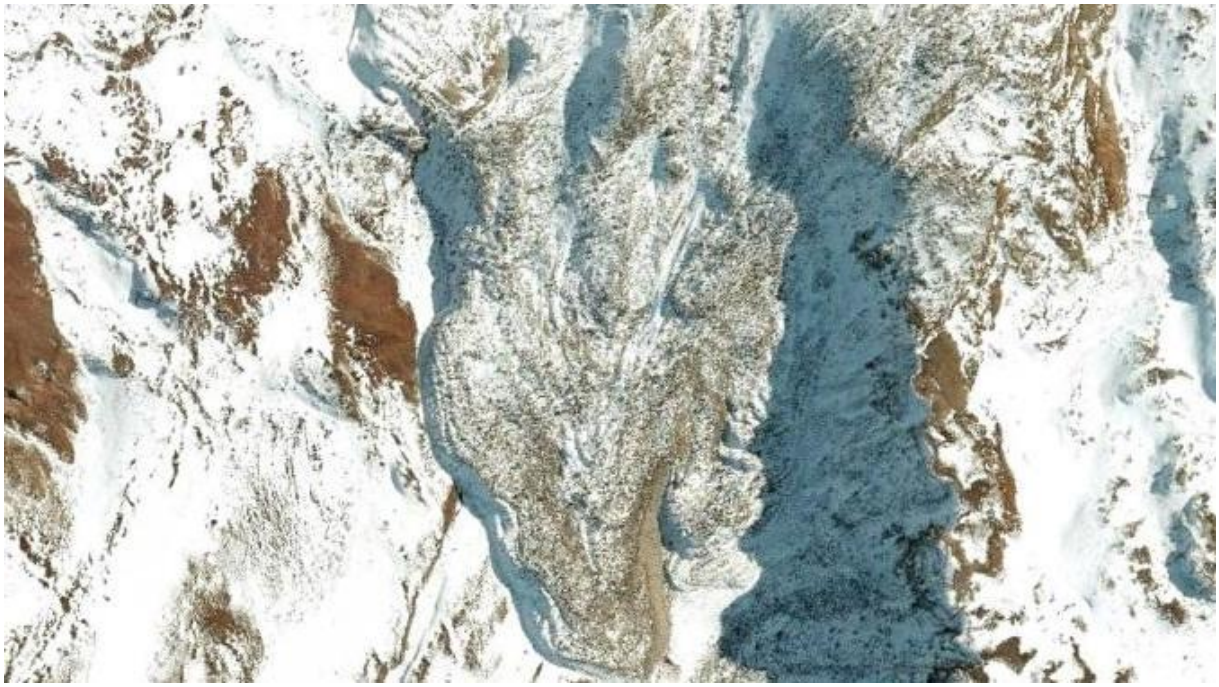
UNITÉ DE GÉOGRAPHIE, DÉPARTEMENT DES GÉOSCIENCES, UNIVERSITÉ DE FRIBOURG/CH

Extrapolation des débits pour un torrent du glacier rocheux des Becs de Bosson



TRP

Fribourg, le 1er juillet 2012

Nikola DIMIC

Cloux-Roussier 5

3960 Sierre

nikola.dimic@unifr.ch

Superviseur :

Reynald DELALOYE

Résumé

Des études montrent que l'augmentation des températures de l'air et du sol a une conséquence sur l'évolution du pergélisol et la dynamique des glaciers rocheux. Les processus hydrologiques qui se produisent en même temps que ces changements sont relativement peu connus et moins étudiés. Ceci s'explique par le fait que les mesures sur le terrain sont plus compliquées et plus exigeantes en quantité de travail. Pourtant, les études récentes sur les phénomènes hydrologiques au sein des glaciers rocheux tendent à montrer que l'eau a une influence non négligeable sur les mouvements de ces derniers. Dans ce travail, les données climatiques concernant le glacier rocheux des Becs de Bosson (Vallon de Réchy, Suisse) seront étudiées.

D'importantes variations saisonnières de vitesse ont pu être observées pour les glaciers rocheux dont la température de la glace est relativement proche du point de fusion, ce qui est le cas pour le glacier étudié. Ces fluctuations sont attribuées à l'augmentation de la température de l'air et du sol avec un temps de pénétration retardé dans la masse gelée. Une accélération soudaine de la vitesse a lieu lors de la fonte des neiges et l'eau disponible, ou plutôt sa température, semble jouer un rôle essentiel dans ce phénomène. Ce travail s'inscrit dans la suite de l'étude effectuée par Mercier (2010) sur ce même glacier rocheux. Les mesures de débits étant disponibles uniquement sur une période courte, l'intérêt principal a été porté sur l'extrapolation des débits pour une période plus longue, avec un regroupement mensuel et semi-mensuel des données.

À partir des pics de débits d'un torrent, il a été possible de déterminer un modèle mathématique simulant la période de décharge de ce dernier. Compte tenu des nombreuses approximations, le résultat obtenu semble être convaincant. Cependant, une mise en parallèle entre les précipitations et les variations observées dans les débits du cours d'eau n'a pas pu être effectuée. Une approche différente permettrait peut-être de trouver cette relation et donnerait l'opportunité d'effectuer une comparaison plus poussée entre la cinématique du glacier rocheux et les débits estimés.

Mots-clés : Glacier rocheux, extrapolation débit, hydrologie

Table des matières

Résumé ..... **i**
Table des matières ..... **ii**
1. Introduction **1**
1.1 Introduction générale 1
1.2 Organisation du travail 1
2. Notions de base **2**
2.1 Glacier rocheux 2
2.2 Dynamique d'un glacier rocheux 2
2.3 Hydrologie des glaciers rocheux 3
2.4 Exemple du Haut-Val de Réchy 3
2.4.1 Situation 3
2.4.2 Le glacier rocheux des Becs de Bosson 4
3. Données de départ **5**
3.1 Données utilisées 5
3.1.1 Débits 5
3.1.2 Températures 7
3.1.3 Précipitations 7
3.1.4 Hauteur de neige 8
3.2 Résumé des données à disposition 8
4. Extrapolation mensuelle des données manquantes **9**
4.1 Période de chute de neige 9
4.2 Extrapolation des pics de débits 12
4.3 Datation des pics de débits 14
4.4 Extrapolation de la période de décharge 16
5. Extrapolation semi-mensuelle des données manquantes **22**
5.1 Extrapolation des pics de débits 22
5.2 Datation des pics de débits 23
5.3 Extrapolation de la période de décharge 25
6. Discussion des résultats obtenus **29**
7. Conclusion **31**
8. Bibliographie **32**
9. Annexes **33**

1. Introduction

1.1 Introduction générale

Les résultats récents montrent que la morphologie du terrain, l'hydrologie, la température du sol ainsi que la température de l'air sont des facteurs influençant la dynamique d'un glacier rocheux (PERMOS, 2007). Par ailleurs, l'eau semble être un paramètre influençant les mouvements des glaciers rocheux de manière saisonnière. En effet, l'infiltration d'eau dans un sol gelé provoque une augmentation brusque de la température de la glace jusqu'à 0°. L'eau résultant de la fonte des neiges ainsi que les précipitations affectent donc considérablement le régime thermique d'un glacier rocheux (PHILLIPS, 2006). Cette hypothèse a en partie été confirmée dans le cas particulier du glacier rocheux des Becs de Bossons (Vallon de Réchy, Suisse). Ce glacier rocheux a déjà été l'objet du travail de recherche de Mercier (2010) qui a procédé à une analyse de débits sur deux torrents du glacier rocheux. Les données n'étant pas disponibles de manière uniforme, il a fallu procéder à un certain nombre d'extrapolations. C'est ainsi que les pics de débits, pour les années dont les mesures sont inexistantes, ont pu être estimés à partir des hauteurs de neige maximales accumulées. Par la suite, le résultat qui en ressort est un lien non négligeable entre la quantité d'eau introduite lors de la fonte des neiges et l'augmentation des variations de vitesse du glacier rocheux. Cependant, cette comparaison n'a pas pu être effectuée pour une année entière, mais uniquement lors de l'apparition du pic de débit. En vue d'une comparaison plus approfondie entre la quantité d'eau transitant par le glacier rocheux et les mouvements de ce dernier, il apparait intéressant de poursuivre l'étude des débits pour une période plus longue. L'objectif de ce travail sera donc l'extrapolation des débits mensuels et semi-mensuels pour les années 2001 à 2011, car durant cette période les mesures de débits n'ont pas été faites.

1.2 Organisation du travail

Ce travail s'organise en quatre parties principales. La première présente les principaux concepts théoriques apparaissant dans ce travail. La deuxième comporte une synthèse des données qui ont été utilisées et les années durant lesquelles les mesures sont disponibles. La troisième se compose de l'extrapolation des données manquantes, sous forme mensuelle et semi-mensuelle. Cette partie du travail est nécessaire car les données climatiques concernant le glacier rocheux des Becs de Bossons sont incomplètes et insuffisantes pour la période d'étude. La dernière partie expose une comparaison des résultats obtenus.

2. Notions de base

2.1 Glacier rocheux

L'intérêt principal de ce travail n'étant pas porté sur l'analyse d'un glacier rocheux à proprement parler, nous allons tout de même donner quelques brèves définitions et notions théoriques utiles à la compréhension de ce travail.

Le glacier rocheux est une masse volumineuse de débris anguleux qui ennoient une lentille de glace qui flue lentement vers l'aval sous l'effet de la gravité (GUITER, 1972). Le facteur glace n'est donc pas l'unique facteur « dominant » dans un glacier rocheux mais les débris qui le composent jouent également un rôle important. Cette définition peut être vue sous un autre angle, par exemple comme la « déformation lente et continue d'un corps de pergélisol[1] sursaturé en glace » (HAEBERLI, 1985).

2.2 Dynamique d'un glacier rocheux

Contrairement aux glaciers tempérés qui glissent sur une surface de décollement, les glaciers rocheux avancent par fluage (« creeping »), c'est-à-dire que le mouvement est fonction des contraintes exercées sur le matériel[2]. La température de la glace présente dans les glaciers rocheux est relativement élevée, ce qui permet ce déplacement par fluage. Différents forages montrent qu'il existe une couche fine dans le glacier rocheux où 50 à 97% des déplacements ont lieu et que les vitesses de fluage maximales sont enregistrées à la surface (ARENSON & al, 2002). Du fait de leur composition, les glaciers rocheux n'avancent pas de manière uniforme sur toute leur surface. Ainsi, il peut y avoir des lobes qui avancent plus vite que le reste du glacier. Les vitesses des glaciers rocheux peuvent être observées à différentes échelles : saisonnière, annuelles ou pluriannuelles. Dans l'optique de ce travail ce sont surtout les échelles saisonnières et annuelles qui sont étudiées. Les variations de vitesses saisonnières semblent être influencées par la présence ou l'absence d'eau de fonte. En présence de celle-ci, les vitesses maximales ont tendance à apparaître en été, subsistant jusqu'au début de l'hiver, tandis que le printemps connait un fluage plus lent (KRAINER & MOSTLER, 2006). L'augmentation de la vitesse est relativement rapide et est corrélée avec la période de fonte des neiges tandis que le ralentissement des vitesses est moins brusque. Un manteau neigeux épais est synonyme d'un grand apport en eau au début de l'été et donc d'une augmentation de vitesse (IKEDA & al, 2008).

[1] Est considéré comme pergélisol un terrain où les températures annuelles en profondeur sont en permanence inférieures à 0°C (PERMOS, 2002).

[2] Exemple de contrainte : la gravité.

2.3 Hydrologie des glaciers rocheux

Comme les glaciers rocheux sont composés d'une certaine quantité de glace, il sont dépendant de la présence d'eau sous différentes formes. Ainsi, l'épaisseur du manteau neigeux, la saturation du terrain, la température de l'eau et les précipitations sont des facteurs hydrologiques à prendre en compte lors de l'étude des glaciers rocheux.

Différents paramètres sont généralement mesurés à proximité d'un glacier rocheux, par exemple : les températures de l'eau, les variations de débits ou encore la résistivité électrique[3]. Ce dernier paramètre permet d'estimer le temps de passage de l'eau sur le sol minéral. Le temps de résidence de l'eau au sein du glacier ou le temps nécessaire pour le traverser sont aussi des paramètres souvent étudiés.

Les processus thermiques et hydrologiques se produisant dans la couche active du pergélisol ont récemment été étudiés et il en ressort que la majorité de l'eau infiltrée provient de la fonte des neiges et que la teneur volumique relative décroit avec la profondeur de la couche active (RIST & PHILLIPS, 2005). Les précipitations météorologiques représentent l'autre source d'infiltration principale dans un glacier rocheux. C'est de l'eau relativement chaude qui va soit s'écouler le long de la couche imperméable du pergélisol (« permafrost table »), soit geler au contact prolongé avec la glace dans une couche peu perméable. La deuxième situation va provoquer un dégagement de flux de chaleur latente de fusion ayant pour effet un réchauffement rapide du permafrost jusqu'à 0°C. Cela a des conséquences importantes sur la zone active du permafrost qui va commencer à fluer à partir de cette zone saturée en eau lors des périodes de fontes (PHILLIPS, 2006).

La relation entre la pression de l'eau et la vitesse de la couche superficielle du glacier rocheux est encore mal connue car les études ont principalement été faites sur les glaciers tempérés. Dans ces derniers, la vitesse est fonction du décollement du glacier sur son socle (IKEN & BINDSCHADLER, 1986). La pression d'eau agit donc comme un lubrifiant sur la surface de glissement du glacier ce qui ne permet pas d'appliquer ces constats à un glacier rocheux, car cette surface n'existe pas. Il faut donc déterminer de quelle manière la présence d'eau interagit avec les mouvements d'un glacier rocheux.

2.4 Exemple du Haut-Val de Réchy

2.4.1 Situation

La zone étudiée se situe dans le vallon de Réchy. La longueur de la vallée est d'environ 11km et elle s'étend de Réchy (560 m) jusqu'au sommet des Becs de Bosson (3148 m). Le permafrost discontinu de cette zone permet le développement des glaciers rocheux, qui sont au nombre de dix (TENTHOREY, 1993). Dans ce travail, seul le glacier rocheux des Becs de Bosson a été étudié.

[3] Pour un exemple pratique de mesure de la résistivité électrique, consulter le travail de Mercier (2010).

2.4.2 Le glacier rocheux des Becs de Bosson

Ce glacier rocheux actif se situe à une altitude de 2810 m (pour la racine), au pied des éboulis du sommet des Becs de Bosson, et il s'étend jusqu'à 2610 m d'altitude pour le lobe frontal.

La zone de racine se trouve dans une zone défavorable au pergélisol tandis que la zone frontale se situe dans une zone favorable au permafrost. Cette situation spéciale est attribuable à la présence d'un glacier lors du petit âge glaciaire. Vers 2680 m d'altitude, le glacier rocheux se sépare en deux lobes frontaux (Figure 1). Le lobe le plus avancé est marqué par la présence de végétation isolée en quelques endroits, tandis que le lobe plus reculé se distingue par des sillons bien développés (PERRUCHOUD & DELALOYE, 2007).

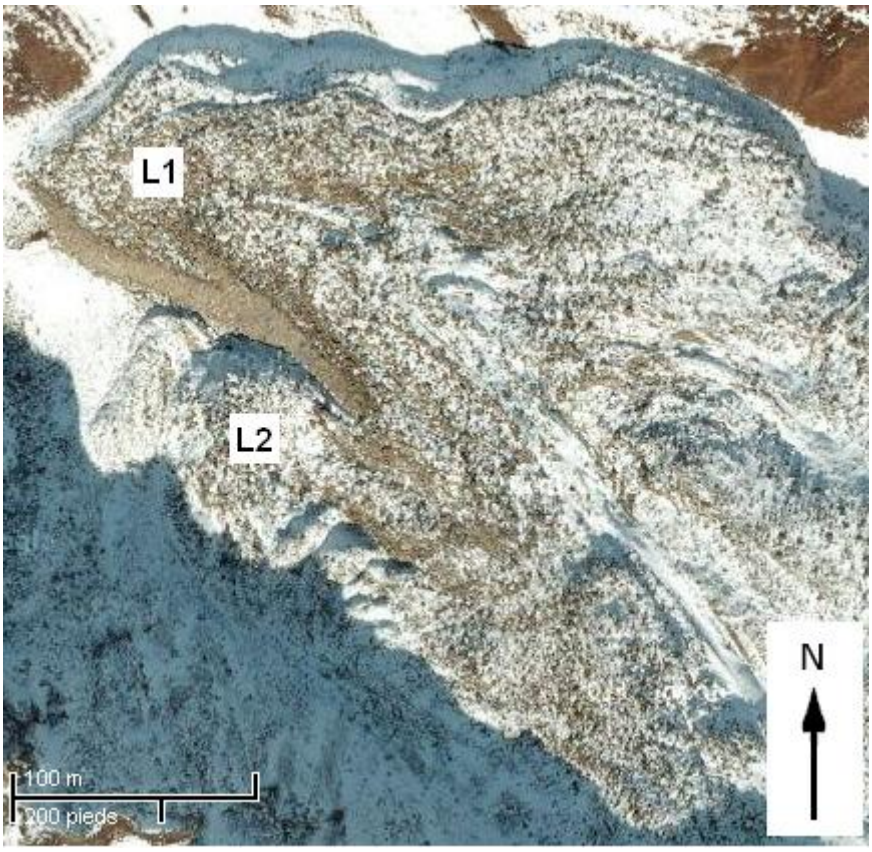


Figure 1: Glacier rocheux des Becs de Bosson (Vallon de Réchy, Suisse). Emplacement des deux lobes ; L1 : le plus avancé, L2 : le plus reculé.

3. Données de départ

Parmi les facteurs principaux influençant la formation et le cycle de vie d'un glacier rocheux, nous avons l'hydrologie (précipitations, système d'écoulement, neige, etc.), le relief, la géologie (topographie) ainsi que le climat (température de l'air, rayonnement, etc.) (PERMOS, 2007). « Le degré d'ensoleillement, le taux d'évaporation, la durée d'enneigement, l'albédo, l'exposition des versants, les pentes, sont des facteurs secondaires intéressants » (TENTHOREY, 1993).

3.1 Données utilisées

Pour réaliser ce travail, nous avons utilisé les données météorologiques suivantes : débits, températures de l'air, précipitations et hauteurs de neige. Les mesures empiriques n'étant pas disponibles de manière homogène durant notre période d'étude (1988 à 2011), il a fallu extrapoler une partie des données afin de pouvoir les comparer.

3.1.1 Débits

Les données de débits ont été collectées par G. Tenthorey pour la période allant du 1er octobre 1988 au 28 septembre 1991, puis par l'université de Fribourg et G.Tenthorey jusqu'au 29 mai 2001 (Figure 2 et). Les mesures ont été effectuées sur deux torrents, le « 139 » et le « 140 »[4] (Figure 4) et ces données m'ont été mises à disposition par J-M. Gardaz et R. Delaloye. Les conditions de maintenance difficiles sont à l'origine d'interruptions et d'imprécisions dans les séries de mesures.

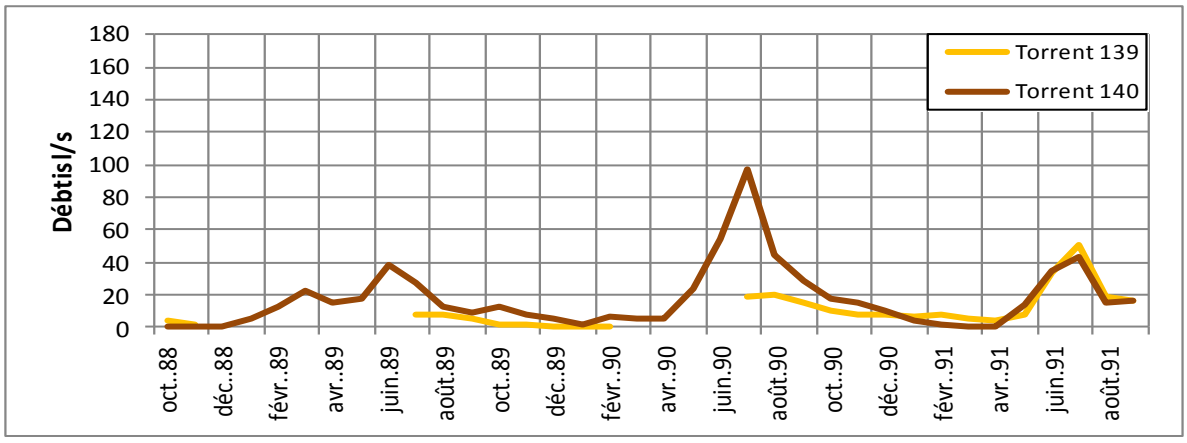


Figure 2: Moyenne mensuelle des débits mesurés par G.Tenthorey et l'Université de Fribourg (octobre 1988 à septembre 1991)

[4] Numéros issus de la thèse de G. Tenthorey, 1993 : ils correspondent aux noms de code des appareils de mesures placés sur les torrents.

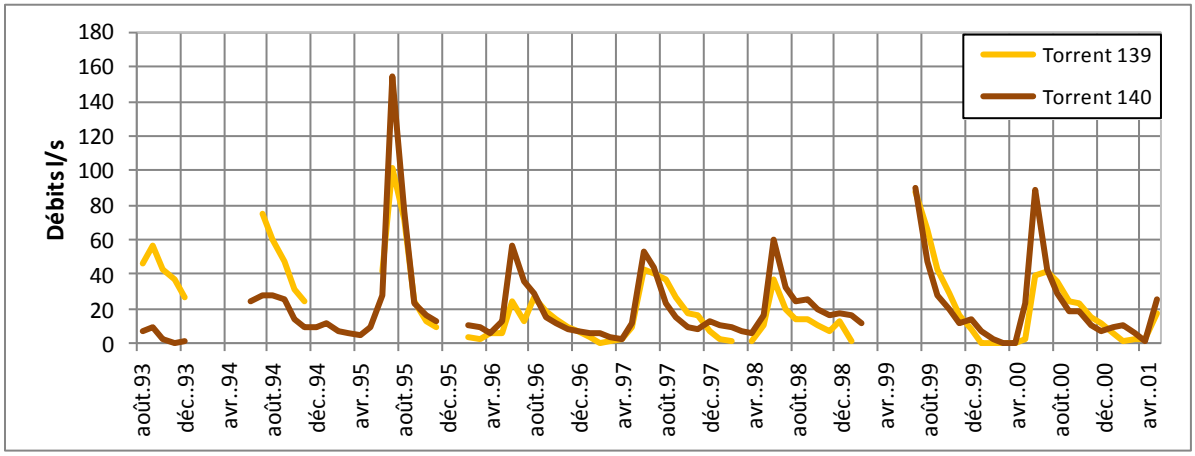


Figure 3 : Moyenne mensuelle des débits mesurés par G.Tenthorey et l'Université de Fribourg (août 1993 à février 1999)

D'une part, nous voyons qu'il y a une certaine cyclicité dans les mesures de débits, les débits maximaux apparaissant chaque année entre les mois de juin et juillet. D'autre par, après le pic de débit, il semble que les débits diminuent progressivement jusqu'à l'année suivante. Connaissant les pics de débits, il serait peut-être possible d'estimer les débits intermédiaires. C'est exactement cette idée qui sera reprise dans la suite de ce travail.

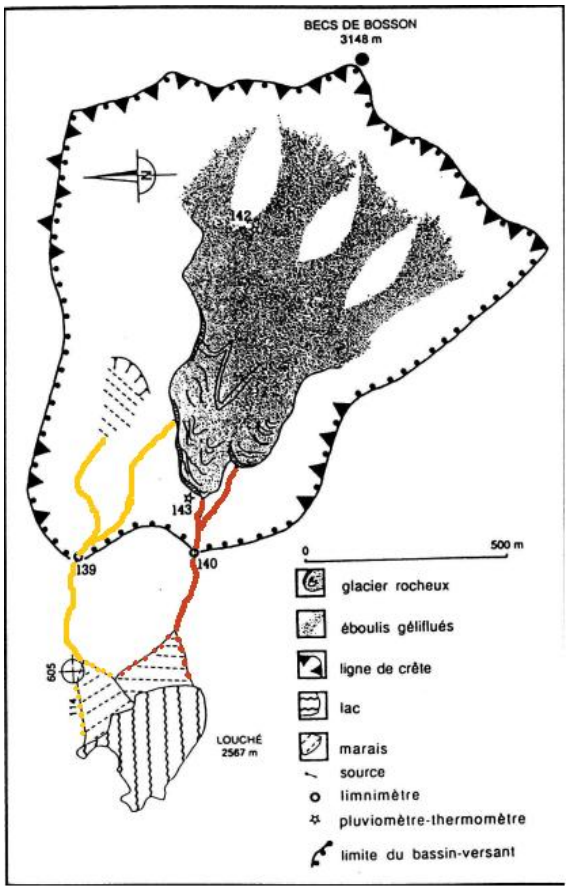


Figure 4: Bassin versant du glacier rocheux des Becs de Bosson et emplacement des appareils de mesures (TENTHOREY, 1993). En orange, le torrent "139" et en brun, le torrent "140". Les deux stations de mesures "142" et "143" sont également visibles.

3.1.2 Températures

Pour la période 1988-1991, deux stations météo (« 142 » et « 143 »[5] Figure 4) ont permis à G.Tenthorey de récolter les données de température de l'air pour les années hydrologiques[6] 1988-1989, 1989-1990, 1990-1991. L'Université de Fribourg a poursuivi les mesures jusqu'à aujourd'hui. De temps en temps, à nouveau pour des raisons techniques, il existe une discontinuité dans les mesures de température de l'air. Pour une altitude similaire et des conditions topographiques semblables, les températures de l'air ne varient que très peu spatialement. La station de mesure de température de l'air (à deux mètres du sol) au Mont-Gelé, située à une altitude de 2730 m[7], a été utilisée pour compléter les mesures manquantes. La Figure 5 illustre la bonne corrélation entre les données, ce qui nous permet d'utiliser les températures mesurées au Mont-Gelé comme représentation des températures de l'air de Réchy. La base de données Climap[8] de l'Université de Fribourg nous a permis d'obtenir ces données de température manquantes.

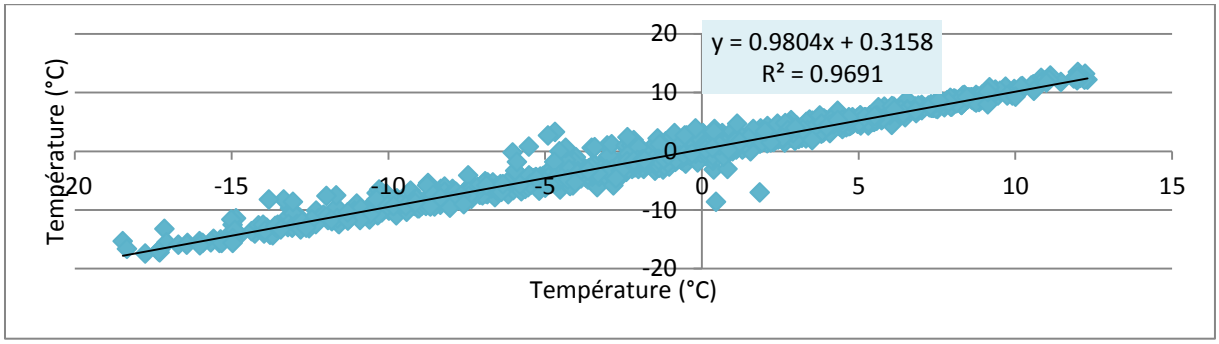


Figure 5: T° de l'air journalière mesurée à Réchy (abscisse) et T° celle du Mont-Gelé (ordonnée) pour la période 01.08.1993-31.08.1997.

La différence de température entre les deux lieux est donnée en Annexe 1. La différence de température n'est pas constante sur toute l'année mais nous constatons que la majorité des données se situe dans l'intervalle allant de 0 à 1° C. Il faut aussi remarquer que pour les années 1995 et 1996, il y a des périodes où les différences sont plus grandes, ce qui pourrait être expliqué par des irrégularités dans les mesures.

3.1.3 Précipitations

Les mesures de précipitations à Réchy ont également été effectuées par les deux stations météo « 142 » et « 143 » pour la période allant de 1988 à 1997. Cependant, la période de mesure étant

[5] Numéros des stations météo, issus de la thèse de G. Tenthorey, 1993.

[6] Une année hydrologique débute le 1er octobre et se termine le 30 septembre.

[7] Altitude similaire à celle du glacier rocheux des Becs de Bosson qui s'étend de 2610 m à 2810 m.

[8] Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse

insuffisante pour effectuer ce travail, les mesures récoltées par la station de mesure d'Evolène-Villaz[9] ont été utilisées en plus. Il a été admis que les conditions de pluviométrie étaient identiques à celle de Réchy car la station météo d'Evolène-Villaz se situe dans la vallée voisine. Il s'agit donc la station la plus proche spatialement. A nouveau, la base de données du logiciel Climap a été utilisée pour obtenir les données sur la période d'étude qui nous intéresse.

3.1.4 Hauteur de neige

Pour ce paramètre, il n'existe pas de mesures disponibles pour le site du glacier rocheux des Becs de Bosson. Toutefois, les hauteurs de neige ont été mesurées à Orzival[10] par le SLF[11] pour la période 1998 à 2008. Ces données ont été précieuses pour déterminer les facteurs de conversion entre les quantités de précipitations à Evolène (disponibles sur toute la période d'étude) et les hauteurs de neige à Orzival pour la période 1990-1998 ainsi que 2008-2011. Les températures de l'air mesurées sur le site du glacier rocheux ont permis de déterminer la date de transition entre les précipitations sous forme de pluie et celle de neige.

3.2 Résumé des données à disposition

Les données brutes à disposition sont majoritairement journalières et dans certains cas même plus fréquentes. Compte tenu du degré de précision souhaité et de la longueur de la période d'étude, toutes les données ont été converties en données mensuelles et semi-mensuelles. Cependant, les données journalières ont été utilisées pour déterminer de manière plus précise la date à laquelle les précipitations tombent sous forme de neige. Le Tableau 1 donne un résumé de toutes les données disponibles pour la période d'étude.

Tableau 1 : Données à disposition

Paramètres	**Période**																							
	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Débits torrent « 139 »	Tenthorey				Université de Fribourg																			
Débits torrent « 140 »	Tenthorey				Université de Fribourg																			
T° air Réchy	Tenthorey				Université de Fribourg																			
T° air Mont-Gelé						MétéoSuisse																		
Précipitations Réchy	Tenthorey				Université de Fribourg																			
Précipitations Evolène		MétéoSuisse																						
Hauteur neige Orzival										SLF														

[9] Station Evolène-Villaz, altitude : 1825 m, abréviation EVO

[10] Station Imis Orzival (ANV 2), altitude : 2630 m

[11] SLF : Institut pour l'étude de la neige et des avalanches, Davos

4. Extrapolation mensuelle des données manquantes

Les deux stations météo « 142 » et « 143 » ainsi que la base de données Climap fournissent une quantité de mesures relativement importante sur les précipitations durant notre période d'étude. Cependant, la littérature attribue les vitesses maximales des glaciers rocheux à la période estivale et, par conséquent, aux quantités d'eau amenées par la fonte du manteau neigeux. Une étude de la cinématique du glacier rocheux des Becs de Bosson a déjà été effectuée à courte échelle, pour la période 2004 à 2006 et le résultat qui en ressort est que les vitesses maximales horizontales apparaissent vers la fin de l'été et perdurent jusqu'au début de l'hiver (PERRUCHOUD & DELALOYE, 2007). Il est donc intéressant d'étudier la couverture neigeuse et les précipitations hivernales.

4.1 Période de chute de neige

Comme hypothèse de départ il a été admis que les chutes de neiges régulières s'étendent sur la période allant de début novembre jusqu'à fin mai. Une étude approfondie des températures journalières relevées au Mont-Gelé a été effectuée afin d'estimer le plus précisément possible la période de chute de neige (Figure 6). Au moment de la fonte du manteau neigeux, l'apport d'eau varie en fonction de la quantité de neige disponible. Il a donc fallu trouver une corrélation entre les précipitations à Evolène et la hauteur de neige à Orzival. Mercier (2010) a considéré que la hauteur de neige maximale sur une moyenne de 14 jours consécutifs était représentative de la quantité d'eau disponible au moment de la fonte. Dans le cadre de ce travail, cette même considération a été reprise.

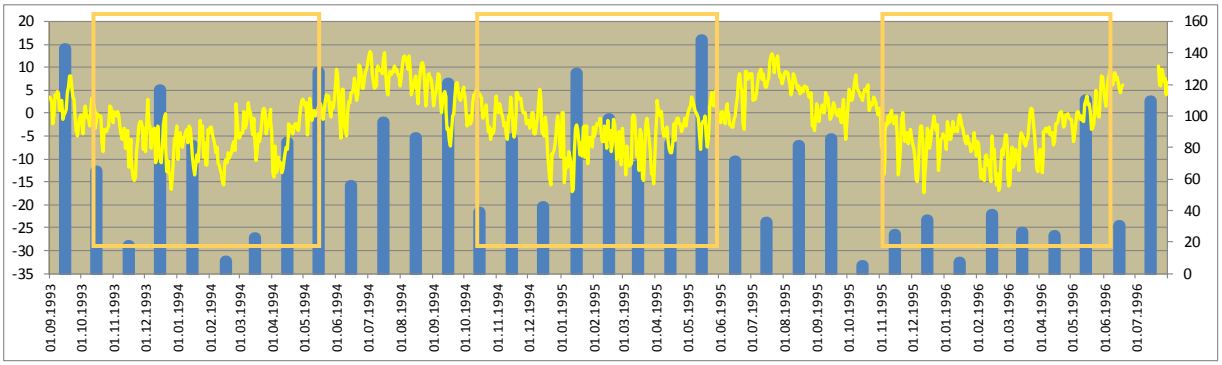


Figure 6 : Précipitations à Evolène (bleu) et températures de l'air au Mont-Gelé (jaune). La période des chutes de neige (novembre-mai) a été modifiée en fonction de l'analyse des températures de l'air inférieures à zéro au Mont-Gelé. Les rectangles orange représentent le résultat de ces modifications.

L'analyse des données de températures a été faite pour les années 1994 à 2011 ce qui a permis de procéder à de multiples corrections sur les périodes de précipitations hivernales, avec une précision de deux semaines. Cette première partie du travail a permis d'établir une bonne corrélation (Figure 8) entre les précipitations hivernales de la période corrigée d'après les températures de l'air au Mont-Gelé et la hauteur du manteau neigeux (Figure 7). Le Tableau 2 présente les corrections effectuées sur

les périodes hivernales pour les années durant lesquelles les mesures sont disponibles ainsi que la somme des précipitations sur les périodes hivernales modifiées.

Tableau 2: Précipitations sur les périodes hivernales corrigées à Evolène et hauteurs du manteau neigeux à Orzival.

Année	Hauteur de neige maximale Orzival (moyenne sur 14 jours)			Précipitations Evolène		
	Début des 14 jours	Fin des 14 jours	Hauteur (cm)	Hiver (novembre-mai) (mm)	Correction avec les températures	Hiver corrigé (mm)
1990	-	-	-	331	-	331
1991	-	-	-	338	-	338
1992	-	-	-	339	-	339
1993	-	-	-	364	-	364
1994	-	-	-	457	Plus ½ octobre, moins ½ mai	**379**
1995	-	-	-	653	Plus ½ octobre	**684**
1996	-	-	-	265	-	265
1997	-	-	-	336	-	336
1998	11 avr.	24 avr.	170	282	Plus ½ octobre	**288**
1999	23 févr.	8 mars	310	431	-	431
2000	20 févr.	4 mars	235	324	-	324
2001	16 avr.	29 avr.	252	408	Moins ½ mai	**390**
2002	20 mars	2 avr.	185	355	Moins ½ mai	**296**
2003	2 févr.	15 févr.	208	344	Moins 1/3 mai	**337**
2004	17 janv.	30 janv.	212	332	Plus 1/3 octobre, moins ½ mai	**331**
2005	17 avr.	30 avr.	169	303	Moins ½ mai	**274**
2006	5 avr.	18 avr.	226	352	-	352
2007	19 mars	1 avr.	192	370	Moins 1/3 mai	**288**
2008	22 mars	4 avr.	232	291	Plus ½ octobre, plus ½ juin	**355**
2009	-	-	-	395	Plus ½ octobre, moins ½ mai	**409**
2010	-	-	-	379	-	379
2011	-	-	-	216	Plus 1/3 octobre, moins ½ mai	**200**

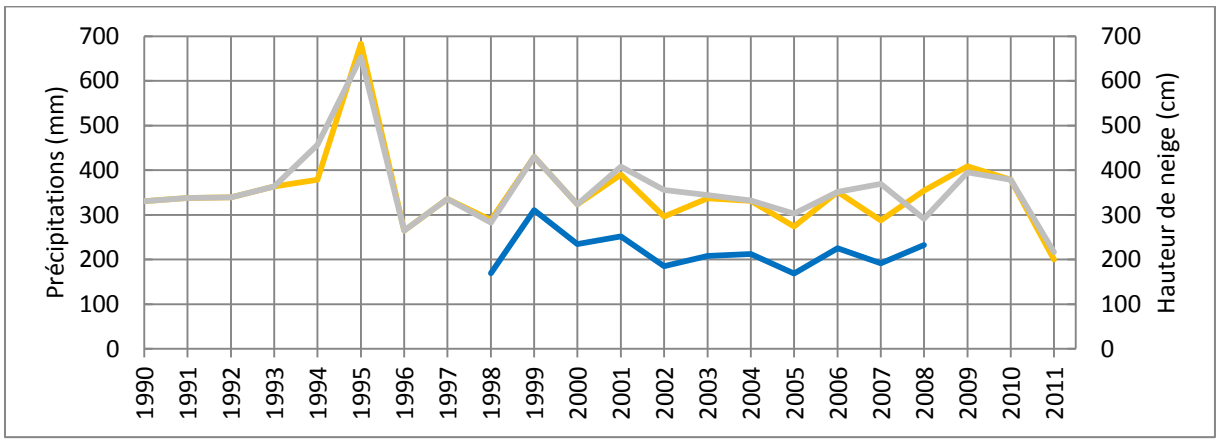


Figure 7: Précipitations à Evolène et hauteur de neige maximale à Orzival. En bleu, la hauteur de neige maximale à Orzival sur une moyenne de 14 jours. La courbe grise représente les précipitations hivernales à Evolène (novembre-mai) et la courbe orange les précipitations sur les périodes hivernales corrigées.

Nous constatons qu'il y a une plus grande ressemblance entre la courbe orange et courbe bleue qu'entre la courbe grise et la bleue, c'est-à-dire que les précipitations sur les périodes hivernales

corrigées sont plus similaires aux hauteurs de neige que les précipitations sur la période novembre à mai. Cette plus grande similitude est mise en évidence dans la Figure 8.

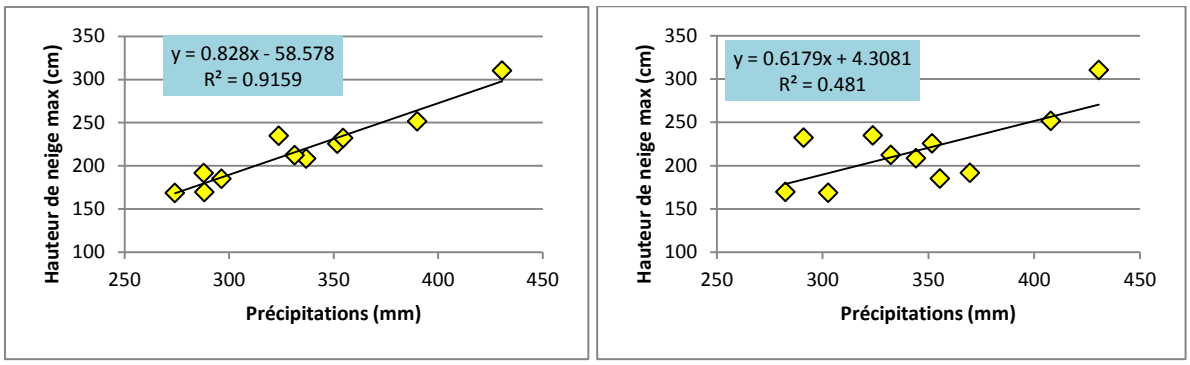


Figure 8 : Hauteurs de neige maximales (moyenne sur 14 jours) mesurées à Orzival et précipitations sur les périodes hivernales corrigées à Evolène *(à gauche)* ainsi que précipitations sur les périodes novembre-mai *(à droite)*.

Cette bonne corrélation a déterminé l'équation qui a permis d'estimer les hauteurs de neige probables à Orzival en fonction des précipitations à Evolène pour les années durant lesquelles il n'y a pas de mesures. Les deux périodes concernées sont : 1990 à 1997 et 2009 à 2011.

Une analyse de la courbe de tendance obtenue a été faite à l'aide du calcul des écarts-types pour les coefficients. À cet effet, la fonction « DROITEREG » du logiciel Excel a été utilisée. La courbe de tendance obtenue dans la Figure 8 étant de la forme $y = ax+b$, le Tableau 3 donne les valeurs des écarts-types obtenues.

Tableau 3: Valeurs de la fonction "DROITEREG".

Coefficient « a »	0.828	-58.578	Constante « b »
Ecart-type de « a »	0.084	28.120	Ecart-type de « b »

Maintenant que nous avons les écarts-types pour les coefficients, il est possible d'obtenir un intervalle de confiance pour la courbe de tendance. En utilisant deux écarts-types de part et d'autre des coefficients nous obtenons un « intervalle de confiance » à 95.4%. Le Tableau 4 présente les équations des droites obtenues en utilisant deux écarts-types. L'Annexe 2 permet d'avoir une illustration des résultats obtenus.

Tableau 4: Courbes de tendances avec deux écarts-types.

Intervalle -2 écarts-types	0.66x-114.818
Intervalle +2 écarts-types	0.996x-2.338

4.2 Extrapolation des pics de débits

Comme la majorité des données à disposition, les mesures journalières de débits ont été transformées en valeurs mensuelles. Dans une deuxième partie du travail, ces mêmes données ont été converties en valeurs semi-mensuelles afin d'effectuer une comparaison avec les données mensuelles. La quantité d'eau lors de la fonte ainsi que les précipitations durant les périodes avec des températures supérieures à zéro sont les deux facteurs qui ont été pris en compte pour l'influence des variations de débits. Les pics de débits ont d'abord été extrapolés et la période de décharge ensuite. Afin de procéder à l'extrapolation de la période de décharge, il a fallu estimer la date d'apparition des débits. Pour des raisons pratiques, seuls les mois d'apparition, respectivement les semi-mois, des débits ont été retenus, la méthode utilisée ne permettant pas une plus grande précision. Comme Mercier (2010) l'a déjà suggéré dans son travail, seul le torrent « 140 » a été étudié, car il semble être plus réactifs à l'apport d'eau lors de la fonte de neige. Les valeurs maximales de débits apparaissant lors de la fonte de neige sont étroitement liées à la hauteur de neige accumulée (Figure 9).

Les données des pics débits sont connues pour les années 1990, 1991, 1995, 1996, 1997, 1998, 2000 (Tableau 6), tandis que les hauteurs de neige ont uniquement été mesurées pour la période 1998 à 2008. Les années 1998 et 2000 sont donc les seules durant lesquelles les pics de débits ainsi que les hauteurs de neige sont connues, ce qui représente un nombre de valeurs trop petit. En utilisant l'équation obtenue à la Figure 8, les hauteurs de neige pour les années 1990 à 1997 ainsi que 2009 à 2011 ont pu être obtenues par extrapolation (Tableau 5).

Tableau 5: Hauteurs de neige extrapolées pour les périodes 1990 à 1997 ainsi que 2009 à 2011 d'après la courbe de tendance obtenue à la Figure 8.

Années	Précipitations hivernales corrigées à Evolène (mm)	Hauteur de neige extrapolée (cm) d'après la Figure 8.
1990	331	0.828*331-58.578=215
1991	338	221
1992	339	222
1993	364	242
1994	379	255
1995	684	507
1996	265	161
1997	336	219
2009	409	280
2010	379	255
2011	200	107

Ces valeurs ont permis de compléter le Tableau 6 et ainsi de pouvoir étudier le lien entre l'amplitude des pics de débits et les hauteurs de neige (Figure 9).

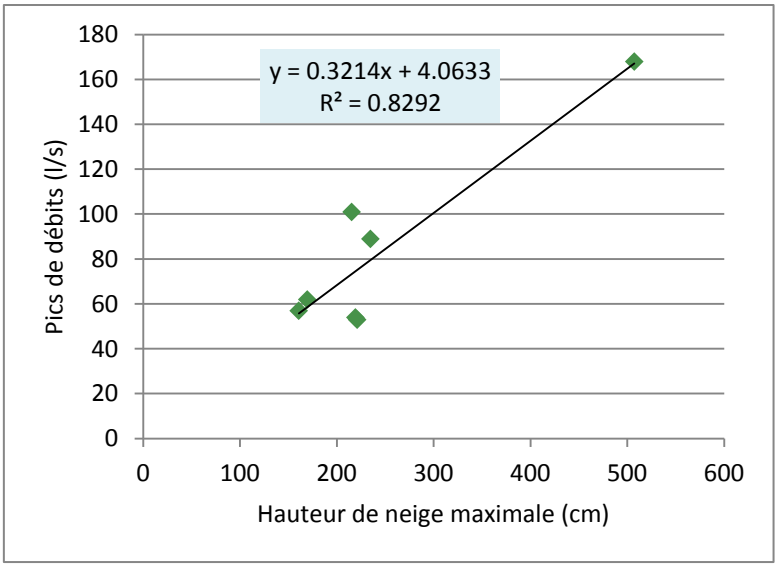


Figure 9: Amplitude des pics de débits (maximum sur une moyenne de 30 jours) et hauteur de neige à Orzival (maximum sur une moyenne de 14 jours) accumulée lors de l'hiver. Les hauteurs de neige estimées pour les années 1990, 1991, 1995, 1996, 1997 ont ainsi été utilisées.

Le Tableau 6 résume les données qui ont été extrapolées (en bleu), à savoir les hauteurs de neige à partir des précipitations sur les périodes hivernales corrigées ainsi que les pics de débits obtenus à partir ces hauteurs de neige.

Tableau 6: Pics de débits (l/s) mesurés et pics de débits extrapolés à partir des hauteurs de neige (mesurées et extrapolées).

Année	Hauteur de neige (mesurée et extrapolée)	Période des débits maximaux (sur moyenne de 30 jours)	Pics de débits mesurés (l/s)	Pics de débits extrapolés (d'après la Figure 9)
1990	**215**	29.06 - 28.07	101	
1991	**221**	22.06 - 21.07	53	
1992	**222**			0.3214*222+4.0633 = **76**
1993	**242**			**82**
1994	**255**			**86**
1995	**507**	11.07 - 09.08	168	
1996	**161**	25.05 - 23.06	57	
1997	**219**	06.06 - 05.07	54	
1998	170	03.06 - 02.07	62	
1999	310			**104**
2000	235	02.06 - 01.07	89	
2001	252			**85**
2002	185			**64**
2003	208			**71**
2004	212			**72**
2005	169			**58**
2006	226			**77**
2007	192			**66**
2008	232			**79**
2009	**280**			**94**
2010	**255**			**86**
2011	**107**			**38**

Les données obtenues jusqu'à maintenant sont illustrées dans l'Annexe 3. En vue de l'extrapolation de la période de décharge, la question de la date d'apparition des pics de débits s'est révélée intéressante. Une fois cette date estimée, il est plus facile de procéder à l'extrapolation des débits manquants en fonction des pics apparus.

4.3 Datation des pics de débits

Les données qui ont été utilisées dans cette partie du travail sont les températures de l'air au Mont-Gelé ainsi que les pics de débits présents dans le Tableau 6. Cependant, seule une partie des données est exploitable. Les mesures de température de l'air ont été effectuées à partir de 1994 jusqu'à aujourd'hui, c'est-à-dire que les pics de débits des années 1990 et 1991 n'ont pas pu être utilisés. Dans un premier temps, une moyenne mobile sur 30 jours des débits a été calculée pour la période des débits maximaux et en parallèle une moyenne mobile sur 40 jours des températures de l'air au Mont-Gelé. Une fois le débit maximal trouvé, les 29 jours le précédant ainsi que le jour du débit maximum ont été pris en compte pour déterminer une relation entre les débits maximaux et les températures. L'exemple pour l'année 1995 est donné en Annexe 4 et ces données font parties des données utilisées pour la Figure 10. Les données restantes proviennent des années 1996, 1997, 1998, 2000 et une bonne corrélation entre les débits et les températures en est ressortie. L'Annexe 5 donne la répartition des T° en fonction des années respectives.

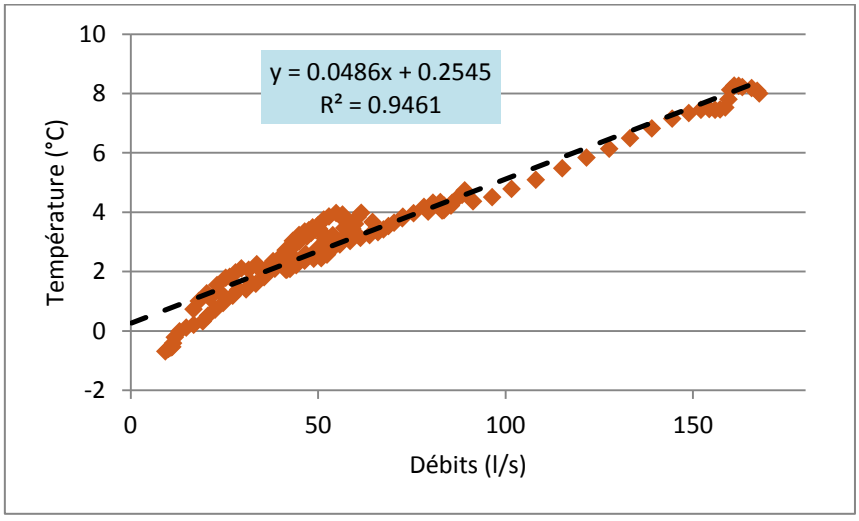


Figure 10: Débits (sur moyenne sur 30j) et T° de l'air au Mont Gelé (moyenne sur 40j) pour la période des 30 jours précédant l'apparition du maximum. Les années utilisées sont : 1995, 1996, 1997, 1998 et 2000.

Afin de confirmer cette bonne relation, le même travail a été effectué avec les cinq débits maximaux de chaque année uniquement. La moyenne des températures sur les 40 jours précédents le pic de débit a de nouveau était utilisée et mise en relation avec les valeurs des débits maximaux (Figure 11). Cette très forte corrélation a permis d'effectuer l'estimation de la date des pics de débits extrapolés pour les années 1994, 1999 ainsi que pour les années 2001 à 2011. Les données de températures étant

manquantes pour les années 1992 et 1993, les mois d'apparition des pics de débits de ces deux années n'ont pas pu être estimés.

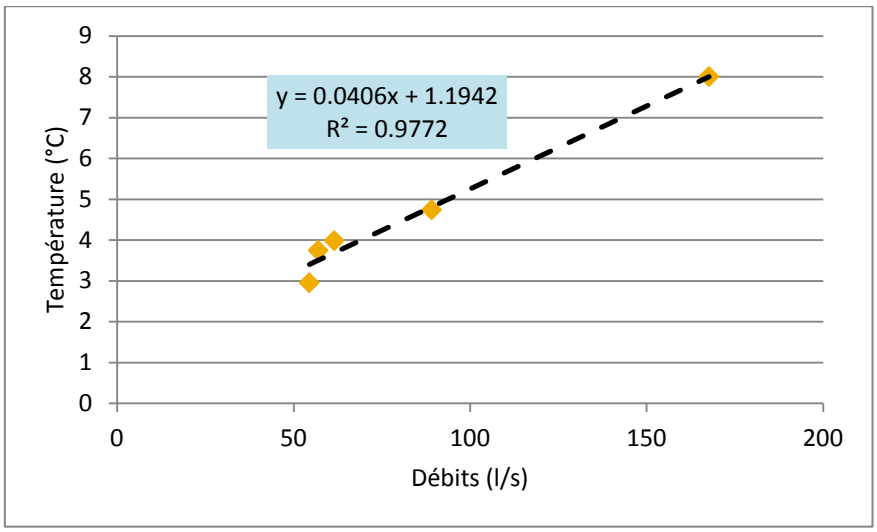


Figure 11: Débits maximaux (sur une moyenne de 30 jours) et T° au Mont-Gelé (sur une moyenne de 40 jours) le jour où le pic a lieu.

Cette méthode a été appliquée sur un nombre de jours différent pour le calcul des moyennes de températures (moyenne sur 7 jours, 15 jours, et 30 jours) mais la moyenne des températures sur les 40 jours avant le pic de débit a donné le résultat le plus concluant (Annexe 6). Après avoir estimé la température avec l'équation de la Figure 11, il a fallu rechercher cette dernière parmi les moyennes de températures calculées pour les années 1994, 1999 ainsi que 2001 à 2011. Les moyennes de températures sur 40 jours augmentant progressivement depuis le début de l'année jusqu'à la fin de l'été, il a été considéré que la première fois que la température estimée était dépassée le pic avait eu lieu. Cette démarche peut être discutée du fait que pour certaines années les moyennes de température sur 40 jours sont proches et se situent entre deux mois. Cependant, une fois la méthode appliquée aux pics de débits dont le mois d'apparition était connu, le résultat s'est avéré relativement concluant. (Tableau 7).

Tableau 7: Estimation de la date d'apparition des pics de débits (moyenne sur 30 jours) en fonction de la température (moyenne sur 40 jours) au Mont-Gelé.

Année	Valeur des pics de débits mesurés et extrapolés (l/s)	T° estimée d'après la Figure 11	T° d'après les mesures	Mois (mesuré)	Mois (estimé)
1994	**86**	*4.69*			***Juillet***
1995	167	*7.97*	8.00	Août	***Août***
1996	57	*3.51*	3.74	Juin	***Juin***
1997	54	*3.39*	2.95	Juillet	***Juin***
1998	62	*3.71*	3.98	Juillet	***Juin-Juillet***
1999	**104**	*5.42*			***Juillet***
2000	89	*4.81*	4.74	Juillet	***Juillet***
2001	**85**	*4.65*			***Juillet***
2002	**64**	*3.79*			***Juin***
2003	**71**	*4.08*			***Juin***
2004	**72**	*4.12*			***Juillet***
2005	**58**	*3.55*			***Juin***
2006	**77**	*4.32*			***Juillet***
2007	**66**	*3.87*			***Juillet***
2008	**79**	*4.40*			***Juillet***
2009	**94**	*5.01*			***Juillet***
2010	**86**	*4.69*			***Juillet***
2011	**38**	*2.74*			***Juin***

Comme déjà mentionné auparavant, les données mensuelles ont principalement été utilisées dans ce travail. Malheureusement, les données concernant les débits mensuels n'ont pas pu être extrapolées. Mais comme nous venons de le voir, les pics de débits ont été extrapolés pour la majorité de la période d'étude. Après avoir analysé les données, il en ressort que l'écart entre les pics de débits et les maximas des débits mensuels est relativement petit. Il a dès lors été considéré que les pics de débits extrapolés pouvaient remplacer les débits mensuels maximaux. Dès que les pics de débits ont été datés, il a été question d'estimer la période de décharge suivant le pic de débits.

4.4 Extrapolation de la période de décharge

Comme nous venons de le voir, il n'y a qu'un seul pic de débit qui apparait durant une année. La période de décharge représente ici la période suivant ce pic de débit, période durant laquelle les débits mensuels diminuent car le système se vide progressivement. Cette partie du travail est la plus technique d'un point de vue mathématique. Afin de procéder à l'extrapolation des débits mensuels après le pic de débit, il a fallu analyser la courbe formée par les données mesurées pour les années 1995, 1996, 1997, 1998, 1999 et 2000. Ce sont les seules années qui ont été utilisées afin d'établir une méthode d'extrapolation car les données sont continues depuis le pic de débit jusqu'à la fin de la période de décharge (Annexe 3). L'année 1999 a été utilisée même si la valeur du pic de débit est extrapolée car les mesures de débits ont été faites durant la période de décharge. La démarche peut se

résumer en deux étapes : tout d'abord une interpolation des données de débits mesurées a été faite et la fonction obtenue a permis l'extrapolation des valeurs concernant la période de décharge pour les pics de débits estimés. Un polynôme d'interpolation unique pour toute la période n'a pas abouti à un résultat concluant car l'oscillation de ce dernier était trop grande entre les valeurs interpolées. La recherche s'est alors orientée vers l'interpolation « par année », c'est-à-dire qu'un polynôme d'interpolation différent pour chaque année est calculé. La fonction $\frac{1}{x}$ a permis d'obtenir de bons résultats. Ce choix est motivé par la disposition des données mesurées qui ressemble fortement au graphique de cette fonction (Figure 12).

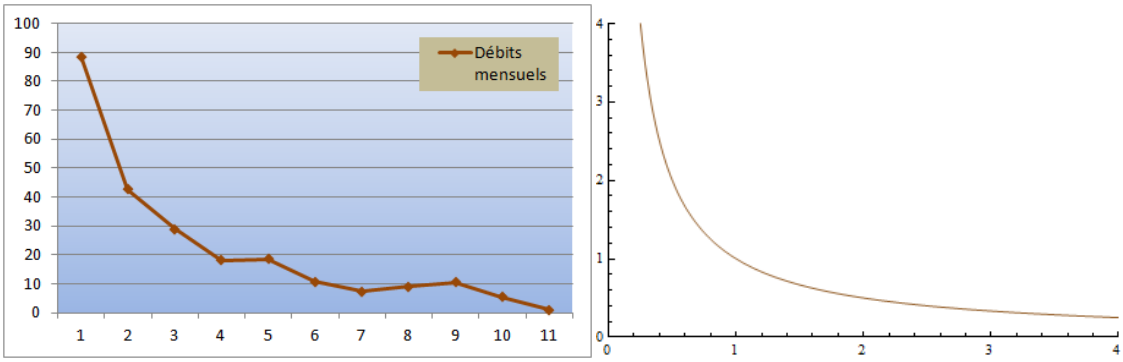


Figure 12: A gauche, les débits mensuels (l/s) pour l'année 2000 (torrent "140") et à droite le graphique de la fonction 1/x.

Ci-dessus il n'y a que l'année 2000 qui est donnée en exemple, mais il est aisé de voir que la distribution des débits mensuels pour les autres années est similaire (Annexe 3). Afin d'interpoler au mieux les données de débits pour les années 1995, 1996, 1997, 1998, 1999 et 2000, le logiciel Mathematica a été utilisé. Par convention, les mois ont été numérotés de la manière suivante : le numéro 1 est attribué au mois durant lequel le pic de débit a lieu et la numérotation se fait jusqu'à l'avant dernier mois précédent le pic de l'année suivante (Annexe 7). Après avoir homogénéisé les données mensuelles de débits selon la numérotation présentée ci-dessus, la fonction « Fit » du logiciel Mathematica a permis d'obtenir une interpolation des débits mensuels selon la méthode dite des « moindres carrés »[12]. Cette fonction est très utile, car l'utilisateur a la possibilité de définir la base qui sera utilisée pour déterminer le polynôme d'interpolation. Après plusieurs tentatives et en s'inspirant de la disposition des données, c'est la base $\{1, \frac{1}{x}\}$ qui a été utilisée, c'est-à-dire que les polynômes d'interpolations sont du type :

$$P(x) = a * \frac{1}{x} + b * 1, \qquad a, b \in \mathbb{R}.$$

L'élément *1* de la base permet l'ajout d'une constante *b* dans le polynôme. L'inconnue *x* représente les mois suivant le pic de débit, c'est-à-dire qu'elle peut prendre les valeurs allant de deux jusqu'à dix ou

[12] Pour plus d'informations sur la méthode des moindres carrés, consulter par exemple l'ouvrage (HUFFEL & VANDEWALLE, 1991).

onze, en fonction de l'apparition du pic de l'année suivante. Une analyse détaillée et de plus amples informations concernant cette inconnue seront données plus loin dans ce travail. Afin d'illustrer les résultats obtenus, voici le détail de la démarche pour l'année 2000. Toutes ces opérations s'effectuent avec le logiciel Mathematica. Les calculs pour les autres années se trouvent en Annexe 8.

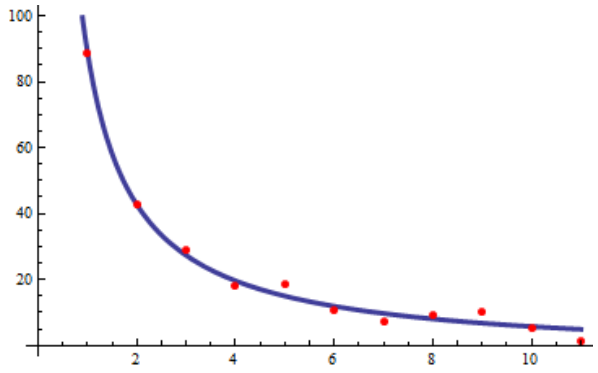
Tout d'abord la liste contenant les débits mensuels est créée :

$$données7 = \{\{1, 88.43\}, \{2, 42.68\}, \{3, 28.9\}, \{4, 18.13\}, \{5, 18.58\}, \{6, 10.63\}, \{7, 7.26\}, \{8, 9.1\}, \{9, 10.43\}, \{10, 5.48\}, \{11, 1.1\}\};$$

Ensuite, la fonction « Fit » calcule le polynôme d'interpolation pour la liste de données ci-dessus :

$$Polynôme7 = Fit[données7, \{1, 1/x\}, x] = -3.46906 + \frac{92.348}{x}$$

Afin d'avoir une information visuelle du résultat, le polynôme d'interpolation et les débits mensuels sont représentés sous forme graphique :



Les différents polynômes interpolent relativement bien les débits mensuels et à partir de là il a fallu trouver une méthode afin de pouvoir les utiliser avec les pics de débits estimés. Le Tableau 8 présente tous les polynômes obtenus. Comme les pics de débits estimés sont disponibles pour toute la période d'étude, la recherche s'est portée sur les débits mensuels maximaux, car il a été admis que les pics de débits représentaient les débits mensuels maximaux. Une bonne corrélation a pu être trouvée entre les débits mensuels maximaux et les coefficients des polynômes d'interpolation.

Tableau 8: Débits mensuels mesurés (l/s) et polynômes d'interpolation pour la période de décharge.

Année	Débits mensuels maximum (l/s)	Polynôme d'interpolation	
		Coefficient 1/x	Constante
1995	154	168.42	-16.24
1996	57	62.06	-0.63
1997	53	55.91	2.76
1998	60	50.09	9.14
1999	104	114.60	-10.24
2000	88	92.35	-3.47

À partir de ces données, une équation permettant de calculer les coefficients des polynômes à partir des débits mensuels maximaux a été obtenue (Figure 13).

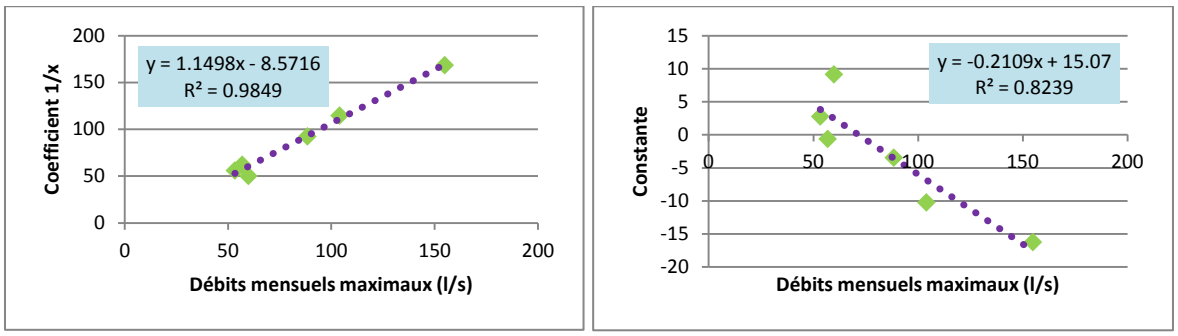


Figure 13: A gauche, débits mensuels maximaux (l/s) et coefficients de 1/x des polynômes d'interpolation. A droite, débits mensuels maximaux (l/s) et constantes des polynômes d'interpolation.

La corrélation entre les débits maximaux et les coefficients des variables 1/x est meilleure que celles des constantes, mais cette dernière est suffisante pour être utilisée. À l'aide de ces deux équations, il est maintenant possible de déterminer les coefficients des polynômes pour les années dont le pic de débits a été estimé et daté auparavant, c'est-à-dire les années 2001 à 2011 (Tableau 9).

Tableau 9: Détermination des polynômes extrapolant les débits mensuels de la période de décharge pour les années 2001 à 2011.

Année	Pics de débits du Tableau 6 (l/s)	Polynômes d'après les pics de débits et Figure 13		Valeurs (l/s) après :	
		Coefficients 1/x	Constantes	11 mois	12 mois
2001	85	89.16	-2.85	4.57	4.00
2002	64	65.02	1.57	6.99	6.57
2003	71	73.06	0.10	6.18	5.72
2004	72	74.21	-0.11	6.07	5.59
2005	58	58.12	2.84	7.68	7.31
2006	77	79.96	-1.17	5.49	4.98
2007	66	67.32	1.15	6.76	6.33
2008	79	82.26	-1.59	5.26	4.74
2009	94	99.51	-4.75	3.54	2.90
2010	86	90.31	-3.07	4.46	3.88
2011	38	35.12	7.06	9.98	9.76

Nous comprenons mieux l'intérêt de pouvoir dater les pics de débits extrapolés, car l'extrapolation de la période de décharge suivant le pic dépend non seulement des valeurs de ces derniers mais aussi du mois durant lequel ils se produisent. D'après la numérotation proposée ci-dessus, le 1 correspondant au mois du pic de débits, il n'est pas surprenant de remarquer que les valeurs des coefficients de la variable 1/x soient relativement proches des valeurs de pics de débits (Tableau 9). Plus précisément, en additionnant uniquement les valeurs des coefficients et des constantes, on obtient une nouvelle valeur assez proche du pic de débit. Cependant, la valeur du pic de débit n'est pas importante, car elle a déjà

fait l'objet d'une estimation ci-dessus. Ce sont les valeurs des débits mensuels suivant le pic qui nous intéressent et nous allons maintenant voir comment les calculer à partir des polynômes obtenus pour chaque année. Par convention, avril est le dernier mois pour lequel l'estimation est faite car il est possible que la fonte des neiges pour l'année suivante commence au mois de mai déjà. À titre d'exemple, le calcul des valeurs de débits mensuels pour l'année 2001 est présenté ci-dessous, le calcul pour les autres années étant similaire. Le polynôme obtenu d'après le Tableau 9 est le suivant :

$$P(x) = 89.16 * \frac{1}{x} - 2.85$$

Il suffit maintenant de remplacer *x* par des nombres entiers afin d'obtenir une estimation de la valeur mensuelle du débit. D'après le Tableau 7, le mois du pic de débit a été estimé à juillet, en remplaçant *x* par 2, on obtient donc l'estimation du débit pour le mois d'août et ainsi de suite pour les mois suivants. Le Tableau 10 résume les valeurs estimées pour tous les mois de l'année 2001.

Tableau 10: Estimation des débits mensuels de l'année 2001, pour les mois suivant le pic de débit.

Mois	Numéro correspondant (1 = mois du pic de débit)	Valeur mensuelle de débit estimée
Août	2	89.16*(1/2)-2.85 = **41.72**
Septembre	3	**26.86**
Octobre	4	**19.43**
Novembre	5	**14.98**
Décembre	6	**12.00**
Janvier	7	**9.88**
Février	8	**8.29**
Mars	9	**7.05**
Avril	10	**6.06**

Nous constatons que la disposition de ces données (Figure 14) est proche de celle des données observées pour les années durant lesquelles les mesures ont été faites.

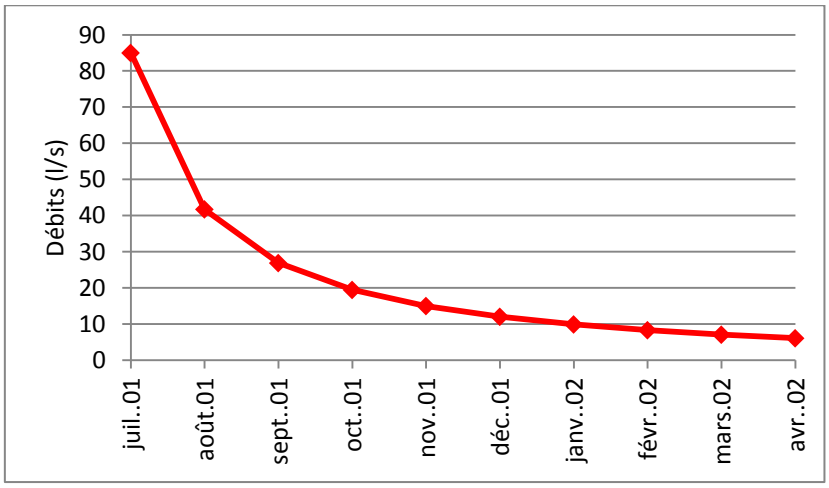


Figure 14: Débits mensuels calculés (l/s) pour l'année 2001.

La représentation graphique des valeurs obtenues pour la période 2001 à 2011 est proposée en Annexe 9. Une fois ce résultat obtenu, il a été question de savoir si le modèle pouvait être amélioré. La première idée qui a été étudiée est la précision des valeurs de débits utilisées, jusqu'à présent seules les valeurs mensuelles ayant été prises en compte. Le même travail effectué jusqu'à présent pour l'extrapolation des débits mensuels a été fait avec un regroupement semi-mensuel. Le but de cette démarche est de comparer les deux résultats afin de voir s'il est nécessaire d'utiliser des données plus précises que les données mensuelles.

5. Extrapolation semi-mensuelle des données manquantes

5.1 Extrapolation des pics de débits

Les résultats obtenus pour les hauteurs de neige extrapolées ci-dessus ont été repris, c'est-à-dire que la hauteur de neige maximale à Orzival, sur une moyenne de 14 jours, serait représentative de la quantité d'eau fournie à la période de fonte. Cependant, les moyennes de débits n'ont plus été faites mensuellement mais semi-mensuellement. Pour des raisons pratiques, les « demi-mois » ont été définis ainsi :

- Première partie : 1er jour du mois jusqu'au 15e jour du mois.
    - Exemple : 01.01.1999 - 15.01.1999, notée : 15 janvier 1999
- Deuxième partie : 16e jour du mois jusqu'au dernier jour du mois.
    - Exemple : 16.01.1999 - 31.01.1999, notée : 31 janvier 1999

En reprenant les valeurs du Tableau 5, une corrélation entre les hauteurs de neige et les pics de débits sur une moyenne de 15 jours a pu être trouvée (Figure 15).

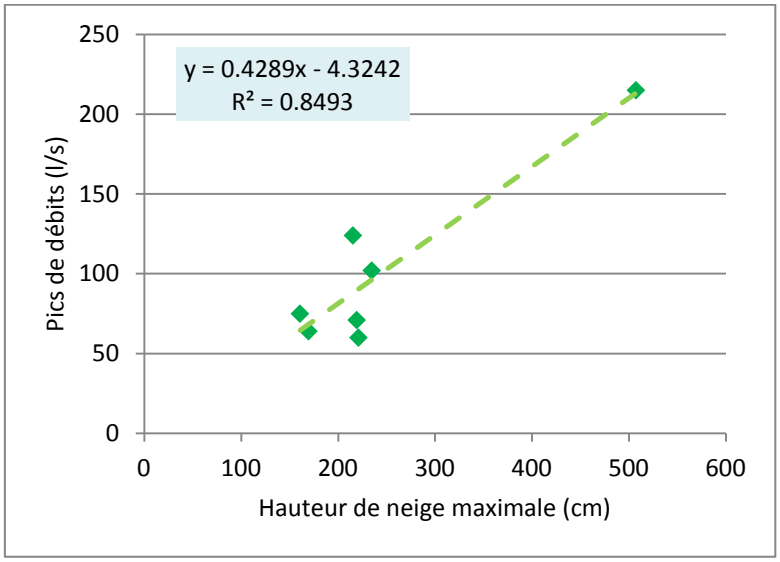


Figure 15: Amplitude des pics de débits (maximum sur une moyenne de 15 jours) et hauteur de neige maximale à Orzival (maximum sur une moyenne de 14 jours) accumulée lors de l'hiver. Les hauteurs de neige estimées pour les années 1990, 1991, 1995, 1996, 1997 ont ainsi été utilisées.

Nous remarquons que le coefficient de corrélation est légèrement supérieur à celui qui avait été trouvé avec les débits mensuels (Figure 9). En procédant de la même manière qu'auparavant, les pics de débits pour les années durant lesquelles les mesures sont indisponibles ont pu être extrapolés. Le Tableau 11 présente les pics de débits (maximum sur une moyenne de 15 jours) obtenus d'après l'équation de la Figure 15.

Tableau 11 : Pics de débits mesurés (l/s) et pics de débits extrapolés (maximum sur moyenne de 15 jours) à partir des hauteurs de neige (mesurées et extrapolées).

Année	Hauteur de neige (mesurée et extrapolée)	Période des débits maximaux (sur moyenne de 15 jours)	Pics de débits mesurés (l/s)	Pics de débits extrapolés (d'après la Figure 15Figure 9)
1990	**215**	01.07 - 15.07	124	
1991	**221**	02.07 - 16.07	60	
1992	**222**			0.4289*222-4.3242 = **91**
1993	**242**			**100**
1994	**255**			**105**
1995	**507**	13.07 - 27.07	215	
1996	**161**	01.06 - 15.06	75	
1997	**219**	08.06 - 22.06	71	
1998	170	29.05 - 12.06	64	
1999	310			**129**
2000	235	03.06 - 17.06	102	
2001	252			**104**
2002	185			**75**
2003	208			**85**
2004	212			**87**
2005	169			**68**
2006	226			**92**
2007	192			**78**
2008	232			**95**
2009	**280**			**116**
2010	**255**			**105**
2011	**107**			**42**

La première tendance qui ressort de ces résultats est que les moyennes de débits semi-mensuelles sont légèrement supérieures aux moyennes mensuelles, ce qui est normal car les forts débits journaliers ont une plus grande influence sur des périodes plus courtes. Une première comparaison des données peut être faite à l'aide de l'Annexe 10. Nous constatons que les données de débits sont plus « irrégulières » sur la période de décharge, plusieurs augmentations de débits apparaissant sur la courbe. Maintenant que les pics de débits ont été extrapolés, il a fallu, comme précédemment, estimer leur date d'apparition.

5.2 Datation des pics de débits

Ce travail est le même qui a été fait dans la partie 4.3. Une bonne corrélation a pu être établie entre les débits et les températures moyennes sur 40 jours. Encore une fois, différentes durées ont été considérées pour le calcul des températures moyennes (Annexe 11), mais la moyenne sur 40 jours semble fournir le meilleur résultat (Figure 16).

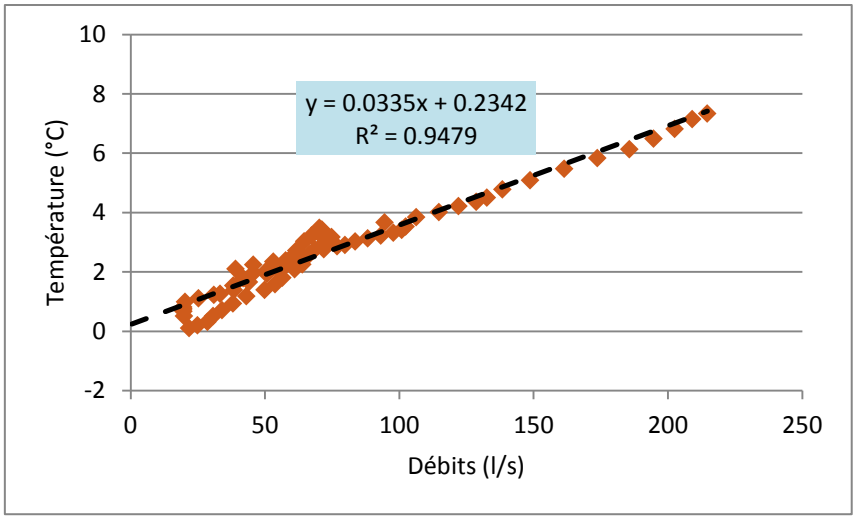


Figure 16: Débits (moyenne sur 15j) et T° de l'air au Mont Gelé (moyenne sur 40j) pour la période des 15 jours précédent l'apparition du maximum. Les années utilisées sont : 1995, 1996, 1997, 1998 et 2000.

Le coefficient de corrélation obtenu dans la Figure 16 est quasiment le même que celui obtenu précédemment entre les débits moyens sur 30 jours à la Figure 10. De plus, les deux coefficients sont très bons. Un très bon résultat a aussi été obtenu avec l'utilisation des pics de débits uniquement (Figure 17).

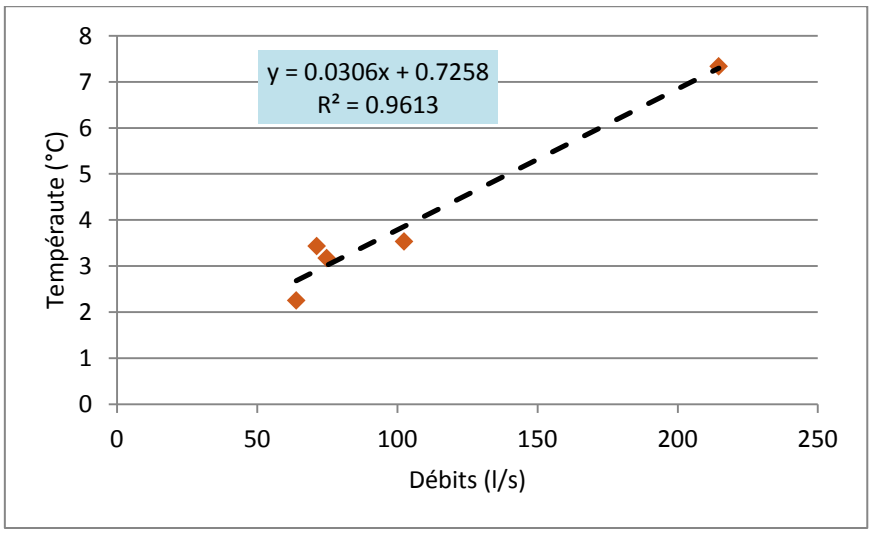


Figure 17: Débits maximaux (sur une moyenne de 15 jours) et T° au Mont-Gelé (sur une moyenne de 40 jours) le jour où le pic a lieu.

Le lien entre les températures et les débits semble donc se confirmer, car l'utilisation des débits moyens sur 30 jours ainsi que sur 15 jours a permis d'obtenir de très bonnes corrélations. Ces deux résultats ont permis l'estimation de la date d'apparition des pics de débits extrapolés précédemment.

Tableau 12: Estimation de la date d'apparition des pics de débits (moyenne sur 15 jours) en fonction de la température (moyenne sur 40 jours) au Mont-Gelé.

Année	Valeur des pics de débits mesurés et extrapolés (l/s)	T° estimée d'après la Figure 17	T° d'après les mesures	Semi-mois d'après les mesures	Semi-mois estimée des pics
1994	**105**	*3.94*			***15 Juillet***
1995	215	*7.30*	7.34	31 Juillet	***31 Juillet***
1996	75	*3.02*	3.18	15 Juin	***15 Juin***
1997	71	*2.90*	3.44	30 Juin	***30 Juin***
1998	64	*2.68*	2.26	15 Juin	***30 Juin***
1999	**129**	*4.67*			***15 Juillet***
2000	102	*3.85*	3.54	30 Juin	***30 Juin***
2001	**104**	*3.91*			***15 Juillet***
2002	**75**	*3.02*			***30 Juin***
2003	**85**	*3.33*			***15 Juin***
2004	**87**	*3.39*			***15 Juillet***
2005	**68**	*2.81*			***30 Juin***
2006	**92**	*3.54*			***15 Juillet***
2007	**78**	*3.11*			***30 Juin***
2008	**95**	*3.63*			***30 Juin***
2009	**116**	*4.28*			***15 Juillet***
2010	**105**	*3.94*			***15 Juillet***
2011	**42**	*2.01*			***15 Juin***

En comparant les températures estimées avec les pics de débits sur une moyenne de 15 jours avec celles obtenues sur les moyennes de 30 jours, nous constatons que l'écart entre les températures mesurées et estimées est légèrement supérieur en utilisant les pics de débits sur 15 jours. La division des périodes de manière semi-mensuelle s'avère intéressante car l'estimation de la date peut être faite de manière plus précise. Nous pouvons maintenant passer à la dernière étape d'extrapolation, celle de la période de décharge.

5.3 Extrapolation de la période de décharge

La disposition des valeurs de débits semi-mensuelles étant également proche du graphique de la fonction 1/x, l'extrapolation des débits s'est aussi faite d'après la méthode présentée en 4.4 pour les débits mensuels. Comment déjà mentionné auparavant, les données de débits calculées semi-mensuellement sont moins « régulières » durant la période de décharge. Malgré ces fluctuations plus marquées, l'extrapolation a donné des résultats convenables. Les années utilisées pour l'interpolation des débits semi-mensuels sont les mêmes que celles utilisées pour les débits mensuels. La numérotation des mois utilisée a également été reprise ici, à savoir que le semi-mois durant lequel le pic apparait se voit attribuer le numéro 1. La seule différence réside dans le fait que la numérotation est environ deux fois plus longue car la subdivision semi-mensuelle produit le double de périodes par

rapport à la subdivision mensuelle. A titre d'illustration, l'année 2000 est présentée en exemple ci-dessous et les autres années sont données en Annexe 12.

La liste contenant les données de débits calculées semi-mensuellement est crée :

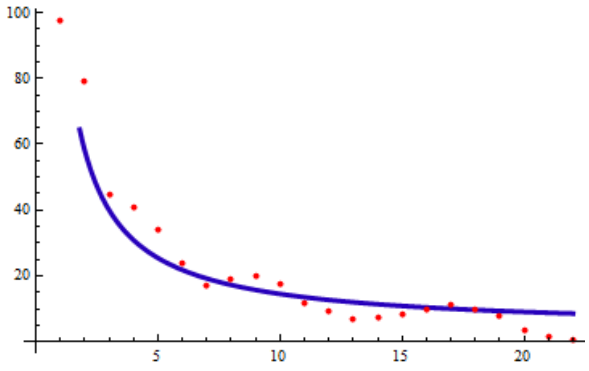
données7=

{{1, 97.8}, {2 ,79.07}, {3, 44.6}, {4, 40.88}, {5, 34.13}, {6, 24}, {7, 17.2}, {8, 19.07}, {9, 19.73}, {10, 17.5}, {11, 11.93}, {12, 9.33}, {13, 7.07}, {14, 7.44}, {15, 8.4}, {16, 9.75}, {17, 11.07}, {18, 9.69}, {19, 7.73}, {20, 3.38}, {21, 1.47}, {22, 0.73}};

La fonction « Fit » nous permet d'obtenir le polynôme interpolant ces données :

$$Polynôme7 = Fit\left[données7, \left\{1, \frac{1}{x}\right\}, x\right] = 3.58965 + \frac{109.189}{x}$$

Afin d'avoir une information visuelle du résultat, le polynôme d'interpolation et les débits mensuels sont représentés sous forme graphique :



L'interpolation est relativement bonne pour toutes les années mais les fluctuations des débits sont plus marquées pour semi-mois, ce qui explique les écarts plus grands entre les polynômes d'interpolations et les valeurs interpolées. Le Tableau 13 résume les polynômes obtenus :

Tableau 13: Débits maximaux calculés semi-mensuellement (l/s) et polynômes d'interpolation pour la période de décharge.

Année	Débits maximum semi-mensuels (l/s)	Polynôme d'interpolation	
		Coefficient 1/x	Constante
1995	192	206.57	-12.94
1996	75	78.07	3.18
1997	60	64.77	7.25
1998	63	57.95	3.59
1999	124	136.14	-0.05
2000	98	109.19	-3.47

Le lien trouvé entre les débits mensuels maximaux et les coefficients des polynômes d'interpolation a de nouveau pu être trouvé avec les débits calculés semi-mensuellement (Figure 18).

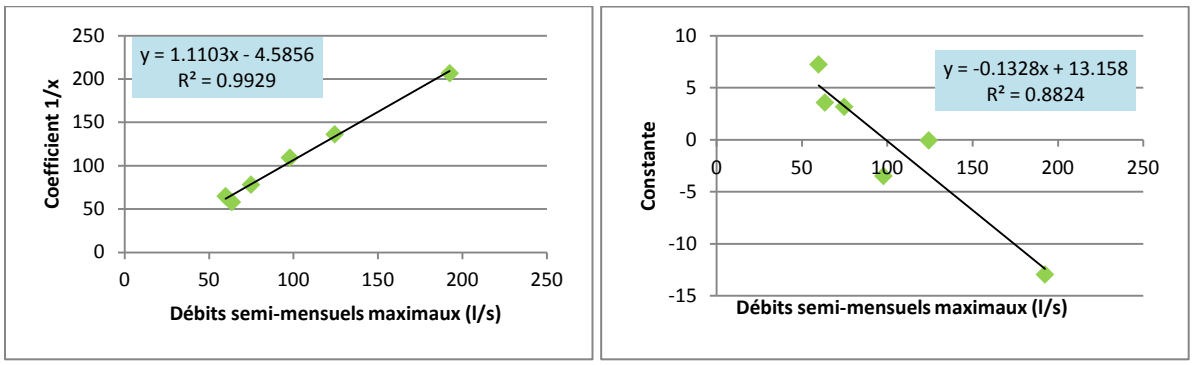


Figure 18: A gauche, Débits semi-mensuels maximaux (l/s) et coefficients de 1/x des polynômes d'interpolation. A droite, débits par semi-mensuels maximaux (l/s) et constantes des polynômes d'interpolation.

Nous constatons que la corrélation entre les débits semi-mensuels maximaux et les coefficients 1/x des polynômes d'interpolation est tout autant forte que celle qui était ressortie en utilisant les débits mensuels. Concernant les constantes des polynômes d'interpolation et les débits semi-mensuels, le coefficient de corrélation est légèrement meilleur qu'avec les débits mensuels. À partir de ces deux équations, il a été possible d'obtenir les coefficients de 1/x ainsi que les constantes pour les polynômes d'extrapolation des années pour lesquelles le pic de débits a été estimé et daté, à savoir 2001 à 2011 (Tableau 14).

Tableau 14: Détermination des polynômes extrapolant les débits semi-mensuels de la période de décharge pour les années 2001 à 2011.

Année	Pics de débits d'après le Tableau 11 (l/s)	Polynômes d'après les pics de débits et Figure 18		Valeurs (l/s) après :	
		Coefficients 1/x	Constantes	11 mois	12 mois
2001	104	110.89	-0.65	4.17	3.78
2002	75	78.69	3.20	6.62	6.35
2003	85	89.79	1.87	5.77	5.46
2004	87	92.01	1.60	5.60	5.28
2005	68	70.91	4.13	7.21	6.96
2006	92	97.56	0.94	5.18	4.84
2007	78	82.02	2.80	6.37	6.08
2008	95	100.89	0.54	4.93	4.58
2009	116	124.21	-2.25	3.15	2.72
2010	105	112.00	-0.79	4.08	3.69
2011	42	42.04	7.58	9.41	9.26

À partir de ces polynômes, il est maintenant possible de calculer les débits semi-mensuels pour les années ci-dessus. La méthode de calcul ayant déjà fait l'objet d'une explication détaillée dans la partie 4.4, nous présentons juste le résultat obtenu pour l'année 2001 (Tableau 15). Comme précédemment, le mois d'avril est le dernier mois pour lequel les débits ont été estimés.

Tableau 15: Estimation des débits semi-mensuels de l'année 2001, pour les mois suivant le pic de débit, dont la date d'apparition a été estimée, d'après le Tableau 12, au premier semi-mois de juillet, noté 15 juillet.

Semi-mois	Numéro correspondant (1 = semi-mois du pic de débit)	Valeur de débit semi-mensuelle estimée
31 Juillet	2	110.89*(1/2)-0.65 = **54.79**
15 Août	3	**36.31**
31 Août	4	**27.07**
15 Sept.	5	**21.52**
30 Sept.	6	**17.83**
15 Oct.	7	**15.19**
31 Oct.	8	**13.21**
15 Nov.	9	**11.67**
30 Nov.	10	**10.44**
15 Déc.	11	**9.43**
31 Déc	12	**8.59**
15 Janv.	13	**7.88**
31 Janv.	14	**7.27**
15 Févr.	15	**6.74**
28 Févr.	16	**6.28**
15 Mars	17	**5.87**
31 Mars	18	**5.51**
15 Avr.	19	**5.18**
30 Avr.	20	**4.89**

Une représentation graphique des données estimées ci-dessus confirme la ressemblance entre les débits mesurés et les valeurs extrapolées (Figure 19).

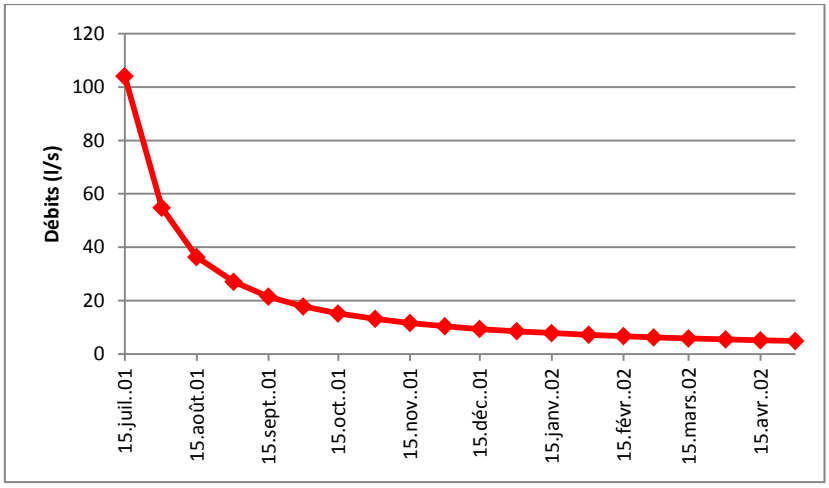


Figure 19:Débits calculés (l/s) semi-mensuellement pour l'année 2001.

Les débits extrapolés semi-mensuellement pour les autres années sont donnés en Annexe 13.

6. Discussion des résultats obtenus

La méthode de travail utilisée avec les données semi-mensuelles étant la même que celle employée avec les données mensuelles, la comparaison des résultats obtenus est relativement facile. La première démarche, consistant à utiliser les débits mensuels, a permis d'effectuer une approche globale tandis que la deuxième partie a eu pour objectif de fournir une analyse plus détaillée. De manière générale, les résultats obtenus avec les débits semi-mensuels ont permis de « vérifier » et de confirmer les premières estimations. Cependant, un certain nombre de différences est apparu au fur et à mesure du travail.

L'utilisation des données de débits sous forme mensuelle a donné une vue d'ensemble et a permis d'avoir une synthèse des débits sur une année. À partir de là, l'extrapolation des hauteurs de neige a pu être faite, car la période sur laquelle les hauteurs de neige ont été considérée est de l'ordre de plusieurs mois, ce qui nous a permis de travailler à l'échelle mensuelle. Toutefois, ce regroupement des données n'est pas sans perte d'information. D'une part, lorsqu'il a été question d'estimer la date d'apparition des débits, l'utilisation des moyennes mensuelles a augmenté le risque d'erreur, la précision n'étant que de l'ordre du mois. D'autre part, l'extrapolation de la période de décharge a donné de bons résultats, mais ce n'est qu'une tendance qui a été trouvée. Par exemple, il a été impossible de déterminer précisément le facteur influençant les augmentations ou diminutions de débits observées lors de cette période. À ce sujet, nous pouvons émettre différentes hypothèses. Ces irrégularités peuvent être dues à la fonte tardive d'un névé, à de fortes précipitations durant le mois en cours, ou au contraire, un mois relativement « sec ». L'étude s'est d'abord portée sur les précipitations précédant ces irrégularités, en prenant en compte différentes durées : mensuelles, semi-mensuel, hebdomadaires. Ensuite, un essai de pondération des valeurs de précipitations a été tenté, mais sans résultat. Une étude plus approfondie des températures pourrait peut-être mener à des résultats concluant car les précipitations n'influenceront pas les débits de la même manière, suivant que le sol soit saturé en eau ou non.

À l'inverse, l'utilisation des données semi-mensuelles a permis d'augmenter la précision lors de l'estimation de la date d'apparition des débits, l'erreur n'étant maintenant « plus que » d'un demi-mois. En ce qui concerne l'extrapolation des pics de débits sur une moyenne de 15 jours, nous avons vu que les résultats obtenus avec les données mensuelles sont à peine moins bons. Afin d'avoir une indication la plus précise possible sur la quantité d'eau amenée dans le système, la moyenne sur 15 jours est certes plus explicite que la moyenne mensuelle, mais le travail fourni est aussi considérablement plus grand. Les données de débits semi-mensuelles se sont également révélées utiles pour mettre en évidence des irrégularités encore plus marquées lors de la période décharge. Là non plus il n'a pas été possible de déterminer l'origine de ces « creux » ou « bosses » dans les données.

En ce qui concerne les polynômes d'interpolation, la base utilisée est subjective et peut faire l'objet de discussions. Si nous considérons la quantité de neige accumulée durant l'hiver comme étant la réserve en eau d'une nappe, alors les polynômes sont une estimation affine de la loi de tarissement de Maillet,

$$Q(t) = Q(0) * e^{-\alpha t},$$

où Q(t) correspond au débit au temps t, Q(0) au débit initial et α au le coefficient de tarissement. Comme cette loi comporte une fonction exponentielle, son utilisation dans la base d'interpolation donnerait peut-être de meilleurs résultats.

Pour finir, le débit mensuel moyen d'une année peut être approché à l'aide de la démarche suivante :

- Estimer la hauteur de neige maximale (sur une moyenne de 14 jours) à l'aide des précipitations et de l'équation de la Figure 8.
- Estimer le pic de débit avec l'équation de la Figure 9.
- À l'aide des températures (moyennes sur 40 jours) et de la Figure 11, estimer la date d'apparition du pic de débit.
- Les équations de la Figure 13 permettent d'obtenir le coefficient et la constante du polynôme d'interpolation à partir du pic de débit.
- Introduire le numéro correspondant du mois (Annexe 7) pour obtenir l'estimation du débit.

La démarche est la même pour une estimation semi-mensuelle, il suffit de prendre les équations correspondantes des Figures du chapitre 5.

7. Conclusion

La réalisation de ce travail a été faite selon deux axes principaux : la recherche bibliographique en premier lieu et la conception d'un modèle mathématique adapté aux données disponibles en second lieu.

L'irrégularité des données a été la difficulté majeure rencontrée lors de cette analyse, car il a fallu procéder à de nombreuses extrapolations. Malgré les corrélations relativement bonnes trouvées dans ce travail, il ne faut toutefois pas oublier que les valeurs utilisées sont hypothétiques et exclusivement des estimations. Les vitesses de déplacement des glaciers rocheux augmentent lors de l'apport d'eau dû à la fonte des neiges et la méthode de datation des pics débits a fourni des résultats tolérables compte tenu du degré de précision souhaité. La partie principale de ce travail a été consacrée à l'élaboration du modèle mathématique permettant l'extrapolation des débits pour la période de décharge. Ce dernier est relativement proche des données mesurées mais il fournit uniquement une tendance sur leur évolution. Nous avons vu qu'une interpolation sur toute la période d'étude est quasiment impossible et que le choix d'un polynôme différent pour chaque année semble être la meilleure solution. Par ailleurs, le regroupement semi-mensuel des données se révèle être un meilleur choix que l'utilisation des données mensuelles, car d'une part l'estimation des débits moyens et leur date d'apparition sont plus précis et d'autre part les variations de débits sont plus marquées ce qui s'avère être plus utile en vue d'une comparaison ultérieure avec la cinématique du glacier rocheux.

De nouvelles mesures de débits sur le terrain permettraient de vérifier si la méthode de datation des débits est bonne ou bien s'il faut procéder à des ajustements ou des modifications éventuelles. La découverte d'un ou plusieurs facteurs influençant les changements de débits de la période de décharge permettrait l'amélioration du modèle mathématique et offrirait de nouvelles perspectives de recherche concernant la comparaison de la cinématique du glacier rocheux avec les quantités d'eau introduites dans le système.

8. Bibliographie

AEMMER, F., & KÖLLA, E. (1989). *Niederwasser: Bestimmung, Nutzung und Erhaltung* (Vol. Vol. 34). (F. &. Kümmerly, Éd.) Zürich.

ARENSON, L., HOELZLE, M., & SPRINGMAN, S. (2002). Borehole Deformation Measurements and Internal Structure of Some Rock Glaciers in Switzerland. *Permafros and Periglacial processes , Vol. 13*, pp. 117-135.

DELALOYE, R. (2004). Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale. *Thèse de doctorat* . Université de Fribourg.

GUITER, V. (1972). Une forme montagnarde: le rock-glacier. *Revue de géographique alpine , Vol. 60* (N°3), pp. 467-487.

HAEBERLI, W. (1985). Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitt. VAW/ETH Zürich*, (77).

HINGRAY, B., PICOUET, C., & MUSY, A. (2009). *Hydrologie 2, Une science pour l'ingénieur.* (P. P. romandes, Éd.)

HUFFEL, S. v., & VANDEWALLE, J. (1991). *The total least squares problem : computational aspects and analysis* (illustrée ed., Vol. 9). Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.

IKEDA, A., MATSUOKA, N., & KAAB, A. (2008). Fast deformation of perennially frozen debris in a warm rock glacier in the Swiss Alps: An effect of liquid water. *Journal of Geophysical Research , Vol. 113*.

IKEN, A., & BINDSCHADLER, R. (1986). Combined measurements of subglacial water pressure and surface velocity of Findelengletscher, Switzerland: conclusions about drainage system and sliding mechanism. *Journal of Glaciology , Vol. 32* (N° 110), pp. 101-119.

KRAINER, K., & MOSTLER, W. (2006). Flow Velocities of Active Rock Glaciers in the Austrian Alps. *Geografiska Annaler , Vol. 88* (N°4), pp. 267-280.

KRAINER, K., & MOSTLER, W. (2002, May). Hydrology of Active Rock Glaciers: Examples from the Austrian Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research , Vol. 34* (N°2), pp. 142-149.

MERCIER, J. (2010). Analyse des débits des sources du glacier rocheux des Becs de Bosson et de leur potentielle influence sur sa dynamique. *Travail de recherche personnel* . Université de Fribourg.

Méthode des moindres carrés. (2012, avril 7). Consulté le avril 20, 2012, sur Wikipédia, l'encyclopédie libre: http://fr.wikipedia.org/wiki/Méthode_des_moindres_carrés

PERMOS. (2007, 9). Les glaciers rocheux et leurs mouvements. *Die Alpen, Les Alpes* , pp. 34-37.

PERMOS. (2002, 10). Réseau d'observation du pergélisol dans les Alpes suisses. *Die Alpen, Les Alpes* , pp. 29-32.

PERRUCHOUD, E., & DELALOYE, R. (2007). Short-Term Changes in Surface Velocities on the Becs-de-Bosson Rock Glacier (Western Swiss Alps). *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung , Vol. 43*, pp. 131-136.

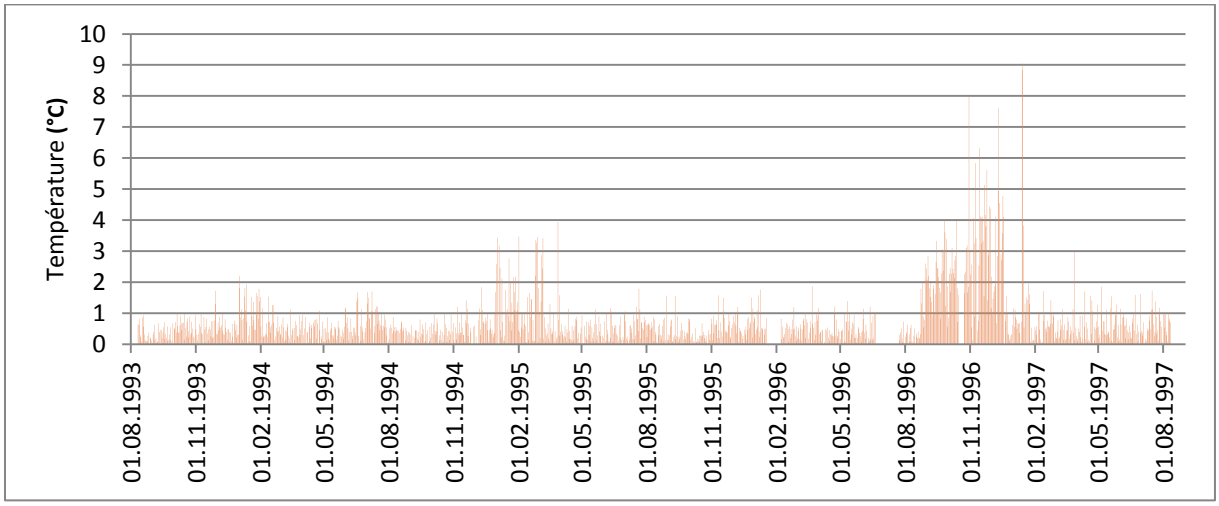
PHILLIPS, M. (2006). Avalanche Defence Strategies and Monitoring of Two Sites in Mountain Permafrost Terrain, Pontresina, Eastern Swiss Alps. *Natural Hazards , Vol.39*, pp. 353-379.

RIST, A., & PHILLIPS, M. (2005). First results of investigations on hydrothermal processes within the active layer above alpine permafrost in steep terrain. *Norwegian Journal of Geography , Vol. 59*, pp. 177-183.

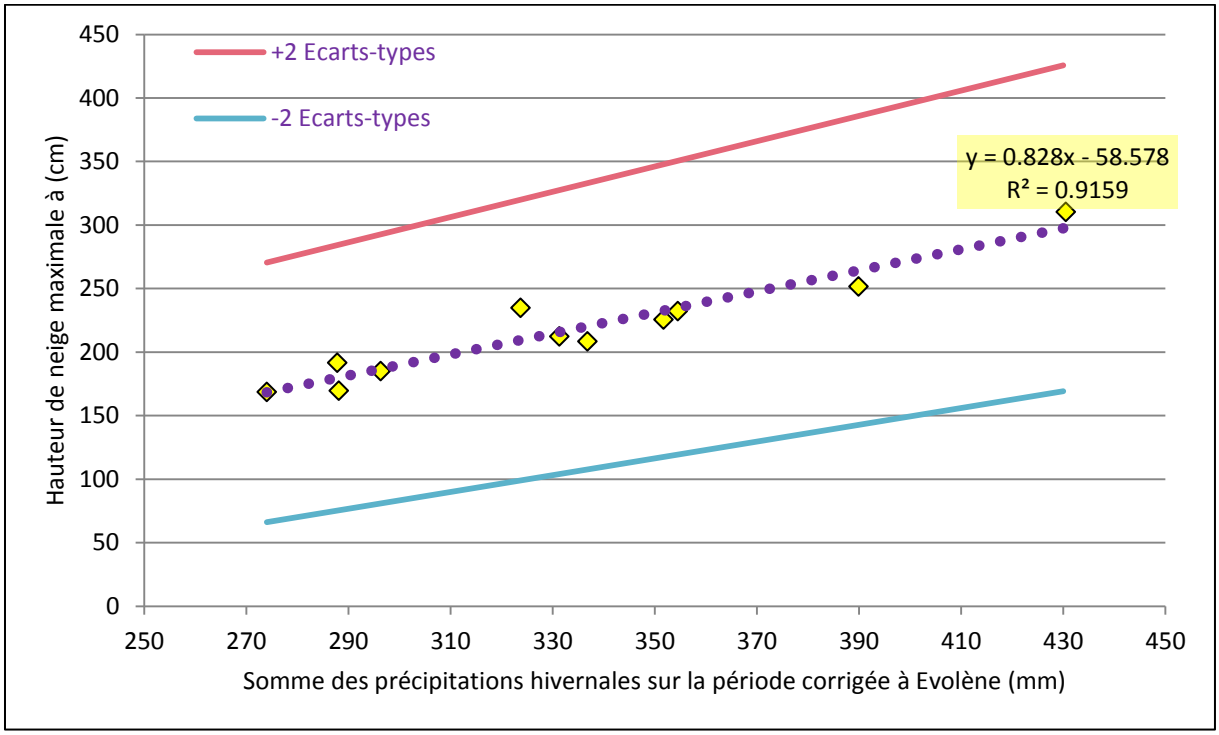
TENTHOREY, G. (1993). Paysage géomorphologique du Haut-Val de Réchy (Valais, Suisse) et hydrologie liée aux glaciers rocheux. *Thèse de doctorat* . Université de Fibourg.

9. Annexes

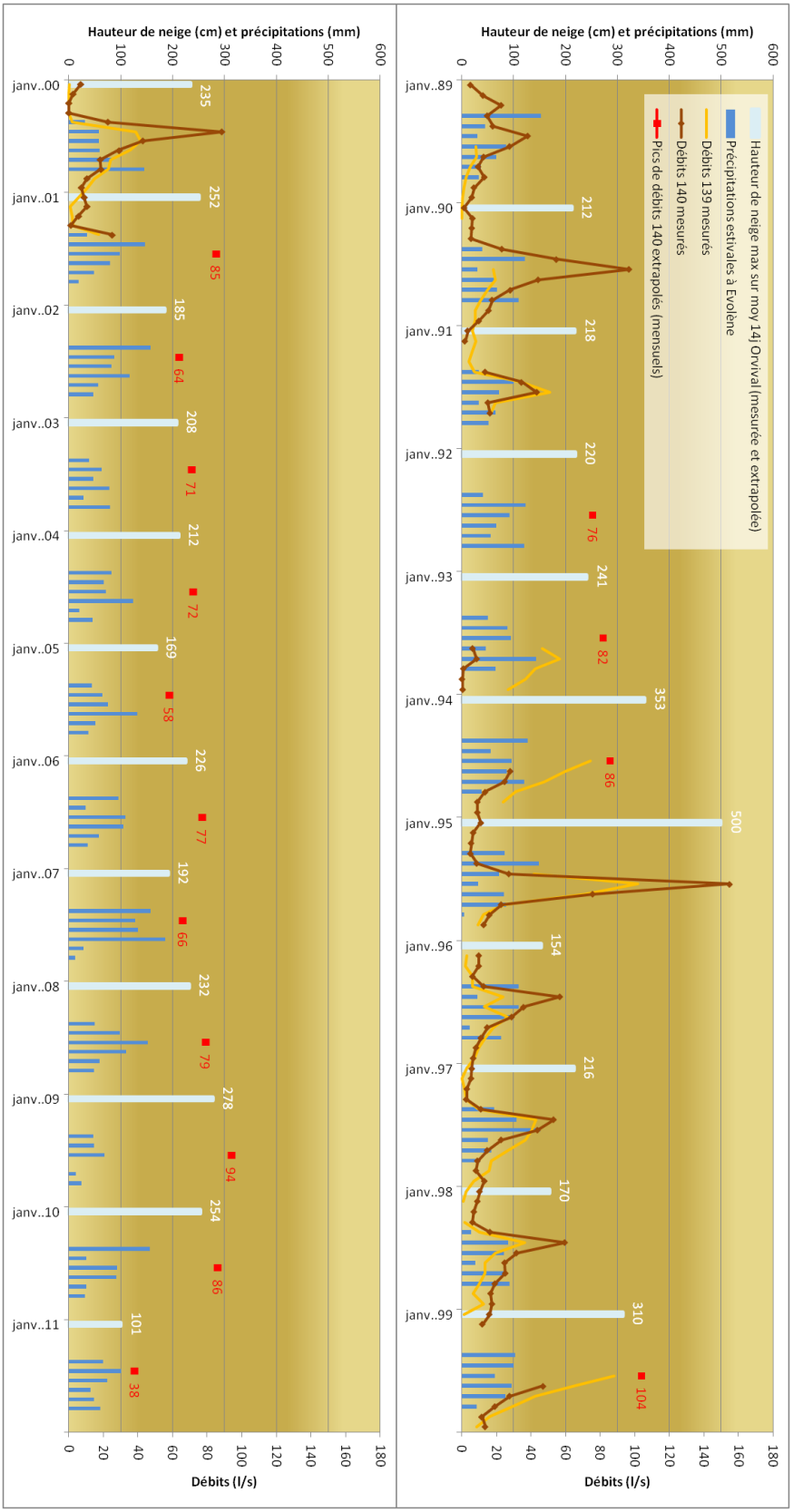
1. Différence de température en valeur absolue entre Réchy et le Mont-Gelé.



2. Illustration des deux courbes de tendance représentant « l'intervalle de confiance » à 95%.



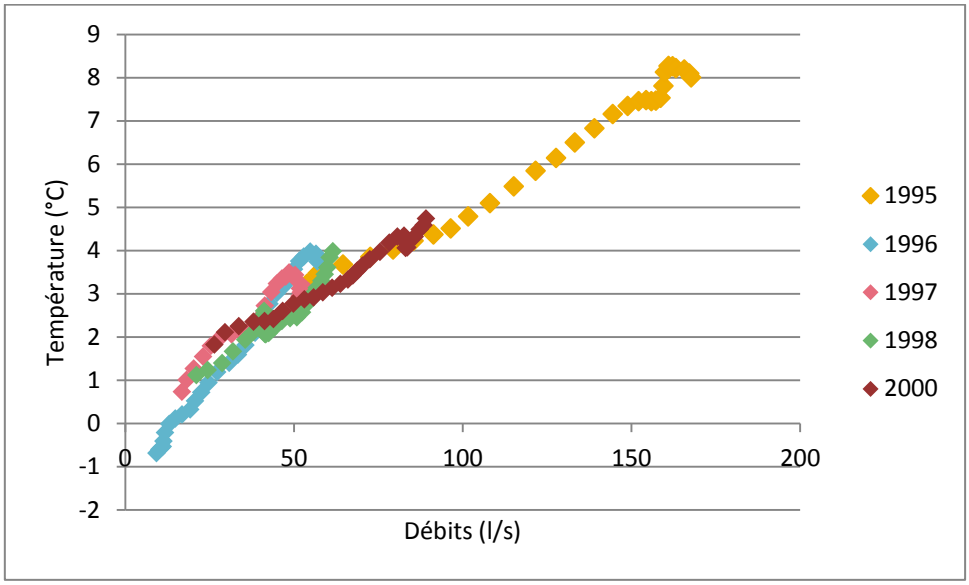
3. Graphique illustrant les données obtenues lors de l'extrapolation des pics de débits.



4. Exemple du travail effectué pour dater les débits. (Année 1995)

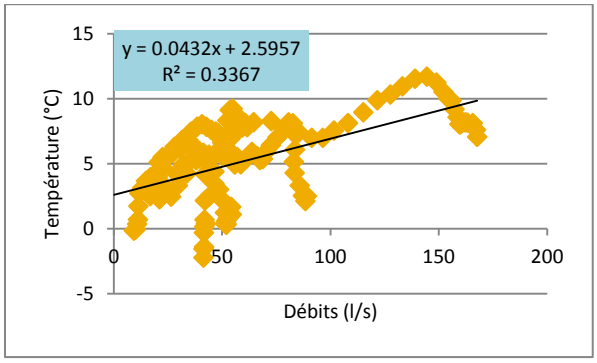
Date	Moyenne (30j) débits + max	Moyenne (40j) T° air Mont Gelé
11.07.1995	53.95	3.23
12.07.1995	57.01	3.47
13.07.1995	64.55	3.68
14.07.1995	72.63	3.85
15.07.1995	79.38	4.02
16.07.1995	85.47	4.23
17.07.1995	91.35	4.37
18.07.1995	96.45	4.51
19.07.1995	101.63	4.79
20.07.1995	108.09	5.10
21.07.1995	115.15	5.48
22.07.1995	121.62	5.84
23.07.1995	127.68	6.14
24.07.1995	133.23	6.50
25.07.1995	139.05	6.83
26.07.1995	144.48	7.16
27.07.1995	148.91	7.34
28.07.1995	152.15	7.45
29.07.1995	154.37	7.48
30.07.1995	155.92	7.45
31.07.1995	157.26	7.47
01.08.1995	158.65	7.53
02.08.1995	159.50	7.81
03.08.1995	159.94	8.13
04.08.1995	161.02	8.27
05.08.1995	162.21	8.26
06.08.1995	163.19	8.22
07.08.1995	165.68	8.19
08.08.1995	167.16	8.09
09.08.1995	167.71	8.00

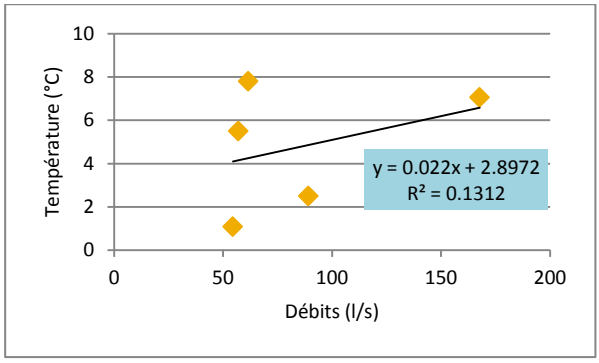
5. Répartition des T° en fonction des débits par rapport aux années respectives.



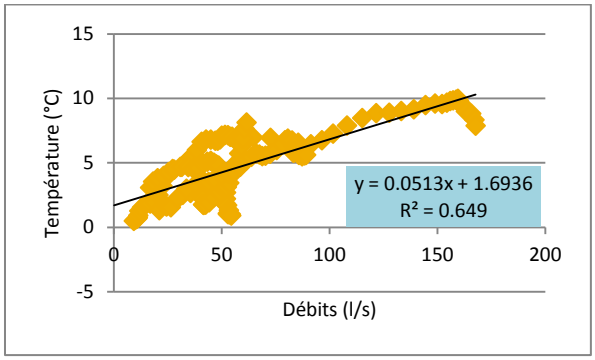
6. Débits (moyenne sur 30jours) et T° (moyennes sur 7 jours, 15 jours et 30 jours). **A gauche** : période des 30 jours précédant l'apparition du maximum. **A droite** : le jour où le pic a lieu.

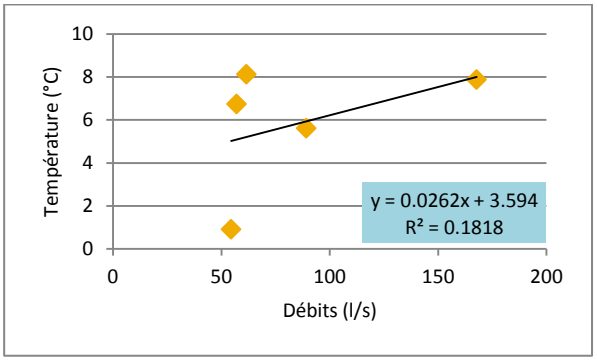
a) Moyenne des T° sur 7 jours



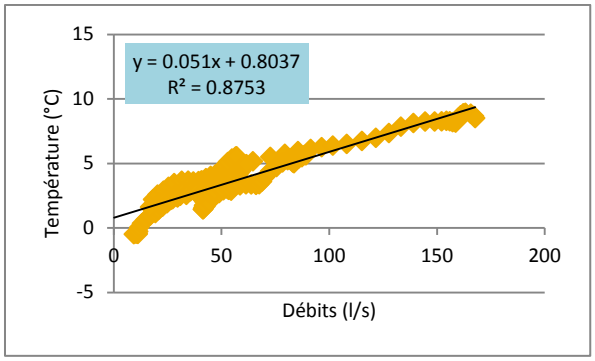


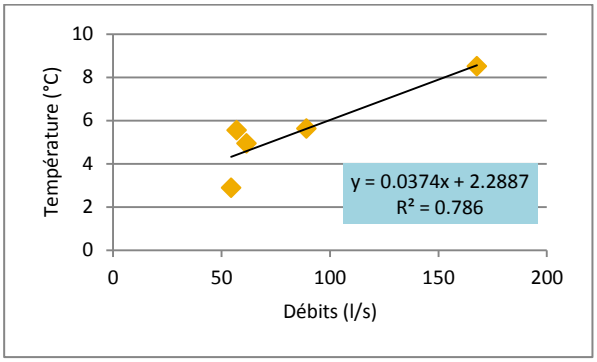
b) Moyenne des T° sur 15 jours





c) Moyenne des T° sur 30 jours





7. Exemple de numérotation des mois (année 2007) pour l'interpolation des débits mensuels.

Mois	Année	Débits mensuels (l/s)	Numéro attribué au mois
Juin	2000	88	1
Juillet	2000	43	2
Août	2000	29	3
Septembre	2000	18	4
Octobre	2000	19	5
Novembre	2000	11	6
Décembre	2000	7	7
Janvier	2001	9	8
Février	2001	10	9
Mars	2001	5	10
Avril	2001	1	11

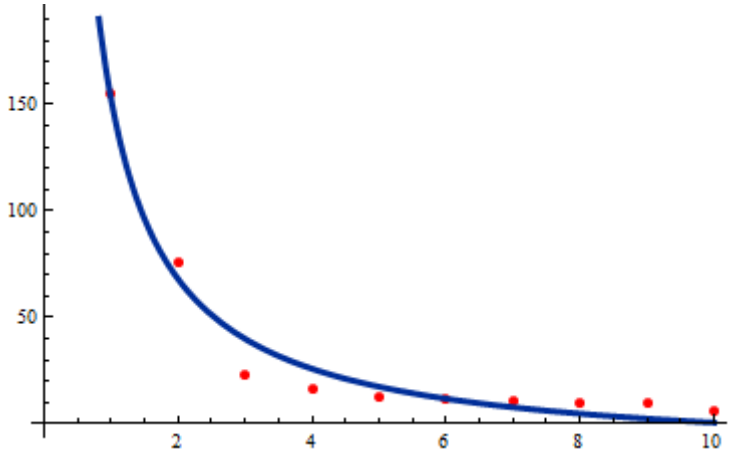
8. Interpolation des débits mensuels pour les années 1995, 1996, 1997, 1998, 1999 avec la fonction « Fit » du logiciel Mathematica. Les graphiques ne sont pas homogènes car les valeurs prises en compte pour l'interpolation vont du pic de débits de l'année en cours jusqu'à l'avant dernier mois avant l'apparition du pic de l'année suivante. Le nombre de valeurs dépend donc du mois d'apparition du débit du l'année suivante.

1995

données2={{1,154.86},{2,75.78},{3,23.05},{4,16.19},{5,12.84},{6,11.5},{7,10.5},{8,9.95},{9,9.82},{10,6.38}};

Polynôme2 = Fit[données2,{1,1/x},x] = -16.243+168.421/x

Show[ListPlot[données2, PlotStyle → Red], Plot[Polynôme2,{x,0,10}]]

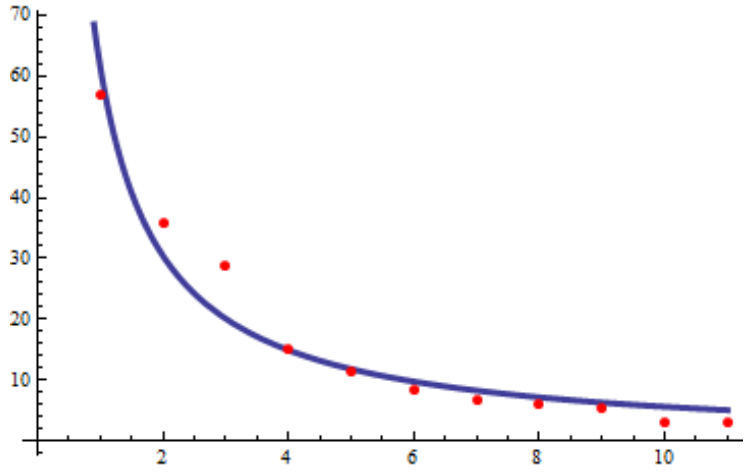


1996

données3={{1,56.88},{2,35.97},{3,28.93},{4,14.97},{5,11.3},{6,8.44},{7,6.6},{8,5.92},{9,5.44},{10,3.1},{11,2.9}};

Polynôme3 = Fit[données3,{1,1/x},x] = -0.632565+62.0582/x

Show[ListPlot[données3, PlotStyle → Red], Plot[Polynôme3,{x,0,11}]]

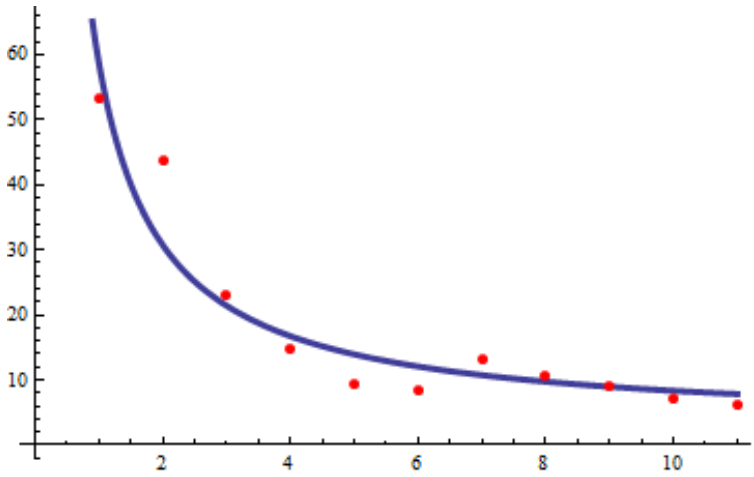


1997

données4={{1,53.33},{2,43.82},{3,23.11},{4,14.93},{5,9.39},{6,8.3},{7,13.16},{8,10.58},{9,9.04},{10,7.19},{11,6.33}};

Polynôme4= Fit[données4,{1,1/x},x] = 2.75807 +55.91/x

Show[ListPlot[données4, PlotStyle → Red], Plot[Polynôme4,{x,0,11}]]

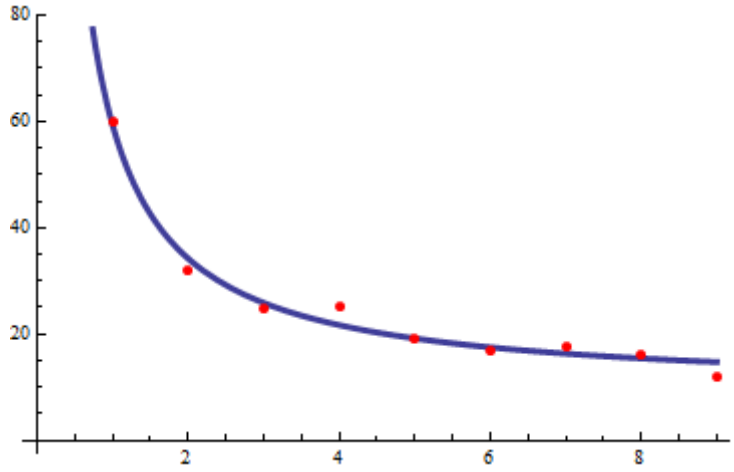


1998

données5={{1,59.87},{2,31.97},{3,24.81},{4,25.23},{5,19.19},{6,16.77},{7,17.74},{8,16.26},{9,12.1}};

Polynôme5 = Fit[données5,{1,1/x},x] = 9.13733 +50.0904/x

Show[ListPlot[données5, PlotStyle → Red], Plot[Polynôme5,{x,0,9}]]

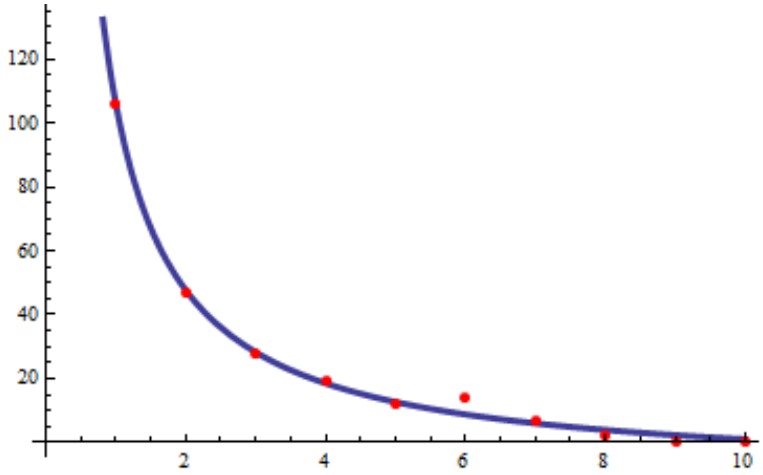


1999

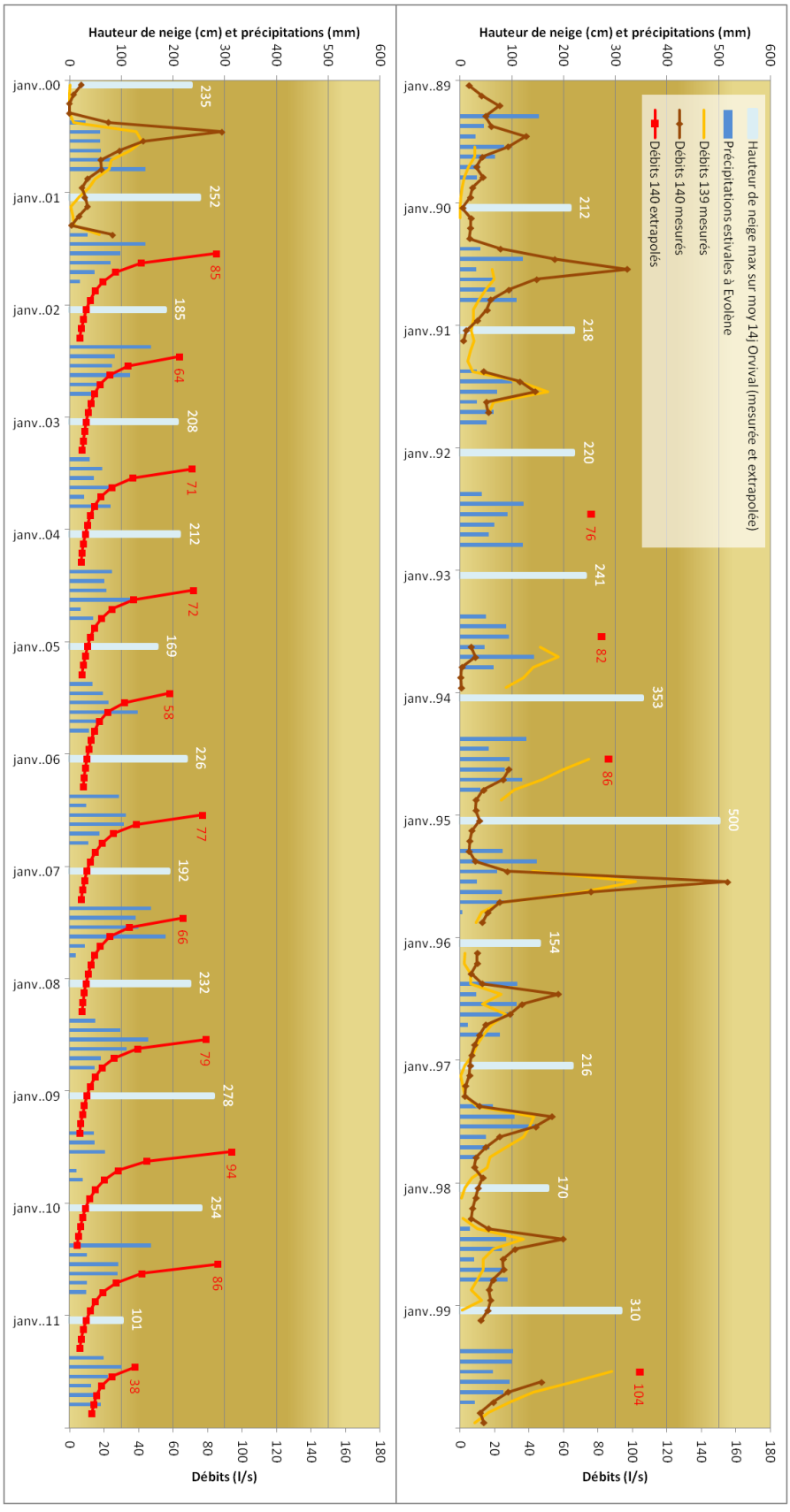
données6={{1,106},{2,47.1},{3,27.9},{4,19.19},{5,11.77},{6,13.81},{7,6.9},{8,2.41},{9,0.16},{10,0}};

Polynôme6 = Fit[données6,{1,1/x},x] = -10.6419+116.648/x

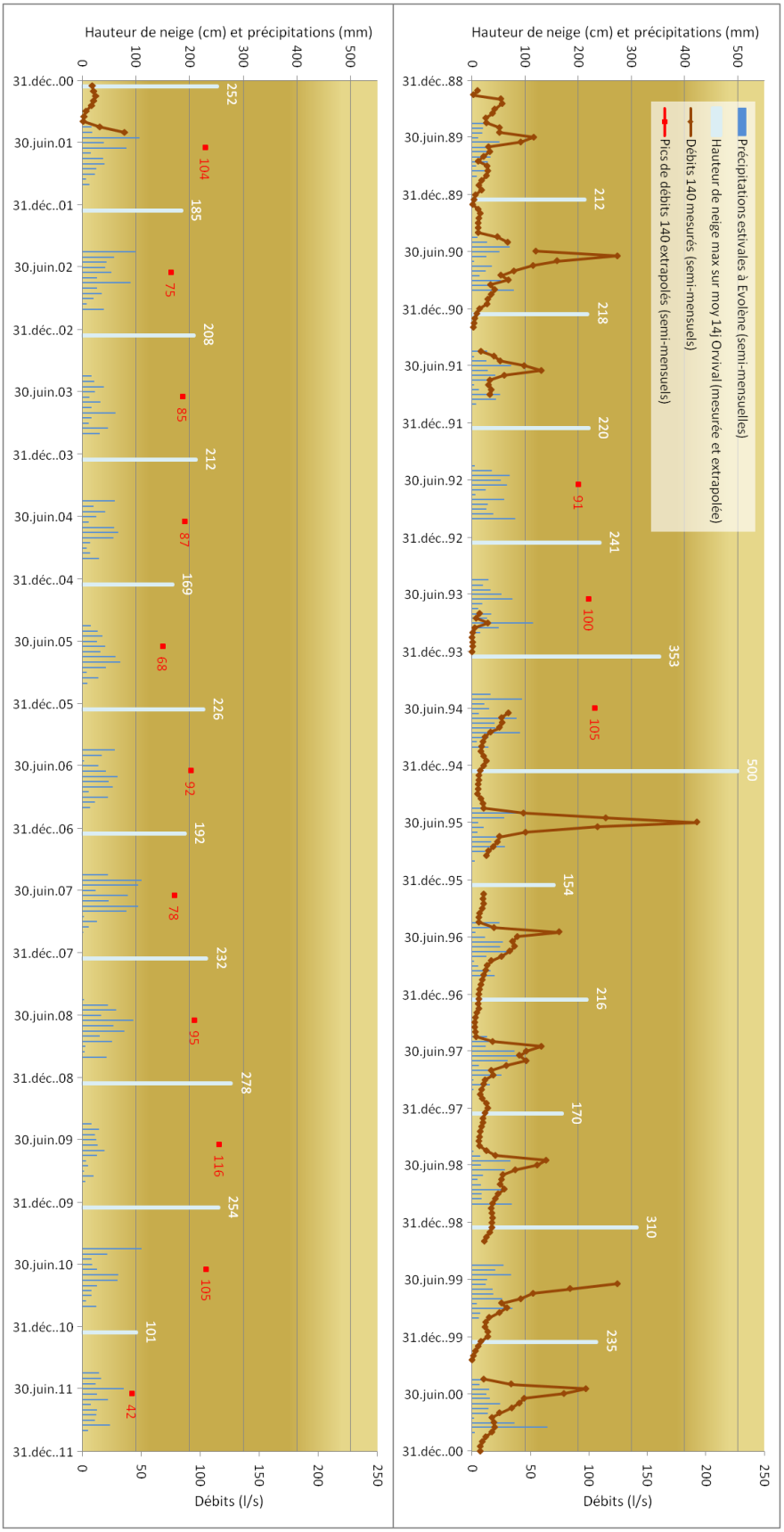
Show[ListPlot[données6, PlotStyle → Red], Plot[Polynôme6,{x,0,10}]]



9. Débits mensuels extrapolés

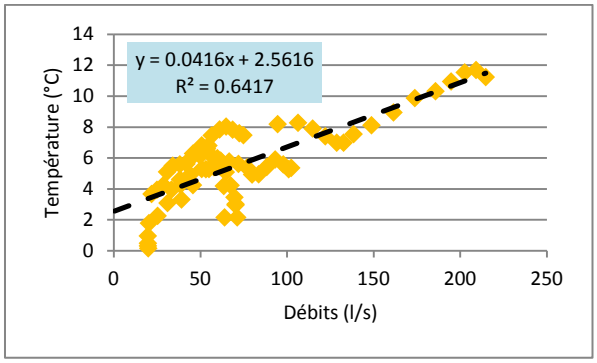


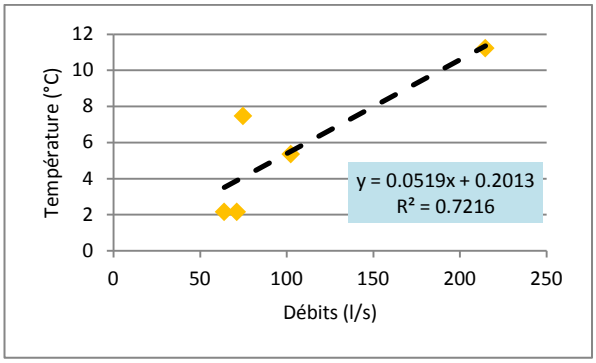
10. Pics de débits extrapolés (semi-mensuels).



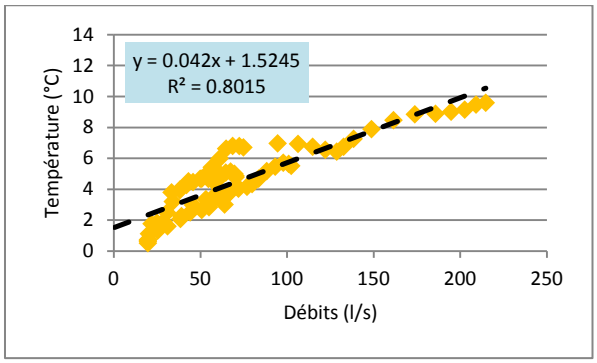
11. Débits (moyenne sur 15 jours) et T° (moyennes sur 7 jours, 15 jours et 30 jours). **A gauche** : période des 15 jours précédant l'apparition du maximum. **A droite** : le jour où le pic a lieu.

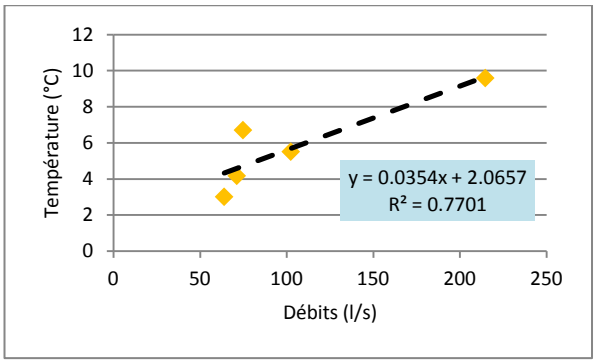
a) Moyenne des T° sur 7 jours



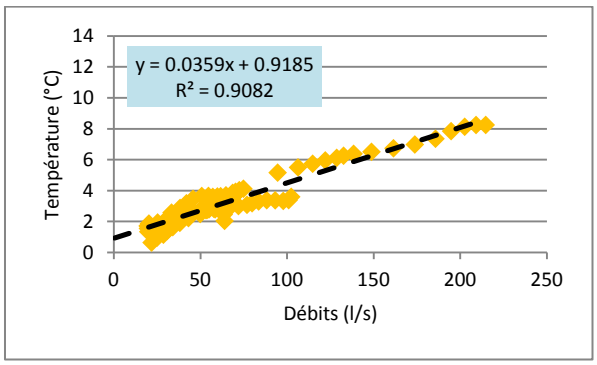


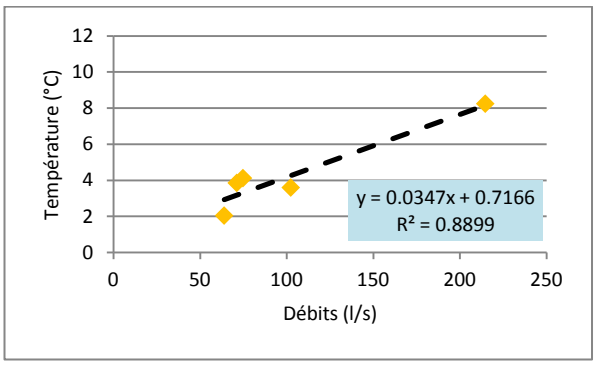
b) *Moyenne des T° sur15 jours*





c) Moyenne des T° sur 30 jours



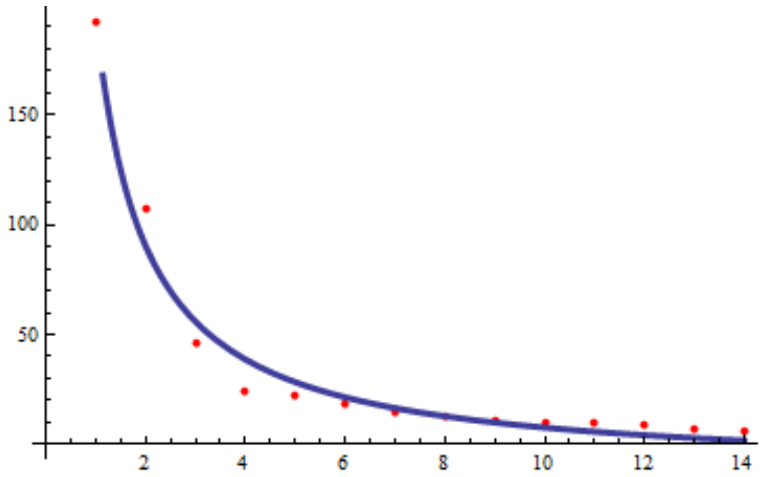


12. Interpolation des débits semi-mensuels pour les années 1995, 1996, 1997, 1998, 1999 avec la fonction « Fit » du logiciel Mathematica. Pour les mêmes raisons qu'à l'Annexe 8, il n'y a pas une homogénéité entre les graphiques.

1995

données2 = {{1, 192.45}, {2, 107.37}, {3, 46.16}, {4, 23.98}, {5, 22.13}, {6, 18.26}, {7, 14.25}, {8, 12.84}, {9, 10.8}, {10, 9.87}, {11, 10.33}, {12, 9.34}, {13, 6.81}, {14, 5.95}};

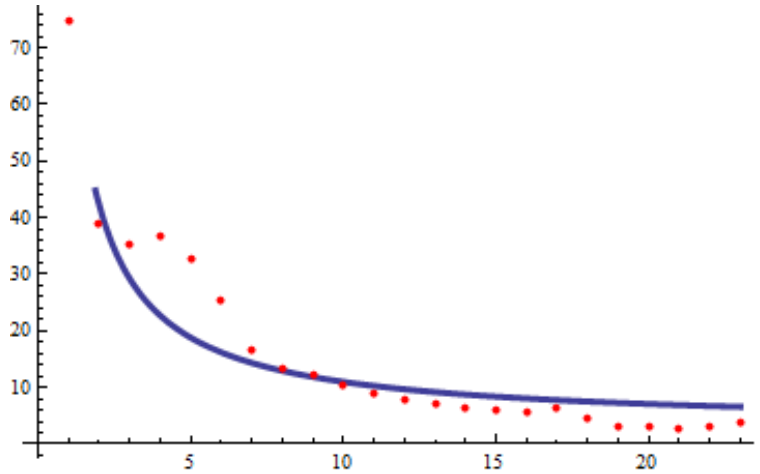
Polynôme2 = Fit[données2, {1, 1/x}, x] = -12.9371 + 206.565/x



1996

données3 = {{1, 74.8}, {2, 38.97}, {3, 35.19}, {4, 36.69}, {5, 32.79}, {6, 25.31}, {7, 16.55}, {8, 13.38}, {9, 12.08}, {10, 10.56}, {11, 8.89}, {12, 7.98}, {13, 7.03}, {14, 6.2}, {15, 6.06}, {16, 5.78}, {17, 6.21}, {18, 4.56}, {19, 3.26}, {20, 2.95}, {21, 2.82}, {22, 2.98}, {23, 3.73}};

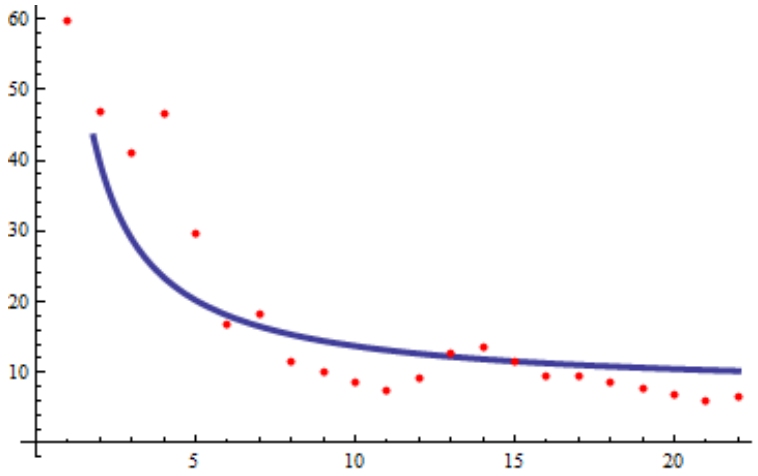
Polynôme3 = Fit[données3, {1, 1/x}, x] = 3.18378 +78.0719/x



1997

données4 = {{1, 59.77}, {2, 46.89}, {3, 40.91}, {4, 46.54}, {5, 29.75}, {6, 16.88}, {7, 18.33}, {8, 11.53}, {9, 10.2}, {10, 8.63}, {11, 7.4}, {12, 9.2}, {13, 12.73}, {14, 13.56}, {15, 11.67}, {16, 9.56}, {17, 9.53}, {18, 8.46}, {19, 7.6}, {20, 6.81}, {21, 6.07}, {22, 6.6}};

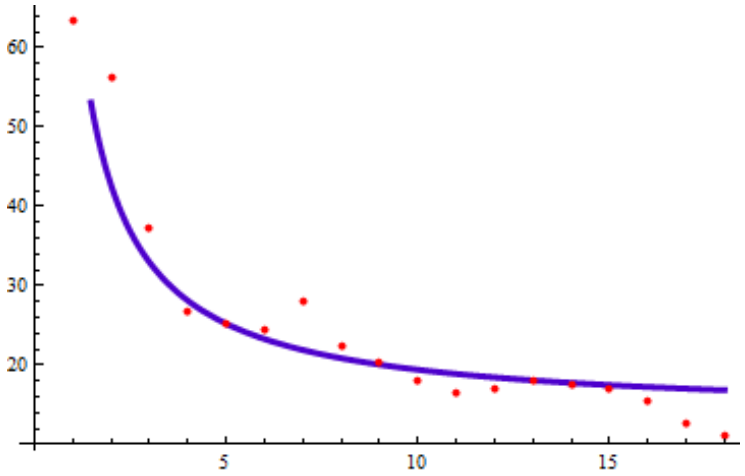
Polynôme4 = Fit[données4, {1, 1/x}, x] = 7.2538 + 64.7652/x



1998

données5 = {{1, 63.47}, {2, 56.27}, {3, 37.4}, {4, 26.88}, {5, 25.27}, {6, 24.38}, {7, 28.07}, {8, 22.4}, {9, 20.33}, {10, 18.13}, {11, 16.47}, {12, 17.07}, {13, 18.07}, {14, 17.44}, {15, 17.07}, {16, 15.5}, {17, 12.53}, {18, 11}};

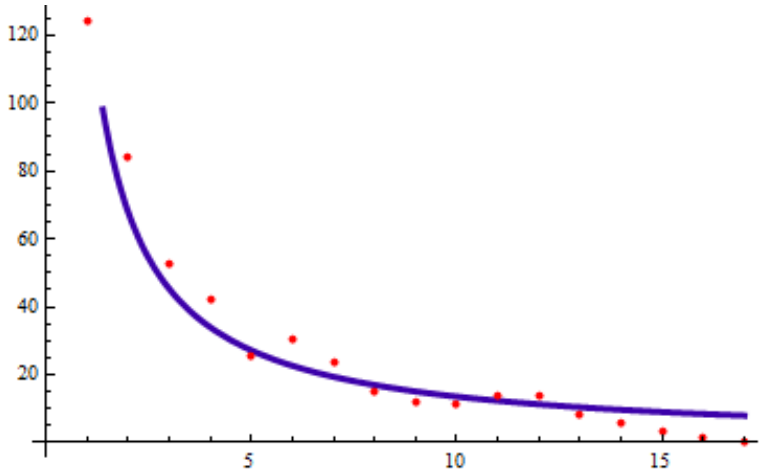
Polynôme5 = Fit[données5, {1, 1/x}, x] = 13.6235 + 57.9459/x



1999

données6 = {{1, 124.33}, {2, 84}, {3, 52.47}, {4, 42.06}, {5, 25.47}, {6, 30.33}, {7, 23.6}, {8, 15.06}, {9, 11.93}, {10, 11.6}, {11, 13.93}, {12, 13.69}, {13, 8.13}, {14, 5.75}, {15, 3.33}, {16, 1.43}, {17, 0.33}};

Polynôme6 = Fit[données6, {1, 1/x}, x] = -0.0481852 + 136.14/x



13. Débits extrapolés semi-mensuellement.

