, contribuant ainsi à prévenir les producteurs agricoles et participe donc à la planification de l'aide humanitaire (Ressources naturelles Canada, 2006).

Dans un contexte actuel où les inondations se font de plus en plus fréquentes, l'amélioration de la précision des modèles de pluie-débit, qui sont d'ailleurs loin d'être encore parfaits (Garrote & Bras, 1995), en particulier concernant leur performance dans

la prévision des crues, devient aujourd'hui un élément essentiel en hydrologie continentale (Aubert, 2003).

La méthode consistant à intégrer et à assimiler les données d'humidité de sol au modèle fait aujourd'hui partie des solutions envisageables et prometteuses. En effet, l'intégration de ces données permettrait de prendre explicitement en considération l'état hydrique du sol. En d'autres termes, les paramètres significatifs que sont les interactions se manifestant à l'intérieur de l'interface sol-végétation-atmosphère qui sont des facteurs dominants dans les processus de transformation des précipitations en écoulement à l'échelle du bassin versant seront ainsi pris en compte. Cela devrait donc permettre d'avoir un meilleur contrôle de l'évolution du modèle et d'améliorer ses performances, en particulier en terme de prévision.

A titre d'exemple, l'étude menée par Aubert et al. (2003) et résumée dans l'article « Assimilation of soil moisture into hydrological models : the sequential method » révèle que le critère d'efficacité (« the efficiency criterion ») comparant les prévisions faites avec assimilation des données d'humidité par méthode séquentielle (représenté en trait plein sur la figure 2) et les prévisions faites sans assimilation (représenté en pointillés), diminue lorsque les intervalles de données manquantes augmentent et que, point primordial, la valeur de ce critère reste toujours de manière significative supérieure à celle déterminée sans assimilation, ceci même pour des intervalles de données manquantes d'une durée allant jusqu'à une semaine.

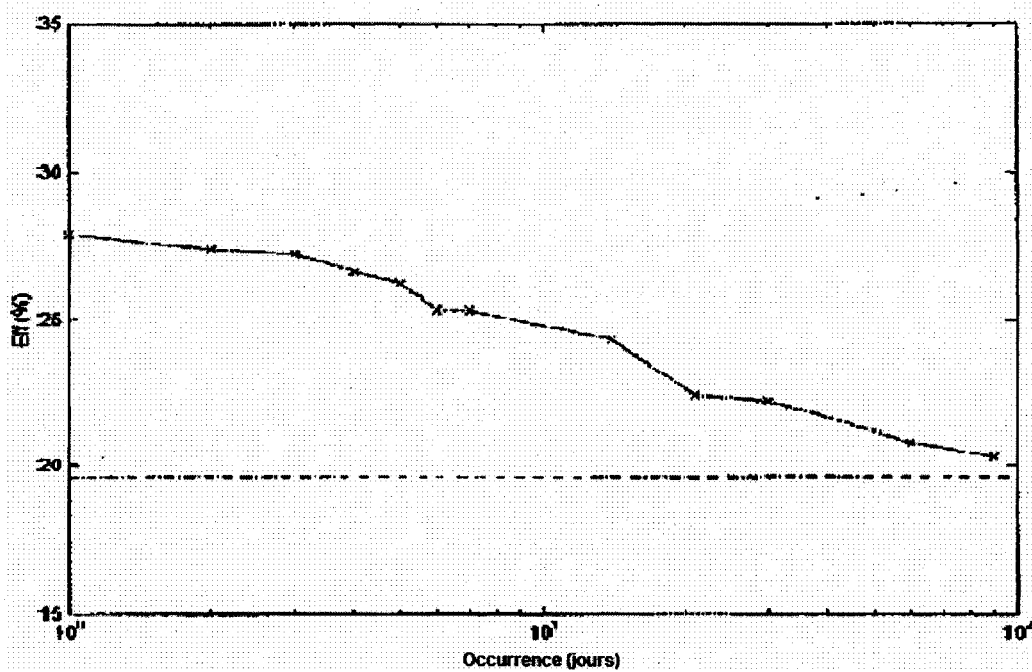


Figure 2 Critère d'efficacité en fonction de la fréquence des mesures d'humidité

(Source : Aubert, 2003)

Toutefois, la méthode consistant à assimiler les données d'humidité lors du processus de modélisation n'est pas des plus aisées à mettre en place et doit être réalisée de manière réfléchie. En effet et à titre d'exemple, l'hétérogénéité et la variabilité du terrain peuvent rendre le lien entre des mesures ponctuelles d'humidité du sol utilisée dans le modèle d'hydrologie et les valeurs d'humidité à prendre en considération pour le reste du territoire difficile à faire. Enfin et surtout, il reste important de préciser que, quelque soit la méthode employée, la disponibilité et la qualité des données d'humidité, la précision et le nombre des sondes et l'homogénéité du terrain d'étude correspondent à des critères à absolument tenir en compte afin d'obtenir les prévisions les plus justes possible.

L'ÉTS travaillant de façon active sur le bassin de la rivière des Anglais, le besoin de développer leur propre outil spécifique au terrain devient une nécessité. L'intégration et

l'assimilation des données d'humidité du sol dans le processus de modélisation hydrologique seront, par ailleurs, les sujets principaux de recherche de cette étude.

2.3 L'assimilation des données d'humidité du sol : comment intégrer intelligemment ces données dans le processus de modélisation?

Les méthodes d'assimilation des données d'humidité du sol dans un modèle d'hydrologie sont nombreuses. Néanmoins, ces dernières ont toutes comme objectif de réduire au maximum les erreurs et divergences d'un modèle utilisant des mesures externes, ce qui devrait permettre ainsi d'améliorer la qualité de la prévision.

Dans le cadre de cette étude, il fut décidé d'utiliser une méthode consistant à corriger localement la valeur des variables internes du modèle lorsque les données d'observation sont disponibles. Pour cette raison et parce que le fait d'assimiler des données nécessite de pouvoir « jouer dans le modèle », ce qui est d'ailleurs impossible à faire lors de l'utilisation d'un code commercial, l'emploi d'un modèle « maison » paraît alors des plus appropriés. Toutefois et point important, il faudra bien entendu faire attention à ce que la procédure de mise à jour des paramètres puisse être compatible et combinée avec le modèle pluie-débit utilisé c'est-à-dire ici, le modèle des Anglais.

La première étape de cette méthode consiste donc tout d'abord à analyser la relation entre les simulations calculées par le modèle et les observations disponibles pour les événements « importants ». Ensuite, plusieurs solutions sont offertes. A titre d'exemple, divers critères définis, soit en intégrant certaines équations, soit par l'introduction d'un filtre tel que celui de Kalman au sein du programme, peuvent permettre de prendre en considération les erreurs estimées par rapport aux observations et de linéariser localement le modèle pour déterminer les corrections à appliquer sur les variables internes. Un critère de persistance pourra au final être utilisé afin d'évaluer l'efficacité et la pertinence de la prévision du modèle.

Toutefois, l'étude et l'analyse de l'ensemble des données du problème ont amené à choisir une méthode en réalité autre même si les idées directrices restent en grande partie les mêmes. En effet, après avoir analysé la relation entre les simulations obtenues par le modèle et les données d'observation, il fut constaté que l'ensemble des divergences ponctuelles obtenues furent de manière générale en corrélation avec certains traits caractéristiques des données d'entrée du modèle, c'est-à-dire et pour être plus précis, lorsqu'il y a absence de précipitation durant des intervalles conséquents. Dès lors, ce phénomène récurrent et facile à distinguer a ainsi permis d'établir une stratégie simple et systématique afin de réduire au maximum les écarts entre les prévisions et les données d'observation. Cette dernière sera décrite plus précisément dans le chapitre 4, autrement dit lorsque la méthodologie de l'étude sera exposée.

Toutefois, l'humidité du sol variant considérablement dépendamment de la structure du sol et de sa porosité, il paraît ainsi fondamental d'étudier en premier lieu et de plus près la nature du territoire sur lequel le travail se portera.

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DU TERRITOIRE

Tout comme mentionné précédemment, le cycle hydrologique représente un phénomène très complexe, influencé par un grand nombre de paramètres tels que le climat, la topographie ou encore les propriétés du sol du territoire. Les caractéristiques du régime hydrologique d'un bassin versant sont ainsi très variables pouvant dépendre également de la forme de ce dernier. Dès lors, il est aisé de saisir toute l'importance à accorder à pouvoir connaître, de manière précise, l'ensemble des caractéristiques du territoire afin d'améliorer au mieux la qualité de l'étude hydrologique associée.

3.1 Bassin de la rivière Châteauguay

3.1.1 Généralités

Situé dans la province du Québec, au sud-ouest de Montréal, sur la rive sud du fleuve St Laurent, le bassin de la rivière Châteauguay s'étend jusque dans l'état de New York aux États-Unis et prend sa source au niveau de l'Upper Châteauguay Lake comme observé sur la figure 3 (Desmeules & Gélinas, 1981). Ce dernier est situé dans une région où le climat est l'un des plus chauds et humides au Québec et dont la température moyenne reste inférieure à 0°C pendant plus de trois mois et au dessus de 10°C pendant plus de quatre mois (Ministère des Terres et Forêts, 1973).

La région est relativement peuplée et compte environ 100 000 habitants dont 65% environ dépendent de l'eau souterraine, cette dernière étant leur source unique d'approvisionnement en eau. Dans les régions rurales principalement, près de 20 000 puits privés, alimentés par les aquifères régionaux, sont en opération (Ressources naturelles Canada, 2004).

3.1.2 Caractéristiques du bassin versant

La forme du bassin ayant une influence importante sur le temps de réponse de ce dernier et sur l'allure de l'hydrogramme pour une pluie donnée (Desmeules & Gélinas, 1981), en voici les principaux traits caractéristiques.

D'une superficie de 2543 km², deux régions physiographiques distinctes peuvent y être distinguées. En effet, au nord se présente tout d'abord la partie québécoise située dans la région des Basses Terres du St Laurent, plaine uniforme aux altitudes inférieures à 30 m le long du fleuve St Laurent et augmentant de manière graduelle jusqu'au plateau des Appalaches d'altitudes maximums de 335 m. La partie sud est quant à elle située aux États-Unis dans la région des Appalaches au relief varié, vallonné et montagneux principalement à l'extrémité sud du bassin. (Desmeules & Gélinas, 1981).

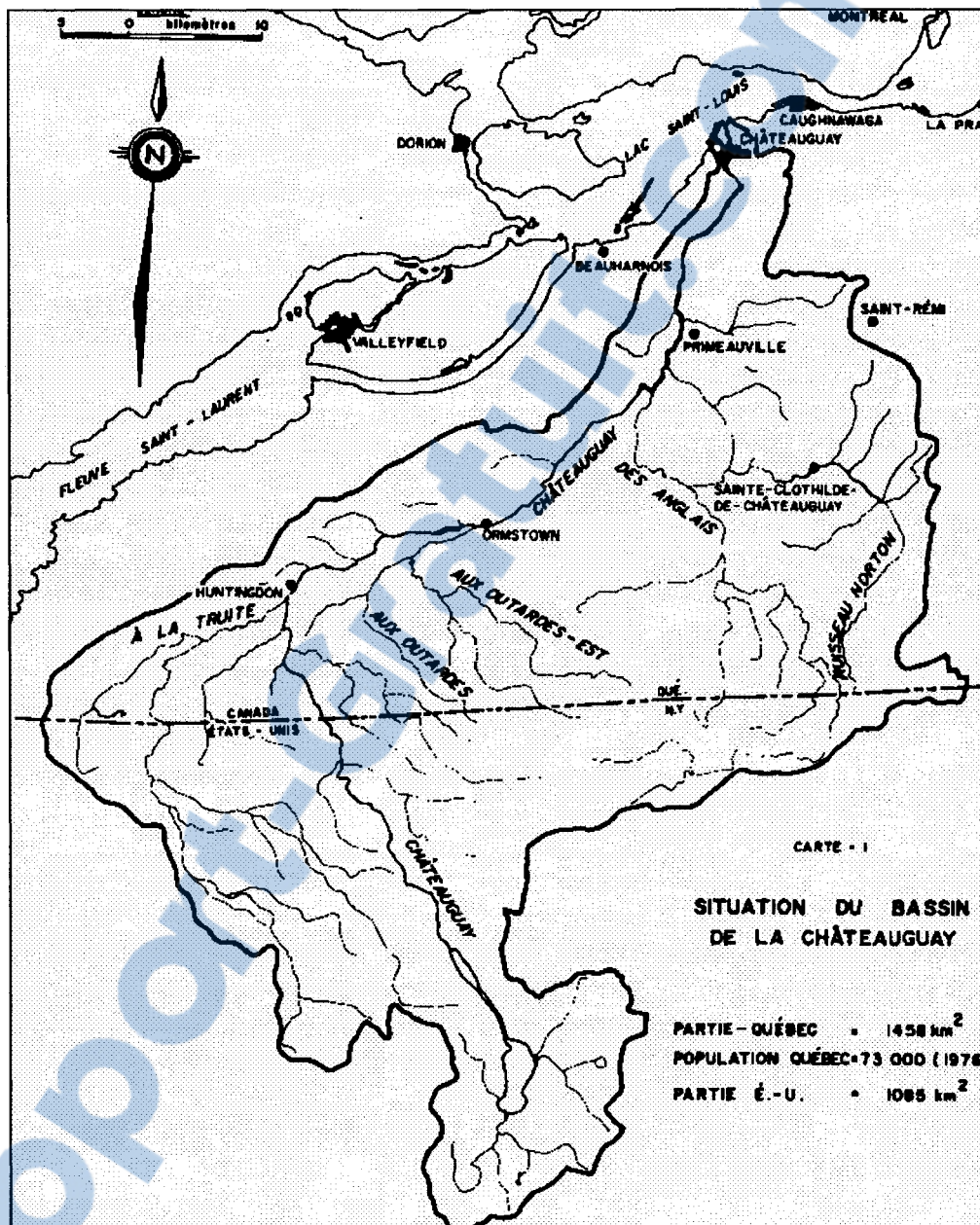


Figure 3

Situation du bassin versant de la rivière Châteauguay
(Tiré de Desmeules & Gélinas, 1981)

Par ailleurs, le bassin de la rivière Châteauguay est composé de plusieurs sous bassins, organisés dépendamment des affluents de la rivière qui les drainent. Ainsi, les sous bassins principaux sont ceux de la rivière à la Truite d'une superficie de 527 km², de la rivière aux Outardes d'une superficie de 230 km² mais surtout de la rivière des Anglais d'une superficie de 727 km² représentant près de 30% de la superficie totale du territoire. C'est au niveau de ce dernier que la présente étude se portera.

3.2 Bassin de la rivière des Anglais

3.2.1 Description du bassin

Lui fournissant près de 40 % de son eau, la rivière des Anglais représente ainsi le tributaire le plus important de la rivière Châteauguay.

D'une altitude moyenne de 106 mètres et d'une superficie de 727 km², le bassin de la rivière des Anglais est composé d'une partie québécoise et d'une partie située aux États-Unis. La première couvre les Municipalités Régionales de Comté (MRC) de Beauharnois-Salaberry et des Jardins-de-Napierville. Quant à la partie étasunienne, elle comprend les cantons de Clinton et Mooers (Ministère de l'environnement du Québec, 1981a).

3.2.1.1 Topographie

Le bassin de la rivière des Anglais présente une topographie somme toute assez singulière caractérisée par la présence d'un relief montagneux au sud et de plaines au nord. En effet, la région sud comporte à la fois les monts Adirondacks des Appalaches aux États-Unis, ces derniers s'élevant à 408 mètres à la limite de partage des eaux, et le mont Covey hill au Québec s'élevant à près de 335 mètres. La partie sud se distingue

donc fortement de la région nord aux altitudes dépassant rarement les 50 mètres de hauteur (Ministère de l'environnement du Québec, 1981a).

3.2.1.2 Géologie

En majorité composées de dépôts glaciers marins, de till et d'argile, une grande partie des terres est peu perméable. Néanmoins, une partie d'entre elles, localisée entre Saint-Chrysostome et Sherrington, est constituée d'un sol de terres noires (organiques) aux caractéristiques particulières et propres à la région (Ministère de l'environnement du Québec, 1981b). En effet, issus de végétaux, les sols organiques contiennent du carbone et de la matière organique mais très peu de minéraux. Ils offrent ainsi un milieu exceptionnel pour certains légumes qui y poussent très facilement d'où leur importance commerciale et agricole. La culture s'y pratique à grande échelle, les fermes sont spécialisées dans une ou quelques variétés de légumes et leur production est essentiellement destinée aux supermarchés du Québec, des Maritimes, de l'Ontario et des États-Unis (Jardins de Napierville, 2005). L'une des propriétés les plus remarquables de la terre noire est que celle-ci peut contenir un volume d'eau pesant jusqu'à trois fois son poids.

3.2.1.3 Démographie et utilisation du territoire

La partie québécoise du bassin versant est la plus « praticable » de par ses plaines, en terme d'exploitation, notamment agricole (versus la partie montagneuse des États-Unis). Ainsi, une grande partie de la population de la région, soit environ 15 000 habitants, s'y retrouve principalement répartie entre les villes de Sainte-Martine, Saint-Jean-Chrysostome, Sainte-Clothilde, Très-Saint-Sacrement, Saint-Urbain-Premier et Howick. Seuls environ 3500 habitants vivent quant à eux du côté des États-Unis répartis entre les régions de Mooers et Clinton (Roy, 2000).

L'agriculture représente quant à elle l'activité la plus importante de la région et son véritable moteur économique, d'une part grâce à la qualité des terres (organiques principalement comme mentionnées en 3.2.1.2) et d'autre part grâce aux conditions climatiques favorables, faisant notamment référence à la qualité d'ensoleillement dont bénéficie le territoire (SCABRIC, 2004). La répartition et l'utilisation du territoire du bassin de la rivière des Anglais sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I
Utilisation de la portion québécoise du bassin
de la rivière des Anglais

| Zone | Superficie | Pourcentage |
|--------------|--------------------|-------------|
| | en km ² | en % |
| Terres | 359,9 | 63,1 |
| Forêt | 206,44 | 36,2 |
| Eau | 2,78 | 0,5 |
| Zone urbaine | 1,39 | 0,2 |
| Total | 570,51 | 100 |

(Tiré du Ministère de l'environnement du Québec, 1981a)

3.2.1.4 Caractéristiques du réseau hydrographique

Représentant 0,5 % du pourcentage d'occupation, le réseau hydrographique du bassin versant, constitué de ruisseaux, rivières et lacs, est très dense (SCABRIC, 2004). En voici les caractéristiques principales présentées dans les tableaux II et III :

Tableau II

Caractéristiques du bassin versant
de la rivière des Anglais

| Bassin Versant | |
|------------------|---------------------|
| Superficie | 727 km ² |
| Pente moyenne | 2,3 m/km |
| Altitude minimum | 31,7 m |
| Altitude maximum | 408 m |
| Altitude moyenne | 106 m |

(Tiré du Ministère de l'Environnement du Québec, 1981a)

Tableau III

Caractéristiques de la rivière des Anglais

| Rivière | |
|---------------|---------|
| Longueur | 64,8 km |
| Dénivellement | 328 m |
| Pente moyenne | 4 m/km |

(Tiré du Ministère de l'environnement du Québec, 1981a)

Quelques ouvrages hydrauliques présents sur le bassin affectent également l'écoulement souterrain et de surface comme par exemple l'exploitation d'un barrage à la hauteur de la ville de Huntingdon ou le dragage de canaux au cours des années 1970 dans le nord-est du bassin versant (Ministère de l'environnement du Québec, 1981c).

3.2.2 Problèmes hydrologiques

Deux phénomènes naturels représentent les principales sources d'angoisse de tout agriculteur : l'inondation et la sécheresse. L'une des caractéristiques marquantes du bassin de la rivière des Anglais est que ce dernier est aussi bien victime d'une trop forte densité de crues que d'étiages trop persistants.

3.2.2.1 Les inondations

Les inondations surviennent fréquemment sur la rivière Châteauguay et tout particulièrement sur l'un de ses tributaires qu'est la rivière des Anglais. Une première idée consisterait à penser que ces dernières pourraient être associées à la crue printanière, celles-ci survenant de manière récurrente au mois d'avril et étant causées par une fonte hâtive du couvert nival, par les embâcles et les débâcles ou une combinaison des deux sur la rivière. De plus, le phénomène pourrait être amplifié par le fait que le sol puisse être pour sa grande partie gelé. Toutefois, l'influence des crues d'automne et d'été semble dans le cas du bassin de la rivière des Anglais être la plus importante et représente les périodes durant lesquelles l'humidité du sol joue pleinement son rôle. En effet, plusieurs inondations récentes furent liées aux pluies survenues durant les mois de Juin et Juillet, l'intensité de ces dernières étant trop fortes, le sol étant ainsi quant à lui totalement saturé. La modélisation de l'humidité du sol, thème principal de cette étude, pourrait ainsi représenter l'une des solutions les plus appropriées à la prévision du phénomène d'inondation.

3.2.2.2 L'étiage

Survenant cette fois-ci en général en plein mois de Juillet, le phénomène d'étiage entraîne principalement l'assèchement des ruisseaux et l'apparition de végétation à l'intérieur du lit mineur, c'est-à-dire la zone limitée par les berges. Cette dernière peut

être responsable des problèmes de qualité de l'eau et peut, dans certains cas extrêmes, provoquer l'obturation du canal et de par la même la diminution du débit du cours d'eau favorisant la stagnation de l'eau.

3.2.3 Données hydrométéorologiques disponibles : le réseau Mésonet-Montréal

3.2.3.1 Origines

Le réseau Mésonet-Montréal est issu de l'association de deux groupes de recherche subventionnés par le fonds canadien de l'innovation. A l'origine, le premier groupe avait pour objectif principal d'installer des capteurs spécialisés notamment dans le bassin versant de la rivière des Anglais afin de fournir une forte densité spatiale de données nécessaires aux recherches de divers groupes en hydro météorologie et en agro météorologie. Le deuxième groupe quant à lui avait pour principal objectif de développer et moderniser les équipements de télédétection atmosphérique (radars) ainsi que d'implanter un réseau de 20 à 25 stations météorologiques automatiques dans un rayon de 100 à 150 km autour de Montréal. Cela devrait ainsi permettre de faciliter et d'approfondir les connaissances sur les phénomènes atmosphériques convectifs tels que les orages violents ou bien même d'améliorer les prévisions météorologiques à court terme des chutes de pluie et des épisodes de temps violent tels que les orages, tempête de neige ou même les tornades.

Les deux groupes ont alors décidé d'unifier leurs efforts pour répondre au mieux aux besoins actuels de la population pour ainsi créer le réseau Mésonet-Montréal (Mésonet-Montréal, 2005).

3.2.3.2 Objectifs

Plusieurs domaines de recherche ainsi que plusieurs organisations telles qu'Environnement Canada ou Hydro-Québec pourront bénéficier des données fournies par le réseau Mésonet-Montréal espérant ainsi que les acquis d'aujourd'hui portant notamment sur les phénomènes convectifs, l'identification et la mesure des précipitations, l'agriculture de précision ou encore l'hydrologie puissent être approfondis, développés et enfin, transmis (Mésonet-Montréal, 2005).

3.2.3.3 Description du réseau

De par son ensemble de stations météorologiques automatiques toutes proches les unes des autres (plus ou moins 30 km) et toutes situées dans un rayon de quelques 100 km autour de Montréal (150 km vers l'ouest), le réseau Mésonet-Montréal peut être défini comme étant un outil de recherche dans plusieurs domaines divers mais reliés tels que la météorologie, l'hydrologie ou encore l'agro météorologie.

De manière plus précise, le Mésonet-Montréal est à l'origine constitué de 13 stations exploitées par Environnement Canada auxquelles s'ajoutent 35 stations météorologiques qui sont installées principalement dans les alentours de Montréal et certaines dans les régions Centre du Québec et Bas Saint-Laurent (Mésonet-Montréal, 2005).

Dans le cas présent, 7 stations toutes situées au niveau du bassin de la rivière des Anglais feront l'objet de l'étude : Howick, L'Artifice, Ruisseau Cranberry, Russeltown, Saint-Chrysostome, Sainte-Clothilde et enfin Saint-Michel. La localisation de ces dernières peut être précisée à la l'aide de la carte suivante :

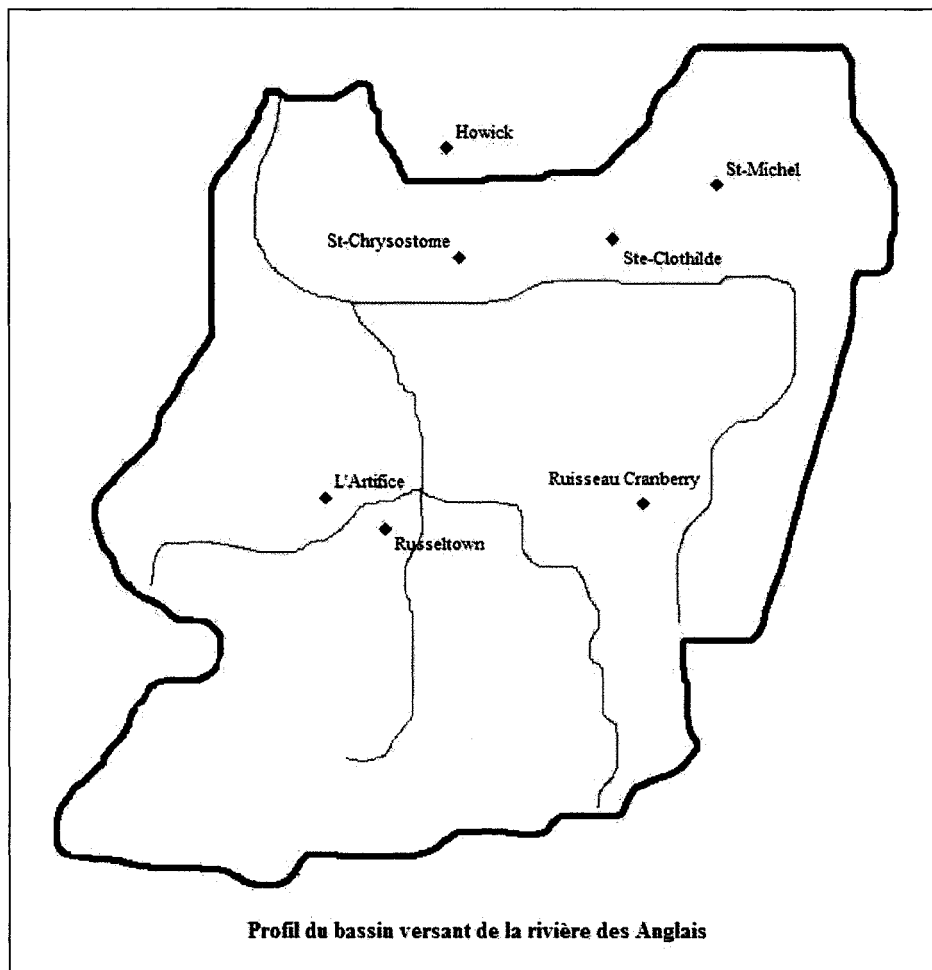


Figure 4 Profil du bassin versant de la rivière des Anglais

3.2.3.4 Description et acquisition des données disponibles

Pour chaque station du réseau, de nombreuses informations sont disponibles, souhaitant obtenir une mesure instantanée ou cumulée de pression, de précipitation et même d'humidité, ceci à des intervalles de temps divers de l'ordre de la minute, de cinq minutes ou encore de l'heure. Ces données sont disponibles aux usagers selon divers modes dont Internet qui fut ici le moyen le plus simple et le plus rapide. En effet, le site web du réseau permet d'accéder et de télécharger gratuitement les données météorologiques actuelles sous format de fichier ASCII, ceci pour chacune des stations

désirées. Pour cela, il faut être un membre du regroupement en Hydro-météorologie (Projet HYMAP) et avoir un nom d'utilisateur et un mot de passe (Mésonet-Montréal, 2005). L'ensemble des stations et des données acquises correspondantes sont présentées aux tableaux IV et V :

Tableau IV

Liste des stations

| |
|--------------------|
| Howick |
| L'artifice |
| Ruisseau Cranberry |
| Russeltown |
| St-Michel |
| St-Chrysostome |
| Ste-Clothilde |

Tableau V

Liste des requêtes

| |
|--------------------------------------|
| Taux de précipitation 60 mins |
| Température moyenne de l'air 60 mins |
| Temps de propagation 0-15 cm |
| Temps de propagation 15-30 cm |
| Temps de propagation 30-45 cm |
| Temps de propagation 45-60 cm |
| Temps de propagation 60-90 cm |

3.2.3.5 Description de l'appareil de mesure « moisture point »

L'ensemble « moisture point » est l'appareil permettant à l'ensemble des stations du réseau Mésonet-Montréal de pouvoir mesurer et déterminer les valeurs d'humidité à différentes profondeurs du sol. Cet outil est constitué d'un boîtier bleu, d'un câble et d'une tige, soit la sonde proprement dite. Par ailleurs, cet appareil utilise la technologie TDR ("Time Domain Reflectometry") pour calculer un profil d'humidité volumétrique du sol à partir de mesures du temps de propagation d'une impulsion électrique envoyée par l'appareil vers la sonde. Avec une précision estimée à 3 % pour un sol cultivé, il est également important de mentionner le fait que l'appareil effectue une moyenne de la valeur d'humidité obtenue sur un volume de sol entre les intervalles spécifiés (Young, 2005). Dans le cas des stations Mésonet-Montréal, les sondes du « moisture point » rendent les mesures pour les segments suivants : 0-15, 15-30, 30-45, 45-60 et 60-90 cm de profondeur.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

L'ensemble des problématiques entourant le territoire et le nombre important de stations présentes sur ce dernier font du bassin versant de la rivière des Anglais l'un des sites les plus intéressants à étudier. L'École de technologie supérieure travaillant par ailleurs de manière active sur ce bassin, le besoin de développer son propre outil de modélisation hydrologique devient aujourd'hui une nécessité. L'élaboration du modèle et la méthodologie s'y rapportant sont décrites dans le présent chapitre.

A titre de rappel, l'objectif principal de cette étude est de déterminer si l'assimilation des données d'humidité du sol dans le processus de modélisation hydrologique représente réellement un ajout en terme de qualité et précision des prévisions. Tout en mettant l'accent sur le caractère exploratoire de l'étude, quatre approches de simulation différentes mais liées ont été menées. La transition entre chaque méthode a consisté à démontrer les améliorations, en terme de qualité de simulation, relatives aux différents changements apportés au modèle. Ainsi, le passage de la méthode 1 à la méthode 2 réside à mettre en valeur les premières améliorations relatives à l'intégration des données d'humidité du sol lors du processus de modélisation hydrologique. Le passage de la méthode 2 à la méthode 3 consiste cette fois-ci à mettre en valeur les avantages liés à l'utilisation d'un modèle distribué. Enfin, le passage de la méthode 3 à la méthode 4 permet de déterminer si l'utilisation d'une méthode de remise à jour des paramètres d'infiltration permet de bonifier la qualité des prévisions. Chacune des ces méthodes sera abordée dans les sections suivantes.

4.1 Choix du modèle

Tout d'abord et pour les mêmes raisons que mentionnées lors du chapitre 2, l'une des caractéristiques fondamentales du modèle à choisir est la propriété de distributivité de ce dernier. Bien entendu, les modèles distribués sont aujourd'hui nombreux possédant chacun leurs propres caractéristiques. Toutefois, le bassin versant de la rivière des Anglais représentant l'un des sites sur lequel l'ÉTS travaille le plus activement, ce dernier présentant par ailleurs de nombreuses caractéristiques particulières, notamment concernant la nature de son sol, le développement d'un modèle spécifique à ce terrain devient aujourd'hui une nécessité. De plus et point important, il paraît indispensable dans le cadre de l'étude de pouvoir avoir accès au code source du modèle afin de pouvoir y apporter les modifications nécessaires et opportunes.

Dès lors, le choix s'est naturellement porté vers un modèle « maison » dit « des Anglais », élaboré ces dernières années par l'équipe du laboratoire de Développement et recherche appliquée en modélisation environnementale (DRAME) de l'École de technologie supérieure et dont les caractéristiques principales sont présentées tout au long du paragraphe suivant.

4.2 Description du modèle des Anglais

Le modèle des Anglais est composé de deux programmes distincts, soit le modèle hydrologique et le modèle hydraulique, ces derniers étant très bien résumés dans le rapport élaboré par Marie Minville et intitulé « Élaboration d'un modèle d'hydrologie : Paramétrage, calage et validation pour le bassin versant de la rivière des Anglais » (Minville, 2004). Tout d'abord, le modèle hydrologique a comme fonction de simuler le cheminement de l'eau à l'échelle du bassin versant jusqu'à la rivière. Il est de type numérique à bases physiques, c'est-à-dire qu'il s'appuie sur les phénomènes du cycle de l'eau pour livrer la réponse d'un bassin suite à un événement pluvieux. La distribution

spatiale est assurée par des éléments triangulaires d'environ quatre kilomètres de superficie dont l'altitude est interpolée à partir d'un modèle numérique de terrain. Les processus considérés concernent le ruissellement et l'infiltration, simulés avec les équations de Manning et de Green et Ampt respectivement. Le modèle hydraulique a comme rôle de récupérer les apports à la rivière obtenus par l'entremise du modèle hydrologique et à les faire progresser dans les tronçons de rivière. Le laminage de crue est simulé avec l'équation de Muskingum-Cunge et il permet de connaître la variation des débits dans le temps afin de générer des hydrogrammes de ruissellement. Le but de ce projet étant de mettre en valeur l'influence de l'assimilation des données d'humidité sur le processus de modélisation, l'utilisation d'un modèle « simplifié » tel que le modèle des Anglais permettra de valider les résultats.

La triangulation du bassin est illustrée grâce à la figure suivante :

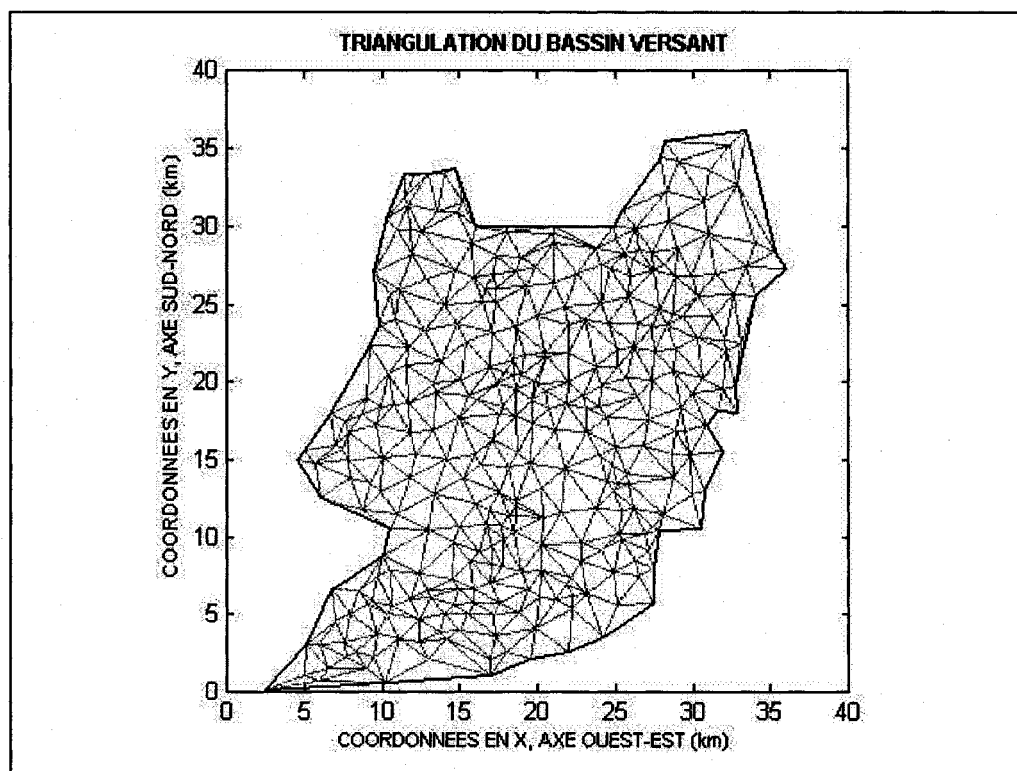


Figure 5 Triangulation du bassin versant

4.3 Choix des événements pluvieux

Les données de précipitation totale disponibles à partir du réseau Mésonet-Montréal le sont pour toutes les 5 minutes ou toutes les heures. Une trop grande précision et un trop grand nombre de données étant ici inutiles, le choix s'est alors porté sur les données horaires de précipitation. Par ailleurs, une série de données s'étalant du 15 Avril 2005 au 30 Novembre 2005 fut sélectionnée. Une fois les données acquises, les événements pluvieux qui semblent les plus remarquables sont alors extraits. Ces derniers sont au nombre de quatre et sont mis en valeur à l'aide de la figure qui suit où le temps 0 correspond à la date du 15 Avril 2005 à minuit :

- Du 20 Avril au 3 Mai 23h (rouge);
- Du 13 Juin au 18 Juin 23h (vert);
- Du 28 Août au 1^{er} Sept 23h (bleu);
- Du 7 Octobre au 27 Octobre 23h (turquoise).

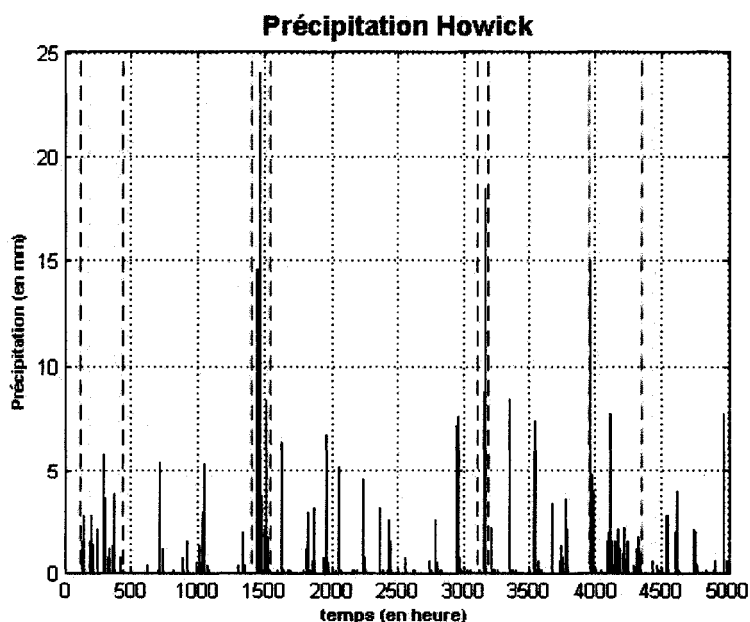


Figure 6 Précipitation Howick

La figure 6 montre que les périodes de pluie extraites correspondent à des périodes à forte activité, présentes par ailleurs pour chaque station étudiée, justifiant ainsi ce choix.

Ensuite, le choix a été fait de considérer, pour chaque événement, les dix jours antérieurs afin de pouvoir établir l'état de l'humidité du sol initiale par l'intermédiaire du calcul de l'Indice de Précipitation Antécédente (IPA), ainsi que les deux jours ultérieurs afin de pouvoir suivre l'évolution de l'état du sol après une forte précipitation. Voici donc au final les différentes périodes sélectionnées :

- a. 15 Avril au 5 Mai 23h;
- b. 3 Juin au 20 Juin 23h;
- c. 18 Août au 3 Septembre 23h;
- d. 27 Septembre 10h au 29 Octobre 23h.

N.B : les données du 27 Septembre ont été compilées qu'à partir de la dixième heure car les données antérieures sont manquantes.

4.4 Approches de la modélisation

Au cours de l'étude, différentes méthodes d'approche de modélisation ont été considérées ayant toutes comme principal objectif de minimiser les écarts entre les débits simulés par le modèle des Anglais et les débits observés. Pour ce faire, l'une des étapes fondamentales à accomplir est de pouvoir déterminer l'ordre de grandeur des paramètres d'infiltration de la méthode dite de « Green et Ampt ». En effet, l'estimation de l'importance du processus d'infiltration permet de quantifier quelle fraction de la pluie va participer au ruissellement de surface et donc au débit, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et donc aussi participer à la recharge des nappes souterraines. C'est donc à l'aide des équations de cette dernière méthode que le modèle des Anglais intègre le processus d'infiltration. Ainsi, et pour une meilleure

compréhension, il est préférable tout d'abord de commencer par décrire la méthode d'infiltration de Green et Ampt.

4.4.1 Méthode d'infiltration de Green et Ampt

L'infiltration correspond au transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol. Après avoir rempli les premiers interstices du sol, l'eau pénètre alors dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion. Plusieurs facteurs influencent l'infiltration dont notamment le type de sol, la compaction de la surface du sol, la couverture du sol, la topographie, le débit d'alimentation ou enfin la teneur en eau initiale du sol (Musy, 1995). La modélisation du processus d'infiltration peut, quant à elle, être réalisée selon différentes approches, soit basée sur des relations empiriques à deux, trois ou quatre paramètres, soit à base physique. Le modèle de Green et Ampt fait partie des modèles à base physique mais reste néanmoins également quelque peu empirique car son utilisation nécessite la détermination expérimentale de la valeur de la charge de pression au front d'humidification. Ce dernier décrit d'une manière simplifiée le mouvement de l'eau dans le sol, en particulier au niveau du front d'humidification et en fonction de certains paramètres physiques. Ce modèle repose sur des hypothèses simplificatrices qui impliquent une schématisation du processus d'infiltration telle que présentée sur la figure 7 :

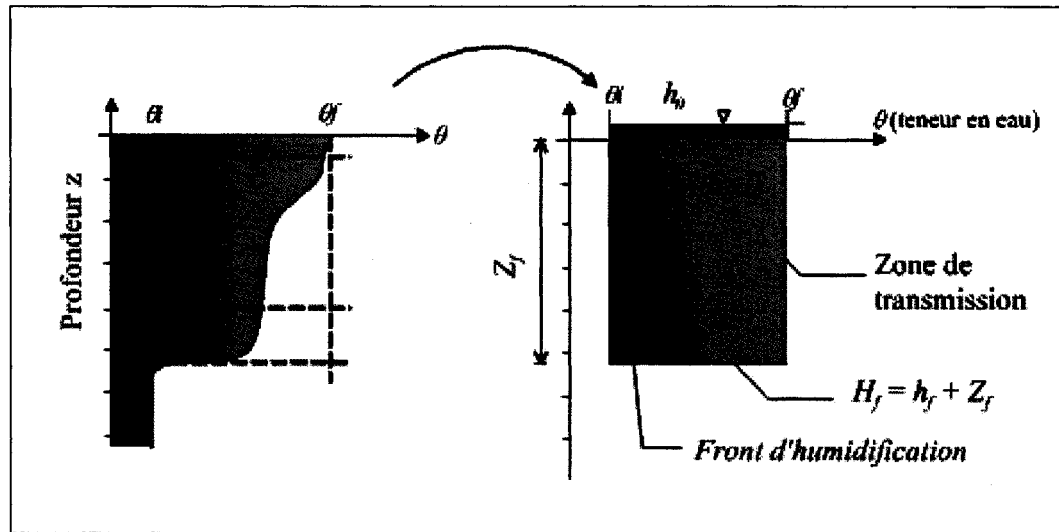


Figure 7 Processus d'infiltration selon Green et Ampt
(Tiré de Musy et Soutter, 1991)

Cette méthode est basée sur l'hypothèse d'une progression de l'humidité du sol semblable à un piston et à la présence d'un front mouillant distinct séparant la zone humide et la zone sèche tout en supposant que la teneur en eau de la zone de transmission est uniforme. Également basée sur la loi de Darcy, les paramètres hydrodynamiques du sol pris en compte sont principalement les charges hydrauliques totales au niveau du front d'humidification (H_f est la somme de la hauteur d'eau infiltrée depuis le début de l'alimentation - Z_f - et de la charge de pression au front d'humidification - h_f) et en surface ($H_0 = h_0 =$ charge de pression en surface) (Musy, 1995). Toutefois, en ce qui concerne le modèle des Anglais, son utilisation requiert l'estimation du déficit volumétrique à saturation ($D\theta_{\text{éta}}$), de sa conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et de la charge de succion au front mouillant (H_c), paramètres revus plus en détail par la suite (Roy, 2000).

Ainsi, quatre méthodes furent utilisées afin de déterminer l'ordre de grandeur de ces paramètres. La première consiste tout d'abord à calculer les Indices de Précipitation Antécédente (IPA). En effet, ces derniers permettront de déterminer la valeur de $D\theta_{\text{éta}}$,

les autres paramètres étant par la suite définis suite à une calibration réalisée sur le modèle des Anglais (Minville, 2004). La deuxième méthode utilisera cette fois-ci les données d'humidité du sol observées afin de réévaluer le paramètre Dthéta, la calibration des autres paramètres sera quant à elle inchangée. Ainsi, la comparaison des résultats des deux méthodes permettra d'établir si l'assimilation des données d'humidité du sol lors des simulations apporte réellement une plus value quant à la précision des résultats. D'autre part, il est important de signaler dès à présent que lors de ces deux premières méthodes, la pluie ainsi que le sol seront considérés comme étant uniformes sur tout le bassin. En effet, lors de la troisième méthode, ces derniers seront cette fois-ci distribués afin de vérifier les avantages liés à l'utilisation d'un modèle distribué. Enfin, la quatrième et dernière méthode utilisera de nouveau les propriétés de distributivité du modèle couplées à une procédure de remise à jour ponctuelle des paramètres du sol.

4.4.2 Méthode 1 : Utilisation des Indices de Précipitation Antécédente (IPA)

L'état de l'humidité du sol fait partie d'une des caractéristiques les plus importantes à déterminer, notamment dans le cadre de cette étude. Toutefois, cette dernière est difficile à mesurer car très variable dans l'espace et dans le temps. Ainsi, plusieurs indices caractérisant les conditions d'humidité antécédentes à une pluie sont souvent utilisés et mis en jeu (Musy, 1995). L'Indice de Précipitation Antécédente (IPA) prend en considération les précipitations tombées au cours des jours précédant l'averse, pondérées par le nombre de jours jusqu'au début de la précipitation simulée, en admettant que la précipitation la plus récente se voit attribuer le poids le plus fort.

$$IPA = \sum_i k^i P_i \quad (4.1)$$

IPA : indice de précipitation antécédente (mm) ;

P_i : hauteur de pluie au jour i précédant le début de l'averse (mm) ;

i : nombre de jours précédant le début de l'averse ;

k : constante de 0,85 pour le Québec.

Dans le cadre de l'étude, une durée de 5 jours fut arbitrairement fixée et correspond au nombre de jours précédant l'averse du premier événement pour le calcul de l'IPA, les données antérieures étant manquantes. Une durée de 10 jours le fut pour les trois autres événements, les calculs ayant été réalisés à l'aide des données de précipitation pour chaque station.

Une fois les indices de précipitation antécédente calculés, la calibration réalisée par Marie Minville sur le modèle des Anglais permet alors de pouvoir déterminer l'ordre de grandeur des paramètres de Green et Ampt tel que les divergences lors de la comparaison entre les débits simulés et observés soient minimales (Minville, 2004). Pour cela, plusieurs simulations et itérations seront nécessaires afin d'obtenir un ensemble de solutions optimales, ces dernières étant ensuite évaluées par le critère de Nash. En effet, la qualité de la méthode de calage est appréciée en évaluant les simulations du modèle, effectuées dans la phase de contrôle. Le critère classique a la forme suivante :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{calc_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (4.2)$$

Dans cette dernière équation, n représente le nombre total de jours d'une période de contrôle, Q_{obs} est le débit observé le jour i et Q_{calc} est le débit calculé le jour i . Quant

aux résultats du critère, ces derniers varient entre $]-\infty ; 1]$. L'équation suivante permet quant à elle de réduire l'intervalle de variation à $]-1;1]$.

$$C2M = \frac{Nash}{2 - Nash} \quad (4.3)$$

Les nouvelles limites du critère de validation permettent ainsi de ne pas donner trop d'importance aux valeurs fortement négatives en contrôle, la valeur 1 étant obtenue lorsque les écarts entre les débits calculés et observés sont nuls. Par ailleurs, deux autres critères furent implémentés afin encore une fois d'évaluer au mieux la qualité des résultats, ces derniers étant les calculs des rapports de volume et des débits de pointe maximale exprimés en pourcentage d'erreur.

4.4.3 Méthode 2 : Utilisation des données d'humidité

Une fois les événements pluvieux choisis, les données observées d'humidité du sol correspondantes pour chaque station et chaque période de temps furent téléchargées, ces dernières étant également accessibles sur le réseau Mésonet-Montréal. Cela a ainsi permis par la suite de pouvoir tracer et analyser les profils d'humidité du sol afin d'en déduire l'ordre de grandeur du déficit volumétrique à saturation correspondant. Une fois encore, les simulations furent tout d'abord réalisées à l'aide d'une pluie et d'un sol uniformes sur tout le bassin, l'emploi du modèle de manière distributive étant réservé pour la prochaine méthode. Enfin, un certain nombre de simulations et d'itérations seront nécessaires afin d'obtenir un ensemble de solutions optimales, le critère de Nash étant une nouvelle fois employé.

4.4.4 Méthode 3 : Utilisation des données d'humidité avec paramètres de sol distribués

La méthodologie employée à cette étape reste somme toute identique à la méthode précédente. La différence majeure réside en réalité dans le fait que la pluie ainsi que le sol seront désormais distribués alors que ces derniers étaient jusqu'à présent considérés comme étant uniformes. Ainsi, la transition entre la deuxième et la troisième méthode consiste à mettre en avant les avantages reliés à l'utilisation d'un modèle distribué.

4.4.5 Méthode 4 : Rétroaction entre les débits simulés et observés

La méthode de rétroaction consiste en l'élaboration d'un programme permettant une « auto correction » locale des valeurs des variables internes du modèle, en particulier celle du déficit volumétrique à saturation, afin de minimiser au mieux les écarts entre les valeurs de débits simulés et observés, ceci étant de plus effectué idéalement de façon continue dans le temps et durant l'averse. Pour cela, le choix de la démarche à employer fut déterminé après analyse de la relation entre les simulations calculées par le modèle et les observations disponibles pour les événements « importants ». Tout en sachant que les propriétés de distributivité du modèle seront ici conservées, les détails de la procédure mise en place seront quant à eux présentés plus longuement lors du prochain chapitre.

4.4.6 Pluie uniforme

L'un des premiers objectifs du modèle étudié est, à titre de rappel, de simuler et d'établir des prévisions des débits à l'exutoire du bassin versant à partir des données d'entrée de précipitation des sept stations sollicitées. Toutefois, il a été décidé dans un premier temps de faire fonctionner le modèle à partir des données de précipitation d'une pluie uniforme sur tout le bassin. En effet, diminuant d'une part le nombre de données à prendre en compte et simplifiant ainsi les calculs, l'emploi d'une telle stratégie permettra

également de pouvoir établir un ordre de grandeur des paramètres à utiliser par la suite lorsque l'hétérogénéité du territoire sera cette fois-ci prise en compte. Enfin et surtout, la création de la pluie uniforme permettra d'effectuer une comparaison et de mettre en valeur les avantages et améliorations potentiels des résultats liés à l'utilisation d'un modèle distribué vis-à-vis d'un modèle non distribué.

Pour cela, la pluie fut créée à partir de l'ensemble des données de chaque station ainsi qu'à l'aide de la fonction des polygones de Thiessen dont un rappel du principe est présenté en annexe 2. Le passage par la suite à un modèle distribué permettra alors de mettre l'accent sur l'importance à accorder aux propriétés du sol à chaque station, ces dernières étant soit localisées en région dite de « terre noire » soit en milieu principalement argileux et dont les propriétés sont divergentes.

4.4.7 Modèle distribué

Le paragraphe suivant a non pas pour objectif de définir ce qu'est un modèle distribué, la description et les avantages de ce dernier étant décrits lors du deuxième chapitre, mais de fournir au lecteur un éclaircissement quant au contexte lors duquel les termes « modèle distribué » seront par la suite employés.

En effet, à l'origine, le modèle des Anglais, de par ses caractéristiques, peut être décrit comme étant un modèle distribué. Toutefois, il appartient à l'utilisateur de l'utiliser en tant que tel ou bien de telle manière à ce que les propriétés de distributivité de ce dernier ne soient pas prises en compte. L'élaboration de ce mémoire a requis l'utilisation du modèle et la définition de deux jeux de variables principaux : les données d'entrée que sont les données de précipitation et les paramètres du sol que sont les paramètres de Green et Ampt. Les différents choix possibles et relatifs à ces derniers sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau VI

Caractérisation du modèle distribué

| Données d'entrée | | Paramètres du sol | |
|------------------|------------------------|---|---|
| Pluie uniforme | Pluie à chaque station | Paramètres uniformes sur tout le bassin | Paramètres différents à chaque maille du modèle |

| |
|---|
| MODELE DISTRIBUE |
| Pluie à chaque station |
| ET |
| Paramètres différents à chaque maille du modèle |

Le tableau ci-dessus permet de distinguer deux types de distributivité possibles pour les simulations à venir, soit la distributivité de la pluie et celle du sol. C'est pourquoi il est important dès à présent de mentionner le fait que les termes « modèle distribué » ne seront utilisés que lorsque la distributivité sera prise en compte à la fois pour la pluie et pour le sol, sinon quoi le type de distributivité devra être précisé.

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION DES DONNÉES ET DES RÉSULTATS

Plusieurs étapes ont été nécessaires afin de pouvoir réaliser les simulations sur le bassin versant de la rivière des Anglais. La présentation et l'interprétation des résultats sont rendues possibles suite à l'utilisation du modèle hydrologique des Anglais, les hydrogrammes produits correspondant aux résultats des différentes simulations utilisant les mesures de précipitation observées en tant que données d'entrée.

Cette section présentera dans un premier temps le traitement et l'exploitation des données observées et mesurées par le réseau Mésonet-Montréal. Ensuite, les résultats relatifs à chacune des quatre approches de simulation introduites dans ce chapitre seront présentés.

5.1 Traitement et exploitation des données Mésonet-Montréal

Afin de faciliter la compréhension du lecteur et d'alléger le contenu du rapport, seule une partie des données mesurées et utilisées sera ici présentée. Toutefois, il sera bien entendu possible de trouver un complément de ces dernières en annexe respectivement pour chaque section.

5.1.1 Les données de précipitation

Lors du chapitre précédent, la méthodologie relative au choix des événements pluvieux a été présentée. Ces derniers ont été extraits d'un ensemble de données couvrant la période du 15 Avril 2005 au 30 Novembre 2005 et dont le format original après téléchargement auprès de la banque de données du réseau Mésonet-Montréal est le suivant :

Howick Precip - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

Les données sont l'entières propriété du Mésonet-Montréal

| IdStation | Date de capture | Code de qualité | Code de la mesure | valeur |
|-----------|-------------------------|-----------------|-------------------|--------|
| 886 | 2005-04-15 00:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 01:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 02:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 03:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 04:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 05:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 06:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 07:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 08:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 09:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 10:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 11:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 12:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 13:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 14:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 15:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 16:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 17:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 18:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 19:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 20:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 21:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-15 22:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 00:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 01:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 02:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 03:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 04:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 05:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 06:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 07:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 09:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 10:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 11:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 12:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 13:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 14:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 15:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 16:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 17:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 18:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 19:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 20:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 21:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 22:00:00.000 | B | 108 | 0 |
| 886 | 2005-04-16 23:00:00.000 | B | 108 | 0 |

Figure 8 Fichier original de précipitation pour la station Howick

Comme observé ci-dessus, le fichier original obtenu, pour chacune des stations est sous la forme d'un fichier bloc note et procure les données horaires de précipitation pour la période désirée. Ainsi, après traitement de ces dernières, il est possible d'obtenir ces

mêmes fichiers sous format Matlab contenant cette fois-ci des données journalières de précipitation. L'ensemble des hyétogrammes obtenus à partir de ces dernières et le débit à l'exutoire du bassin versant peuvent être présentés de la manière suivante :

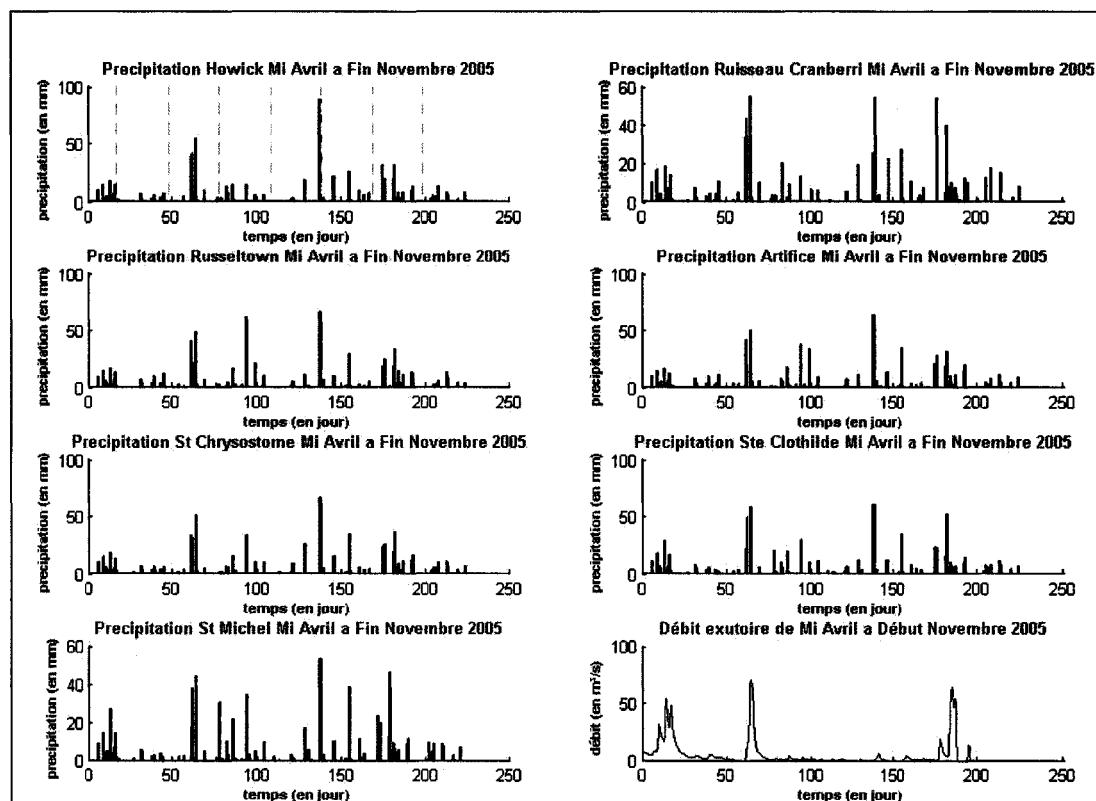


Figure 9 Hyétogrammes de précipitation journalière de chaque station de mi-avril à fin novembre et débit à l'exutoire

En particulier, voici présenté ci-dessous l'ensemble des données de pluie journalières pour cette fois-ci chacun des quatre événements tels que définis précédemment présentées sous forme de hyétogrammes, ceci uniquement pour la station Howick. L'ensemble des données des autres stations seront quant à elles présentées de la même manière en annexe 3. De même, un extrait des mesures de précipitations journalières présentées cette fois-ci sous forme d'un tableau y est également proposé.

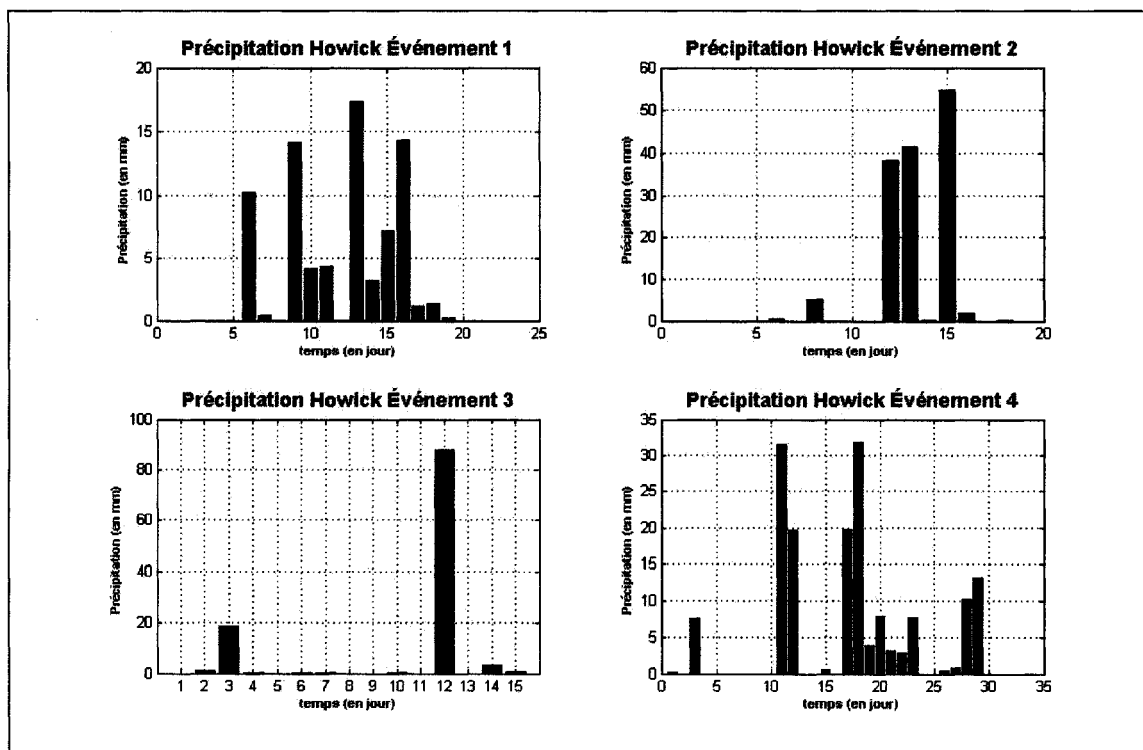


Figure 10 Précipitation Howick

Les événements premier et quatrième peuvent être assimilés à des pluies à moyenne intensité mais à durée assez longue contrairement aux événements deuxième et troisième dont l'intensité des pluies est bien plus importante mais à courte durée. Dès lors, les résultats des simulations devraient refléter et mettre l'accent sur l'ensemble de ces disparités et feraient ainsi gage de la qualité de la modélisation.

Ensuite et à l'aide de l'ensemble des données de précipitation des sept stations à l'étude à chaque événement et à l'aide de la fonction des polygones de Thiessen, il fut possible de créer et d'obtenir une pluie uniforme sur tout le bassin dont la description est présentée à l'aide des hyétoigrammes suivants :

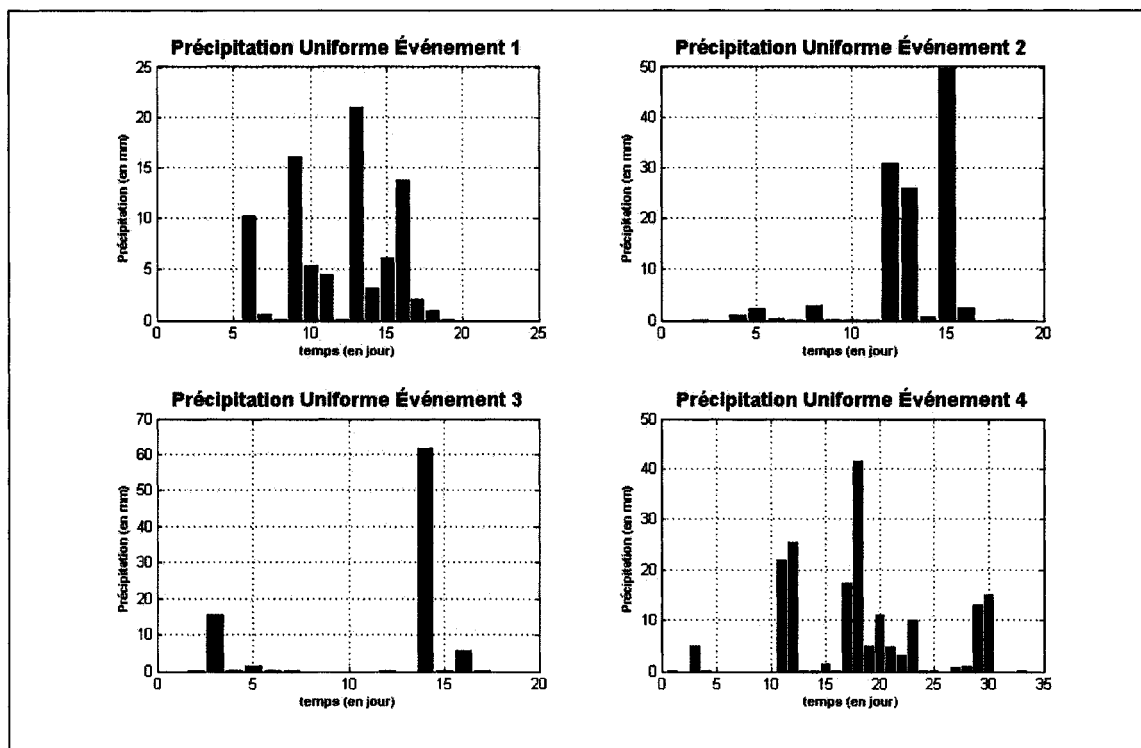


Figure 11 Précipitation Uniforme

Il est notamment possible ici de vérifier l'adéquation des données de précipitation uniforme comparativement aux données brutes de précipitation. Pour cela, il suffit entre autre de vérifier les correspondances entre les dates d'occurrence ainsi que des intensités des événements remarquables.

Par ailleurs, le lecteur pourra trouver ci-dessous l'ensemble des valeurs de l'Indice de Précipitation Antécédente relatif à chaque événement et chaque station.

Tableau VII

Indices de Précipitation Antécédente (en mm)

| | Événement 1 | Événement 2 | Événement 3 | Événement 4 |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Howick | 0,00 | 3,37 | 5,78 | 2,11 |
| Artifice | 0,00 | 3,69 | 3,15 | 1,20 |
| Ruisseau Cranberry | 0,00 | 3,98 | 5,29 | 1,63 |
| Russeltown | 0,00 | 2,51 | 3,67 | 1,51 |
| St-Chrysostome | 0,00 | 3,81 | 7,95 | 1,30 |
| Ste-Clothilde | 0,00 | 3,28 | 5,03 | 0,98 |
| St-Michel | 0,00 | 2,93 | 7,41 | 1,20 |
| Pluie Uniforme | 0,00 | 3,38 | 4,98 | 1,39 |

5.1.2 Les données d'humidité

Les données d'humidité originales fournies par la banque de données du réseau Mésonet-Montréal se présentent exactement dans le même format que celles des précipitations étudiées précédemment à l'exception près qu'elles le sont à tous les 5 minutes d'intervalle et qu'elles représentent, non pas des pourcentages volumétrique de l'humidité du sol comme souhaités, mais des temps de propagation calculés par les sondes « moisture point ». Ainsi, une première étape de conversion de la mesure du temps de propagation en humidité volumétrique doit être réalisée, cette dernière étant présentée et décrite dans l'annexe 1. Dès lors, après traitement sont obtenues au final ces données d'humidité pour chaque heure et sous format Matlab. Ainsi, l'ensemble des données de précipitation et d'humidité pour chaque segment, chaque événement et ceci pour chaque station furent compilées et présentées de la manière suivante :

Tableau VIII

Humidité Howick Événement 1 (2 jours)

| Année | Mois | Jour | Heure | Précipitation | 0-15 cm | 15-30 cm | 30-45 cm | 45-60 cm | 60-90 cm |
|-------|------|------|-------|---------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| 2005 | 4 | 15 | 0 | 0 | 0,28 | 0,45 | 0,43 | 0,43 | 0,36 |
| 2005 | 4 | 15 | 1 | 0 | 0,28 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 2 | 0 | 0,28 | 0,44 | 0,43 | 0,42 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 3 | 0 | 0,28 | 0,45 | 0,44 | 0,44 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 4 | 0 | 0,27 | 0,46 | 0,49 | 0,46 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 5 | 0 | 0,28 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 6 | 0 | 0,24 | 0,43 | 0,47 | 0,50 | 0,39 |
| 2005 | 4 | 15 | 7 | 0 | 0,29 | 0,47 | 0,48 | 0,51 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 15 | 8 | 0 | 0,26 | 0,45 | 0,50 | 0,48 | 0,42 |
| 2005 | 4 | 15 | 9 | 0 | 0,29 | 0,47 | 0,52 | 0,53 | 0,41 |
| 2005 | 4 | 15 | 10 | 0 | 0,26 | 0,45 | 0,43 | 0,46 | 0,42 |
| 2005 | 4 | 15 | 11 | 0 | 0,27 | 0,43 | 0,43 | 0,44 | 0,39 |
| 2005 | 4 | 15 | 12 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 13 | 0 | 0,28 | 0,44 | 0,43 | 0,44 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 14 | 0 | 0,28 | 0,44 | 0,42 | 0,44 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 15 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,42 | 0,44 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 16 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,42 | 0,44 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 17 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,42 | 0,44 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 18 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,43 | 0,44 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 19 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 20 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 21 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,43 | 0,44 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 22 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,42 | 0,45 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 15 | 23 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,42 | 0,45 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 16 | 0 | 0 | 0,27 | 0,44 | 0,42 | 0,45 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 16 | 1 | 0 | 0,27 | 0,43 | 0,42 | 0,45 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 16 | 2 | 0 | 0,27 | 0,43 | 0,42 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 3 | 0 | 0,27 | 0,43 | 0,42 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 4 | 0 | 0,27 | 0,43 | 0,43 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 5 | 0 | 0,29 | 0,47 | 0,48 | 0,48 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 16 | 6 | 0 | 0,27 | 0,43 | 0,42 | 0,45 | 0,37 |
| 2005 | 4 | 16 | 7 | 0 | 0,27 | 0,43 | 0,42 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 8 | 0 | 0,26 | 0,42 | 0,45 | 0,47 | 0,39 |
| 2005 | 4 | 16 | 9 | 0 | 0,24 | 0,46 | 0,49 | 0,51 | 0,40 |
| 2005 | 4 | 16 | 10 | 0 | 0,23 | 0,46 | 0,48 | 0,48 | 0,40 |
| 2005 | 4 | 16 | 11 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,42 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 12 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,42 | 0,46 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 13 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,41 | 0,46 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 14 | 0 | 0,26 | 0,44 | 0,42 | 0,46 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 15 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,43 | 0,46 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 16 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,43 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 17 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,43 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 18 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,43 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 19 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,43 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 20 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,43 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 21 | 0 | 0,25 | 0,43 | 0,43 | 0,45 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 22 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,43 | 0,46 | 0,38 |
| 2005 | 4 | 16 | 23 | 0 | 0,26 | 0,43 | 0,42 | 0,46 | 0,38 |

Il est à noter que les données présentées ci-dessus le sont uniquement pour la station Howick et pour deux jours de temps, le reste des données étant fournies en annexe.

La description de l'ensemble de ces données est quant à elle présentée dans le tableau suivant :

Tableau IX

Description du tableau d'humidité

| | |
|------------|---|
| colonne 1 | année |
| colonne 2 | mois |
| colonne 3 | jour |
| colonne 4 | heure |
| colonne 5 | Précipitation en mm |
| colonne 6 | humidité du segment 0-15 cm en m^3/m^3 |
| colonne 7 | humidité du segment 15-30 cm en m^3/m^3 |
| colonne 8 | humidité du segment 30-45 cm en m^3/m^3 |
| colonne 9 | humidité du segment 45-60 cm en m^3/m^3 |
| colonne 10 | humidité du segment 60-90 cm en m^3/m^3 |

Ensuite et de manière à mieux illustrer la corrélation existante entre les phénomènes de précipitation et d'humidité, il est proposé par la suite un ensemble de graphiques superposant l'ensemble de ces données à chaque événement et dans le cas particulier de la station Howick et pour le segment le plus en surface c'est-à-dire le segment 0-15 cm.

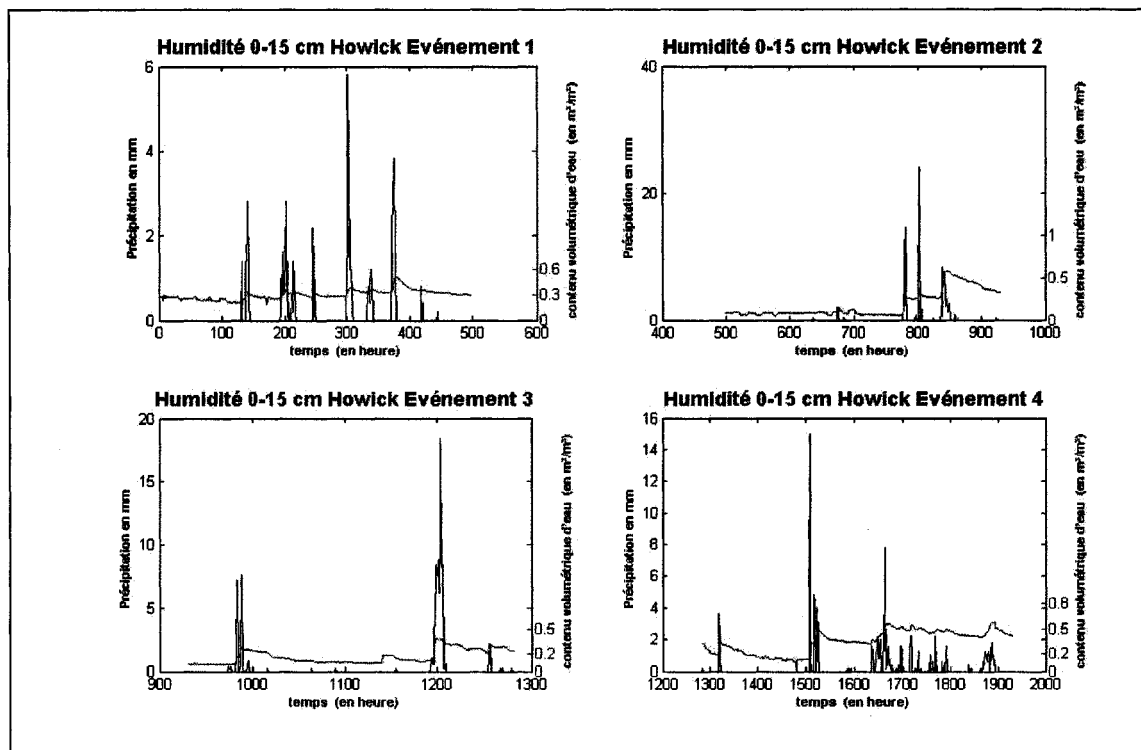


Figure 12 Humidité 0-15 cm Howick et Précipitation

La figure 12 peut rassurer quant aux correspondances existantes entre les données de précipitation présentées en bleu et les données d'humidité du segment 0-15 cm représentées elles en vert. En effet, à chaque pic de précipitation correspond une augmentation nette du contenu volumétrique d'eau. La figure 12 ne représentant toutefois que les données d'humidité du segment 0-15 cm, il est ainsi opportun de montrer l'évolution de ces mêmes données comparativement à celles des autres segments.

Pour cela, la figure 13 schématise à l'aide de plusieurs courbes les mesures d'humidité observées à chaque segment, chacune d'entre elle étant représentée d'une couleur différente.

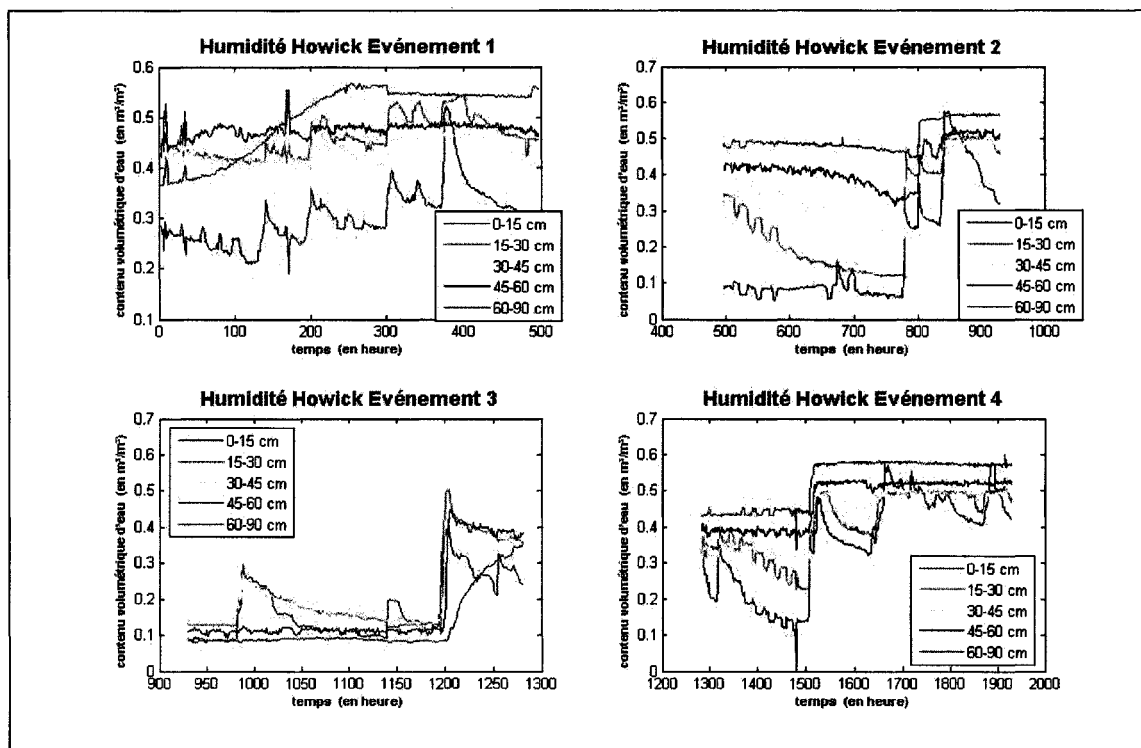


Figure 13 Humidité Howick à chaque segment

Encore une fois, cette figure rassure car elle révèle de nombreuses similitudes lors de l'évolution des courbes d'humidité aux différentes profondeurs du sol. En effet, chaque changement brusque de valeur semble se retrouver pour chaque segment, en notant que plus ce dernier est situé en profondeur, plus l'événement en est retardé dans le temps. De plus, il est ici important de souligner les différences notables d'état d'humidité du sol entre chaque événement. Le point le plus remarquable et auquel sera attachée une attention particulière concerne l'état hydrique du sol lors de l'événement 3, ce dernier étant particulièrement sec comparativement aux autres événements. Ce trait singulier revêtira toute son importance lors de l'analyse et de l'interprétation des résultats.

Ensuite, la variabilité spatiale et temporelle de la teneur en eau dans le sol peut être décrite en traçant des profils d'infiltration ou plus généralement appelés « profils hydriques ». En effet, ces derniers permettent de pouvoir représenter la distribution

verticale des teneurs en eau dans le sol, à différents instants donnés. A titre d'exemple, dans un sol homogène et lorsque la surface du sol est submergée, le profil hydrique du sol présente, comme présentées sur la figure 14 : une zone de saturation, située immédiatement sous la surface du sol ; une zone proche de la saturation appelée zone de transmission, qui présente une teneur en eau proche de la saturation et en apparence uniforme ; et finalement une zone d'humidification qui se caractérise par une teneur en eau fortement décroissante avec la profondeur selon un fort gradient d'humidité appelé front d'humidification qui délimite le sol humide du sol sec sous-jacent (Musy, 1995).

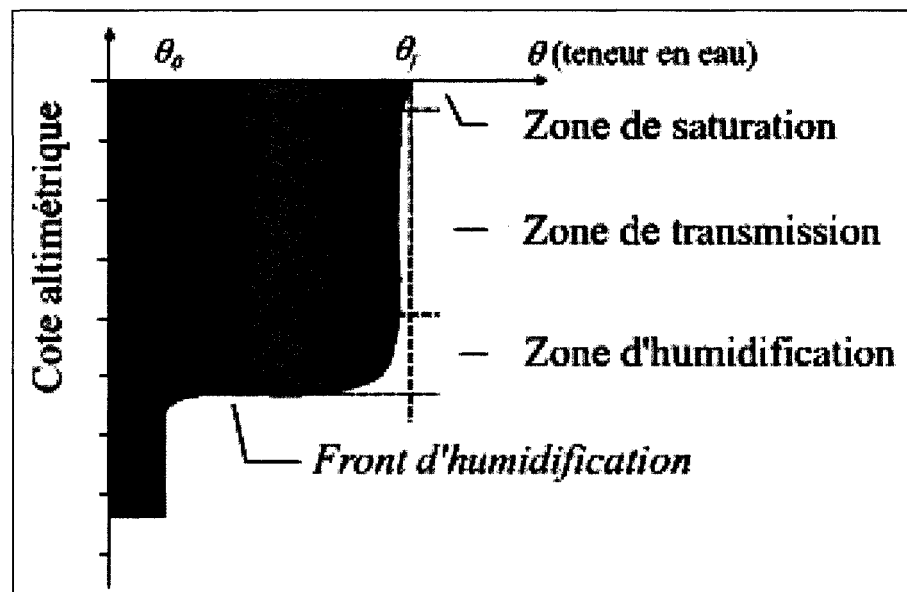


Figure 14 Caractéristiques du profil hydrique
(Tiré de Musy, 1995)

Il est ainsi présenté dans la figure 15 un exemple de profil d'humidité réalisé à l'aide des données fournies par la station Howick sur une durée de 8 heures.

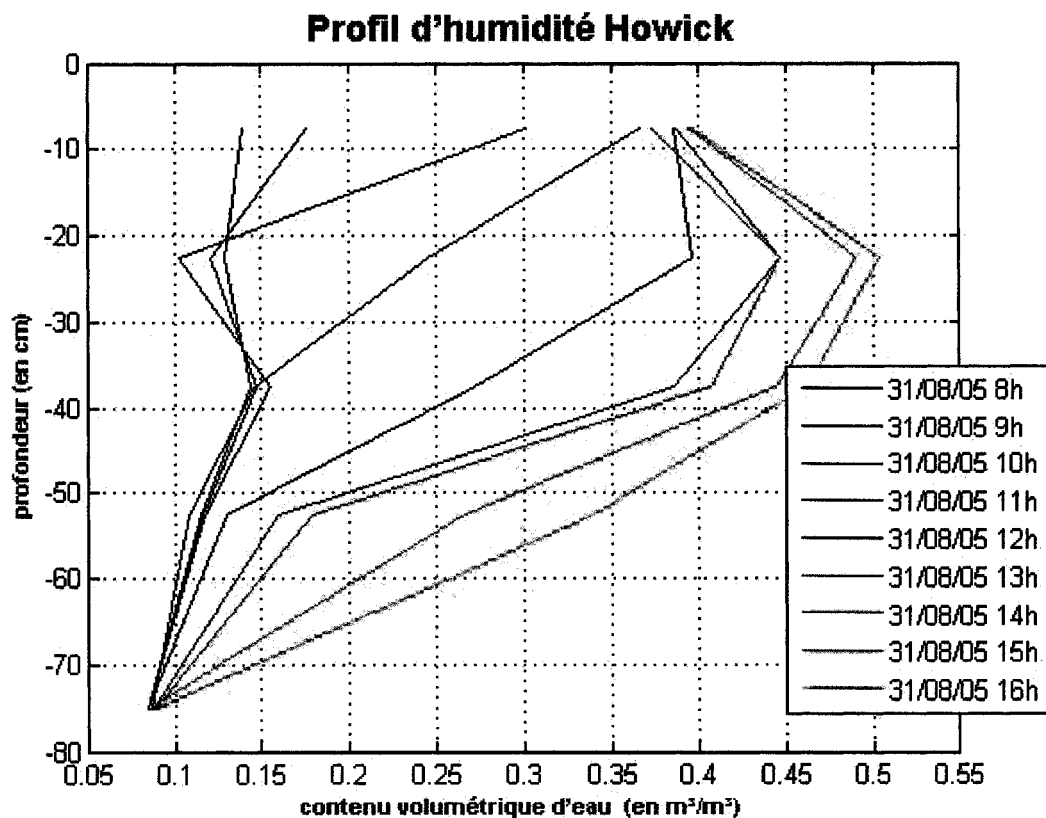


Figure 15 Exemple de profil d'humidité Howick

Le traçage du profil d'humidité à différentes heures symbolisées par différentes couleurs permet d'établir et d'analyser l'évolution de l'état hydrique du sol à un événement particulier et à toutes les profondeurs. Ainsi, en ce qui concerne le cas présenté ci-dessus, il paraît aisé de suivre le déplacement du front mouillant, ce dernier variant du haut vers le bas. En effet, le sol étant sec au départ et à toutes les profondeurs, le sol s'humidifie peu à peu de segment en segment, les couches supérieures étant bien entendu celles affectées en premier.

5.1.3 Les données de débit

De même que pour les données de précipitation et d'humidité et après traitement, voici présentées ci-dessous les données de débits à l'exutoire du bassin des Anglais pour l'ensemble des quatre événements sous forme d'hydrogrammes.

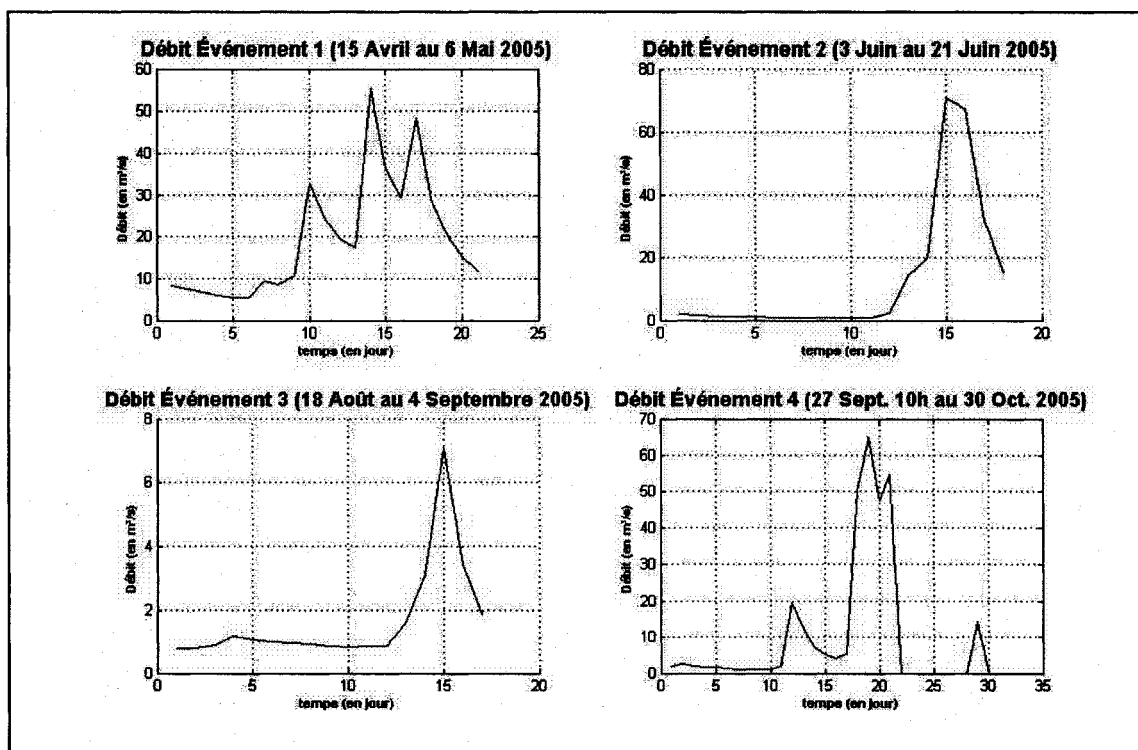


Figure 16 Débit à l'exutoire pour l'ensemble des quatre événements

Tel que montré sur la figure 16, la première remarque consiste une nouvelle fois à noter que les instants à fort débit correspondent aux événements à forte précipitation, les premiers étant naturellement retardés dans le temps de quelques heures. Ensuite et non moins important, une attention particulière doit être apportée à l'événement 3 où les mesures de débits semblent très faibles comparativement aux autres événements. L'état singulièrement sec du sol pour la même période de temps et spécifié lors des commentaires sur la figure 13 en est la raison principale.

5.2 Résultats des différentes méthodes d'infiltration de Green et Ampt

A titre de rappel et de manière très simplifiée, le modèle de simulation, dit « des Anglais », utilisé pour réaliser les simulations s'emploie de la manière suivante :

Les données de précipitation, ordonnées sous forme de matrices, sont introduites au modèle en tant que données d'entrée, les données de pluie uniforme créées à partir des données de précipitation de chaque station étant en premier lieu insérées pour ensuite utiliser le modèle de manière distribuée, ceci uniquement lors de la troisième méthode.

Dépendamment de la méthode et des critères de performance employés, 4 paramètres régulateurs du modèle sont ensuite définis et permettent de varier ou non les résultats tel que désirés. Ces 4 paramètres dits de Green et Ampt sont :

- a. K_{sat} : la conductivité hydraulique à saturation (en mm/h);
- b. H_c : la charge de succion au front mouillant (en m);
- c. $D_{th\acute{e}ta}$: le déficit initial en humidité à saturation (en m^3/m^3);
- d. L_{init} : la hauteur initiale du front mouillant (en m).

Des données de débits correspondent aux données sortantes et aux résultats du modèle. Ces dernières sont présentées sous forme de matrices mais également sous forme de graphiques afin de mieux comparer les résultats avec les débits observés et de manière à faciliter la compréhension du lecteur.

5.2.1 Méthode 1 : Utilisation des Indices de Précipitation Antécédente (IPA)

Comme mentionné auparavant, les données de pluie uniforme sont tout d'abord implantées, le bassin devant ainsi lui-même être considéré comme uniforme en ce qui a trait à la nature de son sol. La deuxième étape consiste donc à définir les paramètres

régulateurs du modèle de sorte à ce que les résultats de la simulation correspondent au mieux aux données observées.

En considérant que le sol soit identique pour chaque station, les paramètres intrinsèques du sol que sont Ksat et Hc sont en toute logique constants sur chaque maille du modèle. Toutefois, bien que la littérature permette de fixer un ordre de grandeur pour les paramètres de sol présents sur le bassin, il est toutefois difficile de les fixer avec précision. Dès lors, la stratégie adoptée fut la suivante : la détermination en premier lieu des paramètres Dthéta et Linit, définissant les conditions initiales du bassin, permettra d'estimer, par calibration, un ordre de grandeur des valeurs de Ksat et Hc qui pourront par la suite être considérées comme fixes pour le restant de l'étude lors de l'utilisation d'une pluie uniforme.

Dès lors et tout d'abord, la méthode ici employée, c'est-à-dire par l'utilisation des IPA et dont les valeurs ont été présentées au tableau VII, permet par l'entremise de l'équation suivante d'obtenir la valeur du paramètre Dthéta (Roy, 2000).

$$D_{\text{théta}} = 14,638 \times (\text{IPA})^{-1,9455} \quad (5.1)$$

Ainsi, les valeurs de Dthéta obtenues à partir des données de la pluie uniforme ainsi que pour chacun des quatre événements peuvent être présentées dans le tableau suivant :

Tableau X

Valeur de Dthéta (Pluie uniforme)

| | Événement 1 | Événement 2 | Événement 3 | Événement 4 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Dthéta (en m ³ /m ³) | Inf | 1,37 | 0,64 | 7,69 |

Par définition, $D_{th\acute{e}ta}$ correspond au déficit volumétrique initial en humidité du sol à saturation. Une grande partie du bassin à l'étude étant composée d'argile, et seule une plus petite partie de ce dernier étant quant à elle à base de terre organique, il fut ainsi décidé dans un premier temps d'uniquement considérer les propriétés d'un sol argileux pour tout le territoire, ce dernier se saturant pour une teneur en eau de $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Dès lors, le coefficient $D_{th\acute{e}ta}$ ne peut excéder dans le cas ici présent la même valeur de $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Or les résultats obtenus sont systématiquement supérieurs à la valeur limite et parfois même anormales en référence par exemple aux résultats des événements 2 et 4. Ceci peut en partie être justifié par le fait que l'équation fournie par Luc Roy n'est vraisemblablement pas compatible avec des IPA calculés sur 5 et 10 jours. Ainsi, $D_{th\acute{e}ta}$ fut par commodité fixé arbitrairement à $0.45 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ceci pour l'ensemble des 4 événements.

Enfin, la valeur du coefficient L_{init} , la hauteur initiale de front mouillant, fut quant à elle également arbitrairement fixée à 0 m après avoir observé et noté que le sol, avant chaque événement, était particulièrement sec. Une remarque reste néanmoins à faire dans la mesure où les données d'humidité auront été utilisées afin de réaliser cette dernière constatation. Toutefois, ceci n'est la conclusion que des observations simples des conditions initiales du sol, ne rentrant pas ainsi dans le cadre de l'assimilation proprement dite des données d'humidité du sol dans notre modèle dont l'importance sera démontrée ou non lors de la deuxième méthode d'infiltration.

Les valeurs de $D_{th\acute{e}ta}$ et de L_{init} maintenant fixées, ce n'est qu'à la suite de plusieurs itérations et essais de calibration qu'ont été déterminées les valeurs des paramètres de K_{sat} et H_c de sorte à ce que le débit simulé et observé puissent correspondre au mieux. Toutefois, la valeur la plus « adéquate » de K_{sat} variant selon l'événement, une valeur de « K_{sat} moyen » pour l'ensemble des quatre événements fut imposée. En somme, pour les quatre événements, les paramètres de Green et Ampt calibrés sont les suivants :

- $K_{sat} \text{ moyen} = K_{sat} = 0,4 \text{ mm/h}$;
- $H_c = 0,4 \text{ m}$;
- $D_{th\acute{e}ta} = 0,45 \text{ m}^3/\text{m}^3$;
- $L_{init} = 0 \text{ m}$.

La valeur des 4 paramètres régulateurs du modèle une fois établie, l'ensemble des résultats et conclusions peuvent ainsi enfin être présentés grâce aux graphiques suivants où sont représentées les données de débit simulé (en bleu foncé), observé (en rouge) ainsi que de précipitation (en bleu clair) :

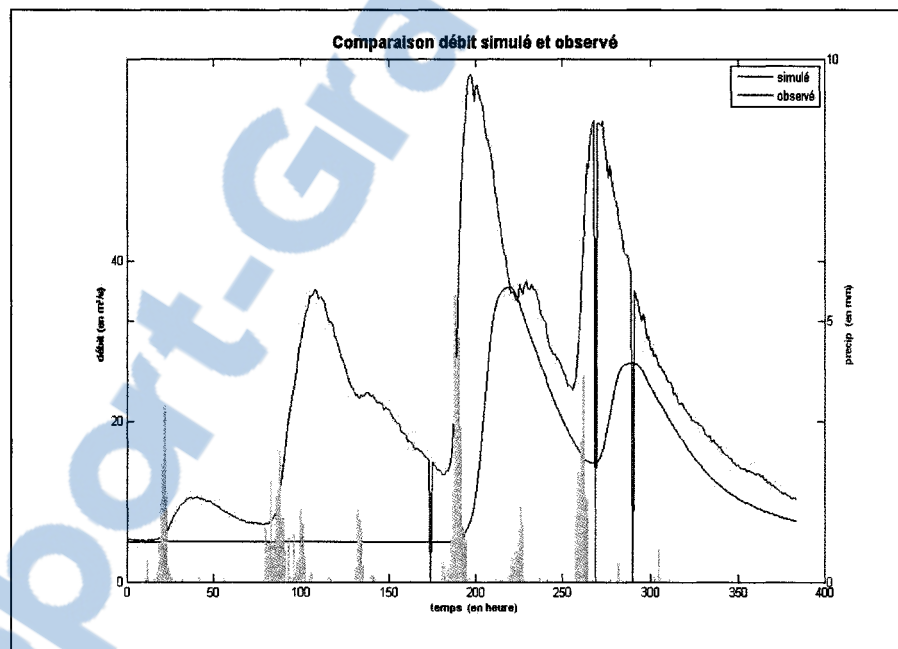


Figure 17 Comparaison débit simulé et observé avec décalage
Méthode 1 – Événement 1 – Pluie Uniforme

Les premiers résultats relevaient la présence systématique pour les quatre événements d'un décalage d'un même nombre d'heures entre le débit simulé et le débit observé. Ce dernier était principalement lié à une mauvaise paramétrisation du modèle hydraulique. Après avoir pallié à ce problème, les résultats finaux sont les suivants :

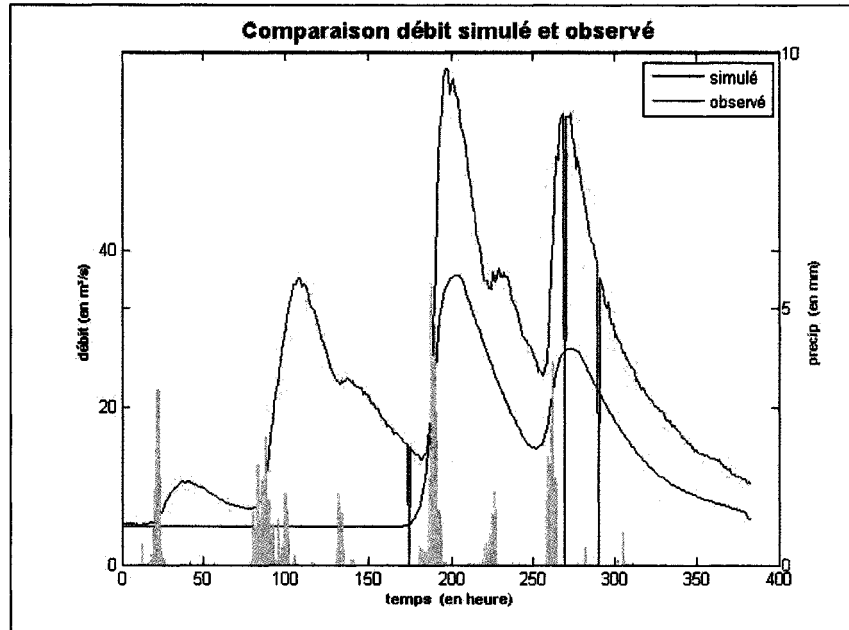


Figure 18 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 1 – Événement 1 – Pluie Uniforme

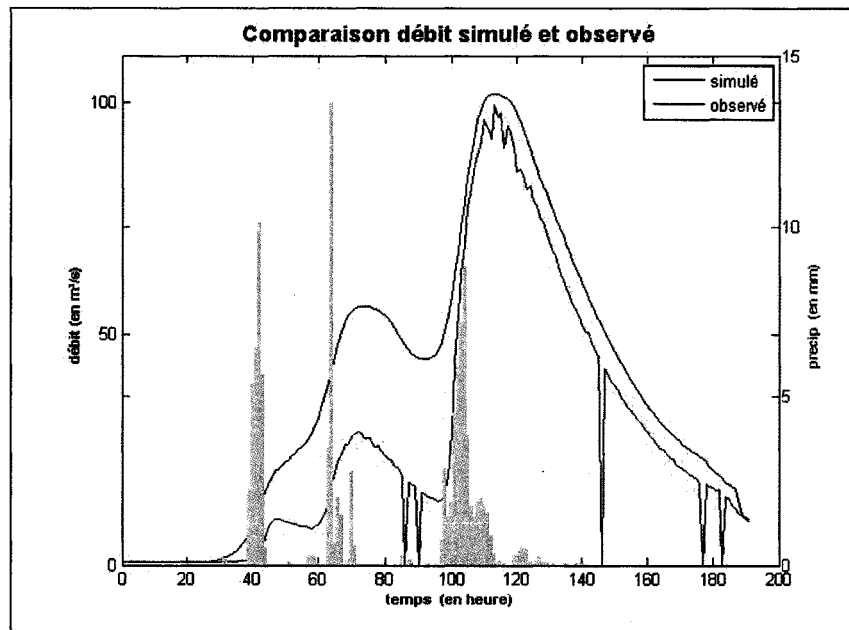


Figure 19 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 1 – Événement 2 – Pluie Uniforme

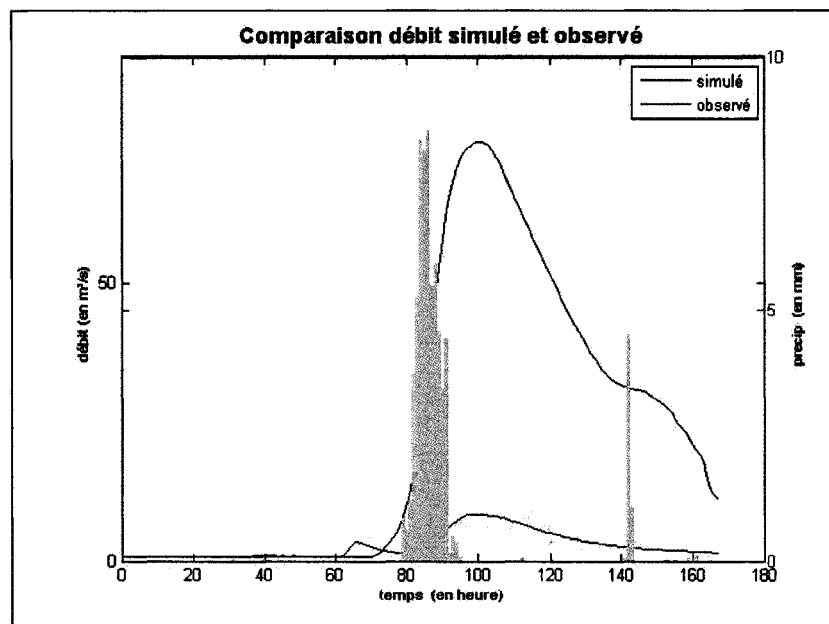


Figure 20 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 1 – Événement 3 – Pluie Uniforme

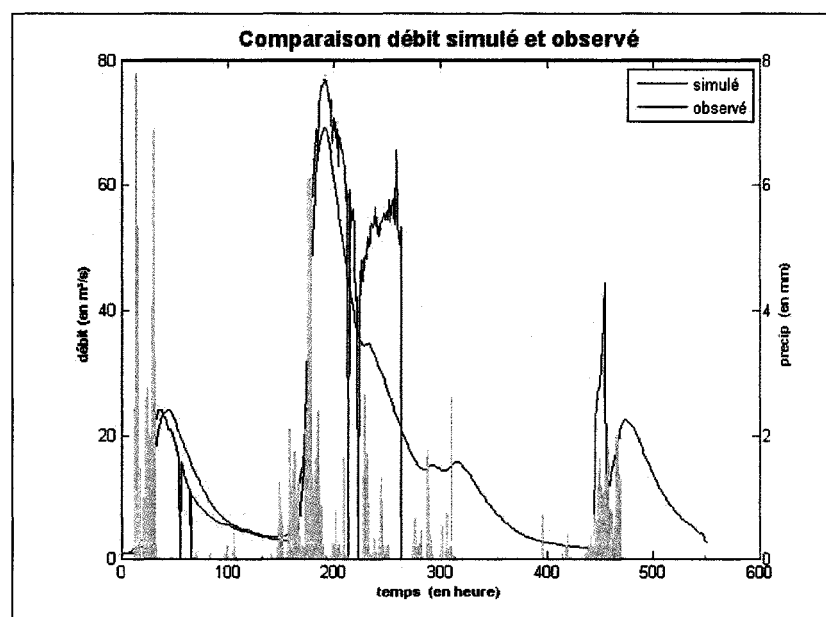


Figure 21 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 1 – Événement 4 – Pluie Uniforme



Plusieurs remarques peuvent être réalisées à partir des résultats des simulations. La première fait référence au décalage systématique entre cette fois-ci les données de précipitation et de débit. Ce dernier s'explique très facilement par la prise en compte du temps de parcours de l'eau, de son point de chute jusqu'à son arrivée à l'exutoire. Ensuite, lors du premier événement, il semble que le modèle ne tienne pas en compte des tout premiers pics de précipitation. Une hypothèse pouvant justifier ce phénomène réside dans le fait que le Ksat moyen, déterminé auparavant, est un peu trop élevé pour cet événement précis. En effet, plus la conductivité à saturation est élevée, plus la quantité d'eau infiltrée doit l'être pour créer un quelconque ruissellement. Toutefois, diminuer la conductivité de cet événement aurait obligé à conserver cette valeur pour les autres événements dont les résultats auraient également été contestables. Une autre remarque consiste à noter le manque de données relatives au débit observé lors de l'événement 4 et dont les incidences seront explicitées lors des prochains chapitres. Enfin et surtout, l'état particulièrement sec du sol lors du début du troisième événement se caractérise une nouvelle fois par l'observation d'un très faible débit comme présenté sur la figure 20. Il est également important de signaler qu'à ce même événement manquent certaines données de précipitation dont celles pouvant justifier la présence du tout premier pic de débit, ce dernier ne pouvant ainsi être retracé lors du débit simulé.

L'évaluation des critères de qualité des dernières simulations est présentée quant à elle dans le tableau suivant :

Tableau XI

Évaluation des critères : Méthode 1

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|--------------------------|---------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 1 Méthode 1 | 0,07 | 0,04 | 48,41 | 41,69 |
| Événement 2 Méthode 1 | 0,69 | 0,52 | -41,16 | -2,60 |
| Événement 3 Méthode 1 | -190,64 | -0,99 | -758,83 | -818,16 |
| Événement 4 Méthode 1 | 0,75 | 0,60 | 21,53 | 10,17 |

L'estimation des critères ci-dessus est primordiale lors de cette l'étude. En effet, d'une part, comme mentionné auparavant, elle permet d'évaluer la qualité et la précision de la simulation. D'autre part, cela établira une comparaison simple entre les différentes méthodes afin de déterminer si oui ou non, la méthode d'infiltration avec assimilation des données d'humidité offre une amélioration quant à la qualité des prévisions.

5.2.2 Méthode 2 : Utilisation des données d'humidité

Une nouvelle fois, les mêmes matrices de pluie uniforme utilisées lors de la première méthode sont employées en tant que données d'entrée. Toutefois, la procédure de détermination des paramètres de Green et Ampt diffère quant à elle comparativement à la première méthode. En effet, le paramètre Dthéta ne sera non plus déterminé grâce aux données d'IPA mais cette fois-ci grâce à l'utilisation des données d'humidité du sol. Pour cela, pour chaque station et à chaque début d'événement sera tracé un profil hydrique du sol sur plusieurs heures. Ce dernier permettra alors de déterminer une valeur des paramètres Linit et Dthéta à chaque station dont une moyenne sur l'ensemble des

différentes sites d'observation pourra être considérée comme étant la valeur la plus représentative de l'ensemble du territoire à l'étude.

A titre illustratif, voici présenté ci-dessous un exemple de profil ainsi que la méthode de détermination des paramètres qui y est associée :

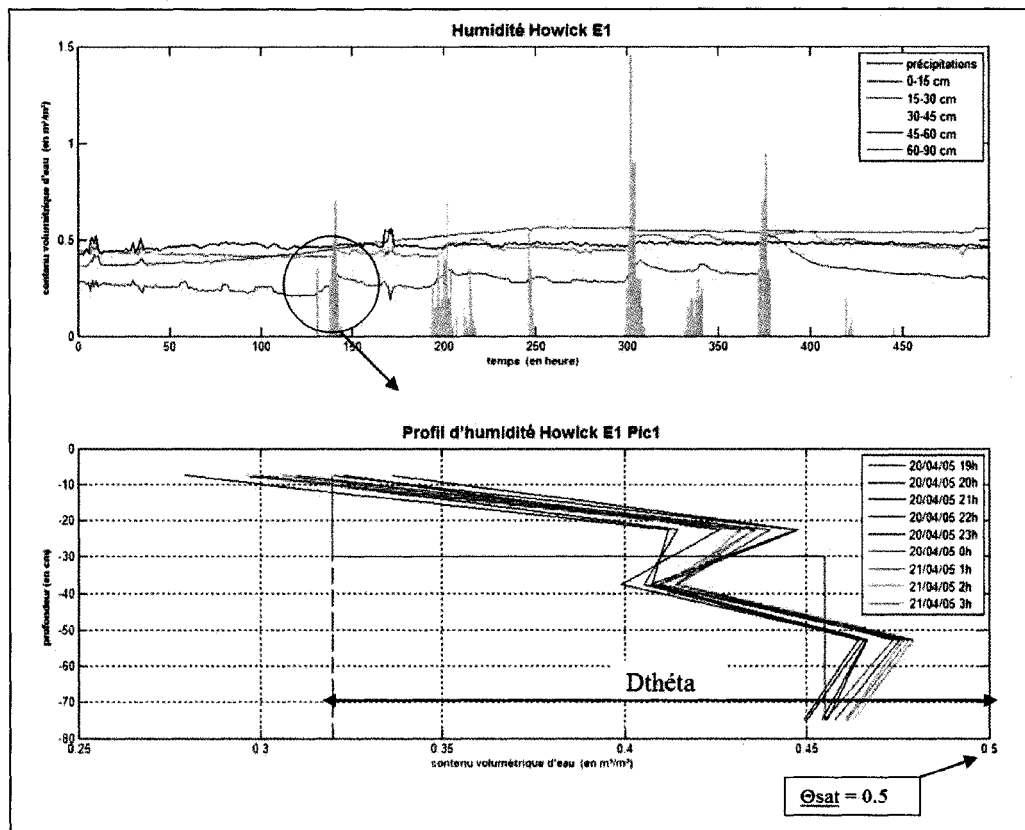


Figure 22 Profil hydrique station Howick
Événement 1 Pic 1

Sur la figure 22 est présentée l'évolution de l'humidité du sol à différentes profondeurs en lien avec celle des précipitations présentées elles en bleu et sous forme d'histogrammes. La méthode d'utilisation des données d'humidité du sol employée ici nécessite la détermination seule des valeurs des paramètres en tant que condition initiale

pour le modèle. En ce sens, seul le tracé du profil d'humidité en début d'événement importe, comme observé sur la figure ci-dessus et contrairement à la quatrième méthode étudiée par la suite où la détermination des paramètres à chaque « pic » important sera nécessaire. Sur la figure du dessous est ainsi présenté le profil hydrique du début de l'événement premier au niveau de la station Howick et où la courbe rouge correspond à l'interpolation de l'ensemble des autres courbes bleues afin de s'apparenter au maximum à un profil de type Green et Ampt.

Le bassin étant en premier lieu considéré comme étant uniforme, la même procédure sera réitérée pour chaque station procurant ainsi 7 profils différents pour le même événement, le tout afin d'obtenir un profil de type Green et Ampt moyen sur l'ensemble du territoire d'étude. A titre d'exemple, voici proposé ci-dessous les résultats d'une « moyenne de profils » (en rouge) réalisée à partir des profils de quelques stations :

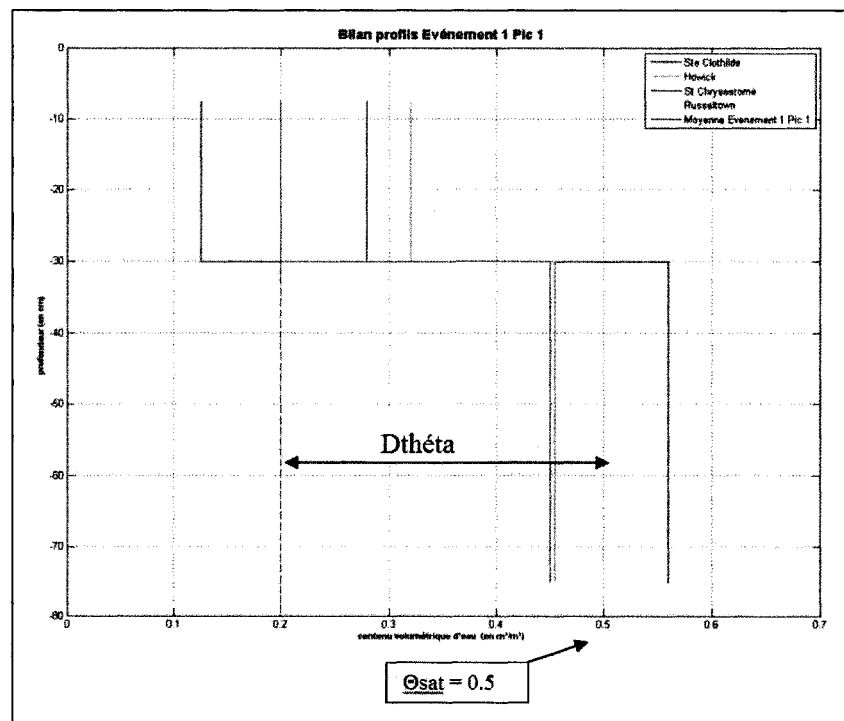


Figure 23 Profil moyen de Green et Ampt
Événement 1 Pic 1

Ainsi, après avoir obtenu le tracé du profil moyen pour l'ensemble des stations au début de chacun des quatre événements, il reste donc à en déduire la valeur des paramètres de Green et Ampt et en particulier de Dthéta. Pour cela, il suffit de soustraire à la valeur du contenu volumétrique à saturation ($\theta_{\text{sat}} = 0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$) la valeur minimale de celle du profil. Ainsi, en se référant à la dernière figure, Dthéta aura une valeur de $0,5 - 0,2 = 0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Le même procédé sera ensuite employé pour chacun des trois autres événements.

Quant à la détermination des valeurs des autres paramètres, Linit sera tout d'abord encore une fois fixée à 0 m pour l'ensemble des quatre événements et pour les mêmes raisons émises lors de la première méthode. En ce qui concerne les valeurs de Ksat et Hc, les mêmes valeurs déterminées lors de la méthode première avec pluie uniforme seront réutilisées. En effet, même s'il était possible d'effectuer une nouvelle fois une étape de calage de ces derniers paramètres, il paraissait plus opportun de conserver les mêmes valeurs, d'une part car ils représentent des variables intrinsèques du sol et donc en toute logique fixes, et d'autre part car cela permettra de réaliser une meilleure comparaison entre les deux méthodes et d'en faciliter les conclusions.

Voici résumé ci-dessous l'ensemble des valeurs des paramètres prises en compte pour la méthode 2 c'est-à-dire avec utilisation des données d'humidité du sol et d'une pluie uniforme ainsi que les résultats finaux qui y sont liés et présentés aux figures 24 à 27 :

Tableau XII

Valeurs des paramètres Green et Ampt
Méthode 2 – Pluie Uniforme

| | Dthéta (en m ³ /m ³) | Linit (en m) | Ksat (en mm/h) | Hc (en m) |
|------------------|---|--------------|----------------|-----------|
| Événement 1 Pic1 | 0,3 | 0 | 0,4 | 0,4 |
| Événement 2 Pic1 | 0,38 | 0 | 0,4 | 0,4 |
| Événement 3 Pic1 | 0,39 | 0 | 0,4 | 0,4 |
| Événement 4 Pic1 | 0,28 | 0 | 0,4 | 0,4 |

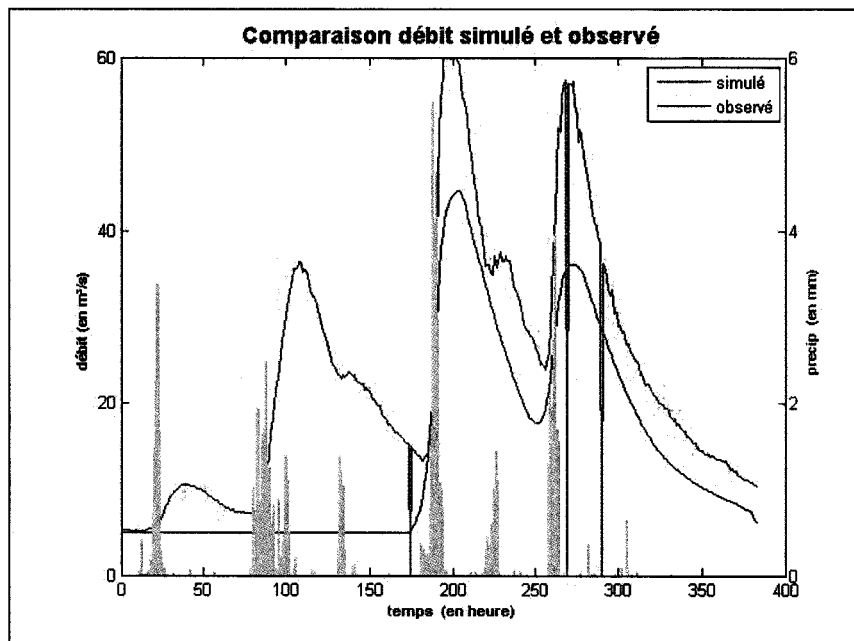


Figure 24 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 2 – Événement 1 – Pluie uniforme

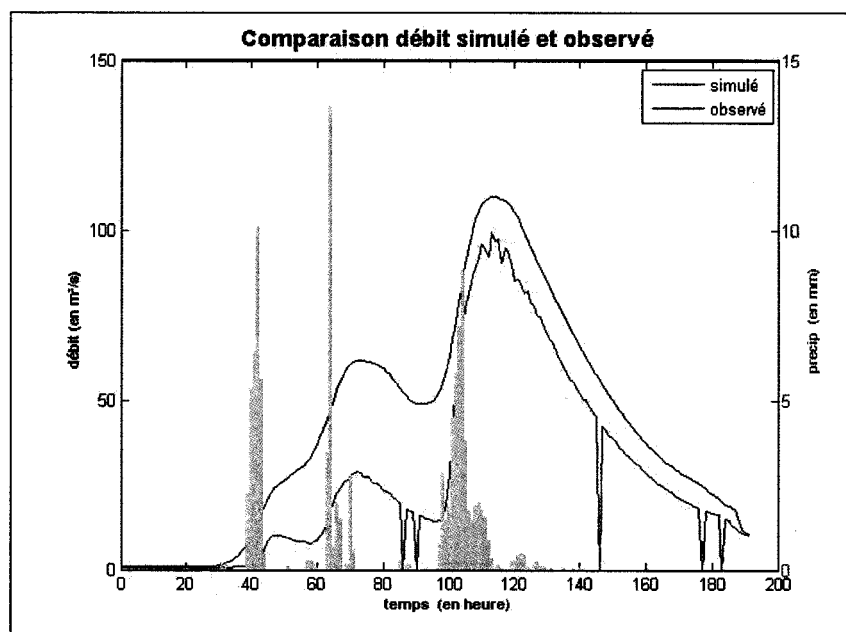


Figure 25 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 2 – Événement 2 – Pluie uniforme

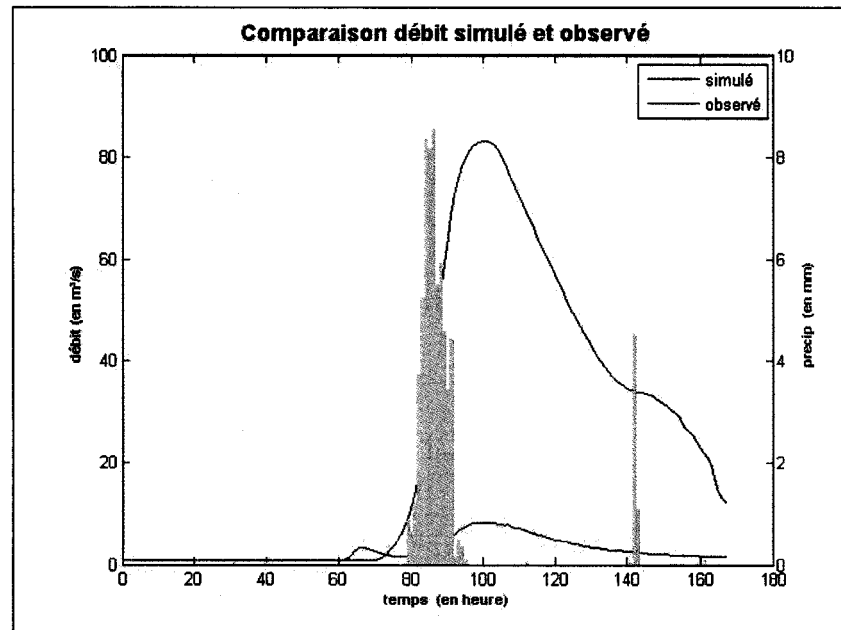


Figure 26 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 2 – Événement 3 – Pluie uniforme

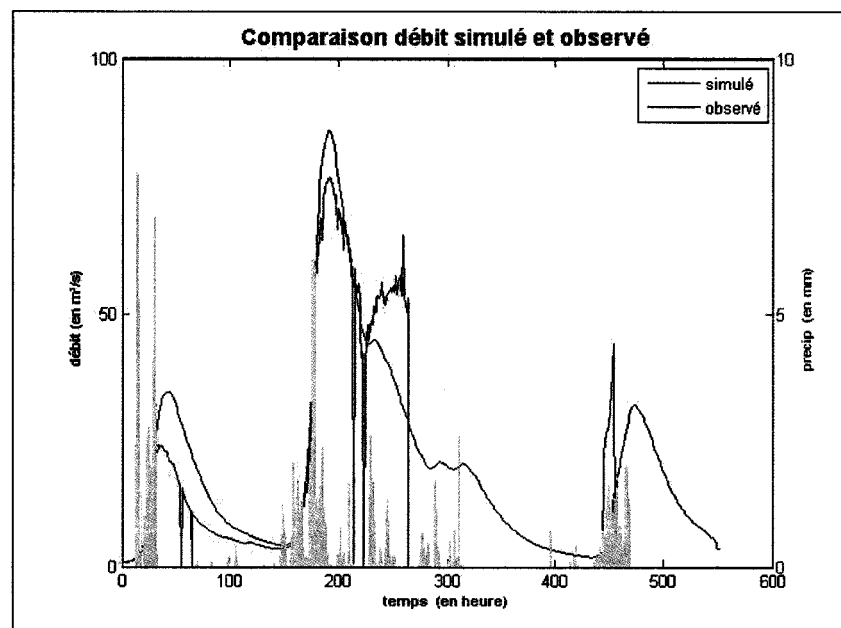


Figure 27 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 2 – Événement 4 – Pluie uniforme

L'évaluation des critères de qualité des dernières simulations est présentée dans le tableau suivant :

Tableau XIII

Évaluation des critères : Méthode 2

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|--------------------------|---------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 1 Méthode 2 | 0,32 | 0,19 | 38,85 | 29,31 |
| Événement 2 Méthode 2 | 0,53 | 0,36 | -53,98 | -10,46 |
| Événement 3 Méthode 2 | -239,94 | -0,99 | -850,33 | -920,23 |
| Événement 4 Méthode 2 | 0,81 | 0,69 | -4,00 | -11,77 |

Avant même de passer à la méthode employant le modèle de manière distribuée, il fut intéressant d'effectuer des tests en considérant uniquement la distributivité de la pluie, afin de déterminer l'importance et l'influence de cette dernière, le tout en conservant les valeurs calibrées des paramètres du sol des méthodes précédentes. Pour cela, certaines modifications doivent être réalisées au niveau des données d'entrées et seront décrites plus en détail lors du paragraphe suivant. Par ailleurs, les résultats graphiques obtenus étant sensiblement les mêmes que ceux présentés ci-dessus, seule l'évaluation des critères de qualité sera ici présentée, les commentaires relatifs à cette dernière étant relatés lors du dernier chapitre.

Tableau XIV

Évaluation des critères : Méthode 2 avec Pluie distribuée

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|--------------------------|---------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 1 Méthode 2 | 0,36 | 0,22 | 37,18 | 27,57 |
| Événement 2 Méthode 2 | 0,25 | 0,14 | -68,85 | -18,74 |
| Événement 3 Méthode 2 | -277,20 | -0,99 | -912,62 | -983,39 |
| Événement 4 Méthode 2 | 0,81 | 0,68 | -5,62 | -13,60 |

5.2.3 Méthode 3 : Utilisation des données d'humidité avec paramètres de sol distribués

La procédure ici employée reste en grande partie la même que celle étudiée juste auparavant. La seule grande différence réside en effet dans le fait qu'utilisant cette fois-ci le modèle de manière « distribuée », les différentes données propres et relatives à chaque station doivent ici être prises en considération.

Ainsi et tout d'abord, alors qu'une unique série de données fut jusqu'ici utilisée afin de caractériser et d'introduire la pluie uniforme en tant que données entrantes du modèle, sept séries de données toutes regroupées en une unique matrice seront cette fois-ci utilisées afin d'introduire et prendre en compte les différentes données de précipitations des sept stations.

De même, alors qu'il était jusqu'ici uniquement nécessaire de déterminer et d'insérer un unique jeu de paramètres régulateurs du modèle (de Green et Ampt), un unique spécimen de sol étant jusqu'à présent considéré, il est désormais également possible

d'introduire autant de jeux de paramètres que de nombre de mailles du modèle. Comme mentionné auparavant, le bassin présentant principalement deux types de sol différents, à savoir une partie argileuse et une autre organique, deux jeux de paramètres différents seront alors implantés pour chaque événement.

Tableau XV

Paramètres du modèle

| Méthode 1 et 2 (Pluie uniforme) | Méthode 3 (Paramètres distribués) | |
|---------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| Sol uniforme | Sol argileux | Sol organique |
| Dthéta | Dthéta1 | Dthéta2 |
| Linit | Linit1 | Linit2 |
| Ksat | Ksat1 | Ksat2 |
| Hc | Hc1 | Hc2 |

Quant à la détermination de ces derniers, elle fut réalisée exactement de la même manière que la méthode précédente à savoir qu'à chaque station et à chaque début d'événement sera tracé un profil hydrique du sol sur plusieurs heures de manière à pouvoir déterminer les différents paramètres Dthéta. Toutefois, alors qu'une unique moyenne de l'ensemble de ces valeurs était nécessaire afin de caractériser l'ensemble du territoire, deux seront désormais nécessaires afin de distinguer les deux parties du bassin, à savoir celle à sol argileux et l'autre à sol organique. Pour cela, la première étape consiste donc à déterminer dans quelle partie est située chaque station à l'étude. La carte des sols du territoire fournit les informations suivantes :

- a. En région de terre noire sont situées : Saint-Michel, Sainte-Clothilde, Ruisseau Cranberry;
- b. En région de terre d'argile sont situées : Howick, l'Artifice, Russeltown, Saint-Chrysostome.

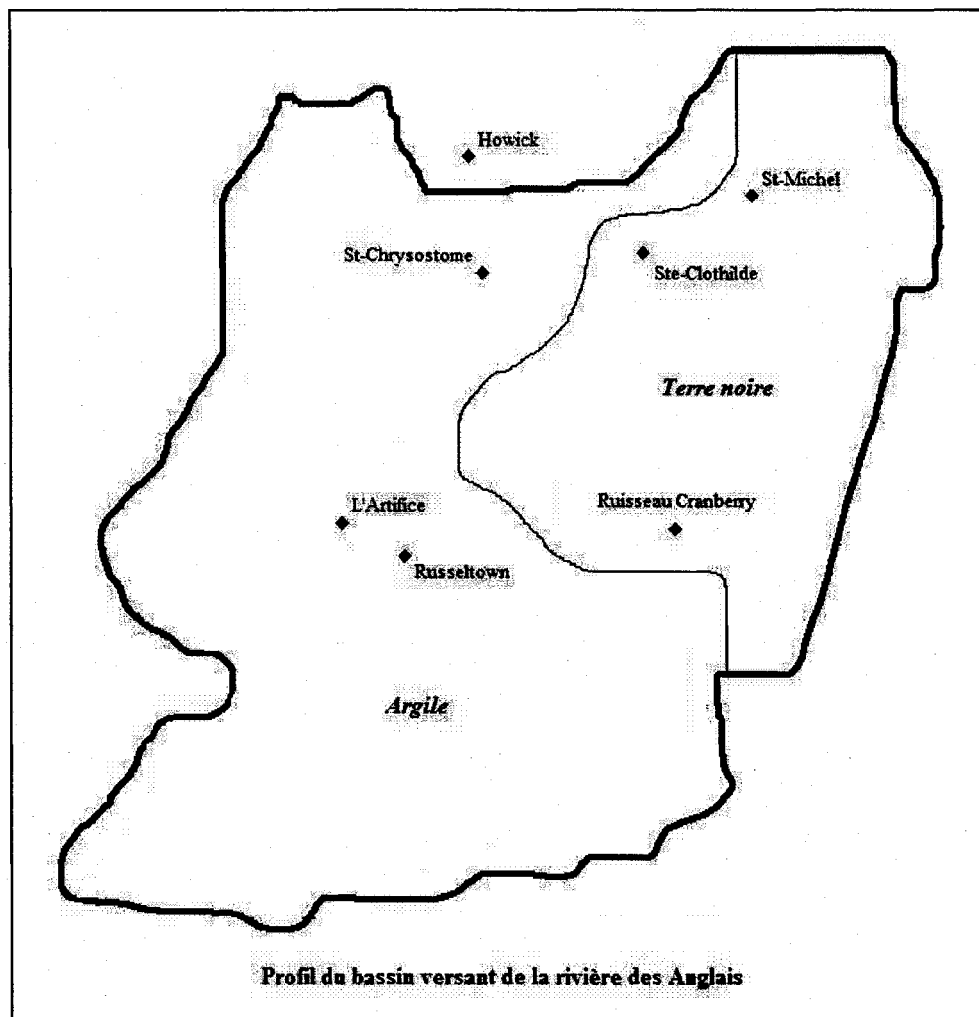


Figure 28 Profil du bassin versant de la rivière des Anglais
avec séparation Terre Noire - Argile

En résumé, en terre argileuse se présentent quatre stations grâce auxquelles seront obtenues ainsi quatre valeurs de Dthéta différentes et dont la moyenne caractérisera cette partie du territoire. Il est important de ne pas oublier que la procédure devra être réitérée au début des quatre événements, la méthode de calcul du déficit volumétrique moyen restant à chaque fois identique. De même, en terre organique se présentent trois stations dont la moyenne des trois valeurs de Dthéta caractérisera cette deuxième partie du bassin et à chaque événement. Toutefois et élément important à relever, la terre noire n'ayant

pas les mêmes propriétés que l'argile, la valeur de ses paramètres diffèrent dont en particulier celle de θ_{sat} qui est non plus égal à $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ mais à $1 \text{ m}^3/\text{m}^3$. A titre illustratif, voici présenté ci-dessous le calcul réalisé afin de déterminer la valeur du paramètre Dthéta du territoire en sol organique lors du premier événement :

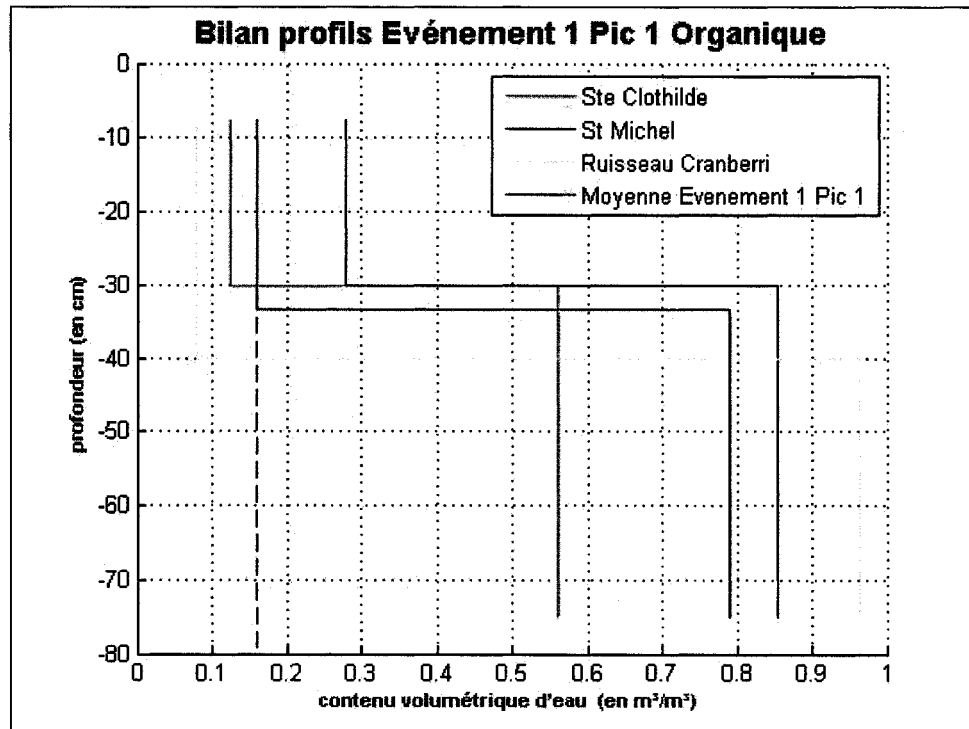


Figure 29 Profil moyen de Green et Ampt
Événement 1 Pic 1 Terre Noire

En utilisant la même méthode qu'employée dans la partie 5.2.2, il est ici obtenu une valeur de $D\theta_{\text{orga}}$ de $1 - 0.16 = 0.84 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Quant à la détermination des valeurs des autres paramètres et pour les mêmes raisons précédemment citées, Linit sera une nouvelle fois fixée à 0 m pour l'ensemble des quatre événements et sur l'ensemble du territoire. Deux différents jeux de paramètres devant désormais être déterminés, la stratégie adoptée fut la suivante. Contrairement aux

méthodes précédentes, les caractéristiques des sols pour lesquels K_{at} et H_c doivent être estimées sont clairement définies et correspondent aux propriétés d'un sol argileux d'une part, et d'un sol organique d'autre part. Dès lors, la littérature permet d'obtenir un ordre d'idée des valeurs de conductivité hydraulique à saturation et de la charge de succion au front mouillant pour chacun des deux types de sol. Ainsi, même si ces dernières ne correspondent pas exactement aux valeurs déterminées au final, elles auront toutefois permis de faciliter et d'accélérer le processus de calibration.

Voici donc résumé ci-dessous l'ensemble des valeurs des paramètres calibrés et pris en compte pour la méthode 3 c'est-à-dire avec utilisation des données d'humidité du sol et paramètres distribués :

Tableau XVI

Valeurs des paramètres Green et Ampt
Méthode 3 – Paramètres distribués

| | Dtheta1 (en m ³ /m ³) | Linit1 (en m) | Ksat1 (en mm/h) | Hc1 (en m) |
|-------------------------|--|---------------|-----------------|------------|
| Événement 1 Pic1 Argile | 0,27 | 0 | 0,23 | 0,37 |
| Événement 2 Pic1 Argile | 0,36 | 0 | 0,23 | 0,37 |
| Événement 3 Pic1 Argile | 0,425 | 0 | 0,23 | 0,37 |
| Événement 4 Pic1 Argile | 0,22 | 0 | 0,23 | 0,37 |

| | Dtheta2 (en m ³ /m ³) | Linit2 (en m) | Ksat2 (en mm/h) | Hc2 (en m) |
|----------------------------|--|---------------|-----------------|------------|
| Événement 1 Pic1 Organique | 0,84 | 0 | 0,9 | 0,7 |
| Événement 2 Pic1 Organique | 0,86 | 0 | 0,9 | 0,7 |
| Événement 3 Pic1 Organique | 0,93 | 0 | 0,9 | 0,7 |
| Événement 4 Pic1 Organique | 0,94 | 0 | 0,9 | 0,7 |

Les résultats finaux sont quant à eux présentés graphiquement et de la manière suivante :

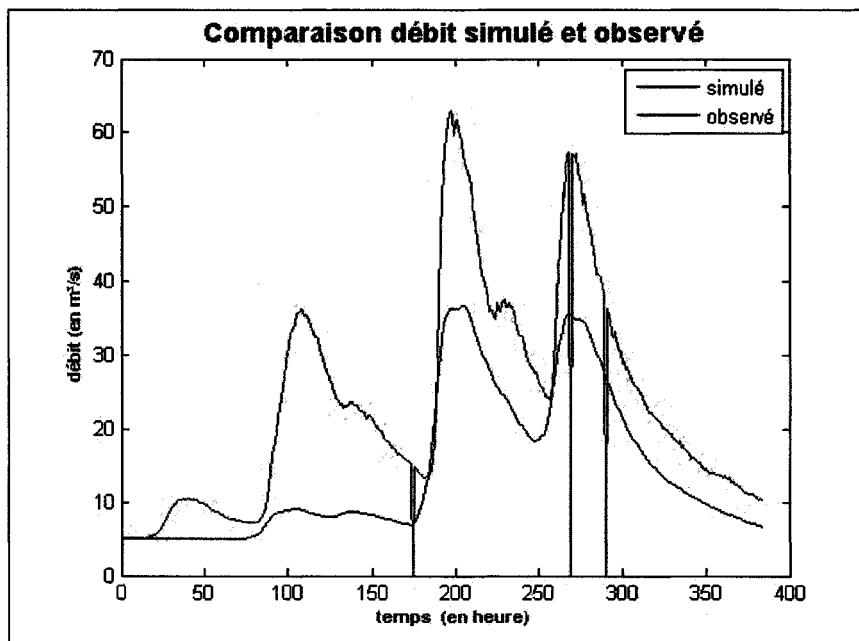


Figure 30 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 3 – Événement 1 – Paramètres distribués

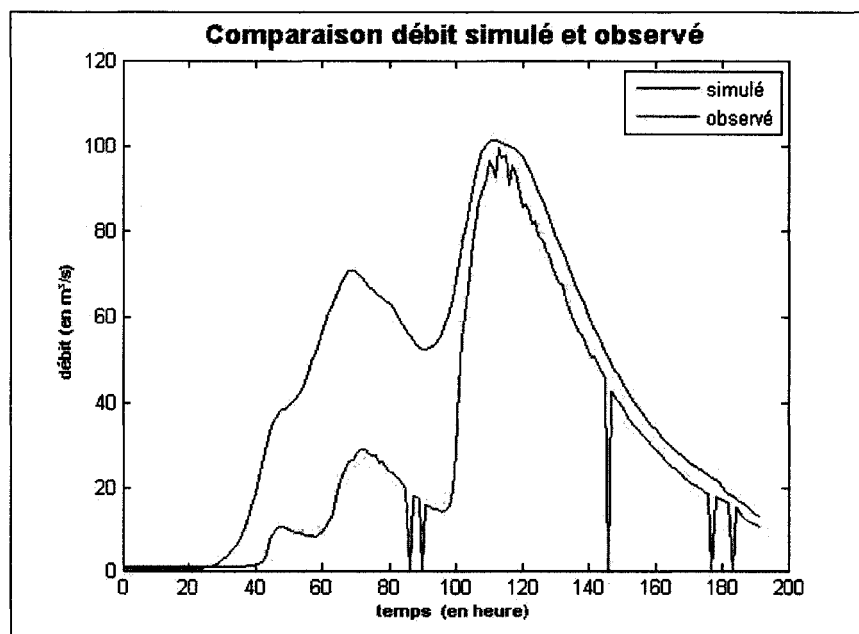


Figure 31 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 3 – Événement 2 – Paramètres distribués

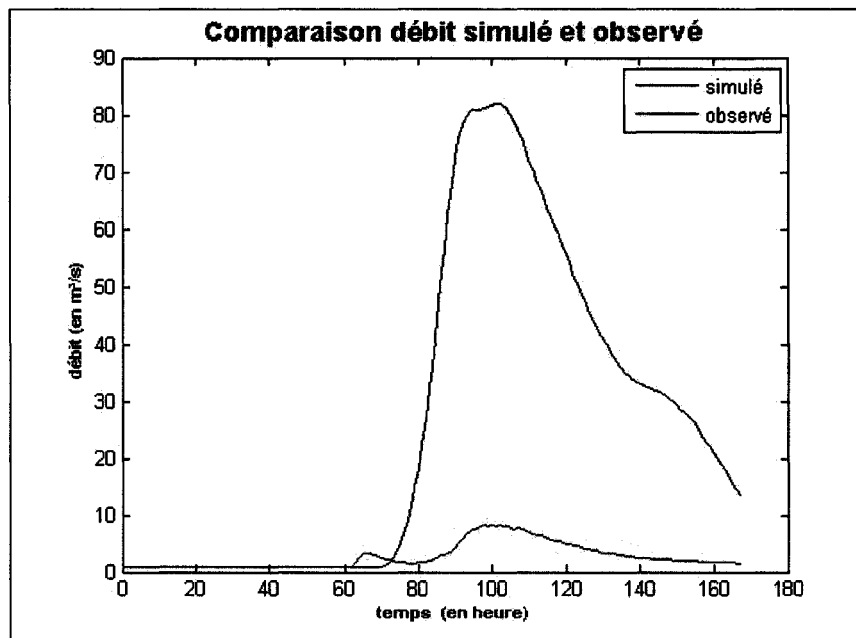


Figure 32 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 3 – Événement 3 – Paramètres distribués

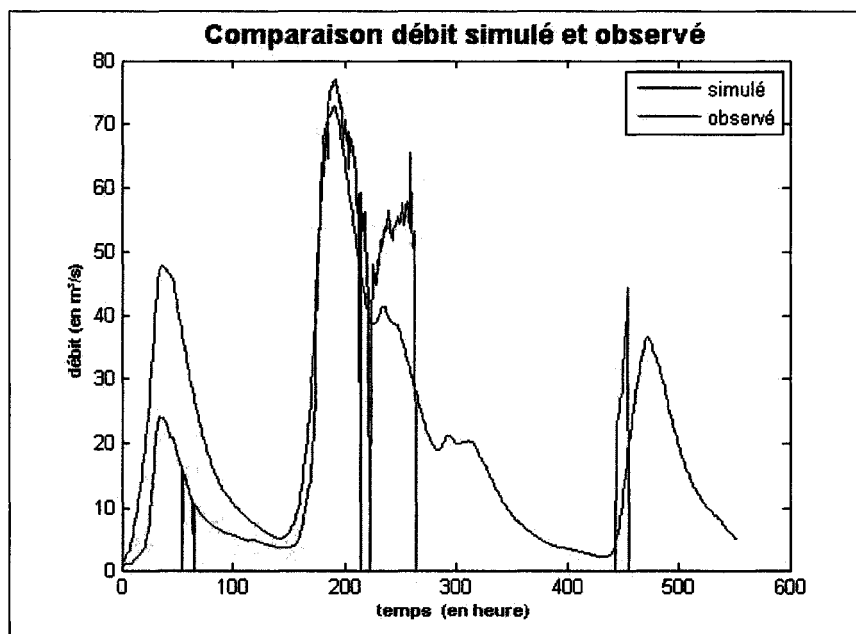


Figure 33 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 3 – Événement 4 – Paramètres distribués

L'évaluation des critères d'efficacité donne quant à elle les résultats suivants :

Tableau XVII

Évaluation des critères : Méthode 3

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|--------------------------|---------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 1 Méthode 3 | 0,35 | 0,21 | 38,85 | 41,78 |
| Événement 2 Méthode 3 | 0,35 | 0,21 | -57,78 | -1,69 |
| Événement 3 Méthode 3 | -243,36 | -0,99 | -858,54 | -904,54 |
| Événement 4 Méthode 3 | 0,69 | 0,53 | -11,40 | 5,49 |

5.2.4 Méthode 4 : Rétroaction entre les débits simulés et observés

5.2.4.1 Objectifs de la méthode

Tout comme mentionné lors du chapitre 4, la méthode de rétroaction consiste en l'élaboration d'un programme permettant une « auto correction » locale et dans le temps des valeurs des variables internes du modèle, afin de minimiser au mieux les écarts entre les valeurs de débits simulés et observés. Ainsi, avant de détailler plus longuement la procédure en elle-même, certaines notions sont ici importantes à rappeler afin de faciliter la compréhension de cette dernière.

Lors de l'élaboration de ce mémoire, quatre paramètres intrinsèques du sol ont été considérés en tant que paramètres régulateurs du modèle de simulation. Conscient qu'à chaque type de sol correspond un unique jeu de paramètres, il a également été noté que

trois d'entre eux, à savoir K_{sat} , H_c et L_{init} , représentent des variables fixes pour un même type de sol. C'est pourquoi, faire référence à une « auto correction » ou une remise à jour des paramètres du sol reviendra ici à corriger localement la valeur du seul paramètre étant variable dans le temps, c'est-à-dire $D_{th\acute{e}ta}$.

Les étapes et les idées essentielles de la procédure de rétroaction sont résumées grâce au graphique et commentaires suivants :

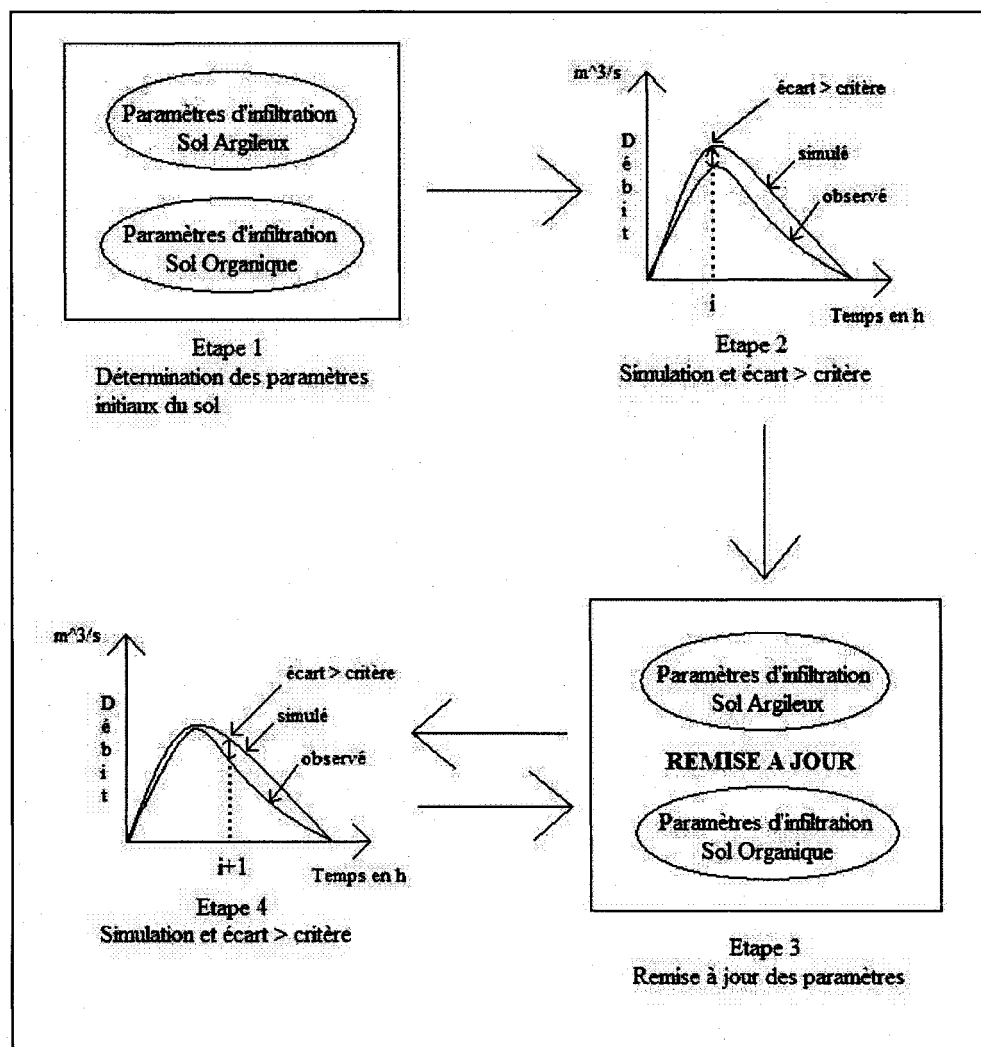


Figure 34 Principes de la rétroaction

Ainsi, la première étape de cette méthode consiste à déterminer la valeur des paramètres initiaux d'infiltration pour pouvoir ensuite lancer la simulation. Lors de cette dernière, le modèle devrait être capable, à partir de critères qui auront été préalablement définis, de déterminer l'instant i à partir duquel les paramètres initiaux provoqueront un écart entre les valeurs simulées et observées trop important. Dès lors, une remise à jour des paramètres de Green et Ampt et uniquement ceux définis à l'instant i sera effectuée. En somme, la valeur des paramètres du sol reste inchangée tant qu'une nouvelle remise à jour ne sera pas effectuée. Une nouvelle simulation sera alors réalisée en attendant que le modèle repère de nouveau un écart trop important cette fois-ci à l'instant $i+1$. La procédure sera réitérée jusqu'à ce que la simulation puisse se terminer au complet.

5.2.4.2 Processus de la simulation

En premier lieu, il est important d'observer que les propriétés de distributivité du modèle seront ici conservées tout comme ils l'ont été pour la méthode précédente. Dès lors, les données d'entrée du modèle à savoir une matrice regroupant l'ensemble des données de pluie des sept stations, ainsi que les paramètres préalablement calibrés restent les mêmes.

A titre de rappel, lors des méthodes précédentes n'étaient considérées que les conditions initiales du sol, que ce soit lors de l'utilisation des IPA ou encore des données d'humidité du sol. Cependant, l'un des défauts majeurs du modèle dit « des Anglais » réside dans le fait que ce dernier ne tient pas en compte, lors de la simulation, des périodes d'assèchement du terrain, c'est à dire lorsqu'il y a absence de précipitation durant une période conséquente. Pour le démontrer, il est possible, à partir du modèle, de tracer l'humidité simulée et de la comparer ainsi à l'humidité observée.

La première remarque consiste à noter que chaque début d'averse, mis en valeur sur la figure ci-dessous, entraîne l'accroissement logique de la valeur de l'humidité aussi bien

simulée qu'observée. Toutefois, alors que la deuxième courbe présente des périodes d'assèchement caractérisées par plusieurs baisses notables entre deux averses, la première courbe se caractérise quant à elle par une augmentation progressive et constante de sa valeur en humidité jusqu'à saturation.

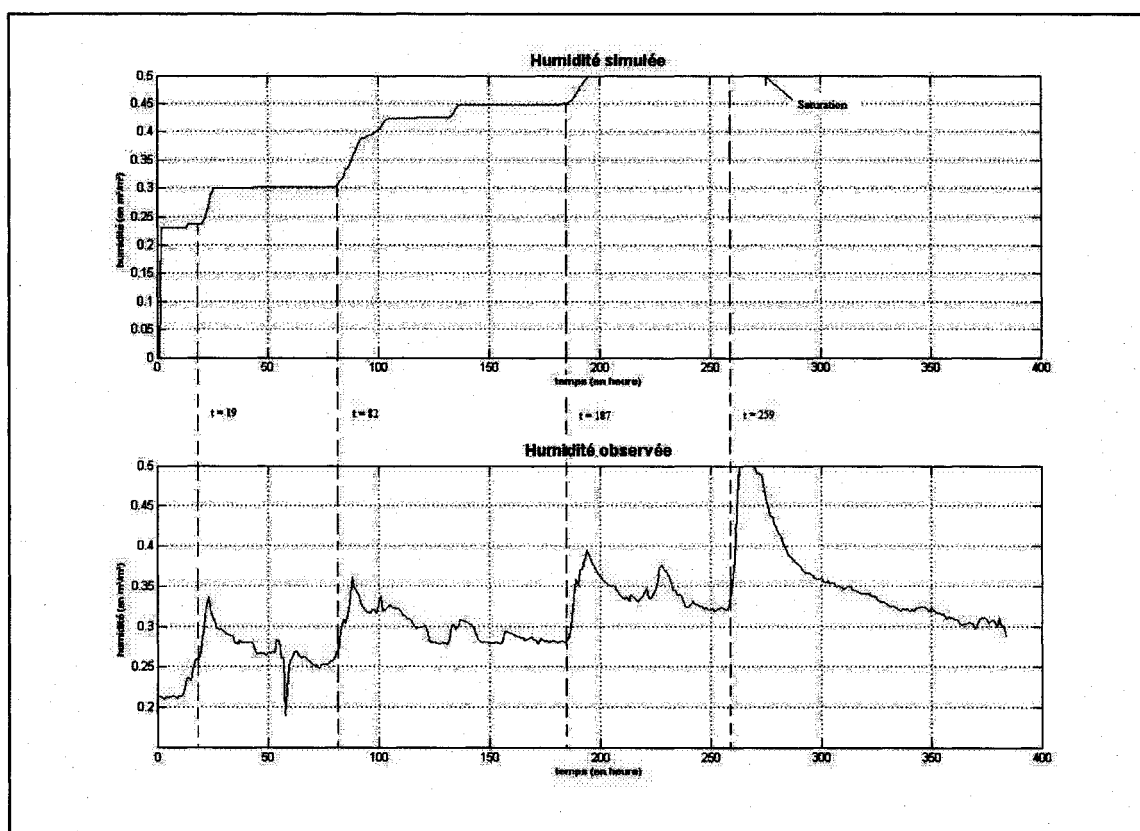


Figure 35 Comparaison humidité moyenne simulée et observée sur les 15 premiers centimètres sur une des mailles du modèle et sans remise à jour (Événement 1)

Ainsi, l'emploi d'une méthode dite à correction continue dans le temps représenterait une solution efficace afin de pallier au défaut du modèle et d'ainsi améliorer possiblement les résultats de la prévision. Il reste alors à déterminer la manière dont la remise à jour du paramètre Dtheta pourrait s'effectuer.

Sous un format identique à celui du fichier de précipitation, à savoir 7 lignes (7 stations) et nbrdt colonne (durée de la simulation), une matrice regroupant les valeurs de Dthéta pour chaque station et à chaque pas de temps fut intégrée au modèle et créée à partir des données d'humidité du sol observées le plus en surface (segment 0-15 cm) et à partir de la relation suivante :

$$Dth\acute{e}ta = \theta_{sat} - \text{Humidit\acute{e} observ\acute{e}e} \quad (5.2)$$

Cette approche diffère ainsi de la méthodologie initiale de remise à jour des paramètres dans la mesure où la valeur du déficit volumétrique ne sera, non pas calculée par le modèle lui-même, mais au contraire imposée à ce dernier, ceci sur chaque maille et comme étant celle provenant de la station la plus proche sur un même type de sol. Recourir à une telle stratégie présente, par ailleurs, de nombreux avantages car, réduisant d'une part le temps de calcul du modèle, elle permet également de rendre ce dernier plus souple et maîtrisable dans le sens où la remise à jour peut désormais être imposée aux pas de temps désirés. Après réflexion, il fut finalement décidé d'effectuer la remise à jour du paramètre Dthéta qu'aux instants de début de chaque averse « importante » tout comme observé sur la figure ci-dessous. De plus, la matrice regroupant les valeurs de Dthéta étant engendrée à l'aide de données réelles et observées d'humidité du sol, cela contribue de par la même une nouvelle fois à déterminer les avantages éventuels liés à l'utilisation de ces dernières.

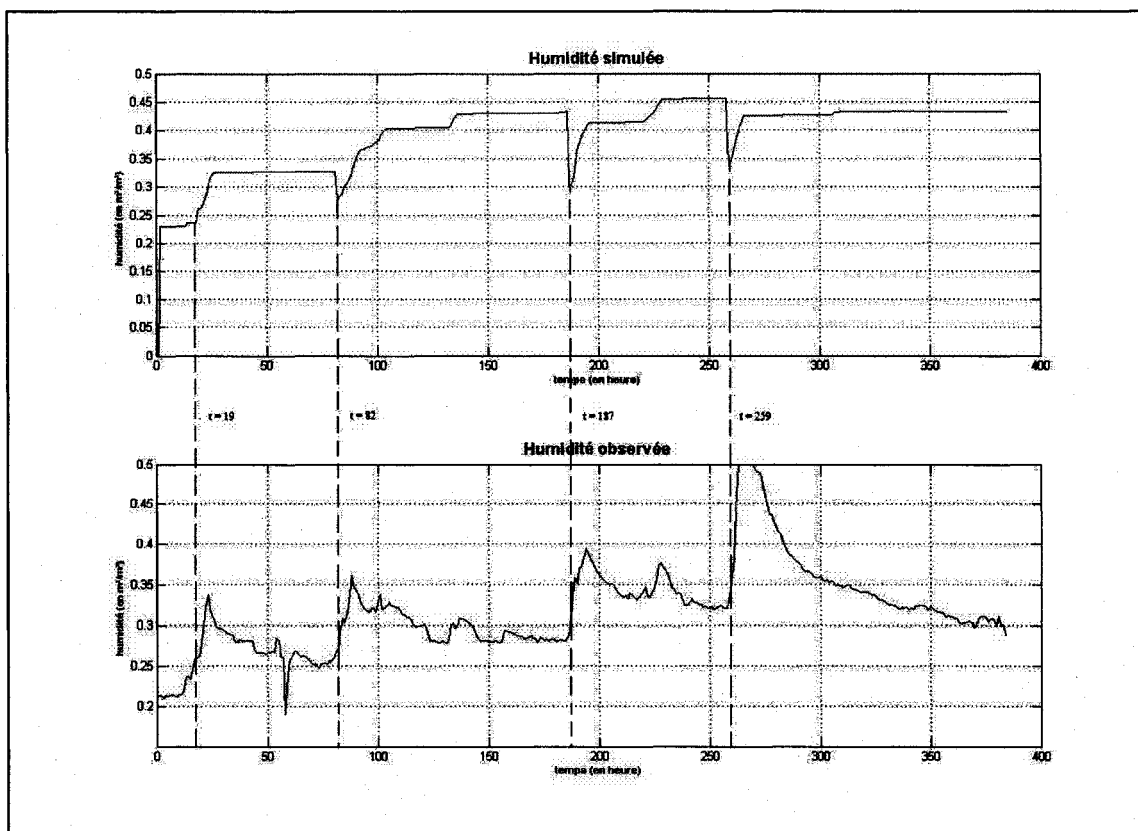


Figure 36 Comparaison humidité moyenne simulée et observée sur les 15 premiers centimètres sur une des mailles du modèle et avec remise à jour (Événement 1)

La figure ci-dessus permet de mettre en valeur les changements occasionnés par la remise à jour du paramètre $D_{th\acute{e}ta}$ lors de l'événement 1 et à chaque début d'averse, c'est à dire aux temps : $t = 19$, $t = 82$, $t = 187$ et $t = 259$ heures. Ainsi et à ces instants précis, la valeur de l'humidité simulée est imposée afin de correspondre aux valeurs respectives de l'humidité observée, permettant ainsi au modèle de prendre en considération les périodes d'assèchement du bassin.

Voici alors présenté ci-dessous l'ensemble des résultats liés à la méthode 4 avec remise à jour au début de chaque averse :

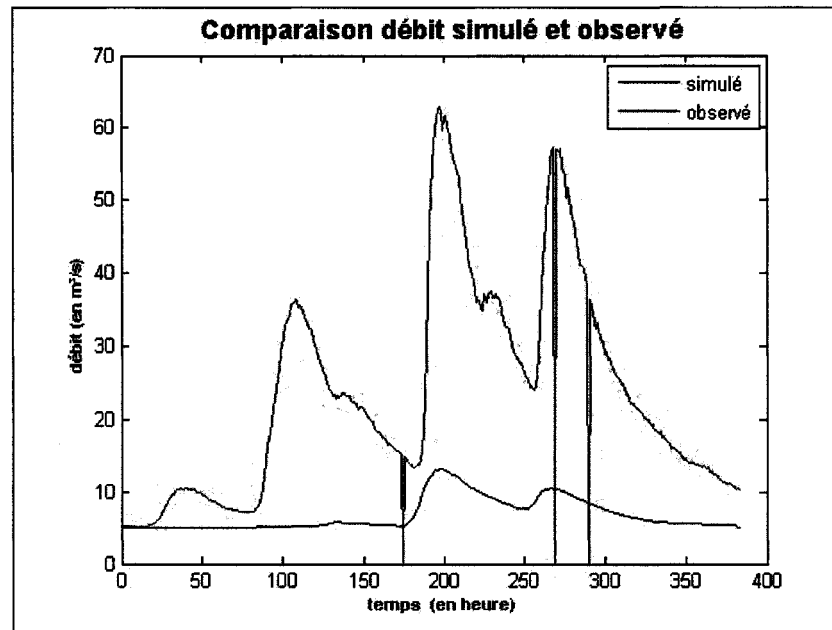


Figure 37 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 4 – Événement 1 – Remise à jour

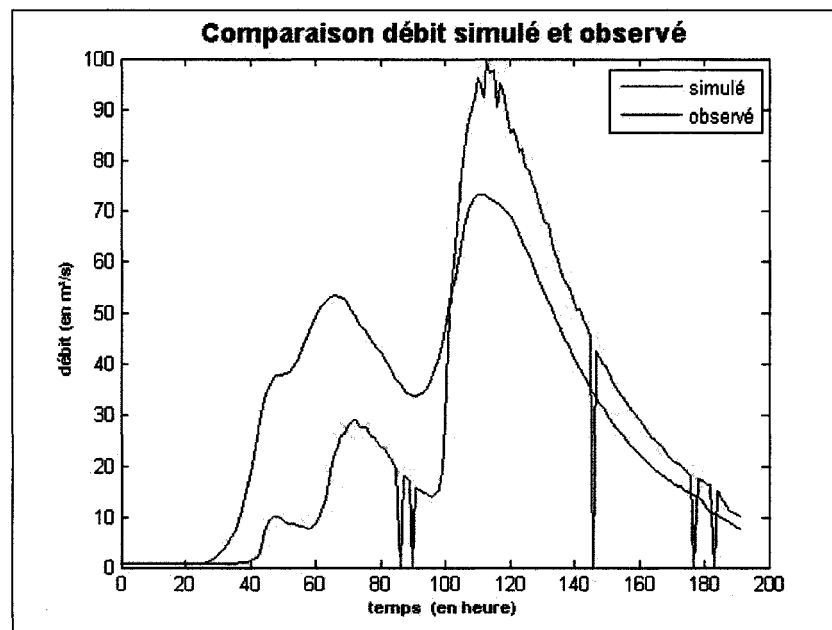


Figure 38 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 4 – Événement 2 – Remise à jour

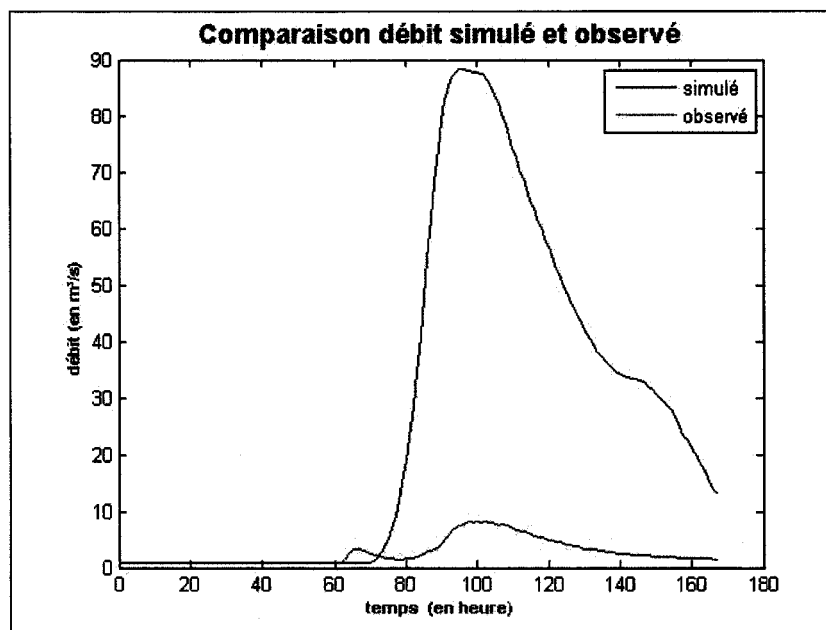


Figure 39 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 4 – Événement 3 – Remise à jour

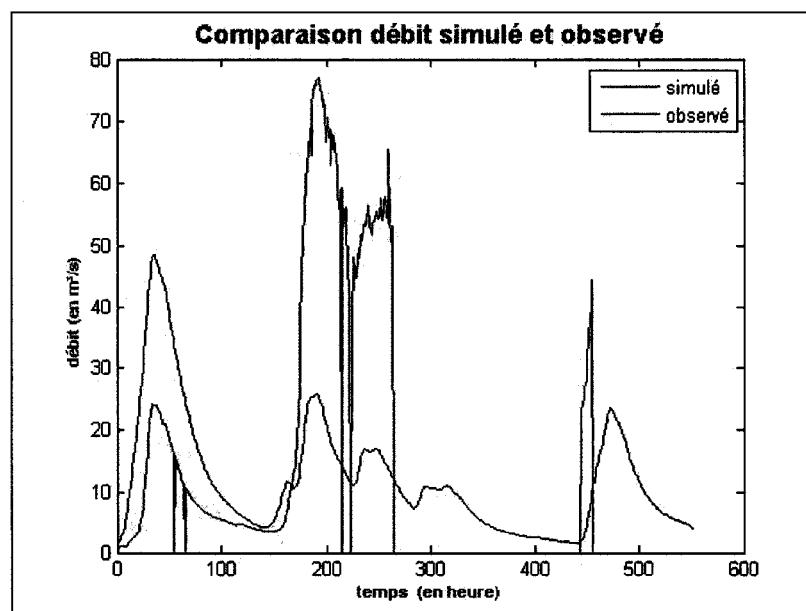


Figure 40 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 4 – Événement 4 – Remise à jour

Le calcul des critères d'efficacité donne les résultats suivants :

Tableau XVIII

Évaluation des critères : Méthode 4

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|--------------------------|---------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 1 Méthode 4 | -1,03 | -0,34 | 71,02 | 79,10 |
| Événement 2 Méthode 4 | 0,63 | 0,46 | -14,24 | 26,28 |
| Événement 3 Méthode 4 | -272,85 | -0,99 | -903,68 | -980,44 |
| Événement 4 Méthode 4 | -0,13 | -0,06 | 34,24 | 37,08 |

L'analyse des derniers résultats marque une détérioration importante de la qualité des simulations, comparativement à celles obtenues lors des méthodes précédentes. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène, ces dernières étant exposées plus en détail lors du prochain chapitre. En particulier, la longueur des événements établis en tout début d'étude pourrait vraisemblablement représenter l'une des causes principales à ce manque de résultats. En effet, le modèle des Anglais est un modèle strictement événementiel dans le sens où il ne peut redistribuer l'humidité de sorte de pouvoir tenir compte notamment de l'évapotranspiration. Dès lors, la durée des événements présentés en tant que données d'entrée du modèle revêt ici toute son importance, en notant que plus courte cette dernière sera et plus précis sera éventuellement le modèle. Pour le prouver, il fut ainsi décidé d'effectuer à nouveau l'ensemble des méthodes précédentes à partir des mêmes événements mais de plus courte durée.

5.2.5 Essai avec fractionnement des événements 2 et 4

L'objectif principal de ce dernier essai consiste à mettre en valeur l'influence que peut avoir le choix des événements pluvieux, notamment en terme de longueur, sur la qualité des résultats découlant des différentes méthodes employées lors de cette étude.

5.2.5.1 Choix des événements « fractionnés »

Comme mentionné lors des paragraphes précédents, la trop grande durée des événements utilisés jusqu'à présent pourrait justifier les mauvais résultats relatifs à la quatrième méthode. L'idée consiste donc à scinder ces derniers en plusieurs sous événements, le découpage étant en réalité réalisé à chaque début et fin d'averse. D'autre part, les traits particuliers des événements 1 et 3 et dont une analyse sera présentée lors du chapitre suivant ont amené à ne considérer que les événements 2 et 4.

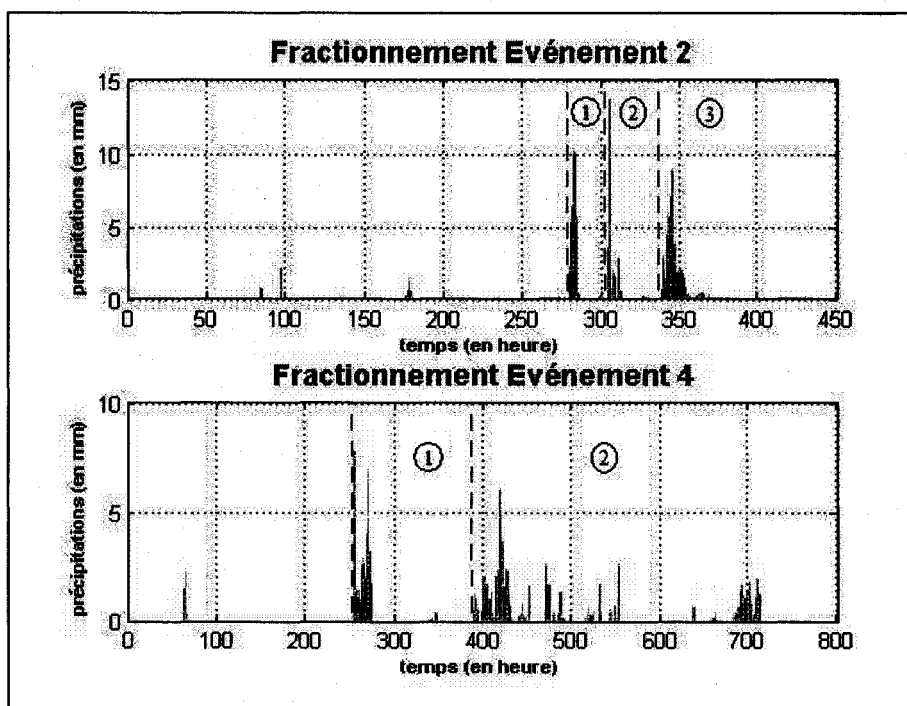


Figure 41 Fractionnement des événements 2 et 4

La figure ci-dessus décrit l'ensemble des sous événements, ces derniers étant au nombre de 3 après fractionnement de l'événement 2, et au nombre de 2 en ce qui concerne l'événement 4.

Tableau XIX

Description des sous événements

| Événement 2-1 | Événement 2-2 | Événement 2-3 | Événement 4-1 | Événement 4-2 |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Événement 2 Partie 1 | Événement 2 Partie 2 | Événement 2 Partie 3 | Événement 4 Partie 1 | Événement 4 Partie 2 |
| 14/06/05 14h au 15/06/05 13h | 15/06/05 14h au 16/06/05 23h | 17/06/05 0h au 20/06/05 23h | 07/10/05 12h au 13/10/05 1h | 13/10/05 2h au 29/10/05 23h |

Par ailleurs et afin de faciliter la compréhension du lecteur, les sous événements seront désignés tel que présentés sur le tableau précédent, les dates relatives à chaque partie étant également fournies. Il est également important de rappeler l'importance à accorder aux premiers jours des événements 2 et 4, car même s'ils ne font pas partie des sous événements, ils permettront de déterminer les IPA relatifs à ces derniers.

Une fois les sous événements définis, les mêmes méthodes de simulation y sont appliquées, les procédures et l'enchaînement de ces dernières étant parfaitement équivalents.

5.2.5.2 Méthode 1 : Utilisation des IPA

La première étape de cette méthode consistait donc à déterminer les IPA à chaque sous événements. Ces derniers sont présentés ci-après :

Tableau XX

IPA après fractionnement

| | IPA (en mm) |
|---------------|-------------|
| Événement 2-1 | 3,38 |
| Événement 2-2 | 28,64 |
| Événement 2-3 | 46,48 |
| Événement 4-1 | 1,39 |
| Événement 4-2 | 24,30 |

Ces derniers permettent encore une fois d'obtenir la valeur du déficit volumétrique à saturation correspondante :

Tableau XXI

Dthéta après fractionnement

| | Dthéta (en m ³ /m ³) |
|---------------|---|
| Événement 2-1 | 0,45 |
| Événement 2-2 | 0,02 |
| Événement 2-3 | 0,01 |
| Événement 4-1 | 0,45 |
| Événement 4-2 | 0,03 |

A titre indicatif, la valeur de Dthéta pour l'événement 2-1 était à l'origine de 1.37 m³/m³ et de 7.69 m³/m³ pour l'événement 4-1.

La calibration effectuée à l'aide du modèle de simulation procure les résultats suivants :

Tableau XXII

Valeur des paramètres Green et Ampt
Méthode 1 après fractionnement

| | Dtheta (en m ³ /m ³) | Linit (en m) | Ksat (en mm/h) | Hc (en m) |
|---------------|---|--------------|----------------|-----------|
| Événement 2-1 | 0,45 | 0 | 0,5 | 0,45 |
| Événement 2-2 | 0,02 | 0 | 0,5 | 0,45 |
| Événement 2-3 | 0,01 | 0 | 0,5 | 0,45 |
| Événement 4-1 | 0,45 | 0 | 0,5 | 0,45 |
| Événement 4-2 | 0,03 | 0 | 0,5 | 0,45 |

La comparaison entre les débits observés et simulés ainsi que les critères d'efficacité sont une nouvelle fois présentés de la manière suivante :

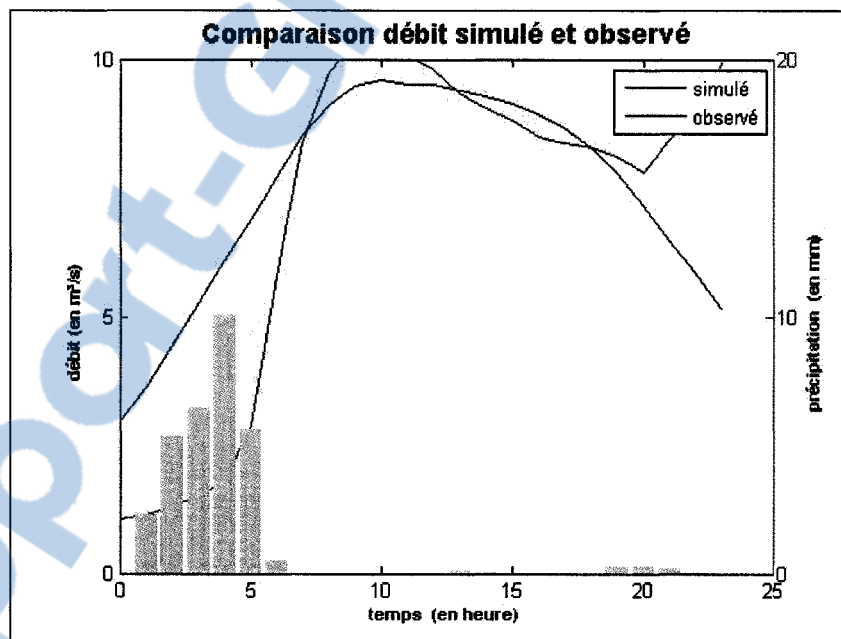


Figure 42 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 1 Événement 2-1

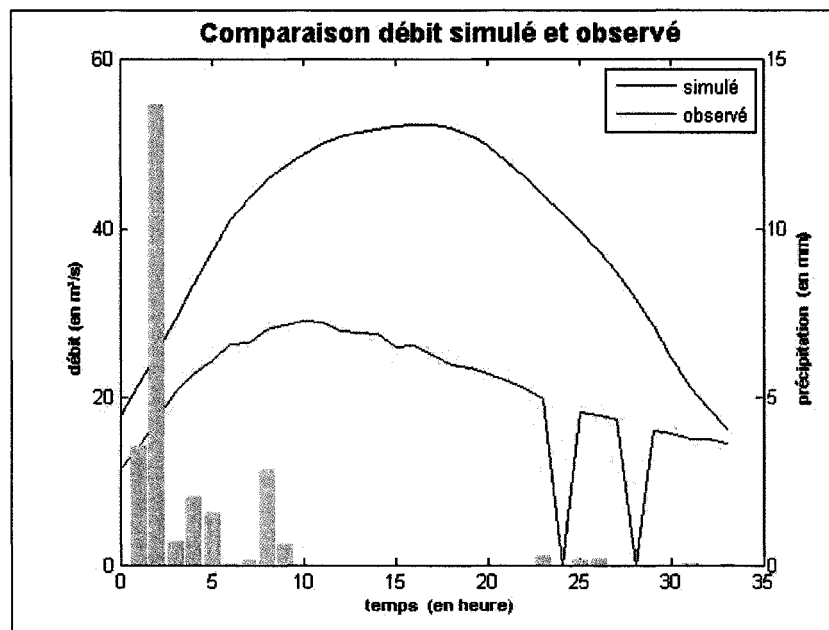


Figure 43 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 1 Événement 2-2

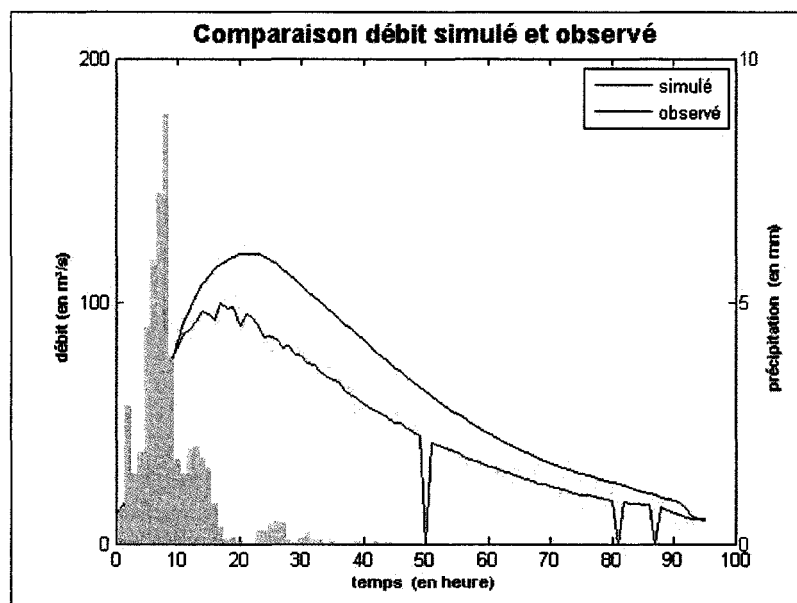


Figure 44 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 1 Événement 2-3

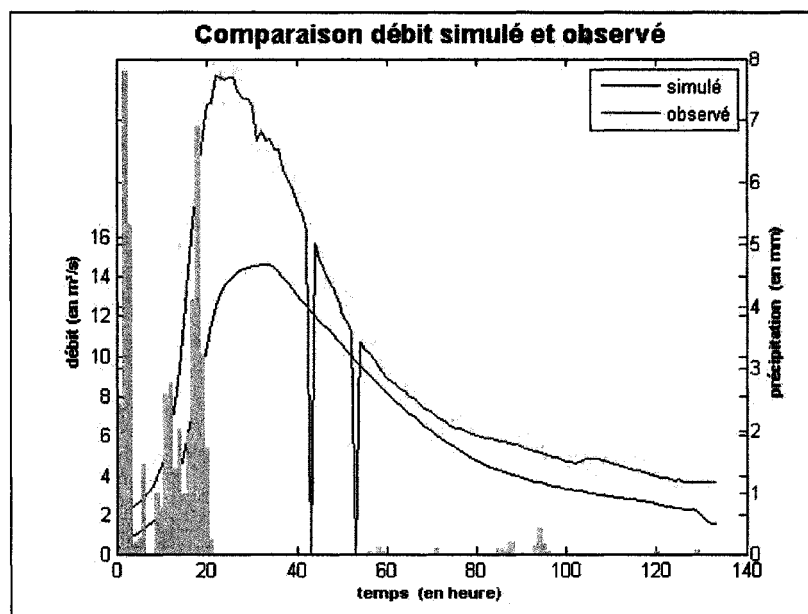


Figure 45 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 1 Événement 4-1

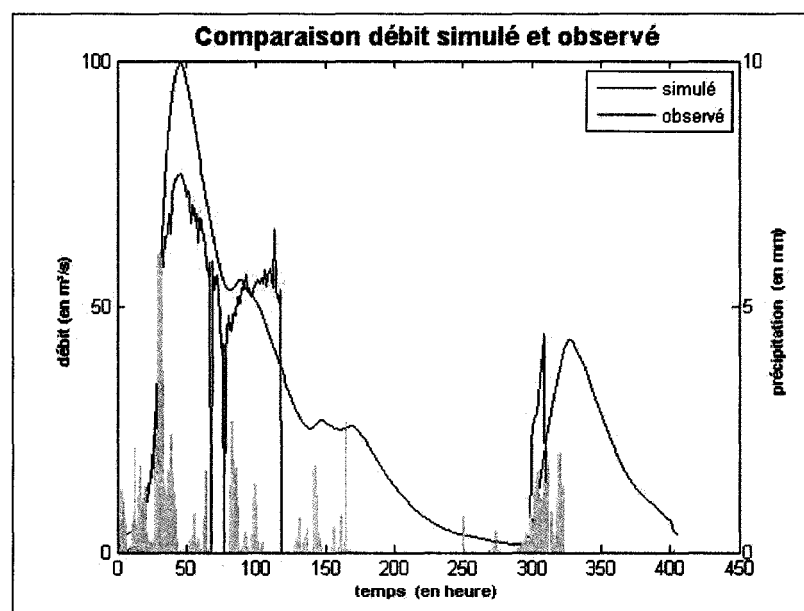


Figure 46 Comparaison débit simulé et observé
Méthode 1 Événement 4-2

Tableau XXIII

Évaluation des critères : Méthode 1 après fractionnement

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|----------------------------|-------|-------|-------------------------------|---|
| Événement 2-1 Méthode 1 | 0,58 | 0,40 | -5,39 | 6,81 |
| Événement 2-2 Méthode 1 | -7,40 | -0,79 | -90,89 | -79,67 |
| Événement 2-3 Méthode 1 | 0,58 | 0,41 | -32,54 | -20,44 |
| Événement 4-1 Méthode 1 | 0,49 | 0,33 | 29,92 | 39,53 |
| Événement 4-2 Méthode 1 | 0,61 | 0,44 | -7,06 | -29,22 |

5.2.5.3 Méthode 2 : Utilisation des données d'humidité

A partir du même procédé qu'employé auparavant à savoir le tracé à chaque station et à chaque événement d'un profil d'humidité, les moyennes caractéristiques sur l'ensemble du bassin des valeurs de Dthéta ont pu être déterminées. Conservant également la calibration effectuée lors de la première méthode, les paramètres de Green et Ampt sont donc les suivants :

Tableau XXIV

Valeur des paramètres de Green et Ampt
Méthode 2 après fractionnement

| | Dthéta (en m ³ /m ³) | Linit (en m) | Ksat (en mm/h) | Hc (en m) |
|---------------|---|--------------|----------------|-----------|
| Événement 2-1 | 0,38 | 0 | 0,5 | 0,45 |
| Événement 2-2 | 0,09 | 0 | 0,5 | 0,45 |
| Événement 2-3 | 0,11 | 0 | 0,5 | 0,45 |
| Événement 4-1 | 0,28 | 0 | 0,5 | 0,45 |
| Événement 4-2 | 0,04 | 0 | 0,5 | 0,45 |

Une nouvelle fois, le modèle permet de tracer les courbes correspondantes au débit simulé et observé afin de comparer les valeurs de ces dernières. Toutefois, afin d'alléger le contenu du rapport, l'ensemble des graphiques seront désormais présentés en annexe 4, seul le tableau regroupant les critères d'efficacité étant alors fourni.

Voici ainsi présenté ci-dessous l'ensemble des valeurs correspondantes à l'évaluation de la qualité de la simulation :

Tableau XXV

Évaluation des critères : Méthode 2 après fractionnement

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|----------------------------|-------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 2-1 Méthode 2 | -1,00 | -0,33 | -58,96 | -41,77 |
| Événement 2-2 Méthode 2 | 0,32 | 0,19 | -6,65 | 0,09 |
| Événement 2-3 Méthode 2 | 0,65 | 0,49 | 26,98 | 33,44 |
| Événement 4-1 Méthode 2 | 0,52 | 0,35 | -18,78 | -6,55 |
| Événement 4-2 Méthode 2 | 0,69 | 0,53 | 0,69 | -20,75 |

Tout comme accompli précédemment, un nouveau test fut réalisé en conservant les valeurs calibrées mais en utilisant une pluie distribuée. Les résultats sont les suivants :

Tableau XXVI

Évaluation des critères : Méthode 2 avec pluie distribuée

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|-------------------------------|-------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 2-1 Méthode 2bis | -3,22 | -0,62 | -89,29 | -74,71 |
| Événement 2-2 Méthode 2bis | -0,40 | -0,17 | -30,14 | -18,96 |
| Événement 2-3 Méthode 2bis | 0,74 | 0,59 | 22,08 | 29,10 |
| Événement 4-1 Méthode 2bis | 0,60 | 0,42 | -15,29 | -4,24 |
| Événement 4-2 Méthode 2bis | 0,67 | 0,50 | -0,92 | -22,44 |

5.2.5.4 Méthode 3 : Utilisation des données d'humidité avec paramètres de sol distribués

Une nouvelle fois, la pluie distribuée correspondra ici aux données entrantes du modèle alors que deux jeux de paramètres différents ont été calibrés, l'un pour le sol argileux et l'autre pour le sol organique. Les valeurs de ces derniers sont présentées comme par la suite suivie ensuite par les résultats d'évaluation des critères d'efficacité, les graphiques de comparaison entre le débit simulé et observé étant une nouvelle fois compilés en annexe 4 :

Tableau XXVII

Valeur des paramètres de Green et Ampt
Méthode 3 après fractionnement

| | Dtheta1 (en m3/m3) | Linit1 (en m) | Ksat1 (en mm/h) | Hc1 (en m) |
|----------------------|--------------------|---------------|-----------------|------------|
| Événement 2-1 Argile | 0,36 | 0 | 0,2 | 0,35 |
| Événement 2-2 Argile | 0,22 | 0 | 0,2 | 0,35 |
| Événement 2-3 Argile | 0,3 | 0 | 0,2 | 0,35 |
| Événement 4-1 Argile | 0,22 | 0 | 0,2 | 0,35 |
| Événement 4-2 Argile | 0,08 | 0 | 0,2 | 0,35 |

| | Dtheta2 (en m3/m3) | Linit2 (en m) | Ksat2 (en mm/h) | Hc2 (en m) |
|-------------------------|--------------------|---------------|-----------------|------------|
| Événement 2-1 Organique | 0,86 | 0 | 0,85 | 0,7 |
| Événement 2-2 Organique | 0,71 | 0 | 0,85 | 0,7 |
| Événement 2-3 Organique | 0,84 | 0 | 0,85 | 0,7 |
| Événement 4-1 Organique | 0,94 | 0 | 0,85 | 0,7 |
| Événement 4-2 Organique | 0,81 | 0 | 0,85 | 0,7 |

Tableau XXVIII

Évaluation des critères : Méthode 3 après fractionnement

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|----------------------------|--------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 2-1 Méthode 3 | -46,81 | -0,96 | -310,30 | -282,39 |
| Événement 2-2 Méthode 3 | 0,48 | 0,32 | 2,23 | 11,88 |
| Événement 2-3 Méthode 3 | 0,41 | 0,26 | 37,92 | 44,76 |
| Événement 4-1 Méthode 3 | -5,50 | -0,73 | -149,74 | -119,61 |
| Événement 4-2 Méthode 3 | 0,74 | 0,59 | 14,49 | 5,96 |

5.2.5.5 Méthode 4 : Rétroaction entre les débits simulés et observés

A titre de rappel, les mêmes données d'entrée ainsi que les mêmes paramètres du sol employés lors de la méthode précédente furent réutilisés alors qu'une remise à jour du paramètre Dthéta au début de chaque averse fut effectuée afin de prendre en compte les périodes d'assèchement du territoire. Dès lors, alors que les résultats graphiques sont encore une fois compilés en annexe 4, l'évaluation des critères d'efficacité donne les résultats suivants :

Tableau XXIX

Évaluation des critères : Méthode 4 après fractionnement

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|----------------------------|--------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 2-1 Méthode 4 | -22,86 | -0,92 | -215,68 | -200,94 |
| Événement 2-2 Méthode 4 | 0,31 | 0,18 | 15,11 | 23,94 |
| Événement 2-3 Méthode 4 | 0,50 | 0,33 | 35,68 | 41,21 |
| Événement 4-1 Méthode 4 | -1,34 | -0,40 | -84,14 | -75,05 |
| Événement 4-2 Méthode 4 | 0,29 | 0,17 | 37,22 | 29,05 |

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS

Différentes approches ont été adoptées afin de mettre en valeur l'importance de l'acquisition des données d'humidité du sol au sein du modèle lors du processus de modélisation hydrologique. L'ensemble des résultats découlant de ces dernières et présentés lors du chapitre précédent, seront au cours des paragraphes suivants analysés et interprétés. Pour cela, les premières remarques évalueront tout d'abord la qualité des simulations vis-à-vis des données observées. Ensuite, une comparaison des résultats entre les différentes méthodes d'infiltration sera exposée et commentée, une analyse critique étant par la suite proposée.

6.1 Comparaison entre les résultats simulés et observés

6.1.1 Récapitulatifs

Comme mentionné en tout début d'étude, l'ordre suivant laquelle les différentes approches ont été étudiées fut établi de sorte que les améliorations apportées au modèle ainsi qu'aux résultats le soient de manière croissante.

Le tableau ci-dessous établit un rappel succinct des différentes caractéristiques de chacune de ces méthodes.

Tableau XXX

Récapitulatif des différentes méthodes

| | |
|-----------|---|
| Méthode 1 | IPA - Pluie et Sol Uniforme |
| Méthode 2 | Données d'humidité - Pluie et Sol Uniforme |
| Méthode 3 | Données d'humidité - Paramètres distribués |
| Méthode 4 | Données d'humidité - Paramètres distribués avec remise à jour |

Ensuite, la qualité et la précision des simulations, pour chaque méthode et chaque événement, ont été évaluées à l'aide du calcul des critères et coefficients que sont le coefficient de Nash, le rapport entre les volumes observés et simulés et enfin le rapport entre les pointes maximales. Ces derniers sont rappelés et compilés pour les événements 2 et 4 uniquement dans le tableau présenté XXXI. L'absence des événements 1 et 3 sera quant à elle justifiée dans le paragraphe 6.1.2.

A titre de rappel, les critères que sont le rapport entre les volumes et entre les pointes maximales sont exprimés en pourcentage d'erreur. Ainsi, la qualité de la simulation sera d'autant meilleure que ces derniers seront proches de zéro.

Tableau XXXI

Récapitulatif des critères d'efficacité pour les événements 2 et 4

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|--------------------------|-------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 2 Méthode 1 | 0,69 | 0,52 | -41,16 | -2,60 |
| Événement 2 Méthode 2 | 0,53 | 0,36 | -53,98 | -10,46 |
| Événement 2 Méthode 3 | 0,35 | 0,21 | -57,78 | -1,69 |
| Événement 2 Méthode 4 | 0,63 | 0,46 | -14,24 | 26,28 |
| Événement 4 Méthode 1 | 0,75 | 0,60 | 21,53 | 10,17 |
| Événement 4 Méthode 2 | 0,81 | 0,69 | -4,00 | -11,77 |
| Événement 4 Méthode 3 | 0,69 | 0,53 | -11,40 | 5,49 |
| Événement 4 Méthode 4 | -0,13 | -0,06 | 34,24 | 37,08 |

6.1.2 Analyse des résultats et remarques sur les événements 1 et 3

Tout d'abord et à la vue des valeurs des coefficients estimés, les simulations réalisées lors des événements 1, 2 et 4 et pour chaque méthode, peuvent paraître satisfaisantes. En effet, avec un coefficient de Nash toujours supérieur à 0.3 pour les trois premières méthodes, la correspondance entre les dates d'occurrence des événements dits « importants » reste acceptable, l'événement dernier obtenant les meilleurs résultats. Par ailleurs, même si la valeur des deux derniers coefficients peuvent parfois décevoir atteignant jusqu'à 50 % d'erreur, l'allure globale des courbes simulées vis-à-vis des courbes observées rassure et laisse fort à penser que les résultats obtenus peuvent être vraisemblablement encore améliorés.

Une attention particulière doit toutefois être accordée aux résultats de l'événement 3, ces derniers présentant des valeurs de critères à première vue désastreuses, phénomène causé principalement par une surestimation systématique des valeurs simulées par rapport aux valeurs observées. Plusieurs explications peuvent ainsi être énoncées dont celle faisant référence à l'état particulièrement sec du sol au début de l'événement et pouvant ainsi donner suite à un très faible débit. Toutefois, cela ne peut justifier un tel écart entre le débit simulé et observé, d'autant plus que l'état hydrique du sol fut pris en compte lors de l'intégration des données d'humidité. En réalité, la comparaison effectuée entre les données de débit à l'exutoire du bassin versant de la rivière des Anglais utilisées ici et celles correspondantes à l'exutoire du bassin versant de la rivière Châteauguay permet de déduire, à l'aide également de la figure 20, que l'erreur majeure ne se situe pas au niveau du débit simulé mais vraisemblablement plus au niveau du débit observé. En effet, lors de cet événement intervient une précipitation à forte intensité traduite cependant par la présence d'un très faible débit observé. Alors que le bassin de la Châteauguay présente une superficie un peu moins inférieure à quatre fois celle correspondante au bassin des Anglais, les valeurs de débit relatives au premier se trouvent être près de dix fois supérieures à dates équivalentes. Ainsi, il paraît légitime de pouvoir remettre en question la qualité des données mesurées, l'évolution du débit simulé paraissant par ailleurs plus logique. C'est pourquoi après réflexion, il fut décidé, de prêter une attention moindre à l'événement 3 et en particulier lors des prochaines analyses et interprétations des résultats.

Une attention particulière peut également être prêtée vis-à-vis du début de l'événement premier. En effet, malgré l'ensemble des efforts fournis afin de faire correspondre au mieux les débits simulés et observés en début d'événement, l'ensemble des résultats fut infructueux, ceci quelque soit la méthode. Dès lors, l'explication la plus vraisemblable pouvant justifier ce phénomène est la suivante. Les dates de début de l'événement premier correspondent à la fin du mois d'Avril. Or, le sud du bassin étant très montagneux, la présence de gel ou de neige à cette période n'est pas à exclure. Un tel

contexte conduirait donc à maintenir l'état hydrique du sol dans un état stable car l'eau ne pourrait plus passer au travers des premières couches du sol alors qu'une quelconque précipitation n'aurait d'influence que sur la mesure de débit. Ainsi, utiliser des données d'humidité observée afin de corriger la mesure de débit simulé peut paraître, dans ce contexte particulier, difficile.

L'ensemble des remarques établies sur les événements 1 et 3 justifie ainsi le fait que ces derniers n'aient pas été pris en considération lors de la reconduite de l'étude avec fractionnement des événements.

6.1.3 Causes éventuelles des imprécisions

En somme, la grande partie des résultats de simulation en comparaison avec les données observées est encourageante. Toutefois, il reste certain que la prévision peut encore grandement être améliorée, le défaut principal en terme de qualité pouvant par ailleurs être justifié comme suit. Tout d'abord, il paraît judicieux de mentionner le problème relatif à la qualité des données d'entrée qui, soit par leur absence partielle ou par leur incohérence ponctuelle, peut constituer l'une des sources majeures d'erreur sans pour autant correspondre à la cause principale d'imprécision. A titre d'exemple, les défauts relevés précédemment et relatifs aux données de débit à l'exutoire lors de l'événement troisième pourraient remettre en doute la qualité des données de débit mesurées lors du quatrième événement, une partie d'entre elles étant de plus indisponibles. Afin de résoudre ce problème, plusieurs solutions de reconstitution de données peuvent être proposées tout comme celle par exemple des trois stations les plus proches. Ensuite et surtout, il est inutile de rappeler qu'il est très difficile voire impossible de reproduire parfaitement la réalité, les procédés utilisés étant très simplifiés par rapport au processus réel.

En conclusion, même si les résultats des simulations ne paraissent pas parfaits, ces derniers sont encourageants et sont suffisants pour parfaire à l'objectif principal qui, à titre de rappel, est d'obtenir des améliorations probantes au cours de l'évolution des méthodes d'assimilation.

6.2 Comparaison entre les résultats des différentes méthodes

6.2.1 Passage de la méthode 1 à la méthode 2

La transition réalisée entre la première et la deuxième méthode vise à mettre en valeur les premières améliorations relatives à l'intégration des données d'humidité du sol lors du processus de modélisation hydrologique.

L'étude comparative des valeurs des critères d'efficacité révèle une amélioration notable de la qualité de la simulation en ce qui concerne le premier et le quatrième événement mais également une légère détérioration des événements deuxième et troisième. A première vue surprenant, ce phénomène est en réalité légitime et découle des particularités des résultats de la première méthode. En effet, lors de la calibration de cette dernière, un effort fut accompli afin de faire correspondre au mieux les courbes de débit simulé et observé, tout en prêtant une attention particulière à la qualité des critères d'efficacité. Cependant, les résultats obtenus ont présenté certaines singularités dans la mesure où le débit simulé, découlant du premier et du dernier événement, était sous évalué alors que celui découlant du deuxième et troisième événement était quant à lui surévalué. Dès lors, l'objectif majeur fut de déterminer les paramètres idéaux afin d'obtenir le compromis le plus juste entre deux phénomènes à tendances différentes et opposées. Par ailleurs, à titre de rappel et lors toujours de la première méthode, la valeur du déficit volumétrique à saturation fut fixée pour chaque événement à $0.45 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Or, les valeurs de Dthéta déterminées lors de la deuxième méthode furent, pour chaque événement, toutes inférieures, augmentant de par la même le débit simulé, en rappelant

que les paramètres K_{sat} , H_c et L_{init} furent de plus inchangés lors du passage à la deuxième méthode. En somme, il était donc très difficile de pouvoir améliorer l'ensemble des événements sans en détériorer aucun.

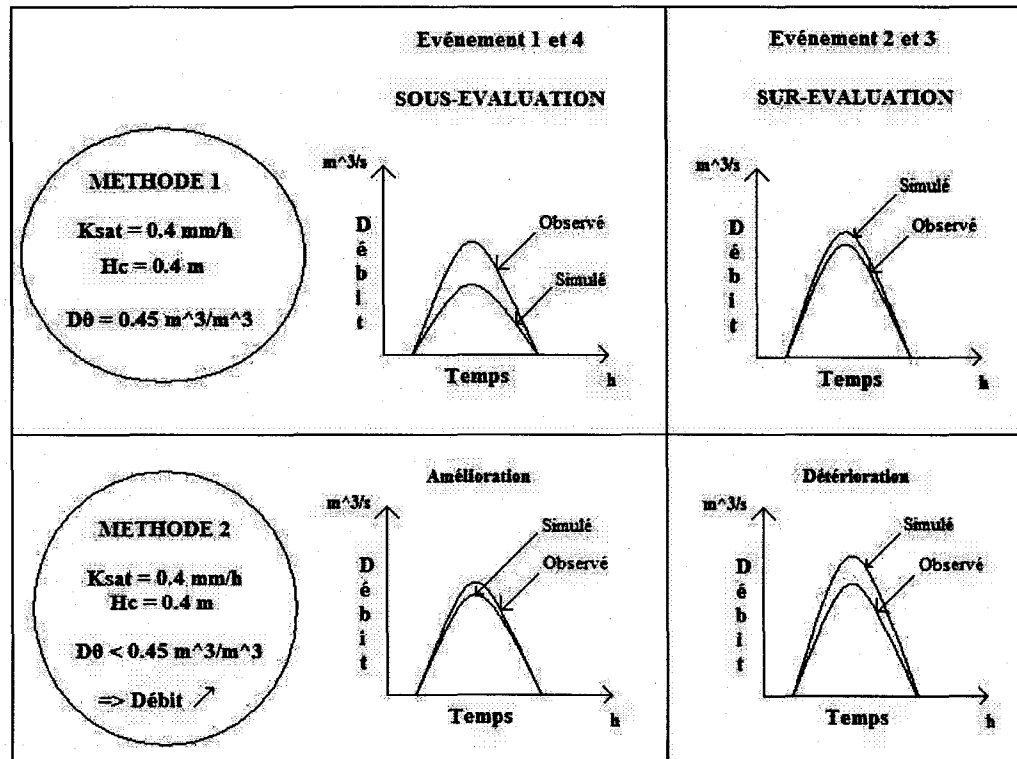


Figure 47 Tendances opposées entre les événements

Afin de mieux illustrer ce phénomène, la figure 47 résume graphiquement les faits énoncés précédemment.

Malgré la détérioration des résultats liée à l'événement 2, cette dernière reste légère et ne change en rien à la qualité et à la sensibilité de la simulation. De plus, l'utilisation des données d'humidité du sol a permis d'améliorer sensiblement la qualité de l'événement 1 alors que l'événement 4 obtient une valeur très encourageante de 0.81 en ce qui concerne le critère de Nash.

En conclusion, la première approche consistant à considérer l'état hydrique initial du sol lors du processus de simulation afin d'améliorer la qualité des prévisions de débit s'avère somme toute concluante, même si certaines améliorations pourraient encore être amenées.

6.2.2 Passage de la méthode 2 à la méthode 3

La transition réalisée entre la deuxième et la troisième méthode vise à mettre en valeur les améliorations potentielles et relatives à l'utilisation d'un modèle distribué.

Pour cela, une première démarche consista à n'utiliser qu'une pluie distribuée afin d'en déterminer l'influence. La comparaison des résultats relatifs au passage de la deuxième méthode avec pluie uniforme à la même méthode mais avec pluie distribuée, et dont le tableau des critères est situé à la fin du paragraphe 5.2.2, révèle une détérioration quasi globale de l'ensemble des résultats. A titre de rappel, le modèle des Anglais est basé sur une triangulation du bassin, dont chaque partie se voit attribuée les caractéristiques propres de la station la plus proche selon la méthode de l'inverse de la distance au carré. Or, il suffit donc que les données de précipitation d'une station, dont le poids serait plus important que les autres, diffèrent du reste pour pouvoir troubler les résultats, ce qui est probablement le cas ici. Ainsi, déterminer l'influence que peut avoir à utiliser un modèle distribué revient dans le cas présent à confronter les résultats entre la méthode 2 avec emploi d'une pluie distribuée et la méthode 3.

L'analyse des valeurs des critères d'efficacité met principalement l'accent sur une amélioration de la qualité des simulations lors des événements 2 et 3 augmentant respectivement de 10 et de 30 selon Nash. Toutefois, les résultats du premier événement restent inchangés alors que ceux du quatrième événement se détériorent.

6.2.3 Passage de la méthode 3 à la méthode 4

La transition réalisée entre la troisième et la quatrième méthode vise à mettre en valeur les améliorations potentielles et relatives à la remise à jour des paramètres du sol, et en particulier du déficit volumétrique à saturation.

L'évaluation des critères de performance révèle une détérioration importante et quasi globale de l'ensemble des résultats. L'observation et la comparaison des différents graphiques de débits révèlent de plus que l'ensemble des débits simulés lors de la dernière méthode correspond en réalité à une sous évaluation du débit simulé lors de la troisième méthode, ceci uniquement à partir de la date de remise à jour c'est-à-dire à chaque début d'averse. Bien entendu, plusieurs tentatives visant à corriger la valeur de $D_{th\acute{e}ta}$ à des instants précis et différents ont été lancées mais ont amené à la même conclusion.

Toutefois, le comportement singulier du modèle est loin d'être anormal et peut être justifié comme suit. Le réseau Mésonet-Montréal peut fournir à chaque station des mesures observées et ponctuelles d'humidité du sol. Toutefois, il survient un moment où le modèle se doit d'associer ces dernières au reste du territoire. Ainsi, la grande difficulté, et peut être l'une des principales sources d'erreur du modèle, est vraisemblablement due à la définition propre donnée au lien existant entre une mesure ponctuelle d'humidité à une portion de territoire à plus grande dimension. En d'autres termes, la question à se poser est de savoir comment être certain qu'une mesure d'humidité prise à une position précise puisse correspondre à l'état hydrique global d'un sol dont la localisation et la taille sont différentes. La solution à ce problème est d'autant plus difficile à trouver si est pris en compte l'hétérogénéité du sol, aussi bien sur sa longueur que sur sa largeur. De surcroît, il est également intéressant de noter, notamment grâce au profil du bassin de la rivière des Anglais présentée au paragraphe 5.2.3, que les trois stations que sont l'Artifice, Russeltown et Ruisseau Cranberry,

interpolent à elles seules la moitié sud du bassin accentuant de par la même la marge d'incertitude qui y est associée.

6.2.4 Bilan de la comparaison des résultats des différentes méthodes

L'analyse et la comparaison des résultats entre chaque méthode offre les conclusions suivantes.

Tout d'abord, l'ensemble des améliorations apportées lors du passage de la méthode 1 à la méthode 2, puis de la méthode 2 à la méthode 3 sont encourageantes et rassurent sur l'idée d'une influence positive, tout d'abord, quant à l'intégration des données d'humidité du sol lors du processus de simulation, puis quant à l'utilisation d'un modèle distribué sur la précision des prévisions. Toutefois, les résultats qui en découlent peuvent sans nul doute être encore améliorés, à condition de pouvoir apporter plusieurs modifications aussi bien quant au modèle qu'à la méthodologie. Ces dernières seront discutées plus longuement lors du chapitre de recommandation.

Les résultats relatifs à la méthode de rétroaction sont quant à eux décevants, d'autant plus que les améliorations potentielles qui y sont liées semblent ne faire aucun doute. Une fois encore, modifier la technique d'approche pourrait représenter une solution plus probante et envisageable. A ces fins, une première tentative consiste à scinder les événements utilisés en tant que données d'entrée en plusieurs sous événements de plus petite durée et dont voici l'analyse des résultats.

6.2.5 Analyse des résultats relatifs aux méthodes employant les événements fractionnés

Tout d'abord et en guise de rappel, l'ensemble des critères d'efficacité déterminés pour chaque méthode sont fournis et récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau XXXII

Récapitulatif des critères d'efficacité après fractionnement

| | Nash | C2M | Rapport des volumes (en %) | Rapport des pointes maximales (en %) |
|----------------------------|--------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
| Événement 2-1 Méthode 1 | 0,58 | 0,40 | -5,39 | 6,81 |
| Événement 2-1 Méthode 2 | -1,00 | -0,33 | -58,96 | -41,77 |
| Événement 2-1 Méthode 3 | -46,81 | -0,96 | -310,30 | -282,39 |
| Événement 2-1 Méthode 4 | -22,86 | -0,92 | -215,68 | -200,94 |
| Événement 2-2 Méthode 1 | -7,40 | -0,79 | -90,89 | -79,67 |
| Événement 2-2 Méthode 2 | 0,32 | 0,19 | -6,65 | 0,09 |
| Événement 2-2 Méthode 3 | 0,48 | 0,32 | 2,23 | 11,88 |
| Événement 2-2 Méthode 4 | 0,31 | 0,18 | 15,11 | 23,94 |
| Événement 2-3 Méthode 1 | 0,58 | 0,41 | -32,54 | -20,44 |
| Événement 2-3 Méthode 2 | 0,65 | 0,49 | 26,98 | 33,44 |
| Événement 2-3 Méthode 3 | 0,41 | 0,26 | 37,92 | 44,76 |
| Événement 2-3 Méthode 4 | 0,50 | 0,33 | 35,68 | 41,21 |
| Événement 4-1 Méthode 1 | 0,49 | 0,33 | 29,92 | 39,53 |
| Événement 4-1 Méthode 2 | 0,52 | 0,35 | -18,78 | -6,55 |
| Événement 4-1 Méthode 3 | -5,50 | -0,73 | -149,74 | -119,61 |
| Événement 4-1 Méthode 4 | -1,34 | -0,40 | -84,14 | -75,05 |
| Événement 4-2 Méthode 1 | 0,61 | 0,44 | -7,06 | -29,22 |
| Événement 4-2 Méthode 2 | 0,69 | 0,53 | 0,69 | -20,75 |
| Événement 4-2 Méthode 3 | 0,74 | 0,59 | 14,49 | 5,96 |
| Événement 4-2 Méthode 4 | 0,29 | 0,17 | 37,22 | 29,05 |

De la même manière qu'en début d'étude, la calibration effectuée lors de la première méthode fut réalisée afin de déterminer le meilleur compromis quant à la qualité des résultats sur l'ensemble des 5 sous événements. Ainsi, il est important de noter que cette dernière offre d'assez bons résultats en moyenne à l'exception de l'événement 2-2 dont les améliorations au cours des méthodes suivantes rassureront.

Ainsi et en premier lieu, l'influence correspondant à l'intégration des données d'humidité du sol lors du processus de modélisation, et caractérisée par le passage entre la première et la deuxième méthode, paraît une nouvelle fois somme toute positive, des améliorations étant constatées à tous les sous événements à l'exception de l'événement 2-1. En effet, il faut rappeler que le même passage réalisé pour l'événement 2 dans sa globalité était le seul ayant amené une baisse de qualité de simulation. Dès lors, il paraît légitime de constater une telle baisse, compensée pourtant par l'amélioration des sous événements 2-2 et 2-3. En somme, la détérioration de la simulation à l'égard de l'événement 2-1 seul, porte tout à croire que les données d'humidité qui y sont associées pourraient être la cause de la détérioration constatée lors de la simulation avec l'événement 2 dans sa globalité.

Le passage de la méthode 2 à la méthode 3 consiste de nouveau à mettre en valeur les apports pouvant être apportés lors de l'utilisation d'un modèle distribué. Une première étape a tout d'abord consisté à fournir au modèle une pluie distribuée tout en gardant le sol uniforme, cette dernière ayant entraîné pour les mêmes raisons qu'énoncées précédemment une baisse quasi globale de la qualité de la simulation. L'un des points marquant à relever concerne les sous événements 2-1 et 4-1 dont la qualité des simulations s'est amplement dégradée, les trois autres présentant des résultats relativement satisfaisants. Or, il est judicieux de noter que les événements 2-1 et 4-1 correspondent aux périodes premières des événements 2 et 4 et dont la qualité de simulation s'est dans les deux cas détériorée. En somme, les résultats visant à montrer

l'influence correspondant à l'utilisation d'un modèle distribué restent ici mitigés mais ne font en réalité que refléter les mêmes tendances qu'observées antérieurement.

La dernière étape consistant au passage de la méthode 3 à la méthode 4 réside à prouver les avantages reliés à une remise à jour des paramètres. A titre de rappel, le même passage avait précédemment conduit à une baisse notable des critères d'efficacité pour la quasi-totalité des événements. Alors que cette même remarque peut être appliquée une nouvelle fois ici aux sous événements 2-2 et 4-2, elle ne le peut toutefois pas en ce qui concerne les sous événements 2-1, 2-3 et 4-1 dont les résultats s'améliorent. Ainsi, même s'il est certain que de nombreux perfectionnements peuvent être encore apportés aussi bien au modèle qu'à la méthodologie, le fractionnement des événements se révèle ici avoir été fructueux.

En somme, l'information importante à retenir ici est que le fait d'avoir scinder les événements initiaux en sous événements de plus petite taille a permis d'acquérir plus de flexibilité quant aussi bien à la calibration qu'à la méthode de remise à jour. Par ailleurs, ce procédé a permis de palier en partie au défaut du modèle qui est de ne pas tenir compte des périodes d'assèchement entre les averses. Toutefois, comparativement aux méthodes ayant utilisé les événements globaux, il est évident que certaines tendances, dont celles entraînant une détérioration des résultats, ont du être observées et n'ont pu être évitées. Enfin et point important, l'ensemble des résultats relatifs aux méthodes employées après fractionnement des événements rassurent une nouvelle fois quant aux améliorations potentielles pouvant survenir suite à l'intégration des données d'humidité du sol lors du processus de modélisation.

En conclusion de ce chapitre, ce présent mémoire peut ouvrir les portes à de nouvelles recherches et tentatives afin d'évaluer au mieux l'influence que peut avoir l'intégration des données d'humidité du sol lors du processus de modélisation sur la qualité des prévisions de débit. De nombreuses améliorations peuvent être apportées afin d'y

parvenir. Il est en effet important ici de rappeler que cette étude reste un travail avant tout exploratoire, dont l'ensemble des hypothèses et simplifications émises lors de ce dernier ont contribué fortement à agrandir la marge d'erreur, la plus importante d'entre elles étant vraisemblablement celle reliée à l'incertitude causée lors de l'interpolation des données d'humidité ponctuelles du sol à partir de certaines stations, au reste du territoire.

CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire était de présenter différentes approches consistant à intégrer des données d'humidité du sol lors du processus de modélisation hydrologique et d'évaluer les améliorations potentielles apportées par ces dernières en prévision de crues au niveau du bassin de la rivière des Anglais. Quatre différentes méthodes de modélisation furent employées lors de l'étude. L'ordre de présentation de ces dernières fut établi selon un cheminement logique où chaque élément nouveau apporté au modèle et à chaque étape visait à apporter, de manière successive et cumulative, des améliorations quant à la précision des nouvelles prévisions.

Tout d'abord, une première analyse de la qualité de l'ensemble des prévisions émises à l'aide du modèle des Anglais fut réalisée, ceci par rapport aux données fournies et observées et à l'aide de différents critères d'efficacité. La première conclusion révèle le fait que, loin d'être parfaite, la qualité des simulations est somme toute encourageante et surtout suffisante afin d'étudier l'objectif principal du mémoire.

Ainsi, une deuxième étape a reposé sur une comparaison des résultats entre les différentes approches et selon un ordre établi afin de déterminer les améliorations apportées tout au long de l'évolution du modèle et des méthodes. Reposant toutes sur le principe d'infiltration de Green et Ampt et sur la détermination des paramètres de ce dernier, la première méthode proposée était elle basée sur l'utilisation des Indices de Précipitation Antécédentes calculés à partir des données de pluie, alors qu'une pluie uniforme était considérée comme donnée entrante du modèle. Cette dernière fut notamment réutilisée lors de la deuxième méthode où les données d'humidité du sol ont cette fois-ci été intégrées au modèle. La comparaison des résultats des deux premières méthodes a montré que l'intégration des données d'humidité du sol au sein du modèle lors du processus de modélisation hydrologique était bénéfique et apportait des améliorations notables quant à la qualité des prévisions de débit.

En ce qui concerne la troisième méthode, le même procédé qu'à la deuxième méthode fut réitéré mais en tenant compte cette fois-ci de l'ensemble des caractéristiques individuelles de chaque station. La comparaison des critères d'efficacité et le passage entre la deuxième et troisième méthode ont également rassuré quant au rôle valorisant que peut avoir l'utilisation d'un modèle distribué, parfaissant une nouvelle fois les résultats.

Enfin, la dernière méthode dite de rétroaction entre les débits observés et simulés est restée identique à la troisième méthode sauf que cette dernière a également reposé sur une somme de corrections ponctuelles et à des instants prédéfinis des paramètres de Green et Ampt. Bien que la méthode de remise à jour des paramètres du sol ne se soit pas avérée concluante, elle a toutefois permis de mettre l'accent sur l'importance à accorder au lien existant entre une valeur ponctuelle d'humidité et une plus large fraction d'un territoire modélisé.

Enfin, afin de parfaire la qualité des résultats, une méthodologie identique fut employée mais cette fois-ci à l'aide de sous événements des événements précédemment considérés. Les conclusions relatives à cette dernière révèlent principalement les bienfaits pouvant être apportés lors de l'emploi d'événements de plus petite durée, tant sur le plan de la flexibilité du modèle que sur celui de la calibration.

RECOMMANDATIONS

L'ensemble des recommandations présentées lors des paragraphes suivants propose une liste d'améliorations pouvant être apportées, d'une part, au modèle de simulation utilisé au cours de l'étude, et, d'autre part, à la méthodologie employée à l'élaboration de ce mémoire. Ces dernières découlent directement des résultats obtenus et informera de la sorte le lecteur des actions possibles pouvant être entreprises pour, s'il y a lieu, donner suite au projet.

Tout d'abord, il importe de combler les lacunes du modèle des Anglais dont en particulier celle relative à la redistribution de l'humidité entre les événements. L'ensemble de ces dernières sont de plus énumérées dans le mémoire réalisé par Marie Minville (Minville, 2004).

D'autre part, il serait opportun de pouvoir réaliser de nouveau l'étude à l'aide d'événements plus courts. En effet, une telle stratégie susciterait une calibration sur plusieurs événements et une validation conséquente sur ces derniers.

En outre, la détermination des paramètres K_{sat} et H_c lors des deux premières méthodes fut réalisée à l'aide de la calibration effectuée par Marie Minville lors de l'élaboration même du modèle (Minville, 2004). Or, il est probable que cette dernière ne soit plus compatible avec l'utilisation du modèle avec paramètres distribués. Ainsi, la solution à ce problème pourrait consister à réaliser de nouveau une calibration du modèle à l'aide des données d'humidité observées.

Ensuite, l'étude fut principalement réalisée à l'aide de l'humidité présentée au segment 0-15 cm. Or, même si les informations acquises sur l'humidité du sol le plus en surface est importante, celles présentées plus en profondeur le sont également et mériteraient ainsi d'être prises en considération. Pour cela, il serait judicieux de pouvoir trouver une

mesure d'humidité plus efficace sur la profondeur racinaire en incorporant l'humidité sur une plus grande profondeur.

Une autre remarque peut quant à elle être effectuée concernant la qualité des données observées. En premier lieu, une validation plus claire des données de débit aurait entre autre permis d'exclure l'événement 3, ce dernier ayant présenté des données erronées. Par ailleurs, une attention particulière doit également être portée quant à la qualité des données observées et relatives à l'humidité du sol. En effet, certaines d'entre elles, bruitées, a contraint à réaliser une moyenne de ces dernières sur plusieurs périodes de temps détériorant peut être ainsi la précision même des prévisions. Par ailleurs, l'étape d'acquisition de ces données peut être considérable en terme temporel. C'est pourquoi adapter le modèle à un système opérationnel intégrant plusieurs ensembles de données satellitaires permettrait vraisemblablement d'accélérer et d'améliorer le processus de modélisation tout en facilitant la gestion des réservoirs d'eau car aiderait à mieux allouer les ressources en eau parmi les usagers (Aubert, 2003). De surcroît, la télédétection, dont le potentiel reste à démontrer, représenterait également une solution efficace afin de palier aux difficultés liées à la méthodologie d'interpolation des données ponctuelles d'humidité.

ANNEXE 1

Conversion de la mesure du temps de propagation en humidité volumétrique

CONVERSION DE LA MESURE DU TEMPS DE PROPAGATION EN HUMIDITE VOLUMÉTRIQUE

Le document qui suit est extrait du «MP-917 Technical Brief 17, Calibration of Profiling Probes » (Young, 2005) et traduit par Sébastien Drainville.

Procédure résumée :

La conversion des mesures brutes de l'appareil Moisture Point en pourcentage volumétrique de l'humidité du sol est effectuée en deux étapes. La première consiste à corriger les mesures brutes en fonction des paramètres de calibration A et B , différents pour chaque segment, selon l'équation 2. La seconde consiste à utiliser l'équation 1 afin de faire la conversion proprement dite. Si la température du sol à la profondeur de chaque segment est connue, un coefficient K_W plus précis peut alors être utilisé dans l'équation 1.

Cas des stations Laval et du réseau Mésonet-Montréal :

Dans le cas des stations Mésonet-Montréal, la température du sol est mesurée à 2, 5, 10, 20 et 50 cm de profondeur tandis que les sondes Moisture Point utilisées rendent des mesures pour les segments suivants : 0-15, 15-30, 30-45, 45-60 et 60-90 cm de profondeur. Les mesures de température actuelles ne permettent donc pas d'établir le coefficient K_W précisément pour tous les segments.

Je propose donc d'utiliser la température du sol mesurée 50 cm pour le calcul du coefficient K_W des deux derniers segments puisque la température à cette profondeur varie peu et de façon saisonnière. Cependant, les essais de ce type n'ont pas été réalisés puisque mon temps a été dirigé vers l'effort de dépannage causé par l'apparition simultanée d'une valeur fixe et de bruit aléatoire dans le signal.

Le texte de cette section est composé d'extraits pertinents traduits de l'anglais à partir d'un document de G. D. Young portant sur la calibration des sondes Moisture Point.

Voici l'équation utilisée pour transformer la mesure brute du Moisture Point, soit le temps de propagation en nanosecondes, vers le pourcentage d'humidité volumétrique du sol.

$$\theta_v = \frac{\left[\frac{T_{MC} - T_s}{T_{air} - T_{air}} \right]}{\sqrt{K_w} - 1} \quad (1)$$

Où :

θ_v est le contenu volumétrique d'eau contenue dans le sol (m^3/m^3);

T_{MC} est le temps de propagation mesuré puis corrigé (nanosecondes), soit le temps du voyage aller-retour de l'impulsion électrique le long d'un segment lorsque la sonde est dans un sol humide;

T_{air} est le temps de propagation théorique d'un segment de sonde entouré d'air,

T_s est le temps de propagation mesuré et corrigé d'un segment de sonde complètement enfouis dans un sol sec;

K_w est la constante diélectrique relative de l'eau. Ce facteur varie avec la température (voir équation 3).

Le rapport T_s/T_{air} est fourni par le manufacturier mais peut être changé en fonction des résultats d'une calibration spécifique.

Le temps de propagation mesuré par le Moisture Point doit être corrigé en fonction de deux paramètres de calibration selon l'équation 2.

$$T_{MC} = \frac{T_M}{B} - A \quad (2)$$

Les termes A et B sont requis pour ajuster le temps de propagation mesuré en fonction de l'effet diélectrique de la sonde dans le sol. La ligne de transmission de l'impulsion électrique n'est que partiellement entourée de sol en raison de la façon dont la sonde est construite.

La troisième équation pertinente permet de calculer la constante diélectrique de l'eau qui varie en fonction de la température.

$$K_w = 78,54(1 - 4,579 \cdot 10^{-3}(t - 25) + 1,19 \cdot 10^{-5}(t - 25)^2 + 2,8 \cdot 10^{-8}(t - 25)^3) \quad (3)$$

À titre indicatif, la racine du coefficient K_w varie peu. Pour des températures du sol variant entre -10 °C et 10 °C, $\sqrt{K_w}$ passe de 9,17 à 9,61.

Les deux équations suivantes sont utilisées pour calculer le temps de propagation d'une impulsion électromagnétique dans un diélectrique d'air, soit le temps de voyage aller-retour dans l'air.

$$T_{air} = \frac{2 \cdot L_{seg}}{v_{air}} \quad (4)$$

$$v_{air} = \frac{c}{\sqrt{K_{air}}} = \frac{2,99792458 \cdot 10^8}{\sqrt{1,00059}} = 299,704058 \quad (5)$$

Dans l'équation 4, la longueur du segment L_{seg} utilisée doit être exprimée en mètres.

Précision de l'appareil :

Le fabricant indique dans le manuel de l'utilisateur que la précision de l'appareil est de 3% dans un sol cultivé typique. Il est important de savoir que le document de ESI mentionne aussi que l'horloge interne du Moisture Point compte le temps de propagation par incréments, typiquement 0,140 nanosecondes.

On peut donc conclure que la vitesse d'échantillonnage de l'horloge limite la précision de la mesure d'humidité volumétrique. En utilisant les paramètres de calibration A , B et T_s/T_{air} fourni par le fabricant, puis en ajoutant 0,140 nanosecondes au temps de propagation correspondant à 50% d'humidité volumétrique, on remarque une augmentation de l'humidité théorique d'environ 2,6% pour les segments de 15 cm et de 1,3% pour les segments de 30 cm. L'horloge interne du Moisture Point est donc une pièce critique de l'instrument.

Paramètres de calibration :

Toutes les sondes neuves sont envoyées avec un même jeu de paramètres jugés adéquats pour obtenir l'humidité des sols arables typiques avec une précision de 3%. Le tableau suivant présente ce jeu de paramètres.

Tableau XXXIII

Paramètres de calibration initiaux

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Longueur L_{seg} | 15 cm | 15 cm | 15 cm | 15 cm | 30 cm |
| | 1,550 | 1,550 | 1,550 | 1,550 | 1,550 |
| | 1,025 | 1,136 | 0,661 | 0,850 | 1,942 |
| | 0,660 | 0,646 | 0,611 | 0,679 | 0,645 |

La calibration en laboratoire permet d'abord de déterminer les coefficients A et B , utilisés dans l'équation 2. De façon optionnelle, on peut aussi déterminer le rapport T_s/T_{air} correspondant au sol dans lequel sera inséré la sonde. Ces paramètres varient en fonction de chaque segment et de chaque sonde. Les paramètres T_s/T_{air} n'ont pas été déterminés en laboratoire puisqu'un échantillon de sol n'était pas disponible. La valeur de 1,550 est donc conservée. Le tableau suivant indique les paramètres A et B tels que déterminés au laboratoire de l'ÉTS pour toute les sondes installées sur les stations du réseau Mésonet-Montréal. Toutes les calibrations ont été effectuées par Sébastien Drainville.

Tableau XXXIV

Paramètres A et B

Numéro de série du MP-917: 2XXX-XXX

Numéro de série de la sonde: 00 00 07 93 17 50

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1.0740 | 0.9780 | 0.6970 | 0.7270 | 1.3840 |
| | 0.6810 | 0.6960 | 0.6220 | 0.6970 | 0.7120 |

Numéro de série du MP-917: 2000-102

Numéro de série de la sonde: 00 00 07 93 3A 9C

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.990 | 0.959 | 0.668 | 0.674 | 1.341 |
| | 0.681 | 0.685 | 0.579 | 0.698 | 0.701 |

Numéro de série du MP-917: 2000-213

Numéro de série de la sonde: 00 00 07 93 4D 31

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.070 | 1.070 | 0.548 | 0.748 | 1.451 |
| | 0.667 | 0.674 | 0.610 | 0.699 | 0.701 |

Numéro de série du MP-917: 2000-215

Numéro de série de la sonde: 00 00 07 92 EE E9

Date de la calibration: 20 octobre 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.198 | 1.059 | 0.774 | 0.899 | 1.301 |
| | 0.642 | 0.669 | 0.603 | 0.688 | 0.716 |

Numéro de série du MP-917: 2000-217

Numéro de série de la sonde: 00 00 07 39 5C 12

Date de la calibration: 20 octobre 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.942 | 0.963 | 0.567 | 0.762 | 1.264 |
| | 0.692 | 0.688 | 0.614 | 0.709 | 0.720 |

Numéro de série du MP-917: 2000-218

Numéro de série de la sonde: 00 00 07 92 EB 7D

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.195 | 1.014 | 0.736 | 0.907 | 1.361 |
| | 0.661 | 0.686 | 0.633 | 0.689 | 0.712 |

Numéro de série du MP-917: 2000-219

Numéro de série de la sonde: 00 00 07 92 E8 12

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.009 | 1.031 | 0.738 | 1.109 | 1.501 |
| | 0.678 | 0.671 | 0.589 | 0.670 | 0.693 |

Numéro de série du MP-917: 2000-220

Numéro de série de la sonde: 00 00 07 93 1A 6F

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.053 | 1.063 | 0.774 | 0.833 | 1.521 |
| | 0.678 | 0.662 | 0.606 | 0.691 | 0.691 |

Numéro de série du MP-917: 2000-221

Numéro de série de la sonde: 00 00 00 43 87 60

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.056 | 1.000 | 0.682 | 0.542 | 1.356 |
| | 0.684 | 0.689 | 0.602 | 0.723 | 0.714 |

Numéro de série de la sonde: 00 00 07 92 E5 89

Numéro de série du MP-917: 2000-222

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.154 | 1.111 | 0.664 | 1.141 | 1.516 |
| | 0.645 | 0.661 | 0.577 | 0.659 | 0.683 |

Numéro de série du MP-917: 2000-223

Numéro de série de la sonde: 00 00 00 43 81 3E

Date de la calibration: 20 octobre 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.122 | 0.932 | 0.555 | 0.704 | 1.302 |
| | 0.666 | 0.704 | 0.624 | 0.707 | 0.720 |

Numéro de série du MP-917: 2000-224

Numéro de série de la sonde: 00 00 00 43 89 38

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.089 | 0.977 | 0.747 | 0.792 | 1.492 |
| | 0.666 | 0.685 | 0.579 | 0.689 | 0.698 |

Numéro de série du MP-917: 2001-101

Numéro de série de la sonde: 00 00 00 57 3E 06

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.049 | 1.002 | 0.628 | 0.812 | 1.491 |
| | 0.678 | 0.676 | 0.586 | 0.686 | 0.696 |

Numéro de série du MP-917: 2001-105

Numéro de série de la sonde: 00 00 00 40 21 32

Date de la calibration: 18 mai 2003

| Segment | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.041 | 1.064 | 0.734 | 0.906 | 1.423 |
| | 0.675 | 0.673 | 0.579 | 0.668 | 0.707 |

ANNEXE 2

Méthode des polygones de Thiessen

MÉTHODE DES POLYGONES DE THIESSEN

En référence au chapitre trois du cours de Musy (Musy, 1995), vous trouverez ci-dessous en bref rappel quant à l'utilisation de la méthode de calcul des polygones de Thiessen.

La méthode du polygone de Thiessen est la plus couramment utilisée, parce que son application est aisée et qu'elle donne en général de bons résultats. Elle convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement (pluviomètres distribués irrégulièrement).

Cette méthode permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique. Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire, exprimée en %, représente le facteur de pondération de la valeur locale. Les différentes zones d'influence sont déterminées par découpage géométrique du bassin sur une carte topographique. Les polygones sont formés par les médiatrices des droites joignant des stations pluviométriques adjacentes. La précipitation moyenne pondérée P_{moy} pour le bassin, se calcule alors en effectuant la somme des précipitations P_i de chaque station, multipliées par leur facteur de pondération (aire A_i), le tout divisé par la surface totale A du bassin. La précipitation moyenne sur le bassin s'écrit :

$$P_{moy} = \frac{\sum A_i \cdot P_i}{A}$$

Avec :

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin;

A : aire totale du bassin;

P_i : précipitation enregistrée à la station i ;

A_i : superficie du polygone associée à la station i .

ANNEXE 3

Données hydrométéorologiques

DONNEES HYDROMETEOROLOGIQUES

Les données de précipitations : Hyétogrammes

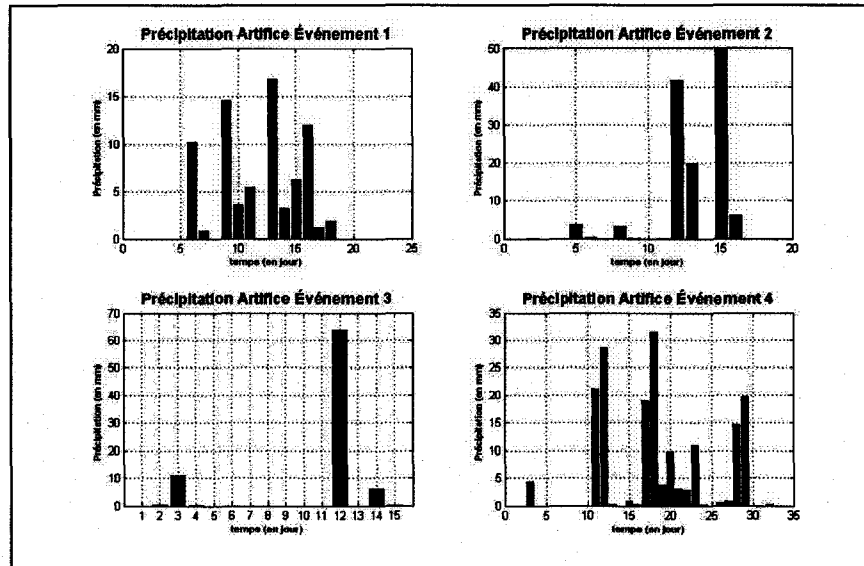


Figure 48 Précipitation Artifice

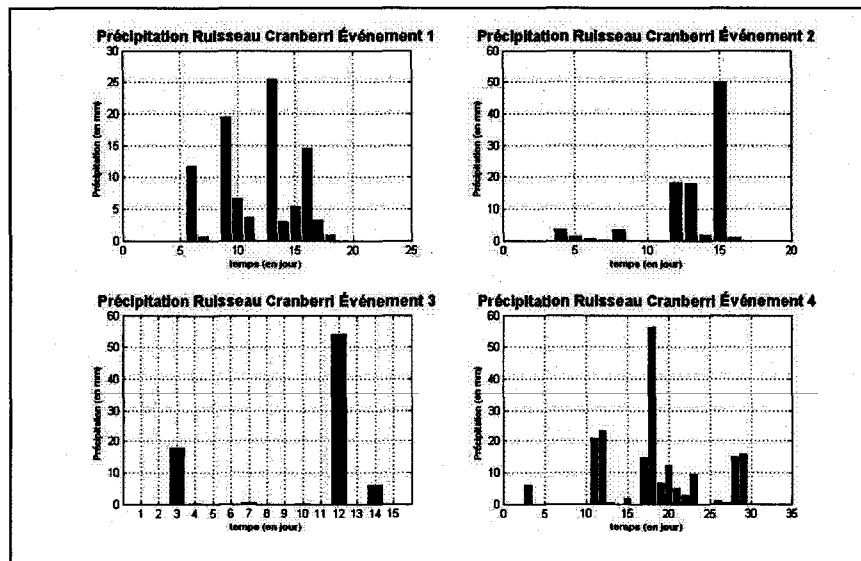


Figure 49 Précipitation Ruisseau Cranberry

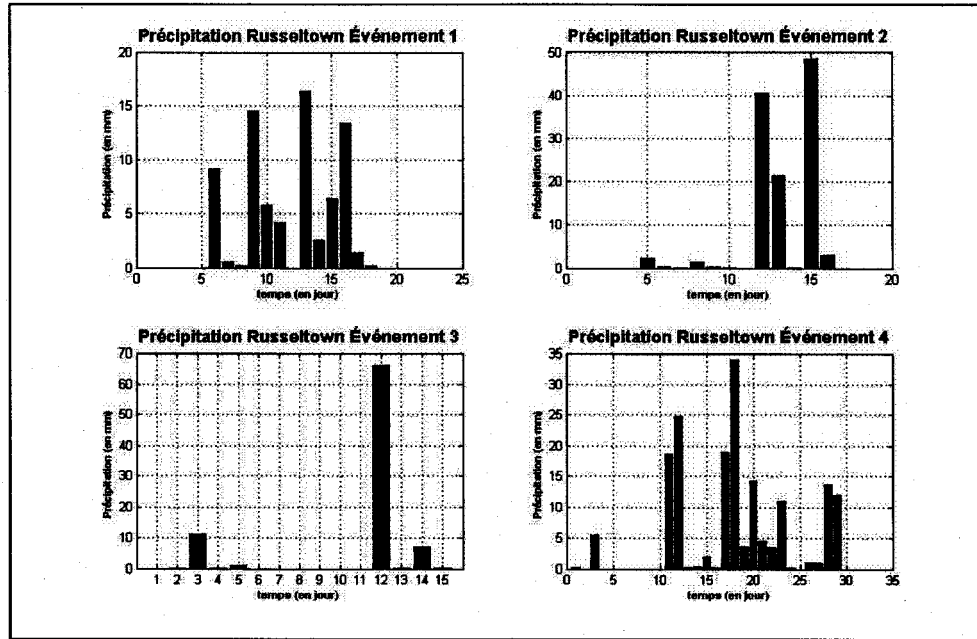


Figure 50 Précipitation Russeltown

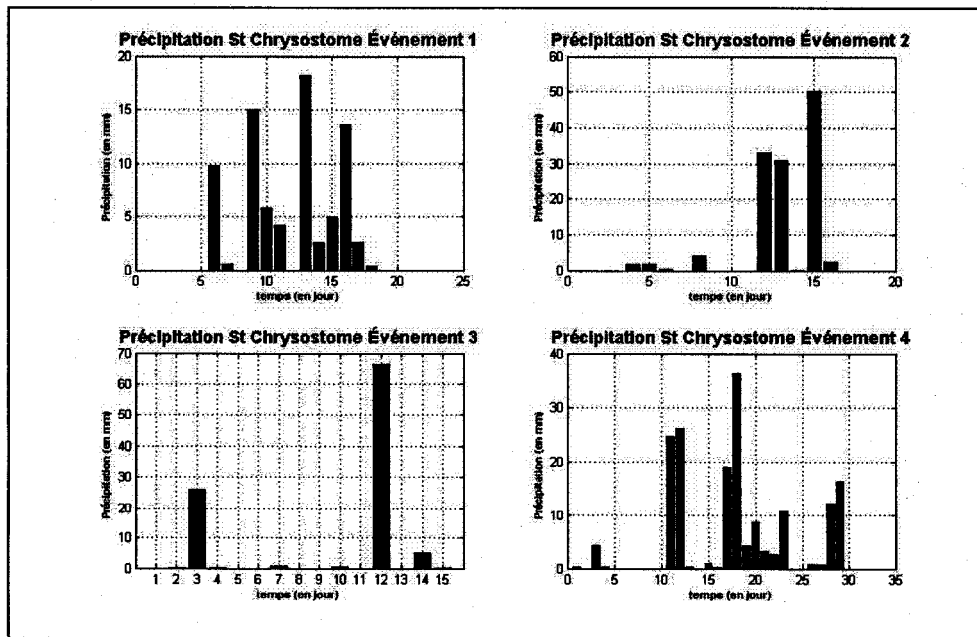


Figure 51 Précipitation St-Chrysostome

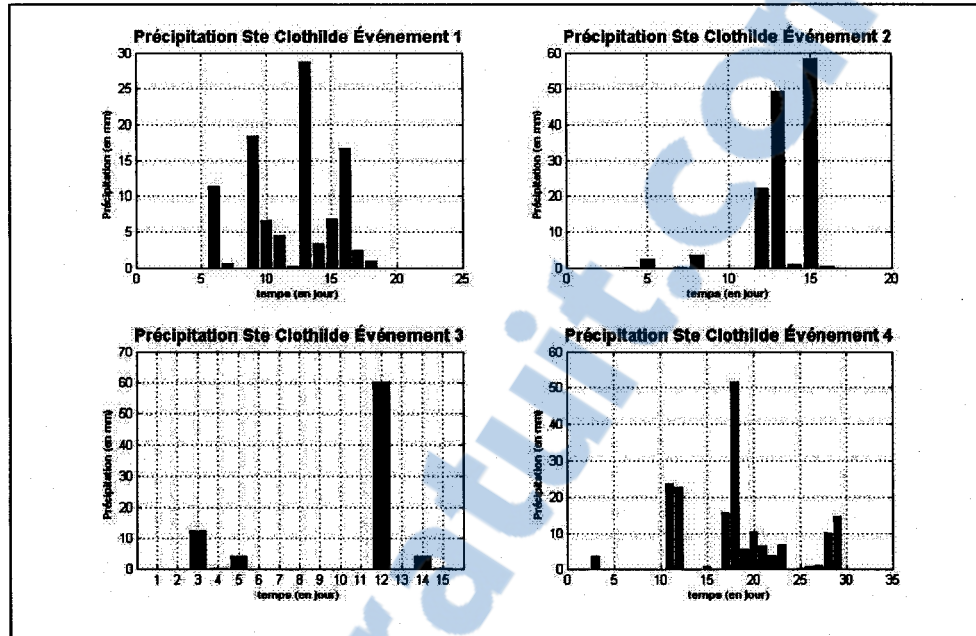


Figure 52 Précipitation Ste-Clothilde

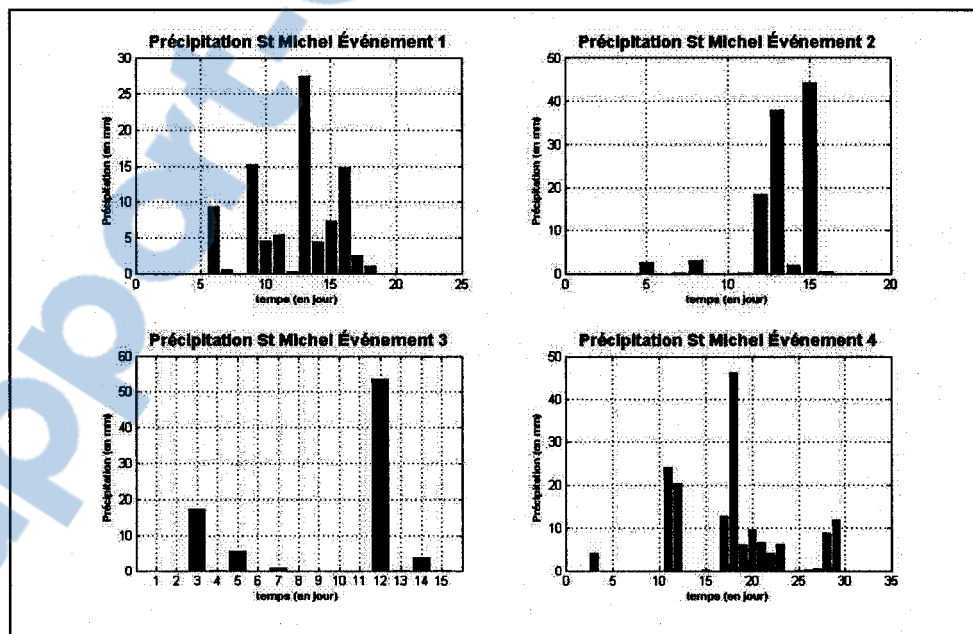


Figure 53 Précipitation St-Michel

Exemple de données de précipitation pour la station Howick : Tableaux

Tableau XXXV

Précipitation Howick Événement 1

| Année | Mois | Jour | Précipitation |
|--------------|-------------|-------------|----------------------|
| 2005 | 4 | 15 | 0 |
| 2005 | 4 | 16 | 0 |
| 2005 | 4 | 17 | 0 |
| 2005 | 4 | 18 | 0 |
| 2005 | 4 | 19 | 0 |
| 2005 | 4 | 20 | 10,2 |
| 2005 | 4 | 21 | 0,4 |
| 2005 | 4 | 22 | 0 |
| 2005 | 4 | 23 | 14,2 |
| 2005 | 4 | 24 | 4,2 |
| 2005 | 4 | 25 | 4,4 |
| 2005 | 4 | 26 | 0 |
| 2005 | 4 | 27 | 17,4 |
| 2005 | 4 | 28 | 3,2 |
| 2005 | 4 | 29 | 7,2 |
| 2005 | 4 | 30 | 14,4 |
| 2005 | 5 | 1 | 1,2 |
| 2005 | 5 | 2 | 1,4 |
| 2005 | 5 | 3 | 0,2 |
| 2005 | 5 | 4 | 0 |
| 2005 | 5 | 5 | 0 |

Tableau XXXVI

Précipitation Howick Événement 2

| Année | Mois | Jour | Précipitation |
|-------|------|------|---------------|
| 2005 | 6 | 3 | 0 |
| 2005 | 6 | 4 | 0 |
| 2005 | 6 | 5 | 0 |
| 2005 | 6 | 6 | 0 |
| 2005 | 6 | 7 | 0 |
| 2005 | 6 | 8 | 0,4 |
| 2005 | 6 | 9 | 0 |
| 2005 | 6 | 10 | 5,2 |
| 2005 | 6 | 11 | 0 |
| 2005 | 6 | 12 | 0 |
| 2005 | 6 | 13 | 0 |
| 2005 | 6 | 14 | 38,4 |
| 2005 | 6 | 15 | 41,6 |
| 2005 | 6 | 16 | 0,2 |
| 2005 | 6 | 17 | 54,8 |
| 2005 | 6 | 18 | 1,6 |
| 2005 | 6 | 19 | 0 |
| 2005 | 6 | 20 | 0,2 |

Tableau XXXVII

Précipitation Howick Événement 3

| Année | Mois | Jour | Précipitation |
|--------------|-------------|-------------|----------------------|
| 2005 | 8 | 18 | 0 |
| 2005 | 8 | 19 | 1 |
| 2005 | 8 | 20 | 18,8 |
| 2005 | 8 | 21 | 0,2 |
| 2005 | 8 | 22 | 0 |
| 2005 | 8 | 23 | 0,2 |
| 2005 | 8 | 24 | 0,2 |
| 2005 | 8 | 25 | 0 |
| 2005 | 8 | 26 | 0 |
| 2005 | 8 | 29 | 0,2 |
| 2005 | 8 | 30 | 0 |
| 2005 | 8 | 31 | 88 |
| 2005 | 9 | 1 | 0 |
| 2005 | 9 | 2 | 3,4 |
| 2005 | 9 | 3 | 0,6 |

Tableau XXXVIII

Précipitation Howick Événement 4

| Année | Mois | Jour | Précipitation |
|-------|------|------|---------------|
| 2005 | 9 | 27 | 0,2 |
| 2005 | 9 | 28 | 0 |
| 2005 | 9 | 29 | 7,6 |
| 2005 | 9 | 30 | 0 |
| 2005 | 10 | 1 | 0 |
| 2005 | 10 | 2 | 0 |
| 2005 | 10 | 3 | 0 |
| 2005 | 10 | 4 | 0 |
| 2005 | 10 | 5 | 0 |
| 2005 | 10 | 6 | 0 |
| 2005 | 10 | 7 | 31,6 |
| 2005 | 10 | 8 | 19,6 |
| 2005 | 10 | 9 | 0 |
| 2005 | 10 | 10 | 0 |
| 2005 | 10 | 11 | 0,6 |
| 2005 | 10 | 12 | 0 |
| 2005 | 10 | 13 | 19,8 |
| 2005 | 10 | 14 | 31,8 |
| 2005 | 10 | 15 | 4 |
| 2005 | 10 | 16 | 8 |
| 2005 | 10 | 17 | 3,2 |
| 2005 | 10 | 18 | 2,8 |
| 2005 | 10 | 19 | 7,8 |
| 2005 | 10 | 20 | 0 |
| 2005 | 10 | 21 | 0 |
| 2005 | 10 | 23 | 0,4 |
| 2005 | 10 | 24 | 0,8 |
| 2005 | 10 | 25 | 10,2 |
| 2005 | 10 | 26 | 13,2 |
| 2005 | 10 | 27 | 0 |
| 2005 | 10 | 28 | 0 |
| 2005 | 10 | 29 | 0 |

Données d'humidité : graphiques

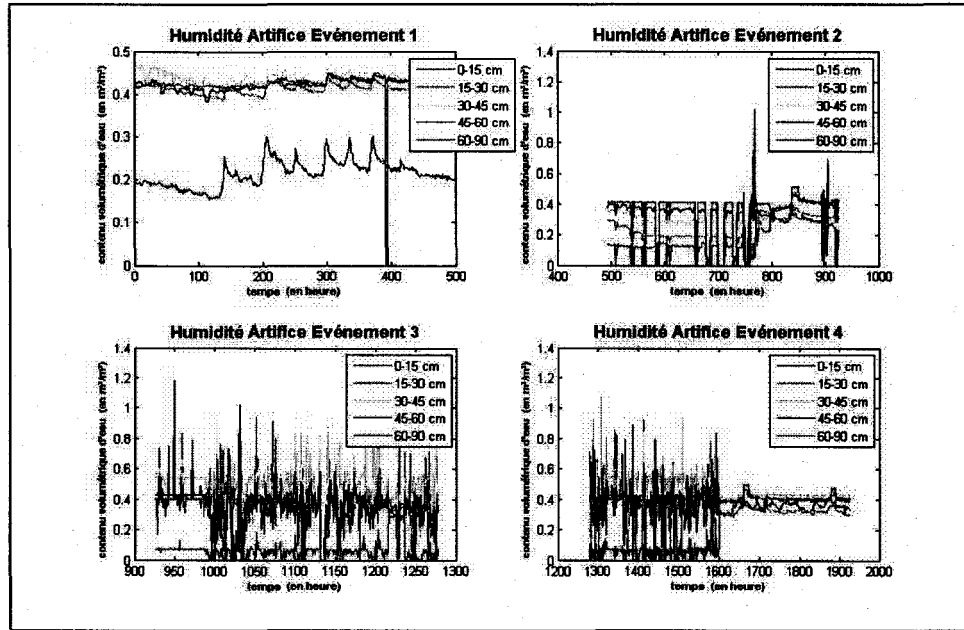


Figure 54 Humidité Artifice

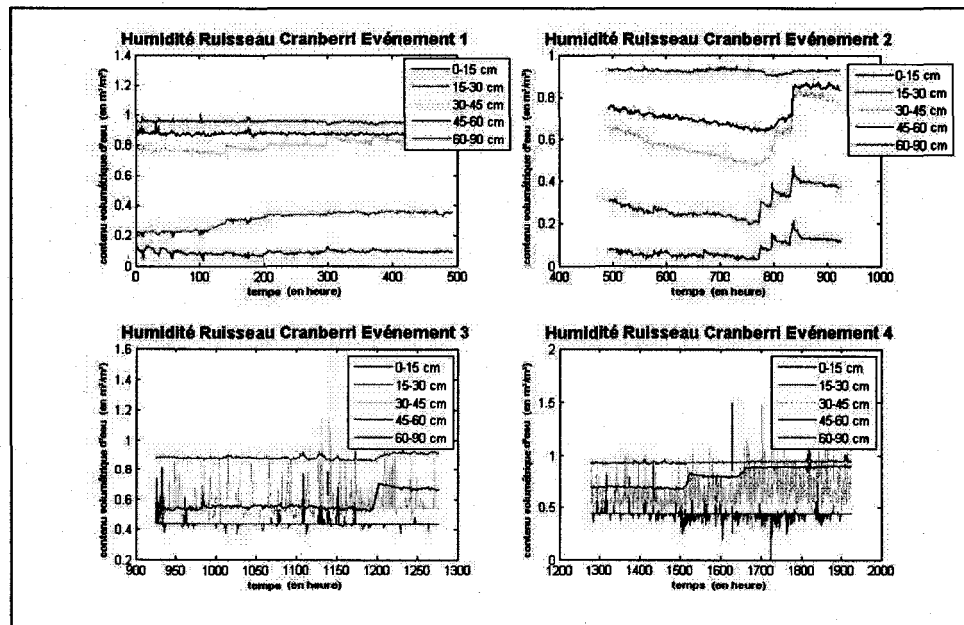


Figure 55 Humidité Ruisseau Cranberry

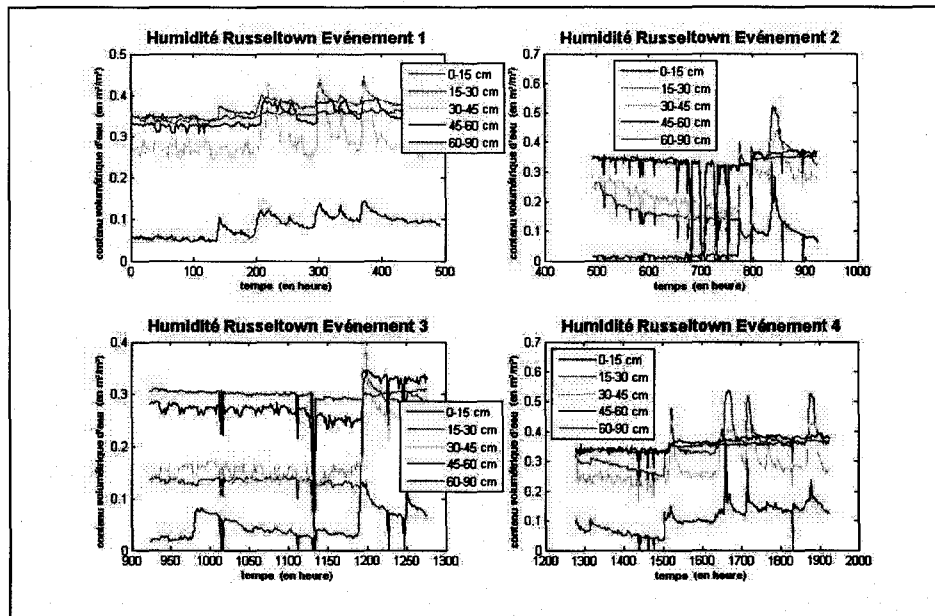


Figure 56 Humidité Russeltown

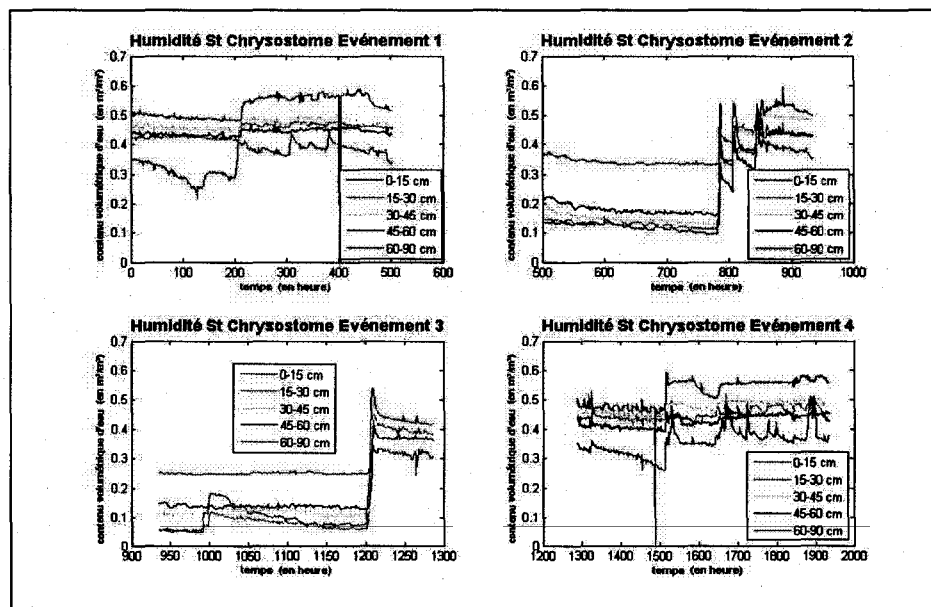


Figure 57 Humidité St-Chrysostome

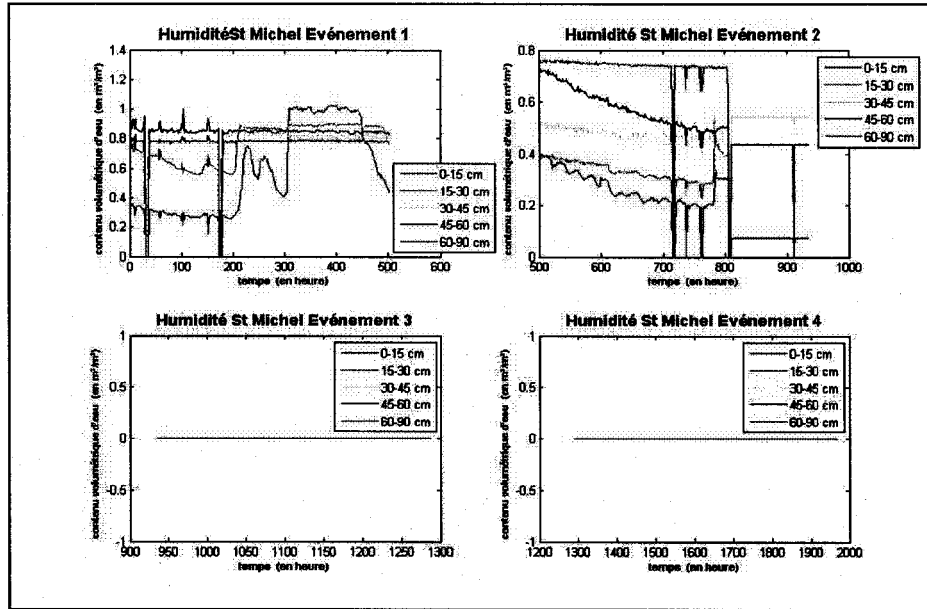


Figure 58 Humidité St-Michel

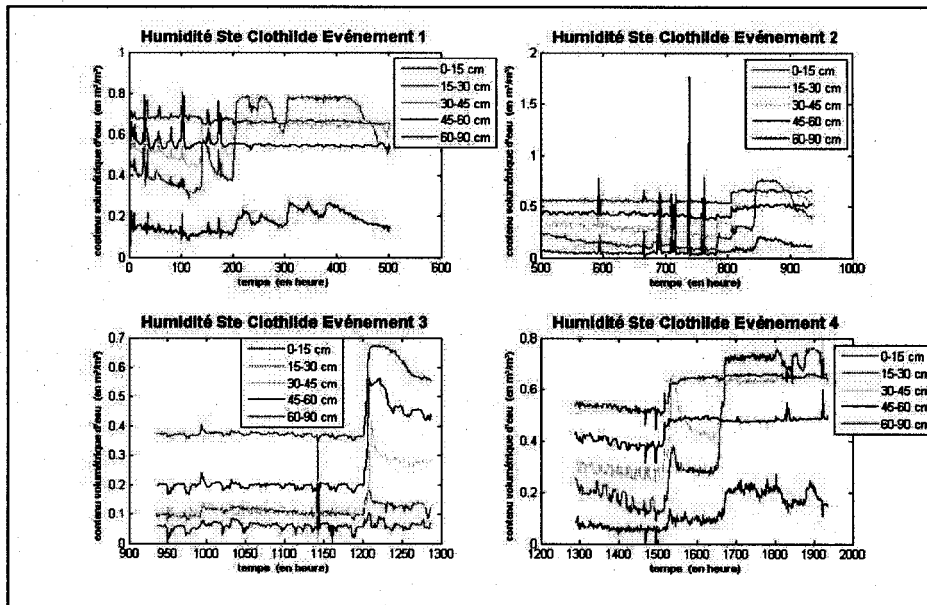


Figure 59 Humidité Ste-Clothilde

Données de débit : tableaux

Tableau XXXIX

Débit à l'exutoire Événement 1

| Année | Mois | Jour | Débit |
|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 2005 | 4 | 15 | 8,46 |
| 2005 | 4 | 16 | 7,44 |
| 2005 | 4 | 17 | 6,75 |
| 2005 | 4 | 18 | 6,09 |
| 2005 | 4 | 19 | 5,49 |
| 2005 | 4 | 20 | 5,34 |
| 2005 | 4 | 21 | 9,51 |
| 2005 | 4 | 22 | 8,52 |
| 2005 | 4 | 23 | 10,76 |
| 2005 | 4 | 24 | 32,68 |
| 2005 | 4 | 25 | 24,83 |
| 2005 | 4 | 26 | 19,48 |
| 2005 | 4 | 27 | 17,50 |
| 2005 | 4 | 28 | 55,40 |
| 2005 | 4 | 29 | 36,42 |
| 2005 | 4 | 30 | 29,39 |
| 2005 | 5 | 1 | 48,33 |
| 2005 | 5 | 2 | 29,18 |
| 2005 | 5 | 3 | 20,67 |
| 2005 | 5 | 4 | 15,17 |
| 2005 | 5 | 5 | 11,86 |

Tableau XL

Débit à l'exutoire Événement 2

| Année | Mois | Jour | Débit |
|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 2005 | 6 | 3 | 1,88 |
| 2005 | 6 | 4 | 1,55 |
| 2005 | 6 | 5 | 1,29 |
| 2005 | 6 | 6 | 1,18 |
| 2005 | 6 | 7 | 1,10 |
| 2005 | 6 | 8 | 0,97 |
| 2005 | 6 | 9 | 0,94 |
| 2005 | 6 | 10 | 0,89 |
| 2005 | 6 | 11 | 0,87 |
| 2005 | 6 | 12 | 0,79 |
| 2005 | 6 | 13 | 0,78 |
| 2005 | 6 | 14 | 2,28 |
| 2005 | 6 | 15 | 14,39 |
| 2005 | 6 | 16 | 20,00 |
| 2005 | 6 | 17 | 70,82 |
| 2005 | 6 | 18 | 67,32 |
| 2005 | 6 | 19 | 32,06 |
| 2005 | 6 | 20 | 15,39 |

Tableau XLI

Débit à l'exutoire Événement 3

| Année | Mois | Jour | Débit |
|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 2005 | 8 | 18 | 0,78 |
| 2005 | 8 | 19 | 0,78 |
| 2005 | 8 | 20 | 0,90 |
| 2005 | 8 | 21 | 1,18 |
| 2005 | 8 | 22 | 1,08 |
| 2005 | 8 | 23 | 1,01 |
| 2005 | 8 | 24 | 0,98 |
| 2005 | 8 | 25 | 0,93 |
| 2005 | 8 | 26 | 0,88 |
| 2005 | 8 | 27 | 0,84 |
| 2005 | 8 | 28 | 0,86 |
| 2005 | 8 | 29 | 0,88 |
| 2005 | 8 | 30 | 1,58 |
| 2005 | 8 | 31 | 3,13 |
| 2005 | 9 | 1 | 7,11 |
| 2005 | 9 | 2 | 3,43 |
| 2005 | 9 | 3 | 1,88 |

Tableau XLII

Débit à l'exutoire Événement 4

| Année | Mois | Jour | Débit |
|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 2005 | 9 | 27 | 1,87 |
| 2005 | 9 | 28 | 2,55 |
| 2005 | 9 | 29 | 2,05 |
| 2005 | 9 | 30 | 1,79 |
| 2005 | 10 | 1 | 1,57 |
| 2005 | 10 | 2 | 1,41 |
| 2005 | 10 | 3 | 1,22 |
| 2005 | 10 | 4 | 1,15 |
| 2005 | 10 | 5 | 1,05 |
| 2005 | 10 | 6 | 0,97 |
| 2005 | 10 | 7 | 2,04 |
| 2005 | 10 | 8 | 19,50 |
| 2005 | 10 | 9 | 12,81 |
| 2005 | 10 | 10 | 7,11 |
| 2005 | 10 | 11 | 5,16 |
| 2005 | 10 | 12 | 4,10 |
| 2005 | 10 | 13 | 5,40 |
| 2005 | 10 | 14 | 50,36 |
| 2005 | 10 | 15 | 64,80 |
| 2005 | 10 | 16 | 47,59 |
| 2005 | 10 | 17 | 54,85 |
| 2005 | 10 | 18 | 0,00 |
| 2005 | 10 | 19 | 0,00 |
| 2005 | 10 | 20 | 0,00 |
| 2005 | 10 | 21 | 0,00 |
| 2005 | 10 | 22 | 0,00 |
| 2005 | 10 | 23 | 0,00 |
| 2005 | 10 | 24 | 0,00 |
| 2005 | 10 | 25 | 14,33 |
| 2005 | 10 | 26 | 0,00 |
| 2005 | 10 | 27 | 0,00 |
| 2005 | 10 | 28 | 0,00 |
| 2005 | 10 | 29 | 0,00 |

ANNEXE 4

Comparaison des débits simulés et observés après fractionnement des événements

COMPARAISON DES DÉBITS SIMULÉS ET OBSERVÉS APRÈS FRACTIONNEMENT DES ÉVÉNEMENTS

Méthode 2 : Utilisation des données d'humidité

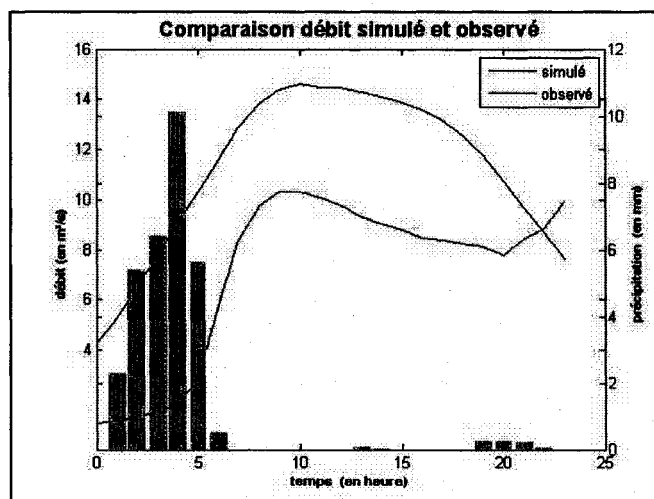


Figure 60 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 2 Événement 2-1

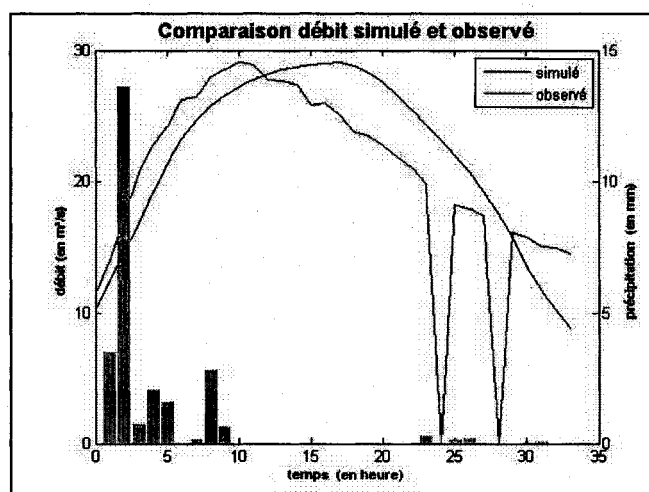


Figure 61 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 2 Événement 2-2

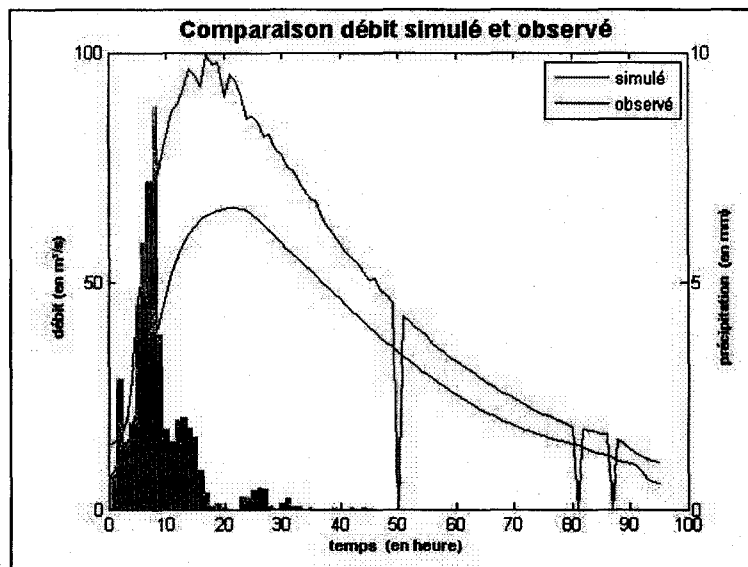


Figure 62 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 2 Événement 2-3

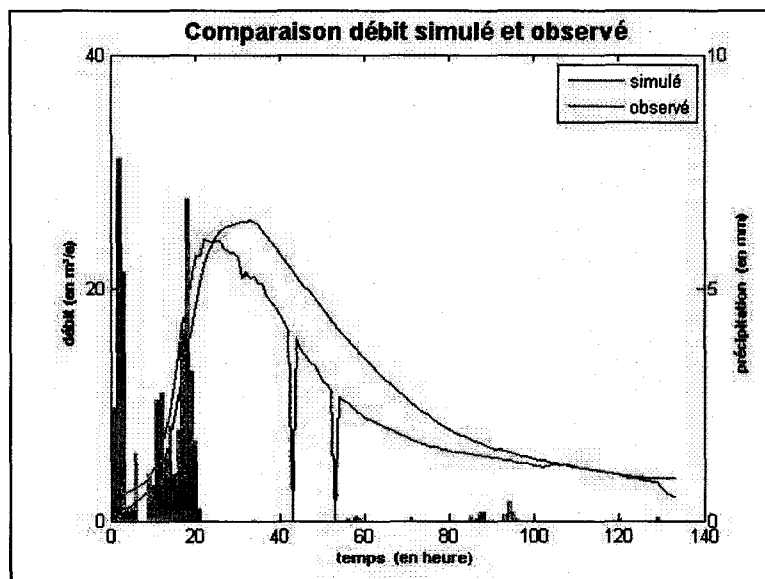


Figure 63 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 2 Événement 4-1

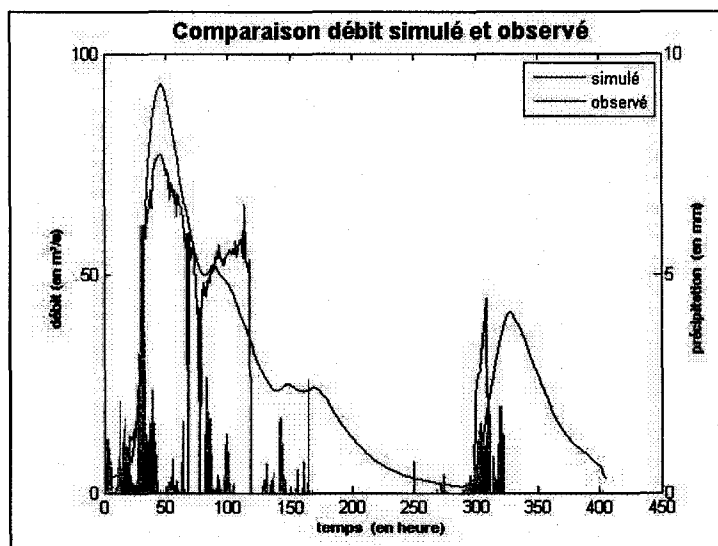


Figure 64 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 2 Événement 4-2

Méthode 3 : Utilisation des données d'humidité avec paramètres distribués

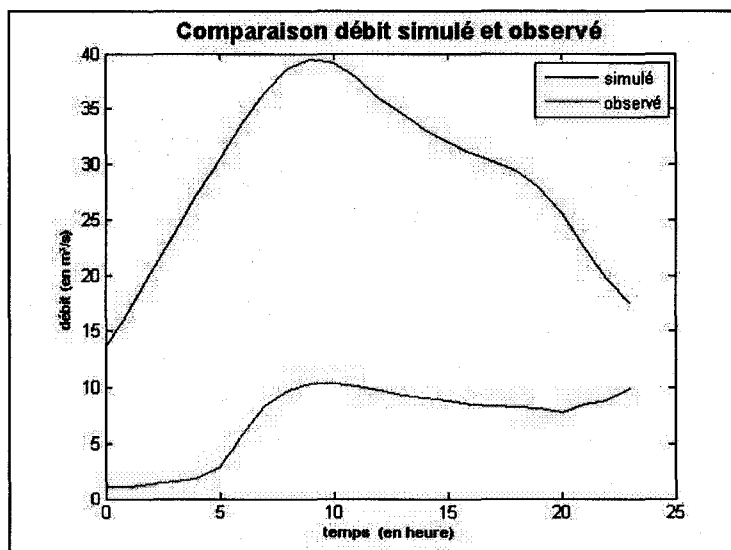


Figure 65 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 3 Événement 2-1

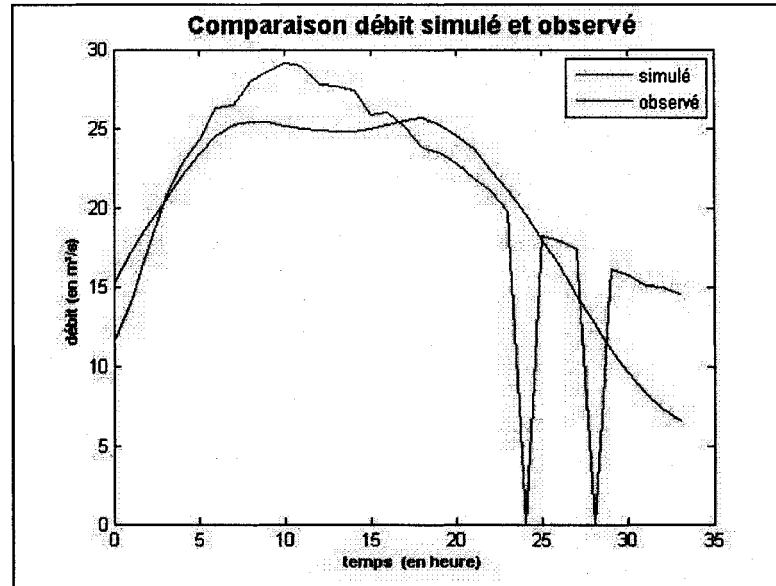


Figure 66 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 3 Événement 2-2

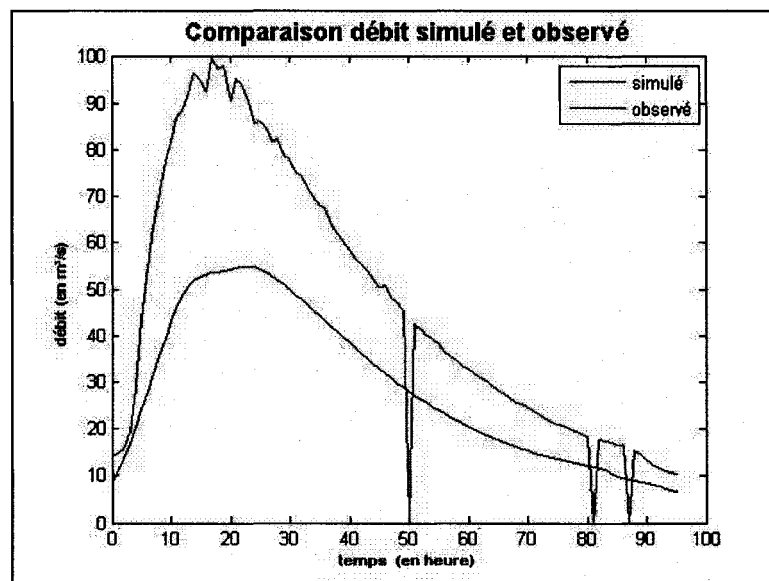


Figure 67 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 3 Événement 2-3

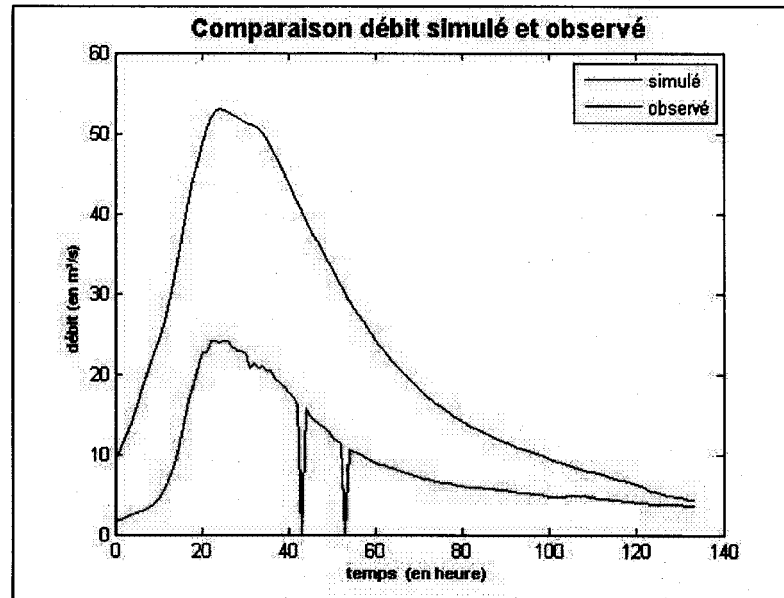


Figure 68 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 3 Événement 4-1

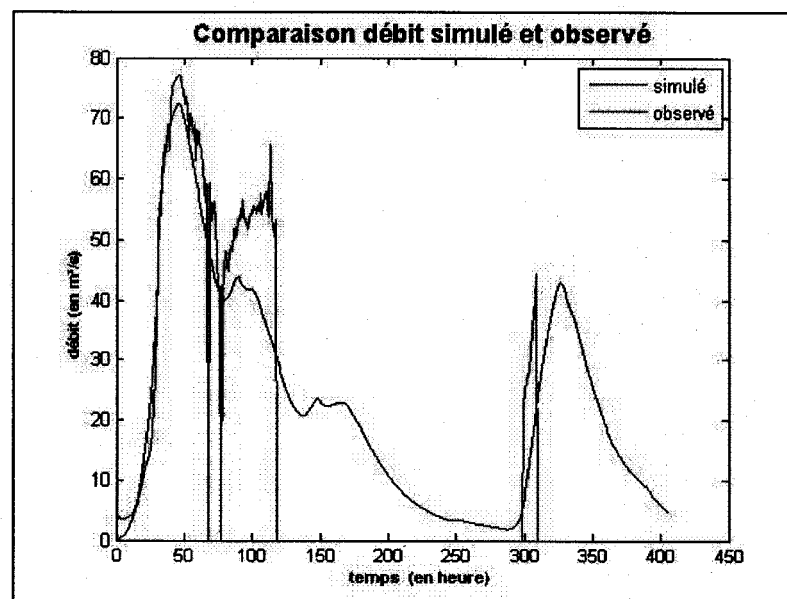


Figure 69 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 3 Événement 4-2

Méthode 4 : Rétroaction entre les débits simulés et observés

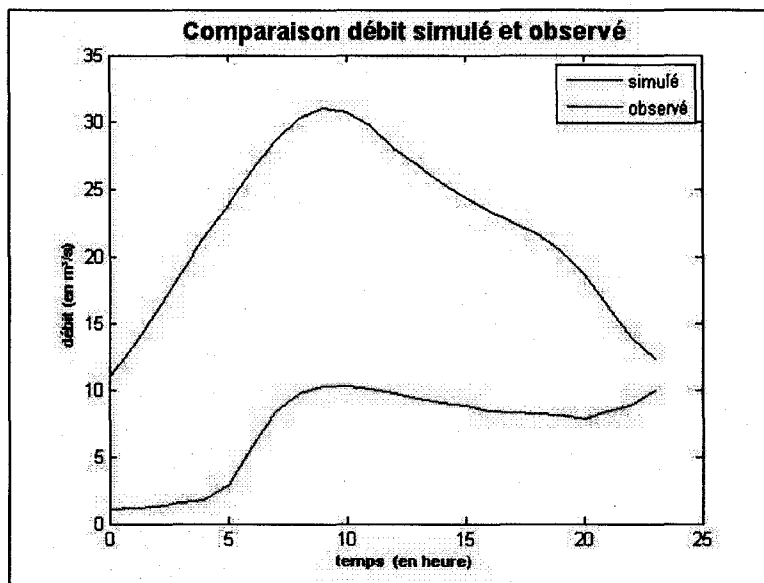


Figure 70 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 4 Événement 2-1

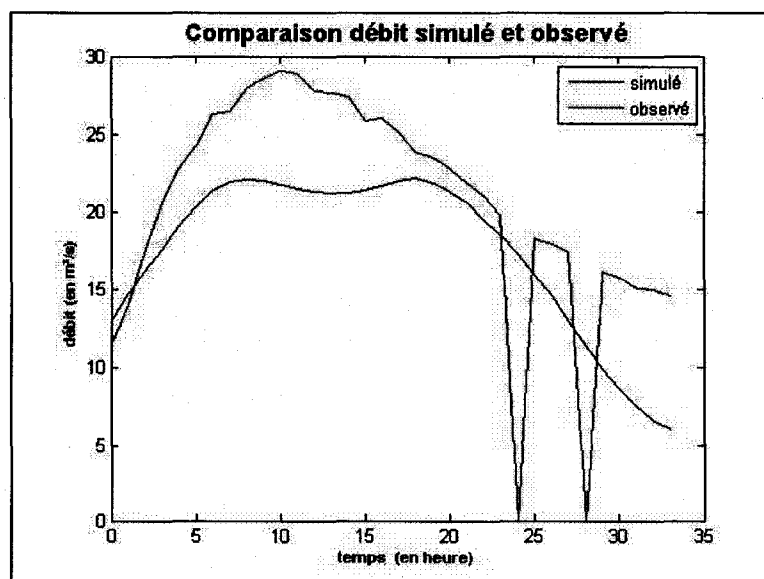


Figure 71 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 4 Événement 2-2

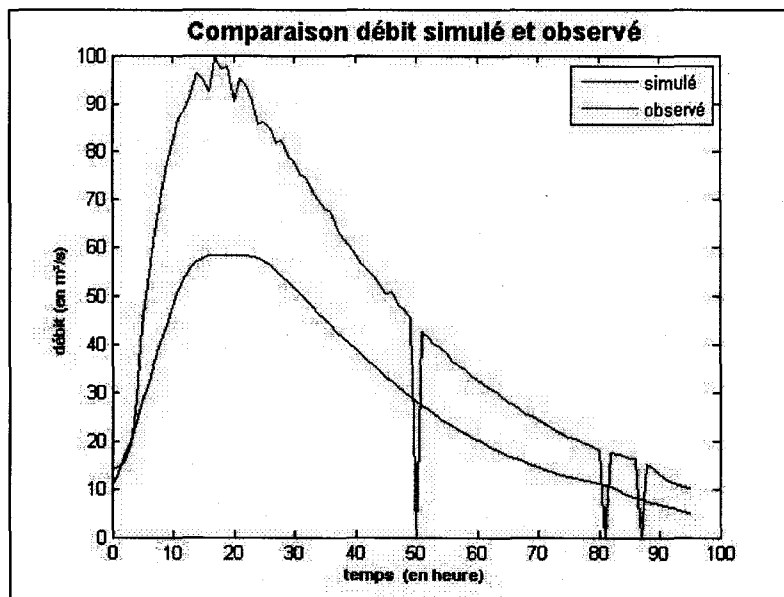


Figure 72 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 4 Événement 2-3

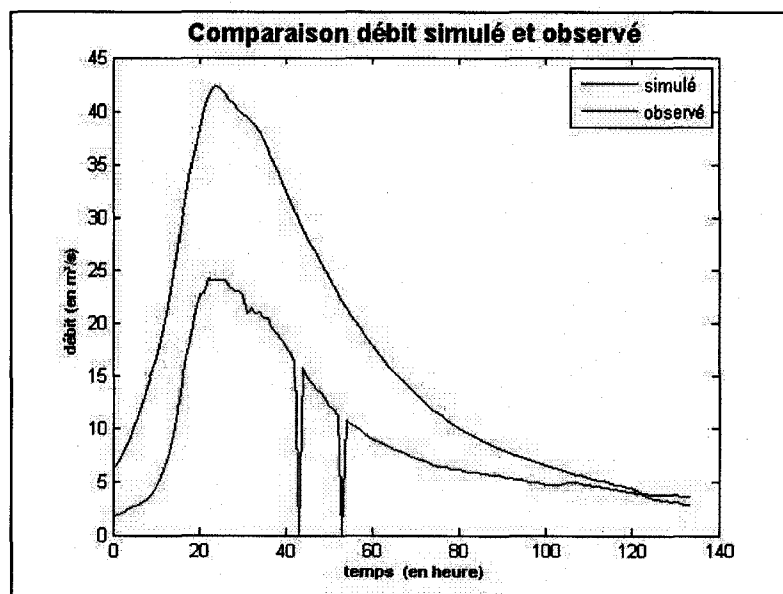


Figure 73 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 4 Événement 4-1

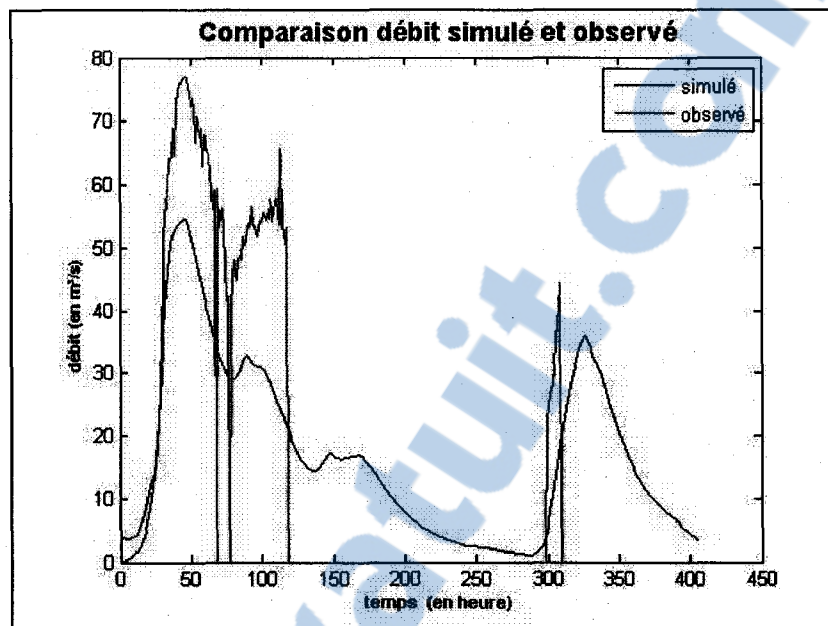


Figure 74 Comparaison des débits simulés et observés
Méthode 4 Événement 4-2

BIBLIOGRAPHIE

- Aubert, D., Loumagne, C., Oudin, L., & Le Hegarat-Masclé, S. (2003). Assimilation of soil moisture into hydrological models: The sequential method. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(6), 711-717.
- Cui, Z., Vieux, B. E., Neeman, H., & Moreda, F. (2005). Parallelisation of a distributed hydrologic model. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 22(1), 42-52.
- Desmeules, J., & Gélinas, J.-P. (1981). *Caractéristiques physiques et démographiques, eaux de surface, bassin versant de la rivière Chateauguay*. Québec, Qué. : Ministère de l'Environnement, Direction générale des inventaires et de la recherche, 66p.
- Dubé, J. S. (2005). MGC-860 Hydraulique souterraine : notes de cours. Montréal : Ecole de Technologie Supérieure.
- GAAP. (2004). HYMAP- Regroupement stratégique en Hydro-Météorologique Appliquée. Consultée le 15/12/2005, <http://hymap.gaap.ulaval.ca/>
- Garrote, L., & Bras, R. L. (1995). Distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models. *Journal of Hydrology*, 167(1-4), 279.
- Jardins de Napierville. (2005). Géologie du territoire. Consultée le 26/03/2006, <http://www.cld-jardinsdenapierville.com/>
- Latham, K. W., Watt, W. E., & Conseil national de recherches Canada. Comité associé sur l'hydrologie. (1990). *Hydrologie des crues au Canada : guide de planification et de conception*. Ottawa: Conseil national de recherches Canada Comité associé d'hydrologie.
- Leconte, R. (2001). CTN-537 Gestion des ressources hydriques : notes de cours. Montréal : Ecole de Technologie Supérieure.
- Llamas, J. (1993). *Hydrologie generale principes et applications* (2e ed.). Boucherville, Québec: G. Morin.
- Mésonet-Montréal. (2005). Mésonet-Montréal. Consultée le 15/12/2005, <http://www.mesonet-montreal.ca/definition.php>

- Ministère de l'environnement du Québec. (1981a). *Caractéristiques physiques et démographiques du bassin versant de la rivière Châteauguay*. Québec: Direction générale des inventaires et de la recherche.
- Ministère de l'environnement du Québec. (1981b). *Étude hydrogéologique du bassin versant de la Châteauguay*. Québec: Direction générale des inventaires et de la recherche.
- Ministère de l'environnement du Québec. (1981c). *Les utilisations de l'eau: Étude de la presse écrite*. Québec: Direction générale des inventaires et de la recherche.
- Ministère des terres et forêts : Service des plans d'aménagement (1973). *Connaissance du milieu forestier, bassin de la rivière Châteauguay*. Québec, Qué. : Ministère des terres et forêts, 88p.
- Minville, M. (2004). *Élaboration d'un modèle d'hydrologie : Paramétrage, calage et validation pour le bassin versant de la rivière des Anglais*. Montréal: École de Technologie Supérieure.
- Musy, A. (1995). Hydrologie générale. Consultée le 10/02/2006, <http://hydram.epfl.ch/e-drologie/>
- Ressources naturelles Canada. (2004). Les eaux souterraines : caractérisation hydrogéologique régionale du bassin versant de la rivière Châteauguay. Consultée le 10/02/2006, http://pes.rncan.gc.ca/p3/a8/index_f.php
- Ressources naturelles Canada. (2006). Centre Canadien de télédétection. Consultée le 03/04/2006, http://ccrs.rncan.gc.ca/ressource/tutor/fundam/chapter5/14_f.php
- Roy, L. (2000). *Évolution du risque hydrologique sur le bassin versant de la rivière Châteauguay*. Montréal: École de technologie supérieure.
- SCABRIC Société de conservation et d'aménagement du bassin de la rivière Châteauguay. (2004). La vallée de la rivière Châteauguay. Consultée le 15/12/2006, <http://www.rivierechateauguay.qc.ca/scabric/carte.htm>
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270-292.
- Turcotte, R., Lacombe, P., Dimnik, C., & Villeneuve, J.-P. (2004). Prevision hydrologique distribuee pour la gestion des barrages publics du Quebec Distributed hydrological prediction for the management of Quebec's public dams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 308-320.

Young, G. D. (2005). *MP-917 Technical Brief 17 : Calibration of Profiling Probes*.
Montréal.