



Unité de recherche Hydrosystèmes
et Bioprocédés
1, rue Pierre Gilles de Gennes
92 160 Antony
FRANCE



Département Hydraulique -
Mécanique des Fluides
2, rue Charles Camichel
31 000 Toulouse
FRANCE



Faculté de foresterie, de géographie
et de géomatique
2405, rue de la Terrasse
Québec, QC G1V 0A6
CANADA

Rapport de projet de fin d'études
**Étude du comportement hydrologique de petits bassins versants
soumis à un aménagement forestier**
Bassin Expérimental du Ruisseau des Eaux-Volées au Québec

Julie VIATGÉ

Encadrants :
Mr Vazken ANDRÉASSIAN - Irstea, Antony
Mr Sylvain JUTRAS - Université Laval, Québec

11 Février 2013 - 18 Juillet 2013

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier mes encadrants Vazken Andréassian et Sylvain Jutras pour la confiance qu'ils m'ont accordée en m'acceptant pour ce stage. J'ai été particulièrement touchée par leur accueil chaleureux, leur investissement, leur présence et leurs conseils précieux.

Je remercie également toute l'équipe HBAN d'Antony, Charles, Louise, Laure, Pierre, Carina, Guillaume, Laurent, Olivier, François, Florent pour leur sympathie, leur accueil et leurs conseils. (Merci Louise de perdre au Badminton!!!). Merci aussi à Flavien pour sa joie de vivre et sa bonne humeur!

Merci aussi aux étudiants du département de foresterie de l'Université Laval pour leur accueil et leur générosité. Un merci tout particulier à Fouzia avec qui j'ai vraiment apprécié travailler, pour sa patience et sa joie de vivre.

Je remercie enfin chaleureusement Maria-Helena Ramos pour sa sympathie, sa générosité et ses conseils. Merci aux originaux introuvables, à la frontière Canada-Québec sur le bac en direction de Tadoussac, aux baleines et un merci tout particulier à la baleine bleue pour sa généreuse et TRÈS RARE participation sur la demande express de Captain Simon...

Résumé

Les relations qui existent entre l'hydrologie d'un bassin versant, son couvert forestier et le climat auquel il est soumis ont été sujet de nombreuses controverses en France, et ce, depuis la fin du XVIII^{ème} siècle. Ce n'est qu'au début du XX^{ème} siècle que fut mis en place sur l'ensemble du territoire des États-Unis un nouveau système d'analyse ayant pour but de mettre en lumière le rôle des forêts sur le comportement hydrologique des bassins versants : le principe des bassins appariés. Avec l'arrivée de l'informatique à la fin du XX^{ème} siècle des outils de calcul plus performants furent créés ouvrant la voie à des analyses plus poussées (*Andréassian, 2002*). Il a souvent été noté que les aménagements forestiers (récoltes partielles, coupes à blanc, herbicides, etc) influent considérablement sur le comportement hydrologique des bassins versants par exemple en aggravant l'ampleur des crues.

Le Bassin Expérimental du Ruisseau des Eaux-Volées (BEREV) situé dans la forêt Montmorency à 50 km au nord de la ville de Québec, a été équipé de seuils de mesures en 1965 dans le but d'en faire un bassin d'étude de la qualité des eaux et du rôle hydrologique de la forêt. Ses 4 sous-bassins principaux ont subi différentes récoltes plus ou moins importantes : une récolte partielle entre 1974 et 1976 (32 % du sous-bassin 6), une récolte massive entre 1993 et 1994 (86 % du sous-bassin 7A) et une récolte importante entre 2003 et 2005 (45 % du sous-bassin 5A). Le BEREV représente donc une source de près de 50 années de données qui sont de plus une véritable mine d'informations sur l'influence des récoltes sur l'hydrologie d'un petit bassin versant (c'est-à-dire de surface inférieure à 10 km²).

À l'inverse de la récolte de 2003-2005, les récoltes de 1974-1976 et 1993-1994 ont déjà fait l'objet d'études mais il n'a cependant jamais été fait d'analyse de validité des données. Nous avons donc voulu évaluer l'importance d'un choix de données chronologiques correctes avant de les utiliser pour nos analyses. En effet, nous avons noté des incohérences temporelles au sein même de la chronique de données météorologiques publiées par le ministère de l'environnement Canadien. D'autre part, il existait également un décalage horaire dans le calcul des données journalières hydrométriques et météorologiques. Il nous a donc paru nécessaire d'effectuer, au préalable de tout calcul, un inventaire et une validation de toutes les ressources disponibles afin de reconstruire les chroniques de données les plus cohérentes possibles.

Une fois ce tri et cette validation effectués, nous avons mis en place notre analyse en utilisant 2 outils de modélisation que sont le modèle Débit-Débit construit sur le principe des bassins appariés et le modèle Pluie-Débit GR4J développé à Irstea Antony ; et dont nous avons évalué les performances à l'aide du critère de Nash-Sutcliffe. Nous avons finalement pu mettre en évidence l'impact des aménagements forestiers sur le comportement hydrologique de petits bassins versants.

Abstract

Relationships between watersheds' behaviour, climate and forests have been a controversial issue in France since the end of the XVIIIth century. A serie of experiments based on the paired watersheds principle have been set up on american watersheds at the very beginning of the XXth century to highlight the role of forests on watersheds' behaviour. The expansion of computer calculation power at the end of the XXth gave access to new powerful tools, allowing to solve more complex calculations (*Andréassian, 2002*). It has often been said that harvesting (partial deforestation, clearcuts, herbicides, etc) had a major influence on watersheds' behaviour such as the generation of floods.

The "Ruisseau des Eaux-Volées" Experimental Watershed (REVIEW) located in the Montmorency forest 50 km north of Quebec city has been equiped with measuring devices in 1965 in order to make it a real place to study water quality and the hydrologic role of a forest. The 4 principal sub-watersheds of the REVIEW have been harvested on surfaces of different size : a partial harvesting in 1974-1976 (32 % of the watershed 6), a massive harvesting in 1993-1994 (86 % of the watershed 7A) and a large one in 2003-2005 (45 % of the watershed 5A). REVIEW represents nearly 50 years of data and a rare source of informations on harvesting influence on watersheds' behaviour.

First harvestings (1974-1976 and 1993-1994) have already been studied but a critical analysis of datas' validity has never been done. It seemed really important to us to show the necessity of using correct chronological datas before working on it. As a matter of fact, we noticed that meteorological datas officially published by the Canadian ministry of environment were not temporally consistent. Moreover, there was a jet lag in the calculation of daily hydrometrical and meteorological datas. Obviously, we first had to draw up the inventory of all the existing datas that could help us build new series of datas as correct as possible.

Once we had made that selection and validation, we set up our analysis using two modelisation tools : a Runoff-Runoff model based on paired watersheds' principle and the GR4J Rainfall-Runoff model developed by Irstea Antony; evaluated by the value of the Nash-Sutcliffe criteria. We finally have been able to highlight some results on the influence of harvestings on little watersheds' behaviour.

Table des matières

Remerciements	1
Résumé	2
Abstract	3
Table des figures	6
Liste des tableaux	6
Introduction	7
1 État des connaissances sur les relations Eau-Forêts	8
1.1 Forêt et climat	8
1.1.1 Interception - Égouttement direct	8
1.1.2 Écoulement tronç - Réseau racinaire	9
1.1.3 Évapotranspiration réelle	9
1.1.4 Ruissellement - Infiltration	9
1.2 Forêt et bassin versant	9
1.2.1 Écoulement annuel	9
1.2.2 Écoulement de pointe	10
1.2.3 Écoulement d'étiage	10
2 Méthode d'analyse	11
2.1 Outils de modélisation	11
2.1.1 Optimisation	11
2.1.2 Modélisation Débit-Débit	12
2.1.3 Modélisation Pluie-Débit : Utilisation du GR4J	12
2.2 Analyse graphique	14
2.3 Le cas du bassin d'Hubbard Brook	15
2.3.1 Au pas de temps annuel	17
2.3.2 Au pas de temps journalier	17
3 Le Bassin Expérimental du Ruisseau des Eaux-Volées (BEREV) au Québec	18
3.1 Présentation du bassin d'étude	18
3.1.1 Le Bassin Expérimental du Ruisseau des Eaux-Volées (BEREV)	18
3.1.2 Traitements appliqués aux sous-bassins du BEREV	19
3.2 Données météorologiques : températures et précipitations	20
3.2.1 Incohérences constatées	20
3.2.2 Correction appliquée aux données de précipitations horaires	22
3.2.3 Données finales de précipitations et températures utilisées pour l'étude	22
3.3 Données hydrométriques	23
4 Évolution du comportement hydrologique du BEREV suite à 3 récoltes forestières	24
4.1 Récolte partielle du bassin 6 entre 1974-1976	24
4.1.1 Évolution de la dynamique du bassin	26
4.1.2 Cumuls Saisonniers	29
4.1.3 Conclusions	29
4.2 Récolte massive du bassin 7A entre 1993-1994	32
4.2.1 Évolution de la dynamique du bassin	32
4.2.2 Cumuls Saisonniers	35
4.2.3 Conclusions	35
4.3 Récolte importante du bassin 5A entre 2003-2005	38
4.3.1 Évolution de la dynamique du bassin	38

4.3.2	Cumuls Saisonniers	41
4.3.3	Conclusions	41
4.4	Résultats généraux	44
5	Importance du choix des données	45
5.1	Les options	45
5.2	Résultats sur le bassin 5A	45
5.3	Résultats sur le bassin 7A	46
5.3.1	Calage du 01/01/2000 au 31/12/2002	46
5.3.2	Calage du 01/01/2001 au 31/12/2004	46
5.3.3	Calage du 01/01/2005 au 31/12/2007	47
	Conclusion	48
	Bibliographie	49
	Annexe A : Optimisation "Pas-à-Pas"	51
	Annexe B : Correction des données de précipitations	52

Table des figures

1.1	Bilan hydrique entre précipitations et forêts	8
2.1	Modélisation Débit-Débit	12
2.2	Fonctionnement général du GR4J	13
2.3	Localisation du bassin d'Hubbard Brook	15
2.4	Les sous-bassins d'Hubbard Brook	15
2.5	Coupe à blanc du bassin 2 d'Hubbard Brook 1965-1969 - Analyse : Bassins Appariés	16
3.1	Le BEREV et ses seuils de mesure	18
3.2	Traitements ayant eu lieu sur le BEREV depuis 1965	19
3.3	Le Seuil 7 du BEREV	20
3.4	Localisation de la Station Principale	20
3.5	Données météorologiques effectivement disponibles	21
3.6	Précipitomètre à pesée de la Station Principale	21
4.1	Hydrogramme du bassin 6 en 1972-1973	24
4.2	Débits annuels (mm/an) des bassins 6, 7A et 5	25
4.3	Récolte partielle 1973-1975 - Analyse : Bassins Appariés	27
4.4	Récolte partielle 1973-1975 - Analyse : GR4J	28
4.5	Analyse Saisonnière de la récolte partielle 1973-1975 - Analyse : Bassins Appariés	30
4.6	Analyse Saisonnière de la récolte partielle 1973-1975 - Analyse : GR4J	31
4.7	Données manquantes en 1998 et 1999	32
4.8	Récolte massive 1993-1994 - Analyse : Bassins Appariés	33
4.9	Récolte massive 1993-1994 - Analyse : GR4J	34
4.10	Analyse Saisonnière de la récolte partielle 1993-1994 - Analyse : Bassins Appariés	36
4.11	Analyse Saisonnière de la récolte partielle 1993-1994 - Analyse : GR4J	37
4.12	Récolte importante 2003-2005 - Analyse : Bassins Appariés	39
4.13	Récolte importante 2003-2005 - Analyse : GR4J	40
4.14	Analyse Saisonnière de la récolte partielle 2003-2005 - Analyse : Bassins Appariés	42
4.15	Analyse Saisonnière de la récolte partielle 2003-2005 - Analyse : GR4J	43
1	Schéma de l'algorithme d'optimisation "Pas-à-Pas"	51

Liste des tableaux

3.1	Caractéristiques climatiques de la Forêt Montmorency	18
4.1	Récolte 1974-1976	24
4.2	Récolte 1974-1976 - Nouvelle étude	25
4.3	Récolte 1993-1994	32
4.4	Récolte 2003-2005	38
5.1	Valeurs de critère C2M pour la période de calage 2000-2002 sur le traitement du bassin 5A	46
5.2	Valeurs de critère C2M pour la période de calage 2000-2002 sur le bassin 7A	46
5.3	Valeurs de critère C2M pour la période de calage 2001-2004 sur le bassin 7A	47
5.4	Valeurs de critère C2M pour la période de calage 2005-2007 sur le bassin 7A	47

Introduction

Irstea (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture), anciennement Cemagref, est un centre de recherche français rattaché aux ministères de la recherche et de l'agriculture. Ses 1600 chercheurs statutaires travaillent à relever les défis de gestion des ressources, risques naturels et qualité environnementale. L'équipe HBAN (Hydrologie des Bassins Versants) d'Irstea s'intéresse tout particulièrement au développement de modèles hydrologiques Pluie-Débit.

L'Université Laval, située à Québec, est l'une des plus grandes universités du Canada. Le département des sciences du bois et de la forêt de la faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, compte 30 professeurs chercheurs qui forment des ingénieurs forestiers, des arpenteurs-géomètres et des géographes dans le but d'aborder des problématiques d'aménagement du territoire dans un souci de protection de l'environnement. La forêt Montmorency, forêt universitaire de l'Université Laval aménagée en 1965, facilite la formation pratique des plus de 400 étudiants qui viennent étudier au sein du département.

C'est dans le cadre d'un partenariat entre l'équipe HBAN d'Irstea Antony et le département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval que s'est déroulé mon stage de fin d'études. Nous nous sommes intéressés à l'évolution du comportement hydrologique du Bassin Expérimental du Ruisseau des Eaux-Volées (BEREV), situé au sein de la forêt Montmorency et ayant été soumis à des récoltes forestières. 2 mois au sein d'Irstea à Antony m'ont permis d'acquérir des connaissances sur les outils de modélisation avant de partir 3 mois à l'Université Laval à Québec pour valider les données hydrométriques et météorologiques du BEREV et analyser les résultats obtenus avec les modèles appréhendés.

Avec près de 50 années de données, le BEREV présente un grand intérêt scientifique. D'autant plus qu'il a souvent été l'objet de récoltes plus ou moins importantes sur chacun de ses 4 sous-bassins principaux. Ses données tant hydrométriques que météorologiques n'ont cependant jamais fait l'objet d'une analyse pointue et d'une validation exhaustive. L'objectif de ce stage fut d'abord de récupérer et trier l'ensemble des données disponibles pour en faire une critique. Ayant constaté de nombreuses erreurs et incohérences, nous avons choisi de corriger ces manques afin d'utiliser la meilleure chronique de données possible pour notre étude. Une fois réalisé ce travail exhaustif, nous avons pu mettre en place l'étude de l'influence des récoltes sur le comportement hydrologique du bassin et l'analyse des résultats obtenus avec 2 modèles : un modèle Débit-Débit développé sur le principe des bassins appariés, un modèle Pluie-Débit, le GR4J, développé à Irstea Antony.

Nous présentons dans un premier temps une analyse bibliographique des impacts connus des aménagements forestiers sur le comportement hydrologique de petits bassins versants. Le fonctionnement des deux modèles utilisés pour l'étude est ensuite détaillé dans le deuxième Chapitre. Le Chapitre 3 est consacré à la présentation du BEREV et à la critique de ses données tant hydrométriques que météorologiques. L'analyse des résultats obtenus avec la modélisation est présentée dans le 4^{ème} Chapitre. Enfin, le 5^{ème} et dernier Chapitre est dédié à l'évaluation de l'importance de la critique des données.

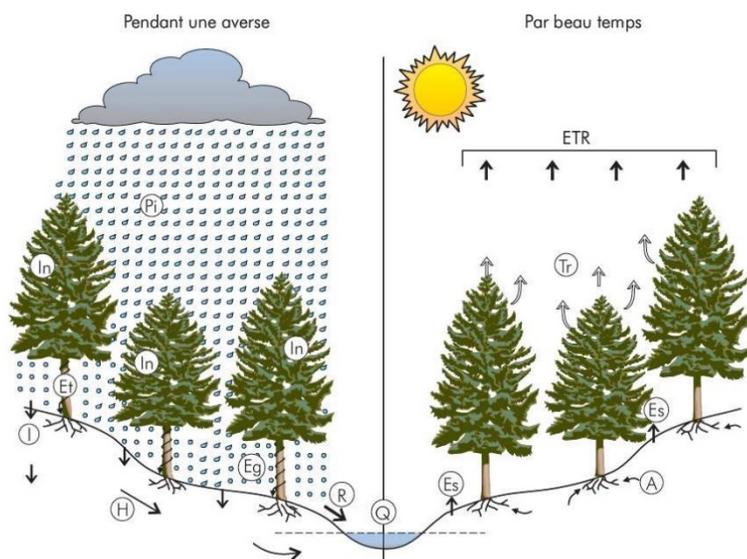
Chapitre 1

État des connaissances sur les relations Eau-Forêts

Bien que complexes, il est possible de trouver de nombreuses informations dans la littérature scientifique sur les liens existants entre eaux et forêts, forêts et bassins versants. Ainsi, nous dressons dans ce premier chapitre une analyse bibliographique.

1.1 Forêt et climat

Le schéma suivant (Figure 1.1) présente le bilan hydrique entre précipitations (solides et/ou liquides) et couvert forestier :



Où :

- P_i est la précipitation incidente
- I_n est l'interception
- E_t est l'écoulement le long des troncs
- E_g est l'égouttement
- I est l'infiltration
- H est l'écoulement lent souterrain
- R est le ruissellement
- ETR est l'évapotranspiration réelle
- E_s est l'évaporation de l'eau sur la canopée et dans le sol
- T_r est la transpiration des plantes
- A est l'absorption par les racines
- Q est l'écoulement de la rivière

FIGURE 1.1 – Bilan hydrique entre précipitations et forêts
(Lavabre et al., 2000)

Nous pouvons aisément en tirer les relations suivantes :

- Par averse : $P_i = I_n + E_t + E_g$, la précipitation incidente P_i se répartit entre interception I_n par le couvert forestier, écoulement direct jusqu'au sol E_g , écoulement plus lent E_t , via les troncs.
- Par beau temps : $ETR = E_s + T_r$, l'évaporation E_s et la transpiration T_r des plantes et/ou du sol contribuent à l'évapotranspiration réelle ETR .

Dans les sections suivantes nous présentons les différentes contributions des termes de ce bilan hydrique et leur lien avec la forêt.

1.1.1 Interception - Égouttement direct

L'égouttement E_g et l'interception I_n sont directement liés : tout ce qui ne s'égoutte pas est tout simplement intercepté par la canopée. L'égouttement est influencé par l'âge et la densité du peuplement, mais aussi par les caractéristiques du feuillage : sa persistance et sa surface. Ainsi, l'égouttement diminue avec l'âge et la densité du peuplement : plus le peuplement est âgé et dense plus il est imposant et rétenteur d'eau. Cette diminution de

l'égouttement se fait évidemment au profit de l'interception.

L'interception dépend donc des mêmes caractéristiques que l'égouttement. Elle tend à diminuer avec l'intensité et la durée des averses car un feuillage a une capacité de stockage restreinte à quelques millimètres : lorsque la capacité de stockage est dépassée et si l'averse continue, les précipitations iront directement au sol et ne seront plus interceptées. D'autre part, l'interception représente une perte pour le bilan hydrologique du bassin puisque directement soumise à l'évaporation et l'absorption des feuilles.

L'égouttement représente en moyenne 70 % de la pluie incidente ; l'interception 25 % (*Lavabre et al.*, 2000).

1.1.2 Écoulement tronc - Réseau racinaire

L'écoulement tronc E_t suit les branches et termine son chemin par le tronc. Il arrive directement aux racines et sa vitesse varie en fonction de la structure du peuplement : par exemple, certains arbres ont des branches plutôt verticales ou des troncs plutôt lisses qui favorisent l'écoulement.

L'eau est alors dirigée vers les racines qui forment un véritable réseau hydraulique. En effet, elles tendent à décompacter le sol et donc à favoriser la capacité de rétention d'eau du sol et l'acheminement vertical des eaux. En cas de beau temps le réseau racinaire permet aussi à l'arbre de pomper les ressources en eau du sol qui seront plus tard soumises à la transpiration.

L'écoulement tronc représente à peu près 5 % de la pluie incidente (*Lavabre et al.*, 2000).

1.1.3 Évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle ETR est la combinaison de l'évaporation du sol, de l'évaporation de l'eau interceptée par les feuillages E_s et de la transpiration des plantes T_r . C'est une variable encore impossible à mesurer mais on sait cependant qu'elle est plus élevée au début qu'en fin de vie d'une plante.

1.1.4 Ruissellement - Infiltration

L'eau pluviale qui n'a pas été interceptée et qui arrive au sol a 2 possibilités : s'infiltrer (I) ou ruisseler directement jusqu'à la rivière (écoulement rapide R). La partie de l'eau qui s'infiltrera arrivera jusqu'aux nappes phréatiques ou rejoindra également la rivière mais cette fois de manière beaucoup plus lente (écoulement lent H). Comme vu précédemment, le réseau racinaire favorise l'infiltration et limite le ruissellement.

1.2 Forêt et bassin versant

Il existe des liens très forts entre le couvert forestier et l'hydrologie d'un bassin. Aussi, la déforestation aura tendance à diminuer l'interception, l'évapotranspiration et l'écoulement tronc ce qui aura pour effet d'augmenter les ressources en eau disponibles pour le bassin. On sait comme acquises les généralisations suivantes faites par *Hibbert* (1967) :

- Les ressources en eau augmentent quand le couvert forestier est réduit
- Elles diminuent quand le couvert augmente

Nous nous intéressons en particulier aux écoulements annuel, de pointe et d'été.

1.2.1 Écoulement annuel

Les forêts peuvent mobiliser de grandes quantités d'eau et réduire les ressources disponibles qui ne sont pas nécessairement compensées par une augmentation de la pluviosité. En effet, la forêt est à l'origine des effets d'interception, de transpiration et d'absorption par les racines qui représentent des pertes pour le bilan hydrologique du bassin ; avec sa récolte ces effets sont diminués et les ressources disponibles augmentées. En conséquence, l'écoulement annuel augmente proportionnellement à la surface de coupe (*Hibbert*, 1967).

Suite à la récolte, avec la repousse, l'augmentation initiale des ressources en eau va diminuer et le bassin retournera à son comportement hydrologique d'origine. Dans certains cas, il arrive même que les ressources deviennent

moindre que ce qu'elles étaient à l'origine puisque la repousse jeune et dynamique évapotranspire plus que le couvert plus âgé. Ce phénomène est souvent appelé effet "Kuczera" (*Kuczera, 1987; Andréassian, 2012; Andréassian et Trinquet, 2009*). *Hibbert (1967)* a également montré que le temps de retour à un état stable suite à une récolte est directement lié au pourcentage de coupe. Finalement, plus la surface de coupe est élevée, plus l'augmentation des ressources en eau et la durée des effets de la récolte sont grandes.

1.2.2 Écoulement de pointe

Il est à noter dans un premier temps que les forêts ne sont pas à l'origine des écoulements de pointe : ce sont les conditions météorologiques qui engendrent ces crues. La forêt peut simplement avoir un rôle protecteur ou non. En effet, elle aura un effet réducteur sur les crues courantes car elle intercepte les précipitations et rend l'écoulement de surface moins rapide et plus étalé de par son réseau racinaire. La forêt alluviale en particulier, près du lit de la rivière, ralentit le courant et a une forte capacité de stockage. Elle n'aura cependant aucun effet sur les événements intenses ou/et de longue durée.

Concernant la récolte, elle aura donc tendance à réduire l'effet protecteur de la forêt sur les crues courantes mais n'aura aucune conséquence sur les événements de forte ampleur. Cependant, elle peut favoriser l'érosion et les glissements de terrains qui peuvent alors causer d'importants dommages en cas de crues.

L'écoulement de pointe lié à la fonte des neiges quant à lui, est rendu précoce par la déforestation : en effet, sans la protection du couvert forestier, le manteau neigeux est plus exposé aux rayons solaires et aura alors tendance à fondre plus tôt.

1.2.3 Écoulement d'été

La forêt peut avoir un effet bénéfique ou non sur les débits d'été. Elle peut d'une part faire office de stockage et constituer alors un surplus en cas de sécheresse (cependant, il arrive que ce surplus soit utilisé pour la transpiration) ; d'autre part, la forêt peut puiser directement dans les nappes pour la transpiration et réduire considérablement l'écoulement souterrain.

Chapitre 2

Méthode d'analyse

2.1 Outils de modélisation

Dans le but de montrer l'influence des aménagements forestiers sur le comportement hydrologique des bassins versants, nous avons choisi d'analyser les débits du bassin qui subit ces transformations (bassin traité). L'objet de la modélisation est ici de déterminer ce qu'auraient dû être les débits du bassin traité s'il n'avait pas subi d'aménagements. Cette modélisation passe nécessairement par une phase d'optimisation que nous allons présenter ci-après.

Nous avons ensuite choisi de nous intéresser à 2 types de modélisation bien distincts. D'une part la modélisation Débit-Débit, basée sur le principe des bassins appariés, qui ne prend en compte que les débits mesurés sur le bassin traité et ceux mesurés sur un autre bassin proche appelé bassin de contrôle. D'autre part la modélisation Pluie-Débit qui prend en compte les précipitations, températures, ETP et débits mesurés sur le bassin traité. Le fonctionnement de ces modèles est présenté dans les paragraphes qui suivent et leur performance est évaluée par le critère C2M dérivé du critère de Nash-Sutcliffe.

2.1.1 Optimisation

Pour chacun des modèles utilisés et présentés ci-après, une phase de calage des paramètres, ou optimisation, est lancée : elle permet de déterminer les paramètres du modèle qui le rendront le plus performant possible. Cette optimisation se fait sur une période où le bassin traité ne subit pas d'aménagements. En effet, le but ici est de calculer, en se basant sur les événements passés, ce qu'aurait dû être le comportement hydrologique du bassin traité s'il n'avait pas subi de transformations. On cale donc les paramètres sur une période sans modifications du couvert forestier du bassin traité. D'autre part, le calage ne peut être pertinent que si le bassin est stable.

La méthode de calage utilisée est une méthode locale dite "pas-à-pas" développée par la division Hydrologie d'Irstea à Antony. C'est une méthode locale directe qui vise à chercher le meilleur jeu de paramètres possibles dans le but de maximiser un critère. Pour ce faire, on choisit un jeu de paramètres initial à partir duquel on détermine la valeur du critère. On transforme ensuite la valeur de chaque paramètre un à un d'un pas de $+/- \Delta i$ et on calcule les valeurs de critère associées. Si le critère a été amélioré une ou plusieurs fois, on choisit le premier jeu de paramètres qui a apporté l'amélioration et on réitère l'opération. S'il n'y a pas d'amélioration, on affine le pas de recherche. Lorsque le pas de recherche atteint sa valeur minimale $\Delta_{min} = 0.01$, la procédure s'arrête et le jeu de paramètres optimal est alors trouvé. Un schéma détaillé de l'algorithme, extrait de la thèse de *Perrin* (2000), est disponible en Annexe A.

On utilise généralement le critère de Nash-Sutcliffe (*Nash et Sutcliffe*, 1970) comme critère à maximiser. Basé sur la somme des erreurs quadratiques, il est défini comme suit :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Ce critère donne beaucoup plus de poids aux valeurs fortes de débits qu'aux valeurs faibles. Or, dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à l'évolution des débits tant d'étiage que de crues. Aussi, il est plus judicieux pour nous d'analyser le critère de Nash-Sutcliffe sur la racine carrée des débits qui donne un peu plus de poids aux valeurs faibles et un peu moins aux valeurs fortes :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{calc,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2}$$

Ce critère varie dans l'intervalle $] -\infty, 1]$ et n'a donc pas de borne inférieure. Pour corriger cet effet, on utilisera plutôt le critère C2M défini par *Mathevet* (2006) et variant dans l'intervalle $] -1, 1]$ où 1 traduit un modèle parfait :

$$C2M = \frac{Nash}{2 - Nash}$$

2.1.2 Modélisation Débit-Débit

La modélisation Débit-Débit est basée sur le principe des bassins appariés. Il s'agit de comparer les débits de 2 bassins versants géographiquement proches et ayant des tailles, aspects et couverts forestiers relativement similaires. L'idée générale est de mesurer et exprimer les débits d'un bassin en fonction des débits de l'autre bassin. Les bassins d'étude étant choisis de telle sorte que leurs caractéristiques physiques et géographiques soient semblables, on déterminera une relation assez linéaire entre leurs débits. Lorsque l'un des bassins est soumis à des aménagements, cette relation sera nécessairement affectée et cette modification correspondra à l'influence directe du traitement effectué. On parlera alors de "bassin traité" et de "bassin de contrôle" pour désigner respectivement le bassin ayant subi un aménagement et le bassin laissé intact servant de témoin. Le schéma ci-après (Figure 2.1) donne une explication visuelle de cette analyse Débit-Débit.

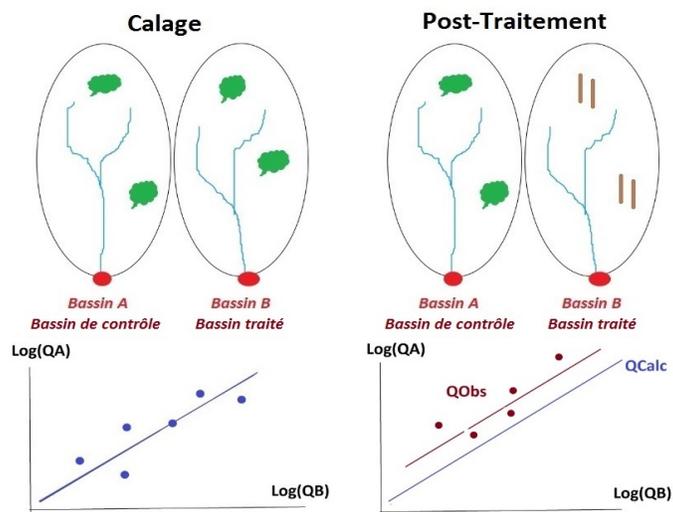


FIGURE 2.1 – Modélisation Débit-Débit

En d'autres termes, durant la période d'optimisation où aucun des bassins considérés n'est traité, on détermine la relation linéaire qui lie leurs débits. On s'attend donc à obtenir une relation de la forme suivante, où A correspond au bassin traité, B au bassin de contrôle :

$$\ln Q_A(j) = \alpha * \ln Q_B(j + \gamma) + b$$

Soit : $Q_A(j) = \beta * Q_B(j + \gamma)^\alpha$

Il y aura donc 3 paramètres à caler qui sont α , β et γ . Bien que cette relation soit assez simple, elle peut donner de très bons résultats qui sont parfois meilleurs que ceux obtenus avec un modèle Pluie-Débit (*Andréassian et al, 2012*). S'en suit une période où l'un des bassins subit une modification de son couvert forestier (bassin traité) et l'autre bassin est laissé pour témoin (bassin de contrôle). Suite à ces aménagements, il est alors possible de déterminer, connaissant les débits du bassin de contrôle et la relation qui lie les débits du bassin de contrôle aux débits du bassin traité, ce qu'aurait dû être le comportement hydrologique du bassin traité s'il n'avait pas subi d'aménagements. Une comparaison entre ces débits "calculés" et les débits observés sur le bassin traité donne une estimation de l'influence des aménagements forestiers.

2.1.3 Modélisation Pluie-Débit : Utilisation du GR4J

La modélisation Pluie-Débit prend en compte les précipitations, débits, températures et ETP du bassin traité. Elle cherche, en se basant sur les observations passées, à calculer le comportement hydrologique du bassin à partir des données météorologiques. Dans le cadre de ce type de modélisation, il est assez difficile de décrire le comportement de la neige. L'exercice est d'autant plus difficile dans notre cas car le bassin étudié est situé dans un environnement où la neige est très présente. En effet, la neige est présente sur le sol québécois de Octobre à Avril et il tombe en moyenne 500 mm de précipitations sur cette période. Il est donc très complexe de modéliser les débits dus à la fonte dans ces régions. Le GR4J n'étant pas conçu pour un tel climat, nous avons choisi de ne nous intéresser qu'aux données estivales et de ne pas considérer de module neige.

Nous allons présenter rapidement le fonctionnement du GR4J qui est détaillé dans l'article de *Perrin et al* (2003). Il s'agit d'un modèle à réservoirs conceptuel donc le sigle signifie : Génie Rural Journalier à 4 paramètres, et dont le fonctionnement global est présenté sur le schéma suivant (Figure 2.2) :

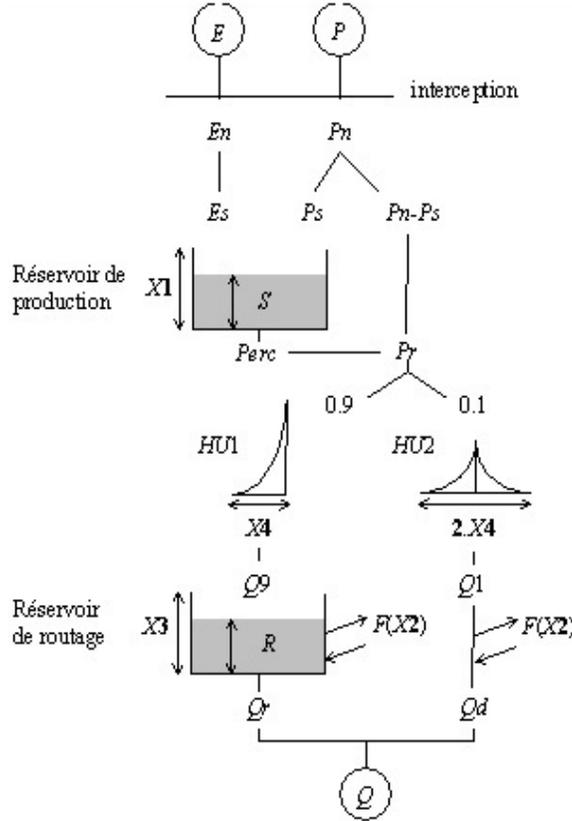


FIGURE 2.2 – Fonctionnement général du GR4J

Source : <http://webgr.irstea.fr/modeles/journalier-gr4j-2/>

P correspond aux précipitations en hauteur d'eau (mm) et E à l'évapotranspiration potentielle (mm). Dans le cadre de cette étude nous avons choisi d'utiliser la formule de *Oudin et al* (2005) pour calculer l'évapotranspiration potentielle. Cette formule prend en compte les températures et la radiation extraterrestre définie par *Morton* (1983). Connaissant les données P et E, on peut d'abord déterminer les précipitations et évapotranspirations nettes E_n et P_n :

- Si $P > E$ alors $P_n = P - E$ et $E_n = 0$
- Si $P < E$ alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P$

Dans le premier cas, on peut considérer qu'une partie P_s de la précipitation nette alimente un réservoir de production de capacité maximale X_1 et de niveau S :

$$P_s = \frac{X_1 * (1 - (\frac{S}{X_1})^2) * \tanh(\frac{P_n}{X_1})}{1 + \frac{S}{X_1} * \tanh(\frac{P_n}{X_1})}$$

Dans le second cas, on considère qu'une partie E_s du réservoir de production s'évapotranspire :

$$E_s = \frac{S * (2 - \frac{S}{X_1}) * \tanh(\frac{E_n}{X_1})}{1 + (1 - \frac{S}{X_1}) * \tanh(\frac{E_n}{X_1})}$$

Le niveau du réservoir de production s'adapte alors et devient : $S = S + P_s - E_s$

Ce réservoir est également soumis aux effets de percolation que l'on calcule de la manière suivante :

$$Perc = S * (1 - [1 + (\frac{4}{9} * \frac{S}{X_1})^4]^{-\frac{1}{4}})$$

Et le niveau du réservoir de production est à nouveau ré-ajusté : $S = S - Perc$

Cette percolation, ajoutée à la précipitation nette qui n'a pas atteint le réservoir de production, $Pr = Perc + (P_n - P_s)$, sont envoyées vers le réservoir de routage. Cette quantité est alors divisée en 2 composantes d'écoulement :

arbitrairement, il est choisi que 90% soient routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage (ce qui correspond à l'écoulement lent) et 10 % par un unique hydrogramme unitaire (ce qui correspond à l'écoulement rapide). Le paramètre X_4 à caler également est le temps de base de l'hydrogramme HU1 (jours). Les ordonnées des hydrogrammes sont définies par :

$$\begin{aligned}UH1(j) &= SH1(j) - SH1(j - 1) \\UH2(j) &= SH2(j) - SH2(j - 1)\end{aligned}$$

Pour $t = 0$, $SH1(t) = 0$ et $SH2(t) = 0$

Pour $0 < t < X_4$, $SH1(t) = (\frac{t}{X_4})^{\frac{5}{2}}$ et $SH2(t) = \frac{1}{2}(\frac{t}{X_4})^{\frac{5}{2}}$

Pour $t > X_4$, $SH1(t) = 1$

Pour $X_4 < t < 2X_4$, $SH2(t) = 1 - \frac{1}{2}(2 - \frac{t}{X_4})^{\frac{5}{2}}$

Pour $t > 2X_4$, $SH2(t) = 1$

Les sorties des hydrogrammes sont ensuite données par :

$$\begin{aligned}Q9(t) &= 0.9 \sum_{i=1}^l UH1(k) Pr(t - k + l) : \text{Écoulement lent} \\Q1(t) &= 0.1 \sum_{i=1}^m UH2(k) Pr(t - k + l) : \text{Écoulement rapide} \\&\text{où } l = \text{int}(X_4) + 1 \text{ et } m = \text{int}(2X_4) + 1\end{aligned}$$

Un échange souterrain est également pris en compte par le modèle et donné par : $F = X_2(\frac{R}{X_3})^{(\frac{7}{2})}$ où R est le niveau dans le réservoir de routage, X_3 sa capacité et X_2 le coefficient d'échange en eau (positif pour les apports, négatif pour les pertes). Le niveau du réservoir de routage devient : $R = \max(0; R + Q9 + F)$. Lorsqu'il se vidange, il libère une quantité Q_r :

$$Q_r = R(1 - [1 + (\frac{R}{X_3})^4]^{-\frac{1}{4}})$$

Et son niveau devient : $R = R - Q_r$

De même, la sortie $Q1$ est soumise à des échanges souterrain et donnera finalement $Q_d = \max(0; Q1 + F)$.

Le débit total est donc donné par : $Q = Q_r + Q_d$.

Il y a donc 4 paramètres à caler pour le modèle qui sont :

- X_1 : capacité du réservoir de production
- X_2 : coefficient d'échanges souterrains
- X_3 : capacité du réservoir de routage
- X_4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire

2.2 Analyse graphique

Pour mener l'étude de l'influence des aménagements forestiers sur le comportement hydrologique des bassins versants, nous avons choisi de comparer ce qu'auraient été les débits du bassin s'il n'avait pas été traité aux débits réellement observés. Nous nous intéressons donc aux résidus annuels et journaliers définis par :

$$\Delta Q_X = Q_{X,observes} - Q_{X,calcules}$$

Où :

- X fait référence au bassin d'étude
- $Q_{X,observes}$ sont les débits réellement observés
- $Q_{X,calcules}$ sont les débits calculés par les modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques, comme vu précédemment, sont calés sur la période où le bassin n'est pas traité et appliqués sur l'ensemble de la période d'étude. De cette manière, le modèle calcule les débits du bassin s'il n'y avait pas eu de traitement. Ainsi, si ΔQ_X est positif cela signifie que les débits réellement observés ($Q_{X,observes}$) sont supérieurs à ce qu'ils auraient du être si le bassin n'avait pas été traité ($Q_{X,calcules}$) : la récolte a généré une augmentation des ressources en eau disponibles. À l'inverse si ΔQ_X est négatif cela correspond à une baisse des ressources en eau disponibles.

Pour présenter les résultats nous allons donc tracer les résidus ΔQ_X annuels et journaliers durant toute la période d'étude : les résidus annuels sont tracés en vert durant la période de calage, en marron durant la récolte

et en rouge suite à la récolte; les résidus journaliers sont tracés en bleu clair; enfin, les données journalières manquantes sont tracées sous forme d'un ligne horizontale bleu clair sous le graphique des résidus. Afin d'avoir un cas d'étude référence, nous allons nous intéresser au bassin d'Hubbard Brook dont les données relativement correctes et abondantes nous semblent particulièrement fiables.

2.3 Le cas du bassin d'Hubbard Brook

La forêt expérimentale d'Hubbard Brook est située aux États-Unis, dans le New Hampshire, à environ 200 km au Nord de Boston (Voir point A sur la Figure 2.3).



FIGURE 2.3 – Localisation du bassin d'Hubbard Brook

Ce site a été mis en place en 1955 dans le but d'étudier les relations entre le couvert forestier et la qualité et les ressources en eau. La qualité des données ainsi que leur disponibilité est très appréciable sur ce secteur ce qui nous a poussés à le choisir comme "témoin". D'autre part, on se situe non loin de notre bassin d'étude situé pour sa part à 50 km au Nord de Québec, ce qui nous permet de penser que les climats sont similaires. Le bassin d'Hubbard Brook est découpé en 9 sous-bassins jaugés comme nous pouvons le voir sur le graphique suivant (Figure 2.4). Nous nous intéressons tout particulièrement aux bassins 2 et 3.

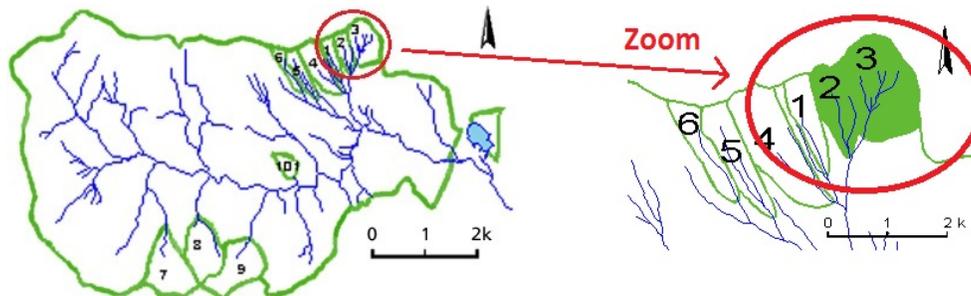


FIGURE 2.4 – Les sous-bassins d'Hubbard Brook
(<http://www.hubbardbrook.org/overview/watersheds.shtml>)

Le bassin 2, de surface 0.156 km², a subi une coupe à blanc en Décembre 1965. Tous les arbres, arbustes et végétaux à bois ont été coupés et laissés sur place. Jusqu'au début de l'année 1969, des herbicides sont appliqués pour éviter toute repousse, puis on a laissé la végétation repartir. Le bassin 3 n'a encore jamais subi de traitement et est donc choisi comme bassin de contrôle pour l'analyse Débit-Débit que nous avons utilisée ici.

Le critère C2M obtenu pour cette étude est de 96.43% traduisant de très bonnes performances du modèle Débit-Débit. Les résultats sont présentés sur la Figure 2.5 de la page suivante.

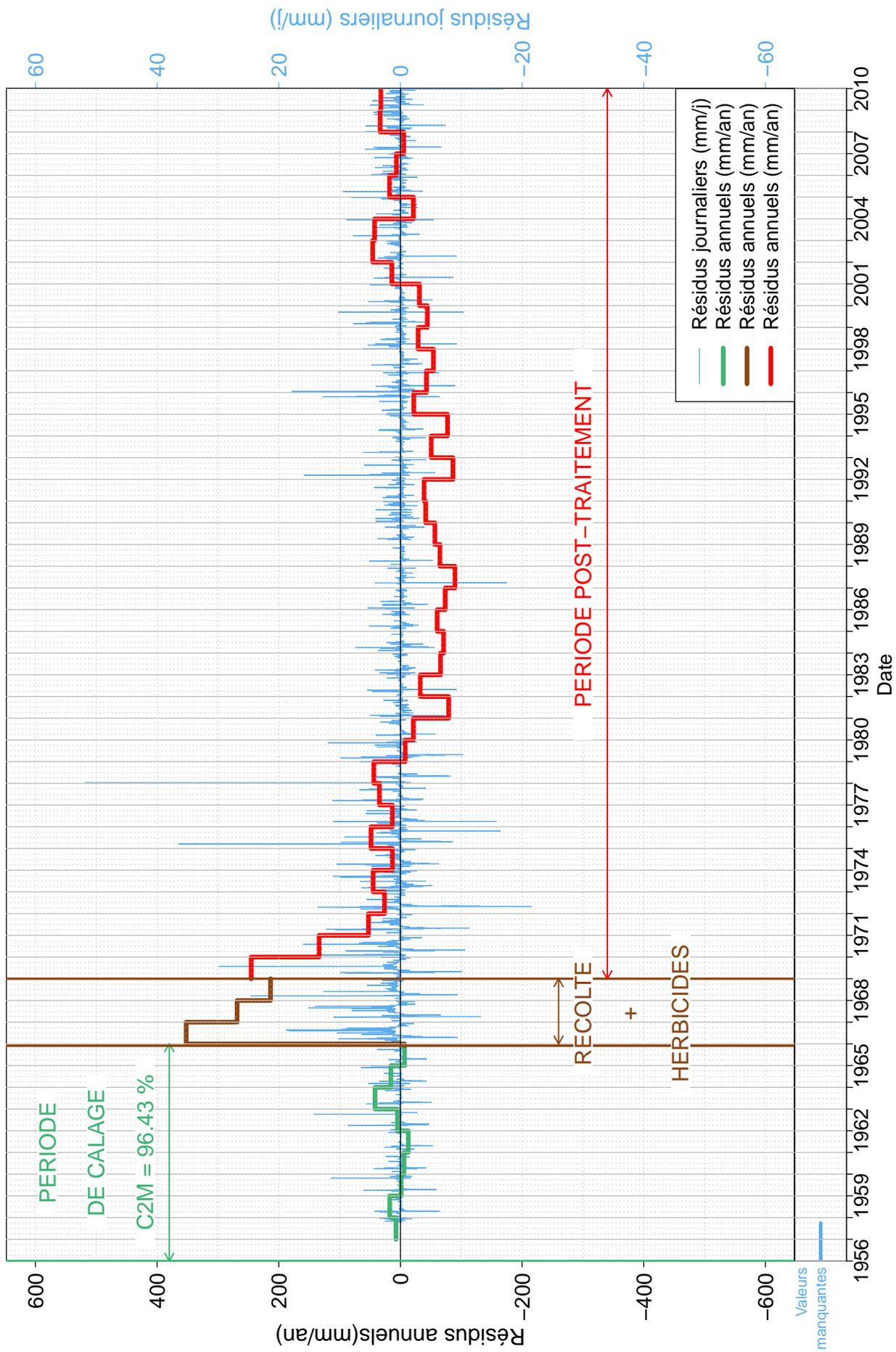


FIGURE 2.5 – Coupe à blanc du bassin de Hubbard Brook 1965-1969 - Analyse : Bassins Appariés

2.3.1 Au pas de temps annuel

Durant la période de calage, les résidus annuels ΔQ_X sont très proches de zéro et cela prouve que notre modèle fonctionne bien : il reproduit bien les débits observés et les écarts à zéro sont simplement liés au bruit. L'effet de la coupe à blanc se fait ressentir dès la première année : on observe une augmentation soudaine et abrupte de ΔQ_X à partir de 1966. Cela indique que les ressources en eau disponibles sont plus importantes que ce qu'elles n'auraient du l'être du fait de la réduction de l'interception et de l'évapotranspiration.

Suite à la récolte, ΔQ_X diminue de façon plus graduelle du fait de la repousse : les ressources en eau disponibles diminuent avec l'augmentation de l'interception et de l'évapotranspiration. ΔQ_X atteint finalement zéro près de 10 ans après la fin du traitement mais le bassin ne semble pas retourner pour autant à son état d'origine. En effet, ΔQ_X devient négatif et on assiste au phénomène Kuczera : la repousse plus jeune et plus dynamique évapotranspire plus que le couvert forestier plus âgé rendant les ressources en eau moins élevées que ce qu'elles étaient avant la récolte.

Finalement, près de 30 ans après la fin de la récolte, ΔQ_X redevient très proche de zéro, prouvant que le bassin est retourné à son état stable d'origine, c'est-à-dire d'avant récolte.

2.3.2 Au pas de temps journalier

Durant la période de calage, il y a de faibles variations des résidus journaliers ΔQ_X qui sont, comme expliqué précédemment, liées au bruit du modèle. Suite à la coupe à blanc, on observe rapidement une apparition plus précoce des débits de fonte au printemps : cela se traduit par un pic positif des résidus journaliers qui arrive juste avant un pic négatif vers les mois de Mars-Avril. ΔQ_X est positif puis directement après négatif : cela traduit le fait que la neige fond plus tôt que prévu s'il n'y avait pas eu de traitement. En effet, le manteau neigeux, sans le couvert forestier, est directement exposé aux rayons solaires et fond donc plus tôt. Cet effet s'estompe avec la repousse et finit par disparaître à peu près 30 ans après la fin du traitement.

En Été et en Automne, il est frappant de voir que le nombre de pics de crues augmente et que le volume d'eau est globalement plus élevé que ce qu'il aurait du l'être : ΔQ_X est largement positif. En effet, la pluie tombe directement au sol ce qui a pour effet d'augmenter le niveau des nappes et les débits de base puisqu'il n'y a pas d'arbres pour absorber les ressources, intercepter ou pour évapotranspirer. L'évapotranspiration réelle est en effet en important déficit durant cette période assez chaude de l'année et cela se ressent dans les volumes d'eau.

Comme constaté avec les résidus annuels, les effets de la coupe relevés ci-avant semblent se résorber et le bassin retrouver son comportement hydrologique d'origine près de 30 ans après la fin de la récolte.

Nous allons maintenant nous intéresser au cas du bassin expérimental du ruisseau des Eaux-Volées au Québec, présenté dans le Chapitre suivant.

Chapitre 3

Le Bassin Expérimental du Ruisseau des Eaux-Volées (BEREV) au Québec

3.1 Présentation du bassin d'étude

3.1.1 Le Bassin Expérimental du Ruisseau des Eaux-Volées (BEREV)

Le bassin expérimental du ruisseau des Eaux-Volées ou BEREV, comme nous l'appellerons par la suite, est situé à 50 km directement au Nord de la ville de Québec, à une latitude de $45^{\circ} 16' 14.5''$, une longitude de $71^{\circ} 08' 13.5''$ et son altitude varie entre 540 m et 950 m. Faisant partie de la forêt Montmorency, forêt expérimentale de l'Université Laval, il recouvre une superficie de 9.3 km². En termes de sol et de la végétation, l'épais podzol ferro-humide permet la pousse de sapin blanc, épinette blanche et bouleau blanc (75% *Abies Balsamea* (L.) Mill., 10% *Betula papyrifera* Marshall, 10% *Picea glauca* (Moench) Voss) (Guillemette, 1999; Lavigne, 2007; Tremblay et al., 2008)

Dans le but de faire de cette parcelle une zone d'étude des relations Hydrologie-Forêts, une série de seuils jaugeurs en V est installée entre les années 1965 et 1971. On dénombre 4 sous-bassins principaux que sont les bassins 5, 6, 7 et 7a, représentés sur la figure ci-après (Figure 3.1, les points rouges représentent les seuils jaugeurs).

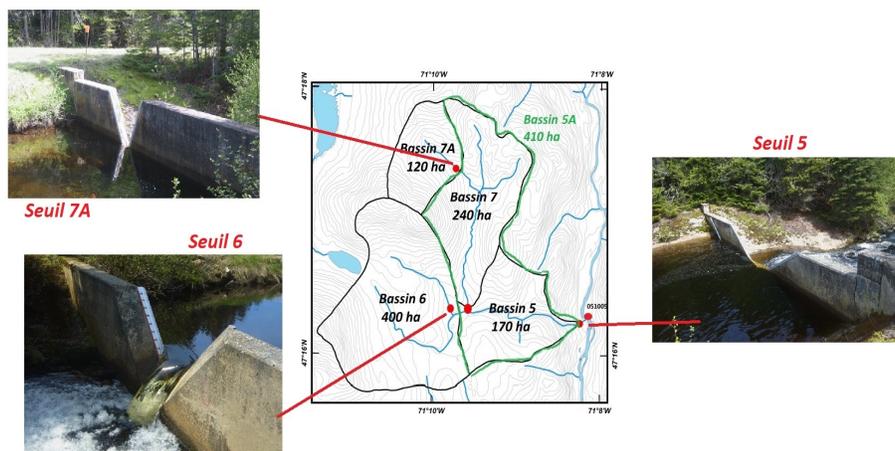


FIGURE 3.1 – Le BEREV et ses seuils de mesure

Une station météorologique située à à peu près 5 km au Nord du BEREV (et appelée station principale) ainsi que les seuils jaugeurs nous fournissent des données depuis l'année 1965 approximativement. Nous regroupons les caractéristiques climatiques de la forêt Montmorency dans le tableau suivant (Tableau 3.1).

Caractéristiques	Unités	Valeur moyenne sur les 30 dernières années (1981-2010)
Température annuelle	° C	0.5
Température en Juillet	° C	14.6
Température en Janvier	° C	-15.9
Précipitation annuelle	mm	1580
Équivalent annuel en eau de la neige	mm	620
Évapotranspiration annuelle	mm	460

TABLE 3.1 – Caractéristiques climatiques de la Forêt Montmorency

Une importante partie du travail, présentée dans les parties 3.2 et 3.3, a été dédiée à la récupération, au tri et à l'analyse de la validité des données météorologiques et hydrométriques. Nous avons également dressé un inventaire, présenté ci-après, des différentes récoltes auxquelles ont été soumis les sous-bassins du BEREV depuis une cinquantaine d'années.

3.1.2 Traitements appliqués aux sous-bassins du BEREV

Les sous-bassins du BEREV ont subi différentes récoltes plus ou moins importantes depuis 1974. La carte suivante (Figure 3.2) illustre ces traitements.

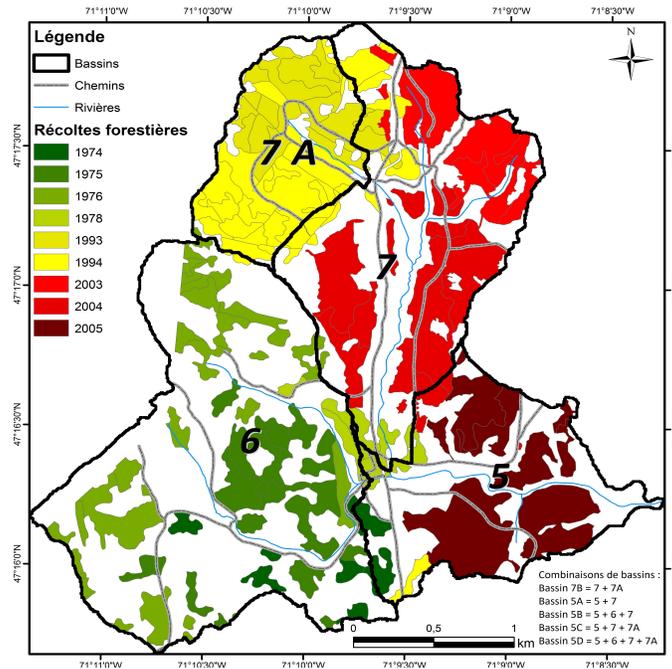


FIGURE 3.2 – Traitements ayant eu lieu sur le BEREV depuis 1965

Chaque sous-bassin a subi une récolte sur une période où les autres bassins n'ont pas été traités. On peut distinguer 3 récoltes principales qui seront l'objet de notre étude :

- Une récolte de faible ampleur (32% de la surface, en vert sur la Figure 3.2) entre 1974 et 1976 sur le bassin 6
- Une récolte massive (85% de la surface, en jaune sur la Figure 3.2) entre 1993 et 1994 sur le bassin 7A
- Une récolte assez importante (45% de la surface, en rouge sur la Figure 3.2) entre 2003 et 2005 sur le bassin 5A (correspondant aux bassins 7 et 5) : cette récolte a commencé au début de l'année 2003 avec 6% de la surface du bassin 5A, elle fut continuée de Octobre 2003 à Avril 2004 sur 18% du bassin et terminée entre Octobre 2004 et Avril 2005 sur 21% supplémentaires de la surface du bassin.

À la suite d'une rencontre avec certains membres du CEHQ (Centre d'Expertise Hydrique du Québec, présenté dans la partie suivante), nous avons appris que les données hydrométriques du bassin 7 sont considérées dans leurs fichiers comme étant "médiocres". En effet, le seuil de mesure a d'abord été construit en poches de ciment qui ont régulièrement fuitées rendant la mesure impossible (Voir Figure 3.3). Bien que entièrement reconstruit il y a quelques années, il arrive encore que le seuil déborde et on sait incertaine l'extrapolation au dessus du niveau maximal du seuil en V. C'est pourquoi nous avons indiqué précédemment avoir choisi d'étudier la récolte de 2003 à 2005 sur le bassin 5A qui correspond à la combinaison des bassins 7 et 5. En effet, cela nous permet de n'avoir jamais à considérer les données du bassin 7 puisque les données du bassin 5A sont obtenues par la différence entre les débits à l'exutoire des bassins 5D, 6 et 7A : $\text{Données}(5A) = \text{Données}(5D) - \text{Données}(6) - \text{Données}(7A)$ (5D correspond au bassin entier : 5+6+7+7A).



FIGURE 3.3 – Le Seuil 7 du BEREV

3.2 Données météorologiques : températures et précipitations

Les données météorologiques utilisées pour cette étude proviennent d'une station située à à peu près 5 km au Nord du BEREV. Cette station est aujourd'hui gérée par le ministère de l'environnement Canadien, Environnement Canada, et est appelée "Station Principale" (Voir Figure 3.4). Nous avons également été amenés à utiliser les données de la Station du Lac Laflamme, également à quelques kilomètres du BEREV, pour des raisons que nous développerons dans les prochains paragraphes.

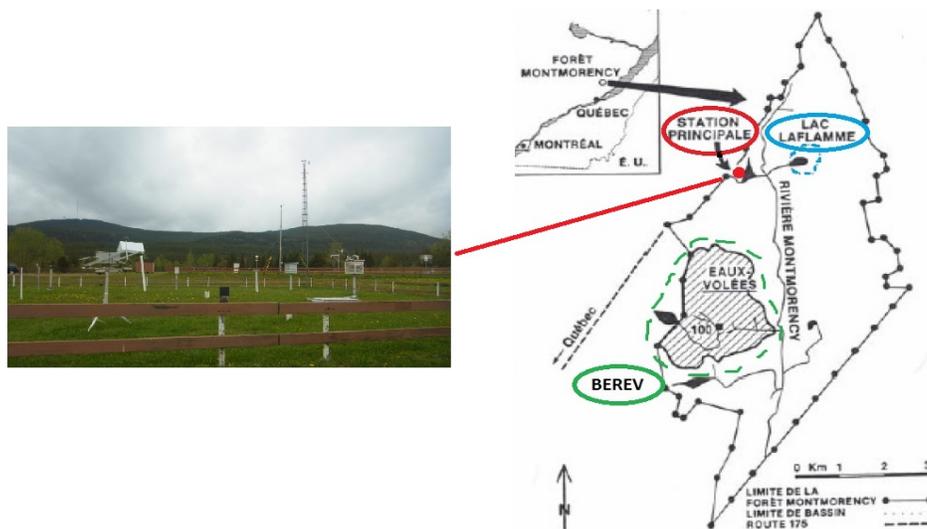


FIGURE 3.4 – Localisation de la Station Principale
(Lavigne, 2007)

Nous avons constaté que les données publiées par Environnement Canada présentent des incohérences temporelles et des manques. Notre motivation principale étant l'utilisation de chroniques de données correctes et cohérentes entre elles, nous avons donc cherché à construire une nouvelle chronique de données météorologiques.

3.2.1 Incohérences constatées

Environnement Canada publie des données météorologiques aux pas de temps journalier depuis 1965, horaire depuis 2003. Les températures sont accessibles aux différents pas de temps; les précipitations, elles, ne sont disponibles qu'au pas de temps journalier.

Il est possible de constater qu'il existe une lacune importante dans les données entre le mois d'Août 2001 et le mois d'Octobre 2003, tant au pas de temps journalier qu'au pas de temps horaire. Un petit état du fonctionnement de la Station Principale s'impose. Le fonctionnement de la station principale a connu un changement radical en 2002 : dans un premier temps était installée une station manuelle gérée par l'Université Laval : un observateur renvoyait des données bi-journalières prises à 8h et à 20h Heure Normale Locale (HNL). À la suite d'une collaboration entre l'Université Laval et Environnement Canada, il fût décidé d'installer en Octobre 2002 une station automatique fournissant des données au pas de temps horaire. Dans l'idée d'évaluer le biais entre les 2 appareils de mesures, la station manuelle continue de fonctionner jusqu'en Septembre 2003.

La période 2001-2003 correspond en fait à une période de chevauchement des prises de mesures. La station automatique n'étant pas clairement identifiée dans les fichiers de gouvernement canadien à cette période, il leur a été impossible de récupérer et publier avec certitude les données horaires renvoyées par elle. Un simple problème d'identification est en fait à l'origine de la lacune dans les données entre 2001 et 2003 publiées par Environnement Canada. Cependant, du fait de l'entente entre l'Université Laval et Environnement Canada, le technicien forestier de l'époque a bien réceptionné et archivé ces données. Nous avons pu avoir la confirmation d'Environnement Canada que rien n'indique un disfonctionnement de l'appareil sur cette période pouvant remettre en doute la validité des données reçues.

Finalement, il existe donc bien des données météorologiques horaires à partir du mois d'Octobre 2002 et nous avons également pu retrouver toutes les données de la station manuelle jusqu'en Septembre 2003 inclus. Le schéma suivant donne un aperçu visuel des données disponibles (Voir Figure 3.5) :

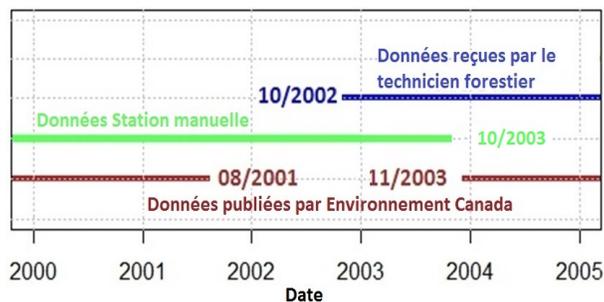


FIGURE 3.5 – Données météorologiques effectivement disponibles

Avant la mise en place de la station automatique, les données météorologiques journalières étaient calculées entre 8h HNL au jour J et 8h HNL au jour J+1 car les mesures étaient prises à 8h HNL et à 20h HNL comme indiqué précédemment. Avec les données horaires de la station automatique, Environnement Canada calcule des données journalières entre 7h heure UTC au jour J et 7h heure UTC au jour J+1, soit 1h HNL au jour J et 1h HNL au jour J+1. Force est de constater qu'il y a une incohérence temporelle dans les données journalières publiées par Environnement Canada : il y a un décalage horaire de 7h à partir de 2003 dans le calcul des données journalières entre la station manuelle et la station automatique, non-négligeable pour l'étude de l'hydrologie d'un si petit bassin. Il semblait donc primordial de récupérer les données horaires de la station automatique afin de recalculer des données journalières de 8h HNL au jour J à 8h HNL au jour J+1 à partir de 2003.

Or, les mesures de précipitations de la station automatique sont faites par un précipitomètre à pesée (Voir Figure 3.6). Ce qui est renvoyé par l'appareil correspond à des cumuls horaires de précipitations auxquels il est nécessaire d'apporter une correction pour 2 raisons principales :

- Il arrive régulièrement que le précipitomètre soit trop plein et qu'il faille effectuer une vidange. Ceci se traduit par une baisse extrêmement brutale des cumuls qui n'est en aucun cas liée à des précipitations négatives.
- Le précipitomètre peut également indiquer des baisses de cumuls de l'ordre de 0.1-0.5 mm qui sont liées à l'évaporation ou à une imprécision de la mesure. De même que précédemment, cela ne traduit absolument pas des précipitations négatives.



FIGURE 3.6 – Précipitomètre à pesée de la Station Principale

Enfin, le modèle Pluie-Débit que nous avons choisi d'appliquer demande d'avoir des chroniques de précipitations et températures complètes. Une seule donnée manquante stoppe le calcul.

Pour ces différentes raisons nous avons choisi de créer notre propre chronique de données météorologiques journalières. Nous avons simplement utilisé les données de la station manuelle jusqu'en Septembre 2003, puis les données de la station automatique au-delà. Pour ces dernières, nous avons appliqué un décalage horaire et une correction avant de compléter les données manquantes restantes.

3.2.2 Correction appliquée aux données de précipitations horaires

Avant toute chose, nous avons appliqué aux données horaires de précipitations cumulées et de températures un décalage horaire de 8h dans le calcul des données journalières pour respecter la cohérence temporelle des données. C'est-à-dire que les données journalières correspondent à la soustraction des cumuls horaires à 7h HNL au jour J+1 et à 8h HNL au jour J pour les précipitations ; à la moyenne entre la température minimale et la maximale détectées entre 8h HNL au jour J et 8h HNL au jour J+1 pour les températures. Nous avons ensuite appliqué une correction aux données de précipitations, inspirée de celle utilisée par Environnement Canada (*Bibeau et al.*, 2000).

Les détails de la correction que nous avons choisi d'appliquer sont développés en Annexe B, mais le fonctionnement global est le suivant. Les données recueillies sont des cumuls de précipitations horaires issus de 2 appareils différents : un pluviomètre à pesée et un pluviomètre à augets basculants (Tipping Bucket) de capacité 0.2 mm. Les données corrigées sont celles du pluviomètre à pesée, le Tipping Bucket servant de contrôle.

L'idée principale de l'algorithme est d'appliquer la correction sur les cumuls journaliers et entre chaque date de vidange. Entre 2 vidanges, on calcule les précipitations cumulées et on considèrera comme données aberrantes donc à corriger, tous les cumuls journaliers qui sont strictement inférieurs au dernier cumul maximum détecté. En effet, cela se traduit par une baisse du cumul, c'est-à-dire des précipitations négatives donc fausses. Toutes les données catégorifiées comme fausses ou non-valides ($V=0$) par l'algorithme sont alors corrigées comme suit :

- Si le dernier cumul valide $cc1$ est supérieur ou égal au prochain cumul valide $cc2$ alors le cumul non-valide ($V=0$) sera égal au dernier cumul valide :

$$Cum(V = 0) = cc1$$

- Si le dernier cumul valide $cc1$ est inférieur ou égal au prochain cumul valide $cc2$ alors une interpolation linéaire entre le dernier et le prochain cumul valide donnera la valeur du cumul non-valide ($V=0$) :

$$Cum(V = 0) = \frac{cc1+cc2}{|i_{cc1}-i_{cc2}|}$$

où $|i_{cc1} - i_{cc2}|$ correspond au nombre de jours entre les cumuls valides. Il doit être inférieur ou égal à 5 jours.

Les précipitations au jour J sont ensuite calculées tout simplement en soustrayant le cumul du jour J et le cumul du jour J-1. Enfin, pour les données estivales (le Tipping Bucket ne fonctionne pas en hiver), on considère que si la précipitation calculée est supérieure à 0.5 mm et que le Tipping Bucket indique une valeur nulle (c'est-à-dire qu'il ne s'est pas déclenché alors qu'il aurait dû le faire 2 fois) alors la précipitation calculée provient d'une erreur de mesure du pluviomètre à pesée et est mise à 0 mm.

3.2.3 Données finales de précipitations et températures utilisées pour l'étude

Nous avons donc à notre disposition des chroniques plus ou moins complètes de données de températures et précipitations. Une seule donnée manquante pouvant être potentiellement source d'erreur, nous avons choisi de compléter nos données de différentes manières.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux données de précipitations et températures provenant d'une station non loin de notre station d'étude : la station du lac Laflamme (en bleue sur la Figure 3.4). Nous avons appliqué une corrélation linéaire entre les données pour calculer les données manquantes de notre station en utilisant les relations suivantes, où y correspond aux données recherchées, x à celles du Lac Laflamme, b1 et b0 aux coefficients de corrélation :

$$b1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$b0 = \bar{y} - b1\bar{x}$$

$$y = b1x + b0$$

- Pour les précipitations, nous obtenons l'équation suivante : $P(\text{notre station})=0.84*P(\text{Lac Laflamme})+0.74$ avec un coefficient de corrélation de 0.85
- Pour les températures, nous obtenons l'équation suivante : $T(\text{notre station})=1.02*T(\text{Lac Laflamme})-0.39$ avec un coefficient de corrélation de 0.98

Suite à ce premier ajout, nous constatons qu'il subsiste des manques pour les données de précipitations (du fait de données également manquantes au Lac Laflamme); les données de températures sont elles maintenant complètes. Nous avons donc complété ensuite avec les données estivales d'un précipitomètre à augets, situé lui aussi au Lac Laflamme.

Enfin, subsistant toujours quelques manques, notamment sur la période hivernale 2003-2004, nous avons choisi de nous baser sur les données publiées par Environnement Canada, gardant en mémoire que la chronique n'est pas entièrement correcte (puisque les données d'Environnement Canada ont un décalage horaire). Cette imperfection reste cependant assez peu limitante pour notre étude puisque nous avons choisi de ne nous intéresser qu'aux données estivales pour la modélisation Pluie-Débit (car le module neige de GR4J n'est pas assez puissant pour ce type de climat, comme indiqué précédemment).

3.3 Données hydrométriques

Il existe plusieurs sources aux données de débits à notre disposition. Celles que nous pouvons considérer comme étant les plus fiables sont celles publiées au pas de temps journalier depuis 1965, instantané depuis 1995, par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ). Le CEHQ est une entité du ministère Québécois du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, en charge de la gestion du régime hydrique du Québec.

Pour l'étude avec la modélisation Débit-Débit nous avons simplement utilisé les données journalières directement publiées par le CEHQ. Pour la modélisation Pluie-Débit, il nous a fallu utiliser un tout autre jeu de données. En effet, les données journalières publiées par le CEHQ sont calculées de minuit à minuit HNL. Comme indiqué précédemment, les données journalières météorologiques sont, elles, calculées de 8h à 8h HNL. Cela correspond donc à un décalage horaire de 8h dans le calcul des données journalières météorologiques et hydrométriques. Il nous a paru assez important de corriger ce décalage car un bassin versant de cette taille peut réagir rapidement à un événement météorologique.

Afin de corriger ce décalage nous avons cherché à retrouver des données hydrométriques horaires pour "recalculer" des données journalières de 8h HNL au jour J à 8h HNL au jour J+1 entre 1965 et 1995 (au-delà nous avons à notre disposition les données instantanées publiées par le CEHQ). Nous savions que peu de personnes avaient à ce jour travaillé sur les données du BEREV. Cependant, *Guillemette* (1999) avait analysé les données estivales du BEREV au pas de temps horaire ce qui nous a permis de récupérer ces données et recalculer des données journalières estivales de débits depuis 1965.

Ces données journalières que nous avons recalculées sont cependant moins précises que celles publiées par le CEHQ car moins abondantes (pas de données hivernales). Là aussi ce manque de précision reste assez peu limitant pour la modélisation Pluie-Débit pour les raisons indiquées plus haut. D'autre part, il était primordial pour nous de respecter la cohérence temporelle que nous nous étions imposée.

Chapitre 4

Évolution du comportement hydrologique du BEREV suite à 3 récoltes forestières

Nous avons étudié les 3 récoltes d'ampleurs variables ayant eu lieu sur les différents sous-bassins du BEREV :

- La récolte partielle du bassin 6 entre 1974 et 1976
- La récolte massive du bassin 7A entre 1993 et 1994
- La récolte importante du bassin 5A (combinaison des bassins 5 et 7) entre 2003 et 2005

Pour chacune de ces récoltes nous analysons l'amplitude et la tendance des résidus (différence entre débits observés et débits calculés par les modèles) au pas de temps annuel et journalier. Nous nous intéressons aux effets des récoltes tant sur les volumes d'eau annuels et saisonniers que sur la dynamique du bassin.

4.1 Récolte partielle du bassin 6 entre 1974-1976

Le bassin 6 a subi une récolte partielle entre le début de l'été 1974 et la fin de l'année 1976. Nous avons choisi d'utiliser le bassin 7A comme bassin de contrôle pour l'analyse Débit-Débit car il n'a été traité qu'à partir de l'année 1993 et est donc stable sur la période concernée ici. Nous calons les paramètres de nos modèles entre le 1^{er} Janvier 1967 et le 31 Mai 1974 (Voir résumé de l'étude dans le Tableau 4.1 ci-après).

Bassin traité : Bassin 6 - Bassin de contrôle : Bassin 7A		
Période de traitement	Période de calage des modèles	Période de calcul
01/06/1974 - 31/12/1976	01/01/1967 - 31/05/1974	01/01/1967 - 31/12/1992
Pourcentage de coupe : 32 %		

TABLE 4.1 – Récolte 1974-1976

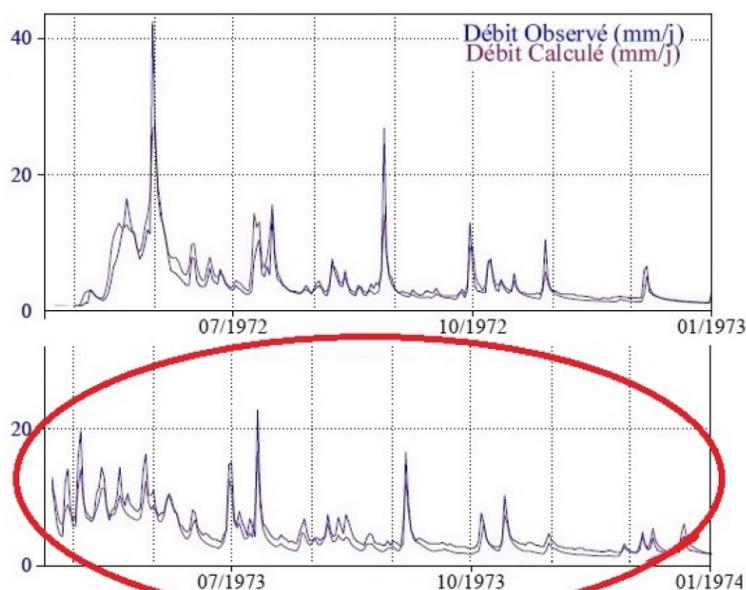


FIGURE 4.1 – Hydrogramme du bassin 6 en 1972-1973

si nous observons et comparons les débits annuels des bassins 6, 7A et 5 (Voir Figure 4.2 ci-après), il est notable que durant l'année hydrologique 1972-1973, les débits du bassin 6 sont plus importants que les autres années. On

Nous avons d'abord observé les hydrogrammes des débits calculés et des débits observés (Voir Figure 4.1 ci-contre) et nous avons été frappés par le comportement du bassin 6 durant l'année 1973. En effet, les débits observés sont très élevés en comparaison aux débits calculés alors que nous sommes en période d'optimisation. D'autre part la différence observée n'est pas si importante les autres années de calage comme en 1972 par exemple (Voir Figure 4.1 ci-contre). Cette observation correspond en fait à ce que l'on s'attend à voir suite à la coupe : une augmentation des débits. Or l'année 1973 est l'année qui précède la première récolte : il ne peut donc en aucun cas s'agir d'un effet de coupe.

Guillemette (1999) ayant travaillé sur cette coupe, nous avons retrouvé des informations pertinentes à ce sujet dans ses travaux. En effet,

peut voir aussi que les débits du bassin 7A durant l'année hydrologique 1972-1973 sont eux relativement faibles par rapport aux autres années.

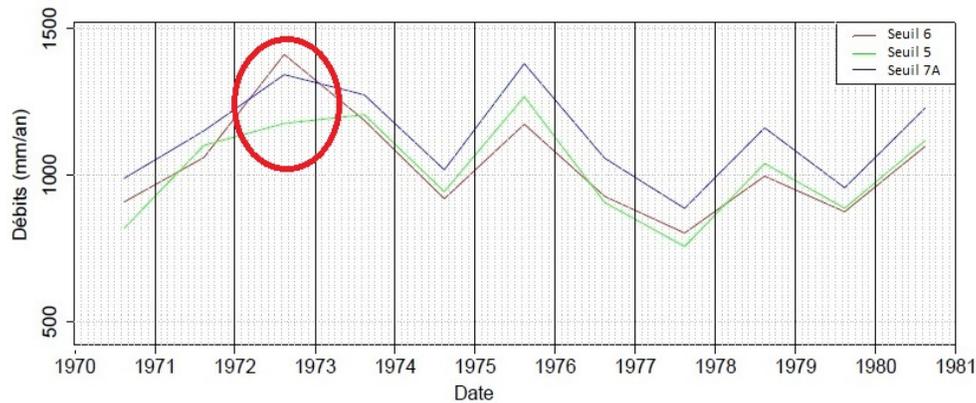


FIGURE 4.2 – Débits annuels (mm/an) des bassins 6, 7A et 5

Selon *Guillemette* (1999), les ressources en eau du sol du bassin 7A étaient plus faibles cette année-là ce qui expliquerait cette baisse d'écoulement. Quand au bassin 6, d'après *Rochette* (1971), il arrive que le Lac Hupé, situé à quelques kilomètres à l'Ouest du bassin 6, s'y déverse à l'occasion de la construction de barrages de castors. *Guillemette* (1999) affirme "Un barrage de castor sur ce dernier [Le Lac Hupé] a été détruit en juillet 1971. Il a probablement été reconstruit en 1972, puis détruit vers 1973 ou 1974 lors des coupes dans le secteur". Une autre explication plausible serait le dysfonctionnement des appareils de mesure cette année-là, mais cela n'a pu être confirmé.

Pour ces raisons, nous avons choisi d'éliminer les années 1973 et 1974 de nos calculs et nous réalisons finalement l'étude suivante (Voir Tableau 4.2 pour résumé) :

Période de traitement	Période de calage des modèles	Période de calcul
01/06/1974 - 31/12/1976	01/01/1967 - 31/12/1972	01/01/1967 - 31/12/1992

TABLE 4.2 – Récolte 1974-1976 - Nouvelle étude

Nous calons donc nos paramètres entre le 1^{er} Janvier 1967 et le 31 Décembre 1972 et nous observons les valeurs des critères C2M obtenues avec les 2 modèles :

- Modèle Débit-Débit : C2M = 89.88 %
- Modèle Pluie-Débit : C2M = 34.53 %

Il est notable que le critère C2M obtenu avec le modèle Débit-Débit est bien meilleur que celui obtenu avec le modèle Pluie-Débit. Cette constatation est assez logique puisque le premier modèle n'utilise que les données hydrométriques et les calculs effectués sont bien moins lourds que ceux utilisés dans la modélisation Pluie-Débit. De plus, comme indiqué par *Andréassian et al.* (2012), le modèle Débit-Débit donne en moyenne de meilleurs résultats que le modèle Pluie-Débit. Nous observerons toujours ce résultat dans les prochains calculs.

Cependant, le critère C2M obtenu avec la modélisation Pluie-Débit, hors comparaison avec le modèle Débit-Débit, est toutefois assez faible. On peut accorder cette observation au manque de données dans les premières années de fonctionnement du BEREV.

On peut donc s'intéresser maintenant à voir les effets de la récolte forestière. Pour ce faire, nous allons d'abord observer l'évolution des résidus annuels et journaliers obtenus avec chacun des modèles (Voir Figure 4.3 et Figure 4.4). Pour le modèle Débit-Débit, nous allons également observer les cumuls saisonniers (Voir Figure 4.5) pour mesurer l'évolution de la contribution aux débits annuels par saison. L'idée est de voir si les modifications observées varient suivant les saisons et sont par exemple plus fortes en crues ou en étiages. On définira donc les saisons suivantes :

- Printemps : du 01/04 au 15/06
- Été-Automne : du 16/06 au 30/11
- Hiver : du 01/12 au 31/03

Nous appliquons également cette analyse au modèle Pluie-Débit (Figure 4.6) en ne considérant cette fois qu'une seule saison, du 01/06 au 31/10, puisque nous ne nous intéressons qu'aux données estivales pour les raisons évoquées dans les chapitres précédents.

4.1.1 Évolution de la dynamique du bassin

Les graphes des pages suivantes (Figure 4.3 et Figure 4.4) nous permettent d'affirmer dans un premier temps que les 2 modèles choisis donnent des informations tout à fait concordantes. En effet, la dynamique observée est la même : le calage est assez bon puisque les résidus ΔQ_X sont proches de zéro et cela traduit le bon fonctionnement de nos modèles. Puis, en période post-traitement (après la récolte), on ne détecte pas d'augmentation des résidus qui aurait du traduire une augmentation des ressources disponibles comme vu avec le cas du bassin d'Hubbard Brook. À l'inverse, on peut voir une chute de ΔQ_X traduisant le fait que les débits observés sont plus faibles que ce qu'ils auraient du être sans traitement. Finalement, on ne ressent clairement pas l'effet de la coupe, mais on semble voir l'effet de la repousse : la repousse jeune et en pleine croissance est bien plus gourmande en eau que le couvert forestier plus âgé, ce qui explique pourquoi nous observons des résidus ΔQ_X négatifs.

En termes de dynamique saisonnière, on peut observer que suite à la récolte, pour les résidus journaliers, des pics positifs apparaissent précédant toujours des pics négatifs autour des mois de Mars et Avril. Cette observation est beaucoup plus visible avec la modélisation Débit-Débit. En fait, les débits observés au moment de la fonte sont plus importants que ceux calculés puis très rapidement après c'est l'inverse qui apparaît. Cela témoigne d'une fonte des neiges plus en avance sur un bassin récolté qui génère une arrivée plus précoce des débits de pointe. Il est difficile d'observer ceci avec la modélisation Pluie-Débit puisqu'on ne considère les données qu'à compter du 1^{er} Juin et la fonte réellement observée apparaît plus tôt.

Le couvert forestier fait office de protection du manteau neigeux contre les rayons solaires : un sol nu est plus exposé et fond donc plus tôt et plus rapidement. Le sol du bassin récolté est donc plus exposé aux rayons ce qui favorise le ruissellement et génère des débits de pointe liés à la fonte plus précoces.

En termes de quantité d'eau, il est possible d'observer, certaines années, des volumes de crues plus importants en observation qu'en calcul. Par exemple, en 1978, 1979 ou encore 1982, sur les résidus journaliers, on observe qu'en valeur absolue les pics positifs sont plus élevés que les pics négatifs. Là encore, il est difficile d'observer ce phénomène avec la modélisation Pluie-Débit pour les raisons évoquées à l'instant. D'autre part, les machines utilisées pour la récolte peuvent avoir laissé des traces et ornières et un sol nu gèle plus facilement car il est plus exposé au froid. Or, il y a moins d'infiltration sur les sols gelés et sur les ornières, ce qui se traduit par une augmentation du ruissellement. De plus et comme évoqué au premier chapitre, il y a réduction de l'évapotranspiration réelle et de l'absorption suite à la récolte ce qui se traduit par une augmentation des ressources disponibles et donc du ruissellement.

On peut donc penser que les effets de cette récolte ne se font pas ressentir sur les cumuls annuels, bien au contraire, ce sont plutôt les effets de la repousse que l'on observe. Cependant, en termes de variations saisonnières, il est assez net que la neige fond plus tôt et en plus gros volume sur le bassin traité.

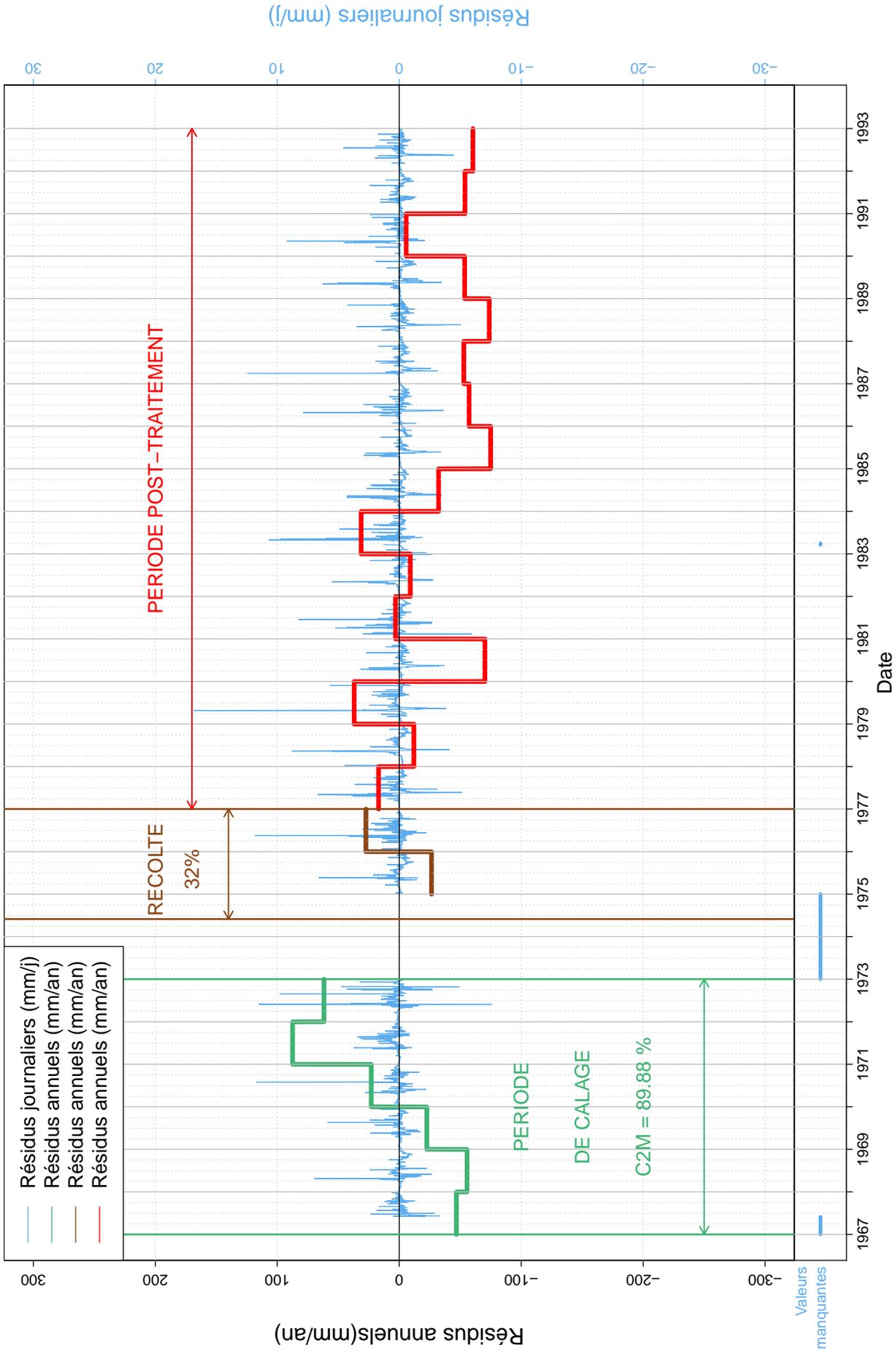


FIGURE 4.3 – Récolte partielle 1973-1975 - Analyse : Bassins Appariés

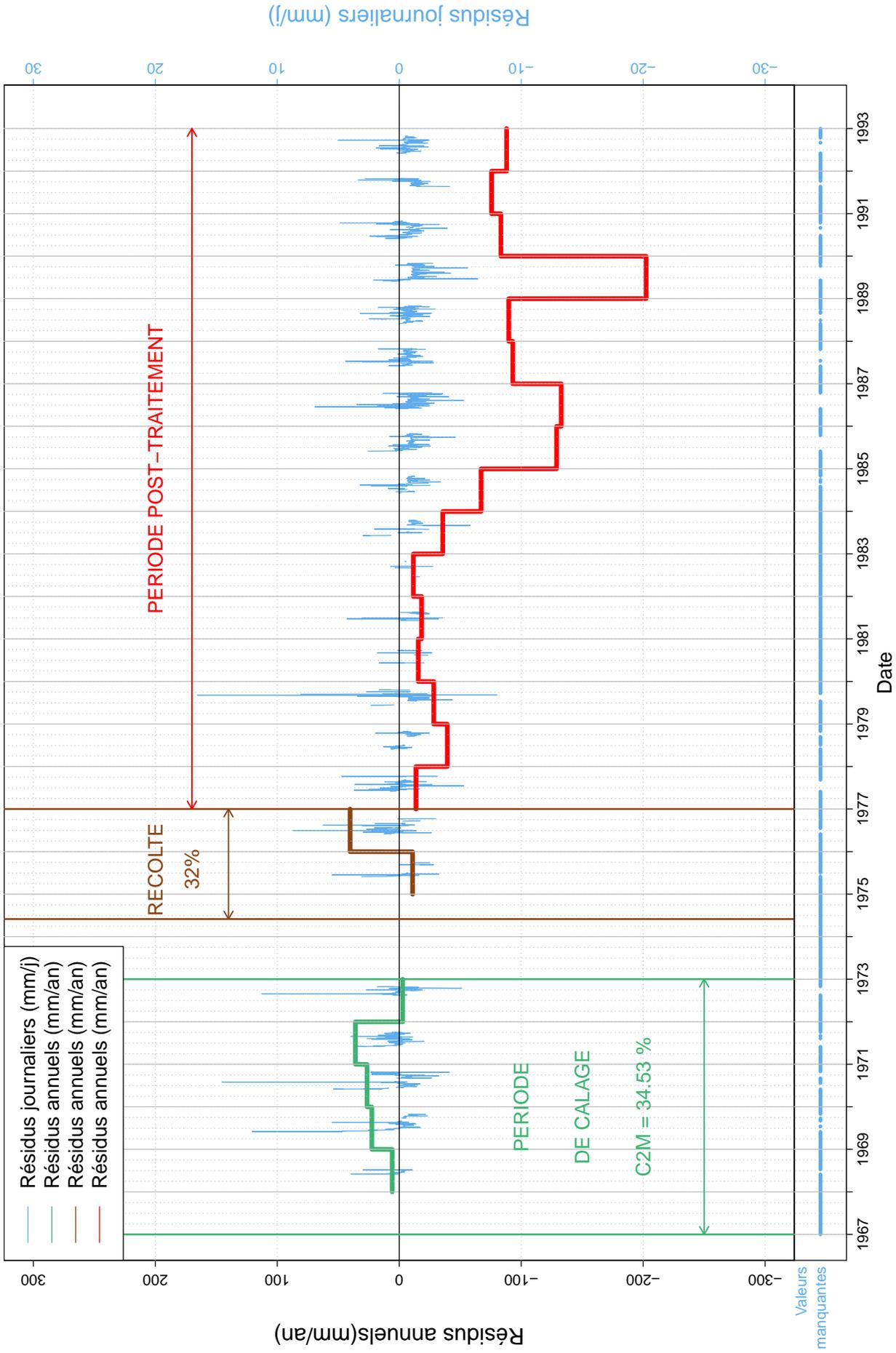


FIGURE 4.4 – Récolte partielle 1973-1975 - Analyse : GR4J

4.1.2 Cumuls Saisonniers

Comme indiqué précédemment, on s'intéresse dans cette partie aux cumuls annuels saisonniers calculés par nos modèles et ceux réellement observés. Dans les graphes qui suivent (Figure 4.5 et Figure 4.6) on peut distinguer plusieurs informations. D'une part les diagrammes en bâtons qui représentent les cumuls annuels saisonniers observés (en rouge) et calculés (en bleu) ; d'autre part la différence en pourcentage pondérée par le nombre de jours disponibles (indiqué sous les bâtons du diagramme) entre ces cumuls ainsi que la moyenne de ces différences en période pré-traitement et post-traitement. Ces pourcentages sont calculés comme suit :

$$\text{Différence(\%)} = \frac{\text{Cumuls observés} - \text{Cumuls calculés}}{\text{Cumuls calculés}} * \frac{\text{Nombre de données disponibles}}{\text{Nombre de données totales sur la saison}} * 100$$

Ainsi, si la différence est positive, cela signifie que les débits observés sont plus élevés que les débits calculés par nos modèles et vice-versa si la différence est négative.

Modèle Débit-Débit

Au printemps, on peut constater qu'avant la récolte les débits calculés sont légèrement sur-estimés puisque la moyenne des variations pré-traitement est négative. Suite à la coupe, en période post-traitement, on détecte des débits observés globalement plus importants que ceux calculés (Moyenne post-traitement positive). Ce résultat n'est pas franc mais on peut penser qu'il s'agit d'un effet de la récolte : les débits de crues suite à la récolte sont plus importants qu'ils n'auraient du l'être sans récolte.

On observe des résultats tout à fait opposés pour les saisons Été-Automne et Hiver. En effet, en période de calage les débits calculés sont cette fois légèrement sous-estimés et suite à la récolte on observe des débits plus faibles qu'ils n'auraient du l'être, comme nous l'avions détecté avec les graphiques précédents.

Modèle Pluie-Débit

Avec cette analyse, le pourcentage de différence est plus élevé qu'avec l'autre analyse en période pré-traitement : les débits calculés sont assez sur-estimés en période de calage ce qui explique cette faible valeur de critère C2M. Suite à la récolte, on calcule des débits beaucoup plus élevés que ceux réellement observés.

4.1.3 Conclusions

Les 2 analyses montrent des résultats assez concordants : le calage des modèles est assez correct même si le modèle Pluie-Débit ne donne pas des résultats entièrement satisfaisants. Suite à la récolte, les 2 modèles montrent une chute des résidus annuels traduisant le fait que la récolte ne se fait pas ressentir mais que c'est à l'inverse la repousse dont on observe les effets. En termes de dynamique saisonnière cependant, il est possible d'observer les effets de la récolte : en effet, la fonte apparaît plus tôt quand il y a eu récolte du couvert forestier car le manteau neigeux est plus exposé aux rayons solaires.

En termes de quantité d'eau, il y a clairement une modification du comportement hydrologique du bassin 6 suite à la récolte : les débits annuels observés sont globalement plus faibles que ce qu'ils auraient du l'être s'il n'y avait pas eu de récolte. On semble là aussi observer un effet de la repousse mais pas de la coupe ce qui est étonnant mais pourtant pas inédit : en effet, *Plamondon et Ouellet* (1980) avaient noté que les débits annuels et saisonniers n'avaient pas été particulièrement affectés par la récolte. D'autre part, il est souvent écrit dans la littérature qu'une récolte de moins de 50% de la surface du bassin n'a pas d'effets notables or le bassin 6 a été récolté sur seulement 32% de sa surface. Cependant, *Plamondon et Ouellet* (1980) ont également relevé qu'il n'y avait pas de changements pendant la période de fonte alors que nous avons plutôt observé une légère augmentation des débits. Cela est assez étonnant, d'autant plus que leur étude date de 1980 : si nous observons seulement les années 1977, 1978 et 1979 qui font suite à la récolte (comme ils ont du le faire), on note cette fois une moyenne des différences entre débits observés et calculés au printemps de 11.3%, ce qui représente une hausse assez importante des débits de pointe. Peut être n'ont-ils pas considéré les mêmes périodes que nous comme étant des périodes de fonte de neige. En effet, nous avons noté que les débits hivernaux sont plus faibles que ce qu'ils auraient du l'être sans récolte. L'hiver étant plus long que la période de crue, la moyenne annuelle apparaît donc plus faible en observation qu'en calcul.

Finalement, la récolte ne semble pas avoir eu de gros effets sur le comportement annuel du bassin. On observe une légère augmentation des pics de crues et une fonte des neiges plus rapide mais l'effet de la repousse apparaît plus notable. Cette constatation est peut-être liée à la faible surface de récolte ce qui rend d'autant plus intéressante l'étude de la récolte massive de 85% du bassin 7A.

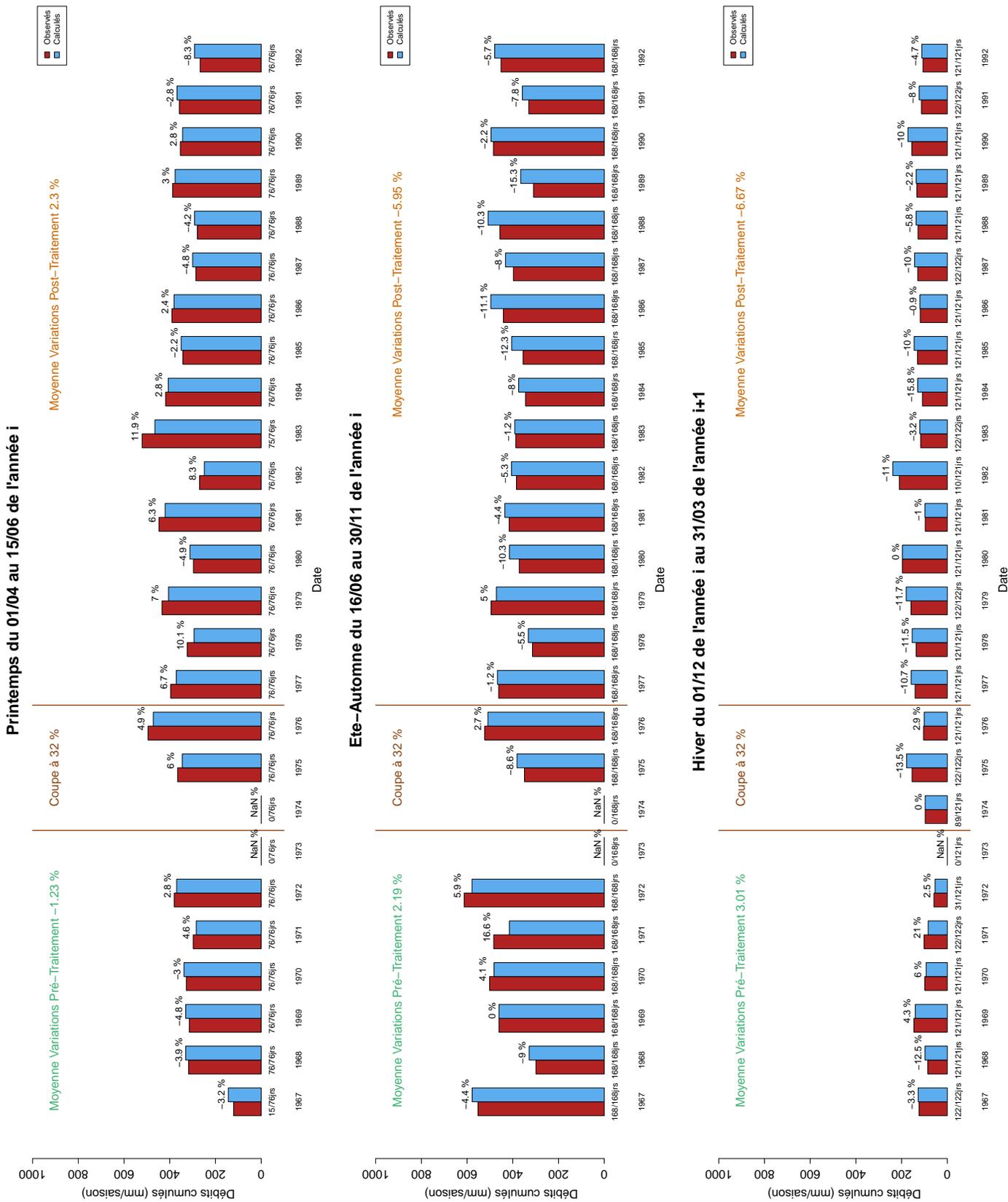


FIGURE 4.5 – Analyse Saisonnière de la récolte partielle 1973-1975 - Analyse : Bassins Appariés

Périodes estivales du 01/06 au 31/10 de l'année i

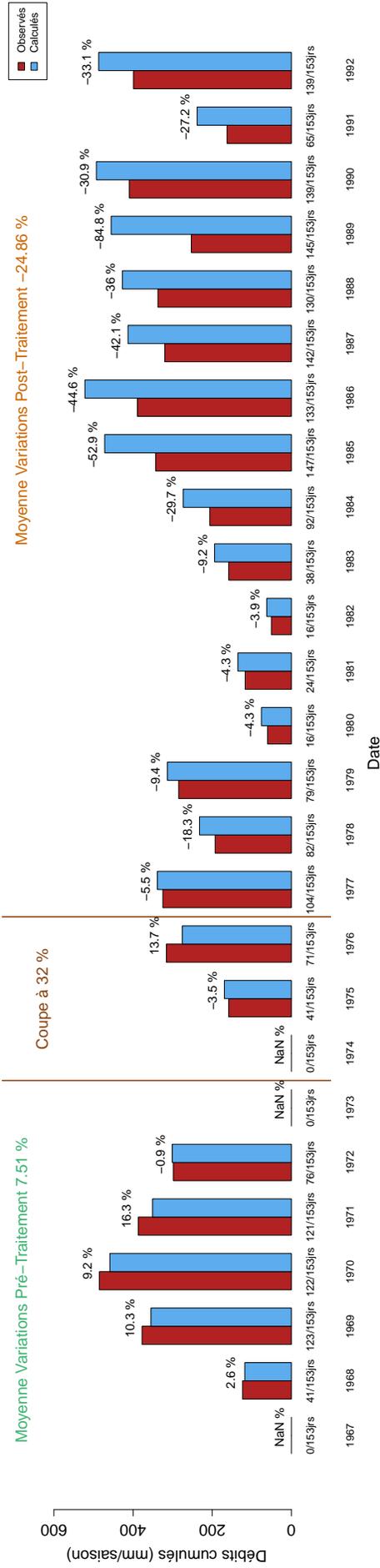


FIGURE 4.6 – Analyse Saisonnière de la récolte partielle 1973-1975 - Analyse : GR4J

4.2 Récolte massive du bassin 7A entre 1993-1994

Suite à la récolte de 1974-1976, le bassin 6 est laissé entièrement à la repousse et ne sera plus jamais exploité. On le choisit donc comme bassin de contrôle (pour l'analyse Débit-Débit) pour l'étude de la récolte massive qui a eu lieu sur le bassin 7A entre 1993 et 1994. Nous avons considéré que les effets de la récolte partielle de 1974-1976 ne se faisaient plus sentir sur le bassin 6 et qu'il était donc suffisamment stable pour faire office de bassin témoin. Le tableau suivant (Tableau 4.3) regroupe les informations sur l'étude qui a été menée.

Bassin traité : Bassin 7A - Bassin de contrôle : Bassin 6		
Période de traitement	Période de calage des modèles	Période de calcul
01/06/1993 - 30/09/1994	01/01/1985 - 01/06/1993	01/01/1985 - 31/12/2012
Pourcentage de coupe : 86 %		

TABLE 4.3 – Récolte 1993-1994

Les critères C2M obtenus avec chacun des modèles sont les suivants :

– Modèle Débit-Débit : C2M = 88.98 %

– Modèle Pluie-Débit : C2M = 71.64 %

Comme indiqué dans l'étude précédente, le critère C2M de la modélisation Débit-Débit est évidemment meilleur que celui de la modélisation Pluie-Débit. Cependant, le critère C2M obtenu en modélisation Pluie-Débit est cette fois bien meilleur.

4.2.1 Évolution de la dynamique du bassin

Cette fois, les 2 modèles ne donnent pas des résultats tout à fait similaires (Voir Figure 4.8 et Figure 4.9). Bien que ΔQ_X soit faible en période de calage pour chaque modèle, indiquant un bon fonctionnement des modèles, les effets de la récolte sont plus perceptibles avec le modèle Débit-Débit qu'avec le modèle Pluie-Débit. En effet, ΔQ_X est nettement positif suite à la récolte avec le premier modèle, mais ce n'est pas vraiment le cas avec le second modèle. Cette différence vient très probablement du nombre relativement important de données manquantes dans la chronique utilisée pour la modélisation Pluie-Débit. Les résultats obtenus avec ce modèle sont donc peu exploitables de ce fait mais, avec le modèle Débit-Débit, il est possible de faire les constats suivants.

Concernant la dynamique, on retrouve les mêmes effets que ceux cités précédemment : les résidus journaliers nous indiquent que la neige fond plus tôt et que les débits de fonte sont, de manière générale, plus élevés suite à la récolte. On se doit de constater que le nombre de données manquantes est très important au début de la période post-traitement et en période de crue. Par exemple, comme on peut le voir sur le zoom ci-contre (Figure 4.7), en 1998, il nous est impossible de détecter le pic de crue. De même en 1999, on suppose que le pic de crue est arrivé plus tôt (ce qui aurait du être visible par un pic positif suivi d'un pic négatif) mais il nous est impossible de le distinguer. Il est donc assez difficile de voir une augmentation ou une diminution des débits directement après la récolte.

Cependant, à partir de l'année 2000, il semble que les données manquantes ne soient que les données hivernales. On peut en fait observer la fin des effets de la récolte et le début des effets de la repousse. En effet, ΔQ_X est largement positif jusqu'en 2003 où la tendance s'inverse : ΔQ_X devient négatif. Cette tendance s'inverse de manière brutale du fait des données manquantes en tout début de fonte au printemps 2003 : on ne perçoit pas le pic de crue réellement observé mais seulement celui calculé qui est en décalage temporel. Puis ΔQ_X reste négatif mais ré-augmente en se rapprochant de zéro à partir de 2006 traduisant le fait que le bassin semble retrouver sa stabilité initiale à partir de 2010. Nous ne pouvons faire un tel constat avec le modèle Pluie-Débit qui semble indiquer un "emballement" du bassin qui ne retrouve pas sa stabilité initiale : ΔQ_X reste nettement positif.

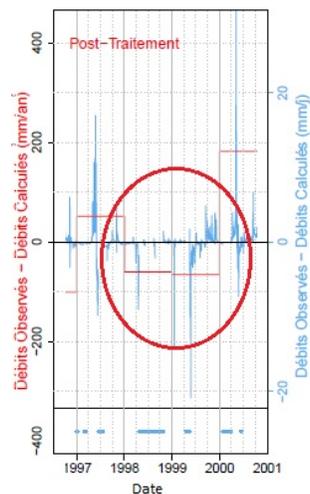


FIGURE 4.7 – Données manquantes en 1998 et 1999

Nous allons maintenant nous intéresser, tout comme pour l'étude précédente, aux données saisonnières.

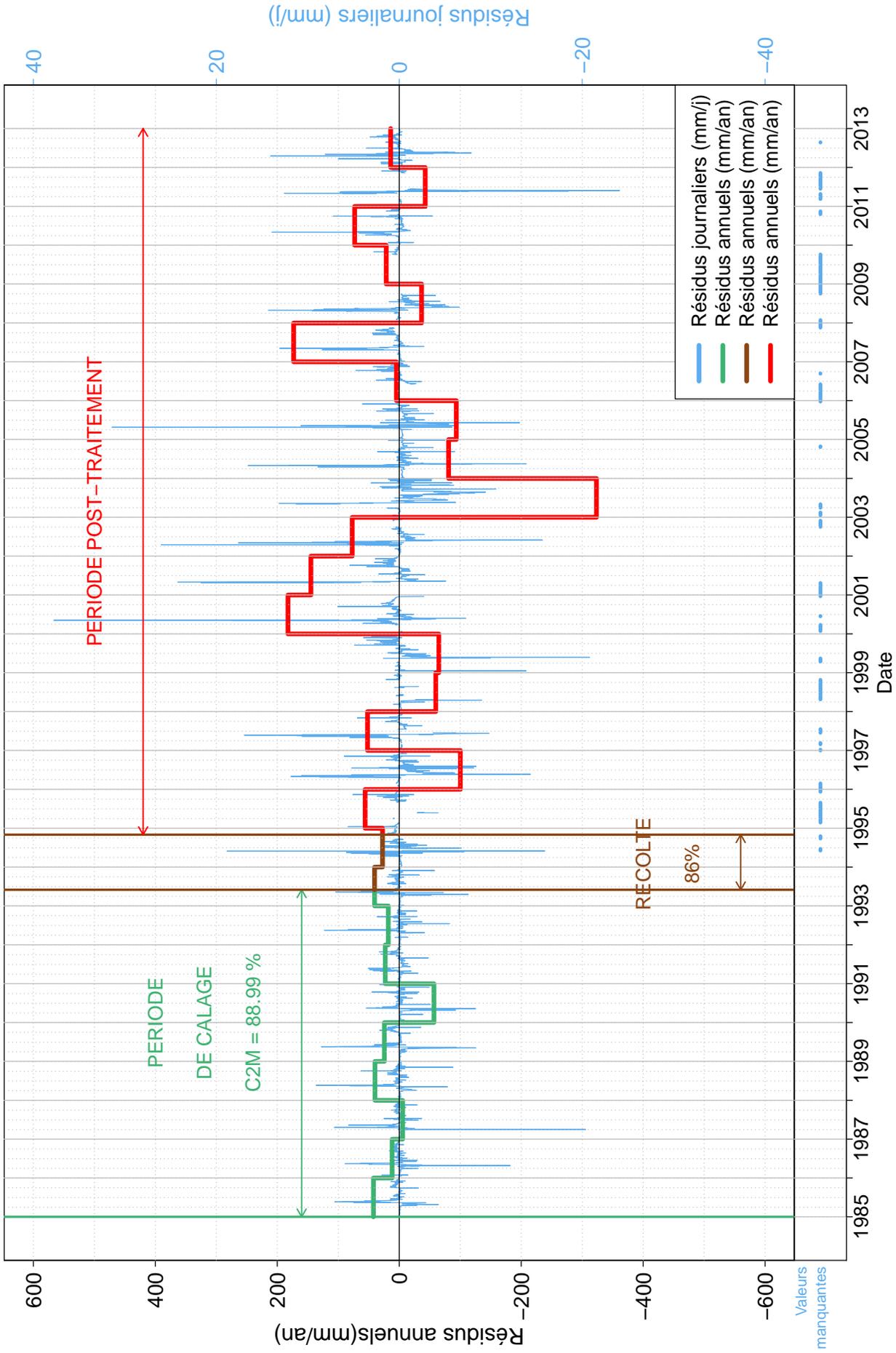


FIGURE 4.8 – Récolte massive 1993-1994 - Analyse : Bassins Appariés

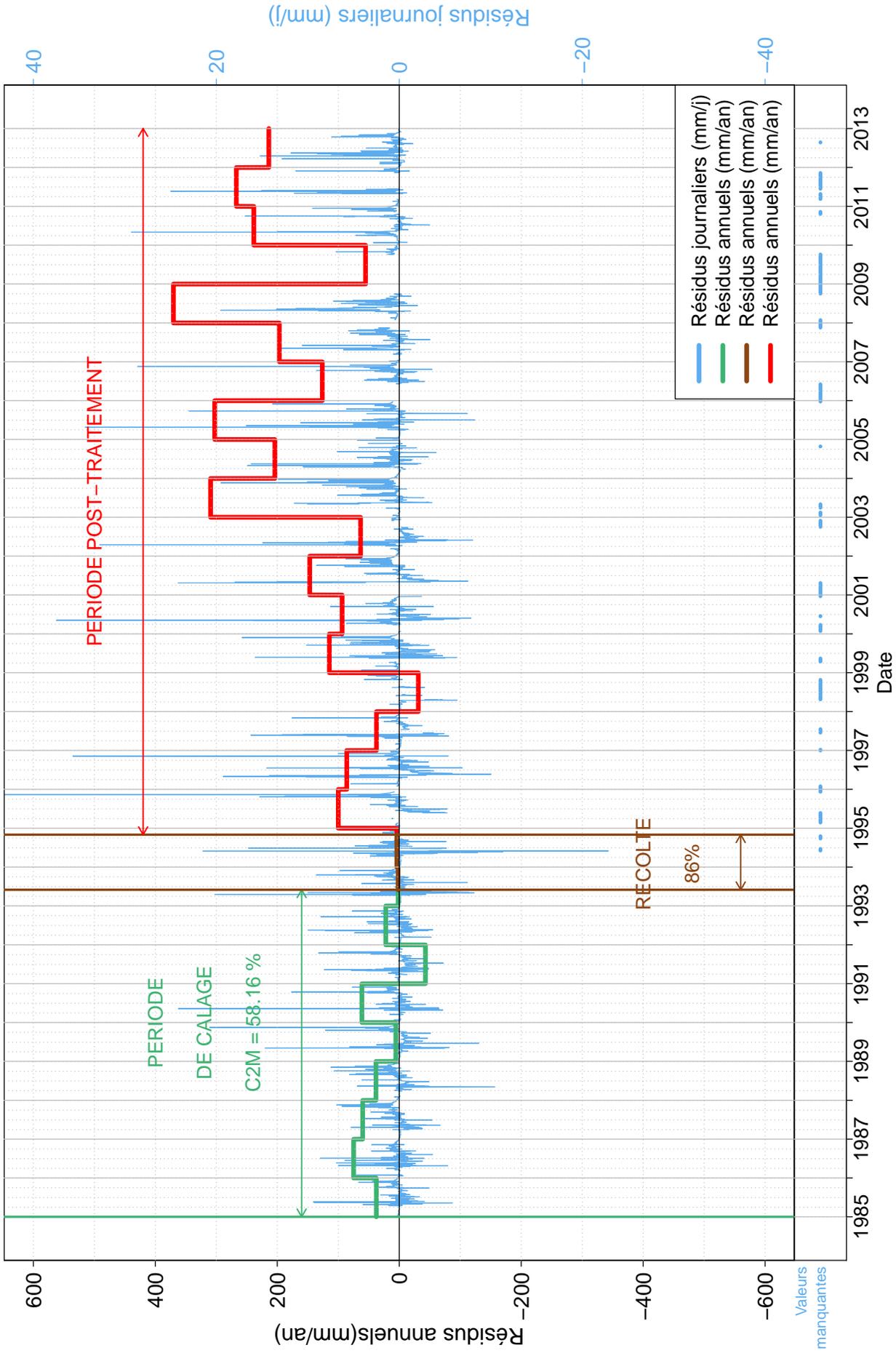


FIGURE 4.9 – Récolte massive 1993-1994 - Analyse : GR4J

4.2.2 Cumuls Saisonniers

Modèle Débit-Débit

Il est assez net qu'il y a une augmentation des débits observés au printemps suite à la récolte puisque la moyenne des différences est plus élevée qu'en période post-traitement (Figure 4.10). On détecte très clairement le problème des données manquantes évoqué précédemment, notamment pour les années 1995, 1998, 2006 et 2009 (les bâtons du diagramme sont très faibles). À partir de l'année 2000, on constate que les débits observés sont nettement supérieurs aux débits calculés et que cette différence s'atténue progressivement à partir de l'année 2004 avec quelques exceptions en 2007 et 2010.

En Été-Automne, on observe plutôt le comportement inverse : les débits observés sont moins élevés que les débits calculés. Le sol, nu, est plus exposé à la chaleur et la pluie qui y tombe s'y infiltre directement augmentant le niveau des nappes et générant une baisse du ruissellement.

En Hiver, en période post-traitement les débits calculés sont particulièrement sur-estimés. Cette sur-estimation chute après la récolte ce qui nous laisse penser que les débits observés ont augmenté. En effet, considérant que le sol nu est maintenant gorgé d'eau la pluie s'y infiltre moins augmentant le ruissellement, du moins, au début de l'Hiver.

Modèle Pluie-Débit

La modélisation Pluie-Débit (Voir Figure 4.11) montre, en pré-traitement, des débits observés en moyenne plus élevés que les débits calculés. Ce n'est pas si net si on s'attarde sur l'analyse année par année : en effet, il n'y a pas de tendance bien définie et on pourrait penser par exemple que la récolte se fait sentir en 2007 et 2008 avec plus de 25 % de différence. Or le modèle Débit-Débit semble montrer qu'à partir de l'année 2004 c'est la repousse qui prend le dessus. On voit ici nettement la contradiction entre les 2 modèles.

4.2.3 Conclusions

Cette étude a permis de mettre en évidence le problème du manque de données. Il est de ce fait très difficile d'exploiter les résultats de la modélisation Pluie-Débit qui pourrait nous laisser croire que la récolte n'a eu aucun effet sur le comportement du bassin. En conséquence, nous présentons ici les résultats de la modélisation Débit-Débit.

Cette étude de la récolte massive du bassin 7A a permis de mettre en évidence plusieurs points significatifs. Tout d'abord, nous avons pu observer une modification très nette de la dynamique du bassin : la neige fond plus tôt et les volumes de fonte sont plus importants suite à la récolte que ce qu'ils auraient du l'être sans coupe. De même que pour l'étude précédente, cette fonte plus précoce est liée à la plus grande exposition du manteau neigeux sur le bassin traité aux rayons solaires. Concernant les volumes, on peut considérer que sur un sol nu la neige et la pluie ne sont pas partiellement interceptées par le couvert forestier et vont directement au sol ; il y a, d'autre part, réduction de l'évapotranspiration donc augmentation des ressources.

Nous avons également noté qu'il y a augmentation des volumes au Printemps et en Hiver ; mais pas en Été-Automne. En effet, en Été-Automne, les précipitations tombent directement sur le sol nu et sec (car directement exposé aux rayons solaires). Or, il n'y a plus d'arbres pour pomper les ressources en eau et l'absorption par les racines est limitée suite à la récolte. La combinaison de ces 2 effets a pour conséquence d'élever le niveau des nappes phréatiques. Il y a donc plus d'infiltration en Été-Automne et à la fin de l'été le sol est donc plus gorgé en eau. Les précipitations du début de l'Hiver ruissellent donc directement ce qui peut expliquer que nous constatons une augmentation des volumes en Hiver.

La repousse commence à se faire sentir dès l'année 2003 où, suite à une inversion de la tendance, on observe maintenant des débits plus faibles que ce qu'ils auraient du l'être. On commence finalement à retrouver l'état d'avant récolte, soit l'état d'équilibre du bassin, à partir de l'année 2009. Il est cependant important de constater que la dynamique saisonnière ne semble pas se rétablir avec la repousse : on observe toujours des pics positifs suivis de pics négatifs.

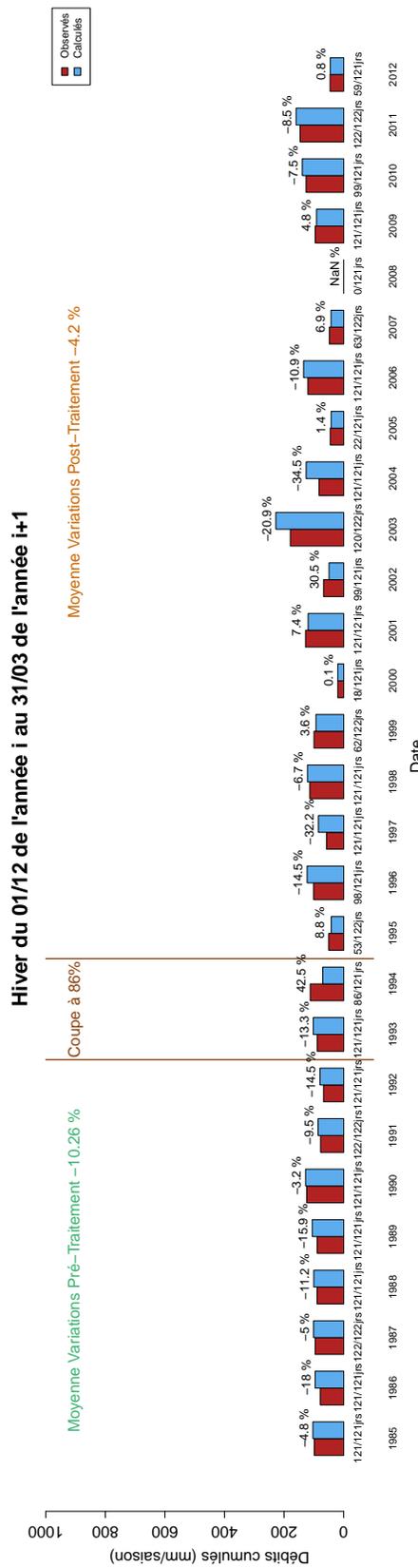
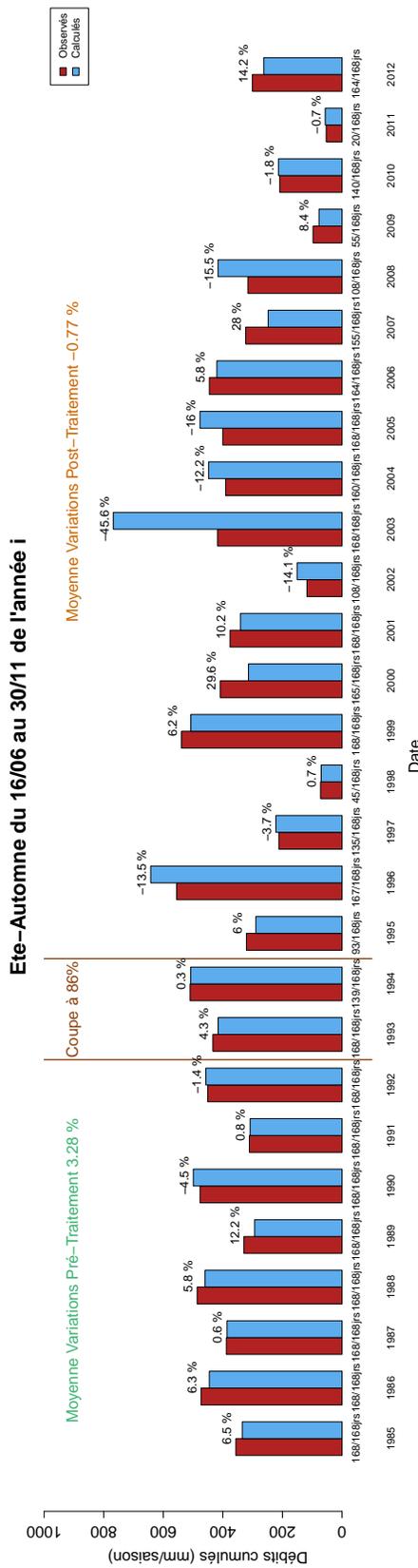
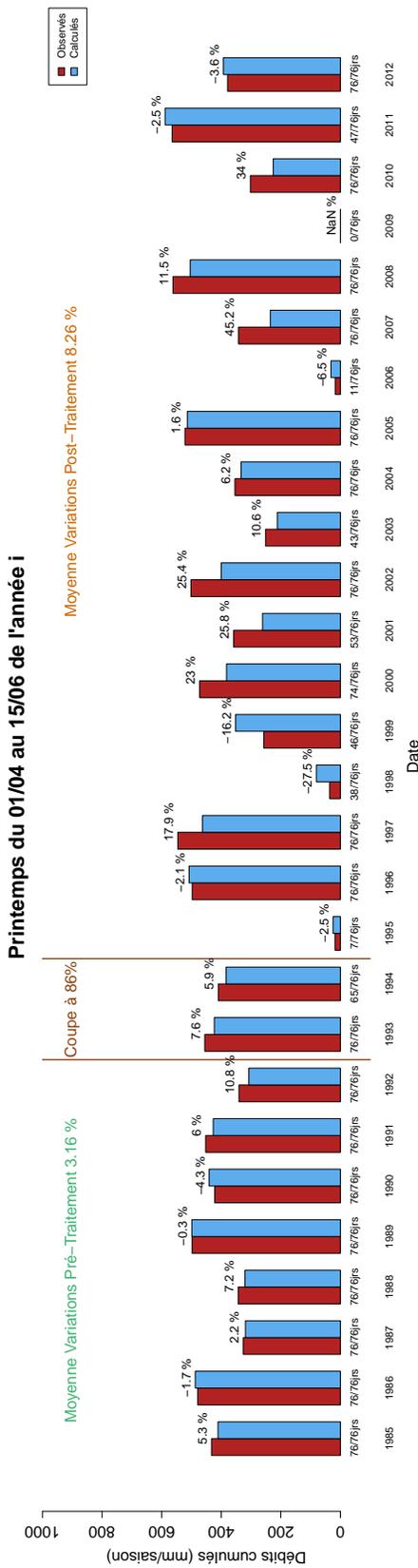


FIGURE 4.10 – Analyse Saisonnière de la récolte partielle 1993-1994 - Analyse : Bassins Appariés

Périodes estivales du 01/06 au 31/10 de l'année i

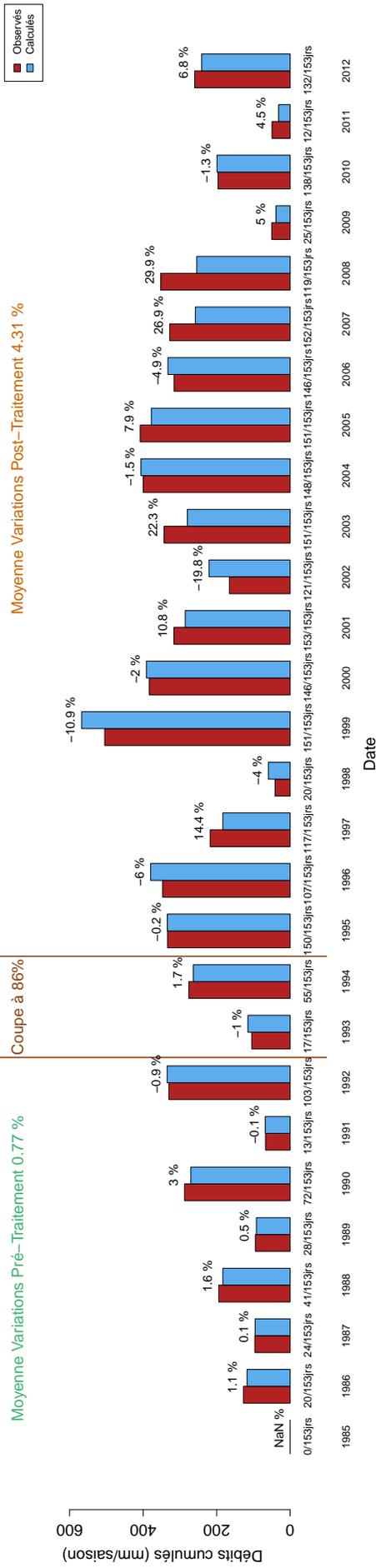


FIGURE 4.11 – Analyse Saisonnière de la récolte partielle 1993-1994 - Analyse : GR4J

4.3 Récolte importante du bassin 5A entre 2003-2005

Cette dernière étude est d'autant plus intéressante qu'elle n'a encore jamais été réalisée. Nous allons étudier la récolte qui a eu lieu sur les bassins 7 et 5 entre 2003 et 2005. Comme indiqué précédemment, le bassin 6 sert à nouveau de bassin témoin pour l'analyse Débit-Débit et nous pouvons maintenant affirmer avec certitude qu'il est stable. En effet, nous nous situons à plus de 30 ans après la récolte partielle de 1974-1976. D'autre part, nous allons considérer non pas chacun des 2 bassins 5 et 7 mais la combinaison de ces 2 bassins que nous appelons bassin 5A. Cette combinaison nous permet d'éviter l'utilisation des données "médiocres" du seuil de mesure du bassin 7 et de rendre l'étude moins lourde en n'étudiant qu'un seul bassin au lieu de 2 (Voir résumé de l'étude dans le Tableau 4.4 ci-après).

Bassin traité : Bassin 5A - Bassin de contrôle : Bassin 6		
Période de traitement	Période de calage des modèles	Période de calcul
2003 - 2005	01/01/2000 - 31/12/2002	01/01/1999 - 31/12/2012
Pourcentage de coupe : 45 %		

TABLE 4.4 – Récolte 2003-2005

Les critères C2M obtenus avec chacun des modèles sont les suivants :

- Modèle Débit-Débit : C2M = 89.28 %
- Modèle Pluie-Débit : C2M = 62.75 %

Ils sont cette fois particulièrement bons, notamment pour la modélisation Pluie-Débit.

4.3.1 Évolution de la dynamique du bassin

Les 2 modèles donnent à nouveau des résultats très concordants (Voir Figure 4.12 et Figure 4.13). Le calage est bon (ΔQ_X proche de zéro), puis on observe très nettement une augmentation des résidus annuels suite et pendant la récolte. La tendance s'inverse à partir de 2009 où on note une diminution de ΔQ_X annuel indiquant la fin des effets de la récolte et le début des effets de la repousse. La récolte étant très récente nous ne pouvons à ce jour observer le retour du bassin à un état stable. Il est intéressant de voir que cette fois-ci la récolte à un effet dès la première année : en effet, les résidus annuels montrent que l'augmentation des débits observés commence dès 2003-2004, c'est-à-dire en pleine récolte. Il est important de noter que la chute brutale de ΔQ_X observée avec le modèle Pluie-Débit en 2009 n'est que fictive : il s'agit en fait du manque cruel de données cette année-là.

Avec le modèle Débit-Débit, il est clairement notable que la fonte est plus précoce sur le bassin traité : on voit bien sur les résidus journaliers, le pic positif arriver plus tôt que le pic négatif suite à la récolte. D'autre part, les pics positifs sont nettement plus élevés que les pics négatifs. Ceci traduit le fait que les ressources disponibles sont plus importantes sur le bassin traité que s'il ne l'avait pas été. On détecte clairement ici les chutes d'évapotranspiration réelle et d'absorption par les racines.

On observe également des débits hivernaux plus élevés (les résidus journaliers sont nettement positifs durant cette saison), ce que nous n'avions pas clairement déterminé dans les études précédentes. En fait, on détermine surtout des débits du début de l'Hiver plus élevés que ce qu'ils auraient dû l'être. Le reste de l'Hiver, c'est-à-dire de Janvier à Mars, les débits de base semblent assez constants. On peut considérer qu'à la fin de l'Été-Automne, le sol récolté est plus gorgé en eau puisque directement exposé aux précipitations et dénudé de végétation qui absorbe et transpire. Il est donc plus isolé contre le froid et a tendance à dégeler les premières neiges ce qui se traduit par une augmentation du ruissellement.

Cette étude est assez étonnante car on y observe des changements très nets dans le comportement du bassin et pourtant la surface de récolte n'est pas particulièrement importante en comparaison, par exemple, à la récolte massive de 1993-1994. Observons maintenant les données saisonnières.

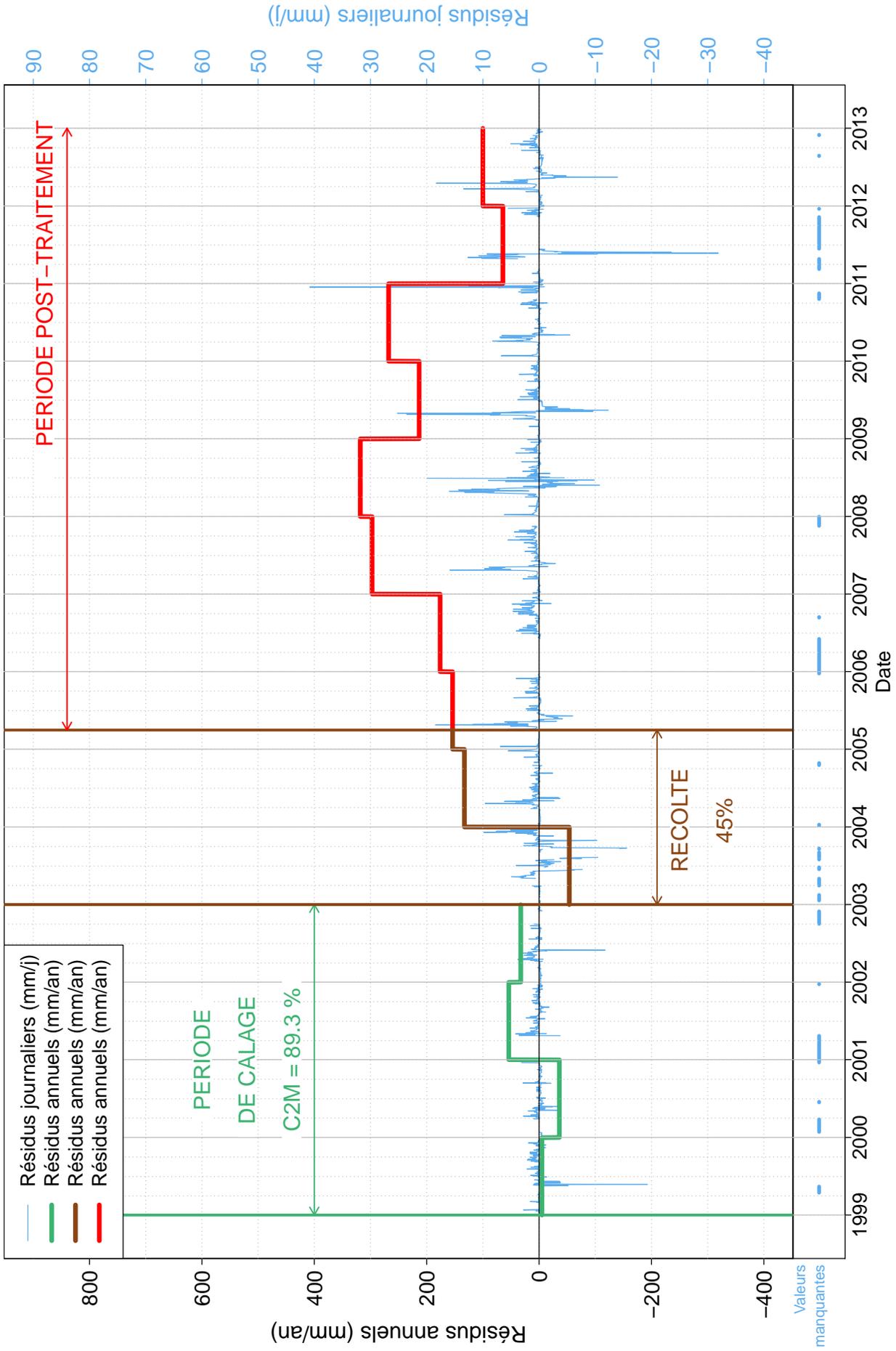


FIGURE 4.12 – Récolte importante 2003-2005 - Analyse : Bassins Appariés

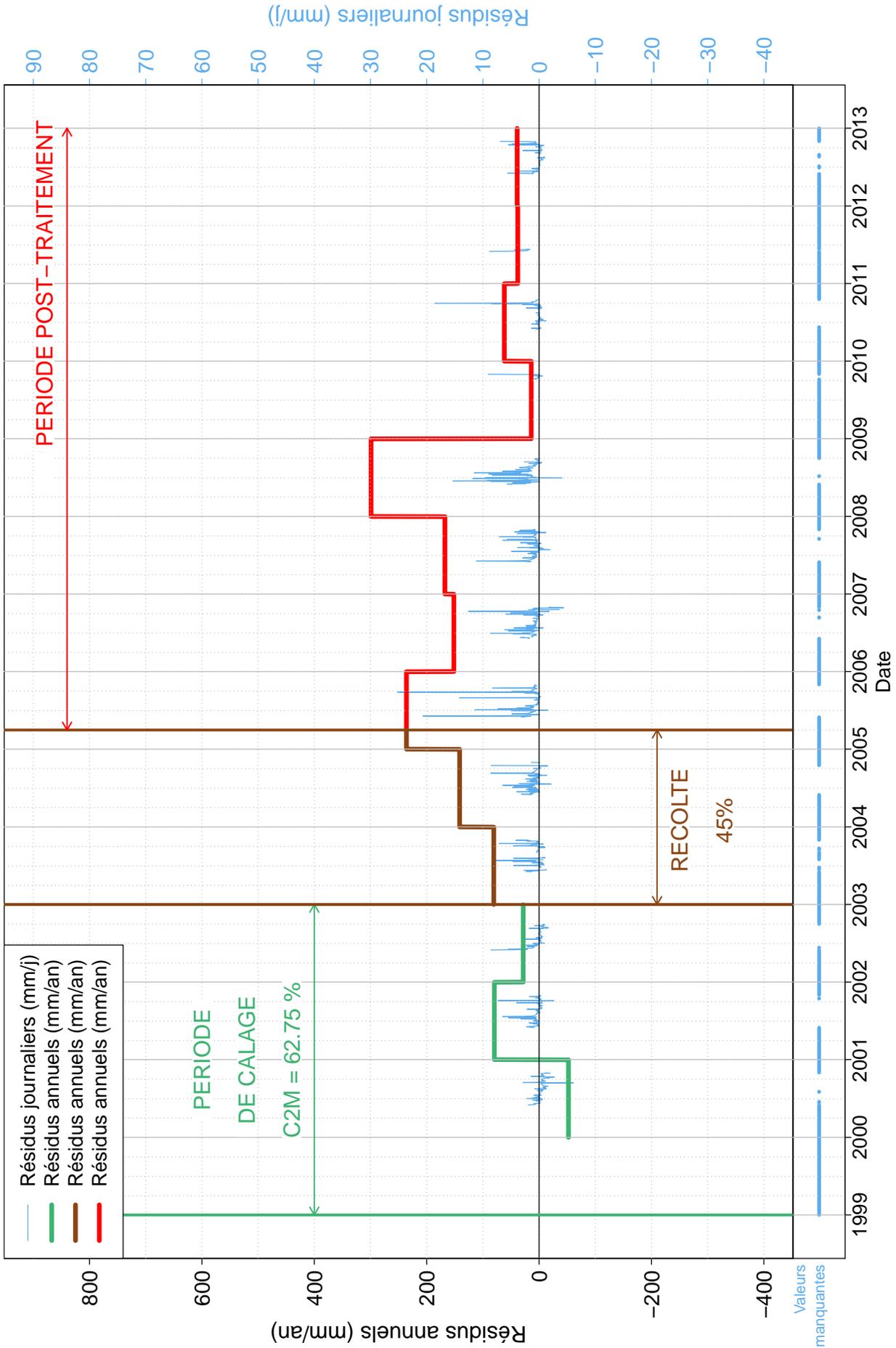


FIGURE 4.13 – Récolte importante 2003-2005 - Analyse : GR4J

4.3.2 Cumuls Saisonniers

Modèle Débit-Débit

Sur la Figure 4.14, au printemps, en période de calage, on observe que les débits calculés sont légèrement sous-estimés puisque la différence en pourcentage est positive. Suite à la coupe, les débits observés sont très nettement supérieurs, des fois jusqu'à 60% par exemple en 2007!! On observe en fait une forte augmentation jusqu'en 2011 où le pourcentage de différence commence à chuter. Il faut tenir compte du fait qu'en 2011, seulement 47 données sont disponibles sur 76... Mais la tendance suit en 2012 où la différence chute à 5.7%. On commence à ressentir les effets de la repousse.

De même, en Été-Automne, les débits calculés sont très légèrement sous-estimés et suite à la récolte, les débits observés sont nettement plus élevés. Jusqu'en 2010 la domination des débits observés est nette, puis elle commence à s'atténuer et on sent arriver les effets de la repousse. On ne tiendra pas compte de l'année 2011 pour laquelle nous avons seulement 11.9% des données disponibles.

Pour l'Hiver cette fois les débits calculés sont sur-estimés en calage puis suite à la coupe, on observe une forte augmentation des débits réellement mesurés par rapport à ce qu'ils auraient du être sans récolte. Il faut cependant noter que la repousse ne semble pas se faire sentir sur les débits hivernaux puisque la différence entre les débits observés et les débits calculés reste élevée après 2010.

Comme remarqué sur les graphiques précédents, on détecte ici aussi que la coupe a un effet immédiat sur le comportement du bassin. En effet, à partir de 2004 on constate déjà une nette augmentation des débits observés par rapport à ce qu'ils auraient du être.

Modèle Pluie-Débit

On observe les mêmes résultats qu'avec le modèle Débit-Débit : augmentation des débits observés, et ce notamment durant la coupe. Il est très clair avec ce graphique que les années 2009 et 2011 ne sont pas analysables puisque le nombre de données disponibles est bien trop faible (15.7% pour 2009, 7.2% pour 2011). Cependant les années 2010 et 2012 nous indiquent une diminution de la tendance à la hausse des débits observés. Le pourcentage de différence est en effet moins élevé ces années-là qu'il ne l'était suite et pendant la récolte.

4.3.3 Conclusions

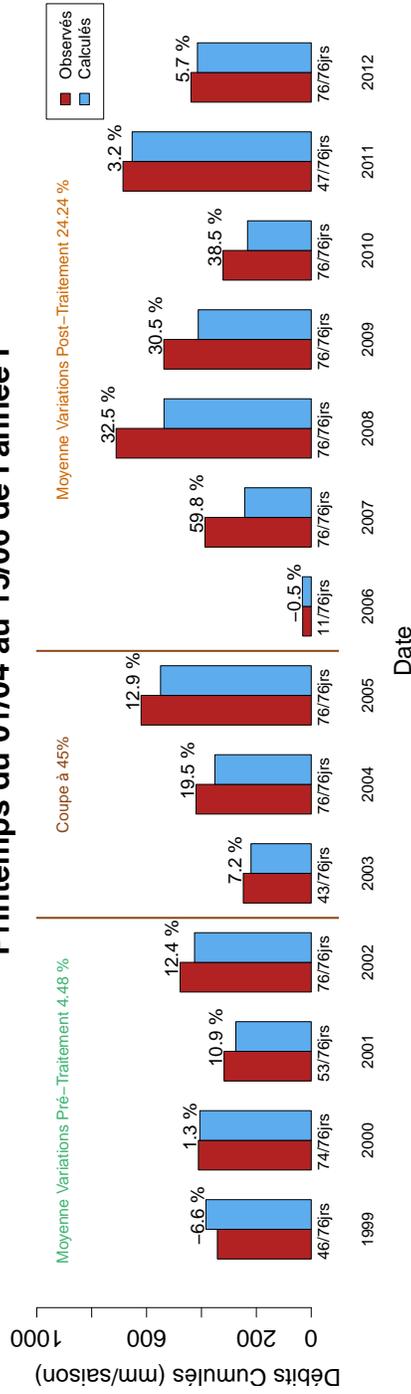
Cette étude a permis de montrer très nettement les conséquences de la récolte forestière auxquelles on s'attendait. En effet, on observe les mêmes tendances que celles présentées dans le cas du bassin d'Hubbard Brook au premier chapitre. Les 2 modèles indiquent une augmentation des débits observés par rapport à ce qu'ils auraient du être directement après le début de la récolte. En effet, on ressent les effets de la coupe dès la crue de 2003. Cette augmentation suit la tendance durant quelques années avant de s'inverser à partir de l'année 2009. On commence alors à ressentir les effets de la repousse qui génère une diminution importante et rapide des débits observés. Il serait intéressant de voir la suite de cette évolution dans quelques années.

On constate à nouveau et de manière d'autant plus marquée que la fonte est plus précoce suite à la récolte : les pics positifs des résidus journaliers arrivent plus en avance que les pics négatifs. Il est également notable que les pics positifs sont régulièrement plus importants que les pics négatifs ce qui traduit une plus grande disponibilité des ressources suite à la récolte. En effet, on ressent bien ici la chute de l'évapotranspiration et de l'absorption par les racines. Cependant, il est important de constater que la dynamique saisonnière engendrée par la récolte ne semble pas se résorber avec la repousse : on continue d'observer des pics positifs suivis de pics négatifs dans les résidus journaliers.

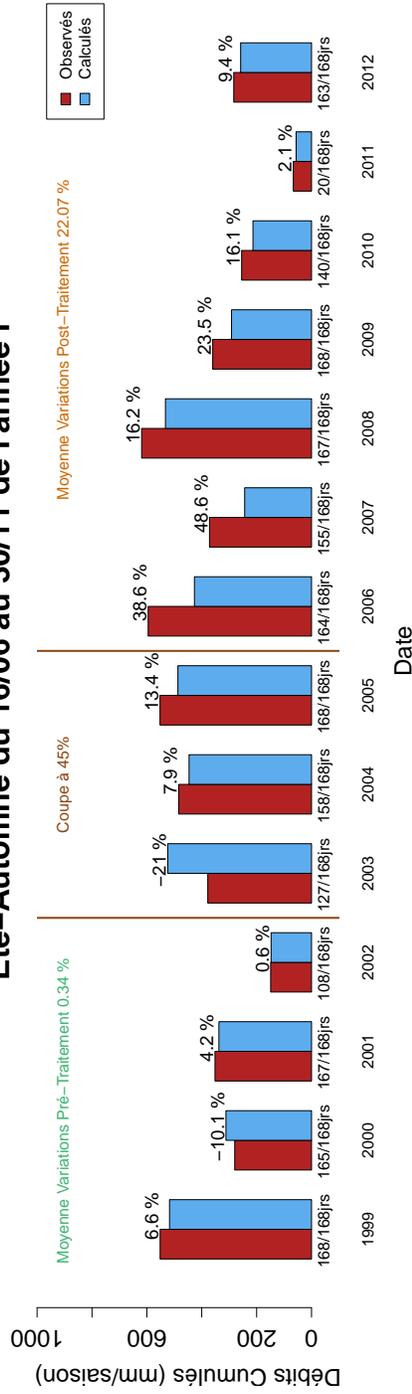
Autre effet notable qui n'avait pas été visible sur les précédentes études : l'augmentation des débits de début d'Hiver. En effet, on distingue des pics positifs vers les mois d'Octobre et Novembre. On peut penser que le sol gorgé d'eau à la fin de l'Automne est en conséquence plus résistant au froid et génère le dégellement des premières neiges ce qui se traduit par une légère augmentation des débits. Les débits de base du milieu de l'Hiver restent quand à eux assez constants, ne semblant pas être affectés par la récolte.

Enfin, il est étonnant de voir que les effets de cette récolte de 45% de la surface du bassin 5A sont plus notables et plus importants que ceux détectés sur la récolte massive du bassin 7A.

Printemps du 01/04 au 15/06 de l'année i



Ete-Automne du 16/06 au 30/11 de l'année i



Hiver du 01/12 de l'année i au 31/03 de l'année i+1

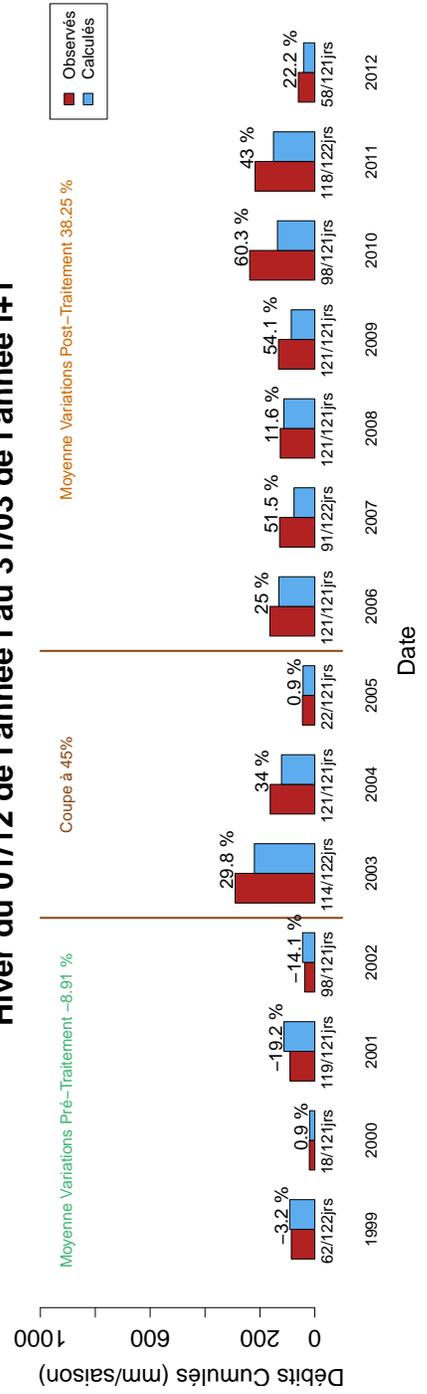


FIGURE 4.14 – Analyse Saisonnière de la récolte partielle 2003-2005 - Analyse : Bassins Appariés

Périodes estivales du 01/06 au 31/10 de l'année i

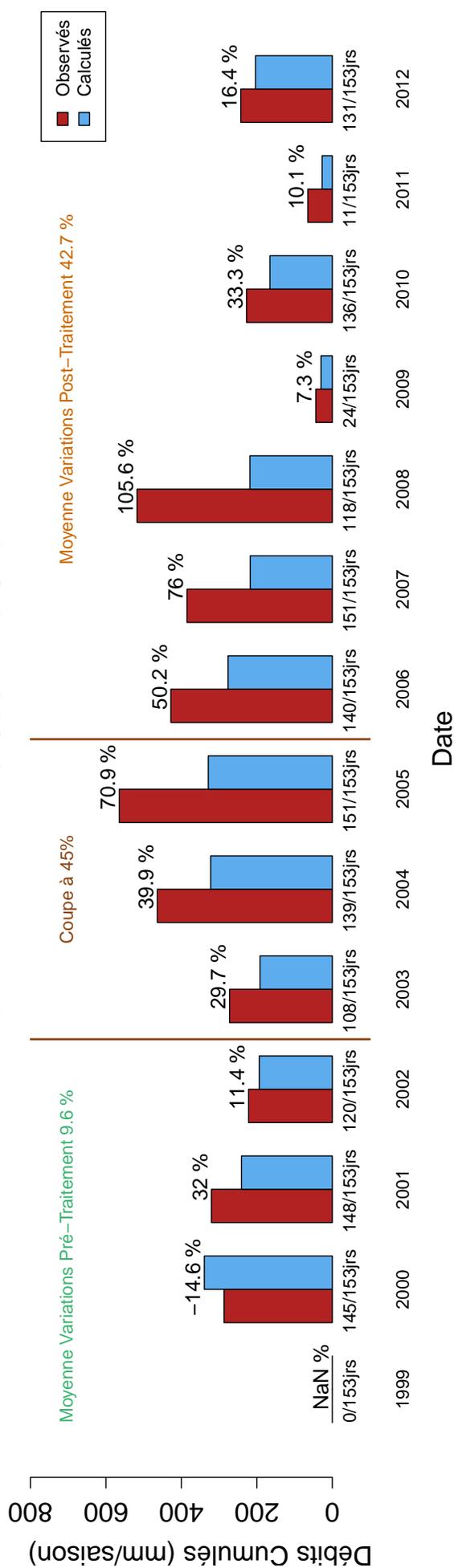


FIGURE 4.15 – Analyse Saisonnière de la récolte partielle 2003-2005 - Analyse : GR4J

4.4 Résultats généraux

Les résultats observés à travers ces 3 récoltes sont globalement assez similaires. L'observation des résidus annuels et journaliers nous a permis de dresser une analyse globale des effets de récoltes forestières sur le comportement hydrologique d'un petit bassin versant. Nous avons également pu comparer les résultats obtenus par 2 modèles fondamentalement différents et vérifier qu'ils soient concordants.

Le scénario qui nous semble expliquer les comportements observés suite à la récolte est le suivant. Suite à la récolte, on observe au Printemps des pics de crues, liés à la fonte des neiges, plus précoces et parfois plus importants en termes de volume d'eau. En effet, la forêt qui faisait office de protection contre les rayons solaires n'est plus là, rendant le manteau neigeux plus exposé : il fond donc plus tôt. D'autre part, du fait des engins utilisés pour la récolte, il arrive que certaines ornières se soient formées et facilitent le ruissellement. On observe donc généralement des débits plus élevés au moment de la fonte des neiges.

En Été-Automne, les précipitations rejoignent directement le sol : il n'y a en effet plus d'arbres pour les intercepter. D'autre part, du fait du manque de couvert forestier, il y a également moins d'absorption par les racines, et l'évapotranspiration réelle chute. Il y a donc beaucoup plus d'infiltration sur cette période et le niveau des nappes augmente. Ceci se traduit par une légère baisse des débits observés sur cette période.

À la fin de l'Été-Automne, le sol est donc gorgé d'eau et est ainsi plus isolé contre le froid. Ainsi, les premières neiges peuvent être rapidement dégelées par l'énergie du sol et on observe quelques pics de faible amplitude au début de l'Hiver. Les débits de base en hiver restent ensuite assez constants car les conditions climatiques sont telles que le couvert forestier n'intervient pas de manière significative dans le comportement hydrologique du bassin à cette période de l'année.

La repousse qui suit la récolte est jeune et dynamique et est donc beaucoup plus gourmande en eau. D'autre part, on sait que les arbres transpirent plus en début qu'en fin de vie. Ainsi, on voit les débits diminuer rapidement après l'augmentation qui suit la récolte. Il arrive même quelques fois que les débits deviennent plus faibles que ce qu'ils l'étaient à l'état originel du bassin. C'est par exemple le cas de la coupe de 1993-1994 et ce qu'on appelle communément l'effet "Kuczera".

Puis au fur et à mesure de la repousse, on rejoint progressivement l'état du bassin avant la coupe et il retrouve alors sa stabilité d'autrefois. Évidemment, le temps de retour à un état stable est étroitement lié à la surface de récolte du bassin.

Cette étude nous a également permis de mettre en avant les difficultés rencontrées quant au manque et à la validité des données. En effet, nous avons souvent constaté que le manque de données pouvait générer des erreurs d'interprétations comme c'est le cas pour l'étude de la récolte de 1973-1975. C'est ce qui peut expliquer en partie le fait que le modèle Pluie-Débit donne de moins bons résultats que le modèle Débit-Débit. Notre étude a été guidée par l'idée constante d'utiliser des données correctes et cohérentes temporellement comme nous l'avons indiqué au troisième chapitre. Aussi, nous avons voulu montrer dans un 5^{ème} et dernier Chapitre quels auraient été les résultats obtenus si nous nous étions contentés de n'utiliser que les données publiées officiellement.

Chapitre 5

Importance du choix des données

Comme indiqué dans le Chapitre 3, partie 3.2.1, nous n'avons pas utilisé la totalité des données officiellement publiées pour mener notre étude. Ce 5^{ème} et dernier chapitre vise à montrer toute l'importance du choix des données. Le but est d'évaluer l'importance du tri et du traitement des données fait au préalable de notre étude. Nous avons, pour ce faire, considéré 2 options : la première option, option A, n'utilise que les données officiellement publiées et accessibles à tous. L'option B utilise le jeu de données considéré jusqu'ici. A chacune de ces options nous appliquons le modèle Pluie-Débit.

Nous observons les résultats obtenus avec la modélisation Pluie-Débit sur la période 1995-2012 durant laquelle a eu lieu une récolte importante de 45% du bassin 5A entre 2004 et 2005. Nous avons également appliqué le test aux données du bassin 7A, non-traité durant cette période. Pour mesurer et comparer les jeux de données, nous considérons que la meilleure option est celle qui donne la valeur de critère C2M la plus élevée.

5.1 Les options

Option A



Pour cette option, nous utilisons les données de précipitations et de températures officiellement publiées par Environnement Canada. Entre Janvier 1995 et Septembre 2003, les données journalières sont issues de la station manuelle et calculées de 8h HNL à 8h HNL ; au-delà, elles proviennent de la station automatique et sont calculées de 1h HNL à 1h HNL. Lorsqu'il existe des manques, nous les avons complété en réalisant une interpolation linéaire avec les données de la Station Étape à 30 km du BEREV et celles de la Station Chateau Richer à 40 km. Les données provenant de la Station du Lac Laflamme, plus proche, ne sont pas publiées par Environnement Canada, ce qui explique pourquoi nous ne les avons pas utilisées. Les données hydrométriques journalières utilisées sont celles publiées par le CEHQ, calculées de minuit HNL à minuit HNL sur toute la période considérée.

Option B



Pour cette option, nous utilisons les données de précipitations et de températures que nous avons corrigées et combinées : les données journalières de la station manuelle jusqu'en Septembre 2003 ; les données journalières calculées et corrigées à partir des cumuls horaires de la station automatique à partir d'Octobre 2003. Les données hydrométriques journalières sont calculées de 8h HNL à 8h HNL à partir des données instantanées publiées par le CEHQ sur toute la période considérée.

5.2 Résultats sur le bassin 5A

Dans cette analyse, nous observons les valeurs de critère C2M pour la période de calage. En effet, comparer les valeurs de critère C2M en période de validation n'a pas de sens puisque le bassin 5A est traité sur la période 2003-2005 donc instable. Une très faible valeur de critère C2M sur une période où il y a modification du couvert forestier du bassin peut traduire une forte influence de la récolte. Comparer les 2 options sur cette période et sur ce

bassin reviendrait en fait à comparer l'influence de la récolte en fonction du jeu de données utilisé. Ce serait faire une erreur d'interprétation.

On cale nos paramètres sur la période allant du 1^{er} Janvier 2000 au 31 Décembre 2002 car c'est une période où le bassin peut être considéré comme stable. Sur cette période, les données météorologiques utilisées sont les mêmes pour les 2 options et proviennent de la station manuelle; les données hydrométriques diffèrent d'un décalage horaire de 8h. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 5.1).

	C2M de Calage
Option A	51.81 %
Option B	62.75 %

TABLE 5.1 – Valeurs de critère C2M pour la période de calage 2000-2002 sur le traitement du bassin 5A

L'option B est nettement meilleure. Cette faible valeur de critère C2M pour l'Option A (en comparaison à l'Option B) ne peut provenir que du décalage horaire de 8h qui existe entre les données météorologiques et hydrométriques. En effet, c'est la seule différence qui existe avec l'Option B sur cette période. On peut donc conclure assez aisément qu'un décalage horaire de 8h entre données météorologiques et données hydrométriques engendre des erreurs de calculs relativement importantes. Cette constatation confirme notre hypothèse de la forte réactivité d'un petit bassin versant.

5.3 Résultats sur le bassin 7A

Dans cette analyse, on observe les valeurs de critère C2M pour la période de calage, la période de validation entre 1999 et 2003 et la période de validation à partir de 2004. On découpe la période de validation car il nous a semblé intéressant de voir comment évolue la valeur du critère C2M avec le changement de calcul des données météorologiques journalières imposé par Environnement Canada. D'autre part, il est cette fois judicieux d'observer les critères C2M de validation car le bassin 7A n'est pas traité durant la période d'étude et le dernier traitement auquel il a été soumis a eu lieu entre 1993 et 1994 soit presque 10 ans auparavant. On peut donc considérer que les effets de la récolte et de la repousse ne se font maintenant plus sentir et que le bassin est stable.

5.3.1 Calage du 01/01/2000 au 31/12/2002

Comme énoncé précédemment, sur cette période de calage, les données météorologiques utilisées sont les mêmes pour les 2 options et proviennent de la station manuelle; les données hydrométriques diffèrent d'un décalage horaire de 8h. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 5.2).

	C2M de Calage	C2M de Validation 1999-2003	C2M de Validation 2004-2012
Option A	63.15 %	61.89 %	54.76 %
Option B	70.79 %	64.92 %	53.18 %

TABLE 5.2 – Valeurs de critère C2M pour la période de calage 2000-2002 sur le bassin 7A

On peut déjà constater que le critère C2M de validation est toujours plus faible que le critère C2M de calage. Cela semble tout à fait logique puisque les paramètres sont calés spécifiquement pour la période de calage. D'autre part, le second critère C2M de validation est toujours plus faible que le premier. Cela semble également assez plausible puisque qu'on se situe plus loin encore temporellement de la période de calage et les facteurs environnementaux peuvent avoir variés.

D'autre part, l'Option B est clairement meilleure que l'Option A tant sur la période de calage que sur la première période de validation. Là encore, on peut considérer que cette différence ne peut être due qu'au décalage horaire entre les données hydrométriques et météorologiques de l'Option A. Sur la seconde période de validation, l'Option A est meilleure mais la différence n'est pas significative.

5.3.2 Calage du 01/01/2001 au 31/12/2004

Sur cette période de calage on se situe dans la période de "transition" des données météorologiques d'Environnement Canada : c'est la période de passage de la station manuelle à la station automatique. Les résultats sont

présentés dans le tableau ci-après (Tableau 5.3).

	C2M de Calage	C2M de Validation 1999-2003	C2M de Validation 2004-2012
Option A	63.34 %	61.99 %	57.77 %
Option B	66.60 %	66.11 %	55.66 %

TABLE 5.3 – Valeurs de critère C2M pour la période de calage 2001-2004 sur le bassin 7A

Les données météorologiques journalières de l’Option A ne sont donc pas calculées avec le même décalage sur la période de calage considérée. Cette incohérence temporelle dans la chronique de données météorologiques ne semble pas affecter les résultats de manière négative. En fait, à partir de Novembre 2003, les données météorologiques sont celles de la station automatique et sont calculées de 1h HNL à 1h HNL à partir des mesures faites au pas de temps horaire. Le décalage horaire entre les données hydrométriques et les données météorologiques de l’Option A n’est alors plus que d’1h. Le modèle adapte donc ses paramètres sur cette fin de période, ce qui explique que les critères C2M de calage et de seconde validation ne sont en aucun cas affectés par l’incohérence temporelle. On pourrait cependant s’attendre à obtenir des résultats moins bons sur la première validation où les données météorologiques et hydrométriques sont, jusqu’en Novembre 2003, décalées de 8h.

L’Option B voit une chute de ses valeurs de critère C2M par rapport à la période de calage précédente. On peut remettre en cause la correction que nous avons choisi d’appliquer... Il reste toutefois assez net qu’elle est meilleure que l’Option A sur la période de calage et la première période de validation. Ici encore, l’Option A est meilleure sur la seconde période de validation toujours de façon non-significative.

5.3.3 Calage du 01/01/2005 au 31/12/2007

Sur cette période de calage, les données hydrométriques et météorologiques utilisées pour chaque option sont différentes. Cette fois, les données hydrométriques et météorologiques de l’Option A ne sont décalées que d’1h. Les résultats sont présentés de le tableau ci-après (Tableau 5.4).

	C2M de Calage	C2M de Validation 1999-2003	C2M de Validation 2004-2012
Option A	62.74 %	58.00 %	58.29 %
Option B	52.55 %	59.06 %	58.03 %

TABLE 5.4 – Valeurs de critère C2M pour la période de calage 2005-2007 sur le bassin 7A

Cette dernière analyse est assez particulière car elle donne des résultats tout à fait opposés aux conclusions que nous avons tirées jusqu’ici. En effet, pour la première fois, l’Option A est bien meilleure que l’Option B en période de calage.

On constate aussi, pour l’Option A, que le premier critère C2M de validation est moins bon que le second, or nous avons toujours observé l’inverse. L’explication qui paraît la plus plausible est la suivante : les paramètres sont calés sur une période où le décalage horaire entre les données hydrométriques et météorologiques est de 1h. Ils sont ensuite appliqués à une première période, 1999-2003, où le décalage horaire entre données hydrométriques et données météorologiques est, du moins jusqu’en Septembre 2003, de 8h ; et une seconde période à partir de Octobre 2003 où le décalage est de 1h. Les paramètres sont donc beaucoup plus adaptés à la seconde période qu’à la première, ce qui explique que le critère C2M soit meilleur en seconde période de validation qu’en première période.

Enfin, pour l’Option B, les critères C2M de validation sont meilleurs que celui de calage ce qui paraît assez étrange... D’autre part, le critère C2M est relativement faible par rapport à ceux obtenus avec les autres calages.

Conclusion

Par le biais de cette étude, nous avons pu mettre en évidence les points suivants :

- L'importance de l'analyse de la validité des données du BEREV
- L'influence des récoltes sur le comportement hydrologique du BEREV

Dans un premier temps, nous avons pu constater les différentes incohérences qu'il existait au sein même des chroniques de données : nous avons tout d'abord noté un décalage horaire dans le calcul de la donnée météorologique journalière entre avant 2003 et après 2003 du fait du changement de station de mesure. Cette incohérence temporelle nous a amené à rechercher les données météorologiques horaires brutes pour refaire le calcul de la donnée journalière sans décalage. Nous avons alors constaté que des aberrations peuvent apparaître dans les données brutes du fait des vidanges ou erreurs de l'appareil de mesure. Nous avons alors décidé d'une correction à appliquer aux données météorologiques avant de détecter un décalage horaire entre les données hydrométriques et météorologiques. En effet, elles ne sont pas publiées par le même organisme. Nous avons alors finalement cherché à retrouver également les données hydrométriques brutes pour corriger ce décalage. Ce travail, bien que laborieux, nous a permis de reconstruire des chroniques de données météorologiques et hydrométriques que nous savons correctes et cohérentes temporellement.

En effet, ne pas avoir effectué un tel travail aurait pu conduire à de grossières erreurs d'interprétation des résultats. Il est cependant particulièrement difficile de retrouver l'ensemble des données hydrométriques horaires brutes depuis 1965 et cela a généré certains manques qui auraient pu également fausser l'interprétation des résultats si nous n'avions pas utilisé 2 modèles distincts. Il serait relativement intéressant de poursuivre une recherche assidue des données hydrométriques existantes au pas de temps horaire afin de rendre les chroniques que nous avons créées plus complètes.

L'évaluation de l'importance du choix des données présentée en dernière partie de ce rapport nous a donné raison : en effet, nous observons des résultats plus performants avec les chroniques de données que nous avons créées qu'avec celles obtenues et traitées sans aucune validation préliminaire.

L'analyse de l'influence des récoltes forestières nous a amené aux résultats suivants : la déforestation modifie le comportement du bassin de manière dynamique et volumique. En effet, suite à la récolte, on observe une fonte des neiges plus précoce au Printemps, témoin d'un manteau neigeux plus exposé aux rayons solaires car non-protégé par la forêt. L'infiltration est relativement importante en Été et Automne sur un parterre de coupe puisque qu'il est directement exposé et qu'il n'y a pas de végétation pour intercepter les précipitations, absorber l'eau souterraine et favoriser l'évapotranspiration réelle. Le niveau des nappes phréatiques se voit donc augmenté à cette période suite à la coupe. Le sol plus humide donc plus isolé contre le froid aura tendance à dégeler les premières neiges avant qu'il ne fasse trop froid, ce qui se manifeste par une augmentation du ruissellement au début de l'hiver. Enfin, l'écoulement annuel est plus élevé suite à la récolte.

Cette élévation globale des débits est vite rattrapée par la repousse dont les effets sont tout à fait opposés à ceux de la récolte : en effet, on observe une chute des débits et une inversion de la tendance. La repousse plus jeune est plus gourmande en eau ; puis elle atteint l'état d'origine du bassin qui semble retrouver son comportement originel.

La correction que nous avons choisi d'appliquer sur les données météorologiques nous paraît tout à fait pertinente, il pourrait cependant être intéressant de l'appliquer au pas de temps horaire pour plus de précision. On pourrait en effet observer plus en détails les petites fluctuations liées à l'évaporation ou aux erreurs de mesure. Il pourrait être intéressant d'en discuter avec les personnes en charge de la correction chez Environnement Canada.

Concernant l'étude de l'influence des récoltes, il pourrait être également assez pertinent d'analyser les effets des différentes coupes en fonction du type de couvert récolté et du type de couvert qui repousse. Une analyse plus poussée de la densité des peuplements serait aussi intéressante.

Bibliographie

- Andréassian, V., 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 781pp.
- Andréassian, V., 2004. Waters and forests : from historical controversy to scientific debate, *Journal of Hydrology*, 291 : 1-27.
- Andréassian, V., 2012. Visualising the hydrological signature of an unsteady land cover – An application to deforested and afforested catchments in Australia, the USA and France, in *Revisiting Experimental Catchment Studies in Forest Hydrology*. Red Book 353, édité par A. A. Webb, M. Bonell, L. Bren, P. N. J. Lane, D. McGuire, D. G. Neary, J. Nettles, D. F. Scott, J. Stednick and Y. Wang, pp. 125-134, IAHS, Wallingford.
- Andréassian, V., et V. Trinquet, 2009. Generalized Kuczera Curves to describe the long-term behaviour of deforested catchments, paper presented at H2009 : 32nd Hydrology and Water Resources Symposium, Engineers Australia, Newcastle.
- Andréassian, V., N. Le Moine, C. Perrin, M. H. Ramos, L. Oudin, T. Mathevet, J. Lerat, and L. Berthet, 2012. All that glitters is not gold : the case of calibrating hydrological models, *Hydrological Processes*, 26(14), 2206-2210.
- Bibeau, L., Fortin, V. et Tétreault, E., 2000. Une méthode robuste d'estimation des précipitations et des températures horaires en temps réel, Institut de recherche Hydro-Québec, IREQ-2000-271C.
- Guillemette, F., 1999. Effet de la coupe sur le bilan hydrologique, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 60pp.
- Hibbert, A. R., 1967. Forest treatment effects on water yield, in *Forest Hydrology : Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar*, edited by W. E. Sopper and H. W. Lull, pp. 527-543, Pergamon Press, Oxford.
- Kuczera, G., 1987. Prediction of water yield reductions following a bushfire in ash-mixed species eucalypt forest, *J. Hydrol.*, 94, 215-236.
- Lavabre, J., Andréassian, V., et Laroussinie, O., 2000. Eaux et forêts - La forêt - Un outil de gestion des eaux ?, Cemagref Editions, 116pp.
- Lavigne, M.-P., 2007. Modélisation du régime hydrologique et de l'impact des coupes forestières sur l'écoulement du ruisseau des Eaux-Volées à l'aide d'Hydrotel, Université Laval, Québec, 283pp.
- Mathevet, T., C. Michel, V. Andréassian, et C. Perrin, 2006. A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins., in *IAHS Red Books Series n° 307*, edited, pp. 211-219.
- Morton, F. I., 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology, *Original Research Article Journal of Hydrology*, Volume 66, Issues 1-4, pp. 1-76.
- Nash, J. E., et J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I - a discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10, 282-290.
- Oudin, L., F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, F. Anctil, et C. Loumagne, 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling, *J. Hydrol.*, 303(1-4), 290-306.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global Pluie-Débit au travers d'une approche comparative, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 530pp.

Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *Journal of Hydrology*, 279 : 275-289.

Plamondon, A. et Ouellet, D., 1980. Partial clearcutting and streamflow regime of ruisseau des Eaux-Volées experimental basin. Actes du Colloque d'Helsinki, IAHS-AISH Publication n° 130.

Rochette, F.J., 1971. Hydrological study of Ruisseau des Eaux-Volées experimental basin, Thèse de maîtrise, University of Western.

Tremblay, Y., Rousseau, A., Plamondon, A., Levesque, D., et Jutras, S., 2008. Rainfall peak-flow response to clearcutting 50% of three small watersheds in a boreal forest, Montmorency Forest, Québec, *Journal of Hydrology*, 352 : 67-76.

Annexe A : Optimisation "Pas-à-Pas"

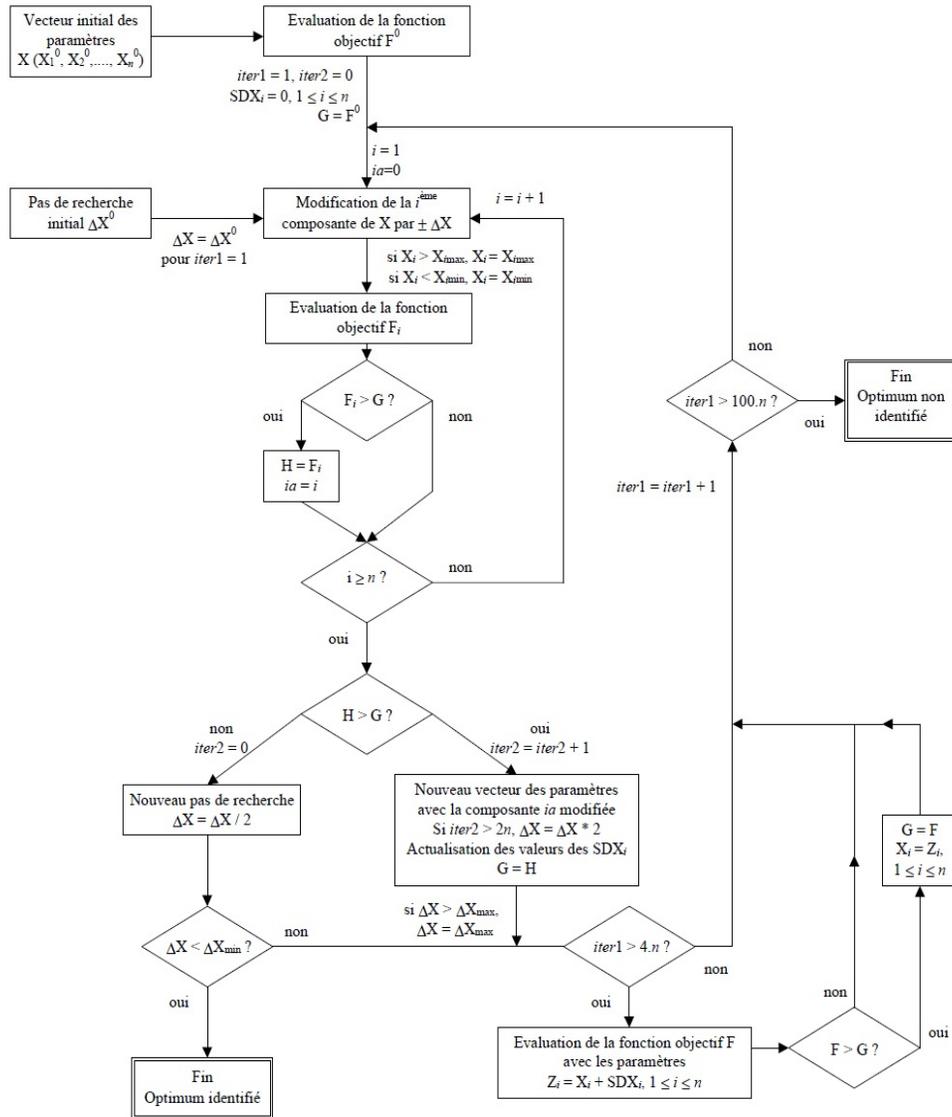


FIGURE 1 – Schéma de l'algorithme d'optimisation "Pas-à-Pas"
(Perrin, 2000)

Annexe B : Correction des données de précipitations

Données

Les données utilisées pour le calcul des données journalières de précipitations sont les valeurs de cumuls horaires renvoyées par le précipitomètre à pesée de la station principale. Les données journalières correspondent à la soustraction des cumuls horaires à 7h HNL au jour J+1 et à 8h HNL au jour J. Nous avons également à notre disposition les données de précipitations horaires du précipitomètre à augets basculants de capacité 0.2 mm (Tipping Bucket ou TBRG). Les précipitations journalières sont calculées en sommant les précipitations horaires entre 8h HNL au jour J et 7h HNL au jour J+1. Attention, le Tipping Bucket ne fonctionne qu'en été mais nous sera utile pour la correction.

Paramètres

On définit dans un premier temps un certain nombre de paramètres :

- VidangeMin = quantité d'eau minimale enlevée à chaque vidange. On prendra VidangeMin=100mm
- SeuilMin = quantité d'eau minimale dans le précipitomètre. On prendra SeuilMin=0mm
- SeuilMax = dernier cumul maximum observé
- DateSeuilMax = date du dernier cumul maximum observé
- PrecipMax = précipitations journalières maximum réalistes. On prendra PrecipMax=80mm
- DateDerVidange = date de la dernière vidange

Cumuls journaliers et Vidanges

On détermine les dates de vidanges en détectant les valeurs de cumuls inférieurs à - 100 mm. Pour ces dates, on considère que la précipitation est nulle puisque l'observateur ne fait pas, a priori, de vidange en pleine pluie : $P(Jvidange)=0$. Puis entre les dates de vidanges on calcule les précipitations cumulées.

Dernier cumul maximum observé

À partir de ces précipitations cumulées on détermine les dates et valeurs des derniers cumuls maximaux observés. C'est-à-dire que si le cumul observé au jour J est supérieur ou égal au dernier cumul maximum observé, on enregistre la date et la valeur car cela peut potentiellement correspondre à une précipitation. Ce cumul devient alors le nouveau dernier cumul maximum observé.

Si $CUM(J) \geq CUM(J-1) \Rightarrow CMAXO(J)=CUM(J)$

Validité des cumuls

On détermine ensuite si les cumuls sont valides ($V=1$) ou non valides ($V=0$). On considère que le cumul est toujours valide sauf si :

- il est inférieur à SeuilMin
- il est égal à -9.9, valeur manquante
- il est inférieur au dernier cumul maximum observé

Estimation des cumuls non-valides

On peut maintenant estimer les cumuls non-valides. Avant tout chose, on considère que l'estimation ne pourra pas se faire si au moins 5 cumuls consécutifs sont non-valides. On enregistrera ces cumuls comme valeur manquante et ils ne pourront être corrigés. Sinon l'estimation est réalisée comme indiqué ci-après :

- Si le dernier cumul valide $cc1$ est supérieur ou égal au prochain cumul valide $cc2$ alors le cumul non-valide ($V=0$) sera égal au dernier cumul valide : $Cum(V=0) = cc1$
- Si le dernier cumul valide $cc1$ est inférieur ou égal au prochain cumul valide $cc2$ alors une interpolation linéaire entre le dernier et le prochain cumul valide donnera la valeur du cumul non-valide ($V=0$) :

$$Cum(V=0) = \frac{cc1+cc2}{|i_{cc1}-i_{cc2}|}$$

où $|i_{cc1} - i_{cc2}|$ correspond au nombre de jours entre les cumuls valides.

Estimation des précipitations

On détermine la valeur des précipitations au jour J en soustrayant le cumul au jour J et le cumul au jour J-1 :
 $P(J) = \text{Cum}(J) - \text{Cum}(J-1)$

Si une donnée n'est pas manquante mais fait suite à une longue série de données manquantes, on considèrera cette donnée comme non-valide donc manquante. Pour $t < J$, si $P(t) = -9.9 \Rightarrow P(J) = -9.9$.

Enfin, connaissant les précipitations journalières mesurées par le TBRG, on considère que si la précipitation calculée est supérieure à 0.5 mm et que le TBRG indique une valeur nulle (c'est-à-dire qu'il ne s'est pas déclenché alors qu'il aurait dû le faire 2 fois) alors la précipitation calculée provient d'une erreur de mesure de l'appareil et est mise à 0 : Si $P(J) > 0.5$ mm et $\text{TBRG}(J) = 0 \Rightarrow P(J) = 0$. Attention, cette correction n'est appliquée qu'entre les mois de Mai et Septembre inclus car l'hiver le TBRG ne fonctionne pas.