# Densification du réseau hydrométrique dans le bassin-versant de la Kleine Emme et étude de la réaction du débit de crue.

Eléments de base pour un futur projet de système d'alarme de crues.



# Travail de master

Philosophisch- naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Bern

Présenté par :

**Coralie AMIGUET** 

2010

Directeur de travail :

Prof. Dr. Rolf Weingartner

Geographisches Institut der Universität Bern

|   | 1 |   |
|---|---|---|
| - | Z | - |

# Préface et remerciements

Ce travail de mémoire reflète les conditions de travail dans lesquelles il a été élaboré. D'une part, il contient des parties en allemand, insérées dans un texte en français. En effet, certains chapitres, en particulier pour la description du bassin-versant, sont valables pour les travaux de Pierre Masson, Samuel Riedener et le mien. Ces parties sont les témoins d'un Master bilingue. D'autre part, une grande partie des annexes est des formulaires qui représentent le travail de terrain. Ce dernier a occupé une grande partie du temps tout au long de l'année, au début pour le montage de nouvelles stations de mesures puis, pour leur entretien et le calibrage.

## Je tiens à remercier :

Le professeur **Rolf Weingartner**, qui a accepté de diriger ce travail.

Jan Schwanbeck, qui a donné beaucoup de son temps pour le travail de terrain et pour l'analyse des données. Merci pour les explications concernant le programme R en particulier.

**Bruno Schädler**, qui a remplacé Rolf Weingartner pendant son semestre sabbatique.

Le professeur Hans Kienholz, qui a accepté le rôle de co-examinateur.

L'Office fédéral de l'environnement (**OFEV**) et sa division Hydrologie, **MétéoSuisse**, Centralschweizerische Kraftwerke AG (**CKW**), le Service "Umwelt und Energie (**UWE**)" du Canton de Lucerne, qui nous ont fourni les données du type de crues, des pluviomètres et du débit.

Le Service "Verkehr und Infrastruktur (vif)" du Canton de Lucerne, et en particulier Daniel Arnold, qui nous ont aidé financiellement et sur le terrain.

Robert Diezig et Caroline Kan pour leurs informations concernant les types de crues.

Hans-Peter Hodel, qui nous a fait une démonstration de mesure à l'ailette hydrométrique.

Hans-Rudolf Wernli, qui nous a fait part de son expérience des mesures du débit à l'uranine.

Caroline Verrey pour ses conseils avisés en hydrauliques et pour la littérature francophone.

Martina Kauzlaric, Emmanuel Rey et Andreia Koller, avec qui j'ai pu partager le bureau.

Pierre Masson et Sämi Riedener, qui sont de très bons partenaires de travail.

Mes amis, qui sont toujours là pour les divertissements, Eric pour son soutien, ma grand-maman, qui est toujours encouragante.

Mais surtout MERCI à **mes parents**, qui m'ont permis de faire des études, qui m'ont aiguillonnées et toujours soutenue dans mes choix.

# Résumé

Conjointement avec les travaux de Pierre Masson et Samuel Riedener, le réseau de mesure du débit et des précipitations du bassin-versant de la Kleine Emme à Werthenstein est densifié. Les résultats obtenus grâce aux données plus précises à l'échelle du bassin-versant, serviront de données préliminaires pour un projet de système d'alarme de crues. Ce travail étudie la réaction des débits de crue: d'une part à l'aide des hydrogrammes des stations de jaugeage, et d'autre part par modélisations avec les programmes HQx\_meso\_CH (Barben, 2003) et PREVAH (Viviroli, et al., 2009). Quatre nouvelles stations de jaugeage (trois sondes à pression et un radar) sont installées et plusieurs mesures du débit sont effectuées pour élaborer les courbes de tarage.

L'hydrogramme de crue de la station de Werthenstein montre un débit qui augmente très vite suite aux précipitations. L'écoulement est très rapide, principalement de surface. Après la pointe de crue le débit diminue rapidement. Le bassin-versant stocke donc très peu d'eau. Les 20 plus grandes crues indépendantes sont pour la majorité de type « longue pluie » selon la méthode de (Diezig, 2006) utilisée pour ce travail. Ces crues arrivent surtout durant l'été, mais des crues peuvent avoir lieu à tout moment de l'année. Les événements d'un temps de retour inférieur à une année sont principalement déclenchés par des précipitations de type « averse ».

12 sous-bassins-verants du bassin d'étude sont modélisés. Les résultats démontrent que la partie sud-est du bassin-versant d'étude présente des débits spécifiques plus élevés. Dans cette région se trouvent également les plus hauts sommets. Au niveau de la lithologie et de la capacité de rétention hydrique, on observe la même division. La partie sud-est est composée principalement de calcaire, de molasse très grèseuse et de molasse marneuse alors qu'au nord-ouest on trouve de la molasse conglomératique. La capacité de rétention hydrique est plus faible au sud-est qu'au nord-ouest.

En tenant compte des sous-bassins qui réagissent avec les plus grands débits spécifiques ainsi que des possibilités techniques, on conclu que les stations de jaugeage, installées durant l'été 2009, sont bien placées. La station qui se trouve dans le bassin-versant des deux Fontannen, est temporaire. L'idée est de comprendre la réaction du sous-bassin-versant à l'aide du pluviomètre et du débit. Si cela est possible, la prévision se fera par la suite uniquement à l'aide du pluviomètre.

# Table des matières

| Pr  | éf | ace et i | emerciements                          | 3 -  |
|-----|----|----------|---------------------------------------|------|
| Ré  | SL | ımé      |                                       | 5 -  |
| Ta  | bl | e des fi | gures                                 | 11 - |
| ΑŁ  | ré | viation  | s fréquentes                          | 16 - |
| l.  |    | INTRO    | DUCTION                               | 17 - |
|     | 1. | Cadr     | e du travail                          | 17 - |
|     | 2. | Situa    | tion et Problématique                 | 17 - |
|     |    | 2.1.     | Histoire de l'hydrologie              | 17 - |
|     |    | 2.2.     | Tendance de l'évolution des crues     | 18 - |
|     |    | 2.3.     | Dégâts liés aux crues                 | 18 - |
|     |    | 2.4.     | Problématique et état de la recherche | 19 - |
|     | 3. | But o    | lu travail                            | 20 - |
|     | 4. | Trava    | ail effectué                          | 21 - |
|     | 5. | Conv     | entions                               | 23 - |
| II. |    | BASES    | THÉORIQUES                            | 24 - |
|     | 1. | Bassi    | n-versant BV                          | 24 - |
|     | 2. | Nive     | au d'eau ou hauteur d'eau H           | 25 - |
|     | 3. | Débi     | t Q                                   | 25 - |
|     |    | 3.1.     | Débit spécifique q                    | 25 - |
|     |    | 3.2.     | Mesure du débit                       | 25 - |
|     | 4. | Répo     | nse hydrologique                      | 27 - |
|     |    | 4.1.     | La fonction de transfert              | 28 - |
|     |    | 4.1.1    | . Influence de la géomorphologie :    | 28 - |
|     |    | Ta       | ille du bassin-versant                | 28 - |
|     |    | Fo       | rme du bassin-versant                 | 29 - |
|     |    | La       | hauteur topographique                 | 30 - |
|     |    | La       | pente                                 | 30 - |
|     |    | 4.1.2    | . Influence de la géologie :          | 30 - |
|     |    | 4.1.3    | . Influence de type de sol :          | 30 - |
|     |    | 4.1.4    | Influence de la végétation :          | 31 - |
|     |    | 4.2.     | Hydrogramme                           | 32 - |
|     |    | 4.2.1    |                                       |      |
|     | 5. | Crue     |                                       | 34 - |

| 6    |    | Coeff | fficient de ruissellement                                      | 37 - |
|------|----|-------|--|------|
| 7    |    | Temp  | ps de retour   | 37 - |
| 8    |    | Régir | me   | 38 - |
| III. | DI | ESCR  | RIPTION DU BASSIN-VERSANT                                      | 39 - |
| 1    |    | Choix | ix du bassin-versant   | 39 - |
| 2    |    | Desc  | cription géographique et géologique (Masson, 2010)             | 40 - |
|      | 2. | 1.    | Geographie   | 40 - |
|      | 2. | 2.    | Geologie und Geomorphologie                                    | 43 - |
| 3    |    | Mété  | éorologie (Riedener, 2010)                                     | 45 - |
|      | 3. | 1.    | Temperatur   | 45 - |
|      | 3. | 2.    | Jahresniederschlag   | 46 - |
|      | 3. | 3.    | Starkniederschläge   | 47 - |
|      | 3. | 4.    | Gewitterhäufigkeit   | 48 - |
|      | 3. | 5.    | Wiederkehrperiode Niederschlagsintensität                      | 48 - |
| 4    |    | Hydr  | rologie  | 50 - |
|      | 4. | 1.    | Fiche technique du bassin-versant                              | 50 - |
|      | 4. | 2.    | Réaction du bassin-versant de la Kleine Emme aux crues de 2005 |      |
|      |    | 4.2.1 | 1. Temps de retour de la crue de 2005                          | 51 - |
|      | •  | 4.2.2 | 2. Débit spécifique et volume de débit                         | 52 - |
|      |    | 4.2.3 | 3. Dégâts  | 53 - |
|      |    | 4.2.4 | 4. Processus dans le lit                                       | 53 - |
|      | 4. | 3.    | Indice de compacité de Gravelius:                              | 53 - |
|      | 4. | 4.    | Les principaux affluents                                       | 54 - |
|      | 4. | 5.    | Régime   | 54 - |
|      | 4. | 6.    | Statistique des débits et des crues                            | 56 - |
|      | 4. | 7.    | Hydrogramme de crue, réponse hydrologique                      | 57 - |
|      | 4. | 8.    | Ecogéomorphologie  | 59 - |
| 5    |    | RÉSE  | EAU DE MESURE  | 59 - |
|      | 5. | 1.    | Les stations de jaugeage                                       | 59 - |
|      |    | 5.1.1 | 1. Les stations de mesure existantes                           | 60 - |
|      |    | 5.1.2 | 2. Les nouvelles stations de mesure du niveau d'eau installées | 61 - |
|      |    | Cri   | ritères pour l'emplacement des stations                        | 61 - |
|      |    | Ch    | hoix des emplacements  | 62 - |
|      |    | Ca    | aractéristiques des stations de jaugeage GIUB                  | 65 - |
|      | 5. | 2.    | Station de mesures des précipitations                          | 65 - |

|        | 5.2.2   | 1.      | Bestehendes Niederschlagsmessnetz bis 2009  | 65 -   |
|--------|---------|---------|---|--------|
|        | Ве      | esteh   | endes Niederschlagsmessnetz im Einzugsgebiet  | - 66 - |
|        | Ве      | esteh   | endes Niederschlagsmessnetz ausserhalb des Einzugsgebietes                                  | 67 -   |
|        | 5.2.2   | 2.      | temporäres Niederschlagsmessnetz Juni – November 2009                                       | - 68 - |
| IV.    | MÉTH    | IODE    | S   | 70 -   |
| Partie | e 1 : L | 'insta  | allation et le calibrage des stations de jaugeage   | 70 -   |
| 1.     | Mes     | ure d   | u niveau d'eau  | 70 -   |
|        | 1.1.    | La so   | onde à pression   | 70 -   |
|        | 1.2.    | Le ra   | adar  | 72 -   |
| 2.     | Mes     | ure d   | u débit   | 72 -   |
|        | 2.1.    | Stra    | tégie de mesure aux quatre stations   | 73 -   |
| ,      | 2.2.    | La d    | ilution au sel  | 73 -   |
|        | 2.2.2   | 1.      | Estimation de la quantité de traceur nécessaire   | 73 -   |
|        | 2.2.2   | 2.      | Déroulement de la mesure  | 73 -   |
|        | 2.2.3   | 3.      | Le calcul du débit  | 74 -   |
|        | 2.2.4   | 4.      | Validation des résultats  | 75 -   |
| ,      | 2.3.    | La d    | ilution à l'uranine   | 76 -   |
|        | 2.3.2   | 1.      | Estimation de la quantité de traceur nécessaire   | 77 -   |
|        | 2.3.2   | 2.      | Déroulement de la mesure  | 78 -   |
|        | Su      | ır le t | errain  | 78 -   |
|        | Αι      | u labo  | pratoire  | - 80 - |
|        | 2.3.3   | 3.      | Validation des résultats  | 82 -   |
|        |         |         | rse des Hydrogrammes de crue de la station Werthenstein pour les 20 le la période 1984-2008 |        |
| 3.     | Elab    | oratio  | on de la série partielle  | 83 -   |
|        | 3.1.    | Crite   | ères d'indépendance :   | 84 -   |
| 4.     | Sépa    | aratio  | n de l'hydrogramme  | 85 -   |
|        | 4.1.    | Mét     | hode numérique à l'aide d'un filtre   | 85 -   |
|        | 4.2.    | Mét     | hode graphique avec une droite  | 86 -   |
| 5.     | Para    | mètr    | es de description des crues   | 86 -   |
|        | 5.1.    | Туре    | e de processus de crue  | 88 -   |
| Partie | e 3 : A | naly    | se des événements de l'été 2009   | 91 -   |
| 6.     | Choi    | ix des  | événements  | 91 -   |
| 7.     | Dép     | lacen   | nent de l'eau dans le bassin-versant  | 91 -   |
| Partie | e 4 : D | éter    | mination des zones clé  | 91 -   |

| 8.   | Décou       | page du bassin-versant en sous-bassins-versants   | 93 -  |
|------|-------------|---|-------|
| 9.   | Le mo       | dèle HQx_meso_CH  | 95 -  |
| 10   | ). Le n     | nodèle PREVAH   | 96 -  |
|      | 10.1.       | Les paramètres ajustables   | 97 -  |
|      | 10.2.       | Données d'entrée  | 98 -  |
|      | 10.3.       | Application du modèle au bassin-versant de la Kleine Emme   | 98 -  |
| V.   | RÉSULT      | ATS   | 100 - |
| Part | ie 1 : L'ir | nstallation et le calibrage des stations de jaugeage GIUB   | 100 - |
| 1.   | Courb       | e de tarage des 4 stations GIUB   | 102 - |
|      |             | analyse des Hydrogrammes de crue de la station de Werthenstein p<br>crues de la période 1984-2008 |       |
| 2.   | Descri      | ption des 20 plus grandes crues   | 109 - |
| Part | ie 3 : L'a  | nalyse des événements de l'été 2009   | 129 - |
| 3.   | Descri      | ption des événements de l'été 2009  | 130 - |
| Part | ie 4 : La   | détermination des zones clé   | 156 - |
| 4.   | HQx_r       | meso_CH   | 156 - |
| 5.   | PREVA       | λΗ  | 162 - |
| VI.  | Discuss     | ion   | 165 - |
| Part | ie 1 : L'ir | nstallation et le calibrage des stations de jaugeage GIUB   | 165 - |
|      |             | nalyse des hydrogrammes de crues de la station de Werthenstein po<br>es de la période 1984-2008   | •     |
| 1.   | Hydro       | gramme  | 168 - |
| 2.   | Type o      | de crue   | 169 - |
| Part | ie 3 : L'a  | nalyse des événements de l'été 2009.  | 172 - |
| 3.   | Hydro       | gramme  | 172 - |
| 4.   | Temps       | s de parcours entre les stations  | 173 - |
| 5.   | Temps       | s de concentration  | 176 - |
| 6.   | Туре        | de crue   | 177 - |
| 7.   | Le cas      | de Fontanne   | 177 - |
| Part | ie 4 : La   | détermination des zones clé   | 180 - |
| 8.   | HQx_r       | meso_CH Qmax :  | 180 - |
|      | 8.1. L      | a méthode müller-zeller   | 180 - |
|      | 8.2. L      | es modèles GIUB(Fn) et GIUB(MQ)   | 182 - |
|      | 8.3. L      | es résultats des sous-bassins-versants  | 182 - |
| 9.   | PREVA       | λΗ  | 183 - |

| g       | 9.1.  | PREVAH I et II1    | L83 - |
|---------|-------|--------------------|-------|
| S       | 9.2.  | PREVAH III 1       | L84 - |
| S       | 9.3.  | PREVAH IV 1        | 186 - |
| 10.     | Z     | ones clé           | 187 - |
| VII.    | CON   | NCLUSIONS 1        | 194 - |
| 1.      | Rép   | onse aux questions | 194 - |
| 2.      | Con   | clusion générale   | 198 - |
| Littéra | ature | 2 2                | 200 - |
| VIII.   | Ann   | nexes 2            | 204 - |

# Table des figures

| Tableau 1: Désignation des stations  | 23 -    |
|--|---------|
| FIGURE 1: DISTINCTION ENTRE BASSIN-VERSANT RÉEL ET TOPOGRAPHIQUE (MUSY, ET AL., 2009 P. 71)                                | 24 -    |
| Tableau 2: Quelques débits caractéristiques  | 25 -    |
| FIGURE 2: TRANSFORMATION DE LA PLUIE BRUTE EN HYDROGRAMME DE CRUE (MUSY, ET AL., 2009 P. 298)                              | 28 -    |
| FIGURE 3: A GAUCHE: INFLUENCE DE LA FORME DU BASSIN-VERSANT SUR L'HYDROGRAMME. DROITE: INFLUENCE DE LA POSITIOI            | N DU    |
| CENTRE DE GRAVITÉ DU BASSIN-VERSANT SUR L'HYDROGRAMME (BAUMGARTNER, ET AL., 1996 P. 525)                                   | 29 -    |
| FIGURE 4: SCHÉMATISATION DE FACTEURS INFLUENÇANT LA FORME DE L'HYDROGRAMME (DYCK, ET AL., 1989 P. 293)                     | 32 -    |
| FIGURE 5: PASSAGE D'UN LIMNIGRAMME À UN HYDROGRAMME PAR L'INTERMÉDIAIRE DE LA COURBE DE TARAGE (MUSY, ET AL. P. 211).      |         |
| FIGURE 6: HYÉTOGRAMME ET HYDROGRAMME RÉSULTANT D'UN ÉVÉNEMENT PLUIE-DÉBIT (MUSY, ET AL., 2009)                             |         |
| Figure 7: Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Datenquelle: Swisstopo 2010.   |         |
| FIGURE 8: BODENNUTZUNGSKARTE EZG KLEINE EMME. DATENQUELLE (BFS, 2001)  |         |
| FIGURE 9: MOLASSESCHICHTEN IM ENTLEBUCH. QUELLE: SCHLUNEGGER (2006)  |         |
| FIGURE 9. IVIOLASSESCHICHTEN IM ENTLEBUCH. QUELLE: SCHLUNEGGER (2006)  |         |
| Figure 11: Oben: Jahressummen des Niederschlags der MeteoSchweiz-Station Flühli von 1901-2009. Das Jahr 2                  |         |
| IST ALS ROTER BALKEN DARGESTELLT. DIE HELLBLAUE HORIZONTALE LINIE STELLT DEN LANGJÄHRIGEN MITTELWERT DAR.                  |         |
|  |         |
| DATENGRUNDLAGE: (MÉTÉOSUISSE). UNTEN: NIEDERSCHLAGSSUMMEN DER METEOSCHWEIZ-STATION FLÜHLI DER MC                           |         |
| JULI BIS OKTOBER VON 1901-2009. DAS JAHR 2009 IST ALS ROTER BALKEN DARGESTELLT. DIE HELLBLAUE HORIZONTAL                   |         |
| STELLT DEN LANGJÄHRIGEN MITTELWERT DAR (MÉTÉOSUISSE)   | 4/-     |
| FIGURE 12: RECHTS: ANZAHL TAGE MIT STARKNIEDERSCHLAG >= 70 MM WÄHREND DER MESSPERIODE VON 1901-1980.                       | 205     |
| KARTENGRUNDLAGE: ATLAS DE LA SUISSE (2004). LINKS: MITTLERER JAHRESNIEDERSCHLAG WÄHREND DER MESSPERIC                      |         |
| VON 1971-1990. KARTENGRUNDLAGE: ATLAS DE LA SUISSE (2004)  |         |
| FIGURE 13: NIEDERSCHLAGSINTENSITÄTS-DIAGRAMM DER MESSSTATION FLÜHLI VON 1901-1970 (GEIGER H., 1978)                        |         |
| TABLEAU 3: CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU BASSIN-VERSANT DE LA KLEINE EMME EN AMONT DE LA STATION WERTHENSTEI (OFEV, 2010). |         |
| Tableau 4: Valeurs records enregistrées aux stations Kleine Emme - Werthenstein et Littau en 2005 (OFEG, 200               | )5 P.   |
| 22)  | 50 -    |
| FIGURE 14: HYDROGRAMMES DE CRUE DES COURS D'EAU DU BASSIN-VERSANT DE LA REUSS (BEZZOLA, ET AL., 2007 P. 49)                | 51 -    |
| FIGURE 15: EVALUATION DU TEMPS DE RETOUR DES CRUES DE 2005 (OFEV, 2009).   | 52 -    |
| FIGURE 16: DÉBITS SPÉCIFIQUES DE POINTE [M²/S*KM²] PENDANT LES CRUES D'AOÛT 2005 (BEZZOLA, ET AL., 2007 P. 63)             | 52 -    |
| FIGURE 17: CARTE DES PRINCIPAUX AFFLUENTS DE LA KLEINE EMME EN AMONT DE LA STATION WERTHENSTEIN                            | 54 -    |
| FIGURE 18: COURBE DE RÉGIME À PARTIR DU COEFFICIENT DE PARDÉ POUR LA PÉRIODE 1993-2009 POUR LA KLEINE EMME AII             | NSI QUE |
| LES COEFFICIENTS MAX (ROUGE) ET MIN (VERT). SOURCE DES DONNÉES : OFEV.   | 55 -    |
| FIGURE 19: RÉPARTITION DES DÉBITS MENSUELS MOYENS POUR LA PÉRIODE 1984-2009 ET COMPARAISON AVEC LE DÉBIT ANNI              | UEL     |
| MOYEN. SOURCE DES DONNÉES : OFEV   | 56 -    |
| FIGURE 20: RÉPARTITION DES DÉBITS MENSUELS MAXIMUMS POUR LA PÉRIODE 1984-2009 ET COMPARAISON AVEC LE DÉBIT A               | NNUEL   |
| MAXIMUM. SOURCE DES DONNÉES : OFEV   | 56 -    |
| FIGURE 21: TEMPS DE RETOUR POUR LA KLEINE EMME À WERTHENSTEIN (OFEV, 2009).  | 57 -    |
| FIGURE 22: FORME DE L'HYDROGRAMME ET TYPE DE CRUE. SOURCE DES DONNÉES : OFEV   |         |
| FIGURE 23: HYDROGRAMME À LA STATION WERTHENSTEIN (MOYENNE HORAIRE) POUR LA PÉRIODE DU 26.6.2009 AU 10.10.                  | 2009.   |
| Source des données : OFEV  | 59 -    |
| FIGURE 24: RÉSEAU DE STATIONS HYDROMÉTRIQUES DANS LA RÉGION DE LA KLEINE EMME (OFEV, 2010)                                 | 60 -    |
| TABLEAU 5: STATIONS DE MESURE DU DÉBIT DE LA RÉGION DE LA KLEINE EMME SUPPRIMÉES AVANT 2009 (OFEV, 2009)                   |         |
| TABLEAU 6: STATION DE MESURE DU DÉBIT DE LA RÉGION DE LA KLEINE EMME EN FONCTION À FIN 2009 (OFEV, 2009)                   |         |
| FIGURE 25 : RÉSEAU HYDROMÉTRIQUE COMPLET AVEC LES STATIONS FÉDÉRALES, CANTONALES, DE CKW ET GIUB                           | 64 -    |
| Tableau 7: Caractéristiques des stations en fonction (Kan, 2002).  |         |
| FIGURE 26: VOR 2009 INSTALLIERTE NIEDERSCHLAGSSTATIONEN IM EINZUGSGEBIET.  | 66 -    |
| Tableau 8: Beschreibung der im Jahre 2009 bereits bestehenden Niederschlagsstationen innerhalb des                         |         |
| EINZUGSGEBIETES.   | 66 -    |
| FIGURE 27: IM JAHRE 2009 BEREITS INSTALLIERTE NIEDERSCHLAGSSTATIONEN AUSSERHALB DES EINZUGSGEBIETES                        |         |
| FIGURE 28: BESCHREIBUNG DER IM JAHRE 2009 BEREITS BESTEHENDEN NIEDERSCHLAGSSTATIONEN AUSSERHALB DES                        |         |
| EINZUGSGEBIETES.   | 67 -    |
| Figure 29: Temporäres Niederschlagsmessnetz während dem Sommer 2009.   |         |
| FIGURE 20: DESCUREIRUNG DER STATIONEN DES TEMPONÖDEN MESSNETZES INNERHALD DES EINZUESSERIETES                              |         |

| FIGURE 31: SONDE MESURANT LA CONDUCTIVITÉ SORTIE DE LA PARTIE DE PROTECTION MÉTALLIQUE POUR LE NETTOYAGE                  | 71 -   |
|---|--------|
| FIGURE 32: INTÉRIEUR DE L'ARMOIRE CONTENANT LE MATÉRIEL ÉLECTRIQUE DE LA STATION HYDROMÉTRIQUE GIUB 3                     | 72 -   |
| FIGURE 33: INSERTION DU SEL DILUÉ DANS LE COURS D'EAU DEPUIS UN PONT.   | 74 -   |
| FIGURE 34: CONDUCTIMÈTRES PLACÉS DANS LE COURS D'EAU ET ASSURÉS PAR UNE COURBE  | 74 -   |
| TABLEAU 9: CARACTÉRISTIQUES DE L'URANINE (SCHUDEL, ET AL., 2002 P. 12)  |        |
| FIGURE 35: INSERTION DE L'URANINE DANS LE COURS D'EAU À L'AIDE D'UN MÂT DEPUIS LE PONT "LANDBRÜGG" À SCHÜPFHEIM.          | - 77 - |
| FIGURE 36: COLORATION DE L'EAU QUELQUES MÈTRES EN AVAL DE L'INSERTION DU TRACEUR  |        |
| FIGURE 37: INSTALLATION DE LA POMPE ET DU SEAU.   | 78 -   |
| FIGURE 38: INTÉRIEUR DU BOÎTIER DE LA POMPE.  | 78 -   |
| FIGURE 39: INSERTION DE QUELQUES GOUTTES D'AMMONIAC DANS L'ÉCHANTILLON POUR RENDRE LA SOLUTION BASIQUE AVANT              | LA     |
| MESURE AVEC LE PICOFLUOR.   |        |
| FIGURE 40: PICOFLUOR (UN SPECTROMÈTRE DE TERRAIN).  |        |
| FIGURE 41: SPECTROPHOTOMÈTRE DE FLUORESCENCE.   |        |
| FIGURE 42: PIC D'URANINE POUR UNE LONGUEUR D'ONDE DE 519 [NM]   |        |
| FIGURE 43: CRITÈRE D'INDÉPENDANCE SELON DVWK (1999).  |        |
| TABLEAU 10: PARAMÈTRES DE DESCRIPTION DES CRUES   |        |
| TABLEAU 11: EVALUATION DU TEMPS DE MONTÉE À L'AIDE DU TEMPS ENTRE LA PREMIÈRE RÉACTION DU DÉBIT DIRECT ET DU PIC DE CRUE. |        |
| TABLEAU 12: EVALUATION DE LA VITESSE DE MONTÉE À L'AIDE DU PARAMÈTRE RTC  |        |
| FIGURE 44: SCHÉMA DU DÉROULEMENT DE LA MÉTHODE DE DIEZIG POUR L'ÉVALUATION DU TYPE DE PRÉCIPITATION DÉCLENCHEU            |        |
| (DIEZIG, 2006 P. 34)  |        |
| TABLEAU 13: LISTE DES SOUS-BASSINS-VERSANTS.  |        |
| FIGURE 45: NOM DES SOUS-BASSINS-VERSANTS. SOURCE DU FOND DE CARTE : SWISSTOPO.  |        |
| FIGURE 46: EXEMPLE DE GRAPHIQUE (GIUB2) AVEC LES RÉSULTATS DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE HQX MESO CH                        |        |
| FIGURE 47: SCHÉMA DE LA STRUCTURE DE PREVAH AVEC LES PARAMÈTRES AJUSTABLES, LES MODULES DE STOCKAGE ET LES FLUX           |        |
| HYDROLOGIQUES (VIVIROLI, ET AL., 2009).   |        |
| FIGURE 48: STATION GIUB 1, SÜDELGRABEN, FLÜHLI, HIRSEGGBRÜGG.   | 100 -  |
| FIGURE 49: STATION GIUB 2, KLEINE EMME, SCHÜPFHEIM, LANDBRÜGG.  | 100 -  |
| FIGURE 50: STATION GIUB 3, GROSSE ENTLE, GFELLE, STILAUB  | 101 -  |
| FIGURE 51: STATION GIUB 4, FONTANNEN, WOLHUSEN, MÜLIACHER.  | 101 -  |
| TABLEAU 14: RÉSULTATS DES MESURES PONCTUELLES DU DÉBIT À LA STATION GIUB 1, SÜDELGRABEN, FLÜHLI                           | 102 -  |
| FIGURE 52 : COURBE DE TARAGE PROVISOIRE POUR LA STATION GIUB 1, SÜDELGRABEN, FLÜHLI                                       | 102 -  |
| TABLEAU 15: RÉSULTATS DES MESURES PONCTUELLES DU DÉBIT À LA STATION GIUB 2, KLEINE EMME, SCHÜPFHEIM                       |        |
| FIGURE 53: COURBE DE TARAGE PROVISOIRE POUR LA STATION GIUB 2, KLEINE EMME, SCHÜPFHEIM.                                   |        |
| FIGURE 54: BOUT DE BOIS COINCÉ DANS LE TUYAU DE LA POMPE  |        |
| TABLEAU 16: RÉSULTATS DES MESURES PONCTUELLES DU DÉBIT À LA STATION GIUB 3, GROSSE ENTLE, GFELLE                          |        |
| FIGURE 55: COURBE DE TARAGE PROVISOIRE POUR LA STATION GIUB 3, GROSSE ENTLE, GFELLE.                                      |        |
| TABLEAU 17: RÉSULTATS DES MESURES PONCTUELLES DU DÉBIT À LA STATION GIUB 4, FONTANNEN, WOLHUSEN                           |        |
| FIGURE 56: COURBE DE TARAGE PROVISOIRE POUR LA STATION GIUB 4, FONTANNE, WOLHUSEN   |        |
| FIGURE 57: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME DE LA CRUE DU 21.08.2005. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET MÉTÉOSUIS:              |        |
| 109 -   | JL     |
| FIGURE 58: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 16.07.2002. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET MÉTÉOSUISSE       | 110 -  |
| FIGURE 59: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 08.08.2007. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                   |        |
| MÉTÉOSUISSE   | 111 -  |
| FIGURE 60: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 12.06.1997. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                   |        |
| MÉTÉOSUISSE   | 112 -  |
| FIGURE 61: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 29.07.2008. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                   |        |
| MÉTÉOSUISSE   | 112 -  |
| FIGURE 62: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 02.06.2004. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                   | 113    |
| MÉTÉOSUISSE   | 11/    |
| FIGURE 63: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 02.08.1996. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                   | 114-   |
| MÉTÉOSUISSE   | 115    |
|   | 112 -  |
| FIGURE 64: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 13.01.2004. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET MÉTÉOSUISSE       | 116 -  |
| FIGURE 65: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 14.07.2008. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                   | 117_   |

| FIGURE 66: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 06.08.2000. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
|---|
| MÉTÉOSUISSE118 -  |
| FIGURE 67: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 21.07.2007. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE119 -  |
| FIGURE 68: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 21.07.1992. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE120 -  |
| FIGURE 69: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 19.12.1987. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE121 -  |
| FIGURE 70: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 11.08.2002. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE 122 -   |
| FIGURE 71: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 25.05.1990. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE 123 -   |
| FIGURE 72: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 19.05.1994. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE 124 -   |
| FIGURE 73: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 04.07.2007. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE125 -  |
| FIGURE 74: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 14.02.1990. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| ·   |
| MÉTÉOSUISSE126 -  |
| FIGURE 75: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 16.07.2001. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE127 -  |
| FIGURE 76: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 10.10.1988. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE128 -  |
| FIGURE 77: NUMÉROTATION DES ÉVÉNEMENTS DE L'ÉTÉ 2009 PAR TAILLE. SOURCE OFEV130 -   |
| FIGURE 78: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME DE L'ÉVÉNEMENT DU 17.07.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                       |
| MÉTÉOSUISSE132 -  |
| $FIGURE~79: En~\text{HAUT}: \text{HYDROGRAMME DES STATIONS S\"{O}RENBERG~ET~WERTHENSTEIN, EN~BAS}: \text{NIVEAU~D'EAU~DES STATIONS~GIUB~1}$ |
| ET 4. SOURCES DES DONNÉES : OFEV, CKW ET UWE133 -   |
| TABLEAU 18: RÉSUMÉ DE L'HEURE D'ARRIVÉE DU PIC, DU DÉBIT/NIVEAU D'EAU MAXIMUM, VOLUME (POUR LES STATIONS CALIBRÉES),                        |
| ET DIFFÉRENCE DE TEMPS DE L'APPARITION DU PIC ENTRE LES STATIONS DANS LE BASSIN ET À L'EXUTOIRE POUR LES STATIONS EN                        |
| FONCTION. SOURCES DES DONNÉES : OFEV, CKW ET UWE133 -   |
| FIGURE 80: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 28.07.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE134 -  |
| FIGURE 81: HYDROGRAMMES ET COURBE DU NIVEAU D'EAU. SOURCES DES DONNÉES: OFEV, CKW ET UWE135 -   |
| TABLEAU 19: INFORMATIONS CONCERNANT LES PICS AUX STATIONS DE JAUGEAGE. SOURCES DES DONNÉES : OFEV, CKW ET UWE                               |
| 135 -   |
| FIGURE 82: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 15.07.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE136 -  |
| FIGURE 83: HYDROGRAMMES ET COURBE DU NIVEAU D'EAU. SOURCES DES DONNÉES: OFEV, CKW ET UWE137 -   |
| TABLEAU 20: INFORMATIONS CONCERNANT LES PICS AUX STATIONS DE JAUGEAGE. SOURCES DES DONNEES : OFEV, CKW ET UWE                               |
| 137 -   |
| FIGURE 84: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 05.09.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE138 -  |
| FIGURE 85: HYDROGRAMMES ET COURBE DU NIVEAU D'EAU. SOURCES DES DONNÉES: OFEV, CKW ET UWE139 -   |
| ,   |
| TABLEAU 21: INFORMATIONS CONCERNANT LES PICS AUX STATIONS DE JAUGEAGE. SOURCES DES DONNÉES : OFEV, CKW ET UWE                               |
| 139 -   |
| FIGURE 86: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 03.08.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE140 -  |
| FIGURE 87: HYDROGRAMMES ET COURBE DU NIVEAU D'EAU. SOURCES DES DONNÉES: OFEV, CKW ET UWE141 -   |
| TABLEAU 22: INFORMATIONS CONCERNANT LES PICS AUX STATIONS DE JAUGEAGE. SOURCES DES DONNÉES : OFEV, CKW ET UWE                               |
| 141 -   |
| FIGURE 88: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 08.08.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| MÉTÉOSUISSE142 -  |
| FIGURE 89: HYDROGRAMMES ET COURBE DU NIVEAU D'EAU. SOURCES DES DONNÉES: OFEV, CKW ET UWE143 -   |
| TABLEAU 23: INFORMATIONS CONCERNANT LES PICS AUX STATIONS DE JAUGEAGE. SOURCES DES DONNÉES : OFEV, CKW ET UWE                               |
| 143 -   |
| FIGURE 90: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 03.07.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET                                     |
| Μέτέοςτικες   |

| FIGURE 91: HYDROGRAMMES. SOURCES DES DONNEES: OFEV, CKW ET UWE   | 145 -    |
|--|----------|
| TABLEAU 24: INFORMATIONS CONCERNANT LES PICS AUX STATIONS DE JAUGEAGE. SOURCES DES DONNÉES : OFEV, CKW ET U  | JWE      |
| FIGURE 92: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 26.06.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET  |          |
| MÉTÉOSUISSE  | - 146 -  |
| FIGURE 93: HYDROGRAMMES. SOURCES DES DONNÉES: OFEV, CKW ET UWE   | _        |
| TABLEAU 25: INFORMATIONS CONCERNANT LES PICS AUX STATIONS DE JAUGEAGE. SOURCES DES DONNÉES : OFEV, CKW ET L  |          |
| 147 -  |          |
| FIGURE 94: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 10.10.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET  |          |
| MÉTÉOSUISSE  | 148 -    |
| FIGURE 95: HYDROGRAMMES ET COURBE DU NIVEAU D'EAU. SOURCES DES DONNÉES: OFEV, CKW ET UWE   | 149 -    |
| TABLEAU 26: INFORMATIONS CONCERNANT LES PICS AUX STATIONS DE JAUGEAGE. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET UWE   | 149 -    |
| FIGURE 96: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 03.09.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET  |          |
| MÉTÉOSUISSE).  |          |
| FIGURE 97: HYDROGRAMMES ET COURBE DU NIVEAU D'EAU. SOURCES DES DONNÉES: OFEV, CKW ET UWE   | 151 -    |
| Tableau 27: Informations concernant les pics aux stations de Jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et l<br>151 -   | JWE      |
| FIGURE 98: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 11.08.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET MÉTÉOSUISSE).  | 152 -    |
| FIGURE 99: HYDROGRAMMES ET COURBE DU NIVEAU D'EAU. SOURCES DES DONNÉES: OFEV ET UWE  | 153 -    |
| TABLEAU 28: INFORMATIONS CONCERNANT LES PICS AUX STATIONS DE JAUGEAGE. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET UWE   | 153 -    |
| FIGURE 100: FICHE TECHNIQUE ET HYDROGRAMME POUR L'ÉVÉNEMENT DU 02.09.2009. SOURCES DES DONNÉES : OFEV ET   |          |
| MÉTÉOSUISSE).  |          |
| FIGURE 101: HYDROGRAMMES ET COURBE DU NIVEAU D'EAU. SOURCES DES DONNÉES: OFEV, CKW ET UWE  |          |
| Tableau 29: Informations concernant les pics aux stations de Jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et U 155 -  | JWE      |
| TABLEAU 30: GRAPHIQUES PAR BASSIN-VERSANT CONTENANT LES RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION AVEC HQX_MESO_CH. EN  | N BLEU:  |
| LES RÉSULTATS POUR LES MÉTHODES ESTIMANT LE DÉBIT MAXIMUM ET EN ROUGE : POUR CELLES ESTIMANT LES DÉBITS  |          |
| CENTENNAUX. SUR L'AXE DES ABSICES LES DIFFÉRENTES MÉTHODES, SUR L'AXE DES ORDONNÉES LE DÉBIT [M³/s]  |          |
| FIGURE 102 : CARTE DES DÉBITS SPÉCIFIQUES (À PARTIR DE QMAX) SELON LA MÉTHODE DE KÜRSTEINER  |          |
| FIGURE 103: CARTE DES DÉBITS SPÉCIFIQUES (À PARTIR DE QMAX) SELON LA MÉTHODE DE MÜLLER-ZELLER  |          |
| FIGURE 104: CARTE DES DÉBITS SPÉCIFIQUES (À PARTIR DE QMAX) SELON LA MÉTHODE GIUB'96 F(FN).  |          |
| FIGURE 105: CARTE DES DÉBITS SPÉCIFIQUES (À PARTIR DE QMAX) SELON LA MÉTHODE GIUB'96 F(MQ)   |          |
| TABLEAU 31: RÉSULTATS DE L'ESTIMATION DES DÉBITS SPÉCIFIQUES MAXIMAUX POUR CHAQUE SOUS-BASSIN-VERSANT AVEC LE DOMAINE DE DISPERSION.   | 162 -    |
| $FIGURE\ 106:\ CARTE\ DES\ RÉSULTATS\ DES\ MOYENNES\ DES\ DÉBITS\ SPÉCIFIQUES\ POUR\ LES\ MÉTHODES\ ESTIMANT\ LE\ QMAX\ (SANS\ POUR\ LES\ POUR\ LES\ POUR\ LES\ MÉTHODES\ ESTIMANT\ LE\ QMAX\ (SANS\ POUR\ LES\ POUR\ LES POUR\ LES POUR\ LES POUR\ LES POUR\ LES POUR\$ |          |
| MÉTHODE KÜRSTEINER)  |          |
| FIGURE 107: RÉSULTATS DES DÉBITS SPÉCIFIQUES MAXIMUM POUR PREVAH I (DONNÉES MÉTÉOSUISSE, PÉRIODE 1984-200  | )8)      |
| 163 -  |          |
| FIGURE 108: RÉSULTATS DES DÉBITS SPÉCIFIQUES MAXIMUM POUR PREVAH II (DONNÉES MÉTÉOSUISSE RÉGIONALES, PÉRIO   |          |
| 1984-2008).  |          |
| FIGURE 109: RÉSULTATS DES DÉBITS SPÉCIFIQUES MAXIMUM POUR PREVAH III (DONNÉES MÉTÉOSUISSE, PÉRIODE ÉTÉ 2009  | ∄) 164   |
| FIGURE 110: RÉSULTATS DES DÉBITS SPÉCIFIQUES MAXIMUM POUR PREVAH IV (DONNÉES MÉTÉOSUISSE + GIUB, PÉRIODE 2009)   |          |
| FIGURE 111: MONTAGE D'UNE TENTE POUR PROTÉGER LES APPAREILS DE MESURE POUR LA DILUTION AU SEL  |          |
| FIGURE 112: FEUILLES ET BRINDILLES ACCROCHÉES À LA STATION GIUB 2  |          |
| TABLEAU 32: RÉSUMÉ DE QUELQUES ÉLÉMENTS DE DESCRIPTION DE CRUE.  |          |
| FIGURE 113: RÉPARTITION ANNUELLE DES TYPES DE PRÉCIPITATIONS DÉCLENCHEURS DE CRUES POUR LES 20 PLUS GRANDES CR   |          |
| la période 1984-2009 selon la méthode de Diezig (2006).  |          |
| FIGURE 114: RÉPARTITION DE LA PROPORTION DES TYPES DE PRÉCIPITATIONS QUI ONT DÉCLENCHÉ LES 20 PLUS GRANDS ÉVÉNE  |          |
| DE LA SÉRIE PARTIELLE (1984-2009).   |          |
| TABLEAU 33: RÉSUMÉ DE QUELQUES ÉLÉMENTS DE DESCRIPTION DE CRUES  | 172 -    |
| TABLEAU 34: PROPORTION DU VOLUME DE CRUE DE WERTHENSTEIN AUX STATIONS À SÖRENBERG, CKW ET SCHÜPFHEIM   | 173 -    |
| TABLEAU 35: TEMPS DE PARCOURS ENTRE CHACUNE DES STATIONS ET LA STATION DE WERTHENSTEIN (W) POUR LES ÉVÉNEME  | NTS DE   |
| L'ÉTÉ 2009. EN BLEU LES TEMPS POUR LESQUELS LE PIC À LA STATION DANS LE BASSIN-VERSANT EST ARRIVÉ AVANT CELL   | JI DE LA |

| APRÈS CELUI DE LA STATION WERTHENSTEIN17   | <sup>1</sup> 3 - |
|--|------------------|
| TABLEAU 36: RÉSULTATS DES TEMPS DE CONCENTRATION POUR CHAQUE SOUS BASSINS-VERSANTS AVEC LES MÉTHODES DE DYCK             |                  |
| (1989), Diezig (2006), Kreps et Kirpich (1940)17   | ⁄6 -             |
| FIGURE 115: TYPES DE PRÉCIPITATIONS QUI ONT DÉCLENCHÉ LES ÉVÉNEMENTS DE L'ÉTÉ 200917                                     |                  |
| Source des données de bases : OFEV 17  |                  |
| TABLEAU 37: TEMPS DE RÉACTION ET TEMPS ENTRE LE DÉBUT DE LA MESURE DE PRÉCIPITATIONS AUX STATIONS E (GIUB) ET NAPF       |                  |
| (MÉTÉOSUISSE). LA LÉGENDE SE TROUVE DANS LE TABLEAU 38. SOURCE DES DONNÉES : MÉTÉOSUISSE ET OFEV 17                      | 19 -             |
| TABLEAU 38: LÉGENDE DU TABLEAU 3717  |                  |
| FIGURE 116: CARTE DES ZONES CORRESPONDANTES AUX FORTES PRÉCIPITATIONS SELON ZELLER (SPREAFICO, ET AL., 2003 p. 58) 181 - |                  |
| TABLEAU 39: COEFFICIENT D'ÉCOULEMENT SELON MÜLLER ET ZELLER (SPREAFICO, ET AL., 2003 P. 57)18                            | 31 -             |
| FIGURE 117: RÉGIONS DE CRUES DU MÊME TYPE EN SUISSE SELON KAN (1995) DANS BARBEN (2003 P. 45)18                          |                  |
| FIGURE 118: SOMME DES PRÉCIPITATIONS MESURÉES PAR LES STATIONS DE MÉTÉOSUISSE, PUIS INTERPOLÉES POUR LA PÉRIODE DU       |                  |
| 26.06.2009 AU 13.10.2009 DANS LE BASSIN-VERSANT DE LA KLEINE EMME (RIEDENER, 2010)18                                     |                  |
| FIGURE 119: SOMME DES PRÉCIPITATIONS MESURÉES PAR LES STATIONS DE MÉTÉOSUISSE ET GIUB PUIS INTERPOLÉES POUR LA           |                  |
| PÉRIODE DU 26.06.2009 AU 13.10.2009 (RIEDENER, 2010)   | ₹7 -             |
| FIGURE 120: CLASSEMENT DES SOUS-BASSINS-VERSANTS SELON LA FRÉQUENCE DES PLUS HAUTS DÉBITS SPÉCIFIQUES MAXIMUMS           | •                |
| POUR LES CINQ MODÉLISATIONS. AVEC 1 LE MOINS FRÉQUENT ET 12 LE PLUS FRÉQUENT   | ₹9 -             |
| FIGURE 121: LITHOLOGIE DU BASSIN-VERSANT DE LA KLEINE EMME. SOURCE DU FOND DE CARTE : ATLAS DE LA SUISSE (2004) 1        |                  |
| -  | .50              |
| FIGURE 122: CAPACITÉ DE RÉTENTION HYDRIQUE. SOURCE DU FOND DE CARTE : ATLAS DE LA SUISSE (2004)19                        | an -             |
| FIGURE 123: STOCKAGE DE L'HUMIDITÉ DANS LE SOL (RIEDENER, 2010)19  |                  |
| TABLEAU 40: PROPORTION DES DIFFÉRENTS TYPES DE COUVERTURE DU SOL POUR LE SOUS-BASSIN DE ROTBACH. SOURCE DES              | -                |
| DONNÉES : (UWE, 2009) 19   | 12 -             |
| FIGURE 124: CARTE DE LA COUVERTURE DU SOL DU SOUS-BASSIN-VERSANT ROTBACH. SOURCE DES DONNÉES : (UWE, 2009) 19            |                  |
| TABLEAU 41: PROPORTION DES DIFFÉRENTS TYPES DE COUVERTURE DU SOL POUR LE SOUS-BASSIN GIUB 3. SOURCE DES DONNÉES :        |                  |
| (UWE, 2009)19  |                  |
| FIGURE 125: CARTE DE LA COUVERTURE DU SOL POUR LE SOUS-BASSIN-VERSANT DE GIUB 3. SOURCE DES DONNÉES : (UWE, 2009)        |                  |
| - 19   | •                |
| TABLEAU 42 : PROPORTION DES DIFFÉRENTS TYPES DE COUVERTURE DU SOL POUR LE SOUS-BASSIN GIUB 1. SOURCE DES DONNÉES         | _                |
| (UWE, 2009)19  |                  |
| FIGURE 126: CARTE DE LA COUVERTURE DU SOL POUR LE SOUS-BASSIN-VERSANT DE GIUB 1. SOURCE DES DONNÉES : (UWE, 2009)        | 9).              |
| TABLEAU 43: PROPORTION DES DIFFÉRENTS TYPES DE COUVERTURE DU SOL POUR LE SOUS-BASSIN LU14. SOURCE DES DONNÉES :          |                  |
| (UWE, 2009)19  | <del>)</del> 3 - |
| FIGURE 127: CARTE DE LA COUVERTURE DU SOL POUR LE SOUS-BASSIN-VERSANT DE LU14. SOURCE DES DONNÉES : (UWE, 2009)          |                  |
| 193 -  |                  |
| FIGURE 128: RÉPARTITION MENSUELLE DES 70 CRUES DE LA SÉRIE PARTIELLE19   | <del>)</del> 5 - |
| TABLEAU 44: TEMPS DE TRANSIT INDICATIFS ENTRE LES STATIONS À L'INTÉRIEUR DU BASSIN-VERSANT ET LA STATION DE              |                  |
| Werthenstein19   | <del>)</del> 6 - |
| FIGURE 129: FRÉQUENCE ANNUELLE DES ORAGES PROCHES ET LOINTAINS (MOYENNE 1931-1980) (ATLAS DE LA SUISSE, 2004) 197 -      |                  |

# Abréviations fréquentes

BV: Bassin-versant

CKW: Centrale électrique de Suisse-centrale SA (Centralschweizerische Kraftwerke AG)

GIS: Système d'information géographique (Geographical Information System)

GIUB: Institut de géographie de l'Université de Berne (Geographisches Institut der

Universität Bern)

HADES: Atlas hydrologique de la Suisse (Hydrologisches Atlas der Schweiz)

HAKESCH: Évaluation du débit dans les petits bassins-versants de la Suisse

(Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz) (Modèle)

HQ100: Débit d'une crue centenale [m³/s]

HQx: Débit d'une crue d'un temps de retour  $x [m^3/s]$ 

HQx\_meso\_CH: Évaluation du débit d'un temps de retour choisi dans les bassins-versants de

taille moyenne en Suisse (Hochwasserabschätzung beliebger Jährlichkeit in

mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz) (Modèle) (Barben, 2003)

HRU: Unité de réponse hydrologique (Hydrological Response Unit)

LU: Canton de Lucerne

LH: Section Hydrologie de l'Office fédéral de l'environnement (Landeshydrologie)

Ms.m. Mètre sur mer

OFEV / BAFU: Office fédéral de l'environnement (Bundesamt für Umwelt)

PREVAH: Modèle de précipitations – écoulement – évapotranspiration - hydrotope

(Precipitation-Runoff-Evapotranspiration-Hydrotope model)

(Viviroli, et al., 2009)

Qmax: Débit maximum [m³/s]

SHN: Service hydrologique national

UWE: Service Environnement et Energie du Canton de Lucerne (Abteilung **Umw**elt und

Energie der Kanton Luzern)

Vif: Service Transport et Infrastructure du Canton de Lucerne (Abteilung Verkehr und

Infrastruktur der Kanton Luzern)

WSL: Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (Wald, Schnee

und Landschaft)

## I. INTRODUCTION

# 1. CADRE DU TRAVAIL

La prévision des crues est en Suisse, un sujet important en particulier du fait que le pays est couvert d'un réseau très dense de cours d'eau et de grandes différences d'altitude relatives aux Alpes. Les crues peuvent provoquer des dommages très importants, comme par exemple celles de 2005 ou 2007. Une partie des coûts pourraient être évitée par une bonne prévision. Mon travail de Master ainsi que celui de deux autres étudiants, Pierre Masson et Sämi Riedener, ont pour but de densifier le réseau pluviométrique et hydrométrique du bassin-versant de la Kleine Emme à Werthenstein pour mieux comprendre la répartition des précipitations et du débit de crue. Ces travaux serviront de base à une future étude pour un système d'alarme de crues dans le bassin-versant de la Kleine Emme. Nous nous intéressons chacun à une partie spécifique. La partie qui me concerne se concentre en particulier sur les débits et l'identification des zones clé dans le bassin-versant. Samuel Riedener étudie plus précisément les précipitations et Pierre Masson s'occupe des aspects techniques de notre réseau de mesure ainsi que de l'application d'un modèle hydrologique (IHACRES) pour le bassin-versant.

Le Service des Transports et des Infrastructures du Canton de Lucerne (Verkehr und Infrastruktur (vif)) est intéressé à participer à notre projet dans le but d'exploiter les résultats de notre recherche et les instruments de mesures pour créer un système d'alarme de crues à long terme.

# 2. SITUATION ET PROBLÉMATIQUE

## 2.1. HISTOIRE DE L'HYDROLOGIE

Pendant l'Antiquité, l'homme a appris à domestiquer l'eau. Toutefois, c'est seulement dans les années 1850 que l'hydrologie passe du stade « contemplatif » au stade « explicatif » en instaurant la modélisation. La véritable prise de conscience de la nécessité d'une meilleure gestion de l'eau date seulement d'une trentaine d'années (Musy, et al., 2009 p. 10). Actuellement en Suisse, les réseaux météorologique et hydrologique sont gérés principalement par l'Institut suisse de météorologie (MétéoSuisse) et l'Office fédéral de

l'environnement (OFEV), qui dans sa division hydrologie dirige le Service hydrologique national (SHN).

## 2.2. TENDANCE DE L'ÉVOLUTION DES CRUES

Une étude sur l'évolution des cours d'eau (Birsan, et al., 2005) met en évience que l'écoulement hivernal à tendance a augmenter, en particulier pour les crues maximales. Cette augmentation pourrait être due au fait que le nombre de jours avec une température journalière minimale suppérieure à 0°C augmente, ce qui conduit à un décalage des précipitations sous forme de neige vers des précipitations sous forme de pluie. De plus, on constate une relation significative entre les tendances d'écoulement et les attributs du bassin-versant tels que l'élévation moyenne, la couverture de glacier et de rocher (positive), et la profondeur moyenne du sol (négative). Cette corrélation suggère que les bassins de montagne sont les plus vulnérables (Birsan, et al., 2005).

#### 2.3. DÉGÂTS LIÉS AUX CRUES

Les dégâts dus aux crues ou aux inondations suite à une gestion insuffisante ou mauvaise sont très importants et entraînent des coûts sociaux et financiers élevés. Le montant des dommages causés par les crues a augmenté de façon exponentielle ces dernières années en fonction du développement social et économique des régions dans lesquelles elles surviennent. Les crues de septembre 1987 ont coûté plus de 1.3 milliard de francs suisses alors qu'à elle seule, la crue de septembre 1993 à Brigue a fait trois morts et a coûté 650 millions de francs suisses. On évalue le coût des dégâts dus aux intempéries à 228 millions de francs suisses en moyenne par année (moyenne 1972-1996). En plus des coûts financiers, on compte 53 victimes lors d'événements extrêmes depuis 1971 (OccC, 1998) que l'on ne peut pas chiffrer en coûts (Musy, et al., 2009 p. 12). Pouvoir prédire une crue très rapidement permettrait de donner l'alarme, d'évacuer les zones à risques et de protéger une partie du matériel vulnérable et ainsi diminuer les pertes en vies humaines et les coûts (Nachtnebel, 2008 p. 260).

### 2.4. Problématique et état de la recherche

## Le fait que :

- les changements climatiques ont tendance à provoquer des événements toujours plus grands (Birsan, et al., 2005)
- que la Suisse de par sa situation géographiqe comprend beaucoup de bassins de montagne qui sont vulnérables aux crues
- que les crues causent des dégâts financiers et sociaux importants qui pourraient être diminués par de bonnes prévisions

sont les raisons qui nous poussent a étudier les crues plus en détails.

Le choix de la méthode pour l'estimation des crues dépend surtout données des mesures du débit et des précipitations à disposition pour le bassin-versant étudié.

Spreafico et al. (2003 p. 9) proposent une classification des méthodes d'estimation des crues selon la disposition des données concernant le débits et les connaissances du bassin-versant, utilisées dans la pratique en Suisse.

Dans les meilleurs cas, il existe une longue série de données hydrométriques qui permettent de faire une analyse statistique des valeurs extrêmes. L'utilisation du modèle Pluie-Débit nécessite aussi bien des données concernant le débit que les précipitations. Pour les bassinsversants non-jaugés, la méthode de transfert régional est la plus adaptée. Dans Spreafico et al. (2003 pp. 11-12), deux façons de faire appelées « fonctions de transfert régional » et « méthode taxonomiques régionales » sont distinguées. La première utilise des formules empiriques (par exemple Qmax = a Fn<sup>b</sup>) pour formuler la variabilité spatial de paramètres hydrologiques. La deuxième se base selon (Becker, 1992) dans Spreafico et al. (2003) « sur la régionalisation au sens d'une « subdivision du territoire en régions de régime semblable ou uniforme » ».

La prévision pour les petits bassins-versants est plus complexe du fait que chaque composante influant sur les écoulements a un rôle plus important; il y a moins de possibilités de compensation des valeurs des composantes mal estimées que dans les bassins plus grands (Spreafico, et al., 2003 p. 12). De plus, les stations hydrométriques et

météorologiques sont disposées sur une échelle beaucoup trop large pour connaître les conditions dans les petits bassins-versants, les données doivent être interpolées.

Pour l'étude des bassins de petite taille (<10 km²), les visites sur le terrains jouent un rôle important pour les raisons citées dans le paragaraphe ci-dessus (Spreafico, et al., 2003 p. 79). Le programme HAKESCH (Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz) développé par le WSL (Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage) permet de modéliser des débits. Il utilise plusieurs méthodes pour son évaluation, Müller, Taubmann, Kölla, modèle modifié du temps d'écoulement et Clark-WSL.

Pour l'estimation des débits dans les bassins-versants de taille moyenne (10-500 km²), il est possible d'utiliser les modèles HQx\_meso\_CH (Hochwasserabschätzung beliebger Jährlichkeit in mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz) et PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration-Hydrotope model). HQx\_meso\_CH est un modèle qui estime les débits maximums ou d'un certain temps de retour avec plusieurs méthodes de régionalisation, se référer à (Barben, 2003). PREVAH est un modèle qui simule le bilan hydrique et les hydrogrammes selon un système basé sur des réservoirs. La littérature à ce sujet se trouve dans (Viviroli, et al., 2009).

Le bassin-versant de la Kleine Emme pâtit du manque de stations de mesure pour une bonne prévision des crues. Ce travail de master, ainsi que ceux de Pierre Masson (Masson, 2010) et Samuel Riedener (Riedener, 2010), doit permettre une meilleure compréhension de la réponse hydrologique du bassin de la Kleine Emme en période de crue, grâce à l'installation de nouvelles stations de mesure des précipitations et du niveau d'eau.

# 3. BUT DU TRAVAIL

Le but général qui chapeaute nos trois travaux de master, celui de Pierre Masson, de Sämi Riedener et le travail présent, est d'installer des nouvelles stations de mesure du débit et des précipitations dans le bassin-versant de la Kleine Emme à Werthenstein. Ce nouveau réseau de stations de mesures permet de mieux comprendre la répartition des précipitations et du débit dans le bassin-versant. Il servira par la suite, dans le meilleur des cas, de base pour créer un système d'alarme contre les crues.

Ce travail étudie la partie concernant le débit. Il a pour but de densifier le réseau hydrométrique du bassin-versant de la Kleine Emme pour mieux comprendre sa réponse hydrologique en période de crue, c'est-à-dire sa réaction aux précipitations. Cela afin de pouvoir proposer des emplacements adéquats pour des stations hydrométriques permettant la prévision des crues à court terme.

Les questions suivantes seront traitées dans cette étude:

- Quelles sont les caractéristiques du débit de crue du bassin-versant de la Kleine
   Emme ?
- Quels types de précipitations provoquent les plus grandes crues de la série de mesure et les événements de l'été 2009 ?
- Quels sont les sous-bassins-versants qui réagissent avec les plus grands débits spécifiques ?
- Comment placer les stations hydrométriques dans le bassin pour obtenir un maximum d'informations pour un système de prévision contre les crues à Werthenstein?

# 4. Travail effectué

Ce travail est établi selon une construction classique (Introduction, Méthodes, Résultats, Discussion, Conclusions). Il est composé de huit parties principales :

- Introduction
- Base théorique
- Description du bassin-versant
- Méthodes
- Résultats
- Discussion
- Conclusions
- Annexes

Pour mieux représenter les différentes étapes du travail, les chapitres Méthodes, Résultats et Discussion sont séparés chacun en quatre parties décrites ci-dessous :

## Partie 1 : L'installation et le calibrage des stations de jaugeage GIUB.

Trois sondes à pression et un radar sont installés dans le bassin d'étude. Ces nouvelles stations mesurent le niveau d'eau. Pour connaître le débit à partir du niveau mesuré, il faut élaborer une courbe de tarage. On l'obtient en effectuant des mesures ponctuelles du débit par dilution.

Ces stations doivent donner des informations sur l'évolution du débit dans les différentes parties du bassin, et sont utilisées pour la partie 3 (voir ci-dessous).

# Partie 2 : L'analyse des hydrogrammes de crue de la station de Werthenstein pour les 20 plus grandes crues de la période 1984-2008.

Pour chaque événement de la série partielle de la station Werthenstein, une fiche technique et un hydrogramme sont préparés.

Cette partie nous permet de déterminer pour les plus grandes crues mesurées à Werthenstein:

- Les caractéristiques de la forme de l'hydrogramme
- Le type de précipitations déclencheur

# Partie 3 : L'analyse des événements de l'été 2009.

Dans cette partie consacrée aux événements de l'été 2009, l'analyse de la partie 2 est également effectuée et complétée par les données de la station hydrométrique de Sörenberg (Canton de Lucerne), des quatre sations GIUB et des précipitations.

## Cette partie permet d'étudier :

- La forme de l'hydrogramme à Werthenstein et aux stations à l'intérieure du bassinversant
- Une évaluation du temps de transit entre les stations (seulement dans le cas où les precipitations couvrent tout le bassin d'étude)
- Le volume d'eau engendré par les sous-bassins-versants jaugés.
- Le type de précipitations déclencheur

# Partie 4 : La détermination des zones clé.

Une zone clé pour la prévision de crues désigne un sous bassin-versant avec une grande prédisposition aux crues ; dont le débit spécifique dépasse celui de la majorité des autres sous-bassins-versants. Les débits spécifiques sont estimés à l'aide de modélisations avec les programmes HQx\_meso\_CH et PREVAH.

# 5. CONVENTIONS

Ce chapitre a pour but de clarifier les termes utilisés dans ce travail.

- Par bassin-versant on entend le bassin-versant topographique à moins qu'il ne soit spécifié différamment.
- Par bassin-versant de la Kleine Emme on entend la partie en amont de la stations de jaugeage de Werthenstein-Chappelboden.
- Par **stations GIUB**, on entend les nouvelles stations hydrométriques ou pluviométriques que nous avons intallées durant l'été 2009.
- Par stations de mesure du débit ou stations de jaugeage ou stations hydrométriques, on désigne également les stations GIUB qui ne donnent actuellement encore pas de données du débit. Elles sont en cours de calibration.
- Les stations hydrométriques sont appelées soit par leur **identifiant**, soit par le nom du cours d'eau sur lequel elles se situent ou le nom du village dans lequel elles se trouvent (pour les stations qui se trouvent sur le cours d'eau principal). Même remarque concernant le nom des sous-bassins-versants (voir tableau 1).

| Identifiant | Autre appélation                              |
|-------------|---|
| GIUB 1      | Südelgraben                                   |
| GIUB 2      | Schüpfheim                                    |
| GIUB 3      | (Grosse) Entle                                |
| GIUB 4      | Fontannen                                     |
| LU14        | Sörenberg, station cantonale                  |
| LH2487      | Werthenstein(-Chappelboden), Station fédérale |
| CKW         | Flühli  |

Tableau 1: Désignation des stations.

# II. BASES THÉORIQUES

## 1. Bassin-versant BV

Le bassin-versant en une section d'un cours d'eau est défini comme la surface drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de la section. Tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit donc traverser la section considérée, appelée **exutoire**, pour poursuivre son trajet vers l'aval.

Dans le cas d'une région au sous-sol perméable, il se peut qu'une partie des eaux tombées à l'intérieur du bassin topographique s'infiltre puis sorte souterrainement du bassin (ou qu'à l'inverse des eaux entrent souterrainement dans le bassin). Dans ce cas, nous serons amenés à ajouter aux considérations topographiques des considérations d'ordre géologique pour déterminer les limites du bassin-versant (figure 1). Cette distinction entre bassin topographique et hydrogéologique se justifie surtout pour les petits bassins. En effet, lorsque la taille du bassin augmente, les apports et les pertes souterraines ont plus de chance de se compenser. De plus, on peut admettre que le débit des cours d'eau est proportionnel à la surface du bassin, les échanges souterrains se font, eux, aux frontières et varient donc sensiblement comme le périmètre. Lorsque la taille du bassin augmente, la surface croît plus vite que le périmètre et les échanges souterrains deviennt négligeables par rapport au débit de surface (Laborde, 2000 p. 5).

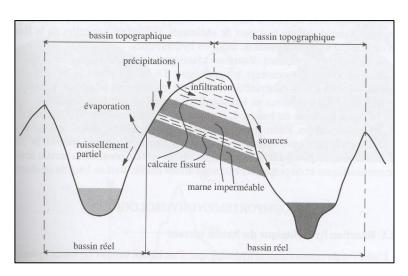


Figure 1: Distinction entre bassin-versant réel et topographique (Musy, et al., 2009 p. 71).

# 2. NIVEAU D'EAU OU HAUTEUR D'EAU H

Le niveau d'eau ou hauteur d'eau est la distance verticale entre la surface de l'eau et un niveau de référence (Loat, et al., 2003). Le niveau d'eau se mesure par exemple à l'aide d'une **échelle limnimétrique** fixée à la berge, d'un **limnigraphe à pression** (pneumatique), d'une **sonde à pression** ou d'un **radar**. L'avantage de ce dernier est qu'il n'est pas en contact avec l'eau et est donc protégé des chocs avec les matériaux de charriage (Spreafico, et al., 2005 pp. 47-8).

La courbe qui représente la hauteur d'eau dans le temps en un certain point du cours d'eau s'appelle **limnigramme**.

# 3. DÉBIT Q

Le débit est le volume total d'eau qui s'écoule à travers une section droite d'un cours d'eau pendant l'unité de temps considéré (Musy, et al., 2009). Contrairement à la hauteur d'eau, il nous donne des informations sur la quantité d'eau. Il est donné dans les unités m³/s ou l/s. On distingue plusieurs types débit (tableau 2).

| Débit [m³/s] | Description                               |
|--------------|---|
| HHQ          | Plus grand débit mesuré (plus haute crue) |
| HQx          | Débit pour un temps de retour x           |
| HQann        | Plus grand débit annuel                   |
| MQ           | Débit moyen pour une période donnée       |

Tableau 2: Quelques débits caractéristiques.

## 3.1. DÉBIT SPÉCIFIQUE Q

Le débit spécifique est le débit divisé par la surface du bassin-versant (m³/s\*km² ou l/s\*km²). Il est utilisé comme moyen de comparaison entre différents bassins-versants ou comme contrôle hydrologique simple pour les débits spécifiques maximaux. En effet, ces débits spécifiques varient de manière inversément proportionnelle à la surface sur laquelle ils sont calculés.

## 3.2. MESURE DU DÉBIT

Il n'existe encore aucune méthode fiable pour relever en continu un débit. Or, dans beaucoup de domaines (protection contre les crues, aménagement des cours d'eau, régulation des lacs, utilisation de la force hydraulique ou protection des eaux), c'est le débit qu'il faut connaître pour avoir des informations sur le volume et le temps (Jordi, 2006 pp. 37-8).

Le débit se mesure donc ponctuellement pour différents niveaux d'eau proche d'une station de mesure de la hauteur d'eau. Quelques méthodes sont brièvement décrites plus bas. Les résultats de ces mesures sont introduits à une **courbe de tarage** qui représente le débit en fonction du niveau d'eau. Il faut au moins 10 points, bien répartis entre les basses et hautes eaux pour obtenir une courbe de tarage. On appelle **jaugeage** l'ensemble des opérations destinées à mesurer le débit d'une rivière, en un lieu et un temps donné (Musy, et al., 2009).

## Il existe plusieurs méthodes de jaugeage :

L' « aile hydrométrique » (ou moulinet) est l'appareil le plus répandu. Il mesure la vitesse d'écoulement en plusieurs points sur une section d'un cours d'eau, en dénombrant le nombre de tours d'une élice en un temps donné. Un appareil analogue mesure par induction magnétique. Il existe plusieurs tailles d'aile pour mesurer des débits différents.

L'« Acoustic Doppler Current Profiler » (ADCP) est un appareil qui a quatre senseurs acoustiques qui mesurent la profondeur d'eau, l'intégrale de la vitesse d'écoulement sur la profondeur et le déplacement de l'appareil relativement au fond du lit. Il est bien adapté aux mesures de crue car il ne doit pas être plongé sous l'eau et permet des mesures rapides. Il faut un certain fond d'eau pour utiliser cet appareil.

La tige d'immersion de Jens peut mesurer la vitesse d'écoulement pour des petits cours d'eau par rapport à la profondeur. Les résultats ne sont pas aussi précis qu'avec une « aile hydrométrique » mais l'appareil permet d'économiser du temps, du personnel et du matériel. Il faut pouvoir traverser le cours d'eau, le courant ne doit donc pas être trop fort. La méthode de dilution se fait à l'aide d'une quantité déterminée de traceur. Un sel ou une matière fluorescente (l'uranine par exemple) sont la plupart du temps utilisés comme traceur. Grâce à la concentration mesurée en aval, il est possible de calculer la quantité d'eau nécessaire à la dilution. Le sel ne peut mesurer les débits que jusqu'à 4 m³/s, pour des débits plus élevés il faut utiliser l'uranine.

Des constructions artificielles, comme par exemple un **canal de Venturi** ou une chute engendre un changement d'écoulement, qui permet de déduire un débit grâce à la hauteur d'eau (Spreafico, et al., 2005 pp. 49-50).

La précision des mesures de débit dépend du type de cours d'eau, de la station de mesure, de la méthode de mesure et des appareils. Normalement, les mesures de débits moyens sont plus précises que celles des crues (Spreafico, et al., 2005 p. 52). En effet, pendant une crue le débit change rapidement.

Pour plus d'informations concernant les mesures du niveau d'eau ou du débit se référer à la littérature suivante : (Musy, et al., 2009 pp. 211-222) (Spreafico, et al., 2005 pp. 47-50) (Wyder, 1998) (Lukes, 2002) (Spreafico, et al., 1994) (Moor, 2004) (Schudel, et al., 2002) (Maniak, 2005) (Wernli, 2009) (Hodel, 1993) (Graf, et al., 2008) (Vischer, 2010) (Dyck, et al., 1989).

# 4. RÉPONSE HYDROLOGIQUE

La manière dont réagit le bassin-versant lorsqu'il est soumis à des précipitations se nomme réponses hydrologiques. Cette dernière se traduit à l'exutoire par une variation temporelle de débit. Une réponse rapide est imputable à l'écoulement de surface ou, par exemple, à un effet piston (écoulement souterrain rapide), ou encore à l'effet de la macroporosité du sol. La réponse est retardée si elle est due principalement aux écoulements souterrains. Dans le cadre d'une description des processus selon le principe établi par Horton, la transformation de la pluie en hydrogramme de crue se traduit par l'application successive de deux fonctions, nommées respectivement fonction de production — ou fonction d'infiltration — et fonction de transfert. La fonction de production permet de déterminer le hyétogramme de pluie nette à partir de la pluie brute (pluie totale tombant sur le sol). La fonction de transfert (voir figure 2) permet, quant à elle, de déterminer l'hydrogramme de crue résultant de la pluie nette (fraction de pluie brute participant totalement à l'écoulement) (Musy, et al., 2009 pp. 296-8).

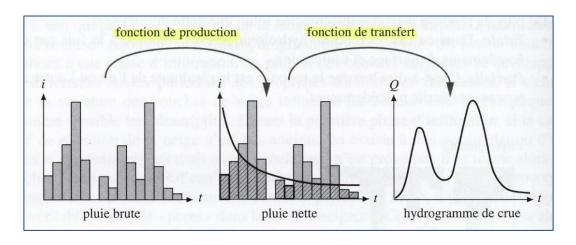


Figure 2: Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue (Musy, et al., 2009 p. 298).

## 4.1. LA FONCTION DE TRANSFERT

La fonction de transfert d'un bassin-versant correspond à la distribution statistique des temps de parcours des écoulements entre leurs lieux de production et l'exutoire du bassin. Le temps de parcours d'une goutte d'eau de pluie nette produite en un point quelconque du bassin est en fait complètement déterminé par le chemin parcouru par cette goutte d'eau pour rejoindre l'exutoire du bassin et par sa vitesse d'écoulement en tout point de ce parcours. La fonction de transfert est donc largement conditionnée par la géomorphologie du bassin-versant, par les caractéristiques de ses versants et de son réseau hydrographique (Hingray, et al., 2009 pp. 188-9).

## 4.1.1.INFLUENCE DE LA GÉOMORPHOLOGIE:

## TAILLE DU BASSIN-VERSANT

Le débit annuel moyen d'un bassin-versant augmente de façon générale avec sa taille. On observe le contraire concernant le débit spécifique. Cela s'explique par le fait qu'avec une plus grande surface, la partie montagneuse avec ses hauts débits spécifiques dus aux précipitations plus abondantes devient plus petite. Une augmentation temporaire du débit spécifique avec la taille du bassin-versant est cependant possible si un affluent avec un grand bassin-versant et un grand débit spécifique vient se greffer. Le temps de concentration grandit avec la taille du bassin-versant. Dans les grands bassins avec des grands affluents, une forte précipitation peut former plusieurs pics de crue car le pic du cours principal et ceux des affluents n'arrivent pas au même moment. La forme générale de l'hydrogramme est également influencée par la taille du bassin-versant. Les petits bassins ont une courbe qui

oscille beaucoup, phénomène qui est atténué dans les grands bassins, et qui est directement influencée par les précipitations alors que les grands bassins réagissent avec un certain retardement (Baumgartner, et al., 1996 p. 522).

## FORME DU BASSIN-VERSANT

Un bassin de **forme** allongée aura une fonction de transfert plus étalée qu'un bassin compact (voir figure 3).

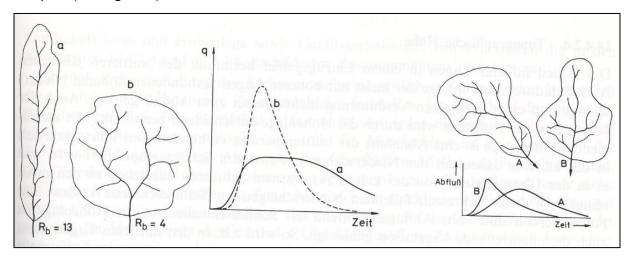


Figure 3: A gauche: influence de la forme du bassin-versant sur l'hydrogramme. Droite: influence de la position du centre de gravité du bassin-versant sur l'hydrogramme (Baumgartner, et al., 1996 p. 525).

L'indice de compacité de Gravelius  $K_G$  est une façon de caractériser la forme d'un bassinversant. Il est défini dans (Musy, et al., 2009 p. 79) comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface, soit :

$$K_G = P / 2*(\pi * A)^{1/2}$$

Avec:

P : le périmètre du bassin [km]

A: l'aire du bassin [km²]

K<sub>G</sub> est proche de 1 pour un bassin-versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus long. A l'inverse, les bassins en forme d'éventail présentant un temps de concentration plus court, auront des débits de pointes plus important.

#### LA HAUTEUR TOPOGRAPHIQUE

La hauteur du bassin-versant influence le débit annuel moyen car les précipitations augmentent et l'évaporation diminue avec l'altitude, ce qui aboutit à un plus grand débit. La saisonnalité du débit est également influencée par l'altitude à cause des précipitations qui tombent sous forme de neige et augmentent le débit lors des périodes de fonte. La végétation est également un critère, aux altitudes moyennes où il y a beaucoup de forêts. Elles interceptent les précipitations et sont souvent sur un sol très perméable ce qui atténue les crues. Dans les parties alpines par contre, l'eau s'écoule rapidement en surface (Baumgartner, et al., 1996 p. 526).

#### **LA PENTE**

La pente du lit a tendance à augmenter avec l'altitude. Cela a un effet sur la vitesse d'écoulement. L'hydrogramme d'un bassin pentu est caractérisé par une haute pointe fine et un court temps de concentration. Sur une pente raide l'écoulement de surface est grand par rapport aux écoulements de subsurface et de base (Baumgartner, et al., 1996 p. 526).

## 4.1.2. INFLUENCE DE LA GÉOLOGIE :

La géologie influence indirectement la taille, la forme et la morphologie d'un bassin-versant. La roche est d'une grande importance sur le processus de débit. Une nappe importante peut se former également dans les régions alpines par infiltration dans le karst ou dans les fissures. Cette nappe joue un rôle important surtout pendant les périodes sèches (Baumgartner, et al., 1996 p. 527).

## 4.1.3.INFLUENCE DE TYPE DE SOL:

La structure, la texture et la porosité d'un sol influence le processus de débit par la perméabilité et les capacités de stockage. Ces deux derniers facteurs sont dépendants ; une capacité de stockage élevée est le plus souvent liée à une faible perméabilité. Ce genre de bassins a en règle générale de petits écoulements de subsurface et de base et un hydrogramme de crue relativement plat. Le débit annuel moyen est dans ce cas faible par rapport aux précipitations à cause de l'évaporation. Les sols avec une faible capacité de stockage et une porosité importante ont de grands écoulements de subsurface et de base. Suite aux précipitations, la courbe de montée de l'hydrogramme est relativement rapide et

la pointe de crue haute, le débit de la courbe de décrue retombe rapidement (Baumgartner, et al., 1996 p. 528).

## 4.1.4.INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION:

La végétation joue un rôle sur l'évaporation dans un bassin-versant au travers de l'interception et de la transpiration. Elle influence le débit annuel moyen mais également saisonnier; par exemple dans les forêts de feuillus l'interception est très différente en été et en hiver à cause de la perte des feuilles. La végétation influence positivement l'infiltration en ralentissant l'écoulement de l'eau à la surface, lui donnant ainsi plus de temps pour pénétrer dans le sol. D'autre part, le système radiculaire améliore la perméabilité du sol. L'interception ralentit l'écoulement et la transpiration le diminue. La rugosité du sol dépend entre autre du type de végétation (Baumgartner, et al., 1996 p. 529).

La fonction de transfert dépend également de la **sollicitation météorologique**, la réactivité d'un bassin est généralement d'autant plus forte que les précipitations sont intenses (Hingray, et al., 2009 pp. 288-9). Hingray et al. (2009 p. 133), propose une formule pour le bilan hydrologique de surface :

$$\Delta S_S = \Delta S_D + \Delta S_I = P - F - E - V_R$$

Avec:

 $\Delta Ss$ : Volume emmagasiné entre la surface du bassin et le toit de la canopée (comprenant l'interception  $\Delta S_1$  et le stockage à la surface du sol  $\Delta S_D$ )

P : Précipitations totale tombées sur le bassin-versant

V<sub>R</sub>: Volume d'écoulement direct (atteignant rapidement l'exutoire)

ET: Quantités d'eau perdue par évaporation (de l'eau à la surface libre) et transpiration

F : Quantité d'eau perdue par infiltration

Dyck et al. (1989 pp. 292-3) a schématisé la réaction de quelques facteurs sur l'hydrogramme dans la figure 4:

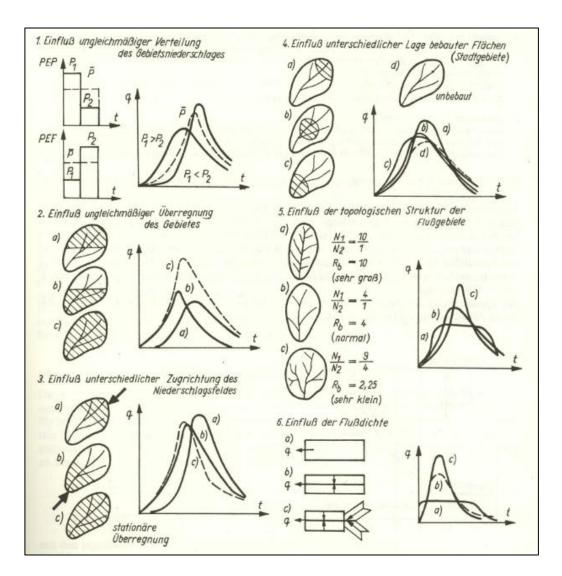


Figure 4: Schématisation de facteurs influençant la forme de l'hydrogramme (Dyck, et al., 1989 p. 293).

## 4.2. HYDROGRAMME

Un hydrogramme est la courbe qui représente la hauteur du débit avec le temps en un certain point d'un cours d'eau. On l'obtient en combinant le limnigramme et la courbe de tarage (voir figure 5).

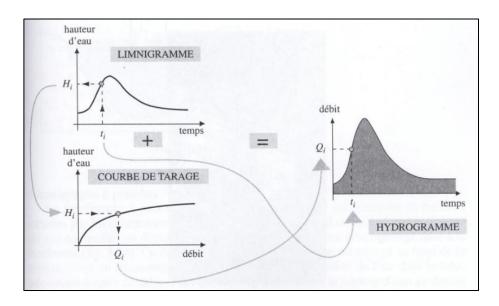


Figure 5: Passage d'un limnigramme à un hydrogramme par l'intermédiaire de la courbe de tarage (Musy, et al., 2009 p. 211).

Chaque hydrogramme contient des informations concernant les conditions climatiques et physiologiques du bassin-versant. La forme de la courbe ascendante de l'hydrogramme est déterminée par les caractéristiques du bassin et des précipitations alors que la courbe descendante est influencée par les propriétés de stockage du bassin-versant et du lit (Dyck, et al., 1989 p. 295).

## 4.2.1.SÉPARATION DE L'HYDROGRAMME

Pendant une crue, il est possible de distinguer trois parties sur l'hydrogramme. Musy et al. (2009 pp. 175-8) propose les descriptions suivantes :

- L'écoulement de surface ou ruissellement est constitué par la frange d'eau qui, après une averse, s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols. Il forme l'essentiel de l'écoulement rapide de crue, le débit direct dans l'hydrogramme. Il y a deux modes principaux d'écoulement : par dépassement de la capacité d'infiltration (écoulement hortonien) et l'écoulement sur surfaces saturées. Ils peuvent se combiner.
- L'écoulement de subsurface : correspond à la partie des précipitations infiltrées qui chemine quasi horizontalement dans les couches supérieures du sol pour réapparaître à l'air libre, à la rencontre d'un chenal d'écoulement. Cette eau peut contribuer rapidement au gonflement de la crue. Les caractéristiques du sol déterminent l'importance de cet écoulement de subsurface qui peut être important.

Cet écoulement tend à ralentir le cheminement de l'eau et à allonger la durée de l'hydrogamme.

• L'écoulement souterrain ou écoulement de base: lorsque la zone d'aération du sol contient une humidité suffisante pour permettre la percolation profonde de l'eau, une fraction des précipitations atteint la nappe phréatique. L'importance de cet apport dépend de la structure et de la géologie du sous-sol ainsi que du volume d'eau précipité. L'eau transite à travers l'aquifère à une vitesse de quelques mètres par jour à quelques millimètres par an avant de rejoindre le cours d'eau. A cause des faibles vitesses dans le sous-sol, l'écoulement de base n'intervient que pour une faible part dans l'écoulement de crue. De plus, il ne peut pas être toujours relié au même événement pluvieux que l'écoulement de surface. L'écoulement de base assure en général le débit des rivières en l'absence de précipitations et soutient les débits d'étiages (l'écoulement des régions karstiques fait exception à cette règle).

# 5. CRUE

Selon Aschwanden et al. (1995) on parle de crue dès que l'écoulement de base est nettement dépassé pendant un certain temps. La hauteur que devrait atteindre ce dépassement pour que l'on puisse parler de crue est une question qui doit être réglée de cas en cas. Le plus souvent, on utilise un seuil défini par un débit qui est un multiple entier du débit moyen. Dyck et al. (1989) ajoute qu'une crue suit un événement météorologique ou une catastrophe.

On distingue quatre parties à l'hydrogramme de crue (Musy, et al., 2009 pp. 298-9)(figure 6):

- La courbe de montée ou de concentration qui correspond à la montée de la crue.
   L'allure de cette courbe reflète les caractéristiques topographiques du bassin et celles de l'averse.
- La pointe ou crête de l'hydrogramme ou de la crue, est le point compris entre le point d'inflexion de la courbe de concentration et celui de la courbe de décrue. L'instant où la pointe de l'hydrogramme se produit est pris en compte pour la détermination du temps de réponse du bassin-versant et du temps de montée de l'hydrogramme. C'est l'instant où le débit de la crue en question est le plus grand. On parle de débit de pointe. En pratique, les hydrogrammes comportent souvent

- plusieurs pointes en raison de la forme irrégulière du bassin et de l'hétérogénéité spatiale et temporelle de l'averse.
- La courbe de décrue traduit la vidange du bassin, toute alimentation directe ayant cessé. L'allure de cette courbe est presque indépendante des variations d'intensité de la pluie et de l'infiltration. Elle est principalement fonction des caractéristiques physiques du réseau hydrographique. Cette courbe est donc la seule partie de l'hydrogramme qui puisse être approximativement représentée par une équation générale de forme exponentielle applicable à la majorité des averses tombant sur un même bassin.
- La **courbe de tarissement** est la partie de l'hydrogramme générée par les seuls écoulements souterrains, alors que tout écoulement de surface a déjà cessé.

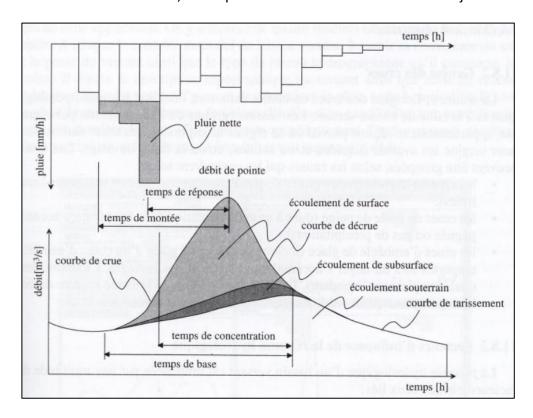


Figure 6: Hyétogramme et hydrogramme résultant d'un événement pluie-débit (Musy, et al., 2009).

On définit aussi des temps caractéristiques (Musy, et al., 2009 p. 299)(figure 6):

**Temps de concentration t**<sub>c</sub>: temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. On peut estimer tc en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct. Ce temps

reflète la durée de l'effet des précipitations sur le débit. Il n'est pas une valeur fixe, il varie avec le niveau d'eau car le rayon hydraulique et la rugosité en dépendent.

Dyck, et al. (1989 p. 298) propose une approximation pour les cours d'eau de moyenne montagne:

$$t_c = 0.265 * L^{2/3} / I^{1/3}$$

Avec :  $t_c$  en h, L la distance entre le point le plus éloigné sur la ligne de partage des eaux et l'exutoire en km et I=H/L avec H la différence d'altitude entre le point le plus éloigné sur la ligne de partage des eaux et l'exutoire en m.

Diezig (2006) utilise une autre approximation:

$$t_c = 2 * F_N^{0.35}$$

Avec: F<sub>N</sub> la surface du bassin-versant en km<sup>2</sup>.

L'OFEV utilise la formule suivante selon Kreps :

$$t_c = 0.89 * F^{0.4} - 0.15$$

Avec : t<sub>c</sub> en h et F la taille du bassin-versant en km<sup>2</sup>.

Le US Soil Conservation Service propose la formule de Kirpich (1940) dans Nachtnebel (2008):

$$tc = (0.868 * L^3 / H)^{0.385}$$

Avec : L la longueur du cours d'eau principal en km, H la différence d'altitude entre le point le plus haut et celui le plus bas du cours d'eau principal en m.

**Temps de montée t**<sub>m</sub> : temps qui s'écoule entre l'arrivée à l'exutoire de l'écoulement rapide (décelable par le limnigraphe) et le maximum de l'hydrogramme de ruissellement.

**Début et fin de la crue** : Une crue commence au moment où l'écoulement de surface (débit direct) augmente de façon visible par rapport au débit de base et se termine au moment où

les deux hydrogrammes se rejoignent. C'est la méthode que Steiner (2007) propose dans son travail.

**Temps de réaction :** C'est le temps qui sépare le début des précipitations et la première réaction visible sur l'hydrogramme.

# 6. COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

Rapport entre la hauteur d'eau ruisselée et la hauteur d'eau précipitée. Ce coefficient traduit le fait que toute l'eau reçue par un bassin-versant ne se retrouve pas nécessairement à l'exutoire au vu des différents termes de pertes apparaissant dans l'équation du bilan hydrique (interception, évaporation, infiltration) (Musy, et al., 2009 p. 75). Le coefficient de ruissellement est en principe inférieur à l'unité et est variable d'un événement à l'autre. La productivité moyenne d'un bassin est dépendante, pour un contexte climatique donné, de ses caractéristiques et en particulier de la topographie, de l'occupation des sols et de leur nature (Hingray, et al., 2009 pp. 133-4).

### 7. TEMPS DE RETOUR

En règle générale, lorsque l'on étudie les débits de crue, on cherche à déterminer la probabilité pour qu'un débit Q ne soit pas dépassé (soit inférieur ou égal à une valeur x). Cette probabilité est donnée, si X représente une variable aléatoire, par la relation suivante :

$$F_x(x) = P(X \le x)$$

On nomme cette probabilité fréquence de non-dépassement ou probabilité de non-dépassement. Son complément à l'unité est appelé probabilité de dépassement, fréquence de dépassement ou encore fréquence d'apparition. On définit alors le temps de retour T d'un événement comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition au non-dépassement de l'événement. Soit :

$$T = 1 / 1 - F_x(x)$$

Ainsi, un débit de temps de retour T est un débit qui sera dépassé en moyenne toutes les T années (Hingray, et al., 2009 p. 346).

# 8. RÉGIME

Le régime hydrologique peut être vu comme l'élément de liaison de l'espace-temps hydrologique. Il contient des données hydrologiques, géographiques et climatologiques sur plusieurs années (Musy, et al., 2009 p. 257).

Le coefficient de Pardé, décrit par la formule suivante, est utilisé pour définir la courbe de régime (Weingartner, et al., 1992) :

Le régime est différencié en trois classes principales (Musy, et al., 2009 p. 266):

- Alpin
- Du plateau et du Jura
- Du sud des Alpes.

### III. DESCRIPTION DU BASSIN-VERSANT

Le premier chapitre de cette partie explique le choix du bassin-versant de la Kleine Emme à Werthenstein pour cette étude.

La réaction de cette région aux crues de 2005 fait l'objet du deuxième chapitre.

Puis la géographie et la géologie sont décrites ainsi que les caractéristiques météorologiques et hydrologiques.

Un dernier chapitre donne une vue d'ensemble du réseau des stations de mesure des précipitations et du débit officielles qui sont disposées dans le bassin ainsi que des nouvelles stations qui ont été installées durant l'été 2009 pour notre étude.

## 1. CHOIX DU BASSIN-VERSANT

Trois bassins-versants ont fait l'objet d'une courte étude afin de déterminer lequel est le plus adapté pour la densification du réseau de mesures en vue d'un système de prévention contre les crues. Ces trois bassins sont la Sense à Thörishaus, l'Emme à Eggiswil et la Kleine Emme à Werthenstein. Le réseau de stations et leurs périodes de mesures, ainsi que le temps de concentration, le débit moyen, la surface et le régime sont documentés pour chacun des 3 bassins. A ceci s'ajoute un commentaire sur les éventuelles études déjà parues, les systèmes d'alarmes en fonction et les avantages et inconvénients du bassin pour notre étude.

Les bassins-versants de la Sense et de l'Emme sont déjà équipés d'un système d'alarme. Ces deux bassins disposent moins de stations de mesure en service que celui de la Kleine Emme. C'est entre autre les raisons pour lesquelles le bassin-versant de la Kleine Emme est favori. De plus, il bénéficie d'un réseau de stations pluviométriques relativement dense avec six stations en fonction et une station supprimée. En plus de la station de Werthenstein, le débit est aussi mesuré sur la Waldemme à Sörenberg par le Canton de Lucerne.

Suite aux événements de 2005 qui ont causé beaucoup de dégâts, un projet de renaturalisation est mis en place. Dans le cadre de ce projet, un système d'alarme contre les crues doit être installé. Pour l'instant les démarches pour la création de ce système n'ont pas encore été entamées. Le Service Transport et Infrastructure (Verkehr und Infrastuktur (vif)) du Canton de Lucerne est intéressé par une collaboration avec notre projet. Le Service Environnement et Energie (Umwelt und Energie (uwe)), qui gère les stations pluviométriques

et du débit dans le Canton de Lucerne est prêt à mettre à notre disposition les données mesurées.

Le temps de concentration calculé à l'aide de la formule de Kirpich (1940) est de 3.71 heures pour le bassin-versant de la Kleine Emme, il est un peu plus long que les deux autres bassins et permet une plus grande marge de maneuvre en cas de crue. La formule de Kirpich (1940) est plus robuste que celles de Dyck et al. (1989), Diezig (2006) ou Kreps dans Helbling et al. (2006), car elle tient compte de la longueur du cours d'eau et de la différence d'altitude qu'il parcourt et pas seulement de la surface du bassin-versant.

Finalement, la Kleine Emme s'écoule dans une région qui est souvent menacée par des orages qui provoquent des montées rapides du débit.

Les éventuelles difficultés relevées sont :

- la région karstique dans la partie nord-ouest du bassin
- la période de mesure des stations cantonales relativement courte
- le fait que la station de mesure du débit de Sörenberg n'est pas validée pour des grands débits.

# 2. DESCRIPTION GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE (MASSON, 2010)

Les caractéristiques géographiques et géologiques sont des éléments clé de la réponse hydrologique d'un bassin-versant. Elles influencent le type de précipitations suivant les régions et l'altitude, la vitesse d'écoulement de l'eau de surface et souterraine et les capacités de stockage de l'eau.

#### 2.1. GEOGRAPHIE

Als Untersuchungsgebiet für die vorliegende Arbeit dient das Einzugsgebiet der Kleinen Emme bis zum Pegel Werthenstein. Diese Forschungsregion erstreckt sich über eine Fläche 311 km² weshalb diese Landschaft als mittelgrosses Einzugsgebiet (EZG) klassiert wird (Schädler, et al., 1992). Das Quellgebiet der Waldemme liegt am Nordhang des Brienzer Rothorns oberhalb von Sörenberg.

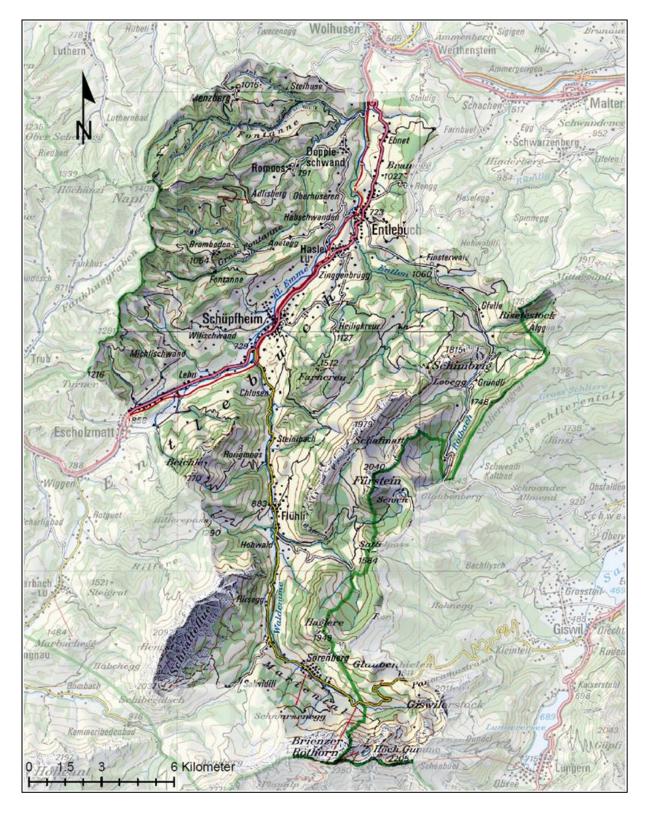


Figure 7: Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Datenquelle: Swisstopo 2010.

Mit einer mittleren Höhe von 1173 m.ü.M liegt dieses Einzugsgebiet in der Übergangszone von Mittelland und Voralpen. Im Süden begrenzt die Bergkette um das Brienzer Rothorn (2350 m.ü.M.) das EZG und im Westen stellt der Napf (1410 m.ü.M.) einen markanten Punkt

der EZG-Grenze dar. Im Osten verläuft die Wasserscheide über den Giswiler Stock (2011 m.ü.M.) (uwe 2010). Die Hauptwasserläufe lassen sich wie folgt beschreiben (Figure 7): Im Quellgebiet, beim sogenannten Emmensprung auf 1467 m.ü.M, entspringt die Waldemme, die flussabwärts durch die Einmündung des Südelgrabens ergänzt wird. Mit der Einmündung der Wiss Emme in die Waldemme kurz vor Schüpfheim ändert sich der Name des Flusses. So entsteht der für das Einzugsgebiet bestimmende Name der Kleinen Emme. Bei der Abflussmessstation Werthenstein verlässt die Kleine Emme das Untersuchungsgebiet und mündet schlussendlich bei Luzern in die Reuss.

Für hydrologische Forschungsarbeiten, ist unter anderem die Bodenbedeckung eines Einzugsgebietes von grosser Relevanz. In der Figure 8 sind die vier Hauptkategorien der Arealstatistik dargestellt (BFS, 2001). Die Anteile an bestockten Flächen (42.48%) und Landwirtschaftsflächen (46.92 %) fallen im vorliegenden Einzugsgebiet jeweils um 10 % höher aus, als im Schweizer Durchschnitt. Die Siedlungsfläche hingegen umfasst gerademal 3.02 %, was der Hälfte des knapp

eidgenössischen Durchschnittes

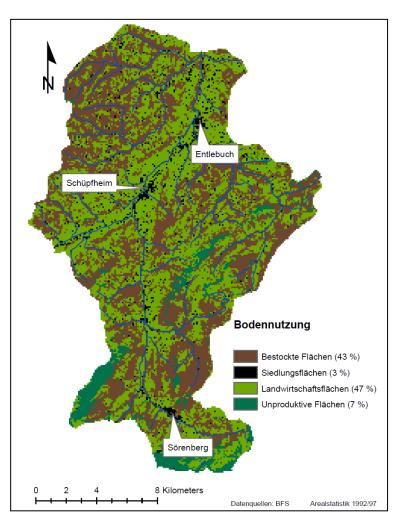


Figure 8: Bodennutzungskarte EZG Kleine Emme. Datenquelle (BFS, 2001).

entspricht. Diese Verteilung der Bodennutzung zeigt ein typisches Bild einer voralpinen Region auf. Auch das dominierende Landschaftsbild der Landwirtschaftsflächen verdeutlicht den ländlich geprägten Charakter dieser Landschaft in der Zentralschweiz. Der Anteil von 7.57 % unproduktiver Fläche (Schweiz: 25.5 %) beschränkt sich auf die Höhenzüge im Einzugsgebiet der Kleinen Emme.

### 2.2. GEOLOGIE UND GEOMORPHOLOGIE

Betrachtet man den geologischen Untergrund der Region Entlebuch, lassen sich unterschiedliche Molasseschichten erkennen und zeitlich einordnen. Der Begriff der Molasse beschreibt geologische Ablagerungen im Vorland eines Gebirges während dessen Entstehung (Labhart, 2009). Die Untere Meeresmolasse (UMM) entstand vor 35 bis 30 Millionen Jahren. Schlammströme und Murgänge führten zu Ablagerungen von Sandstein auf dem Grund des Restmeeres im Mittelland. Zudem führten ruhige Zeitphasen zur Sedimentation von feinen Mergelschichten. Durch das schnellere Heben der Alpen vor 30 Mio. Jahren, wurde mehr Gestein an der Oberfläche abgetragen und im nördlichen Molassegebiet wieder akkumuliert. Durch die Verlandung des Meeres entstand eine Flusslandschaft. Die daraus entstandene Untere Süsswassermolasse (USM) ist aus grobkörnigem Material aufgebaut. Noch heute sind Nagelfluhbänke dieser Molasseschicht an der Beichlen zu sehen Figure 9). Die Tatsache, dass die USM an der Erdoberfläche zu sehen ist, kann mit dem weiteren Vorrücken der Alpen erklärt werden. Heutzutage kann nachgewiesen werden, dass durch Stauchung und Verschiebung der geologischen Strukturen Molasseschichten bis zu 4000 m herausgehoben wurden (Zemp, et al., 2005 p. 6). 20 bis 18 Mio. Jahre vor der heutigen Zeit, wurde die USM von einem, durch die fortschreitende Hebung der Beichlen-Schichten gebildeten Meer überflutet. Wiederum kam es in der Folge zu Ablagerungen von feinen Sandsteinen. Diese, durch brandende Wellen und Gezeitenströme umgelagerte Molasseschicht, nennt man Obere Meeresmolasse (OMM). Als Folge der fortschreitenden Alpenfaltung, wurde das Meer wieder mit Schutt gefüllt. In dieser Zeit (vor 18 bis 14 Mio. Jahren) bildeten sich die Obere Süsswassermolasse (OSM) und auch wieder Nagelfluhbänke. Auch die Bildung des Napfschuttfächers als Ablagerungsort des Napfflusses (Uraare) lässt sich in diese Zeit einordnen (Zemp, et al., 2005 p. 5). Ein weiterer Vorschub der helvetischen Decke löste ein Überfahren der bereits abgelagerten Molasseschichten aus. Durch das Überschieben wurden am nördlichen Alpenrand die Molasseschichten verfaltet oder in Späne und Schuppen aufgetrennt. Die so entstandene subalpine Molasse prägt mit "langgestreckten Höhenzügen, in denen [sich] kahle, Mergellagen schiefgestellte Nagelfluhrippen mit bewachsenen abwechseln" charakteristische Landschaftsbild im Entlebuch (Labhart, 2009 p. 24).

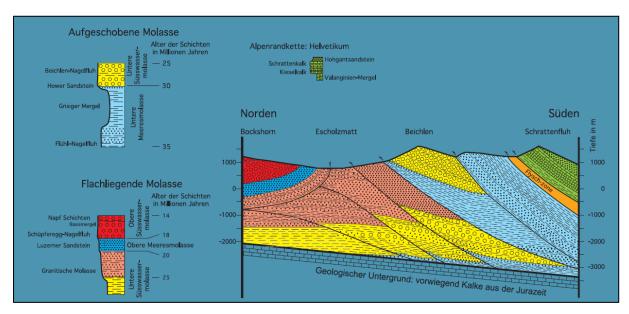


Figure 9: Molasseschichten im Entlebuch. Quelle: Schlunegger (2006).

Während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM), 28'000 bis 10'000 Jahre vor heute, war das Entlebuch von einer Eisschicht bedeckt. Der Waldemmegletscher bedeckte grosse Teile des Tales und teilte sich nach der Lammschlucht in zwei Zungen auf. Eine Gletscherzunge bewegte sich in Richtung Entlebuch, während der andere Ausläufer auf das heutige Wiggen zufloss. Die geglättete Geomorphologie, aber auch Moränenwälle zeugen noch heute von diesen formbildenden Prozessen. Ein Kontrast zu diesen Landschaftsformen bildet die Napfregion. Da dieses Gebiet während des LGM nur teilweise von Eis bedeckt war, konnten die Fliessgewässer um den Napf durch Erosion tiefe Schluchten bilden (z.B. Fontanne) (Schlunegger, 2006 p. 99).

Für hydrologische Untersuchungen relevant ist das Vorkommen von Karst (Figure 10). Gerade in der Frontzone der helvetischen Decke entstehen oft Karstgebiete. Die Karstmorphologie stellt ein Teilgebiet der Geomorphologie dar, wobei der Begriff Karst einen Landschaftstyp mit folgenden Charakteristiken beschreibt. Karstgebiete weisen lösliche Gesteine auf, die mit Wasser oder wässriger Lösung reagieren und es zu Lösungsformen kommen kann. Zu diesen Gesteinen gehören der Kalkstein und der Gips. Für hydrologische Untersuchungen solcher Regionen ist die unterirdische Entwässerung ein wesentlicher Punkt. Spezifische Oberflächenformen wie zum Beispiel Dolinen oder Höhlen lassen auf das Vorhandensein von Karst schliessen (FUB, 2007). Die meisten Karstlandschaften entstanden in einem feuchten Klima. Das Wasser verwitterte über Jahrtausende das Gestein und schuf

so die typischen Karren und Schratten der Karstgebiete. Die Schrattenfluh im Westen des Untersuchungsgebiets zählt zu den grösseren Karstgebieten der Schweiz (Labhart, 2009 p. 130).

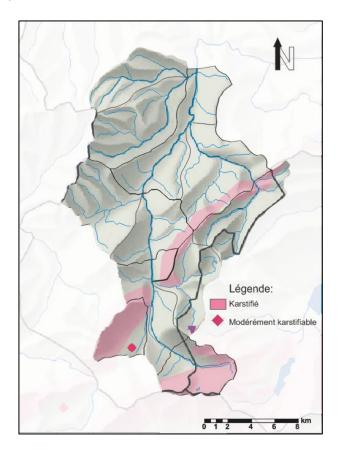


Figure 10: Zones karstifiées. Source de la carte : Atlas de la Suisse (2004).

# 3. MÉTÉOROLOGIE (RIEDENER, 2010)

Das Klima ist "die für einen Ort, eine Landschaft oder einen grösseren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsbedingungen während eines längeren Zeitraumes von charakteristischer Verteilung der häufigsten, der mittleren und der extremen Werte" (Blüthgen, et al., 1980). In diesem Kapitel wird vorwiegend der Parameter Niederschlag betrachtet.

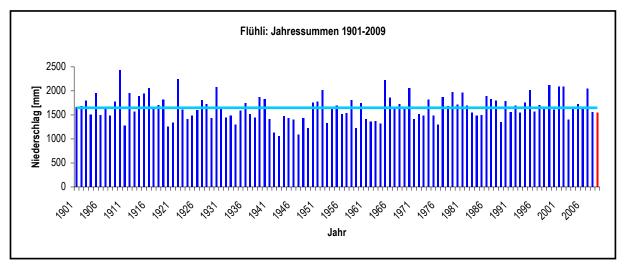
### 3.1. TEMPERATUR

Die mittlere jährliche Temperatur variiert von rund 8.5 °C beim tiefstgelegenen Bereich in der Nähe der Abflussmessstation Werthenstein bis zu -0.5 °C auf dem Brienzer Rothorn. Die

geschätzte mittlere Temperatur in Entlebuch beträgt 8 °C und in Flühli 7 °C (Atlas de la Suisse, 2004).<sup>1</sup>

#### 3.2. Jahresniederschlag

Der mittlere Jahresniederschlag während der Messperiode von 1901 bis 2009 beträgt bei der Station Flühli 1646 mm (Figure 11) und bei der Station Entlebuch 1426 mm. Die genannten Niederschlagstagessammler sind die einzigen Messgeräte im Untersuchungsgebiet mit langjährigen Aufzeichnungen. Im Atlas der Schweiz (2004) ist eine Karte mit mittlerem Jahresniederschlag während der Messperiode von 1971 bis 1990 in digitaler Form präsentiert (Figure 12). Der mittlere Jahresniederschlag betrug während der Messperiode von 1971 bis 1990 zwischen 1300 und 2000 mm. Die niederschlagsärmsten Gebiete mit 1300 mm Niederschlag befinden sich im tiefer gelegenen nördlichen Randgebiet und im Haupttal von Entlebuch nach Escholzmatt. Generell lässt sich in höheren Lagen eine Zunahme des Jahresniederschlags feststellen. Beim höchsten Punkt im Kanton Luzern, dem Brienzer Rothorn, wird eine Niederschlagsmenge von rund 1800 mm angenommen. Die höchsten Niederschlagsmengen treten im Südwesten am Osthang der Schrattenfluh und in der Umgebung der südöstlichen Erhebung rund um den Fürstein auf. In diesen Regionen beträgt der Jahresniederschlag rund 2000 mm.



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Die mittleren jährlichen Temperaturen beziehen sich auf den Zeitraum von 1961-1990 (Atlas de la Suisse, 2004).

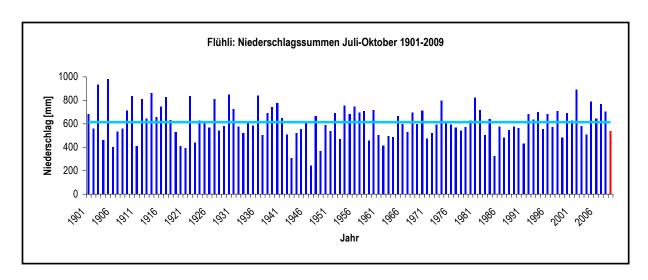


Figure 11: Oben: Jahressummen des Niederschlags der MeteoSchweiz-Station Flühli von 1901-2009. Das Jahr 2009 ist als roter Balken dargestellt. Die hellblaue horizontale Linie stellt den langjährigen Mittelwert dar. Datengrundlage: (MétéoSuisse). Unten: Niederschlagssummen der MeteoSchweiz-Station Flühli der Monate Juli bis Oktober von 1901-2009. Das Jahr 2009 ist als roter Balken dargestellt. Die hellblaue horizontale Linie stellt den langjährigen Mittelwert dar (MétéoSuisse).

Die Niederschlagssumme während der Betriebsperiode des temporären Messnetzes von Juli bis Oktober 2009 beträgt 539 mm in Flühli<sup>2</sup> (Figure 11) und 503 mm in Entlebuch. Somit liegt die Niederschlagssumme der Messperiode vom Juli bis Oktober 2009 rund 12 % (Station Flühli) bzw. 7 % (Station Entlebuch) unter dem langjährigen Mittelwert. Die Niederschlagsstation in Flühli liegt auf einer Höhe von 928 m.ü.M. und somit rund 200 m höher als die Station Entlebuch.

#### 3.3. STARKNIEDERSCHLÄGE

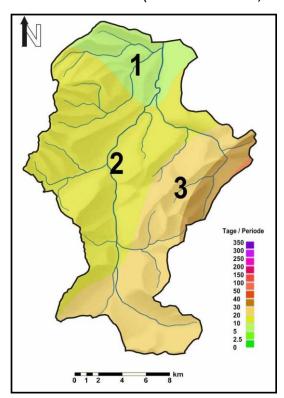
Die Verteilung der Niederschläge und insbesondere der Starkniederschläge werden im Atlas der Schweiz (2004) publiziert. Auf der Karte sind die Anzahl Starkniederschläge dargestellt, die 70 mm innerhalb eines Tages überschreiten (Figure 12). Als Grundlage der Niederschlagskarte dienen die Tagesmessungen der Niederschlagsstationen der MeteoSchweiz von 1901 bis 1980. Die Karte wurde anhand von interpolierten Niederschlagsdaten angefertigt und stellt somit nicht die reale Anzahl Ereignisse über die Fläche verteilt dar, sondern ist als eine Annäherung an die Wirklichkeit zu verstehen. Das Untersuchungsgebiet lässt sich somit in drei Teilregionen unterteilen. In der Region 1, dem nördlichsten und tiefstgelegenen Teilgebiet, wurden während der Untersuchungsperiode fünf bis zehn Starkniederschlagsereignisse aufgezeichnet. Im Teilgebiet 2 wurden zwischen zehn und 20 Ereignisse gemessen. In der dritten Region waren mehrheitlich 20 bis 30

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Es sind keine Messwerte vom 1.8.2009-15.8.2009 der Niederschlagsstation Flühli vorhanden. Die Werte dieser Periode

Starkniederschlagsereignisse zu verzeichnen. Im östlichsten Teil der Region 3, im Oberlauf der Grossen Entle, wurden 30 bis 50 Ereignisse geschätzt. Die unterschiedliche Häufigkeit des Auftretens von Extremereignissen lässt auf eine grosse räumliche Variabilität des Niederschlags im EZG der Kleinen Emme schliessen.

#### 3.4. GEWITTERHÄUFIGKEIT

Im Untersuchungsgebiet ist die Häufigkeit der Gewitter mit 30 bis 35 Tagen pro Jahr grösser als im schweizerischen Durchschnitt (20-30 Tage). Insbesondere im Sommer kann eine erhöhte Anzahl Gewitter im EZG (20-25 Tage) im Vergleich zum Mittelland (15-20 Tage) beobachtet werden (Atlas de la Suisse, 2004).<sup>3</sup>



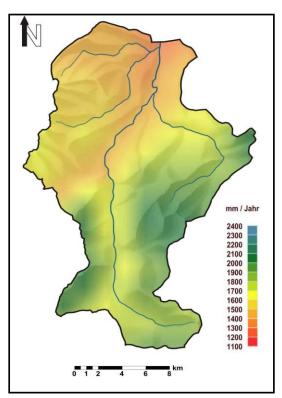


Figure 12: Rechts: Anzahl Tage mit Starkniederschlag >= 70 mm während der Messperiode von 1901-1980 .

Kartengrundlage: Atlas de la Suisse (2004). Links : Mittlerer Jahresniederschlag während der Messperiode von 1971-1990.

Kartengrundlage: Atlas de la Suisse (2004).

### 3.5. WIEDERKEHRPERIODE NIEDERSCHLAGSINTENSITÄT

Im Niederschlagsintensitäts-Diagramm sind die Niederschlagsintensitäten in Abhängigkeit von Wiederkehrperioden und Messintervall dargestellt (Figure 13). Das Diagramm, welches auf Daten der Niederschlagsmessstation Flühli der Periode 1901 bis 1970 basiert, zeigt, dass

\_

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Gewitter der Periode 1931-1980 im Untersuchungsgebiet: an 30 bis 35 Tagen pro Jahr. Im Sommer werden durchschnittlich an 20 bis 25 Tagen Gewitter beobachtet (Atlas de la Suisse, 2004).

die Intensität des Niederschlags mit zunehmender Dauer abnimmt. Zu beachten ist, dass sich die Wiederkehrperioden auf Punktniederschläge beziehen und nicht auf Gebietsniederschläge angewendet werden können, da gemäss Grebner, et al. (1999) die Niederschlagsmenge mit zunehmender Distanz zum Niederschlagszentrum abnimmt. Dies hat zur Folge, dass ein Gebietsniederschlag kaum die maximale Intensität eines Punktniederschlags annehmen kann. Ein Tagesniederschlag in Flühli mit 2.33 jähriger Wiederkehrperiode hatte während der Periode 1901 bis 1970 eine Intensität von 2.8 mm/h, was rund 67 mm pro Tag entspricht. Bei einem hundertjährigen Ereignis wurde eine Intensität von 5.3 mm/h festgestellt, die einen Tagesniederschlag von 127 mm ergeben. In Entlebuch entsprach ein Tagesniederschlag mit 2.33 jähriger Wiederkehrperiode einer Intensität von 2.7 mm/h und einer Summe von rund 65 mm. Bei einem hundertjährigen Ereignis wurde mit einer Intensität von 5.0 mm/h und einem Tagesniederschlag von 120 mm gerechnet.

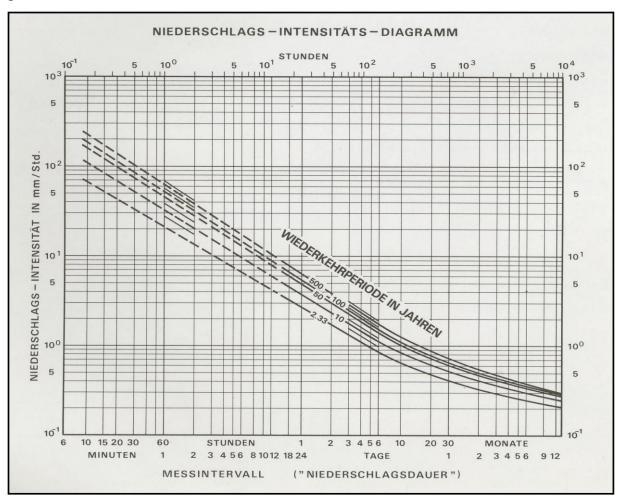


Figure 13: NiederschlagsIntensitäts-Diagramm der Messstation Flühli von 1901-1970 (Geiger H., 1978).

### 4. HYDROLOGIE

Ce chapitre décrit les caractéristiques hydrologiques du bassin-versant de la Kleine Emme en amont de la station LH2487 Werthenstein, Chappelboden.

### 4.1. FICHE TECHNIQUE DU BASSIN-VERSANT

| Coordonnées de la station            | 647 870 / 209 510 |
|--------------------------------------|-------------------|
| Altitude de la station [m.s.m.]      | 540               |
| Surface [km <sup>2</sup> ]           | 311               |
| Périmètre [km]                       | 97                |
| Altitude moyenne du bassin-versant   | 1173              |
| [m.s.m.]                             |                   |
| Altitude max [m.s.m.]                | 2349              |
| Surface occupée par les glaciers [%] | 0                 |
| Longueur du cours d'eau principal    | 37                |
| (avec Waldemme) [km]                 |                   |

Tableau 3: Caractéristiques générales du bassin-versant de la Kleine Emme en amont de la station Werthenstein (OFEV, 2010).

Dans le tableau 3 nous considérons le bassin-versant topographique. Le bassin-versant hydrogéologique est un peu différent à cause de la partie kartistique en amont du bassin-versant. Une partie des précipitations tombées sur le bassin-versant topographique est drainée par la roche poreuse jusqu'au lac de Thoune (Schädler, et al., 1992) et n'atteint donc jamais l'exutoire à la station de la Kleine Emme.

# 4.2. RÉACTION DU BASSIN-VERSANT DE LA KLEINE EMME AUX CRUES DE 2005

Pour un grand nombre de stations du réseau hydrométrique suisse, un nouveau record a été enregistré au mois d'août 2005. C'est le cas de la station LH2487 Werthenstein, Chappelboden (voir le tableau 4).

|               | Evénement a         | oût 2005   |          | Plus grands valeurs jusqu'à lors |                 |            |
|---------------|---------------------|------------|----------|----------------------------------|-----------------|------------|
|               | Débit de            |            | Temps de | Durée de                         |                 |            |
|               | pointe              | Date       | retour   | mesure                           | Débit de pointe | Date       |
|               | [m <sup>3</sup> /s] |            | [Années] |                                  | [m /s]          |            |
| Kleine Emme - | 644                 | 21.08.2005 | 50-100   | 1985                             | 400             | 16.07.2002 |
| Werthenstein  | 044                 | 21.00.2003 | 30 100   | 1505                             | 1400            | 10.07.2002 |
| Kleine Emme - |                     |            |          |                                  |                 |            |
| Littau,       | 764                 | 22.08.2005 | 100-200  | 1978                             | 570             | 16.07.2002 |
| Reussbühl     |                     |            |          |                                  |                 |            |

Tableau 4: Valeurs records enregistrées aux stations Kleine Emme - Werthenstein et Littau en 2005 (OFEG, 2005 p. 22).

La station de la Kleine Emme à Werthenstein est la première à avoir enregistré un pic de crue remarquable le 21 août 2005 au soir. La grande quantité d'eau que la Kleine Emme a transféré jusqu'à la Reuss est en partie responsable du pic à la station Mühlau le 22 août 2005 au matin.

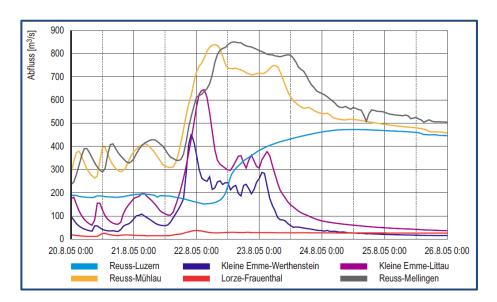


Figure 14: Hydrogrammes de crue des cours d'eau du bassin-versant de la Reuss (Bezzola, et al., 2007 p. 49).

### 4.2.1. TEMPS DE RETOUR DE LA CRUE DE 2005

Selon l'OFEV (2009) la Kleine Emme a réagi aux intempéries du mois d'août 2005 avec une crue d'un temps de retour estimé entre 20 et 50 ans (voir figure 15). En 2005, le rapport sur les crues de 2005 de l'OFEG (2005) estimait ce temps de retour entre 50 et 100 ans, il a donc été revu à la baisse.

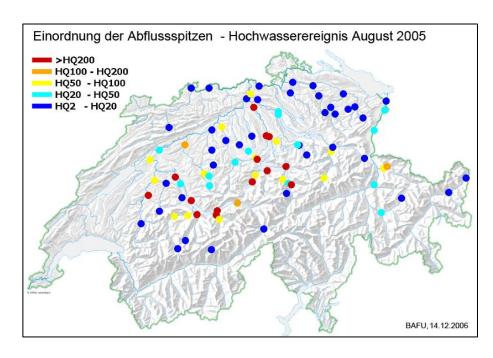


Figure 15: Evaluation du temps de retour des crues de 2005 (OFEV, 2009).

### 4.2.2. DÉBIT SPÉCIFIQUE ET VOLUME DE DÉBIT

Beaucoup de bassins-versants avec des précipitations extrêmes montrent un très haut débit spécifique. Un débit spécifique de 1.51 [m³/s\*km²] a été mesuré pour le bassin-versant en amont de la Kleine Emme lors de la crue de 2005 (voir figure 16). On peut expliquer cette valeur élevée par les précipitations extrêmes tombées sur ce bassin (281 mm du 18.08.2005 à 12:00 au 23.08.2005 à 12:00) (Bezzola, et al., 2007 pp. 62-3).

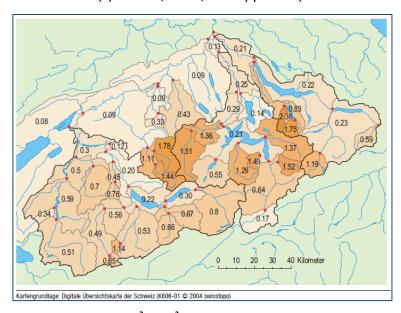


Figure 16: Débits spécifiques de pointe [m²/s\*km²] pendant les crues d'août 2005 (Bezzola, et al., 2007 p. 63).

Le volume de débit du bassin de la Kleine Emme est par contre étonnamment faible (157 mm) par rapport aux autres bassins qui ont reçu des précipitations comparables. Il en va de même pour le coefficient de volume de débit (0.56). Ces deux faibles valeurs ne sont pas expliquées de façon plausible, ce qui rend la probabilité de fausses valeurs de précipitations ou de débits grande (Bezzola, et al., 2007 p. 68).

#### 4.2.3.DÉGÂTS

Le Canton de Lucerne a affiché des dégâts pour un montant d'environ 590 Mio. CHF. Les industries qui ont subit des dégâts le long de la Kleine Emme en sont la raison principale. Dans plusieurs bâtiments, les chambres du sous-sol et du rez-de-chaussée se sont fait saccager par les débris et la boue. Des réservoirs de mazout ont encore augmentés les dégâts. Plus de 900 personnes ont dû être évacuées le long de la Kleine Emme. Les communes d'Emmen (180 Moi. CHF) et de Littau (110 Mio. CHF) sont les plus touchées pour le Canton de Lucerne. Il y a eu beaucoup d'érosion de berges, de brisement de digues, quelques glissements de terrain et de laves torrentielles, beaucoup de transport de matériel et de bois flottants dans les cours d'eau. A Entlebuch, une lave torrentielle a causé la mort de deux personnes.

Une érosion latérale prononcée a été observée sur la Kleine Emme, plus de 10 m ont été érodés sur des tronçons de 100 m ou plus

#### 4.2.4. PROCESSUS DANS LE LIT

Dans le bassin-versant de la Kleine Emme, les glissements étaient nombreux. L'érosion des berges est le processus principal responsable des ¾ du bois flottant. L'érosion latérale était particulièrement importante à Entlebuch. Les zones d'érosion qui s'écartent jusqu'à 30 m ont touché aussi bien les forêts des plaines alluviales que les forêts mixtes avec des arbres de 25 m (Bezzola, et al., 2008 p. 140).

#### 4.3. INDICE DE COMPACITÉ DE GRAVELIUS:

Pour la Kleine Emme nous avons un indice de Gravelius de 1.55 ce qui représente un bassinversant relativement allongé, car il est supérieur à 1 (voir le chapitre «Influence de la géomorphologie », p.28).

### 4.4. LES PRINCIPAUX AFFLUENTS

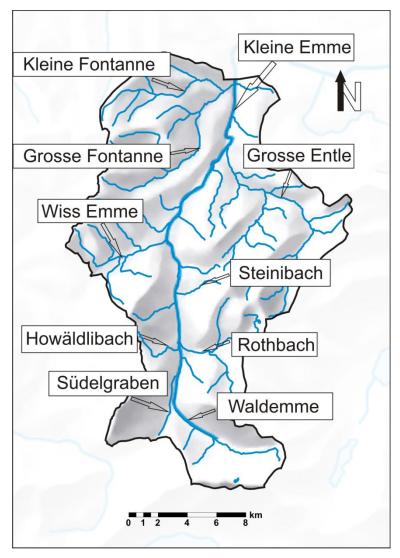


Figure 17: Carte des principaux affluents de la Kleine Emme en amont de la station Werthenstein.

### 4.5. RÉGIME

D'après (Weingartner, et al., 1992), la Kleine Emme a un régime de type nival de transition. Le coefficient de Pardé, décrit par la formule suivante, est utilisé pour définir la courbe de régime:

PKi= MQ(Monat) / MQ(Jahr); i=1,2...12

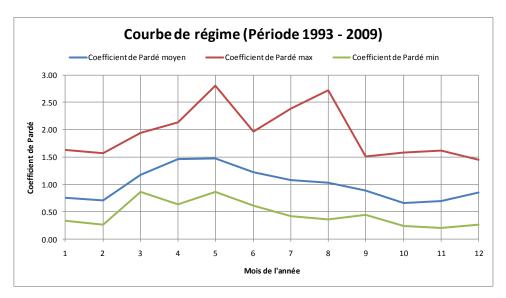


Figure 18: Courbe de régime à partir du coefficient de Pardé pour la période 1993-2009 pour la Kleine Emme ainsi que les coefficients max (rouge) et min (vert). Source des données : OFEV.

On rencontre le **régime nival de transition** sur les bassins-versants d'altitude moyenne comprise entre 1200 et 1600 mètres (l'altitude moyenne du bassin-versant de la Kleine Emme, Werthenstein est de 1173 m). Le régime nival de transition se rapproche d'un type complexe dans ce sens qu'il présente quatre saisons hydrologiques. Ses caractéristiques sont les suivantes (Musy, et al., 2009 pp. 262-3):

- Courbe des coefficients mensuels des débits montrant deux maxima et deux minima.
- Coefficient de Pardé minimum, en janvier, de l'ordre de 0.2 à 0.5.
- Après un étiage relatif en octobre, on observe en novembre une légère hausse due à la pluie, induisant un maximum secondaire de coefficient de Pardé inférieur à 1.

Ces descriptions générales de régime ne correspondent pas entièrement au régime de la Kleine Emme à Werthenstein car les débits moyens mensuels et annuels varient beaucoup selon les années comme on peut le remarquer à l'aide des coefficients de Pardé moyen, maximum et minimum (voir figure 18).

### 4.6. STATISTIQUE DES DÉBITS ET DES CRUES

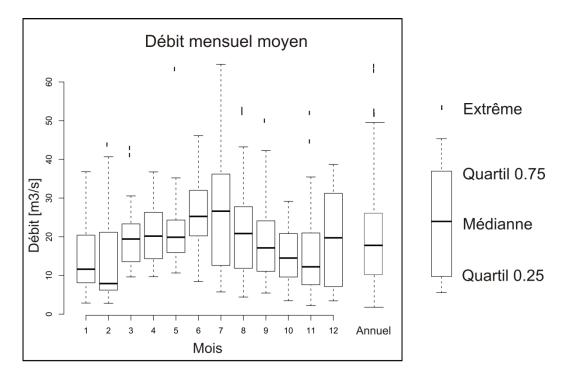


Figure 19: Répartition des débits mensuels moyens pour la période 1984-2009 et comparaison avec le débit annuel moyen. Source des données : OFEV.

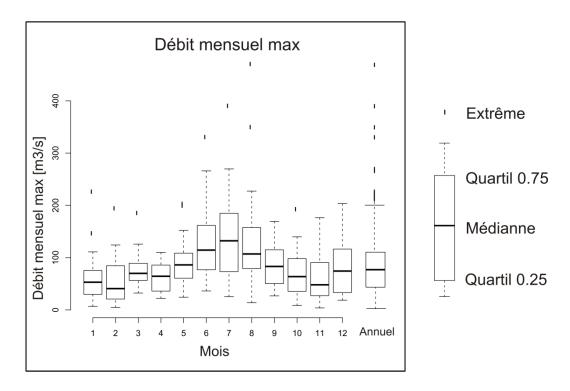


Figure 20: Répartition des débits mensuels maximums pour la période 1984-2009 et comparaison avec le débit annuel maximum. Source des données : OFEV.

Sur les figure 19 et figure 20, on observe en moyenne aussi bien le plus grand débit mensuel moyen que maximum au mois de juillet. La fonte des neiges fait augmenter le débit mensuelle moyen dès le mois de mars. Le maximum absolu mesuré s'est produit en août (2005).

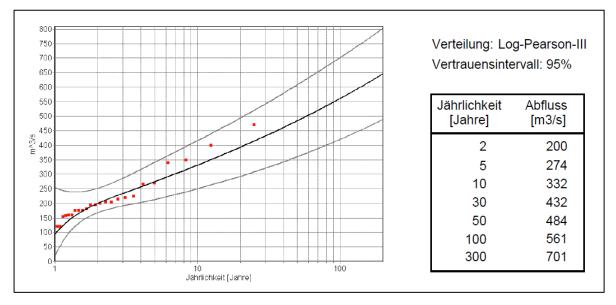


Figure 21: Temps de retour pour la Kleine Emme à Werthenstein (OFEV, 2009).

Sur la figure 21, on remarque que le pic de crue maximum correspond à un temps de retour d'environ 45 ans.

### 4.7. HYDROGRAMME DE CRUE, RÉPONSE HYDROLOGIQUE

La Kleine Emme a un hydrogramme de crue en général très pointu. Le débit augmente très rapidement et redescend rapidement. On observe souvent une courbe aplatie après le pic de crue (figure 22). Les couleurs correspondant aux types de crues dans la figure 22 sont expliquées au chapitre Méthode, Partie 2.

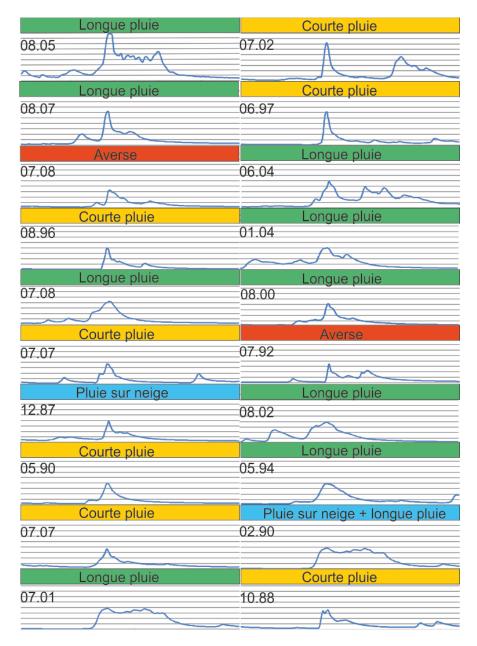


Figure 22: Forme de l'hydrogramme et type de crue. Source des données : OFEV.

Une crue avec un temps de retour estimé à un peu moins de 2 ans a été mesurée le 17 juillet 2009 (voir figure 23). On remarque également sur ce graphe que le mois de septembre était relativement sec.

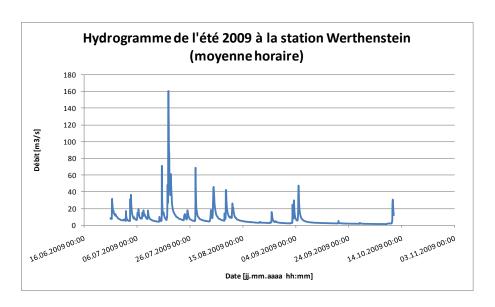


Figure 23: Hydrogramme à la station Werthenstein (moyenne horaire) pour la période du 26.6.2009 au 10.10.2009.

Source des données : OFEV.

### 4.8. ECOGÉOMORPHOLOGIE

Malgré quelques interventions anthropiques visibles, la Kleine Emme garde un état relativement naturel. Une grande plaine alluviale protégée est située dans les environs d'Entlebuch. 76.1% des cours d'eau du bassin-versant entier de la Kleine Emme sont jugé comme « proche de la nature » ou « peu influencé » (UWE, 2010).

Les macro-invertébrés sont des indicateurs de la qualité de l'eau. Lors du camps de terrain d'hydrologie avec l'Université de Berne, nous avons pu constater nous-mêmes par l'observation des macro-invertébrés que la Kleine Emme a une eau de très bonne qualité à Entlebuch. La qualité est jugé « bonne » à « très bonne » par le Service Environnement et Energie (Umwelt-Energie) du Canton de Lucerne (UWE, 2010).

# 5. RÉSEAU DE MESURE

Les stations de mesure des précipitations et du débit sont la base pour la prévision des crues. Elles permettent de mieux comprendre la réaction du bassin-versant aux précipitations.

### **5.1.** LES STATIONS DE JAUGEAGE

Les stations de jaugeage nous informent sur l'évolution du débit dans les cours d'eau.

#### **5.1.1.LES STATIONS DE MESURE EXISTANTES**

La Kleine Emme bénéficiait au début du 20<sup>ème</sup> siècle d'un réseau de mesure relativement dense. Plusieurs stations ont été supprimées par la suite (voir figure 24).

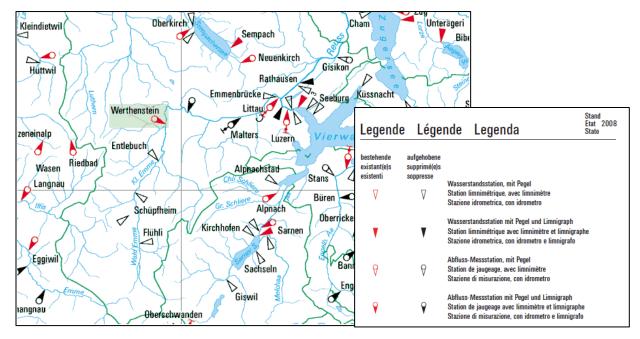


Figure 24: Réseau de stations hydrométriques dans la région de la Kleine Emme (OFEV, 2010).

| Nom                       | Période de fonction | Responsable |
|---------------------------|---------------------|-------------|
| Waldemme, Flühli          | 1905 – 1920         | OFEV        |
| Waldemme, Schüpfheim      | 1906 – 1927         | OFEV        |
| Kleine Emme, Schüpfheim   | 1907 – 1921         | OFEV        |
| Kleine Emme, Entlebuch    | 1904 – 1913         | OFEV        |
| Kleine Emme, Werthenstein | 1906 – 1935         | OFEV        |
| Kleine Emme, Malters      | 1931 – 1977         | OFEV        |
| Kleine Emme, Emmenbrücke  | 1866 – 1949         | OFEV        |

Tableau 5: Stations de mesure du débit de la région de la Kleine Emme supprimées avant 2009 (OFEV, 2009).

|        | Nom                        | Coordonnées   | Type de station | Période<br>de | Responsable |
|--------|----------------------------|---------------|-----------------|---------------|-------------|
|        |                            |               |                 | fonction      |             |
| LH2487 | Kleine Emme, Werthenstein, | 647 870 / 209 | Station de      | 1984 -        | OFEV        |
|        | Chappelboden               | 510           | jaugeage        |               |             |
|        | Kleine Emme, Littau,       | 664 220 / 213 | Station de      | 1936 -        | OFEV        |
|        | Reussbühl                  | 200           | jaugeage        |               |             |
| LU14   | Waldemme, Sörenberg        | 645 510 / 185 | Station de      | 1994 -        | UWE         |
|        |                            | 640           | jaugeage        |               |             |
|        | Waldemme, Flühli           | 643 710 / 194 | Limnimètre à    | 1988 -        | OFEV        |
|        |                            | 570           | maximum         |               |             |
|        | Kleine Fontanne, Romoos,   | 647 020 / 208 | Limnimètre à    | 1988 -        | OFEV        |
|        | Stägplatz                  | 840           | maximum         |               |             |

Tableau 6: Station de mesure du débit de la région de la Kleine Emme en fonction à fin 2009 (OFEV, 2009).

La station de jaugeage de Werthenstein est celle utilisée comme exutoire. Elle est en fonction depuis plus de 25 ans. La station de jaugeage du Canton de Lucerne à Sörenberg (LU14) ne mesure correctement que jusqu'à un débit de 10 [m³/s] d'après le protocole de la station. Le débit de la crue d'août 2005 (32.3 [m³/s]) a dû être extrapolé. Le Service UWE nous a fourni les données.

Lors d'une visite sur le terrain nous avons découvert une station radar posée par CKW (Centralschweizerische Kraftwerke AG). Les données ont été mises à notre disposition. « La station de mesures est temporaire et sera supprimée dès que les travaux de la centrale électrique débuteront, soit avant fin 2011» (Hürlimann 2010, communication écrite par courriel du 16.08.2010). Les 2 limnimètres à maximum ne sont pas pris en concidération pour ce travail car ils nécessitent un relevé manuel qui ne convient pas pour un système d'alarme géré à distance.

### 5.1.2.LES NOUVELLES STATIONS DE MESURE DU NIVEAU D'EAU INSTALLÉES

Durant l'été 2009, quatre stations de mesure du niveau sont installées sur le terrain. Parmi ces stations, trois sont composées d'une sonde à pression et une d'un radar. Le fonction de ces appareils est décrit dans Masson (2010).

### CRITÈRES POUR L'EMPLACEMENT DES STATIONS

Il y a plusieurs critères à prendre en compte pour trouver un emplacement adéquat aux stations de mesure du débit. L'étude des cartes topographiques donne une première idée concernant les confluences et la taille des bassins-versants des affluents par exemple, mais il

est indispensable de se faire aussi une idée de la réalité en allant sur le terrain pour vérifier que les conditions suivantes soient remplies :

- Le lit, ainsi que le point de niveau 0, doivent être stables.
- La surface de l'eau ne doit pas être influencée par un retour d'eau.
- Une section serrée est préférable à une section large, afin qu'une différence de niveau d'eau se fasse mieux remarquer, sauf pour les cas où il y a de grandes fluctuation entre les événements extrêmes de hautes et basses eaux (Dyck, et al., 1989 p. 59).
- On cherche à estimer à quel moment une crue va se produire à la station Werthenstein à l'aide des données mesurées aux stations dans le bassin-versant. Un certain temps d'écoulement entre la station dans le bassin et celle de Werthenstein est donc nécessaire.
- De plus, la station doit être atteignable sans danger.
- Un pont est pratique pour pouvoir facilement passer de part et d'autre du cours d'eau.
- Il doit y avoir la possibilité d'installer l'armoire contenant le matériel électrique pas trop loin (reliée avec des câbles électriques).
- Pour que les données puissent être appelées à distance par système GSM, la zone doit bénéficier d'une bonne couverture réseau.
- L'accord du propriétaire est une condition qu'il faut également prendre en compte.

### CHOIX DES EMPLACEMENTS

Nous avons étudié plusieurs possibilités et nous nous sommes mis d'accord pour trois stations avec une sonde à pression (GIUB 1,2 et4) et une station radar (GIUB 3). Ces stations permettent d'avoir les informations de chacun des affluents principaux.

La station **GIUB 1** représente l'affluent Südelgraben et son bassin-versant très marécageux. La station CKW donne indirectement des informations concernant les affluents Rotbach car les débits du Südelgraben et de la Waldemme en amont de la station cantonale à Sörenberg sont connus et il n'y a pas d'autres affluents conséquents. L'installation d'une station proche de l'embouchure de Rotbach est difficile à réalisé car le lit est très instable et les berge sont naturelles.

- Le débit de la Wiss Emme est mesuré indirectement par la station **GIUB 2** à Schüpfheim et l'on admet qu'il n'y a pas une grande différence de débit sur la Waldemme entre les stations CKW et GIUB 2. Cette dernière bénéficie d'une section en forme de trapèze. Le pont qui la surplombe est jugé suffisamment haut pour laisser passer une crue. Il est pratique pour insérer un traceur ou faire des mesures à l'ailette hydrométrique et, 1 km en aval, un autre pont traverse le cours d'eau où l'on peut effectuer les mesures du débit. Reste à mesurer les affluents Grosse Entle et Fontannen.
- Pour avoir suffisamment de temps avant que la vague n'atteigne la station de Werthenstein, nous avons choisi de placer la station GIUB 3 relativement en amont dans le bassin-versant. Nous avons monté un radar sur le pont du lieu dit « Stilaub ». A cet endroit, le débit peut être déjà élevé au vu des blocs d'un diamètre supérieur à 20 cm qui se trouvent dans le lit. Une sonde à pression aurait été trop vulnérable aux chocs avec les blocs.
- La station GIUB 4 est trop proche de celle de Werthenstein pour l'utiliser pour des prévisions. L'idée est de comprendre comment réagissent les bassins-versants de la Grosse et Kleine Fontanne aux précipitations pour pouvoir, par la suite, faire une prévision directement sur la base des précipitations.

La figure 25 représente le réseau hydrométrique complet.

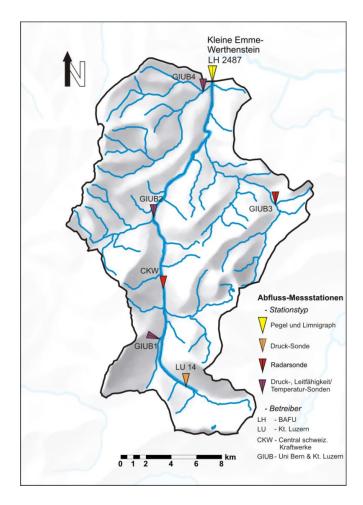


Figure 25 : Réseau hydrométrique complet avec les stations fédérales, cantonales, de CKW et GIUB.

Dans le tableau 6, quelques caractéristiques des stations de mesures existantes. La surface est mentionnée dans le tableau 13 p.- 94 -.

| ID     | Nom complet   | Coordon   | Type de     | Exloitant | Résolution | Période | Altitude |
|--------|---------------|-----------|-------------|-----------|------------|---------|----------|
|        |               | nées      | station     |           |            | de      | de la    |
|        |               |           |             |           |            | mesure  | station  |
|        |               |           |             |           |            |         | [ms.m.]  |
| LH2487 | Kleine Emme,  | 647 870 / | Station de  | OFEV      |            | 1984-   |          |
|        | Werthenstein, | 209 510   | jaugeage,   |           |            |         |          |
|        | Chappelboden  |           | pneumatique |           |            |         |          |
| LU14   | Waldemme,     | 645 550 / | Station de  | UWE       | 10 min     | 1994-   | 1155     |
|        | Sörenberg,    | 185 600   | jaugeage,   |           |            |         |          |
|        | Hinder        |           | sonde à     |           |            |         |          |
|        | Schönisei     |           | pression    |           |            |         |          |
| CKW    | Waldemme,     | 643 550 / | Station de  | CKW       |            |         | 860      |
|        | Flühli,       | 193 850   | jaugeage,   |           |            |         |          |
|        | Spierbärgli   |           | radar       |           |            |         |          |
| GIUB 1 | Südelgraben,  | 643 900 / | Limnimètre, | GIUB      | 5 min      | 2009    | 950      |
|        | Flühli,       | 189 480   | sonde à     |           |            |         |          |
|        | Hirseggbrügg  |           | pression    |           |            |         |          |

| GIUB 2 | Kleine Emme,    | 643 250 / | Limnimètre. | GIUB | 5 min   | 2009 | 710  |
|--------|-----------------|-----------|-------------|------|---------|------|------|
|        | Schüpfheim,     | 199 250   | Sonde à     |      |         |      |      |
|        | Landbrügg       |           | pression    |      |         |      |      |
| GIUB 3 | Grosse Entle,   | 652 600 / | Limnimètre, | GIUB | 0.5 min | 2009 | 1010 |
|        | Gfelle, Stilaub | 199 900   | radar       |      |         |      |      |
| GIUB 4 | Fontannen,      | 647 150 / | Limnimètre, | GIUB | 5 min   | 2009 | 595  |
|        | Wolhusen,       | 208 850   | sonde à     |      |         |      |      |
|        | Müliacher       |           | pression    |      |         |      |      |

Tableau 7: Caractéristiques des stations en fonction (Kan, 2002).

Le nom exact des stations est constitué de trois parties qui décrivent leur emplacement :

- Cours d'eau
- Village
- Lieu dit

#### CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS DE JAUGEAGE GIUB

Les stations GUIB 1, 2 et 4 sont équipées d'une sonde à pression, qui mesure la hauteur d'eau verticale qui la submerge, et d'une sonde mesurant la température et la conductivité. Le data logger qui leur est associé enregistre une valeur toutes les 5 min. Le radar envoie des signaux verticaux en direction de la surface de l'eau pendant deux minutes puis s'éteint systématiquement une minute afin de recharger la batterie. Pour des explications plus précises, se référer au travail de Masson (2010). Pour des questions de simplification de la base de données, ces quatre stations sont constamment réglées à l'heure d'hiver.

### 5.2. STATION DE MESURES DES PRÉCIPITATIONS

Ce chapitre est repris et simplifié à partir du travail de master de Samuel Riedener (Riedener, 2010).

Um die Messreihen und Daten der Messnetze zu beurteilen, wurden die Charakteristiken der Niederschlagsstationen und des Messnetzes in den folgenden Kapiteln betrachtet. Dies beinhaltet die Beschreibung der Gerätetypen, der zeitlichen und mengenmässigen Auflösung der Messung, der Höhenverteilung der Messstationen und der Konzeption des temporären Messnetzes.

#### 5.2.1.Bestehendes Niederschlagsmessnetz bis 2009

Um einen adäquaten Gebietsniederschlag der 20 grössten Hochwasserereignissen seit Beginn der Abflussmessung 1984 darzustellen, wurden nebst den Messstationen im Einzugsgebiet auch nahe liegende Punktmessungen ausserhalb des Einzugsgebiets miteinbezogen.

#### BESTEHENDES NIEDERSCHLAGSMESSNETZ IM EINZUGSGEBIET

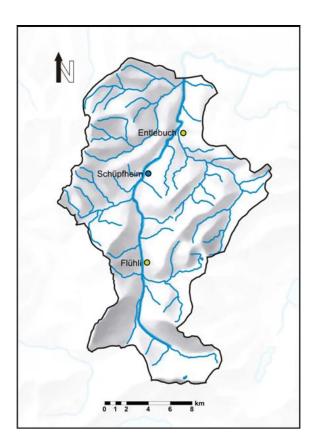


Figure 26: Vor 2009 installierte Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet.

| ID   | Standort   | Koordinaten     | Höhe [m.ü.M] | Stationstyp          | Betreiber     | Auflösung [min] | Auflösung [mm] | Messperiode |
|------|------------|-----------------|--------------|----------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------|
| 4620 | Flühli     | 644.240/192.910 | 928          | Hellmann-Pluviometer | MeteoSchweiz  | 1440            | 1              | 1890-       |
| 4650 | Entlebuch  | 647.690/204.780 | 765          | Hellmann-Pluviometer | MeteoSchweiz  | 1440            | 1              | 1883-       |
| LU10 | Schüpfheim | 644.500/200.940 | 760          | Ott Pluvio           | Kanton Luzern | 1               | 0.01           | 1999-       |

Tableau 8: Beschreibung der im Jahre 2009 bereits bestehenden Niederschlagsstationen innerhalb des Einzugsgebietes.

Die drei bestehenden Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet befinden sich alle im Haupttal. Es existieren während des Beobachtungszeitraums (1984 -2009) des Abflusses in Werthenstein nur 2 Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet. Das ergibt für das Untersuchungsgebiet eine Messstelle auf 156 km². Laut der WMO (2004) ist die Niederschlagsmessung für hydrologische Studien normalerweise unzureichend, wenn die

Fläche des Einzugsgebietes mehr als 25 km² beträgt und der Niederschlag an einem Punkt gemessen wird.

BESTEHENDES NIEDERSCHLAGSMESSNETZ AUSSERHALB DES EINZUGSGEBIETES

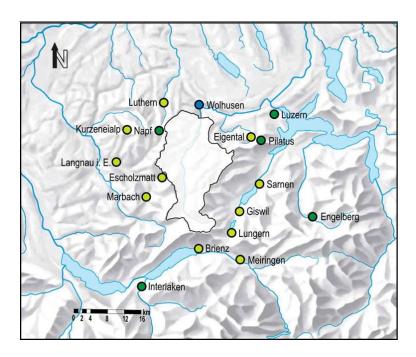


Figure 27: Im Jahre 2009 bereits installierte Niederschlagsstationen ausserhalb des Einzugsgebietes.

| ID    | Standort      | Koordinaten      | Höhe [m.ü.M] | Stationstyp           | Betreiber      | Auflösung [min] | Auflösung [mm] | Messperiode |
|-------|---------------|------------------|--------------|-----------------------|----------------|-----------------|----------------|-------------|
| LU 09 | Wolhusen      | 648.090/212.490  | 610          | Ott Pluvio            | Kanton Luzem   | 1               | 0.01           | 1999-       |
| 4410  | Engelberg     | 674.150/186.060  | 1035         | Lambrecht 1518 H 3    | MeteoS chw eiz | 10              | 0.1            | 1983-       |
| 4590  | Luzern        | 665.520/209.860  | 456          | Lambrecht 1518 H 3    | MeteoS chw eiz | 10              | 0.1            | 1978-       |
| 4600  | Pilatus       | 661.910/203.410  | 2106         | Lambrecht 1518 H 3    | MeteoS chw eiz | 10              | 0.1            | 1981-       |
| 5190  | Interlaken    | 633.070/ 169.120 | 580          | Lambrecht 1518 H 3    | MeteoS chw eiz | 10              | 0.1            | 1978-       |
| 6475  | Napf          | 638.138/206.075  | 1406         | Lambrecht 1518 H 3    | MeteoS chw eiz | 10              | 0.1            | 1978-       |
| 4500  | Lungem        | 655.275/181.800  | 740          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1968-       |
| 4510  | Gisw il       | 656.120/186.000  | 489          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1978-       |
| 4560  | Sarnen        | 661.570/193.640  | 475          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1895-       |
| 4680  | Eigenthal     | 659.340/203.880  | 1114         | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1899-       |
| 5070  | Meiringen     | 656.460/ 175.400 | 595          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1890-       |
| 5090  | Brienz        | 647.120/177.490  | 575          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1900-       |
| 6450  | Marbach       | 635.290/ 190.170 | 847          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1900-       |
| 6470  | Escholzmatt   | 638.120/195.100  | 910          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1882-       |
| 6480  | Langnau i. E. | 628.070/198.830  | 755          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1910-       |
| 6500  | Kurzeneialp   | 630.575/207.010  | 894          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1901-       |
| 6630  | Luthern       | 636.465/ 212.020 | 767          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              | 1900-       |

Figure 28: Beschreibung der im Jahre 2009 bereits bestehenden Niederschlagsstationen ausserhalb des Einzugsgebietes.

Um den Gebietsniederschlag nicht auf Basis von 2 Stationen berechnen zu müssen und um eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung zu erlangen, wurden alle Tagessammler im Umkreis von 10 km und alle Swissmetnet-Stationen mit 10 min Auflösung im Umkreis von 30

km miteinbezogen. Mit Ausnahme der kantonalen Station in Wolhusen decken alle Messreihen den ganzen Zeitraum der Abflussmessungen in Werthenstein ab.

### 5.2.2.TEMPORÄRES NIEDERSCHLAGSMESSNETZ JUNI – NOVEMBER 2009

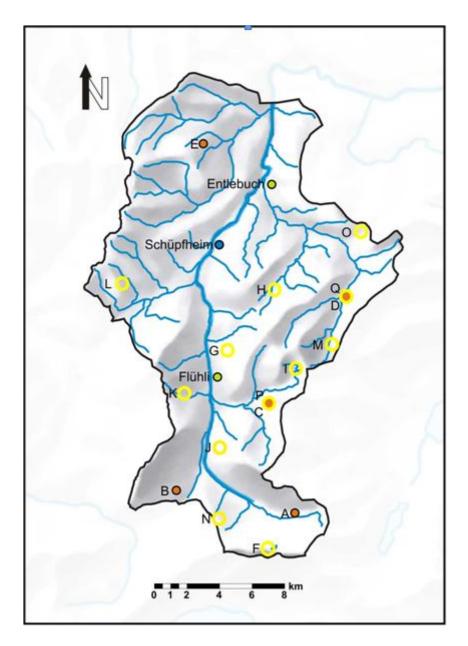


Figure 29: Temporäres Niederschlagsmessnetz während dem Sommer 2009.

| ID    | Standort           | Koordinaten      | Höhe [m.ü.M] | Stationstyp           | Betreiber      | Auflösung [min] | Auflösung [mm] |
|-------|--------------------|------------------|--------------|-----------------------|----------------|-----------------|----------------|
| 4620  | Flühli             | 644.240/192.910  | 928          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              |
| 4650  | Entlebuch          | 647.690/204.780  | 725          | Hellmann-Pluv iometer | MeteoS chw eiz | 1440            | 1              |
| LU 10 | Schüpfheim         | 644.500/200.940  | 760          | Ott Pluvio            | Kanton Luzern  | 1               | 0.01           |
| Α     | Arnischwand        | 649. 120/184.515 | 1377         | Young 52202           | GIUB           | 5               | 0.1            |
| В     | Ruchweid           | 641.885/185.900  | 1382         | Young 52202           | GIUB           | 5               | 0.1            |
| С     | Schaftelenmoos     | 647.535/191.240  | 1407         | Young 52202           | GIUB           | 5               | 0.1            |
| D     | Gründli            | 652.260/197.775  | 1196         | Young 52202           | GIUB           | 5               | 0.1            |
| Е     | Grämse             | 643.535/207.125  | 959          | Young 52202           | GIUB           | 5               | 0.1            |
| F     | Eisee              | 647.480/182.345  | 1955         | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| G     | Salzbüel           | 645.015/194.480  | 1120         | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| Н     | Hintere Angst      | 647.875/198.175  | 1174         | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| T     | Sewenseeli         | 649.230/193.355  | 1710         | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| J     | Junkholz           | 644.540/188.525  | 1195         | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| K     | S chw ändi         | 642.375/191.845  | 1148         | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| L     | M ultigschw ändili | 638.575/198.555  | 970          | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| M     | Hintere Rotbach    | 651.390/194.845  | 1423         | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| N     | Schwarzenegg       | 644.485/184.165  | 1521         | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| 0     | H euboden          | 653.160/201.730  | 1233         | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| Р     | Schaftelenmoos     | 647.535/191.240  | 1407         | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |
| Q     | Gründli            | 652.260/197.775  | <b>1</b> 196 | Rainwise              | GIUB           | 1               | 0.25           |

Figure 30: Beschreibung der Stationen des Temporären Messnetzes innerhalb des Einzugsgebietes.

Um das grobmaschige Niederschlagsmessnetz innerhalb des Einzugsgebietes zu ergänzen sowie zur besseren räumlichen Erfassung der Niederschläge, wurde von Juni bis November 2009 ein temporäres Messnetz installiert. Während dieser Periode wurde an 17 zusätzlichen Standorten der Niederschlag mit Niederschlagswippen aufgezeichnet. Dies ergibt eine durschnittliche Messnetzdichte von einer Messstelle auf 17 km².

Zufällige Messfehler werden reduziert, da differenzierte Informationen zur Niederschlagsverteilung durch die höhere Messnetzdichte vorhanden sind und die verwendeten Daten weniger von der tatsächlichen Niederschlagsverteilung abweichen.

Pour plus d'informations concernant la répartition des stations dans le bassin-versant, le choix des emplacements ainsi que les caractéristiques techniques des stations, consulter le travail de Riedener (2010).

### IV. MÉTHODES

Ce chapitre explique les méthodes choisies pour chacune des quatre parties du travail. Dans la première partie, les méthodes de mesure du niveau d'eau et du débit sont expliquées. Dans la deuxième partie, qui concerne l'analyse des hydrogrammes des 20 plus grandes crues, il est expliqué comment la série partielle est élaborée, comment le débit de base est séparé, quels sont les paramètres de crues étudiés, ainsi que la description de la méthode de Diezig (2006) pour déterminer les types de précipitations déclancheurs de crues. Dans la partie 3, le choix des événements de l'été 2009 est briévement décrit ainsi que les éléments qui aident à leur analyse. La partie 4 explique comment le bassin-versant est découpé en 12 sous-bassins-versants et le fonctionnement des modélisations avec les programmes HQx meso CH et PREVAH.

# PARTIE 1: L'INSTALLATION ET LE CALIBRAGE DES STATIONS DE JAUGEAGE.

La courbe de tarage s'obtient en correlant dans un graphique niveau d'eau-débit, les résultats des mesures du débit ponctuelles (pour des débits avec le plus de dispersion possible) avec le niveau d'eau enregistré au moment de la mesure.

### 1. MESURE DU NIVEAU D'EAU

Il existe plusieurs façons de mesurer le niveau d'eau, quelques unes sont décrites dans le chapitre 2 des Bases théoriques. Trois sondes à pression sont à notre disposition. Elles sont installées sur le terrain au stations GIUB 1, 2 et 4. Le choix des emplacements est décrit dans le chapitre 5.1.2 p.- 61 -. La quatrièment station, GIUB 3, est équipée d'un radar, qui a l'avantage de ne pas être vulnérable aux chocs puisqu'il est monté hors du cours d'eau. Les détails techniques concernant les appareils de mesures se trouvent dans le travail de Masson (2010).

### 1.1. LA SONDE À PRESSION

Ces stations comportent deux sondes dans l'eau, l'une mesure la hauteur verticale entre son emplacement et la surface d'eau par la pression qu'exerce l'eau et l'autre la conductivité et la température (voir figure 31). Les sondes sont protégées des chocs avec le matériel transporté par le courant par des plaques métalliques. La sonde à pression est placée

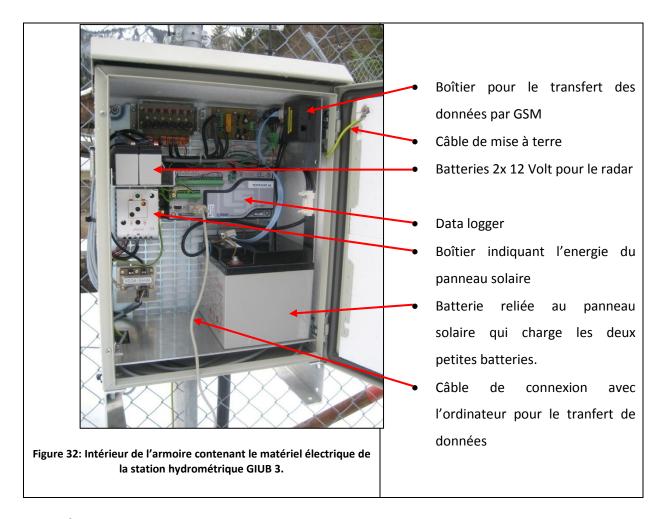
verticalement et la sonde de mesure de la conductivité et de la température horizontalement. Elles sont reliées à une caisse par un câble électrique également protégé par des plaques métalliques ou un tube en plastique suivant leur exposition.



Figure 31: Sonde mesurant la conductivité sortie de la partie de protection métallique pour le nettoyage.

Dans la caisse se trouve plusieurs éléments (figure 32):

- Le data logger : dans lequel les données sont enregistrées
- La batterie : qui permet au data logger de fonctionner
- Le boîtier GSM avec une antenne : qui permet de communiquer avec la station à distance
- Ev. Un boîtier pour le panneau solaire



### 1.2. LE RADAR

Le radar est fixé à un pont. Il mesure la distance entre son emplacement et la hauteur de la surface d'eau grâce à la réflexion d'un signal en mV (en temps double). A noter qu'inversement aux sondes à pression plus la distance est grande plus le niveau est bas. Le radar est également relié à une armoire qui contient les mêmes éléments que les armoires précédentes.

### 2. MESURE DU DÉBIT

Il n'existe pas encore de méthodes fiables pour mesurer le débit de façon continue. Il est donc mesuré à un certain endroit le long du lit et comparé à la hauteur d'eau moyenne pendant la durée de la mesure. La courbe de tarage, qui représente le débit en fonction du niveau d'eau, nous permet d'estimer le débit par rapport à la hauteur d'eau à trois conditions :

- Le lit garde une section inchangée sur le tronçon à la hauteur de la station
- Le cours d'eau ne déborde pas de son lit

• Suffisament de mesures ont été élaborées pour que la courbe de tarage soit robuste

Quelques méthodes de mesures du débit sont brièvement décrites dans le chapitre 3.2 p.-25 - des Bases Théoriques. Pour l'étalonnage des stations nous avons utilisé la méthode de la dilution au sel et à l'uranine, ainsi que quelques tests avec les méthodes à ailette et du bâton de Jens. Les protocoles des mesures du débit se trouvent dans les annexes.

### 2.1. STRATÉGIE DE MESURE AUX QUATRE STATIONS

Pour chacune des stations trois niveaux d'eau ainsi que les méthodes appropriées sont définis. Le niveau « haut » ne signifie pas qu'une crue se produit, mais correspond à une stratégie de mesure par un niveau d'eau relativement élevé. Le descriptif se trouve dans l'annexe A3.

#### 2.2. LA DILUTION AU SEL

Pour calibrer les 4 nouvelles stations GIUB, nous avons principalement utilisé la dilution sel. En raison de ses propriétés stables, le chlorure est un bon traceur. Les fortes concentrations présentes dans la nature nécessitent toutefois une quantité d'injection environ 10'000 fois plus grande que celle des traceurs fluorescents (Schudel, et al., 2002 p. 16).

#### 2.2.1. ESTIMATION DE LA QUANTITÉ DE TRACEUR NÉCESSAIRE

Selon Wernli (2009 p. 13.6), 4 à 5 [kg] de sel (NaCl) pour un débit de 1 [ $m^3/s$ ] sont nécessaires pour un cours d'eau avec une conductivité d'environ 500 [ $\mu$ S/cm]. Le sel doit auparavant être dilué dans au moins 4 litres d'eau par kilo de sel. Ainsi il est possible de mesurer des débits jusqu'à environ 3 à 4 [ $m^3/s$ ].

Une longue distance de dilution, à partir d'environ 200 à 300 mètres, ou une conductivité électrique de base élevée (>>500 [ $\mu$ S/cm]) demande une plus grande quantité de traceur. La conductivité devrait augmenter d'au moins 100 [ $\mu$ S/cm] au passage de la concentration maximale de sel pour diminuer l'erreur lors de l'analyse.

#### 2.2.2. DÉROULEMENT DE LA MESURE

Les conductimètres sont disposés sur la largeur du cours d'eau avec la pointe dirigée vers l'aval (pour éviter les turbulences et l'accrochage des feuilles mortes)(figure 34). La conductivité de base est inscrite sur le protocole. Le sel dissous dans l'eau est inséré en une

seule vidange dans le cours d'eau. Les conductimètres sont mis en marche. Ils enregistrent une valeur toutes les 4 secondes. Lorsqu'ils atteignent à nouveau la conductivité de base, la mesure est terminée.



Figure 33: Insertion du sel dilué dans le cours d'eau depuis un pont.



Figure 34: Conductimètres placés dans le cours d'eau et assurés par une courbe.

#### 2.2.3.LE CALCUL DU DÉBIT

Le coffret de mesure du débit, utilisé pour les premières mesures, est équipé d'un ordinateur portable avec un programme (Abflussmessung) qui permet de visualiser la courbe de la conductivité sur le temps et qui calcule les débits à partir des mesures enregistrées. Un script R peut aider pour remplacer les données manquantes ou fausses par « NA » et déterminer le début et la fin de la mesure (sur le terrain il n'est pas facile de déterminer à quel moment le sel arrive à la station de mesure et combien de temps il lui faut pour traverser la zone de mesure).

Les nouveaux conductimètres WTW enregistrent les données de la conductivité et de la température de l'eau pour un pas de temps choisi. Lors du transfère des données des conductimètres WTW à l'ordinateur, un script R nous aide à lire ces données dans un tableau, remplacer les données manquantes ou fausses par « NA », représenter les données dans un graphique, déterminer le début et la fin de la mesure et calculer le débit.

Ces nouveaux appareils ont les avantages suivants

- Ils sont imperméables (utilisables par tous les temps)
- Il est possible de les répartir depuis les deux berges
- Ils ont une longue autonomie

• Ils enregistrent les données automatiquement sans devoir passer par un ordinateur,

il y a donc moins de matériel à déplacer sur le terrain

Par contre, les résultats ne sont visibles qu'une fois les données transférées sur un

ordinateur à la fin de la mesure.

Chaque conductimètres utilisés mesure les valeurs de la conductivité électrique pendant le

passage du sel. Il en résulte une courbe par conductimètre à partir de laquelle un débit peut

être calculé avec la formule suivante (Wernli, 2009 pp. 13.6-7):

$$Q = QI / C_m * dt$$

Avec:

Q: Débit [m³/s]

QI : Quantité de traceur injectée [mg]

C<sub>m</sub> : Concentration moyenne de traceur mesurée [mg/m<sup>3</sup>]

dt : Durée de la mesure [s] (déterminée à l'aide de R)

C<sub>m</sub> se calcule de la façon suivante :

Avec:

Cond<sub>moy</sub>: Conductivité moyenne de la mesure [ $\mu$ S/cm]

Cond<sub>base</sub>: Conductivité du cours d'eau avant la mesure [µS/cm]

Facteur: 0.5

Il est nécessaire de multiplier la conductivité par 1'000 afin d'obtenir des milligrammes par

mètre cube.

Le débit total Q<sub>total</sub> est calculé en faisant la moyenne des débits calculés de chaque

conductimètres pour lesquels l'écart à la moyenne est inférieur à 10%. Si l'erreur devait être

plus grande pour l'une des sondes, elle est écartée.

2.2.4. VALIDATION DES RÉSULTATS

Pour la courbe de tarage, chaque mesure du débit est évaluée et placée dans une des trois

catégories suivantes :

- Bonne : si toutes les sondes utilisées pour la mesure donnent des résultats dont l'erreur relative mesurée entre les données des quatre sondes est inférieure à 10%.
- Suffisante : si seulement deux ou trois des quatre sondes donnent des résultats qui, comparés entre eux, ont une erreur relative inférieur à 10%. Les sondes qui ont une erreur supérieure ne sont pas prises en compte dans le calcul du débit.
- Insuffisante: si aucun résultat n'est obtenu, si les résultats des mesures des sondes ont une erreur relative plus grande que 10% entre chacune des sondes ou si les valeurs sont visiblement impossibles. Les mesures insuffisantes ne sont pas prises en compte dans la courbe de tarage.

### 2.3. LA DILUTION À L'URANINE

L'uranine est le traceur fluorescent le plus utilisé et le plus adéquat en raison (Schudel, et al., 2002):

- De sa très grande sensibilité de détection
- De sa faible tendance à l'adsorption
- De son prix relativement bas

Dans les conditions les plus favorables du point de vue optique, la limite de détection peut descendre jusqu'à 0.001 ppb (cela correspond à 0.001 µg/l ou à un rapport de masse de 1:10<sup>12</sup>). L'uranine est sensible à la lumière, il est nécessaire d'utiliser des flacons bruns pour l'échantillonnage pour évité le photoblanchiment. Dans les eaux acides de pH inférieur à 5.5, le risque d'adsorption de l'uranine augmente en raison d'une modification de la structure de la molécule. En milieu acide (pH<7), la fluoréscence même de la particule est considérablement diminuée. L'uranine est endommagée en présence d'agents oxydants tels que le chlore, le dioxyde de chlore et l'ozone, substances fréquemment utilisées dans le traitement de l'eau potable (Schudel, et al., 2002 p. 14). Le tableau 9 présente quelques caractéristiques de l'uranine.

| Dénomination                                    | Uranine ou Fluorescéine | Retardement (dû à                               | Faible                   |
|---|-------------------------|---|--------------------------|
|   | disodique               | l'adsorption réversible)                        |                          |
| Index de couleur                                | 45350                   | Restitution du traceur                          | Elevée                   |
| Spectre excitation / émission [nm] <sup>4</sup> | 490 / 515               | Rapport qualité/prix du<br>traceur <sup>5</sup> | Très bon                 |
|   |                         |   |                          |
| Evaluation                                      | Inoffensif              | Propriétés particulières                        | Peut être endommagé      |
| toxicologique <sup>6</sup>                      |                         |   | par des oxydants (par    |
|   |                         |   | ex. chlore, ozone)       |
| Limite de détection                             | Très bonne              | Remarques                                       | Globalement, le meilleur |
|   |                         |   | traceur                  |

Tableau 9: Caractéristiques de l'uranine (Schudel, et al., 2002 p. 12).

### 2.3.1. ESTIMATION DE LA QUANTITÉ DE TRACEUR NÉCESSAIRE

Selon Wernli (2009 p. 13.12), pour la méthode d'injection momentanée, il faut compter 5 grammes d'uranine pour un débit de 1 [m³/s].





Figure 35: Insertion de l'uranine dans le cours d'eau à l'aide d'un mât depuis le pont "Landbrügg" à Schüpfheim.

Figure 36: Coloration de l'eau quelques mètres en aval de l'insertion du traceur.

<sup>-</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Longueurs d'onde produisant le signal de fluorescence maximal avec la technique du double balayage (selon les appareils, de légers écarts sont possibles).

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Evaluation de la qualité des traceurs d'après la sensibilité de détection et la mobilité (capacité de transport dans l'eau souterraine).

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> (Umweltbundesamt, 1997) et (Behrens, et al., 2001).





Figure 37: Installation de la pompe et du seau.

Figure 38: Intérieur du boîtier de la pompe.



A NO GLASS CUVETTES

Picofluor

GLAD

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

1920

Figure 39: Insertion de quelques gouttes d'Ammoniac dans l'échantillon pour rendre la solution basique avant la mesure avec le Picofluor.

Figure 40: Picofluor (un spectromètre de terrain).

#### 2.3.2. DÉROULEMENT DE LA MESURE

Il y a deux façons d'introduire le traceur dans le cours d'eau : par injection continue ou par injection instantanée. C'est cette dernière méthode qui est utilisée pour ce travail. Elle présente plusieurs avantages, la quantité de traceur nécessaire est plus faible, le temps de la mesure est plus court et la mise en oeuvre est plus simple (Schudel, et al., 2002 p. 46).

### **SUR LE TERRAIN**

- Préparer l'emplacement de la mesure de chaque côté du lit (voir figure 37)
- Rincer et préparer 4 bouteilles brunes (pour que l'uranine ne se dégrade pas au soleil) avec un bouchon et une étiquette avec les inscriptions nécessaires :
  - Nom du cours d'eau et du lieu

- Date
- o N° de l'essai de la journée
- Droite ou gauche
- o Heure de la prise de l'échantillon
- Échantillon O/Start/(Test)/Stop/Seau
- Prendre l'échantillon « 0 »
- Mettre l'uranine dans l'eau, noter le temps
- Enclencher les pompes rapidement, prendre l'échantillon « START » et mettre la pompe dans le seau, noter le temps
- Noter à quel moment l'uranine est visible dans l'eau
- Passer les échantillons « 0 » au Picofluor (spectromètre de terrain) (voir figure 40)
- Attendre que le traceur ne soit plus visible
- Prendre un échantillon « TEST », noter le temps et le passer au Picofluor, si il est plus grand que l'échantillon « 0 » attendre encore un peu et retester, si il est équivalent à l'échantillon « 0 » :
- Prendre un échantillon « STOP », arrêter la pompe, noter le temps
- Remuer le seau et prendre l'échantillon « Seau »

# Résumé des échantillons :

- Échantillon 0: relevé dans le cours d'eau une fois que la station de mesure est construite, avant d'injecter le traceur.
- Échantillon START: relevé à la pompe, dès que la bouteille est pleine, le tuyau est mis dans le récipient, noter l'heure de la prise de l'échantillon et celle du début du pompage (Pump START).
- Échantillon TEST : relevé à la pompe au moment où l'on estime que le nuage de traceur est passé pour vérifier qu'il n'y ait plus de traceur dans l'eau.
- Échantillon TEST 2,3,...: relevé à la pompe dans le cas où il y aurait encore du traceur dans l'échantillon TEST 1.
- Échantillon STOP: relevé à la pompe lorsque le nuage de traceur est passé. Noter l'heure à laquelle le tuyau est sorti du récipient (Pump STOP) et celle de la prise de l'échantillon.

• Échantillon du seau : relevé du seau après avoir remué. C'est l'échantillon qui nous

permet de connaître la concentration de traceur.

Il est important d'annoter les échantillons directement après les avoir pris, ne pas oublier

d'inscrire s'il a été alcalisé « alc » (voir figure 39). L'uranine change de propriétés selon le pH.

Sa fluorescence est maximale pour un pH 10. On ajoute quelques gouttes d'ammoniac pour

rendent la solution basique et pouvoir observer la fluorescence le mieux possible.

Sur le terrain une première mesure des résultats est possible avec le picofluor (fluorimètre

de poche) (voir figure 40) avant de passer au laboratoire. La formule pour calculer le débit

est la suivante :

$$Q = Qi / C_m * dt$$

Avec:

Q: Débit [m³/s]

Qi : Quantité de traceur injectée [mg]

C<sub>m</sub>: Concentration obtenue avec le spectromètre picofluor [mg/m<sup>3</sup>]

dt : Durée de pompage [s]

AU LABORATOIRE

Au laboratoire, chaque échantillon ainsi qu'une solution de contrôle sont passés au

spectrophotomètre de fluorescence (figure 41). On obtient une courbe avec les

concentrations par rapport à la longueur d'onde. La hauteur du pic d'uranine (519 [nm]) est

mesurée à la règle.



Figure 41: Spectrophotomètre de fluorescence.

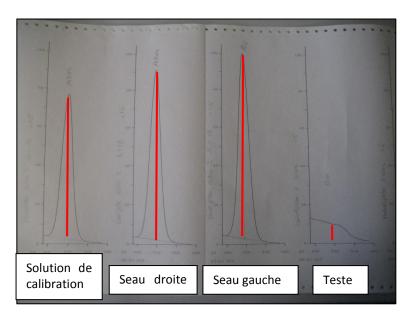


Figure 42: Pic d'uranine pour une longueur d'onde de 519 [nm].

Tout d'abord il faut calculer le facteur à l'aide de la solution de contrôle avec la formule suivante :

Facteur = H / Cons<sub>controle</sub> \* Amplification

# Avec:

H<sub>contrôle</sub> : Hauteur du pic de la solution de contrôle mesuré à la règle sur le papier [cm]

Cons<sub>contrôle</sub>: Concentration de la solution de contrôle [mg/m<sup>3</sup>]

Amplification: Amplification introduite au spectrophotomètre

Ensuite il faut calculer la concentration dans le seau :

Conc<sub>seau</sub> = H<sub>seau</sub> / Facteur \* Amplification

Avec:

H<sub>seau</sub>: Hauteur du pic de l'échantillon du seau mesuré à la règle sur le papier [cm] (voir figure

42)

Cons<sub>seau</sub>: Concentration de l'échantillon du seau [mg/m³]

Amplification: Amplification introduite au spectrophotomètre

Le débit se calcule avec l'échantillon du seau et la formule suivante :

 $Q = EM / Conc_{seau} * \Delta t$ 

Avec:

Q : Débit [m<sup>3</sup>/s]

EM : Quantité de traceur introduite dans le cours d'eau [mg] (Eingabemenge)

Cons<sub>seau</sub>: Concentration de l'échantillon du seau [mg/m<sup>3</sup>]

Δt : Durée de pompage [s]

2.3.3. VALIDATION DES RÉSULTATS

Pour les mesures du débit avec la méthode de la dilution à l'uranine, on obtient un résultat pour chaque côté du cours d'eau. Si les résultats sont semblables (moins de 10% de différence) alors le débit correspond à la moyenne des deux et la mesure est jugée bonne. S'il y a une plus grande différence entre les deux résultat, il faut alors chercher à comprendre le problème. Si seul un des deux côtés donne un résultats comparable, il faut juger s'il est plausible. La mesure sera évaluée suffisante dans le cas d'un résultat plausible et insuffisante, si les résultats ne sont pas plausibles. Le risque de contamination est très élevé car l'uranine est détectable en très faible quantité par le spectromètre.

- 82 -

# PARTIE 2 : ANALYSE DES HYDROGRAMMES DE CRUE DE LA STATION WERTHENSTEIN POUR LES 20 PLUS GRANDES CRUES DE LA PÉRIODE 1984-2008.

L'hydrogramme de crue donne des informations importantes concernant la réaction du bassin-versant. Une fiche technique comprenant des informations sur les temps caractérisant la crue, le volume d'eau écoulé, le type de précipitation déclencheur et l'estimation du temps de retour complète les informations visuelles de l'hydrogramme pour les 20 plus grandes crues de la période 1984-2008. Cette partie explique l'élaboration de la série partielle, puis définit les paramètres de la fiche technique.

# 3. ELABORATION DE LA SÉRIE PARTIELLE

Pour déterminer la série partielle, un script est écrit avec le programme R.

A partir des données de l'hydrogramme des valeurs de la station Werthenstein entre 1984 et 2009, les valeurs sont agglomérées en une valeur par jour correspondant au maximum journalier. Cela permet de réduire considérablement le nombre de valeur sans pour autant perdre l'information de la valeur maximale. Ces maximums journaliers sont ordonnés dans un ordre décroissant. Le nombre de crues pris en considération correspond à quatre fois le nombre d'années de mesure observé (25 ans de mesure entre 1984 et 2009 correspondent donc à une série partielle de 100 crues). Pour éviter de prendre plusieurs fois le même événement en compte, ou en d'autres termes, pour que chaque crue soit indépendante (voir plus bas), seules les pointes de crues séparées d'au moins sept jours sont retenues. Cette opération a réduit la série partielle à 70 crues, ce qui correspond aux critères de Nachtnebel (2008) qui dit que le nombre de valeurs correspond à environ 2 à 3 fois le nombre d'années observées. Sur les 70 crues de la série partielle, les 20 plus grandes sont étudiées.

Il existe d'autres façons de créer un série partielle. Aschwanden et al. (1995) par exemple, fait recours à un seuil, habituellement la valeur de la plus petite crue annuelle de la série. Les probabilités de crue sont calculées pour la crue la plus forte de chaque année, ainsi que pour les pointes les plus hautes d'été et d'hiver. Le calcul est conduit en suivant les recommandations pour la détermination des probabilités de crue adoptées en Allemagne (DVWK, 1979). Les fonctions de répartitions retenues sont les suivantes : log-Pearson-III, Pearson-III et Gamma. Selon Spreafico et al. (2003 p. 39): «Pour une série de mesures

courte, on peut utiliser des séries partielles de 2 à 4 crues par année réparties en été et en hiver. Les crues d'hiver appartiennent souvent à un autre ensemble que celles de l'été ».

#### 3.1. CRITÈRES D'INDÉPENDANCE :

Il existe plusieurs façons de déterminer un critère d'indépendance entre événement. Voici quelques exemples :

Selon Maniak (2005 p. 131), le critère d'indépendance peut être déterminé soit à l'aide de la forme de l'hydrogramme, soit avec un interval de temps. Si la hauteur du débit entre deux pics de crues voisins diminue jusqu'au moins à la moitié de la hauteur de la pointe de crues la plus petite d'entre les deux, alors ces deux crues peuvent être considérées comme indépendantes. Un autre critère est le fait que le débit redescende au moins de deux tiers par rapport au débit de pointe du premier pic. Maniak (2005) précise que ces conditions sont généralement remplies si l'on admet que deux crues doivent être séparées de sept jours pour être indépendantes. C'est ce dernier critère qui a été choisi pour élaborer la série partielle.

Selon DVWK (1999), deux événements d'une série de crues annuelles sont indépendants, si la différence A entre le pic le plus petit et le débit minimum relatif entre les deux événements est plus grand que la différence B entre le débit moyen de la série de mesure et le débit minimum relatif entre les deux événements.

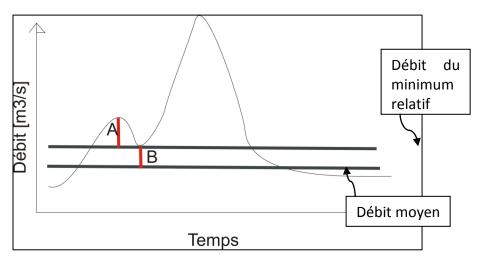


Figure 43: Critère d'indépendance selon DVWK (1999).

Selon Helbling et al. (2006), pour les crues qui ont plusieurs pics, la durée totale n'est pas prise en compte, mais seulement celle du pic le plus haut, si les conditions suivantes sont prises en compte:

- Le maximum est atteint au premier pic : après le pic le débit diminue pendant au moins 3h.
- Le maximum est atteint lors d'un pic suivant : le débit atteint au maximum 1/3 du pic avant le pic maximum et après le pic maximum le débit diminue pendant au moins 3 h.

C'est le critère choisi dans ce travail pour déterminer, si un pic avant ou après l'événement analysé en fait partie ou pas. Dans quelques cas, un petit pic avant ou après le pic principal est séparé de l'événement, si il est possible d'attribuer le premier pic à une précipitation et le second à une deuxième vague de précipitation.

# 4. SÉPARATION DE L'HYDROGRAMME

La séparation des écoulements a pour objectif d'identifier différents composants de l'écoulement total observé en une station de mesure de débit donnée. Il s'agit de séparer, le plus souvent, les écoulements de base (écoulements lents), observés de façon plus ou moins continue dans le cours d'eau, des écoulements directs (écoulements rapides), observés irrégulièrement à l'occasion des événements pluviométriques. Les écoulements lents sont souvent considérés comme résultant de la vidange des aquifères. Les écoulements rapides sont rattachés aux ruissellements de surface et de subsurface résultant de précipitations récentes sur le bassin (Hingray, et al., 2009 p. 363).

Il y a différentes méthodes possibles (Hingray, et al., 2009 p. 364):

- La séparation à l'aide de traceurs environnementaux
- La séparation graphique
- La séparation numérique (à l'aide de filtres numériques).

Pour ce travail, ces deux dernières méthodes sont utilisées.

#### 4.1. MÉTHODE NUMÉRIQUE À L'AIDE D'UN FILTRE

D'après l'article Merz et al. (2006), plusieurs techniques de séparation automatique du débit de base sont testées et le filtre proposé par Chapman et al. (1996) détermine une séparation qui se rapproche le plus du débit de base que l'on séparerait à la main par interprétation

visuelle. Elle est basée sur la différence du débit de base dans une tranche de temps et sur le débit, ainsi que le paramètre de stockage k qui est déterminer visuellement sur l'hydrogramme. Il est exprimé par la formule suivante :

$$\begin{split} q^b(t) &= (a \mathrel{/} (2\text{-}a)) * q^b(t\text{-}\Delta t) + ((1\text{-}a) \mathrel{/} (2\text{-}a)) * q(t), \, q^b(t) \mathrel{<=} q(t) \\ \\ a &= e^{-\Delta t/k} \\ \\ q^d(t) &= q(t) - q^b(t) \end{split}$$

Avec:

q<sup>b</sup>(t): débit de base [m<sup>3</sup>/s]

a: paramètre en fonction de k

k: paramètre de stockage

Δt: intervalle d'une heure

q(t): écoulement [m³/s]

q<sup>d</sup>(t): écoulement direct [m<sup>3</sup>/s]

#### 4.2. MÉTHODE GRAPHIQUE AVEC UNE DROITE

Une droite est tirée entre le point où le débit direct augmente par rapport au débit de base (séparé à l'aide du filtre) et le point où le débit direct se rapproche le plus, voire coupe le débit de base (séparé à l'aide du filtre). Si ces critères ne sont pas satisfaisants, on se fie à l'interprétation visuelle. Dans certain cas, l'utilisation de l'hydrogramme avec une échelle semi-logarithmique peut aider. Selon Hingray et al. (2009 p. 364) la fin du débit direct correspond souvent au point à partir duquel on peut considérer le logarithme du débit comme une fonction linéairement décroissante du débit. La précision de la séparation du débit de base par une droite est souvent amplement suffisante (Nachtnebel, 2008 p. 220).

# 5. PARAMÈTRES DE DESCRIPTION DES CRUES

Chacune des 20 plus grandes crues de la série partielle est représentée par un hydrogramme comprenant deux jours avant et trois jours après le pic principal ainsi que les précipitations associées. Elles sont décrites par une série de paramètres détaillés ci-dessous.

| Paramètre           | Description   | Source            |
|---------------------|---|-------------------|
| Date et heure de la | Déterminé avec le programme R à partir des valeurs du débit.                              |                   |
| crue                |   |                   |
| Débit de pointe     | Déterminé avec le programme R à partir des valeurs du débit.                              |                   |
| Jour julien         | Déterminé sur le calendrier Julien.   |                   |
| Début de la crue    | Heure de la première réaction du débit, là où le débit direct                             |                   |
|                     | augmente de façon remarquable par rapport au débit de base.                               |                   |
|                     | Déterminé à partir de l'hydrogramme des valeurs du débit au point                         |                   |
|                     | où commence la droite de séparation du débit de base (voir                                |                   |
|                     | chapitre 4 dans la partie Méthode).   |                   |
| Fin de la crue      | Lorsque le débit direct s'approche le plus, voire coupe le débit de                       |                   |
|                     | base déterminé à l'aide du filtre. Si le résultat n'est pas satisfaisant                  |                   |
|                     | on l'estime visuellement. Déterminé à partir des valeurs du débit. au                     |                   |
|                     | point où fini la droite de séparation du débit de base (voir chapitre 4                   |                   |
|                     | dans la partie Méthode).  |                   |
| Durée de la crue    | Temps entre début et fin de la crue. Déterminé avec les moyennes                          |                   |
|                     | horaire.  |                   |
| Temps de réaction   | Temps entre le début des précipitations et le début de la crue.                           |                   |
|                     | Déterminé avec les valeurs du débit de l'hydrogramme (et pas les                          |                   |
|                     | valeurs moyennes).  |                   |
| Temps de montée     | Temps entre le début de la crue et le pic. Déterminé avec les valeurs                     |                   |
|                     | du débit.   |                   |
| Débit avant la crue | Débit correspondant au début de la crue. Déterminé avec les valeurs                       |                   |
|                     | du débit.   |                   |
| Débit après la crue | Débit correspondant à la fin de la crue. Déterminé avec les valeurs                       |                   |
|                     | du débit.   |                   |
| Débit total de la   | Somme des débits horaires pendant la crue multipliée par 360 pour                         |                   |
| crue cumulé         | obtenir un débit horaire.   |                   |
| Débit de base       | Somme des débits de base (séparé avec le filtre) horaire pendant la                       |                   |
| cumulé              | crue multipliée par 360 pour obtenir un débit de base horaire.                            |                   |
| Volume de crue      | Débit total de la crue cumulé multiplié par la durée de la crue : V=                      | (DVWK, 1982 p.    |
| total               | $\Sigma Q_{tot}(t)^* \Delta t$  | 2) cité dans      |
|                     |   | (Steiner, 2007 p. |
|                     |   | 33)               |
| Volume de base      | Débit de base cumulé multiplié par la durée de la crue : $V = \Sigma Q_b(t)^* \Delta t$   |                   |
| écoulé              |   |                   |
| Volume direct       | Volume de crue total auquel on soustrait le volume de base écoulé.                        |                   |
| écoulé              |   |                   |
| а                   | Paramètre dépendant de ka = e <sup>(-1/k)</sup>   | (Merz, et al.,    |
|                     |   | 2006)             |
| k                   | Paramètre de stockage déterminé visuellement et à l'aide de la                            | (Merz, et al.,    |
|                     | courbe semi-logarithmique.  | 2006)             |
| MQ25                | Moyenne du débit des 12 h avant, des 12h après et de l'heure de la                        | (Diezig, 2006)    |
|                     | crue.   |                   |
| HQannuel            | Débit maximal annuel de l'année de la crue en question, données de                        |                   |
|                     | débit travaillées avec le programme R.  |                   |
| R                   | HQannuel divisé par MQ25  | (Diezig, 2006)    |
| t <sub>c</sub>      | Temps de concentration correspond à 2*F <sub>N</sub> <sup>0.35</sup> avec F la surface du | (Diezig, 2006)    |
|                     | bassin-versant en [km²].  |                   |

| R <sub>tc</sub>  | R multiplié par t <sub>c</sub>  | (Diezig, 2006)    |
|------------------|---|-------------------|
| Durée des        | L'événement commence lorsque les précipitations augmentent de         | (Riedener, 2010)  |
| précipitations   | façon marquante et que le débit réagit. Il doit tomber au moins       |                   |
|                  | 12 mm en 24 h ou 6 mm en 12 h pour qu'un événement soit               |                   |
|                  | concidéré comme inintérompu. L'événement se termine lorsque les       |                   |
|                  | précipitations sont plus faibles que 0.3 [mm/h].                      |                   |
| Intensité des    | Quantité de précipitations tombées en une heure [mm/h]                |                   |
| précipitations   |   |                   |
| Quantité des     | Somme des précipitations tombées sur l'ensemble du bassin-versant     |                   |
| précipitations   | multipliée par la durée de l'événement [mm]                           |                   |
| Saison           | Déterminée selon les saisons habituelles                              |                   |
| Type de crue     | Selon la Figure 44 (Diezig, 2006) ci-dessous                          | (Diezig, 2006)    |
| Coefficient de   | Rapport entre la hauteur d'eau ruisselée (Volume direct écoulé)       | (Hingray, et al., |
| ruissellement    | divisé par la surface du bassin-versant en [m²] et multiplié par 1000 | 2009)             |
|                  | pour obtenir des [mm]) et la hauteur d'eau précipitée en [mm].        |                   |
| Débit spécifique | Débit de pointe [m³/s] divisé par la surface du bassin-versant en     |                   |
|                  | [km <sup>2</sup> ].   |                   |
| Temps de retour  | Lu sur le graphe des statistiques de Crues de l'OFEV.                 | (OFEV, 2010)      |
|                  |   |                   |

Tableau 10: Paramètres de description des crues.

# **5.1.** Type de processus de crue

Diezig (2006) a élaboré une méthode pour l'évaluation du type de crue basée en grande partie sur le travail de Merz (2002). L'OFEV propose également un processus d'évaluation du type de crue qui se réfère en grande partie aux calendriers météorologiques. Pour ce travail, le procédé de Diezig est choisi car l'analyse utilise des données débimétriques et pluviométriques directement, ce qui permet de baser l'évaluation du type de crue sur les données que nous avons travaillées et non sur les calendriers météorologiques. Diezig (2006) défini six types de pluie :

- Averse
- Courte pluie
- Longue pluie
- Pluie sur la neige
- Fonte de la neige
- Fonte de la glace

Dans le tableau 11 et le tableau 12 se trouvent les valeurs utilisées pour la méthode ainsi que le schéma du déroulement de la méthode de Diezig (figure 44).

Plus les précipitations sont longues plus le temps de montée a tendance à être long (Diezig, 2006, p.29) :

| Temps de montée                                   |              |         |  |  |  |
|---|--------------|---------|--|--|--|
| Temps de montée [h] Type de crue à priori Vitesse |              |         |  |  |  |
| <5  | Averse       | Éclaire |  |  |  |
| 5-10  |              | Rapide  |  |  |  |
| 10-20   | Courte pluie | Moyen   |  |  |  |
| >20   | Longue pluie | Lent    |  |  |  |

Tableau 11: Evaluation du temps de montée à l'aide du temps entre la première réaction du débit direct et du pic de crue.

Malgré l'utilisation d'un indicateur Rtc, l'estimation du temps de montée reste peu précise. Pour déterminer Rtc nous devons admettre que le temps de concentration ne dépend que de la taille du bassin-versant (Diezig, 2006).

| Rtc               |                       |         |  |  |
|-------------------|-----------------------|---------|--|--|
| Rtc               | Type de crue à priori | Vitesse |  |  |
| 10-20             | Longue pluie          | Lent    |  |  |
| 20-40             | Courte pluie          | Moyen   |  |  |
| 40-80             | Averse                | Rapide  |  |  |
| Trop de variation | Pluie sur neige       |         |  |  |

Tableau 12: Evaluation de la vitesse de montée à l'aide du paramètre Rtc.

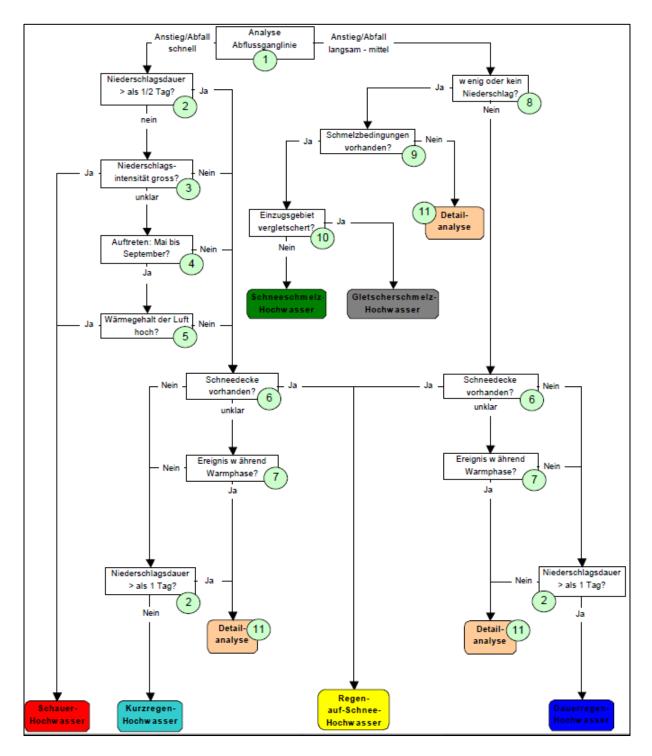


Figure 44: Schéma du déroulement de la méthode de Diezig pour l'évaluation du type de précipitation déclencheur (Diezig, 2006 p. 34).

# PARTIE 3: ANALYSE DES ÉVÉNEMENTS DE L'ÉTÉ 2009.

Pour les événements de l'été 2009, la même analyse que celle de la partie 2 a été faite. Elle est complétée par les données des stations hydrométriques et pluviométriques GIUB. Les informations au sein du bassin-versant sont donc plus détaillées et permettent l'analyse du déplacement de l'eau dans le bassin-versant.

# 6. CHOIX DES ÉVÉNEMENTS

Pour l'année 2009, les crues considérées sont celles qui dépassent 20 m³/s pour la période pendant laquelle au moins une partie les stations de jaugeage et des précipitations étaient installées, soit du 26.06.2009 au 10.10.2009. Le critère d'indépendance choisi est le suivant : il est nécessaire que le débit entre deux pics diminue de 2/3 par rapport au plus petit pic pour que les pics correspondent à des événements différents.

## 7. DÉPLACEMENT DE L'EAU DANS LE BASSIN-VERSANT

La comparaison des hydrogrammes des stations en fonction et la répartition des précipitations dans le bassin permettent de mieux cerner la réponse hydrologique. Les éléments suivants sont préparés pour l'analyse :

- Une fiche technique.
- Un graphique avec les hydrogrammes des stations LU14 à Sörenberg, CKW à Flühli,
   GIUB 2 à Schüpfheim et LH2487 à Werthenstein. Un graphique avec les niveaux d'eau des stations GIUB 1, 3 et 4.
- Les cartes des moyennes horaire des précipitations sur le bassin entier.

Les temps de concentration pour chaque sous-bassin-versant sont également déterminés à l'aide de formules empiriques et sont utilisés comme comparaison.

# PARTIE 4: DÉTERMINATION DES ZONES CLÉ

La détermination des zone clés est faite à l'aide de deux modèles HQx\_meso\_CH et PREVAH. Le modèle HAKESCH et la méthode de Schaffner (2007) sont écartés car ils sont valable pour des bassins-versants de plus petites tailles. Pour rendre les résultats comparables entre les bassins-versants, l'utilisation du débit spécifiques est essentiel. Les débits spécifiques sont classés en trois catégories : haut, moyen et bas de façon proportionnelle pour chacune des modélisations. Ainsi il est également possible de comparer les différentes modélisations entre elles, même si les valeurs des débits spécifiques sont différentes.

Cinq modélisations sont élaborées pour chaque sous bassin-versant, une avec HQx\_meso\_CH et quatre avec PREVAH:

- HQx\_meso\_CH modélise la moyenne des débits spécifiques des méthodes calculant le Qmax (soit Müller-Zeller, GIUB(Fn) et GIUB(MQ), la méthode de Kürsteiner n'est pas prise en compte). Les méthodes qui mdélisent les crues d'autres temps de retour (30, 100, 300 ans) ne sont pas prises en compte non plus. Ce qui nous intéresse pour cette modélisation, c'est de connaître quels sous-bassins peuvent réagire avec les débits spécifiques les plus élevés.
- PREVAH I modélise les débits spécifiques maximaux avec comme données d'entrées pour les précipitations les moyennes horaire de MétéoSuisse pour la période 1984-2008. Cette modélisation réagit principalement avec l'intensité élevée des précipitations. Les sous-bassins-versants qui montrent les débits spécifiques les plus élevés sont le résultats d'un événement pluvieux très intense.
- PREVAH II modélise les débits spécifiques maximaux avec comme données d'entrées les précipitations régionales de MétéoSuisse pour la période 1984-2008. Les précipitations régionnales correspondent à une hauteur d'eau moyenne qui tombe pareillement sur tout le bassin-versant. Cela permet de donner plus d'importance aux caractéristiques du bassin-versant.
- PREVAH III modélise les débits spécifiques maximaux avec, comme données d'entrées pour les précipitations, les moyennes horaire de MétéoSuisse pour la période du 26.06.2009 au 10.10.2009.
- PREVAH IV modélise les débits spécifiques maximaux avec, comme données d'entrées pour les précipitations, les moyennes horaire de MétéoSuisse ainsi que les moyennes horaire des pluviomètres GIUB pour la période du 26.06.2009 au 10.10.2009. En comparant les modélisations de PREVAH III et IV, il est possible de mieux interpréter l'interpolation entre les pluviomètres et de mieux localiser les précipitations grâce aux nouveaux plusviomètres.

Ces cinq modélisations différentes nous permettent de mieux comprendre les influences des différents facteurs du transfert hydrologique. Pour l'année 2009, la période modélisée (26.09.2009 – 10.10.2009) correspond à l'intervalle de temps pendant lequel une grande partie des pluviomètres GIUB sont en fonction. Le 10.10.2009 est le jour de la première neige, les données des pluviomètres ne sont plus fiables, car les pluviomètres ne sont pas équipés pour mesurer la quantité de neige.

# 8. DÉCOUPAGE DU BASSIN-VERSANT EN SOUS-BASSINS-VERSANTS

Le bassin-versant de la Kleine Emme en amont de la station fédérale de Werthenstein est découpé en 11 sous-bassins-versants selon les critères suivants :

- Chacune des quatre nouvelles stations GIUB est l'exutoire d'un sous bassin-versant.
   Ce qui forme quarte sous-bassins : GIUB 1, 2, 3 et 4.
- Les stations LU 14 et CKW forment l'exutoire de deux sous-bassins qui portent leurs noms.
- Les affluents importants par leur taille qui ne sont pas contrôlés par une station forment chacun un sous-bassin avec comme exutoire l'embouchure avec la Kleine Emme (ou Waldemme dans la partie en amont de Schüpfheim). Ce qui forme les sous-bassins Rotbach et Wiss Emme.
- A cela s'ajoute un sous-bassin Grosse Entle avec comme exutoire l'embouchure de la Grosse Entle avec la Kleine Emme ainsi que deux sous-bassins qui distinguent la Grosse de la Kleine Fontanne.

# Le tableau 13 et la figure 45 aide à se repérer.

| Numéro | Bassin-versant  | Exutoire   | Surface [km²] |
|--------|-----------------|--|---------------|
|        |                 |  | (PREVAH)      |
| 1      | LU14            | Station LU14, Waldemme, Sörenberg                  | 22.4          |
| 2      | GIUB 1          | Station GIUB 1, Südelgraben, Flühli, Hirseggbrügg  | 16.9          |
| 3      | Rotbach         | Confluence Rotbach-Waldemme                        | 24.6          |
| 4      | CKW             | Station CKW, Waldemme, Flühli                      | 91.1          |
| 5      | Wiss Emme       | Confluence Wiss Emme- Kleine Emme                  | 28.9          |
| 6      | GIUB 2          | Station GIUB 2, Kleine Emme, Schüpfheim, Landbrügg | 143.6         |
| 7      | GIUB 3          | Station GIUB 3, Grosse Entle, Gfellen, Stilaub     | 26.9          |
| 8      | Grosse Entle    | Confluence Grosse Entle- Kleine Emme               | 69.4          |
| 9      | Grosse Fontanne | Confluence Grosse Fontanne- Kleine Fontanne        | 39.0          |
| 10     | Kleine Fontanne | Confluence Grosse Fontanne- Kleine Fontanne        | 23.1          |
| 11     | GIUB 4          | Station GIUB 4, Fontannen, Wolhusen, Müliacher     | 62.2          |
| 12     | Werthenstein    | Station LH2487, Kleine Emme, Werthenstein,         | 311           |
|        |                 | Chappelboden                                       |               |

Tableau 13: Liste des sous-bassins-versants.

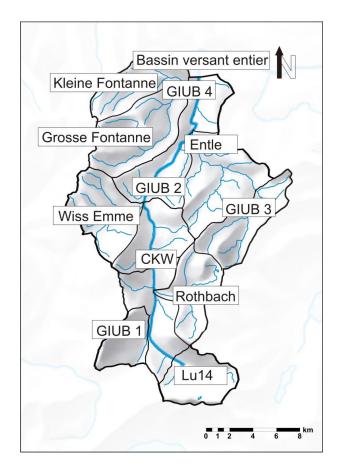


Figure 45: Nom des sous-bassins-versants. Source du fond de carte : Swisstopo.

# 9. LE MODÈLE HQX\_MESO\_CH

HQx\_meso\_CH est un modèle qui compare des débits maximum, moyen ou d'un certain temps de retour (souvent à choix) par les méthodes suivantes : Kürsteiner, Müller-Zeller, GIUB'96 Qmax f(Fn), GIUB'96 Qmax f(MQ), GIUB'96 HQ100 f(Fn), GIUB'96 HQ100 f(MQ), Kölla, Momente, BaD7. Les quatre premières méthodes donnent un résultat pour un débit maximum et les cinq dernières pour un débit d'un temps de retour de 100 ans.

L'analyse des résultats comporte plusieurs étapes (Spreafico, et al., 2003) :

• 1<sup>ère</sup> étape : Utilisation de plusieurs méthodes

Les résultats obtenus avec les différentes méthodes utilisées dans HQx\_meso\_CH sont transmis dans un même graphique. Un graphique correspond à un sous-bassin-versant. Les bâtonnets bleus représentent les méthodes qui calculent une crue maximale et les bâtonnets rouges celles qui calculent une crue centennale (voir figure 46).

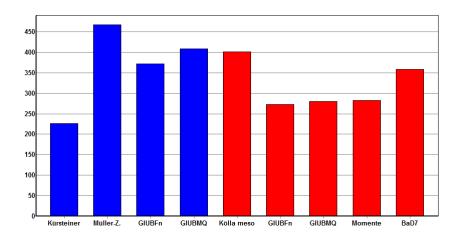


Figure 46: Exemple de graphique (GIUB2) avec les résultats des différentes méthodes de HQx\_meso\_CH.

• 2<sup>ème</sup> étape : Analyse de la dispersion des résultats

# Il y a deux cas:

- Les valeurs obtenues pour Qmax et HQ100 sont du même ordre de grandeur. Les moyennes des Qmax sont plus grandes que celles des HQ100. Dans ce cas, le débit de crue recherché peut assez facilement être estimé.
- Les valeurs obtenues présentent une dispersion importante dans chacun des groupes HQx et/ou Qmax. Quelques valeurs de HQx peuvent même dépasser les valeurs de Qmax. L'évaluation de la crue est alors plus délicate. L'origine de ces résultats contradictoires doit être recherchée (3<sup>ème</sup> étape).
- 3<sup>ème</sup> étape : Corrections, suppression des résultats non plausible
- 4<sup>ème</sup> étape : Détermination de la valeur de HQx, dispersion et validation des résultats

# 10. LE MODÈLE PREVAH

PREVAH (Precipitation-Runoff-EVApotranspiration Hru (hyrological response unit)) est un modèle hydrologique semi distribué, utilisant une approche par processus. En d'autres mots, il est basé sur des unités de réponses hydrologiques (HRU), qui sont des hydrotopes ou des clusters représentant une surface du bassin-versant pour laquelle le comportement hydrologique est estimé semblable (l'utilisateur peut déterminer le nombre de paramètres semblables nécessaires à la formation d'un hydrotope). Ces hydrotopes ont donc une réponse similaire aux différents processus hydrologiques représentés par des modules de stockage dans PREVAH. Ces derniers sont décrits plus bas. Il a été développé spécialement pour modéliser des bassins-versants montagneux caractérisés par un environnement et des

conditions climatiques très variables, il permet de comprendre les variations spatiales et temporelles des processus hydrologiques (Viviroli, et al., 2009 pp. 1209-11).

#### 10.1. LES PARAMÈTRES AJUSTABLES

PREVAH fonctionne avec des modules de stockage. On en dénombre six : pour le stockage de la neige, des interceptions, de la teneur en eau du sol, pour la zone superficielle non-saturée de l'écoulement, pour la zone sous terraine saturée de l'écoulement et pour les glaciers (névé, neige et glace). PREVAH est calibrable à l'aide de 12 à 14 paramètres ajustables. Le modèle m'a été fourni calibré pour notre bassin-versant.

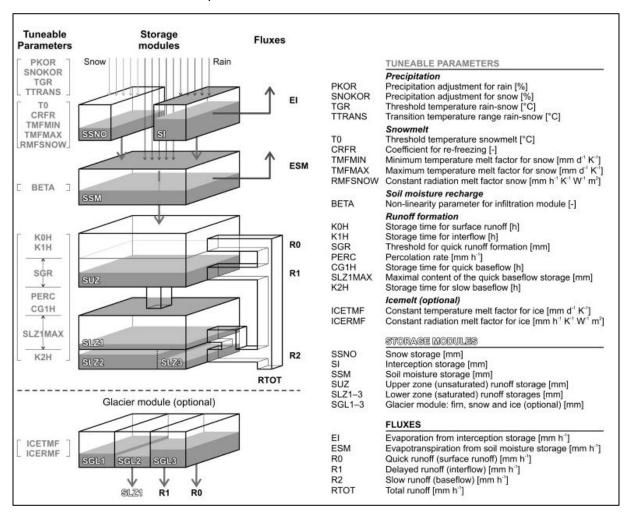


Figure 47: Schéma de la structure de PREVAH avec les paramètres ajustables, les modules de stockage et les flux hydrologiques (Viviroli, et al., 2009).

### 10.2. Données d'entrée

Trois types de données d'entrée sont nécessaires (Viviroli, et al., 2009 p. 1213) :

Les informations physiologiques pour les unités de réponses hydrologiques (HRUs) : Il s'agit d'une table au format ASCII qui liste les propriétés physiologiques de chaque HRU et d'une carte qui localise les HRU. Tous deux sont créés à l'aide de WINHRU, un outil de PREVAH.

La météorologie : Les données météorologiques standards à haute résolution temporelle (l'heure comme unité de temps) sont utilisées. Elles contiennent les informations sur la température de l'air, les précipitations, l'humidité relative, la radiation globale, la vitesse du vent et la durée d'ensoleillement. Ces variables sont différenciées spatialement et avec l'altitude. Les données sont rassemblées dans une table au format ASCII. La sélection des stations, l'interpolation et l'agrégation sont faites avec l'outil WINMET de PREVAH.

Les données de contrôle : Elles contiennent toutes les informations des paramètres du modèle comme par exemple le nombre de HRU, les altitudes, les conditions de stockage initial, les pas de temps, les paramètres ajustables.

#### 10.3. APPLICATION DU MODÈLE AU BASSIN-VERSANT DE LA KLEINE EMME

Pour la Kleine Emme, un total de 572 hydrotopes ont été choisis, ce qui est beaucoup pour la taille du bassin-versant. Les shape files des sous-bassins-versants sont transformées en raster puis en format ASCII et finalement au format .isb (internal sub-bassin) lisible par PREVAH.

On fait tourner le modèle une fois avec les précipitations (moyennes horaire) de MétéoSuisse que l'on a interpolées pour la période 1984-2008 (PREVAH I), une fois avec les précipitations régionales de MétéoSuisse pour la période 1984-2008 (PREVAH II) (« mean » dans le fichier de sortie), une fois avec les précipitations (moyennes horaire) mesurées durant l'été 2009 par MétéoSuisse puis que l'on a interpolées (PREVAH III) et une fois avec les précipitations (moyennes horaire) mesurées durant l'été 2009 par MétéoSuisse et par les stations GIUB (moyennes horaire), que l'on a interpolées (PREVAH IV). De cette façon, il est possible de voir à quel point les précipitations et les caractérisitques physiques du bassin représentées dans le modèle influencent le débit.

Il faut prendre note du fait que PREVAH nous donne un résultat de débit en [mm/h\*km²]. Pour pouvoir interpréter ces données, nous avons écrit un script avec le programme R

(SPTS\_examplesCA). Ce script sort le débit maximum pour chaque sous-bassins, et le transforme en débit spécifique avec les unité [m³/h\*km²], pour pouvoir comparer les résultats des sous-bassins entre eux. Les zones clé correspondent alors aux bassins-versants qui simulent les plus grands débits spécifiques.

# V. RÉSULTATS

Dans ce chapitre, les résultats de chacunes des quatre parties sont présentés. Ils sont discutés au chapitre Discussion.

# PARTIE 1: L'INSTALLATION ET LE CALIBRAGE DES STATIONS DE JAUGEAGE GIUB

Les stations sont installées durant l'été 2009 (voir figure 48 à figure 51). Elles enregistrent le niveau d'eau toutes les 5 minutes. La station GIUB 1 est en fonction depuis le 16.07.2009 à 11:00; la station GIUB 2, depuis le 07.07.2009. Un problème de réglage d'heure à cette dernière ne permet son utilisation qu'à partir du 27.07.2009 à 8:15. La station GIUB 3 mesure le niveau d'eau depuis le 02.09.2009 à 7:23 à raison de deux mesures par minute pendant deux minutes suivies d'une pause d'une minute. Ces données sont ensuite retravaillées, avec une interpolation linéaire pour les minutes sans mesure, puis une agrégation par tranche de 5 minutes. La station GIUB 4 donne le niveau d'eau toutes les 10 minutes entre le 12.07.2009 à 8:40 et le 27.09.2009 à 13:50 puis toutes les 5 minutes à partir du 27.07.2009 à 14:00. Il faut noter que les stations sont toutes réglées à l'heure d'hiver afin de faciliter le traîtement des données.



Figure 48: Station GIUB 1, Südelgraben, Flühli, Hirseggbrügg.



Figure 49: Station GIUB 2, Kleine Emme, Schüpfheim, Landbrügg.



Figure 50: Station GIUB 3, Grosse Entle, Gfelle, Stilaub.

Figure 51: Station GIUB 4, Fontannen, Wolhusen, Müliacher.

En tout 51 mesures du débit ont été faites, réparties sur les 4 stations. Les résultats sont présentés sous forme de tableau (tableau 14 à tableau 17) et dans un graphique « Niveau-Débit » (figure 52 à figure 56). Les points verts correspondent aux mesures du débit qui sont évaluées bonnes ; les points oranges déterminent les mesures évaluées suffisantes et les rouges celles qui sont insuffisantes selon les critères décrits aux chapitres 2.2.4 p. - 75 -et 2.3.3 p.- 82 -. Pour les stations GIUB 1 et 4, le graphe indique le débit en fonction de la hauteur d'eau verticale sur la sonde à pression. Pour la station GIUB 3, on soustrait la distance entre la surface de l'eau et le radar à un point imaginaire à 5 mètres en-dessous du radar (environ 2 mètres sous le lit, comme marge pour l'érosion). On obtient ainsi un nuage de points dessiné dans le même sens que les autres stations. Pour la station GIUB 2, l'emplacement exacte de la sonde est localisé à l'aide d'un théodolite (la méthode exact de l'utilisation du théodolite est décrite dans l'annexe A7). La courbe de tarage indique donc le débit en fonction du niveau d'eau au-dessus de la mer.

Un protocole pour chaque mesure est disponible dans les annexes A4 et A5.

# 1. Courbe de tarage des 4 stations GIUB

#### STATION GIUB 1

| Date       | Hauteur de<br>l'eau | Methode  | Niveau | Débit<br>estimé | Note         |
|------------|---------------------|----------|--------|-----------------|--------------|
|            |                     |          | [cm]   | [m³/s]          |              |
| 26.08.2009 | Bas                 | Sel      | 12.22  | 0.07            | Bonne        |
| 26.08.2009 | Bas                 | Sel      | 12.61  | 0.05            | Bonne        |
| 21.09.2009 | Bas                 | Sel      | 10.77  | 0.03            | Bonne        |
| 21.09.2009 | Bas                 | Sel      | 10.75  | 0.03            | Bonne        |
| 02.11.2009 | Bas                 | Sel      | 18.94  | 0.19            | Bonne        |
| 19.05.2010 | Bas                 | Sel      | 18.67  | 0.33            | Bonne        |
| 12.10.2009 | Haut                | Sel      | 35.74  | 2.24            | Suffisante   |
| 12.10.2009 | Moyen               | Sel      | 33.72  | 1.97            | Suffisante   |
| 02.11.2009 | Bas                 | Sel      | 15.49  | 0.08            | Suffisante   |
| 19.05.2010 | Bas                 | Sel      | 18.69  | 0.33            | Suffisante   |
| 16.07.2009 | Bas                 | Moulinet | 0.00   | 0.00            | Insuffisante |
| 20.07.2009 | Bas                 | Moulinet | 18.82  | 0.00            | Insuffisante |
| 16.07.2009 | Bas                 | Sel      | 18.00  | 0.00            | Insuffisante |
| 18.07.2009 | Haut                | Sel      | 41.78  | 0.00            | Insuffisante |
| 20.07.2009 | Bas                 | Sel      | 18.82  | 0.00            | Insuffisante |

Tableau 14: Résultats des mesures ponctuelles du débit à la station GIUB 1, Südelgraben, Flühli.

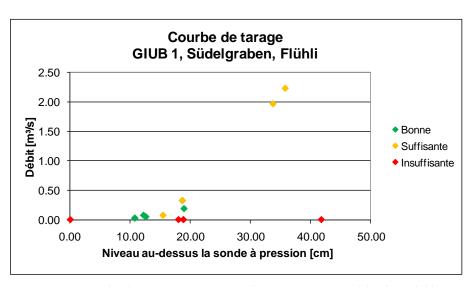


Figure 52 : Courbe de tarage provisoire pour la station GIUB 1, Südelgraben, Flühli.

Deux mesures du débit à l'aide du moulinet sont réalisées à la station GIUB 1. Les résultats ne sont pas concluants, car le lit est très irrégulier. De plus il a quelques gros blocs qui perturbent la mesure. Le débit varie sur la section transversale du cours d'eau ce qui rend le choix de l'hélice difficile.

Les mesures du débit par dilution au sel sont plus appropriées. Les mesures insuffisantes sont dues à un mauvais choix du chemin de mélange. En effet, environ 200 mètres en amont de la station le cours d'eau forme des petits lacs qui jouent le rôle de puits pour le traceur. Il est donc déconseillé d'incérer le sel depuis le pont en amont. Il est préférable de suivre la stratégie de mesure proposée (voir l'annexe A3). Le matériel utilisé pour les premières mesures n'était pas adapté aux conditions de terrain. Le coffret contenant l'ordinateur et le transformateur est sensible à l'eau et donc difficilement utilisable en cas de pluie (cas relativement fréquent en période de crue!). Les deux mesures du débit le plus élevé sont seulement « suffisantes » entre autre car le chemin de mélange est mal choisi. La dilution à l'uranine aurait peut-être amélioré le résultat.

#### **STATION GIUB 2**

|            | Hauteur de |         |        |        | Débit  |            |
|------------|------------|---------|--------|--------|--------|------------|
| Date       | l'eau      | Methode | Niveau | Niveau | estimé | Note       |
|            |            |         | [müM]  | [cm]   | [m³/s] |            |
| 02.06.2010 | Moyen      | Uranine | 725.56 | 58.99  | 15.20  | Bonne      |
| 02.06.2010 | Moyen      | Uranine | 725.52 | 55.12  | 13.00  | Bonne      |
| 07.06.2010 | Haut       | Uranine | 725.69 | 72.13  | 22.80  | Bonne      |
| 07.06.2010 | Haut       | Uranine | 725.75 | 78.33  | 29.30  | Suffisante |
| 26.08.2009 | Bas        | Sel     | 725.24 | 26.70  | 2.55   | Suffisante |
| 28.09.2009 | Bas        | Sel     | 725.18 | 21.07  | 1.05   | Suffisante |
| 28.09.2009 | Bas        | Sel     | 725.18 | 20.94  | 1.15   | Suffisante |
| 28.09.2009 | Bas        | Sel     | 725.18 | 21.06  | 1.40   | Suffisante |
| 28.09.2009 | Bas        | Sel     | 725.18 | 20.94  | 1.71   | Suffisante |
| 18.08.2009 | Bas        | Uranine | 725.23 | 25.56  | 3.47   | Suffisante |
| 18.08.2009 | Bas        | Uranine | 725.22 | 25.16  | 3.32   | Suffisante |
| 31.08.2009 | Bas        | Uranine | 725.20 | 22.82  | 2.78   | Suffisante |
| 16.11.2009 | Moyen      | Uranine | 725.51 | 54.07  | 9.58   | Suffisante |
| 24.11.2009 | Moyen      | Uranine | 725.55 | 58.17  | 14.08  | Suffisante |
| 12.10.2009 | Moyen      | Uranine | 725.53 | 55.66  | 12.52  | Suffisante |
| 29.07.2010 | Haut       | Uranine | 726.23 | 125.56 | 74.19  | Suffisante |

Tableau 15: Résultats des mesures ponctuelles du débit à la station GIUB 2, Kleine Emme, Schüpfheim.

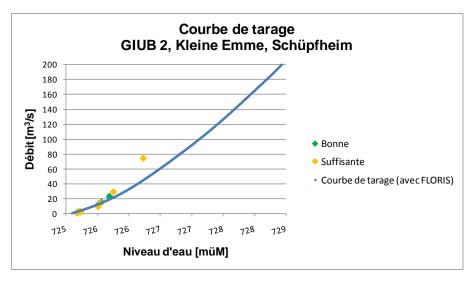


Figure 53: Courbe de tarage provisoire pour la station GIUB 2, Kleine Emme, Schüpfheim.

Pour la station GIUB 2, nous avons pratiqué la dilution au sel pour les petits débits et à l'uranine pour les débits plus grands. Pour quelques mesures, une des pompes a mal fonctionné. Etant donné que le résultat de l'autre côté du lit semblait plausible, ces mesures sont considérées comme suffisantes. Un autre problème rencontré est celui des affluents. En période de crue le terrain est souvent gorgé d'eau et s'il pleut, le ruissellement augmente et forme des affluents temporaires. Ces derniers peuvent fausser le résultats s'ils sont conséquents ou s'ils affluent trop proche de l'endroit de la mesure (diminution de la concentration de traceur, ce qui donne un débit plus élevé que la réalité).

Pour la station GIUB 2, un mandat a été donné à un bureau d'ingénieur zürichois, TK Consult, pour extrapoler la courbe de tarage aux grands débits. Ils ont appliqué le modèle FLORIS en utilisant nos résultats des mesures de débit pour le calage du modèle. Une courbe de tarage avec sa formule polynômiale nous est fournie :

$$y = -2.88*10^{-13} * x^6 + 2.00*10^{-10} * x^5 - 5.49*10^{-8} * x^4 + 7.65*10^{-6} * x^3 - 5.92*10^{-4} * x^2 + 4.09*$$

Avec:

x = le débit en [m<sup>3</sup>/s]

y = le niveau d'eau [müM]

Pour savoir à quel débit correspondent les niveaux d'eau enregistrés par les stations, nous avons recalculé la formule avec x le niveau d'eau [ms.m.] et y le débit [m³/s] (voir figure 53). Plus l'ordre est élevé plus le calcul doit être précis pour diminuer l'erreur. Le polynôme du 3<sup>ème</sup> ordre avec 15 chiffres après la virgule semble être une bonne approximation :

$$y = -1.26* x^3 + 2.79* 10^3 * x^2 - 2.01* 10^6 * x + 4.89* 10^8$$

Les deux mesures des débits les plus hauts ont été faites après l'extrapolation avec le programme FLORIS. On remarque sur le graphe (voir figure 53) que ces points se situent audessus de la courbe de tarage. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette courbe de tarage, établie par régression à la puissance 6, est basée sur très peu de points de mesure qui sont de surplus des mesures de faibles débits. Une fois que suffisamment de mesures de hauts débits seront réalisées, il sera nécessaire de recalculer la courbe de tarage avec le

programme pour avoir une meillleure base pour l'extrapolation. Il se peut également que le débit soit surestimé. La mesure du plus grand débit n'est jugée que « suffisante » car la pompe du côté droit a été bloquée par un morceau de bois (voir figure 54) et que de ce même côté les échantillons « START » et « STOP » contenaient de l'uranine, vraisemblablement par contamination (la personne qui a pris ces échantillons a également dissout l'uranine et l'a introduite dans le cours d'eau, les conditions météorologiques étaient très mauvaises ce qui complique les manoeuvres).

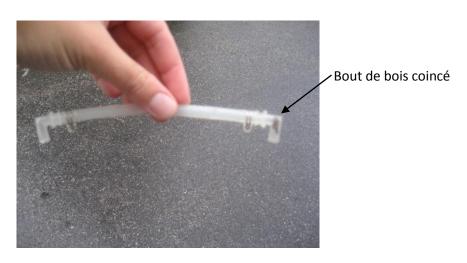


Figure 54: Bout de bois coincé dans le tuyau de la pompe.

# **STATION GIUB 3**

| Date       | Hauteur<br>d'eau | Methode | Niveau<br>enregistré | niveau d'un<br>point fixe<br>5m sous le<br>radar. | Débit<br>estimé | Note         |
|------------|------------------|---------|----------------------|---|-----------------|--------------|
|            |                  |         | mV                   |   | [m³/s]          |              |
| 19.05.2010 | Moyen            | Sel     | 3069.93              | 1930.07   | 1.46            | Bonne        |
| 19.05.2010 | Moyen            | Sel     | 3074.68              | 1925.32   | 1.45            | Bonne        |
| 28.09.2009 | Bas              | Sel     | 3193.48              | 1806.52   | 0.19            | Bonne        |
| 28.10.2009 | Bas              | Sel     | 3152.75              | 1847.25   | 0.48            | Bonne        |
| 12.10.2009 | Moyen            | Sel     | 3016.63              | 1983.37   | 4.58            | Suffisante   |
| 12.10.2009 | Moyen            | Sel     | 3007.47              | 1992.53   | 4.02            | Suffisante   |
| 24.11.2009 | Moyen            | Sel     | 3027.84              | 1972.17   | 4.20            | Suffisante   |
| 28.09.2009 | Bas              | Sel     | 3193.48              | 1806.52   | 0.00            | Insuffisante |
| 28.09.2009 | Bas              | Sel     | 3193.48              | 1806.52   | 0.00            | Insuffisante |

Tableau 16: Résultats des mesures ponctuelles du débit à la station GIUB 3, Grosse Entle, Gfelle.

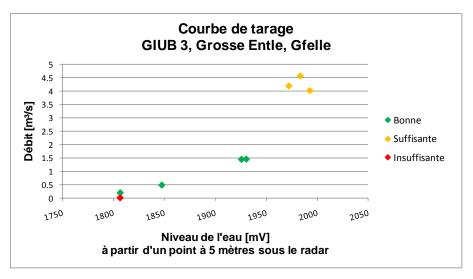


Figure 55: Courbe de tarage provisoire pour la station GIUB 3, Grosse Entle, Gfelle.

Il y a plusieurs possibilités d'introduction du traceur dans la Grosse Entle, ce qui facilite la méthode. Par contre quelques affluents, surtout lorsqu'il pleut perturbent la mesure. Le transport de matériel dans le lit peut également poser problème pour les instruments de mesure lors de débits supérieurs à 3-4 m³/s.

#### **STATION GIUB 4**

|            | Hauteur |          | Niveau | Débit  |              |
|------------|---------|----------|--------|--------|--------------|
| Date       | d'eau   | Methode  | d'eau  | estimé | Note         |
|            |         |          | [cm]   | [m³/s] |              |
| 20.08.2009 | Bas     | Sel      | 11.2   | 0.5    | Bonne        |
| 26.08.2009 | Bas     | Sel      | 12.8   | 0.6    | Bonne        |
| 23.09.2009 | Bas     | Sel      | 8.9    | 0.3    | Bonne        |
| 23.09.2009 | Bas     | Sel      | 8.9    | 0.3    | Bonne        |
| 02.11.2009 | Moyen   | Sel      | 17.6   | 1.1    | Bonne        |
| 02.11.2009 | Moyen   | Sel      | 16.2   | 1.0    | Suffisante   |
| 07.12.2009 | Haut    | Sel      | 46.4   | 0.0    | Insuffisante |
| 27.07.2009 | Bas     | Moulinet | 15.9   | 2.6    | Insuffisante |
| 20.08.2009 | Bas     | Moulinet | 11.7   | 1.0    | Insuffisante |
| 20.08.2009 | Bas     | Moulinet | 11.6   | 0.5    | Insuffisante |

Tableau 17: Résultats des mesures ponctuelles du débit à la station GIUB 4, Fontannen, Wolhusen.

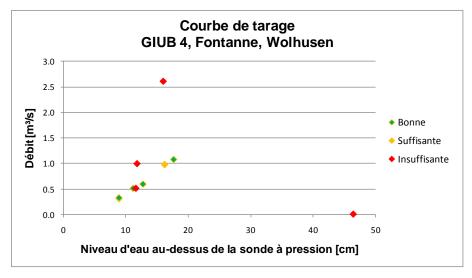


Figure 56: Courbe de tarage provisoire pour la station GIUB 4, Fontanne, Wolhusen.

La méthode de dilution au sel est bien adaptée au calibrage de la station GIUB 4 pour des débits relativement bas. Par contre, la dilution à l'uranine doit être appliquée à partir d'une certaine hauteur d'eau. Le transport de matériel et la portance de l'eau empêchent l'immersion des conductimètres. Les profils au moulinet fournissent des résultats peu plausibles. Le choix de l'hélise en est peut-être la cause.

# Partie 2 : L'analyse des Hydrogrammes de crue de la station de Werthenstein pour les 20 plus grandes crues de la période 1984-2008.

Une fiche technique (décrite dans le tableau 10) et un hydrogramme avec le débit de base et les précipitations sont élaborés pour les 20 plus grandes crues de la série partielle.

#### 2. DESCRIPTION DES 20 PLUS GRANDES CRUES

La crue du 21.08.2005 (1)

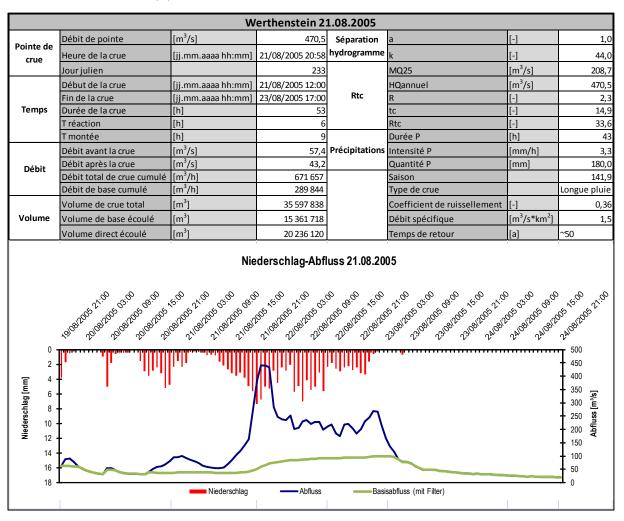


Figure 57: Fiche technique et hydrogramme de la crue du 21.08.2005. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

Bien que le temps de montée soit relativement rapide (ce qui tend vers un type "courte pluie") les précipitations ont duré plus d'un jour (presque 3). D'après la méthode de Diezig (2006), cela mène à une analyse détaillée. Le type "longue pluie" est déterminé pour cette crue.

Le procédé est relativement subjectif et les règles ne sont pas forcément adaptées pour chaque événement.

On observe un plateau après le pic à un débit d'environ 220 m³/s et d'une durée de plus de 24 heures.

#### La crue du 16.07.2002 (2)

|                                 | Débit de pointe            | [m <sup>3</sup> /s] | 390,38           | Séparation | a                            | [-]                 | 1,0          |  |  |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------|------------------|------------|------------------------------|---------------------|--------------|--|--|
| Pointe de<br>crue               | Heure de la crue           |                     | 16/07/2002 00:53 | •          | k                            | [-]                 | 44,(         |  |  |
| ciue                            | Jour julien                |                     | 197              |            | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 93,2         |  |  |
|                                 | Début de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 15/07/2002 18:00 |            | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 390,4        |  |  |
|                                 | Fin de la crue             | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 16/07/2002 16:00 | Rtc        | R                            | [-]                 | 4,2          |  |  |
| Temps                           | Durée de la crue           | [h]                 | 46               |            | tc                           | [-]                 | 14,9         |  |  |
|                                 | Tréaction                  | [h]                 | 1                |            | Rtc                          | [-]                 | 62,5         |  |  |
|                                 | T montée                   | [h]                 | 7                |            | Durée P                      | [h]                 | 8            |  |  |
|                                 | Débit avant la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 22,46            |            | Intensité P                  | [mm/h]              | 5,4          |  |  |
| Débit                           | Débit après la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 36,54            |            | Quantité P                   | [mm]                | 42,9         |  |  |
| Debit                           | Débit total de crue cumulé | [m <sup>3</sup> /h] | 184 119          |            | Saison                       |                     | été          |  |  |
|                                 | Débit de base cumulé       | [m <sup>3</sup> /h] | 54 120           |            | Type de crue                 |                     | Courte pluie |  |  |
|                                 | Volume de crue total       | [m <sup>3</sup> ]   | 8 469 463        |            | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 0,45         |  |  |
| Volume                          | Volume de base écoulé      | [m <sup>3</sup> ]   | 2 489 534        |            | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 1,3          |  |  |
|                                 | Volume direct écoulé       | [m <sup>3</sup> ]   | 5 979 929        |            | Temps de retour              | [a]                 | ~13          |  |  |
| Niederschlag-Abfluss 16.07.2002 |                            |                     |                  |            |                              |                     |              |  |  |

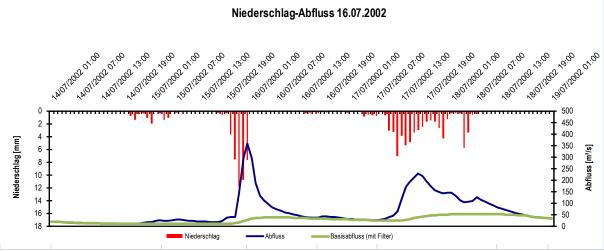


Figure 58: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 16.07.2002. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

La courbe de décrue se distingue de la courbe de tarissement, le débit baisse plus lentement à partir d'un certain moment. L'OFEV donne le type « longue pluie » pour cette crue (Helbling, et al., 2006). Il est possible que l'interpolation des précipitations ne représente pas la réalité.

| Werthenstein 08.08.2007                     |                            |                     |                     |                |                              |                     |              |  |  |
|---|----------------------------|---------------------|---------------------|----------------|------------------------------|---------------------|--------------|--|--|
|   | Débit de pointe            | [m <sup>3</sup> /s] | 349,7               | Séparation     | a                            | [-]                 | 1,0          |  |  |
| Pointe de<br>crue                           | Heure de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 08.08.2007 19:55:00 | hydrogramme    | k                            | [-]                 | 44,0         |  |  |
| ciue  | Jour julien                |                     | 220                 |                | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 119,0        |  |  |
|   | Début de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 07.08.2007 20:00:00 |                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 349,7        |  |  |
|   | Fin de la crue             | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 09.08.2007 20:00:00 | Rtc            | R                            | [-]                 | 2,9          |  |  |
| Temps                                       | Durée de la crue           | [h]                 | 48                  |                | tc                           | [-]                 | 14,9         |  |  |
|   | T réaction                 | [h]                 | 6                   |                | Rtc                          | [-]                 | 43,8         |  |  |
|   | T montée                   | [h]                 | 24                  |                | Durée P                      | [h]                 | 46           |  |  |
|   | Débit avant la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 9,14                | Précipitations | Intensité P                  | [mm/h]              | 2,3          |  |  |
| Débit                                       | Débit après la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 39,66               |                | Quantité P                   | [mm]                | 105,0        |  |  |
| Debit                                       | Débit total de crue cumulé | [m <sup>3</sup> /h] | 346 414             |                | Saison                       |                     | été          |  |  |
|   | Débit de base cumulé       | [m <sup>3</sup> /h] | 114 574             |                | Type de crue                 |                     | Longue pluie |  |  |
|   | Volume de crue total       | [m <sup>3</sup> ]   | 16 627 895          |                | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 0,34         |  |  |
| Volume                                      | Volume de base écoulé      | [m <sup>3</sup> ]   | 5 499 561           |                | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 1,1          |  |  |
|   | Volume direct écoulé       | [m <sup>3</sup> ]   | 11 128 334          |                | Temps de retour              | [a]                 | ~12          |  |  |
|   |                            |                     |                     |                |                              |                     |              |  |  |
| Time   10   10   10   10   10   10   10   1 |                            |                     |                     |                |                              |                     |              |  |  |

Figure 59: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 08.08.2007. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

Le procédé est relativement subjectif et les règles ne sont pas forcément adaptées pour chaque événement, il est possible qu'on ait dû dans ce cas choisir le début de la crue un jour après. Le temps de montée serait alors « rapide » voir « éclair ». On observe un plateau après le pic à un débit de environ 110 m³/s et d'une durée d'environ 12 heures.

# La crue du 12.06.1997 (4)

| Débit de base cumulé [m³/h] 106 587  Volume de crue total [m³] 7928 479  Volume de base écoulé [m³] 3 410 786  Volume direct écoulé [m³] 4 517 692  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997   | Werthenstein 12.06.1997 |  |  |  |                  |  |                                       |  |  |  |  |
|--|-------------------------|--|--|--|------------------|--|---------------------------------------|--|--|--|--|
| Heure de la crue   [jj.mm.aaaa hh:mm    12.06.1997   03:33:00   hydrogramme   k   [-]  |                         | Débit de pointe  | [m <sup>3</sup> /s]  | 330,7  | Séparation       | a  | [-]                                   | 1,0  |  |  |  |
|  |                         | Heure de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]   | 12.06.1997 03:33:00  | hydrogramme      | k  | [-]                                   | 44,0   |  |  |  |
| Début de la crue   [jj.mm.aaaa hh.mm]   11.06.1997   18:00:000   Rtc   Rtc   [-]   tc    | ciue                    | Jour julien  |  | 163  |                  | MQ25   | [m <sup>3</sup> /s]                   | 75,4   |  |  |  |
| Fin de la crue   (ijj.mm.aaaa hh:mm)   13.06.1997 02:00:00   Rtc   C   C   C   C   C   C   C   C   C   |                         | Début de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]   | 11.06.1997 18:00:00  | 1                | HQannuel   |                                       | 330,7  |  |  |  |
| Tréaction   [h]   3  |                         |  |  |  |                  |  |                                       | 4,4  |  |  |  |
| T montée   [h]   | Temps                   | Durée de la crue   | [h]  | 32   |                  | tc   | [-]                                   | 14,9   |  |  |  |
| Débit avant la crue [m³/s] 5,33 Précipitations Intensité P [mm/h] Quantité P [mm/h] Débit darès la crue [m³/s] 24,83 Débit total de crue cumulé [m³/h] 247.765 Débit total de crue cumulé [m³/h] 106,587 Volume de crue total [m³] 7.928.479 Volume de base écoulé [m³] 7.928.479 Volume de base écoulé [m³] 3.410.786 Débit spécifique [m³/s**km²] Temps de retour [a] Pébit spécifique [m³/s**km²] Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  |                         | T réaction   | [h]  | 3  |                  | Rtc  | [-]                                   | 65,4   |  |  |  |
| Débit après la crue [m³/s] 24,83 Débit total de crue cumulé [m³/h] 247 765 Débit de base cumulé [m³/h] 106 587  Volume de crue total [m³] 7 928 479 Volume de base écoulé [m³] 3 410 786 Volume direct écoulé [m³] 4 517 692  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997   |                         | T montée   | [h]  | 10   | -1               |  | [h]                                   | 14   |  |  |  |
| Débit total de crue cumulé [m³/h] 247 765 Débit de base cumulé [m³/h] 106 587  Volume de crue total [m³] 7928 479 Volume de base écoulé [m³] 3410 786 Volume direct écoulé [m³] 4517 692  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997   |                         | Débit avant la crue  |  | 5,33   | Précipitations   | Intensité P  | [mm/h]                                | 3,8  |  |  |  |
| Débit total de crue cumulé [m³/h] 247 765 Débit de base cumulé [m³/h] 106 587 Volume de crue total [m³] 7928 479 Volume de base écoulé [m³] 3 410 786 Volume direct écoulé [m³] 4 517 692  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  | Dáhit                   | Débit après la crue  | [m <sup>3</sup> /s]  | 24,83  |                  | Quantité P   | [mm]                                  | 53,8   |  |  |  |
| Volume de crue total [m³] 7928479 Volume de base écoulé [m³] 3410786 Volume direct écoulé [m³] 4517692  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997   | Debit                   | Débit total de crue cumulé   | • ' '  | 247 765  |                  | Saison   |                                       | Printemps  |  |  |  |
| Volume de base écoulé [m³] 3 410 786  Volume direct écoulé [m³] 4 517 692  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  |                         | Débit de base cumulé   | . , ,  | 106 587  |                  | Type de crue   |                                       | Courte pluie   |  |  |  |
| Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997    Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  |                         | Volume de crue total   | $[m^3]$  | 7 928 479  |                  | Coefficient de ruissellement   | [-]                                   | 0,27   |  |  |  |
| Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  Niederschlag-Abfluss 12.06.1997  | Volume                  | Volume de base écoulé  | [m <sup>3</sup> ]  | 3 410 786  |                  | Débit spécifique   | [m3/s*km2]                            | 1,1  |  |  |  |
| Tool lead the second of the second se |                         | Volume direct écoulé   | [m <sup>3</sup> ]  | 4 517 692  |                  | Temps de retour  | [a]                                   | ~11  |  |  |  |
| 2 - [Em 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4  |                         | John Pallo, Pall | 1,100 04,00 1,100 0,1100 0,1100 0,1100 0,1100 0,1100 0,1100 0,1100 0,1100 0,1100 0,1100 0,1100 0,1100 0,1100 0 | Se 12:00 dr. do 19:00 (19:00 ft. 19:00 ft. 19: | , 106,184, 57.60 | Light State of The | , 4061 981 16:00<br>11 1061 981 16:00 | 1,51061,081 04:00  |  |  |  |
| 14 16 18 Niederschlag — Abfluss — Basisabfluss (mit Filter)  | 2 4 6 8 10 12 14 16     | · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·  |  | alag — Abflus  |                  |  |                                       | 500<br>450<br>400<br>350<br>350<br>250<br>200<br>150<br>100<br>50<br>0 |  |  |  |

Figure 60: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 12.06.1997. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

La courbe de décrue se différencie de la courbe de tarissement.

## La crue du 29.07.2008 (5)

|   |   | \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ | Werthenstein 29     | .07.2008       |                              |                     |  |  |  |  |
|---|---|---------------------------------------|---------------------|----------------|------------------------------|---------------------|--|--|--|--|
|   | Débit de pointe                         | [m <sup>3</sup> /s]                   | 269,8               | Séparation     | a                            | [-]                 | 1,0  |  |  |  |
| Pointe de<br>crue                               | Heure de la crue                        | [jj.mm.aaaa hh:mm]                    | 29.07.2008 07:05:00 | hydrogramme    | k                            | [-]                 | 44,0   |  |  |  |
| ciue  | Jour julien                             |                                       | 210                 |                | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 68,6   |  |  |  |
|   | Début de la crue                        | [jj.mm.aaaa hh:mm]                    | 28.07.2008 17:00:00 |                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 269,8  |  |  |  |
|   | Fin de la crue                          | [jj.mm.aaaa hh:mm]                    | 30.07.2008 22:00:00 | Rtc            | R                            | [-]                 | 3,9  |  |  |  |
| Temps   | Durée de la crue                        | [h]                                   | 53                  |                | tc                           | [-]                 | 14,9   |  |  |  |
|   | T réaction                              | [h]                                   | 1                   |                | Rtc                          | [-]                 | 58,6   |  |  |  |
|   | T montée                                | [h]                                   | 14                  |                | Durée P                      | [h]                 | 15   |  |  |  |
|   | Débit avant la crue                     | [m <sup>3</sup> /s]                   | 7,12                | Précipitations | Intensité P                  | [mm/h]              | 0,7  |  |  |  |
| Débit   | Débit après la crue                     | [m <sup>3</sup> /s]                   | 20,86               |                | Quantité P                   | [mm]                | 10,8   |  |  |  |
| Debit   | Débit total de crue cumulé              |                                       | 126 411             |                | Saison                       |                     | été  |  |  |  |
|   | Débit de base cumulé                    | [m <sup>3</sup> /h]                   | 33 124              |                | Type de crue                 |                     | Averse   |  |  |  |
|   | Volume de crue total                    | [m <sup>3</sup> ]                     | 6 699 809           |                | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 1,5  |  |  |  |
| Volume  | Volume de base écoulé                   | [m <sup>3</sup> ]                     | 1 755 596           |                | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 0,9  |  |  |  |
|   | Volume direct écoulé                    | [m <sup>3</sup> ]                     | 4 944 213           |                | Temps de retour              | [a]                 | ~5   |  |  |  |
| ć   |   |                                       |                     |                |                              |                     |  |  |  |  |
|   |   |                                       |                     |                |                              |                     |  |  |  |  |
| 0 2 - Niederschlag [mm] 8 - 0 10 - 12 - 14 - 14 | Y V V V V V V V V V V V V V V V V V V V | Nieder                                | <u></u>             |                | abfluss (mit Filter)         |                     | 500<br>450<br>400<br>350 250<br>200 450<br>150<br>100<br>50<br>0 |  |  |  |

Figure 61: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 29.07.2008. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

La valeur du coefficient de ruissellement est très élevée, on peut en conclure qu'une partie des précipitations n'a pas été mesurée correctement. Elles sont sous-estimées. Il se peut que l'écoulement soit engendré par un orage local, qui n'a pas été mesuré par les pluviomètres. Le type « averse » est alors bien adapté.

## La crue du 02.06.2004 (6)

| Werthenstein 02.06.2004   |  |  |                   |   |                              |  |              |  |  |  |
|---|--|--|-------------------|---|------------------------------|--|--------------|--|--|--|
|   | Débit de pointe  | [m <sup>3</sup> /s]                                | 266,0             | Séparation  | a                            | [-]                                      | 1,0          |  |  |  |
| Pointe de<br>crue   | Heure de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]                                 | 02.06.2004 01:35: | hydrogramme   | k                            | [-]                                      | 44,0         |  |  |  |
| crue  | Jour julien  | <i>-</i>   | 154               |   | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s]                      | 106,4        |  |  |  |
|   | Début de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]                                 | 01.06.2004 12:00: |   | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s]                      | 226,1        |  |  |  |
|   | Fin de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]                                 | 04.06.2004 13:00: | Rtc   | R                            | [-]                                      | 2,1          |  |  |  |
| Temps   | Durée de la crue   | [h]  | 73                |   | tc                           | [-]                                      | 14,9         |  |  |  |
|   | Tréaction  | [h]  | 5                 |   | Rtc                          | [-]                                      | 31,7         |  |  |  |
|   | T montée   | [h]  | 14                |   | Durée P                      | [h]                                      | 68           |  |  |  |
|   | Débit avant la crue  | [m <sup>3</sup> /s]                                | 12,34             | Précipitations  | Intensité P                  | [mm/h]                                   | 2,1          |  |  |  |
| Débit   | Débit après la crue  | [m <sup>3</sup> /s]                                | 46,43             |   | Quantité P                   | [mm]                                     | 145,8        |  |  |  |
| Debit   | Débit total de crue cumulé   |  | 250 240           |   | Saison                       |  | été          |  |  |  |
|   | Débit de base cumulé   | [m <sup>3</sup> /h]                                | 78 695            |   | Type de crue                 |  | Longue pluie |  |  |  |
|   | Volume de crue total   | [m <sup>3</sup> ]                                  | 18 267 487        |   | Coefficient de ruissellement | [-]                                      | 0,28         |  |  |  |
| Volume  | Volume de base écoulé  | [m <sup>3</sup> ]                                  | 5 744 765         |   | Débit spécifique             | [m3/s*km2]                               | 0,9          |  |  |  |
|   | Volume direct écoulé   | [m <sup>3</sup> ]                                  | 12 522 722        |   | Temps de retour              | [a]                                      | ~2           |  |  |  |
| 3705.   | 0.10 POOL 10 P | 0706-204 07:00<br>0708-204 07:00<br>0708-204 73:00 | 0;                | 0206, <sup>4</sup> <sup>7</sup> 3:00<br>0306, 2004<br>0306, 2004<br>0306, 2004<br>07. |                              | 0:00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 | 0506-5004    |  |  |  |
| Solution   Solution |  |  |                   |   |                              |  |              |  |  |  |

Figure 62: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 02.06.2004. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

On observe un plateau après le pic à un débit de environ 70 m³/s et d'une durée d'environ 10 heures puis plusieurs pics jusqu'à un débit de 194.94 m³/s.

# La crue du 02.08.1996 (7)

|   |                                      | W  | erthenstein 0                        | 2.08.1996                               |  |                     |                  |  |  |
|---|--------------------------------------|--|--------------------------------------|---|--|---------------------|------------------|--|--|
|   | Débit de pointe                      | [m <sup>3</sup> /s]  | 227,31                               | Séparation                              | a  | [-]                 | 1,0              |  |  |
| Pointe de<br>crue   | Heure de la crue                     | [jj.mm.aaaa hh:mm]   | 02.08.1996 18:43:                    | hydrogramme                             | k  | [-]                 | 44,0             |  |  |
| crue  | Jour julien                          | 3,   | 214                                  |   | MQ25                                       | [m <sup>3</sup> /s] | 56,4             |  |  |
|   | Début de la crue                     | [jj.mm.aaaa hh:mm]   | 02.08.1996 14:00:                    |   | HQannuel                                   | [m <sup>3</sup> /s] | 227,3            |  |  |
|   | Fin de la crue                       | [jj.mm.aaaa hh:mm]   | 04.08.1996 02:00:                    | Rtc                                     | R  | [-]                 | 4,0              |  |  |
| Temps   | Durée de la crue                     | [h]  | 36                                   |   | tc   | [-]                 | 14,9             |  |  |
|   | T réaction                           | [h]  | -1                                   |   | Rtc  | [-]                 | 60,0             |  |  |
|   | T montée                             | [h]  | 5                                    |   | Durée P                                    | [h]                 | 14               |  |  |
|   | Débit avant la crue                  | [m <sup>3</sup> /s]  | 3,29                                 | Précipitations                          | Intensité P                                | [mm/h]              | 2,2              |  |  |
| Débit   | Débit après la crue                  | [m <sup>3</sup> /s]  | 18,01                                |   | Quantité P                                 | [mm]                | 31,2             |  |  |
| Debit   | Débit total de crue cumulé           |  | 196 648                              |   | Saison                                     |                     | été              |  |  |
|   | Débit de base cumulé                 | [m <sup>3</sup> /h]  | 65 102                               |   | Type de crue                               |                     | Courte pluie     |  |  |
|   | Volume de crue total                 | [m <sup>3</sup> ]  | 7 079 324                            |   | Coefficient de ruissellement               | [-]                 | 0,49             |  |  |
| Volume  | Volume de base écoulé                | [m <sup>3</sup> ]  | 2 343 681                            |   | Débit spécifique                           | [m3/s*km2]          | 0,7              |  |  |
|   | Volume direct écoulé                 | [m <sup>3</sup> ]  | 4 735 643                            |   | Temps de retour                            | [a]                 | ~2.5             |  |  |
|   | 311011688 1910 01108 01108 01108 011 | 31.0° 1910 01/09 1910 01/09 11 | Oligh Gligh Gligh<br>Bac 12:00 18:00 | Sold Sold Sold Sold Sold Sold Sold Sold | "Manda and and and and and and and and and | Play Play Charles   | OF108/1998 19:00 |  |  |
| Niederschlag [mm] Niederschlag [mm] Niederschlag [mm] 10 - 12 - | 4                                    |  |                                      |   |  |                     |                  |  |  |
|   |                                      | Niederschlag   | Abflus                               |   | Basisabfluss (mit Filter)                  |                     |                  |  |  |

Figure 63: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 02.08.1996. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

Il est possible de délimiter la courbe de décrue et la courbe de tarissement. Un deuxième pic bien plus petit arrive à 15:00 (20h après) avec un débit max de 56.05 m³/s.

#### La crue du 13.01.2004 (8)

|   | Werthenstein 13.01.2004    |                     |                   |  |                              |  |              |  |  |  |
|---|----------------------------|---------------------|-------------------|--|------------------------------|--|--------------|--|--|--|
|   | Débit de pointe            | [m <sup>3</sup> /s] | 226,07            | Séparation                               | a                            | [-]  | 1,0          |  |  |  |
| Pointe de<br>crue   | Heure de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 13.01.2004 16:25: | hydrogramme                              | k                            | [-]  | 44,0         |  |  |  |
| ciue  | Jour julien                |                     | 13                |  | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s]                        | 122,1        |  |  |  |
|   | Début de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 11.01.2004 16:00: |  | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s]                        | 226,1        |  |  |  |
|   | Fin de la crue             | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 14.01.2004 16:00: | Rtc                                      | R                            | [-]  | 1,9          |  |  |  |
| Temps   | Durée de la crue           | [h]                 | 72                |  | tc                           | [-]  | 14,9         |  |  |  |
|   | Tréaction                  | [h]                 | 3                 |  | Rtc                          | [-]  | 27,6         |  |  |  |
|   | T montée                   | [h]                 | 48                |  | Durée P                      | [h]  | 66           |  |  |  |
|   | Débit avant la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 11,27             | Précipitations                           | Intensité P                  | [mm/h]                                     | 1,3          |  |  |  |
| Débit   | Débit après la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 45,46             |  | Quantité P                   | [mm]                                       | 88,1         |  |  |  |
| Debit   | Débit total de crue cumulé |                     | 310 673           |  | Saison                       |  | Hiver        |  |  |  |
|   | Débit de base cumulé       | [m <sup>3</sup> /h] | 118 467           |  | Type de crue                 |  | Longue pluie |  |  |  |
|   | Volume de crue total       | [m <sup>3</sup> ]   | 22 368 426        |  | Coefficient de ruissellement |  | 0,51         |  |  |  |
| Volume  | Volume de base écoulé      | [m <sup>3</sup> ]   | 8 529 590         |  | Débit spécifique             | [m3/s*km2]                                 | 0,7          |  |  |  |
|   | Volume direct écoulé       | [m <sup>3</sup> ]   | 13 838 837        |  | Temps de retour              | [a]  | ~2.5         |  |  |  |
|   |                            |                     |                   | 0; 60; 60; 60; 60; 60; 60; 60; 60; 60; 6 |                              | 0.5 00,000,000,000,000,000,000,000,000,000 |              |  |  |  |
| 0 2 450 450 400 350 500 100 100 150 100 100 50 0 0 100 10 |                            |                     |                   |  |                              |  |              |  |  |  |

Figure 64: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 13.01.2004. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

La crue du 13.01.2004 est la plus grande crue arrivée en hiver de la série. Le type « pluie sur neige + longue pluie » serait aussi possible, car avant le pic on observe pendant presque 2 jours un plateau. Des maximums relatifs sont visibles sur ce plateau en soirée ce qui pourrait être le signe de la fonte de la neige. Etant donné que nous n'avons pas les informations concernant la couverture neigeuse pour cette date, le type de crue approprié est « longue pluie ».

## La crue du 14.07.2008 (9)

|  |                            | W                   | erthenstein 1     | 4.07.2008      |                              |                     |              |  |  |  |  |
|--|----------------------------|---------------------|-------------------|----------------|------------------------------|---------------------|--------------|--|--|--|--|
|  | Débit de pointe            | [m <sup>3</sup> /s] | 220,8             | Séparation     | a                            | [-]                 | 1,0          |  |  |  |  |
| Pointe de<br>crue  | Heure de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 14.07.2008 08:15: | hydrogramme    | k                            | [-]                 | 44,0         |  |  |  |  |
| crue   | Jour julien                | 3,                  | 195               |                | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 121,9        |  |  |  |  |
|  | Début de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 13.07.2008 20:00: |                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 269,8        |  |  |  |  |
|  | Fin de la crue             | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 15.07.2008 00:00: | Rtc            | R                            | [-]                 | 2,2          |  |  |  |  |
| Temps  | Durée de la crue           | [h]                 | 28                |                | tc                           | [-]                 | 14,9         |  |  |  |  |
|  | T réaction                 | [h]                 | 3                 |                | Rtc                          | [-]                 | 33,0         |  |  |  |  |
|  | T montée                   | [h]                 | 12                |                | Durée P                      | [h]                 | 24           |  |  |  |  |
|  | Débit avant la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 27,8              | Précipitations | Intensité P                  | [mm/h]              | 2,2          |  |  |  |  |
| Débit  | Débit après la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 42,53             |                | Quantité P                   | [mm]                | 52,1         |  |  |  |  |
| Debit  | Débit total de crue cumulé |                     | 416 566           |                | Saison                       |                     | été          |  |  |  |  |
|  | Débit de base cumulé       | [m <sup>3</sup> /h] | 129 178           |                | Type de crue                 |                     | Longue pluie |  |  |  |  |
|  | Volume de crue total       | [m <sup>3</sup> ]   | 11 663 849        |                | Coefficient de ruissellement |                     | 0,50         |  |  |  |  |
| Volume   | Volume de base écoulé      | $[m^3]$             | 3 616 975         |                | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 0,7          |  |  |  |  |
|  | Volume direct écoulé       | [m <sup>3</sup> ]   | 8 046 874         |                | Temps de retour              | [a]                 | ~2.5         |  |  |  |  |
| Niederschlag [mm]  10  10  10  10  10  10  10  10  10  1 |                            |                     |                   |                |                              |                     |              |  |  |  |  |
| 12   |                            |                     |                   |                |                              |                     |              |  |  |  |  |

Figure 65: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 14.07.2008. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

D'après le critère du minimum relatif à 2/3 du petit pic, la crue commencerait presque deux jours plus tôt. Visuellement, il semble plus juste de commencer après les deux petites pointes.

# La crue du 06.08.2000 (10)

|   |                                 | w  | erthenstein 0                                  | 6.08.2000           |  |                     |               |  |
|---|---------------------------------|--|--|---------------------|--|---------------------|---------------|--|
|   | Débit de pointe                 | [m <sup>3</sup> /s]  | 218,23   | Séparation          | a  | [-]                 | 1,0           |  |
| Pointe de<br>crue   | Heure de la crue                | [jj.mm.aaaa hh:mm]   | 06.08.2000 04:13:                              | hydrogramme         | k  | [-]                 | 44,0          |  |
| crue  | Jour julien                     |  | 218  |                     | MQ25   | [m <sup>3</sup> /s] | 90,7          |  |
|   | Début de la crue                | [jj.mm.aaaa hh:mm]   |  |                     | HQannuel                                     | [m <sup>3</sup> /s] | 218,2         |  |
|   | Fin de la crue                  |  | 07.08.2000 14:00:                              | Rtc                 | R  | [-]                 | 2,4           |  |
| Temps   | Durée de la crue                | [h]  | 54   |                     | tc   | [-]                 | 14,9          |  |
|   | Tréaction                       | [h]  | 3  |                     | Rtc  | [-]                 | 35,9          |  |
|   | T montée                        | [h]  | 20   |                     | Durée P                                      | [h]                 | 43            |  |
|   | Débit avant la crue             | [m <sup>3</sup> /s]  | 10,52  | Précipitations      | Intensité P                                  | [mm/h]              | 1,5           |  |
| Débit   | Débit après la crue             | [m <sup>3</sup> /s]  | 25   |                     | Quantité P                                   | [mm]                | 62,5          |  |
| Debit   | Débit total de crue cumulé      | [m <sup>3</sup> /h]  | 237 226  |                     | Saison                                       |                     | Eté           |  |
|   | Débit de base cumulé            | [m <sup>3</sup> /h]  | 94 309   |                     | Type de crue                                 |                     | Longue pluie  |  |
|   | Volume de crue total            | $[m^3]$  | 12 810 183                                     |                     | Coefficient de ruissellement                 | [-]                 | 0,40          |  |
| Volume  | Volume de base écoulé           | [m <sup>3</sup> ]  | 5 092 662                                      |                     | Débit spécifique                             | [m3/s*km2]          | 0,7           |  |
|   | Volume direct écoulé            | [m³]   | 7 717 522                                      |                     | Temps de retour                              | [a]                 | ~2.5          |  |
|   | anestar anestar need anestar to | Broad of the graph | de sign de | po reign of the top | allegue ollegue ollegue elegue elegue elegue | Blog Land Blog Le   | ologizgo ario |  |
| Solution   Solution |                                 |  |  |                     |  |                     |               |  |
| 10 <b>-</b><br>12 <b>-</b>  |                                 | ل  |  |                     |  |                     | 100<br>50     |  |

Figure 66: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 06.08.2000. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

On observe un plateau avant le pic avec un débit de 50 m³/s environ sur une durée de 13 heures environ.

# La crue du 21.07.2007 (11)

|  |                            | w                   | erthenstein 2  | 1.07.2007        |                              |                     |              |
|--|----------------------------|---------------------|--|------------------|------------------------------|---------------------|--------------|
|  | Débit de pointe            | [m <sup>3</sup> /s] | 215,2  | Séparation       | a                            | [-]                 | 1,0          |
| Pointe de<br>crue                              | Heure de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 21.07.2007 21:55:  | hydrogramme      | k                            | [-]                 | 44,0         |
| ciue   | Jour julien                | ,                   | 202  |                  | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 68,5         |
|  | Début de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 21.07.2007 15:00:  | 1                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 349,7        |
|  | Fin de la crue             | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 22.07.2007 13:00:  |                  | R                            | [-]                 | 5,1          |
| Temps  | Durée de la crue           | [h]                 | 22   |                  | tc                           | [-]                 | 14,9         |
|  | T réaction                 | [h]                 | 0-1  |                  | Rtc                          | [-]                 | 76,2         |
|  | T montée                   | [h]                 | 7  |                  | Durée P                      | [h]                 | 11           |
|  | Débit avant la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 11,83  | Précipitations   | Intensité P                  | [mm/h]              | 3,4          |
| Débit  | Débit après la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 26,2   |                  | Quantité P                   | [mm]                | 37,9         |
| Debit  | Débit total de crue cumulé | [m <sup>3</sup> /h] | 283 428  |                  | Saison                       |                     | été          |
|  | Débit de base cumulé       | [m <sup>3</sup> /h] | 87 310   |                  | Type de crue                 |                     | Courte pluie |
|  | Volume de crue total       | $[m^3]$             | 6 235 426  |                  | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 0,37         |
| Volume   | Volume de base écoulé      | [m <sup>3</sup> ]   | 1 920 827  |                  | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 0,7          |
|  | Volume direct écoulé       | [m³]                | 4 314 598  |                  | Temps de retour              | [a]                 | ~2.5         |
|  |                            |                     | e si de de la companya de la company | of spinor spinor |                              | of spirit spirit    |              |
| Niederschlag Abfluss Basisabfluss (mit Filter) |                            |                     |  |                  |                              |                     |              |

Figure 67: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 21.07.2007. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

La courbe de tarissement se distingue de la courbe de décrue. Un plateau de quelques heures a lieu avant le pic.

#### La crue du 21.07.1992 (12)

| Werthenstein 21.07.1992  |                            |                     |                   |                |                              |  |  |  |  |  |
|--|----------------------------|---------------------|-------------------|----------------|------------------------------|--|--|--|--|--|
|  | Débit de pointe            | [m <sup>3</sup> /s] | 212,85            | Séparation     | a                            | [-]                                      | 1,0  |  |  |  |
| Pointe de<br>crue  | Heure de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 21.07.1992 19:03: | hydrogramme    | k                            | [-]                                      | 44,0   |  |  |  |
| ciue   | Jour julien                | ,                   | 202               |                | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s]                      | 46,1   |  |  |  |
|  | Début de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 21.07.1992 16:00: |                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s]                      | 212,9  |  |  |  |
|  | Fin de la crue             | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 23.07.1992 18:00: | Rtc            | R                            | [-]                                      | 4,6  |  |  |  |
| Temps  | Durée de la crue           | [h]                 | 50                |                | tc                           | [-]                                      | 14,9   |  |  |  |
|  | T réaction                 | [m <sup>3</sup> /s] | 0                 |                | Rtc                          | [-]                                      | 68,8   |  |  |  |
|  | T montée                   | [h]                 | 3                 |                | Durée P                      | [h]                                      | 27   |  |  |  |
|  | Débit avant la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 6,21              | Précipitations | Intensité P                  | [mm/h]                                   | 2,8  |  |  |  |
| Débit  | Débit après la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 20,24             | -1             | Quantité P                   | [mm]                                     | 74,9   |  |  |  |
| Debit  | Débit total de crue cumulé | [m <sup>3</sup> /h] | 202 806           |                | Saison                       |  | été  |  |  |  |
|  | Débit de base cumulé       | [m <sup>3</sup> /h] | 77 020            |                | Type de crue                 |  | Averse   |  |  |  |
|  | Volume de crue total       | [m <sup>3</sup> ]   | 10 140 311        |                | Coefficient de ruissellement | [-]                                      | 0,27   |  |  |  |
| Volume   | Volume de base écoulé      | [m <sup>3</sup> ]   | 3 850 994         |                | Débit spécifique             | [m3/s*km2]                               | 0,7  |  |  |  |
|  | Volume direct écoulé       | [m <sup>3</sup> ]   | 6 289 316         |                | Temps de retour              | [a]                                      | ~2.5   |  |  |  |
|  |                            |                     |                   | Agin Agings    |                              | O. O | 0; de 10; |  |  |  |
| 0 2 4 4 4 0 400 350 [s] 2 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 |                            |                     |                   |                |                              |  |  |  |  |  |

Figure 68: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 21.07.1992. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

On observe un plateau après le pic à un débit d'environ 50 m³/s et d'une durée d'environ 9 heures puis un deuxième pic avec un débit de pointe de 112.6 m³/s. Selon les critères de Diezig, les précipitations durant plus d'un jour s'orientent vers le type « longue pluie ». Dans ce cas, la forte intensité des précipitations dans la première phase de l'événement (celle du pic) nous permet d'admettre un type « averse ». C'est d'ailleurs aussi l'attribution qu'a donné l'OFEV (Helbling, et al., 2006).

# La crue du 19.12.1987 (13)

| Werthenstein 19.12.1987  |                       |                     |                   |             |                              |  |                 |  |  |  |
|--|-----------------------|---------------------|-------------------|-------------|------------------------------|--|-----------------|--|--|--|
| Dainta di  | Débit de pointe       | [m <sup>3</sup> /s] | 203,3             | Séparation  | a                            | [-]                                      | 1,0             |  |  |  |
| Pointe de<br>crue  | Heure de la crue      | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 19.12.1987 05:31: | hydrogramme | k                            | [-]                                      | 44,0            |  |  |  |
| ciue   | Jour julien           |                     | 353               |             | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s]                      | 73,5            |  |  |  |
|  | Début de la crue      | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 17.12.1987 18:00: |             | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s]                      | 203,3           |  |  |  |
|  | Fin de la crue        | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 20.12.1987 10:00: | Rtc         | R                            | [-]                                      | 2,8             |  |  |  |
| Temps  | Durée de la crue      | [h]                 | 64                |             | tc                           | [-]                                      | 14,9            |  |  |  |
|  | T réaction            | [h]                 | 1                 |             | Rtc                          | [-]                                      | 41,2            |  |  |  |
|  | T montée              | [h]                 | 36                | ł           | Durée P                      | [h]                                      | 44              |  |  |  |
| Débit avant la crue [m³/s] 15,94 Précipitations Intensité P [mm/h] |                       |                     |                   |             |                              |  |                 |  |  |  |
| Débit après la crue [m³/s] 25,59 Quantité P [mm]                   |                       |                     |                   |             |                              |  |                 |  |  |  |
| Débit total de crue cumulé [m³/h] 186 410 Saison été               |                       |                     |                   |             |                              |  |                 |  |  |  |
|  | Débit de base cumulé  | [m <sup>3</sup> /h] | 82 210            |             | Type de crue                 |  | Pluie sur neige |  |  |  |
|  | Volume de crue total  | [m <sup>3</sup> ]   | 11 930 240        |             | Coefficient de ruissellement | [-]                                      | 0,55            |  |  |  |
| Volume   | Volume de base écoulé | [m <sup>3</sup> ]   | 5 261 451         |             | Débit spécifique             | [m3/s*km2]                               | 0,7             |  |  |  |
|  | Volume direct écoulé  | $[m^3]$             | 6 668 789         |             | Temps de retour              | [a]                                      | 2               |  |  |  |
|  |                       |                     |                   |             |                              | 21/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 |                 |  |  |  |
| 0 1 450 4400 350 (s/c) 1 300 1 100 100 100 100 100 100 100 100     |                       |                     |                   |             |                              |  |                 |  |  |  |

Figure 69: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 19.12.1987. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

On observe un plateau après le pic à un débit d'environ 90 m³/s et d'une durée d'environ 6 heures. Le long plateau avant le pic est dû à la fonte des neiges.

#### La crue du 11.08.2002 (14)

| Werthenstein 11.08.2002  |   |                     |                   |                |                              |                     |              |  |
|--|---|---------------------|-------------------|----------------|------------------------------|---------------------|--------------|--|
|  | Débit de pointe   | [m <sup>3</sup> /s] | 203,1             | Séparation     | a                            | [-]                 | 1,0          |  |
| Pointe de<br>crue  | Heure de la crue  | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 11.08.2002 20:13: | hydrogramme    | k                            | [-]                 | 44,0         |  |
| ciue   | Jour julien   |                     | 223               |                | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 135,9        |  |
|  | Début de la crue  | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 10.08.2002 09:00: |                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 390,4        |  |
|  | Fin de la crue  | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 12.08.2002 15:00: | Rtc            | R                            | [-]                 | 2,9          |  |
| Temps  | Durée de la crue  | [h]                 | 54                |                | tc                           | [-]                 | 14,9         |  |
|  | T réaction  | [h]                 | 2                 |                | Rtc                          | [-]                 | 42,8         |  |
|  | T montée  | [h]                 | 33                |                | Durée P                      | [h]                 | 48           |  |
|  | Débit avant la crue   | [m <sup>3</sup> /s] | 17,6              | Précipitations | Intensité P                  | [mm/h]              | 1,7          |  |
| Débit  | Débit après la crue   | [m <sup>3</sup> /s] | 49,1              |                | Quantité P                   | [mm]                | 83,7         |  |
| Debit  | Débit total de crue cumulé  | [m <sup>3</sup> /h] | 262 179           |                | Saison                       |                     | été          |  |
|  | Débit de base cumulé  | [m <sup>3</sup> /h] | 100 710           |                | Type de crue                 |                     | Longue pluie |  |
|  | Volume de crue total  | [m <sup>3</sup> ]   | 14 157 653        |                | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 0,33         |  |
| Volume   | Volume de base écoulé   | [m <sup>3</sup> ]   | 5 438 344         |                | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 0,7          |  |
|  | Volume direct écoulé  | [m <sup>3</sup> ]   | 8 719 309         |                | Temps de retour              | [a]                 | 2            |  |
| Niederschlag-Abfluss 11.08.2002                                      |   |                     |                   |                |                              |                     |              |  |
| 0 1 2 3 4 5 7 7 7 10 11 12 13 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 | 1 2 450 4400 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 4350 4400 440 |                     |                   |                |                              |                     |              |  |

Figure 70: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 11.08.2002. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

Selon le critère comme quoi le débit doit redescendre de 2/3 de sa valeur après le petit pic, il faudrait distinguer les deux événements. La marge est faible et par rapport aux précipitations, il semble plus correct de prendre les deux bosses dans un seul événement.

#### La crue du 25.05.1990 (15)

| Werthenstein 25.05.1990                 |  |                     |                   |                |                              |                     |              |  |
|---|--|---------------------|-------------------|----------------|------------------------------|---------------------|--------------|--|
|   | Débit de pointe  | [m <sup>3</sup> /s] | 202,9             | Séparation     | a                            | [-]                 | 1,0          |  |
| Pointe de<br>crue                       | Heure de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 25.05.1990 10:01: | hydrogramme    | k                            | [-]                 | 44,0         |  |
| ciue                                    | Jour julien  | ,                   | 145               |                | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 81,6         |  |
|   | Début de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 24.05.1990 21:00: |                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 202,9        |  |
|   | Fin de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 26.05.1990 16:00: | Rtc            | R                            | [-]                 | 2,5          |  |
| Temps                                   | Durée de la crue   | [h]                 | 43                |                | tc                           | [-]                 | 14,9         |  |
|   | T réaction   | [h]                 | 2                 |                | Rtc                          | [-]                 | 37,1         |  |
|   | T montée   | [h]                 | 13                |                | Durée P                      | [h]                 | 16           |  |
|   | Débit avant la crue  | [m <sup>3</sup> /s] | 9,82              | Précipitations | Intensité P                  | [mm/h]              | 3,2          |  |
| Débit                                   | Débit après la crue  | [m <sup>3</sup> /s] | 21,41             |                | Quantité P                   | [mm]                | 51,0         |  |
| Desit                                   | Débit total de crue cumulé                                 | [m <sup>3</sup> /h] | 216 945           |                | Saison                       |                     | Printemps    |  |
|   | Débit de base cumulé                                       | [m <sup>3</sup> /h] | 81 437            |                | Type de crue                 |                     | Courte pluie |  |
|   | Volume de crue total                                       | [m <sup>3</sup> ]   | 9 328 632         |                | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 0,37         |  |
| Volume                                  | Volume de base écoulé                                      | [m <sup>3</sup> ]   | 3 501 801         |                | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 0,7          |  |
|   | Volume direct écoulé                                       | [m <sup>3</sup> ]   | 5 826 831         |                | Temps de retour              | [a]                 | 2            |  |
| Niederschlag-Abfluss 25.05.1990         |  |                     |                   |                |                              |                     |              |  |
| 0 1 2 3 4 5 6 7 8 8 9 10 11 12 12 13 14 | 2 400 400 400 350 8 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 |                     |                   |                |                              |                     |              |  |

Figure 71: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 25.05.1990. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

On observe un plateau avant le pic à un débit d'environ 40 m³/s et d'une durée d'environ 8 heures. Ce plateau est certainement dû à la première vague de précipitations. Selon les critères de Diezig (2006), nous avons un événement « courte pluie » car les précipitations ne dépassent pas une journée. L'OFEV (Helbling, et al., 2006) donne le type « longue pluie ». Cette différence dépend des critères choisis.

# La crue du 19.05.1994 (16)

| Werthenstein 19.05.1994   |                            |                     |                   |                |                              |                     |              |  |  |
|---|----------------------------|---------------------|-------------------|----------------|------------------------------|---------------------|--------------|--|--|
|   | Débit de pointe            | [m <sup>3</sup> /s] | 199,3             | Séparation     | a                            | [-]                 | 1,0          |  |  |
| Pointe de<br>crue   | Heure de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 19.05.1994 02:54: | hydrogramme    | k                            | [-]                 | 44,0         |  |  |
| ciue  | Jour julien                | ,                   | 139               |                | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 115,8        |  |  |
|   | Début de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 18.05.1994 04:00: |                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 199,3        |  |  |
|   | Fin de la crue             | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 20.05.1994 03:00: | Rtc            | R                            | [-]                 | 1,7          |  |  |
| Temps   | Durée de la crue           | [h]                 | 47                |                | tc                           | [-]                 | 14,9         |  |  |
|   | T réaction                 | [h]                 | 1                 |                | Rtc                          | [-]                 | 25,7         |  |  |
|   | T montée                   | [h]                 | 23                |                | Durée P                      | [h]                 | 35           |  |  |
|   | Débit avant la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 9,09              | Précipitations | Intensité P                  | [mm/h]              | 2,3          |  |  |
| Débit   | Débit après la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 36,74             |                | Quantité P                   | [mm]                | 81,0         |  |  |
| Debit   | Débit total de crue cumulé | [m <sup>3</sup> /h] | 288 504           |                | Saison                       |                     | été          |  |  |
|   | Débit de base cumulé       | [m³/h]              | 94 616            |                | Type de crue                 |                     | Longue pluie |  |  |
|   | Volume de crue total       | [m <sup>3</sup> ]   | 13 559 693        |                | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 0,36         |  |  |
| Volume  | Volume de base écoulé      | [m <sup>3</sup> ]   | 4 446 970         |                | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 0,6          |  |  |
|   | Volume direct écoulé       | [m <sup>3</sup> ]   | 9 112 724         |                | Temps de retour              | [a]                 | 2            |  |  |
| Niederschlag-Abfluss 19.05.1994                                   |                            |                     |                   |                |                              |                     |              |  |  |
| 0 1 500 450 450 450 450 400 77 100 100 100 100 100 100 100 100 10 |                            |                     |                   |                |                              |                     |              |  |  |
|   |                            | Niederschlag        |                   | Basisabfl      | luss (mit Filter)            |                     | •            |  |  |

Figure 72: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 19.05.1994. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

On observe un plateau avant le pic à un débit de environ 30 m³/s et d'une durée d'environ 12 heures.

# La crue du 04.07.2007 (17)

| Werthenstein 04.07.2007                      |  |                     |                   |                |                              |                     |              |  |  |
|--|--|---------------------|-------------------|----------------|------------------------------|---------------------|--------------|--|--|
| B  | Débit de pointe  | [m <sup>3</sup> /s] | 198,5             | Séparation     | a                            | [-]                 | 1,0          |  |  |
| Pointe de<br>crue                            | Heure de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 04.07.2007 03:35: | hydrogramme    | k                            | [-]                 | 44,0         |  |  |
| Ciuc   | Jour julien  |                     | 185               |                | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 75,4         |  |  |
|  | Début de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 03.07.2007 16:00: |                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 349,7        |  |  |
|  | Fin de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 06.07.2007 07:00: | Rtc            | R                            | [-]                 | 4,6          |  |  |
| Temps  | Durée de la crue   | [h]                 | 63                |                | tc                           | [-]                 | 14,9         |  |  |
|  | Tréaction  | [h]                 | 1                 |                | Rtc                          | [-]                 | 69,2         |  |  |
|  | T montée   | [h]                 | 12                | -              | Durée P                      | [h]                 | 16           |  |  |
|  | Débit avant la crue  | [m <sup>3</sup> /s] | 11,7              | Précipitations | Intensité P                  | [mm/h]              | 1,1          |  |  |
| Débit  | Débit après la crue  | [m <sup>3</sup> /s] | 19,5              |                | Quantité P                   | [mm]                | 18,0         |  |  |
| J Debit                                      | Débit total de crue cumulé   | [m <sup>3</sup> /h] | 183 900           |                | Saison                       |                     | été          |  |  |
|  | Débit de base cumulé   | [m <sup>3</sup> /h] | 87 297            |                | Type de crue                 |                     | Courte pluie |  |  |
|  | Volume de crue total   | [m <sup>3</sup> ]   | 11 585 683        |                | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 1,09         |  |  |
| Volume                                       | Volume de base écoulé  | [m <sup>3</sup> ]   | 5 499 698         |                | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 0,6          |  |  |
|  | Volume direct écoulé   | $[m^3]$             | 6 085 985         |                | Temps de retour              | [a]                 | ~2           |  |  |
| Š  | Niederschlag-Abfluss 04.07.2007  |                     |                   |                |                              |                     |              |  |  |
| 1 2 3 4 4 5 6 6 7 8 9 9 11 12 13 14 12 13 14 | 2 3 4 40 40 35 5 5 6 6 6 7 25 7 7 7 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 |                     |                   |                |                              |                     |              |  |  |

Figure 73: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 04.07.2007. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

L'attribution du type crue n'est pas claire. Le temps de montée est relativement rapide et les précipitations durent entre 12 et 24 h. Le coefficient de ruissellement est très élevé. Il est possible qu'une partie des précipitations ne soit pas prise en compte.

## La crue du 14.02.1990 (18)

|  | Werthenstein 14.02.1990  |                     |                   |                |                              |                     |                              |  |  |
|--|--|---------------------|-------------------|----------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|--|--|
|  | Débit de pointe  | [m <sup>3</sup> /s] | 194,3             | Séparation     | a                            | [-]                 | 1,0                          |  |  |
| Pointe de<br>crue  | Heure de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 14.02.1990 08:58: | hydrogramme    | k                            | [-]                 | 44,0                         |  |  |
| ciue   | Jour julien  |                     | 45                |                | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 125,8                        |  |  |
|  | Début de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 13.02.1990 23:00: |                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 202,9                        |  |  |
|  | Fin de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 15.02.1990 23:00: | Rtc            | R                            | [-]                 | 1,6                          |  |  |
| Temps  | Durée de la crue   | [h]                 | 48                |                | tc                           | [-]                 | 14,9                         |  |  |
|  | Tréaction  | [h]                 | 5                 |                | Rtc                          | [-]                 | 24,0                         |  |  |
|  | T montée   | [h]                 | 10                |                | Durée P                      | [h]                 | 52                           |  |  |
|  | Débit avant la crue  | [m <sup>3</sup> /s] | 6,7               | Précipitations | Intensité P                  | [mm/h]              | 2,5                          |  |  |
| Débit  | Débit après la crue  | [m <sup>3</sup> /s] | 62,7              |                | Quantité P                   | [mm]                | 129,6                        |  |  |
|  | Débit total de crue cumulé   | [m³/h]              | 270 650           |                | Saison                       |                     | Hiver                        |  |  |
|  | Débit de base cumulé   | [m³/h]              | 53 900            |                | Type de crue                 |                     | pluie-sur-neige+longue pluie |  |  |
|  | Volume de crue total   | [m <sup>3</sup> ]   | 12 991 216        |                | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 0,26                         |  |  |
| Volume   | Volume de base écoulé  | [m <sup>3</sup> ]   | 2 587 203         |                | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 0,6                          |  |  |
|  | Volume direct écoulé   | [m <sup>3</sup> ]   | 10 404 013        |                | Temps de retour              | [a]                 | ~2                           |  |  |
|  | Niederschlag-Abfluss 14.02.1990  State of the state of th |                     |                   |                |                              |                     |                              |  |  |
| Niederschlag (mm) Niederschlag (mm) Niederschlag (mm) 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 1 | Nikederschild   1  |                     |                   |                |                              |                     |                              |  |  |

Figure 74: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 14.02.1990. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

Après le pic le débit reste haut (>150 m³/s) pendant plus de 24 heures. Selon les données de MétéoSuisse, la couverture neigeuse a disparu pendant les deux jours précédant la crue. En plus de la fonte des neiges, il a plu pendant plus de deux jours.

## La crue du 16.07.2001 (19)

| Werthenstein 16.07.2001                                 |  |                     |                   |                      |                              |   |              |  |  |
|---|--|---------------------|-------------------|----------------------|------------------------------|---|--------------|--|--|
|   | Débit de pointe  | [m <sup>3</sup> /s] | 193,5             | Séparation           | a                            | [-]   | 1,0          |  |  |
| Pointe de<br>crue                                       | Heure de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 16.07.2001 01:03: | hydrogramme          | k                            | [-]   | 44,0         |  |  |
| ciue  | Jourjulien   |                     | 197               |                      | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s]   | 76,6         |  |  |
|   | Début de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 14.07/2001 21:00  |                      | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s]   | 202,9        |  |  |
|   | Fin de la crue   | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 17.07.2001 00:00: | Rtc                  | R                            | [-]   | 2,6          |  |  |
| Temps   | Durée de la crue   | [h]                 | 51                |                      | tc                           | [-]   | 14,9         |  |  |
|   | T réaction   | [h]                 | 1                 |                      | Rtc                          | [-]   | 39,5         |  |  |
|   | T montée   | [h]                 | 28                |                      | Durée P                      | [h]   | 34           |  |  |
|   | Débit avant la crue  | [m <sup>3</sup> /s] | 5,5               | Précipitations       | Intensité P                  | [mm/h]  | 2,0          |  |  |
| Débit   | Débit après la crue  | [m <sup>3</sup> /s] | 26,9              |                      | Quantité P                   | [mm]  | 69,7         |  |  |
| Debit   | Débit total de crue cumulé   | [m <sup>3</sup> /h] | 129 949           |                      | Saison                       |   | Été          |  |  |
|   | Débit de base cumulé   | [m <sup>3</sup> /h] | 42 740            |                      | Type de crue                 |   | Longue pluie |  |  |
|   | Volume de crue total   | [m <sup>3</sup> ]   | 6 627 410         |                      | Coefficient de ruissellement | [-]   | 0,21         |  |  |
| Volume  | Volume de base écoulé  | $[m^3]$             | 2 179 724         |                      | Débit spécifique             | [m3/s*km2]  | 0,6          |  |  |
|   | Volume direct écoulé   | [m <sup>3</sup> ]   | 4 447 686         |                      | Temps de retour              | [a]   | ~2           |  |  |
| , <sub>P</sub> ,  | Niederschlag-Abfluss 16.07.2001  Line of the control of the contro |                     |                   |                      |                              |   |              |  |  |
| 0 1 2 3 4 4 5 7 8 9 9 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 |  | Niederschi          | Basis             | abfluss (mit Filter) |                              | 500<br>450<br>400<br>350<br>300<br>200<br>150<br>100<br>50<br>0 |              |  |  |

Figure 75: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 16.07.2001. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

Le temps de montée change de plus d'une demi-journée si l'on considère que le premier pic fait partie de l'événement ou pas. La détermination est relativement subjective et la comparaison des temps de montées en dépend.

# La crue du 10.10.1988 (20)

| Pointe de crue   Débit de pointe   (m³/s)   192,6   Séparation   a   [-]   44,0  |        | <u></u>                    | We                  | erthenstein 10.  | 10.1988           |                              |                     |              |
|--|--------|----------------------------|---------------------|------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|--------------|
| Heure de la crue   (jj.mm.aaaa hh:mm)   10.10.1988   10.003 (bydrogramme   k   -   |        | Débit de pointe            | [m <sup>3</sup> /s] | 192,6            | Séparation        | a                            | [-]                 | 1,0          |
| Debut de la crue   (jj.mm.aaaa hh:mm)   10.10.1988   04:00   00   Rtc  |        | Heure de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 10.10.1988 10:03 | ђуdrogramme       | k                            | [-]                 | 44,0         |
| Fin de la crue   | crue   | Jour julien                |                     |                  |                   | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 74,1         |
| Temps  |        | Début de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 10.10.1988 04:00 | 00                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 192,6        |
| Tréaction   [h]   2   Rtc   [-]   38,8   |        | Fin de la crue             | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 11.10.1988 14:00 | <sub>00</sub> Rtc | R                            | [-]                 | 2,6          |
| Timontée   [h]   6   6     6     6     6     6     6     7   5   8,7   Précipitations   Débit avant la crue   [m³/s]   23,9     10   242,9     23,9   Débit tayrès la crue   [m³/s]   122 826   Débit de base cumulé   [m³/h]   32 311   Type de crue   Courte pluie   Coefficient de ruissellement   [-]   0,39   Débit apacité écoulé   [m³]   7 123 922   Volume direct écoulé   [m³]   1 874 025   Volume direct écoulé   [m³]   5 249 897   Temps de retour   [a]   ~ 2   | Temps  | Durée de la crue           | [h]                 | 58               |                   | tc                           | [-]                 | 14,9         |
| Débit avant la crue   [m³/s]   8,7   23,9     24,9     24,9     24,9     24,9     24,9     24,9     24,9     24,9     24,9   24,9     24,9   |        | T réaction                 |                     | 2                |                   | Rtc                          |                     | 38,8         |
| Débit   Débit dar de crue   [m³/s]   23.9   Quantité P   [mm]   42.9   |        | T montée                   |                     | 6                |                   | Durée P                      | [h]                 | 8            |
| Débit total de crue cumulé   [m³/h]   122 826   Débit de base cumulé   [m³/h]   32 311   Type de crue   Courte pluie   Coefficient de ruissellement   Coe |        | Débit avant la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 8,7              | Précipitations    | Intensité P                  | [mm/h]              | 5,4          |
| Débit total de crue cumulé   [m³/h]   122 826   Débit de base cumulé   [m³/h]   32 311   Type de crue   Courte pluie   Coefficient de ruissellement   [-] 0,39   Débit spécifique   [m³/s*km²] 0,6   Temps de retour   [a]  | Débit  | Débit après la crue        |                     | 23,9             |                   | Quantité P                   | [mm]                | 42,9         |
| Volume         Volume de crue total         [m³]         7 123 922           Volume de base écoulé         [m³]         1 874 025           Volume direct écoulé         [m³]         5 249 897    Niederschlag -Abfluss 10.10.1988  Niederschlag -Abfluss 10.10.1988  Niederschlag -Abfluss 10.10.1988  One of the control of the con   | 2000   | Débit total de crue cumulé |                     |                  |                   | Saison                       |                     | Automne      |
| Volume         Volume de base écoulé         [m³]         1 874 025         Débit spécifique         [m³/s*km²]         0,6           Niederschlag -Abfluss 10.10.1988   |        | Débit de base cumulé       |                     | 32 311           |                   | Type de crue                 |                     | Courte pluie |
| Volume direct écoulé   [m³]   5 249 897   Temps de retour   [a]   ~2   |        | Volume de crue total       | [m <sup>3</sup> ]   | 7 123 922        |                   | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 0,39         |
| Niederschlag -Abfluss 10.10.1988  Niederschlag -Abfluss 10.10.1988  Niederschlag -Abfluss 10.10.1988   | Volume | Volume de base écoulé      | [m <sup>3</sup> ]   | 1 874 025        |                   | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 0,6          |
| Niederschlag -Abfluss 10.10.1988  Niederschlag -Abfluss 10.10.1988   |        | Volume direct écoulé       | [m <sup>3</sup> ]   | 5 249 897        |                   | Temps de retour              | [a]                 | ~2           |
| 1  |        |                            |                     |                  |                   |                              |                     |              |
| 12 13 14 1   |        |                            |                     |                  |                   |                              |                     |              |

Figure 76: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 10.10.1988. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

On observe un plateau après le pic avec un débit d'environ 80 m³/s et d'une durée d'environ 6 heures. Le pic de crue est double.

## PARTIE 3: L'ANALYSE DES ÉVÉNEMENTS DE L'ÉTÉ 2009

Une analyse détaillée des hydrogrammes des stations en fonction des précipitations est élaborée pour chaque événement dont le débit dépasse 20 m³/s, à la station de Werthenstein, durant la période comprise entre le 26.06.2009 et le 10.10.2009. Cette période est déterminée par le moment où la majorité des pluviomètres GIUB sont installés (départ) et les premières neiges tombées sur le bassin-versant (fin). Les documents suivants (placés dans les annexes A9) aident à analyser les événements :

- Une fiche technique des valeurs caractéristiques décrites dans la partie des méthodes (tableau 10) est remplie pour chacune des stations dont les données sont disponibles. A Werthenstein les temps caractéristiques sont relevés selon l'hydrogramme des valeurs (et non de la moyenne horaire) (mais le volume à partir des moyennes horaire).
- Un graphique comprenant l'hydrogramme à Werthenstein et les précipitations du bassin de recherche (tous deux en moyennes horaire) permet de visualiser l'événement dans le temps. Ce graphique représente un intervalle de temps de 5 jours, soit 2 jours avant et 3 jours après un événement.
- Deux autres graphiques, l'un avec les hydrogrammes des stations de jaugeage et l'autre avec les niveaux d'eau des stations qui ne sont pas encore jaugées, permettent de comparer la réponse des sous-bassins-versants.
- Un tableau avec l'heure du pic maximum, le débit/niveau d'eau maximum, le volume d'eau (pour les stations calibrées), et la différence de temps entre l'heure du pic de la station observée et l'heure du pic à Werthenstein facilite la lecture des valeurs visibles dans les graphiques décrits ci-dessus.
- Les cartes des précipitations (moyennes horaire) interpolées avec les stations fédérales, cantonales et GIUB permettent de comprendre la répartition spatiale et temporelle des précipitations dans le bassin d'étude. Une carte par heure est disponible et ceci pour la durée de l'événement (voir Riedener (2010)).

Il faut prendre note, lors de la lecture des graphiques, que deux graphiques représentent des hydrogrammes (variation du débit selon le temps) et un troisième le niveau en fonction du temps. Pour ce dernier, la hauteur d'eau ne peut pas être comparée entre les stations, car

les sondes ne sont pas placées à la même distance du fond du lit. Les données du radar sont aussi d'un ordre tout à fait différent. Dans ce cas, la distance mesurée avec le radar est transmise en [mV] puis calibré pour connaître la distance en [cm]. Sur ce graphique, seules l'heure des pics et la forme des courbes sont représentatives.

L'hydrogramme de Werthenstein est dessiné à partir des moyennes horaire, c'est pourquoi la pointe n'atteint pas la valeur du débit maximum entrée dans le tableau. L'axe des débits de l'hydrogramme couplé aux précipitations a le même maximum à 100 m³/s à part pour la crue du 17.07.2009 (200 m³/s) afin de pouvoir mieux les comparer.

Les données d'une résolution de 10 min sont utilisées à la station LU14 à Sörenberg, et de 5 min aux stations CKW et GIUB.

Le temps entre l'heure du pic des stations dans le bassin et l'heure du pic à l'exutoire à Werthenstein est inscrit dans la dernière colonne du tableau. Le temps est en italique si le pic se produit à la station, dans le bassin-versant, après que le pic principal se soit produit à Werthenstein.

Les noms et numéros des stations pluviométriques et de jaugeage se trouvent sur une carte dans le chapitre 5 p. - 59 -. Le nom des sous-bassins-versants se trouvent à la figure 45.

Les tableaux et hydrogrammes de chaque événement se trouvent dans les annexes. Ils ne sont dans le texte que pour la crue du 17.07.2009, comme exemple.

## 3. DESCRIPTION DES ÉVÉNEMENTS DE L'ÉTÉ 2009

La figure 77 présente les 12 événements de l'été 2009 sur l'hydrogramme.

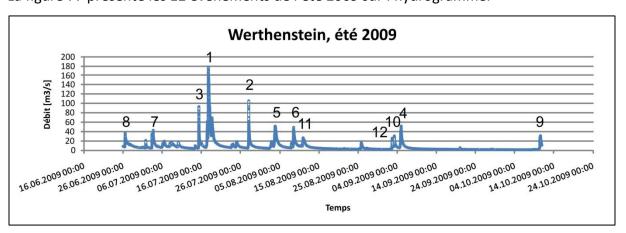


Figure 77: Numérotation des événements de l'été 2009 par taille. Source OFEV.

## L'ÉVÉNEMENT DU 17.07.2009 (1)

La crue du 17.07.2009 est la seule de l'année 2009 à avoir un temps de retour estimé à plus d'une année. D'après la méthode de Diezig (2006), elle est déclenchée par une « longue pluie ». C'est le seul événement de ce type qui s'est produit durant l'été 2009. Il y a trois phases de précipitations qui ont chacune engendré une réaction du débit à Werthenstein. La première phase à 9:00 est mesurée à la station C dans le sous-bassin de Rotbach avec une intensité de 10 mm/h. Cette phase a provoqué le premier petit pic à 10:00 à Südelgraben et à 10:30 à Sörenberg. Dans la partie inférieur du bassin, le petit pic arrive à 11:10 à la station GIUB 4 (Fontannen) et seulement à 13:00 à Werthenstein. Entre 12 et 14 heure les précipitations se sont atténuées. La plus forte intensité de l'événement est mesurée principalement dans les hauteurs du bassin-versant à l'Est entre 16 et 17 heure. Les pics principaux sont apparu dans l'ordre suivant : 18:04 à CKW, 18:30 à Fontannen, 19:03 à Werthenstein, 19:45 à Südelgraben, 19:50 à Sörenberg. Le plateau sur l'hydrogramme entre 2 et 4 heure le 18.07.2009 provient probablement des précipitations continues entre 18 heure le 17.08 et 1 heure le 18.08 dans le bassin entier. Après une courte pause, une troisième phase de précipitations a engendré un troisième pic plus petit. En général, d'après les carte des précipitations, ces dernières étaient plus intenses à l'Est dans la partie haute du bassin-versant. Le pic des stations en amont s'est produit plus tard qu'en aval. On mesure moins d'un tier du volume débit de la station Werthenstein à la station CKW. Une grande partie vient probablement du sous-bassin GIUB 3. Le coefficient de ruissellement est surestimé avec une valeur de 1.3. Le coefficient de ruissellement ne peut logiquement pas dépasser la valeur 1. Il est possible que les précipitations soient sous-estimées ou le débit surestimé. La première cause est plus vraisemblable.

|   |                            | w                   | erthenstein 1    | 7.07.2009      |                              |                     |             |  |
|---|----------------------------|---------------------|------------------|----------------|------------------------------|---------------------|-------------|--|
| 5 - 1 - 4 - 4 -   | Débit de pointe            | [m <sup>3</sup> /s] | 177.79           | Séparation     | a                            | [-]                 | 0.98        |  |
| Pointe de<br>crue   | Heure de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 17.07.2009 19:03 | hydrogramme    | k                            | [-]                 | 44.00       |  |
| ciue  | Jour julien                |                     | 198              |                | MQ25                         | [m <sup>3</sup> /s] | 71.39       |  |
|   | Début de la crue           | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 17.07.2009 04:07 |                | HQannuel                     | [m <sup>3</sup> /s] | 177.79      |  |
|   | Fin de la crue             | [jj.mm.aaaa hh:mm]  | 19.07.2009 08:57 | Rtc            | R                            | [-]                 | 2.49        |  |
| Temps   | Durée de la crue           | [hh:mm]             | 52:50:00         |                | tc                           | [-]                 | 14.91       |  |
|   | Tréaction                  | [hh:mm]             | 00:02            |                | Rtc                          | [-]                 | 37.13       |  |
|   | T montée                   | [hh:mm]             | 14:56            |                | Durée P                      | [hh:mm]             | 36:55       |  |
|   | Débit avant la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 6.21             | Précipitations | Intensité P                  | [mm/h]              | 2.10        |  |
| Débit   | Débit après la crue        | [m <sup>3</sup> /s] | 21.18            |                | Quantité P                   | [mm]                | 80.60       |  |
| Debit   | Débit total de crue cumulé | [m <sup>3</sup> /h] | 995'669          |                | Saison                       |                     | été         |  |
|   | Débit de base cumulé       | [m <sup>3</sup> /h] | 382'238          |                | Type de crue                 |                     | Longue puie |  |
|   | Volume de crue total       | [m <sup>3</sup> ]   | 52'770'472       |                | Coefficient de ruissellement | [-]                 | 1.30        |  |
| Volume  | Volume de base écoulé      | [m <sup>3</sup> ]   | 20'258'625       |                | Débit spécifique             | [m3/s*km2]          | 0.57        |  |
|   | Volume direct écoulé       | [m <sup>3</sup> ]   | 32'511'847       | 1 1            | Temps de retour              | [a]                 | 1.50        |  |
|   |                            |                     |                  |                |                              |                     |             |  |
| The control of the |                            |                     |                  |                |                              |                     |             |  |

Figure 78: Fiche technique et hydrogramme de l'événement du 17.07.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

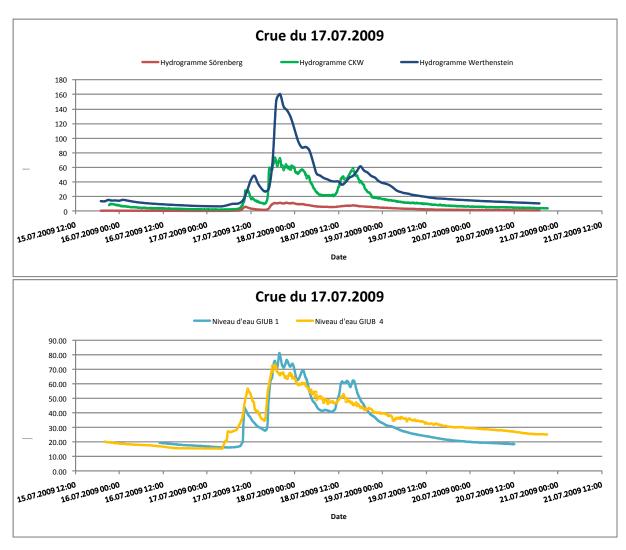


Figure 79: En haut : hydrogramme des stations Sörenberg et Werthenstein, en bas : niveau d'eau des stations GIUB 1 et 4.

Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max  | Volume     | dt      |
|--------------|--------------------|------------|------------|---------|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]     | [m³]       | [hh:mm] |
| Sörenberg    | 17.07.2009 19:50   | 11.44      | 4'064'374  | 00:47   |
| CKW          | 17.07.2009 18:04   | 73.30      | 9'431'674  | 00:59   |
| Schüpfheim   |                    |            |            |         |
| Werthenstein | 17.07.2009 19:03   | 177.79     | 32'511'847 |         |
|              |                    |            |            |         |
|              | Heure du pic       | Niveau max | dt         |         |
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [cm]       | [hh:mm]    |         |
| GIUB 1       | 17.07.2009 19:45   | 81.47      | 00:42      |         |
| GIUB 3       |                    |            |            |         |
| GIUB 4       | 17.07.2009 18:30   | 73.56      | 00:33      |         |

Tableau 18: Résumé de l'heure d'arrivée du pic, du débit/niveau d'eau maximum, volume (pour les stations calibrées), et différence de temps de l'apparition du pic entre les stations dans le bassin et à l'exutoire pour les stations en fonction.

Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

## L'ÉVÉNEMENT DU 28.07.2009 (2)

Cet événement, avec un court temps de montée sur l'hydrogramme (05:02), est l'exemple typique d'une « averse ». L'intensité maximale est mesurée entre minuit et 1 heure dans la partie inférieur du bassin-versant. Les débits maximums ont atteint Fontannen à 01:35, Südelgraben à 01:50, Werthenstein à 01:59, CKW à 02:10, Schüpfheim à 02:40 et Sörenberg à 02:50. Mis à part GIUB 1 et Fontannen, les débits maximums sont survenus plus tard aux stations en amont. L'hydrogramme de Schüpfheim est divisé en deux pointes (01:10 / 02:40). Cala s'explique car les précipitations, contrairement au reste du bassin, ont à nouveau augmenté entre 01:40 et 01:55. On mesure 32% du volume de crue de Werthenstein à la station à Schüpfheim, 20% à Flühli et 13% à Sörenberg.

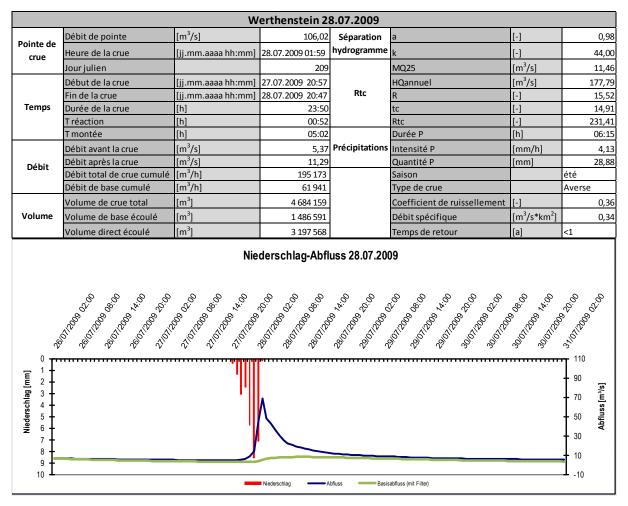


Figure 80: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 28.07.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

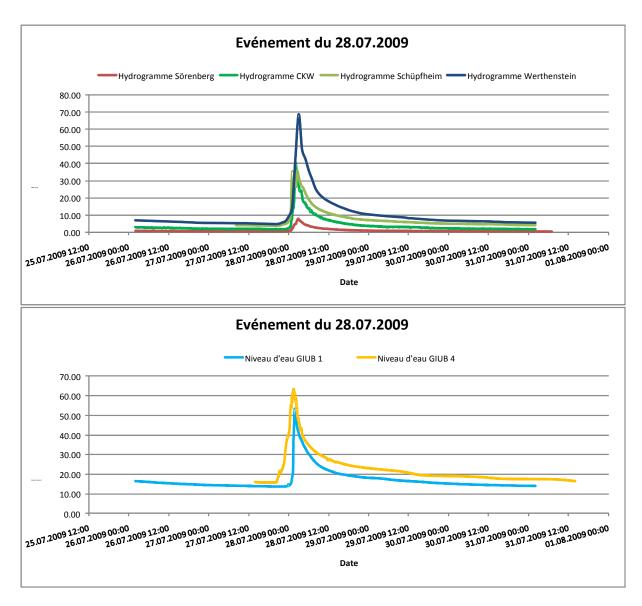


Figure 81: Hydrogrammes et courbe du niveau d'eau. Sources des données: OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max    | Volume    | dt      |
|--------------|--------------------|--------------|-----------|---------|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]       | [m³]      | [hh:mm] |
| Sörenberg    | 28.07.2009 02:50   | 7.79         | 342'630   | 00:51   |
| CKW          | 28.07.2009 02:10   | 40.51        | 641'144   | 00:11   |
| Schüpfheim   | 28.07.2009 02:40   | 35.87        | 1'038'842 | 00:41   |
| Werthenstein | 28.07.2009 01:59   | 106.02       | 3'197'568 |         |
|              |                    |              |           |         |
|              | Heure du pic       | Niveau d'eau | dt        |         |
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [cm]         | [hh:mm]   |         |
| GIUB 1       | 28.07.2009 01:50   | 53.53        | 00:09     |         |
| GIUB 3       |                    |              |           |         |
| GIUB 4       | 28.07.2009 01:35   | 63.54        | 00:23     |         |

Tableau 19: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

#### L'ÉVÉNEMENT DU 15.07.2009 (3)

Le 15.07.2009, un court événement de type « averse » a eu lieu le matin pendant 2 heures. L'intensité maximale des précipitations entre 6 et 7 heure était de 19.5 mm/h, mesurée dans le sous-bassin Rotbach. Les précipitations de forte intensité de la première heure ont ensuite diminué. Les précipitations sont principalement tombées dans les environs du Fürsten (sommet à 2040 m, à la frontière des sous-bassins-versants Rotbach et GIUB 3) ainsi que dans la vallée principale entre Schüpfheim et Entlebuch. Le débit de pointe s'est produit aux stations temporairement d'amont en aval dans un laps de temps d'une heure et demi : à 07:10 à Sörenberg, à 07:20 à CKW, à 07:50 à Fontannen et à 08:35 à Werthenstein. Le volume de crue à CKW est de 22% par rapport à celui de Werthenstein et seulement 2% à Sörenberg par rapport à celui de Werthenstein. Cela s'explique car les précipitations sont tombées sur le Fürstein, dont une partie s'est écoulée dans le bassin Rotbach et l'autre partie s'est écoulée par la Grosse Entle. Les précipitations sur la partie nord du bassin ont contribué en grande partie au volume de crue à Werthenstein.

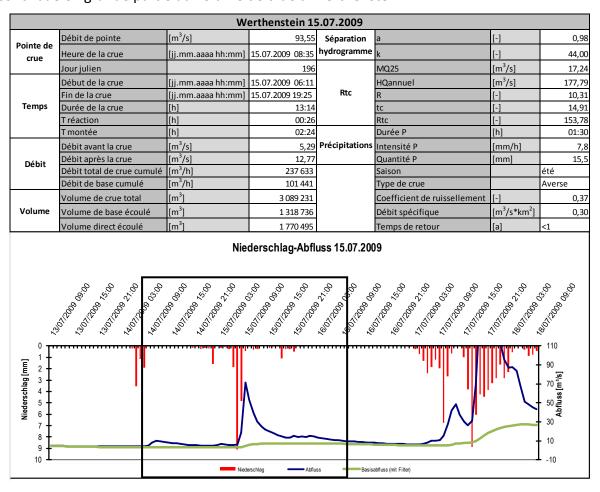


Figure 82: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 15.07.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

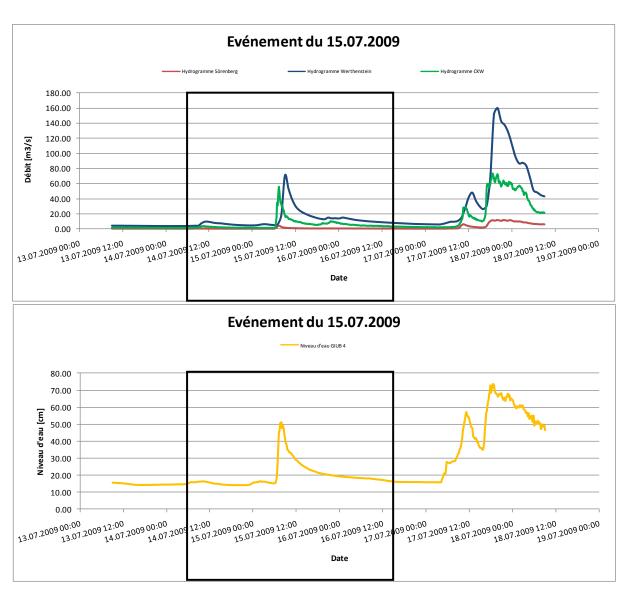


Figure 83: Hydrogrammes et courbe du niveau d'eau. Sources des données: OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max    | Volume    | dt      |
|--------------|--------------------|--------------|-----------|---------|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]       | [m³]      | [hh:mm] |
| Sörenberg    | 15.07.2009 07:10   | 4.17         | 35'618    | 01:25   |
| CKW          | 15.07.2009 07:20   | 55.78        | 381'095   | 01:15   |
| Schüpfheim   |                    |              |           |         |
| Werthenstein | 15.07.2009 08:35   | 93.55        | 1'770'495 |         |
|              |                    |              |           |         |
|              | Heure du pic       | Niveau d'eau | dt        |         |
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [cm]         | [hh:mm]   |         |
| GIUB 1       |                    |              |           |         |
| GIUB 3       |                    |              |           |         |
| GIUB 4       | 15.07.2009 07:50   | 50.98        | 00:45     |         |

Tableau 20: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

## L'ÉVÉNEMENT DU 05.09.2009 (4)

À 11:45, les précipitations ont débuté et sont tombées pendant 11 heures. L'intensité maximale a été mesurée entre 17:41 et 18:41 le 4.09.2009 dans le sous-bassin Rotbach et la plus grande quantité de pluie est tombée dans le bassin de Sörenberg. Toutes les stations sauf celle de Fontanne ont un hydrogramme composé d'un double pic. Cela résulte des précipitations qui se sont intensifées deux fois (à 18 et à 21 heure). Dans le bassin-versant GIUB 4, les précipitations étaient relativement constantes ce qui explique la courbe régulière. Les débits de pointe arrivent avec le deuxième pic à 22 :50 à GIUB 3 (Grosse Entle), 23 :10 à Südelgraben, 23 :20 à Sörenberg, 23 :30 à CKW, à 23 :35 à Schüpfheim, 23 :50 à Fontannen et finalement 00 :41 à Werthenstein. Les débits de pointe ont lieu en premier en amont puis aux stations en aval. Le volume de crue mesuré à Schüpfheim correspond à 43% du volume de crue de Werthenstein. 28% provient de CKW. Cela signifie que les cours d'eau Steinibach et Wiss Emme ont aussi largement contribué au volume de débit. L'autre partie vient probalement en majorité du bassin-versant de la Grosse Entle.

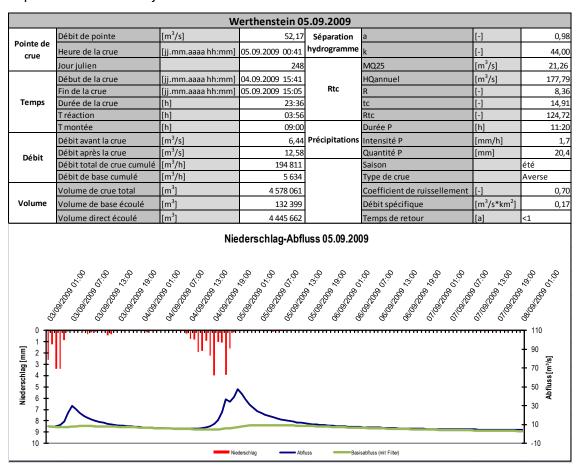


Figure 84: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 05.09.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

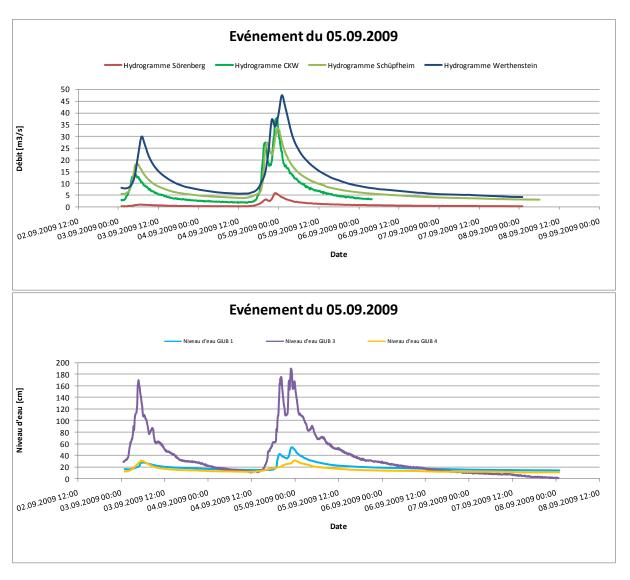


Figure 85: Hydrogrammes et courbe du niveau d'eau. Sources des données: OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max    | Volume    | dt      |
|--------------|--------------------|--------------|-----------|---------|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]       | [m³]      | [hh:mm] |
| Sörenberg    | 04.09.2009 23:20   | 5.87         | 458'233   | 01:21   |
| CKW          | 04.09.2009 23:30   | 37.78        | 1'265'150 | 01:11   |
| Schüpfheim   | 04.09.2009 23:35   | 33.62        | 1'906'941 | 01:06   |
| Werthenstein | 05.09.2009 00:41   | 52.172       | 4'445'662 |         |
|              |                    |              |           |         |
|              | Heure du pic       | Niveau d'eau | dt        |         |
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [cm]         | [hh:mm]   |         |
| GIUB 1       | 04.09.2009 23:10   | 53.76        | 01:31     |         |
| GIUB 3       | 04.09.2009 22:50   | 719.06       | 01:51     |         |
| GIUB 4       | 04.09.2009 23:50   | 30.67        | 00:51     |         |

Tableau 21: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

## L'ÉVÉNEMENT DU 03.08.2009 (5)

Cet événement est le seul du type « courte pluie » de l'été 2009. Les précipitations sont d'intensité plus faible (1.5 mm/h) que celles de type « averse », ont duré 15 heures, et sont réparties sur tout le bassin. Les plus grandes intensité et quantité sont mesurées dans le sous-bassin-versant Sörenberg. Les pointes de crue sont plus arrondies, parfois même plates, que lors des précipitations de type « averse ». Les pics ont atteint Fontannen à 19:45, Werthenstein à 20:01, CKW à 20:10 (pic très arrondi), et sont arrivés seulement une heure plus tard à 21:10 à Schüpfheim, à 22:20 à Südelgaben et à 23:10 à Sörenberg. Il a plu plus longtemps dans la partie sud du bassin (après 20 heure à Sörenberg et Südelgraben) ce qui explique les pics retardés aux stations le plus au sud par rapport à celle du nord. 37% du volume de crue de la station Werthenstein est mesuré à Schüpfheim et 25% à CKW.

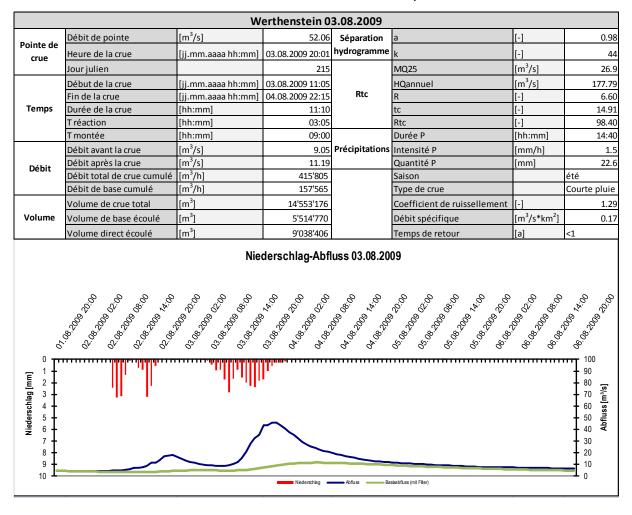
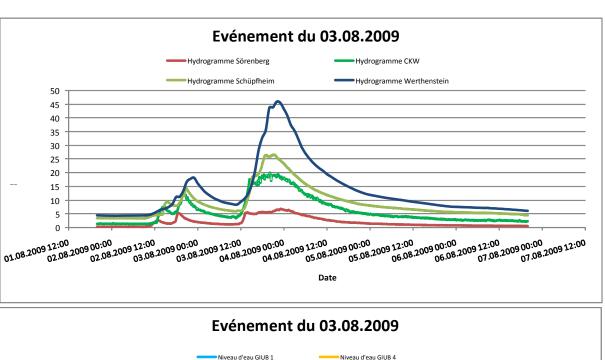


Figure 86: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 03.08.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.



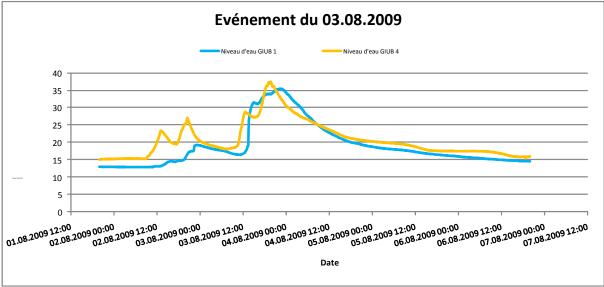


Figure 87: Hydrogrammes et courbe du niveau d'eau. Sources des données: OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max | Volume    | dt      |
|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m³/s]    | [m³]      | [hh:mm] |
| Sörenberg    | 03.08.2009 23:10   | 6.78      | 945'804   | 03:09   |
| CKW          | 03.08.2009 20:10   | 19.94     | 2'252'199 | 00:09   |
| Schüpfheim   | 03.08.2009 21:10   | 26.68     | 3'320'365 | 01:09   |
| Werthenstein | 03.08.2009 20:01   | 52.06     | 9'038'406 |         |
|              |                    |           |           |         |
|              | Heure du pic       | Niveau    | dt        |         |
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [cm]      | [hh:mm]   |         |
| GIUB 1       | 03.08.2009 22:20   | 35.59     | 02:19     |         |
| GIUB 3       |                    |           |           |         |
| GIUB 4       | 03.08.2009 19:45   | 37.40     | 00:16     |         |

Tableau 22: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

## L'ÉVÉNEMENT DU 08.08.2009 (6)

Le 08.08.2009, un événement de type « averse » localisé sur le bassin de la Wiss Emme et en partie celui de Grosse Fontanne a engendré une pointe avec un temps de montée très rapide aux stations de la partie aval du bassin-versant. Plus de 30 mm sont tombés sur ces sousbassins. L'intensité maximale est mesurée à la station L (Multigschwändli) avec 26 mm/h. La grande quantité d'eau tombée sur le bassin de la Wiss Emme a engendré un pic à 12 :20 à Schüpfheim et 5 minutes plus tard à Fontannen. Des précipitations d'une intensité d'environ 10 mm/h sont tombées sur le sous-bassin de Südelgraben vers 11 heure. Le débit n'a que très peu augmenté (10 cm) à cette dernière station. La station de Sörenberg n'a pas enregistré de variation notable de débit. A Schüpfheim, on mesure 51% du volume de crue de Werthenstein et 33% à CKW.

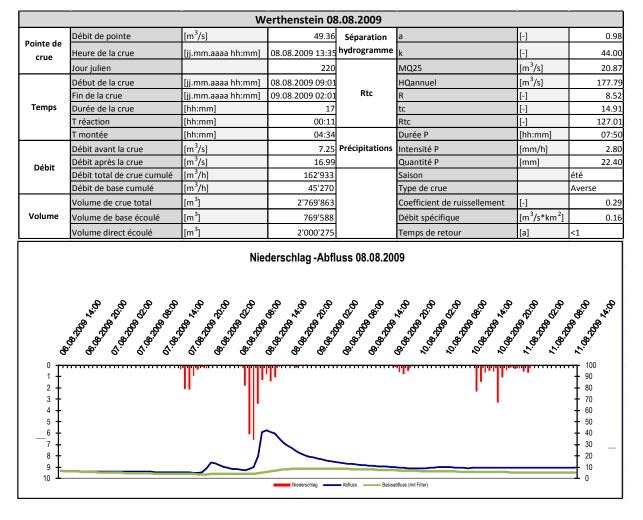
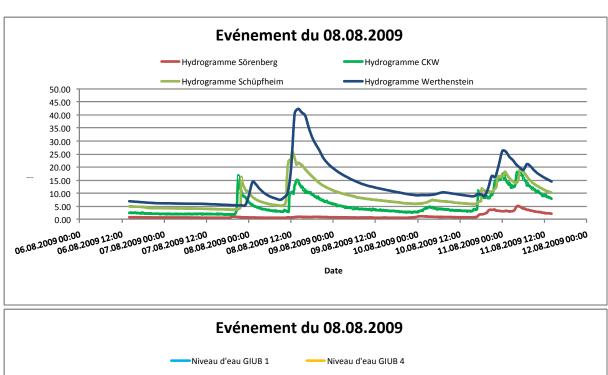


Figure 88: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 08.08.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.



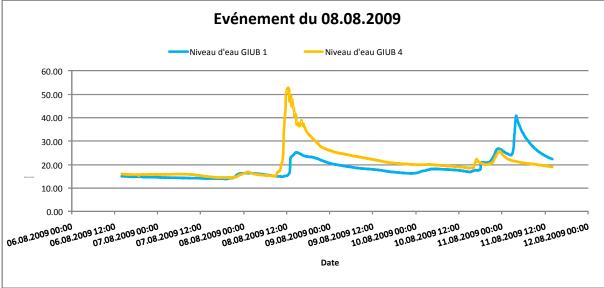


Figure 89: Hydrogrammes et courbe du niveau d'eau. Sources des données: OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max | Volume    | dt      |
|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]    | [m³]      | [hh:mm] |
| Sörenberg    |                    |           |           |         |
| CKW          | 08.08.2009 13:40   | 15.21     | 654'100   | 00:05   |
| Schüpfheim   | 08.08.2009 12:20   | 26.17     | 1'013'157 | 01:15   |
| Werthenstein | 08.08.2009 13:35   | 49.358    | 2'000'275 |         |
|              |                    |           |           |         |
|              | Heure du pic       | Niveau    | dt        |         |
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [cm]      | [hh:mm]   |         |
| GIUB 1       | 08.08.2009 14:35   | 25.17     | 01:00     |         |
| GIUB 3       |                    |           |           |         |
| GIUB 4       | 08.08.2009 12:25   | 52.93     | 01:10     |         |

Tableau 23: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

## L'ÉVÉNEMENT DU 03.07.2009 (7)

Des précipitations intenses dans le bassin de Rotbach ont débuté aux allentours de 6 heure. Une intensité de 6.9 mm/h est mesurée à ce moment. Elles ont engendré un grand pic à la station CKW à 06 :50 et un premier petit pic à 07 :40 à Sörenberg et à 10 :00 à Werthenstein. Après une courte accalmie vers 10 heure, les précipitations ont repris à 13 heure avec une intensité de 6.9 mm/h à nouveau dans le bassin du Rotbach. Un second pic, plus grand est mesuré à 16 :00 à Sörenberg et à 16 :51 à Werthenstein. La plupart des stations GIUB n'étaient pas encore installées à ce moment. L'hydrogramme est trompeur, la courbe de CKW présente un débit plus élevé que celle de Werthenstein. Cela s'explique car l'hydrogramme de Werthenstein est formé à partir des moyennes horaire, alors que celui de CKW a une résolution de 5 min. Ce qui explique également la grande proportion de volume de la station Werthenstein (99%) mesurée à la station CKW. Le débit maximum mesuré à Werthenstein est de 43.06 [m³/s], presque semblable à celui de CKW 43.92 [m³/s]. Le premier pic de CKW a vraisemblablement engendré le premier pic à Werthenstein.

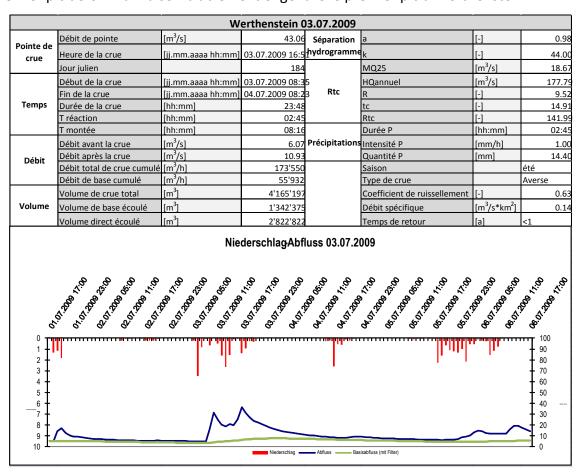


Figure 90: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 03.07.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

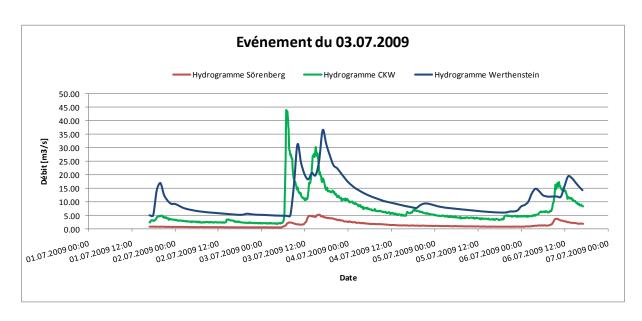


Figure 91: Hydrogrammes. Sources des données: OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max | Volume    | dt      |  |
|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------|--|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]    | [m³]      | [hh:mm] |  |
| Sörenberg    | 03.07.2009 16:10   | 5.41      | 734'787   | 00:41   |  |
| CKW          | 03.07.2009 06:50   | 43.92     | 2'804'496 | 10:01   |  |
| Schüpfheim   |                    |           |           |         |  |
| Werthenstein | 03.07.2009 16:51   | 43.06     | 2'822'822 |         |  |

Tableau 24: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

# L'ÉVÉNEMENT DU 26.06.2009 (8)

Les précipitations ont duré 4 heures, avec une intensité maximale de 12.8 mm/h mesurée à la station de Schüpfheim. La plus grande quantité d'eau (30.4 mm) a également été mesurée dans le sous-bassin de Schüpfheim. L'hydrogramme à Werthenstein a répondu très rapidement aux précipitations, car la cellule de précipitations était centrée sur le nord du bassin-versant, le débit maximum a eu lieu à 12:51. Les stations CKW et Sörenberg ont enregistré un pic à 14:00 respectivement 14:50. Peu de pluviomètres GIUB étaient montés à ce moment ce qui rend l'analyse moins précise.

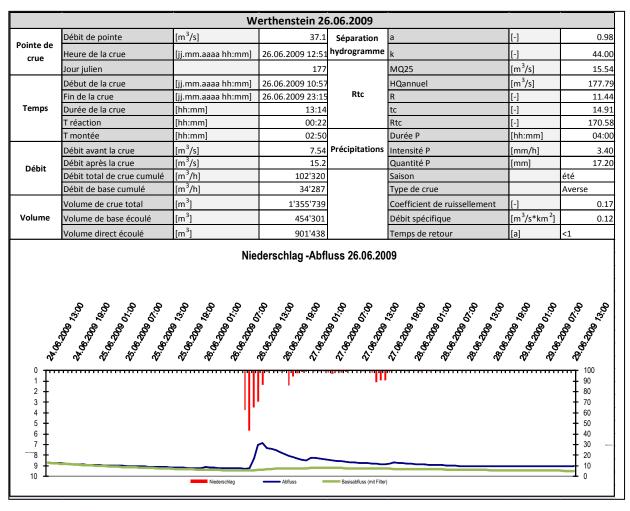


Figure 92: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 26.06.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.

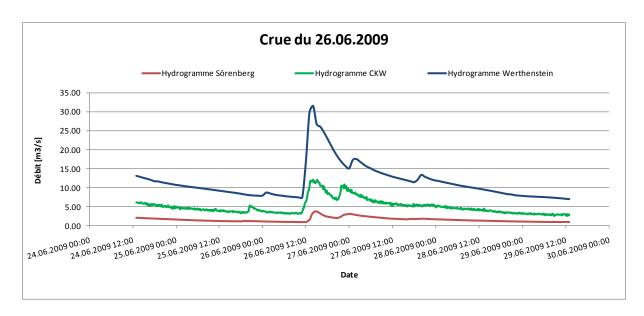


Figure 93: Hydrogrammes. Sources des données: OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max | Volume    | dt      |  |
|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------|--|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]    | [m³]      | [hh:mm] |  |
| Sörenberg    | 26.06.2009 14:50   | 3.82      | 352'693   | 02:00   |  |
| CKW          | 26.06.2009 14:00   | 12.05     | 1'150'334 | 01:09   |  |
| Schüpfheim   |                    |           |           |         |  |
| Werthenstein | 26.06.2009 12:51   | 37.1      | 1'366'894 |         |  |

Tableau 25: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

# L'ÉVÉNEMENT DU 10.10.2009 (9)

Les précipitations de la « averse » du 10.10.2009 étaient les plus intenses à 5 heure dans le bassin Rotbach (9.8 mm/h) et sont tombées principalement sur l'Est du bassin (33.8 mm à Rotbach, 30.4 mm GIUB 3 et 25.9 mm à Sörenberg). Elles ont duré 10 heures. Les stations GIUB 3 et 4 ont réagi les premières à 09 :30 et 10 :00. Les autres stations ont réagi plus tard ; 12 :20 à Südelgraben, 12 :35 à CKW, 12 :50 à Sörenberg, et 13 :30 à Schüpfheim. Le pic de crue est arrivé à 14 :03 à Werthenstein. L'intensité relativement élevée (environ 7 mm/h) sur le bassin de Fontanne et sur l'Entle sont responsables du premier pic. Les précipitations entre 8 et 11 heure ont formé les plus grandes pointes et le deuxième pic à Entle. A Schüpfheim, on mesure 50% du volume de crue de Werthenstein. Le sud du bassin et La Grosse Entle sont responsables du reste du volume à Werthenstein.

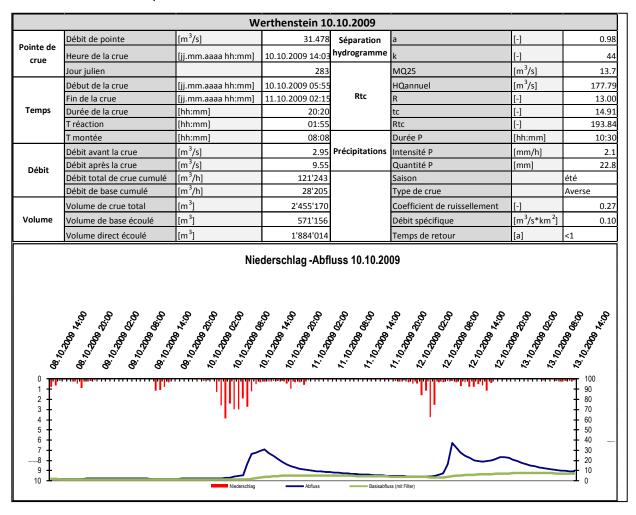
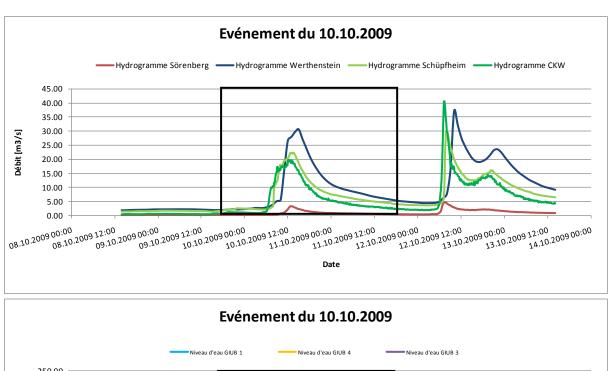


Figure 94: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 10.10.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse.



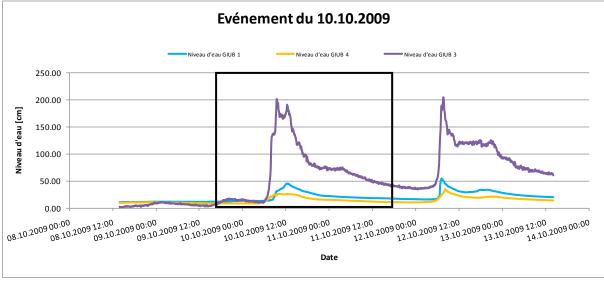


Figure 95: Hydrogrammes et courbe du niveau d'eau. Sources des données: OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max | Volume    | dt      |
|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]    | [m³]      | [hh:mm] |
| Sörenberg    | 10.10.2009 12:50   | 3.36      | 111'985   | 01:13   |
| CKW          | 10.10.2009 12:35   | 19.70     | 584'245   | 01:28   |
| Schüpfheim   | 10.10.2009 13:30   | 22.31     | 947'909   | 00:33   |
| Werthenstein | 10.10.2009 14:03   | 31.48     | 1'884'014 |         |
|              |                    |           |           |         |
|              | Heure du pic       | Niveau    | dt        |         |
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [cm]      | [hh:mm]   |         |
| GIUB 1       | 10.10.2009 12:20   | 44.75     | 01:43     |         |
| GIUB 3       | 10.10.2009 09:30   | 701.09    | 04:33     |         |
| GIUB 4       | 10.10.2009 10:00   | 26.17     | 04:03     |         |

Tableau 26: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV et UWE.

# L'ÉVÉNEMENT DU 03.09.2009 (10)

L'intensité maximale (6.6 mm/h) de l'événement a été mesurée dans le bassin de la Grosse Fontanne à 02 :00. Les précipitations sont tombées en grandes quantités entre 1 et 4 heure dans le bassin de la Grosse Entle (13.5 mm) où elles ont provoqué le premier pic à la station GIUB 3 à 04 :50. Une deuxième vague de précipitations sur le bassin des Fontannen entre 2 et 4 heure a engendré un pic à 05 :30 à la station GIUB 4. Les autres stations ont atteint leur maximums à 05 :00 à CKW, à 05 :45 à Schüpfheim, à 06 :00 à Südelgraben et à 06 :23 à Werthenstein. A Sörenberg, la station de jaugeage n'a enregistré qu'une très faible montée du débit.

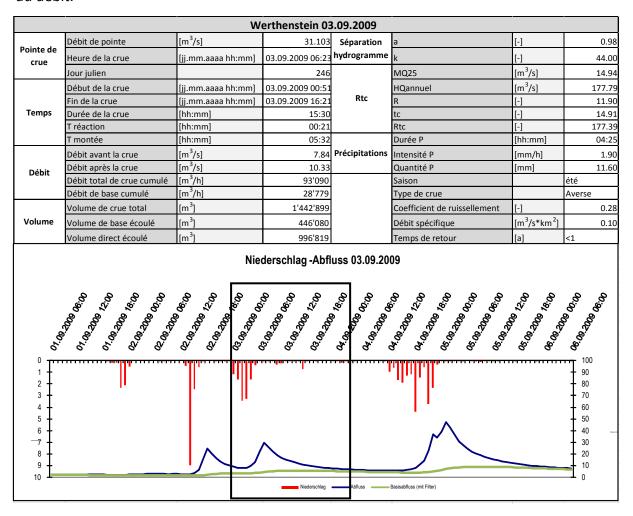


Figure 96: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 03.09.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse).

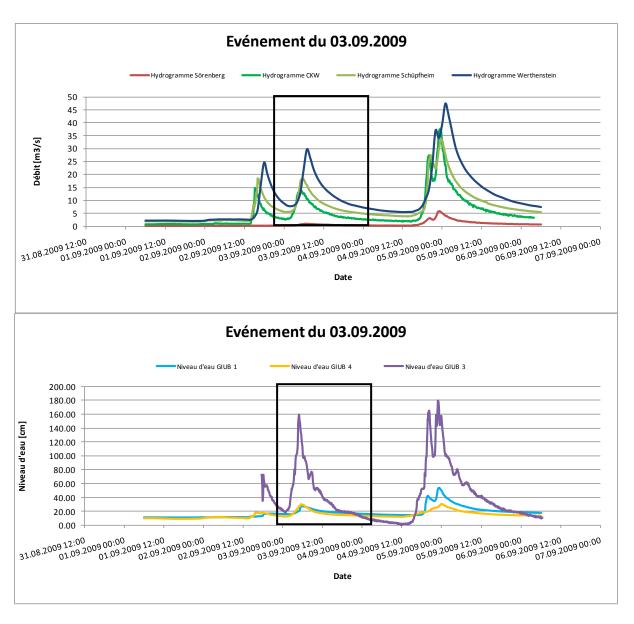


Figure 97: Hydrogrammes et courbe du niveau d'eau. Sources des données: OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max | Volume  | dt      |
|--------------|--------------------|-----------|---------|---------|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]    | [m³]    | [hh:mm] |
| Sörenberg    | 03.09.2009 07:00   | 1.05      | 20'756  | 00:37   |
| CKW          | 03.09.2009 05:00   | 14.00     | 243'906 | 01:23   |
| Schüpfheim   | 03.09.2009 05:45   | 18.40     | 674'840 | 00:48   |
| Werthenstein | 03.09.2009 06:23   | 31.10     | 996'819 |         |
|              |                    |           |         |         |
|              | Heure du pic       | Niveau    | dt      |         |
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [cm]      | [hh:mm] |         |
| GIUB 1       | 03.09.2009 06:00   | 27.18     | 00:23   |         |
| GIUB 3       | 03.09.2009 04:50   | 699.28    | 01:33   |         |
| GIUB 4       | 03.09.2009 05:30   | 30.51     | 00:53   |         |

Tableau 27: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

# L'ÉVÉNEMENT DU 11.08.2009 (11)

L'événement du 11.08.2009 a duré 12 heures et s'est passé en deux étapes. L'intensité la plus élevée a été mesurée à la station O (Heubödeli / 8.5 mm/h). Les précipitations tombées sur le bassin entier ont fait augmenter le débit jusqu'à un maximum à 23 :20 à la station GIUB 4 et à 00 :14 à Werthenstein. Plus tard, entre 2 et 3 heure, les précipitations se sont concentrées dans la partie sud du bassin, ce qui explique pourquoi les pics des stations Südelgraben (03 :55), Sörenberg (04 :20), CKW (04 :40) et Schüpfheim (05 :05) sont apparus après ceux de Werthenstein. On mesure 27%, 71% et 88% du volume de crue respectivement à Sörenberg, CKW et Schüpfheim. Les précipitations sur le sud du bassinversant sont donc largement responsables de l'augmentation du débit à Werthenstein.

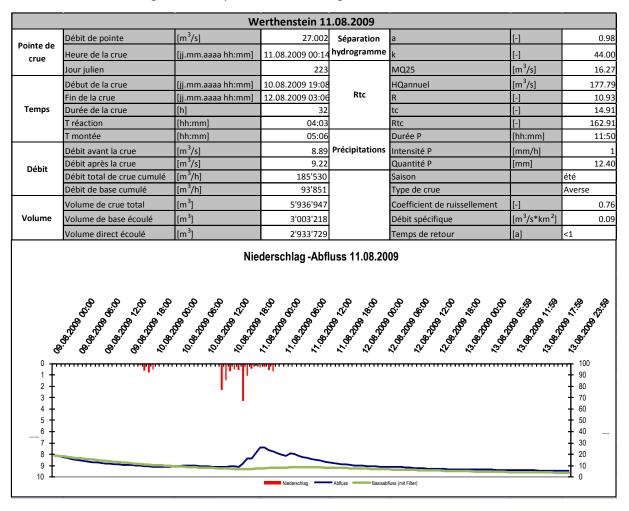


Figure 98: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 11.08.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse).

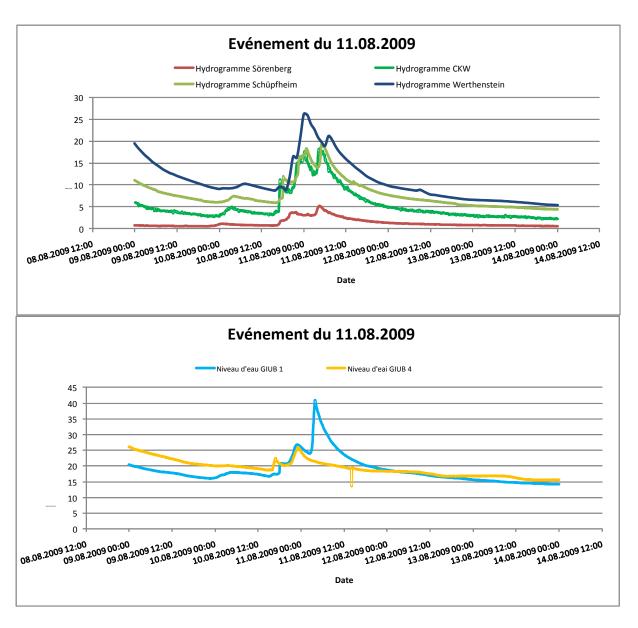


Figure 99: Hydrogrammes et courbe du niveau d'eau. Sources des données: OFEV et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max | Volume    | dt      |
|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]    | [m³]      | [hh:mm] |
| Sörenberg    | 11.08.2009 04:20   | 5.22      | 779'748   | 04:06   |
| CKW          | 11.08.2009 04:40   | 18.38     | 2'087'681 | 04:34   |
| Schüpfheim   | 11.08.2009 05:05   | 19.39     | 2'569'589 | 04:49   |
| Werthenstein | 11.08.2009 00:14   | 27.00     | 2'933'729 |         |
|              |                    |           |           |         |
|              | Heure du pic       | Niveau    | dt        |         |
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [cm]      | [hh:mm]   |         |
| GIUB 1       | 11.08.2009 03:55   | 40.89     | 03:41     |         |
| GIUB 3       |                    | _         |           |         |
| GIUB 4       | 10.08.2009 23:20   | 25.84     | 00:54     |         |

Tableau 28: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV et UWE.

# L'ÉVÉNEMENT DU 02.09.2009 (12)

L'événement du 02.09.2009 est de type « averse » et les précipitations n'ont duré que 2:45. Les précipitations les plus intenses sont mesurées dans le bassin de Rotbach (23 mm/h). Elles ont engendré des pics rapides aux stations, CKW (15:10), Fontanne (15:45), Schüpfheim (16:05) et Werthenstein (17:21). 47% du volume de crue de Werthenstein est mesuré à Schüpfheim et 25% à CKW. La station de Sörenberg n'a pas mesuré d'augmentation du débit.

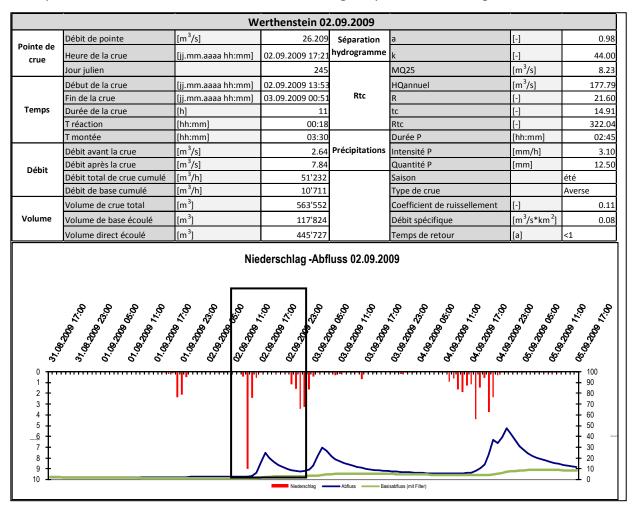


Figure 100: Fiche technique et hydrogramme pour l'événement du 02.09.2009. Sources des données : OFEV et MétéoSuisse).

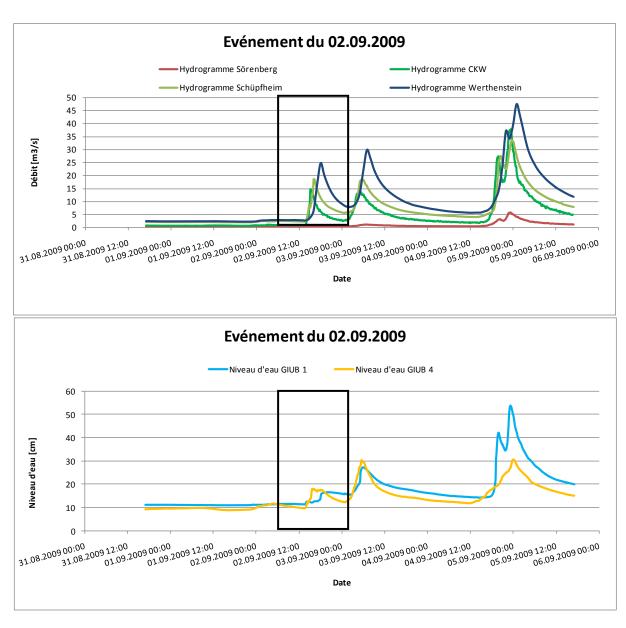


Figure 101: Hydrogrammes et courbe du niveau d'eau. Sources des données: OFEV, CKW et UWE.

|              | Heure du pic       | Débit max | Volume  | dt      |
|--------------|--------------------|-----------|---------|---------|
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [m3/s]    | [m³]    | [hh:mm] |
| Sörenberg    |                    |           |         |         |
| CKW          | V 02.09.2009 15:1  |           | 113'633 | 02:12   |
| Schüpfheim   | 02.09.2009 16:05   | 18.57     | 208'317 | 01:16   |
| Werthenstein | 02.09.2009 17:21   | 26.209    | 445'727 |         |
|              |                    |           |         |         |
|              | Heure du pic       | Niveau    | dt      |         |
|              | [jj.mm.aaaa hh:mm] | [cm]      | [hh:mm] |         |
| GIUB 1       | 02.09.2009 20:10   | 16.50     | 02:50   |         |
| GIUB 3       |                    |           |         |         |
| GIUB 4       | 02.09.2009 15:45   | 18.12     | 01:36   |         |

Tableau 29: Informations concernant les pics aux stations de jaugeage. Sources des données : OFEV, CKW et UWE.

# PARTIE 4: LA DÉTERMINATION DES ZONES CLÉ.

Cette partie présente les résultats des sous-bassins-versants qui réagissent avec les débits spécifiques les plus élevés, appelés zones clé. La discussion de ces résultats se trouve dans le chapitre Discussion.

Le travail de Schaffner (2007) démontre que les paramètres mH (hauteur moyenne du bassin-versant), Re (longueur hydrologique)<sup>7</sup>, GD (densité du réseau hydrologique) et L<sub>I</sub> (Shape Factor)<sup>8</sup>, sont les plus adaptés pour l'estimation des débits élevés. Cependant les valeurs seuils qu'il définit ne sont pas adaptées pour des bassins-versants d'une taille supérieure à 10 km<sup>2</sup>. Pour ces derniers, il recommande le programme HQx\_meso\_CH. C'est la méthode utilisée pour la détermination des zones clé complétée par des modélisations avec le programme PREVAH.

# 4. HQx\_meso\_CH

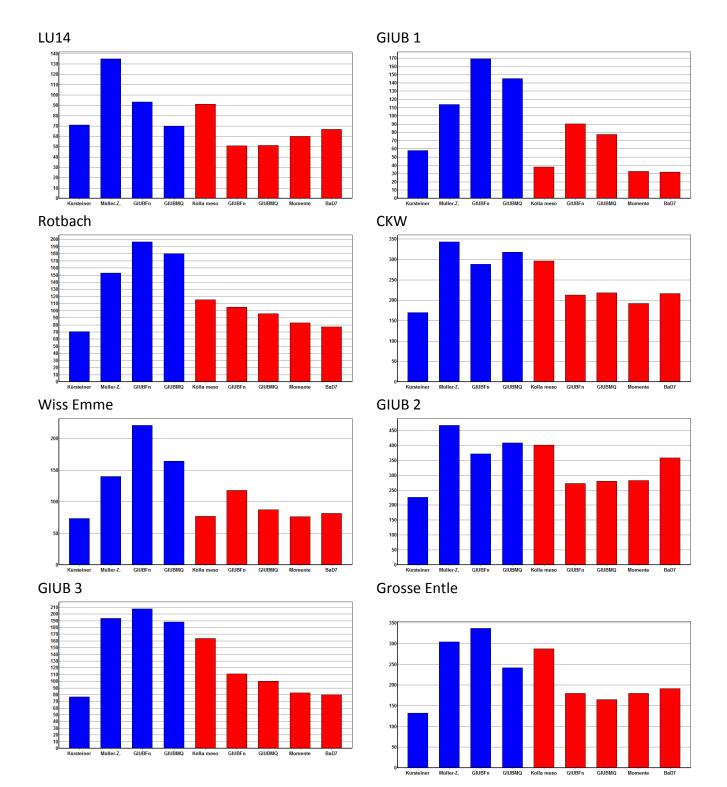
#### 1ère étape : Utilisation de plusieurs méthodes

Les graphes suivants représentent les résultats des débits modélisés avec les 9 méthodes de HQx\_meso\_CH (en bleu les débits maximums (Qmax) et en rouge les débits centennaux (HQ100)) pour chacun des 11 sous-bassins-versants ainsi que le bassin entier.

De gauche à droite les méthodes sont placées comme suit : Kürsteiner, Müller-Zeller, GIUBFn(Qmax), GIUBMQ(Qmax), Kölla meso, GIUBFn(HQ100), GIUBMQ(HQ100), Momente, BaD7.

 $<sup>^7</sup>$  La longueur hydrologique utilisée par (Schaffner, 2007) et celle de (Seyhan, 1976),  $R_{e\_lh} = (2*Fn^{(1/2)}) / (L_h *\pi^{(1/2)})$ , avec  $R_{e\_lh}$  la longueur hydrologique, Fn la surface du bassin-versant,  $L_h$  la longueur hydrologique du bassin

 $<sup>^8</sup>$  (Schaffner, 2007) utilise la formule de (McCuen, 2004)  $L_{\rm l} = (L_{\rm h}*L_{\rm ca})^{0.3}$  avec  $L_{\rm l}$  le facteur de forme, Lh la longueur hydrologique du bassin-versant, Lca la longueur du cours principal jusqu'au point de gravité du bassin.



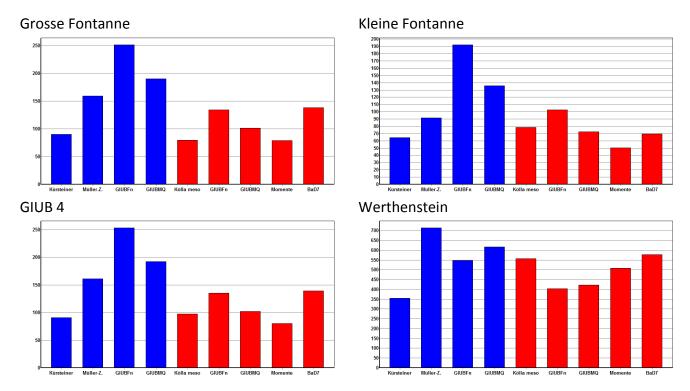


Tableau 30: Graphiques par bassin-versant contenant les résultats de la modélisation avec HQx\_meso\_CH. En bleu : les résultats pour les méthodes estimant le débit maximum et en rouge : pour celles estimant les débits centennaux. Sur l'axe des absices les différentes méthodes, sur l'axe des ordonnées le débit [m³/s].

# 2ème étape : Analyse de la dispersion des résultats

Pour l'analyse de la dispertion des résultats, seules les méthodes qui déterminent le débit maximum (bâtonnets bleus) sont prises en compte et non celles qui déterminent un débit pour un certain temps de retour (30, 100 ans par exemple). Ceci car on cherche à connaître le débit spécifique le plus grand que peuvent engendrer les sous-bassins. Les méthodes qui présentent pour un même sous-bassin un débit maximum avec un écart inférieur à 25% sont concidérées comme du même ordre. La méthode de Kürsteiner n'est pas prise en compte, elle est concidérée comme mauvaise car elle présente un résultat pour le débit maximum qui est la pluspart du temps inférieur aux résultats des méthodes qui présentent le débit d'une crue centenale. Les résultats du débit maximum sont du même ordre pour les sousbassins : Rotbach, CKW, GIUB 2 (Schüpfheim), GIUB 3 (Grosse Entle amont) et Werthenstein (bassin entier). Ces résultats ont donc plus de chance d'être fiables dans ces cas (voir les cartes du tableau 30).

La moyenne des Qmax est pour chaque sous-bassin-versant plus grande que celle des HQ100.

Afin de pouvoir comparer les sous-bassins entre eux, les débits sont divisés par la surface du bassin-versant correspondant pour obtenir les débits spécifiques.

Les cartes suivantes représentent les débits spécifiques (à partir des Qmax) modélisés dans les sous-bassins-versants pour les 4 méthodes Kürsteiner, Müller-Zeller, GIUBFn(Qmax), GIUBMQ(Qmax). Les cercles verts/oranges indiquent que la méthode en question modélise le plus petit/grand débit spécifique. On remarque que la méthode de Kürsteiner (figure 102) représente dans la pluspart des cas le débit maximum le plus faible alors que la méthode GIUB'96 f(Fn) (figure 104) représente dans la pluspart de cas le plus élevé.

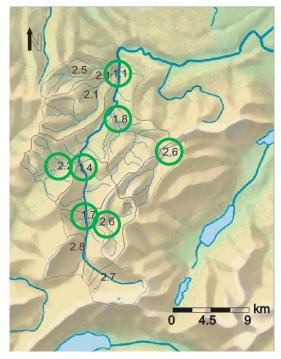


Figure 102 : Carte des débits spécifiques (à partir de Qmax) selon la méthode de Kürsteiner.

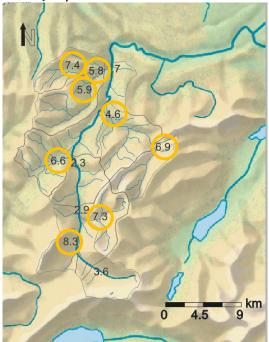


Figure 104: Carte des débits spécifiques (à partir de Qmax) selon la méthode GIUB'96 f(Fn).

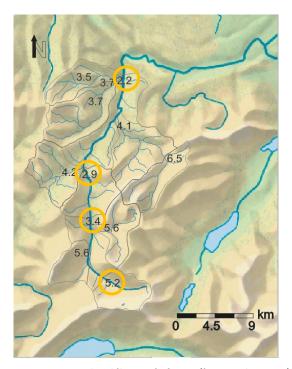


Figure 103: Carte des débits spécifiques (à partir de Qmax) selon la méthode de Müller-Zeller.

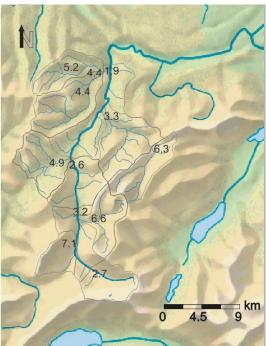


Figure 105: Carte des débits spécifiques (à partir de Qmax) selon la méthode GIUB'96 f(MQ).

# 3ème étape : Corrections, suppression des résultats non plausibles

Les résultats obtenus avec la méthode Kürsteiner donnent, dans la majorité des cas, les résultats les plus petits (figure 102). Étant donné que cette méthode se base sur des débits maximums, il est peu plausible que ces résultats soient inférieurs à ceux modélisés pour des crues centennales. Le débit de pointe est estimé à l'aide d'une courbe de type  $Q_{max}=c*F^{2/3}$ 

avec c, un paramètre de caractérisation du bassin-versant (vallonné, pente, couverture glaciaire) (voir table 3.5 (Barben, 2003)) et F la taille du bassin-versant en kilomètre carré. Selon Spreafico et al. (2003), des erreurs d'estimation importantes de la pointe de crue peuvent se produire pour les bassins présentant de fortes pentes dans leur partie supérieure et des zones plates dans leur partie basse. La pente moyenne qui est à la base de ce modèle n'a pas de grande signification dans ce dernier cas.

De plus, l'écart à la moyenne de toutes les méthodes diminue pour chaque sous-bassin si l'on ne prend pas en compte la méthode Kürsteiner.

Pour ces raisons, cette dernière est écartée pour l'estimation des débits de pointe avec HQx\_meso\_CH.

Dans les autres cas, la dispersion est due le plus souvent à la méthode GIUB Fn, qui présente un débit maximum plus élevé que les autres.

La méthode GIUB'96 Fn peut poser des problèmes dans les régions limitrophes. La Kleine Emme se trouve proche des frontière N1 et N2 (figure 117- 182 -). Le paramètre spécifique de la région a considérablement changé entre les régions N1 (pour Qmax 12.02 et pour HQ100 7.18) et N2 (pour Qmax 23.99 et pour HQ100 17.66), ce qui pourrait influencer le résultat.

La méthode GIUB'96 Fn n'est pas écartée, car pour ce travail ce n'est pas la valeur du débit en soit, mais la valeur relative qui nous intéresse. Cette méthode a tendance à surestimer les débits, ce qui nous place du côté de la sécurité.

# 4ème étape : Détermination de la valeur de HQx, dispersion et validation des résultats.

On obtient, dans le tableau ci-dessous, le débit spécifique estimé à partir de la moyenne arithmétique des débits maximums (sans Kürsteiner). L'étendue de dispersion (qui n'est pas égale à l'intervalle de confiance de l'analyse des valeurs extrêmes) est déterminée par la plus grande et la plus petite des valeurs calculées par l'une des méthodes pour le sous-bassinversant (Spreafico, et al., 2003 p. 72). On ne prend en compte que les méthodes qui déterminent le débit maximum et non celle qui déterminent le débit pour un certain temps de retour (30 ou 100 ans par exemple), car on cherche à connaître le débit maximum que peuvent engendrer les sous-bassins. Ceci afin de déterminer les zones clé.

|                    | Qmax       | (sans Kürste | einer)     |
|--------------------|------------|--------------|------------|
|                    | Min        | Moyenne      | Max        |
|                    | [m3/s*km2] | [m3/s*km2]   | [m3/s*km2] |
| LU14               | 2.7        | 3.8          | 5.2        |
| GIUB1              | 5.6        | 7.0          | 8.3        |
| Rothbach/Seebebach | 5.6        | 6.5          | 7.3        |
| CKW                | 2.9        | 3.2          | 3.4        |
| Wiss Emme          | 4.2        | 5.2          | 6.6        |
| GiUB2              | 2.3        | 2.6          | 2.9        |
| GUIB3              | 6.3        | 6.6          | 6.9        |
| Grosse Entle       | 3.3        | 4.0          | 4.6        |
| Grosse Fontannen   | 3.7        | 4.7          | 5.9        |
| Kleine Fontannen   | 3.5        | 5.4          | 7.4        |
| GIUB4              | 3.7        | 4.7          | 5.8        |
| Bassin entier      | 1.7        | 1.9          | 2.2        |

Tableau 31: Résultats de l'estimation des débits spécifiques maximaux pour chaque sous-bassin-versant avec le domaine de dispersion.

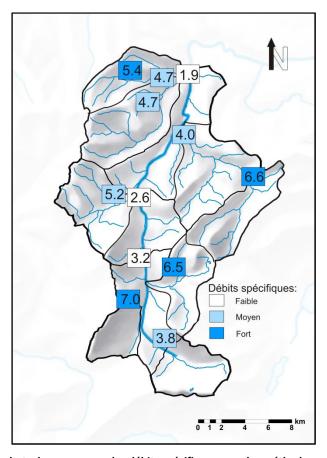


Figure 106: Carte des résultats des moyennes des débits spécifiques pour les méthodes estimant le Qmax (sans la méthode Kürsteiner).

# 5. PREVAH

Les cartes suivantes représentent les débits spécifiques modélisés par PREVAH.

- PREVAH I modélise les débits spécifiques maximaux avec, les moyennes horaire de MétéoSuisse interpolées pour la période 1984-2008, comme données d'entrées pour les précipitations (figure 107).
- PREVAH II modélise les débits spécifiques maximaux avec, les précipitations régionales (moyennes horaire et surfacique) de MétéoSuisse comme données d'entrées, interpolées pour la période 1984-2008 (figure 108).
- PREVAH III modélise les débits spécifiques maximaux avec, les moyennes horaire de MétéoSuisse comme données d'entrées pour les précipitations, interpolées pour la période du 26.06.2009 au 10.10.2009 (figure 109).
- PREVAH IV modélise les débits spécifiques maximaux avec, les moyennes horaire de MétéoSuisse comme données d'entrées pour les précipitations, ainsi que les moyennes horaire des pluviomètres GIUB interpolées pour la période du 26.06.2009 au 10.10.2009 (figure 110).

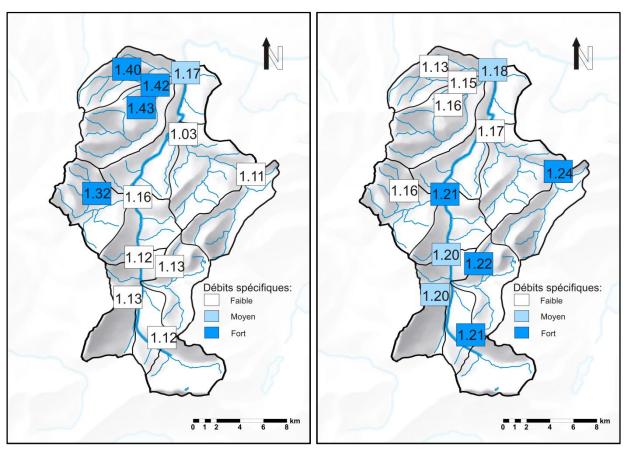


Figure 107: Résultats des débits spécifiques maximum pour PREVAH I (Données MétéoSuisse, période 1984-2008).

Figure 108: Résultats des débits spécifiques maximum pour PREVAH II (Données MétéoSuisse régionales, période 1984-2008).

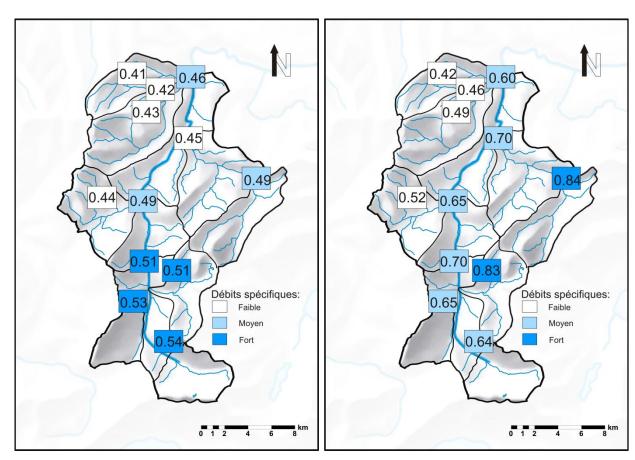


Figure 109: Résultats des débits spécifiques maximum pour PREVAH III (Données MétéoSuisse, période été 2009).

Figure 110: Résultats des débits spécifiques maximum pour PREVAH IV (Données MétéoSuisse + GIUB, période été 2009).

#### VI. Discussion

# PARTIE 1: L'INSTALLATION ET LE CALIBRAGE DES STATIONS DE JAUGEAGE GIUB.

Plus les mesures du débit sont nombreuses <u>et</u> réparties entre petits et grands débits, meilleure sera la courbe de tarage.

Les mesures en basses eaux sont plus faciles à exécuter car

- Il y a moins de courant, les appareils restent en place dans l'eau et il est possible de se déplacer dans le lit.
- L'eau est claire et le traceur est visible (dans le cas d'une mesure à l'uranine).
- If y a moins de bruit pour communiquer.

Les crues sont par définition plus rares que les débits moyens et leur mesure est plus difficile car le débit change plus rapidement en particulier dans le laps de temps proche de la pointe de crue. D'après Lang et al. (2006) dans Hingray et al. (2009 p. 26), la hauteur maximale jaugée correspond le plus souvent à un débit de période de retour inférieur à 10 ans en France. L'exploitation des courbes de tarage en dehors du domaine des débits jaugés peut conduire alors à des erreurs significatives sur l'estimation des débits peu fréquents (de l'ordre de +/- 20% pour le débit centennal).

Actuellement, il n'est pas encore possible de déterminer la courbe de tarage des nouvelles station GIUB avec une précision suffisante. Il est nécessaire de faire plus de mesures en particulier pour les hauts débits. Cela nécessite de faire des mesures sur plus d'une année vu qu'il y a 4 stations et statistiquement pas plus qu'une crue correspondant à un temps de retour de plus d'une année par année (par exemple en 2009). A la station GIUB 2 à Schüpfheim une extrapolation est faite pour les grands débits à l'aide du modèle hydraulique FLORIS. Ce modèle est étalonné avec les mesures du débit que l'on a faite en 2009-2010. Toutefois des mesures du débit faites par hautes eaux (débit entre 75 et 80 m³/s) après l'élaboration de la courbe montrent que la courbe n'est pas correct. Une fois que quelques mesures supplémentaires seront effectuées par hautes eaux, on pourra améliorer la courbe de tarage.

Cependant, une stratégie de mesure est élaborée pour chacune des stations grâce à l'expérience acquise durant l'année 2009 (voir l'annexe A3). Pour faire des mesures de bonne qualité il est important de pouvoir juger correctement entre autre:

- La longueur du tronçon de mélange
- La quantité de traceur nécessaire
- La façon d'introduire le traceur dans l'eau
- Un lieu adapté pour la mesure

L'équipement pour les mesures a été adapté, une tige métallique est maintenant à disposition pour maintenir et protéger les sondes dans l'eau, des nouveaux conductimètres imperméables facilitent les mesures :

- Ils sont imperméables, il n'est plus nécessaire de monter une tente (voir figure 111)
- Ils enregistrent les données automatiquement, il n'est plus nécessaire de prendre l'ordinateur sur le lieu de la mesure
- Ils peuvent être placés à partir des deux rives, il n'est plus nécessaire de traverser le cours d'eau



Figure 111: Montage d'une tente pour protéger les appareils de mesure pour la dilution au sel.

Le plus efficace est de mesurer les hauts débits en période de fonte de la neige. Cette période présente plusieurs avantages

• Le débit change moins rapidement et est régulier avec le changement jour/nuit.

- La pointe de crue arrive en fin d'après-midi après une journée d'ensoleillement.
- Par ailleurs, la neige fond plus rapidement lorsque la température s'élève et le rayonnement augmente, ces conditions sont plus agréables et facilitent grandement les mesures.

Par contre, les plus grandes crues ne se passent pas toujours en période de fonte.

Ueli Schneider, étudiant en master, et Andreia Koller, engagée pour les travaux de terrain durant l'été 2010, prennent le relais pour l'entretien des stations et les mesures du débit. Les visites sur le terrain sont aussi nécessaires pour la sauvegarde des données et le nettoyage des sondes. L'image ci-dessous montre un tas de feuilles et de brindilles accroché à la station GIUB 2. Après une montée du débit, une veste remplie de sable est venue se bloquer contre la station. Ces événements peuvent perturber le fonctionnement des sondes.



Figure 112: Feuilles et brindilles accrochées à la station GIUB 2.

# Partie 2 : L'analyse des hydrogrammes de crues de la station de Werthenstein pour les plus grandes crues de la période 1984-2008.

Dans ce chapitre, l'hydrogramme typique d'une crue à la station de Werthenstein est caractérisé. L'analyse se base sur les 20 plus grandes crues de la série partielle pour la période 1984-2009. La théorie sur laquelle cette analyse est basée, est décrite dans le chapitre 5, p. - 34 -. Les résultats sont résumés dans le tableau 32.

#### 1. HYDROGRAMME

La courbe de montée de l'hydrogramme de crue à la station Werthenstein est souvent rapide. Cette partie de la courbe reflète les caractéristiques topographiques du bassin et les précipitations. Le bassin-versant réagit très vite suite aux précipitations. Le temps de montée moyen pour une crue de type « longue pluie » est de 23 heures (rapidité moyenne selon le tableau 11), et de 8.6 heures pour les types « courte pluie » et « averse » (rapide selon le tableau 11).

La pointe de crue est double pour deux cas. Dans plusieurs événements, un ou plusieurs pic(s) avant et/ou après le pic principal apparaissent. Ces phénomènes sont dus aux précipitations et à leur déplacement au-dessus du bassin et à la forme du bassin-versant et de ses affluents.

La courbe de décrue ne dépend plus des précipitations mais des caractéristiques physiques du réseau hydrographique. Le débit diminue rapidement après le pic. Cela signifie que l'écoulement est rapide, donc de surface. L'eau est rapidement drainée dans les cours d'eau. L'eau s'infiltre peu, le bassin-versant a une faible capacité de rétention hydraulique.

Pour quelques crues, il est possible de distinguer la courbe de décrue de la courbe de tarissement. Sur l'hydrogramme, visuellement, il s'agit du point d'inflexion où la pente change d'angle. Le débit diminue moins rapidement sur la courbe de tarissement. Cette dernière est générée uniquement par les écoulements souterrains lorsque l'écoulement de surface est terminé.

Le tableau 33 présente une vue d'enseble pour les 20 plus grandes crues indépendantes des types de précipitations déclancheurs selon la méthode de Diezig et l'OFEV, du coefficient de ruissellement, de la distinction entre courbe de décrue et courbe de tarrissement, du temps de montée, et de apparition ou non d'un plateau, d'un second pic ou d'un double pic.

|            |       |           | Type selon la     |                   |             | Distinction  |        | Temps  |         |         |       |       |        |
|------------|-------|-----------|-------------------|-------------------|-------------|--------------|--------|--------|---------|---------|-------|-------|--------|
|            |       |           | méthode de        |                   | Coef. ruis- | décrue-      | Temps  | montée | Plateau | Plateau | Pic   | Pic   | Double |
| Date       | Heure | Saison    | Diezig            | Type selon I'OFEV | sellement   | tarrissement | montée | pic    | après   | avant   | avant | après | pic    |
|            |       |           |                   |                   |             |              | [h]    | [h]    |         |         |       |       |        |
| 21/08/2005 | 20:58 | Eté       | Longue pluie      | Pur longue pluie  | 0,36        |              | 9      |        | Χ       |         |       | Х     |        |
| 16/07/2002 | 00:53 | Eté       | Courte pluie      | Pur longue pluie  | 0,45        | X            | 7      |        |         |         |       |       |        |
| 08/08/2007 | 19:55 | Eté       | Longue pluie      | Pur longue pluie  | 0,34        |              | 24     |        | Χ       |         | Х     |       |        |
| 12/06/1997 | 03:33 | Printemps | Courte pluie      | Pur averse        | 0,27        | Х            | 10     |        |         |         |       |       |        |
| 19/07/2008 | 07:05 | Eté       | Averse            | Pur averse        | 1,50        |              | 14     |        | Χ       |         | Х     | Х     |        |
| 02/06/2004 | 01:35 | Printemps | Longue pluie      | Pur longue pluie  | 0,28        |              | 14     |        | Х       |         | Х     | Х     |        |
| 02/08/1996 | 18:43 | Eté       | Courte pluie      | Pur averse        | 0,49        | Х            | 5      |        |         |         |       | Х     |        |
| 13/01/2004 | 16:25 | Hiver     | Longue pluie      |                   | 0,51        |              | 48     | 10     | Х       | Х       |       |       |        |
| 14/07/2008 | 08:15 | Eté       | Longue pluie      |                   | 0,50        |              | 40     |        |         | Х       | Χ     |       |        |
|            |       |           |                   | Longue pluie avec |             |              |        |        |         |         |       |       |        |
| 06/08/2000 | 04:13 | Eté       | Longue pluie      | averse            | 0,40        |              | 20     |        |         | Х       |       |       |        |
| 21/07/2007 | 21:55 | Eté       | Courte pluie      |                   | 0,37        | Х            | 7      |        |         | Х       |       |       |        |
| 21/07/1992 | 19:03 | Eté       | Averse            | Pur averse        | 0,27        | Х            | 3      |        | Х       |         |       | Х     |        |
|            |       |           |                   | Fonte + longue    |             |              |        |        |         |         |       |       |        |
| 19/12/1987 | 05:31 | Automne   | Pluie sur neige   | pluie             | 0,55        |              | 36     |        | Х       |         |       |       |        |
| 11/08/2002 | 20:13 | Eté       | Longue pluie      |                   | 0,33        | Х            | 14     |        |         |         | Х     |       | Х      |
| 25/05/1990 | 10:01 | Printemps | Courte pluie      | Pur longue pluie  | 0,37        |              | 13     |        |         | Х       |       |       |        |
| 19/05/1994 | 02:45 | Printemps | Longue pluie      | Pur longue pluie  | 0,36        |              | 23     |        |         | Х       |       |       |        |
| 04/07/2007 | 03:35 | Eté       | Courte pluie      |                   | 1,09        |              | 12     |        | Х       |         |       |       |        |
|            |       |           | Pluie sur neige + |                   |             |              |        |        |         |         |       |       |        |
| 14/02/1990 | 08:58 | Hiver     | Longue pluie      |                   | 0,26        |              | 10     |        | Х       |         |       |       |        |
| 16/07/2001 | 01:03 | Eté       | Longue pluie      | Pur longue pluie  | 0,21        |              | 28     | 14     |         |         | Χ     |       |        |
| 10/10/1988 | 10:03 | Automne   | Courte pluie      | Pur longue pluie  | 0,39        |              | 6      |        | Х       |         |       |       | Х      |

Tableau 32: Résumé de quelques éléments de description de crue.

Le coefficient de ruissellement correspond à la lame d'eau écoulée sur la lame d'eau précipitée. En général, il est légèrement inférieur à 1. La réponse rapide de l'hydrogramme et surtout la diminution rapide du débit après le pic laissent sous-entendre que le bassin stocke très peu d'eau. On s'attend alors à un coefficient de ruissellement élevé (proche mais inférieur à 1). Avec une moyenne de 0.5, il semble un peu bas pour le bassin-versant de la Kleine Emme.

#### 2. Type de crue

Le type de crue est déterminé selon la méthode Diezig (2006). La répartition du type de crue dans l'année est représentée dans la figure 113 et la proportion du type de crue dans la figure 114.

Les 20 plus grandes crues de la série partielle se sont produites aux mois de juillet et août. Les types « averse », « courte pluie » et « longue pluie » on eu lieu lors de ces deux mois. En hiver, le type « pluie sur neige » a été repéré deux fois dans les plus grandes crues.

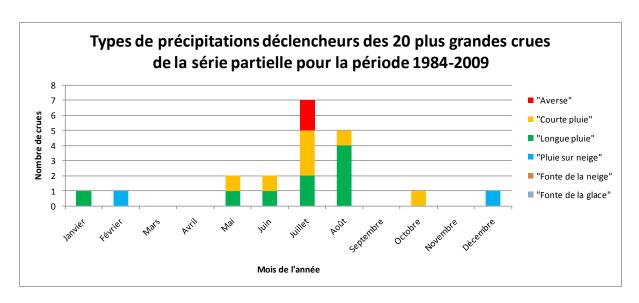


Figure 113: Répartition annuelle des types de précipitations déclencheurs de crues pour les 20 plus grandes crues de la période 1984-2009 selon la méthode de Diezig (2006).

45% des 20 plus grandes crues de la série partielle ont lieu suite à des précipitations de type « longue pluie ». Les autres se répartissent de la manière suivante :

- 35% de type « courte pluie »
- 10% de type « averse »
- 10% de type « pluie sur neige »

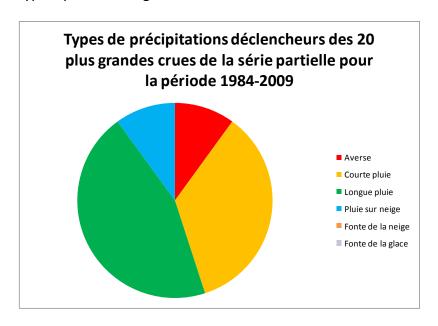


Figure 114: Répartition de la proportion des types de précipitations qui ont déclenché les 20 plus grands événements de la série partielle (1984-2009).

Une méthode de détermination du type de crue a également été développée à l'OFEV (Helbling, et al., 2006). La Division Hydrologie de l'OFEV nous a fourni leurs résultats pour le bassin-versant de la Kleine Emme. Dans leur travail, les crues maximales annuelles sont

étudiées alors que nous avons choisi une série partielle. Ce qui explique pourquoi nous n'avons pas traité exactement les mêmes crues. En comparant les résultats, pour les crues étudiées avec les deux méthodes, 3 cas (16.07.2002/ 25.05.1990/ 10.10.1988) donnent des résultats différents. Ces 3 cas sont brièvement discutés dans le chapitre Résultats.

D'une façon générale, il reste une part de subjectivité dans la méthode de détermination du type de crue, malgré le fait qu'un certain nombre de critères soient définis. Les principales sources d'erreurs sont :

- La détermination du début et de la fin du débit direct et des précipitations
- Le fait de débuter l'estimation par le temps de montée. Il faudrait tester une méthode dont le déroulement commence par l'intensité maximale des précipitations par exemple et non par le temps de montée du débit.

Le site du Service Environnement et Energie (Umwelt+Energie) du Canton de Lucerne (UWE, 2010) résume ce qui est expliqué dans ce chapitre dans un passage qui concerne la Kleine Emme: "Die Kleine Emme ist ein Wildbach mit normalerweise geringer Wasserführung und starkem Anschwellen bei Starkniederschlägen. Die lehmigen Flyschböden des Entlebuchs halten nur wenig Wasser zurück".

# PARTIE 3: L'ANALYSE DES ÉVÉNEMENTS DE L'ÉTÉ 2009.

La même analyse que dans la partie 2 est élaborée pour les événements de l'été 2009. Les nouvelles stations de mesure des précipitations et du débit nous permettent une analyse plus détaillée de l'hydrologie dans le bassin-versant.

#### 3. Hydrogramme

Comme pour les crues présentées dans la partie 2, les hydrogrammes de l'été 2009 montrent une montée rapide du débit suite aux précipitations. La moyenne du temps de montée pour les événements de l'été 2009 est de 05:53, sans compter l'événement du 17.07.2009 de type « longue pluie », et 06:38 avec. D'après le tableau 11, cela correspond à une montée « rapide ». Le tableau 33 résume quelques éléments de description de crues.

Le coefficient de ruissellement est en moyenne de 0.63. Cette valeur semble plus adéquoite que le 0.5 obtenu avec les 20 plus grandes crues. Les pluviomètres ajoutés dans le bassin d'étude durant l'été 2009 améliorent l'interpolation des précipitations. Cependant, il reste une partie de subjectivité dans le choix du début et de la fin des précipitations et du débit qui influence le coefficient de ruissellement.

| Rang | Date       | Heure | Débit<br>[m3/s] | Туре         | Coef.<br>Ruissel-<br>lement | Temps<br>montée<br>[h] | Temps<br>montée<br>pic<br>[h] | Distinction<br>décrue-<br>tarissement | Plateau<br>après | Plateau<br>avant | Pic avant  | Pic après  | Double pic | Sommet<br>plat |
|------|------------|-------|-----------------|--------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|----------------|
| 1    | 17/07/2009 | 19:03 | 177,788         | Longue pluie | 1,3                         | 14:56                  | 03:00                         |                                       | X                |                  | Х          | Х          |            |                |
| 2    | 28/07/2009 | 01:59 | 106,017         | Averse       | 0,36                        | 05:02                  | 03.00                         | Х                                     | Α                |                  |            | Α          |            |                |
| 3    | 15/07/2009 | 08:35 | 93,546          | Averse       | 0,37                        | 02:24                  |                               |                                       |                  |                  |            |            |            |                |
| 4    | 05/09/2009 | 00:41 | 52,172          | Averse       | 0,7                         | 09:00                  |                               |                                       |                  |                  |            |            | Х          |                |
| 5    | 03/08/2009 | 20:01 | 52,055          | Courte pluie | 1,3                         | 09:00                  | 08:00                         |                                       |                  |                  | Х          |            |            |                |
| 6    | 08/08/2009 | 13:35 | 49,358          | Averse       | 0,3                         | 04:35                  | 03:30                         |                                       |                  |                  | Х          |            |            |                |
| 7    | 03/07/2009 | 16:51 | 43,064          | Averse       | 0,6                         | 08:16                  | 02:00                         |                                       |                  | Χ                | Χ          |            |            |                |
| 8    | 26/06/2009 | 12:51 | 37,101          | Averse       | 1,2                         | 02:50                  |                               |                                       |                  |                  |            |            |            |                |
| 9    | 10/10/2009 | 14:03 | 31,478          | Averse       | 0,3                         | 09:28                  |                               | Χ                                     |                  |                  |            |            |            | Χ              |
| 10   | 03/09/2009 | 06:23 | 31,103          | Averse       | 0,3                         | 05:32                  |                               |                                       |                  |                  | 02/09/2009 |            |            |                |
| 11   | 11/08/2009 | 00:14 | 27,002          | Averse       | 0,76                        | 05:06                  |                               |                                       |                  |                  |            | Х          |            |                |
| 12   | 02/09/2009 | 17:21 | 26,209          | Averse       | 0,1                         | 03:30                  |                               |                                       |                  |                  |            | 03/09/2009 |            |                |

Tableau 33: Résumé de quelques éléments de description de crues.

Les proportions du volume de crue de Werthenstein aux stations à Sörenberg (LU14), Flühli (CKW) et Schüpfheim (GIUB 2) sont résumées dans le tableau 34. En moyenne, pour les quelques événements de l'été 2009 mesurés à Schüpfheim, la proportion du volume de crue de Werthenstein est de 44%. Elle est de 42% à la station CKW. Le reste du volume de crue à

Werthenstein provient vraisemblablement en grande partie de la Grosse Entle et une petite partie des Grosse et Kleine Fontannen. Le sous-bassin-versant de Sörenberg contribue à lui seul, en moyenne pour les 10 événements mesurés durant l'été 2009, à 13% du volume de crue de Werthenstein.

|            | Proportion du volume de   | Proportion du volume de  | Proportion du volume de  |
|------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
|            | crue de Werthenstein à la | crue à Werthenstein à la | crue à Werthenstein à la |
| Date       | station à Sörenberg       | station à Schüpfheim     | station CKW à Flühli     |
| 17.07.2009 | 13%                       | X                        | 29%                      |
| 28.07.2009 | 11%                       | 32%                      | 20%                      |
| 15.07.2009 | 2%                        | X                        | 22%                      |
| 04.09.2009 | 10%                       | 43%                      | 28%                      |
| 03.08.2009 | 10%                       | 37%                      | 25%                      |
| 08.08.2009 | Х                         | 51%                      | 33%                      |
| 03.07.2009 | 26%                       | X                        | 99%                      |
| 26.06.2009 | 26%                       | X                        | 84%                      |
| 10.10.2009 | 6%                        | 50%                      | 31%                      |
| 03.09.2009 | 2%                        | 7%                       | 24%                      |
| 11.08.2009 | 27%                       | 88%                      | 71%                      |
| 02.09.2009 | Х                         | 47%                      | 25%                      |
| MOYENNE    | 13%                       | 44%                      | 42%                      |

Tableau 34: Proportion du volume de crue de Werthenstein aux stations à Sörenberg, CKW et Schüpfheim.

# 4. TEMPS DE PARCOURS ENTRE LES STATIONS

| Evénements   | LU14-W  | CKW-W   | GIUB 1 - W | GIUB 2- W | GIUB 3 - W | GIUB 4 - W |
|--------------|---------|---------|------------|-----------|------------|------------|
| [jj.mm.aaaa] | [hh:mm] | [hh:mm] | [hh:mm]    | [hh:mm]   | [hh:mm]    | [hh:mm]    |
| 17.07.2009   | 00:47   | 00:59   | 00:42      | Χ         | Х          | 00:33      |
| 28.07.2009   | 00:51   | 00:11   | 00:09      | 00:41     | Х          | 00:23      |
| 15.07.2009   | 01:25   | 01:15   | Х          | Χ         | Х          | 00:45      |
| 05.09.2009   | 01:20   | 01:11   | 01:30      | 01:06     | 01:50      | 00:50      |
| 03.08.2009   | 03:10   | 00:09   | 02:20      | 01:10     | Х          | 00:16      |
| 08.08.2009   | 00:45   | 00:05   | 01:00      | 01:15     | Х          | 01:10      |
| 03.07.2009   | 00:51   | 10:01   | Χ          | Χ         | Х          | Х          |
| 26.06.2009   | 02:00   | 01:09   | Χ          | Χ         | Χ          | Х          |
| 10.10.2009   | 01:13   | 01:28   | 01:43      | 00:33     | 04:33      | 02:03      |
| 03.09.2009   | 00:40   | 01:23   | 00:23      | 00:38     | 01:33      | 00:53      |
| 11.08.2009   | 04:16   | 04:34   | 03:41      | 04:50     | Х          | 00:54      |
| 02.09.2009   | 02:30   | 02:12   | 02:50      | 01:15     | Х          | 01:36      |
|              | 01:21   | 01:24   | 01:36      | 00:59     | 01:41      | 00:39      |

Tableau 35: Temps de parcours entre chacune des stations et la station de Werthenstein (W) pour les événements de l'été 2009. En bleu les temps pour lesquels le pic à la station dans le bassin-versant est arrivé avant celui de la station Werthenstein; en rouge les temps pour lesquels le pic à la station dans le bassin-versant est arrivé après celui de la station Werthenstein.

Les temps moyens de transit entre une station à l'intérieur du bassin-versant et la station de Werthenstein sont calculés pour les événements de l'été 2009 (tableau 35). Seuls les événements pour lesquels les pics sont arrivés en premier à la station à l'intérieur du bassin, puis à la station Werthenstein, sont pris en compte.

#### Entre la station LU14 à Sörenberg et la station de Werthenstein :

Le temps de transit moyen est de **01:21** (les événements pris en compte sont 15.07.2009/05.09.2009/03.07.2009/10.10.2009).

# Entre la station GIUB 1 à Flühli et la station de Werthenstein :

Le temps de transit moyen est de **01** :**36** (les événements pris en compte sont 05.09.2009 et 10.10.2009). Les événements du 28.07.2009 et du 03.09.2009 ne sont pas pris en compte, car le débit de la stations GIUB 1 n'a vraisemblablement pas participé au pic de la station Werthenstein.

#### Entre la station CKW à Flühli et la station de Werthenstein:

Le temps de transit moyen est de **01 :24** (les événements pris en compte sont 17.07.2009/ 15.07.2009/ 05.09.2009/ 10.10.2009/ 03.09.2009/ 02.09.2009)

#### Entre la station GIUB 2 à Schüpfheim et la station de Werthenstein :

Le temps de transit moyen est de **00 :59** (les événements pris en compte sont (05.09.2009/03.08.2009/08.08.2009/10.10.2009/03.09.2009/02.09.2009).

## Entre la station GIUB 3 et la station de Werthenstein :

Le temps de transit moyen est de **01** :**41** (les événements pris en compte sont 05.09.2009 et 03.09.2009). L'événement du 10.10.2009 n'est pas pris en compte, car les précipitations sont tombées en deux vagues. Le pic de GIUB 3 est formé par la première et celui de Werthenstein par la deuxième vague.

#### Entre la station GIUB 4 et la station Werthenstein :

Le temps de transit moyen est de **00 :39** (tous les événements sont pris en compte, sauf le 03.07.2009 et le 26.06.2009 pour lesquels nous ne disposons pas de donnée. L'événement

du 10.10.2009 n'est pas non plus pris en compte, car le pic à la station GIUB 4 est engendré par une première vague de pluie particulièrement intense sur le bassin de cette station, alors que celui de Werthenstein a été engendré aussi par le reste de la pluie. L'événement du 08.08.2009 n'est pas pris en compte, car la station GIUB 4 a réagi rapidement aux précipitations abondantes qui ont eu lieu dans les hauts des bassins des deux Fontannen, alors que le pic de Werthenstein a eu lieu seulement une fois que les autres parties du bassin aient réagi. On ne peut donc pas calculer le temps de transit directement sur cet événement. Celui du 02.09.2009 non plus, car le pic de Werthenstein est également influencé par les précipitations qui ont duré plus longtemps dans le sud du bassin et qui n'ont pas touché le bassin des deux Fontannen.

Il est étonnant que les temps de transit de l'eau entre les stations GIUB 1 (Südelgraben) et Werthenstein ainsi que CKW (Flühli) et Werthestein soient plus longs que celui depuis la station LU14 (Sörenberg), qui est pourtant presque 5 km respectivement 9 km plus en amont que GIUB 1, respectivement CKW.

Il y a deux explications possibles :

- Le temps de transit n'est pas une valeur fixe. Il dépend de la quantité d'eau qui s'écoule ; plus le débit est grand, plus la vitesse d'écoulement dans le lit augmente.
- Les valeurs calculées ci-dessus sont des moyennes basées sur très peu d'événements.

Malgré la courte distance (~1 km) qui sépare la station GIUB 4 et la station Werthenstein, le temps de transit est relativement long avec 00:39. Cela correspond à une vitesse d'écoulement faible d'environ 1.5 km/h. Lors des mesures du débits à l'uranine à Schüpfheim, le traceur met environ voir moins de 20 minutes pour une distance de 1.5 km. On s'attend plutôt à un temps de transit de l'ordre d'une vingtaine de minutes entre GIUB 4 et Werthenstein. La distance est plus petite mais la vitesse d'écoulement est plus faible (car le débit est moins grand et la pente n'est pas plus raide). L'eau en provenance du bassinversant GIUB 4 arrive vraisemblablement à Werthenstein avant que le pic soit atteint à cette dernière station. Cela explique le temps de transit surestimé entre ces deux stations. Le petit pic qui a souvent lieu à la station de Werthenstein avant la pointe maximale n'est pas engendrée par le sous-bassin-versant de GIUB 4. Ce petit pic est souvent également visible à la station GIUB 4. Il est engendré par les précipitations.

### 5. TEMPS DE CONCENTRATION

L'eau s'écoule toujours de l'amont vers l'aval par force de gravité, mais plusieurs facteurs, décrits au chapitre 5 p.- 34 -, influencent la rapidité de l'écoulement.

Le temps de concentration, c'est-à-dire le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée de l'exutoire pour parvenir à celui-ci, peut être déterminé empiriquement. Ce temps n'est pas un valeur fixe, il varie avec le niveau d'eau car le rayon hydraulique et la rugosité en dépendent (Musy, et al., 2009 p. 299). Les valeurs déterminées dans ce chapitre sont indicatives.

Quelques-unes des formules qui déterminent le temps de concentration sont décrites au chapitre 5 p.- 34 -. Les résultats pour chaque sous bassin-versant se trouvent dans le tableau 36.

| Méthode | Unité | Werthen-<br>stein | LU 14 | GIUB 1 | Rotbach | CKW  | Wiss<br>Emme | GIUB 2 | GIUB 3 | Grosse<br>Entle | Grosse<br>Fontanne | Kleine<br>Fontanne | GIUB 4 |
|---------|-------|-------------------|-------|--------|---------|------|--------------|--------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|--------|
| Dyck    | [h]   | 0.78              | 0.18  | 0.20   | 0.24    | 0.38 | 0.23         | 0.52   | 0.23   | 0.49            | 0.42               | 0.32               | 0.42   |
| Diezig  | [h]   | 14.91             | 5.94  | 5.38   | 6.14    | 9.70 | 6.49         | 11.38  | 6.33   | 8.82            | 7.21               | 6.00               | 8.49   |
| Kreps   | [h]   | 8.69              | 2.94  | 2.61   | 3.05    | 5.26 | 3.27         | 6.34   | 3.17   | 4.70            | 3.70               | 2.97               | 4.49   |
| Kirpich | [h]   | 3.71              | 0.70  | 0.62   | 0.83    | 1.64 | 1.10         | 2.39   | 0.85   | 2.05            | 1.61               | 1.27               | 1.63   |

Tableau 36: Résultats des temps de concentration pour chaque sous bassins-versants avec les méthodes de Dyck (1989), Diezig (2006), Kreps et Kirpich (1940).<sup>9</sup>

Les résultats sont très éparses car les formules utilisent des coefficients très différents. La formule de Kirpich (1940) est la plus appropriée, avec celle de Dyke (1989), elle est la seule à utiliser la longueur du bassin-versant ainsi que la différence de hauteur dans le bassin-versant. Kirpich (1940) utilise la longueur et la différence de hauteur du cours d'eau principal alors que Dyke (1989) prend en compte le point le plus éloigné de l'exutoire sur la ligne de partage des eaux et la différence de hauteur entre le point le plus haut du bassin-versant et l'exutoire. Cette dernière façon de faire est vraisemblablement moins adaptée pour notre bassin-versant. Le point le plus éloigné et celui le plus haut ne sont pas forcément

1:25'000.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> La taille du bassin-versant est celle calculée et utilisée dans PREVAH, la longueur du cours d'eau et du bassin-versant sont déterminées à l'aide de l'outil de mesure du programme GIS à une échelle de 1:25'000, et les altitudes sont lues sur une carte topographique au

représentatifs; la différence de hauteur, en particulier, peut être trop exagérée. Les autres formules se basent uniquement sur la taille du bassin-versant et comme expliqué au chapitre 5 p. - 34 -, la forme du bassin-versant joue un rôle important sur la fonction de transfert. Plus le chemin à parcourir est long, plus il faudra de temps à l'eau pour parcourir le trajet.

#### 6. Type de crue

Le type de crue est aussi déterminé avec la méthode de Diezig (2006) pour les 12 événements de l'été 2009. Les résultats sont présentés dans la figure 115.

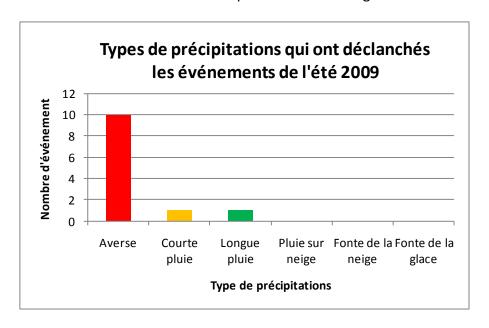


Figure 115: Types de précipitations qui ont déclenché les événements de l'été 2009.

Source des données de bases : OFEV.

Une crue ayant un temps de retour plus grand qu'une année a eu lieu en 2009, le 17.07.2009. Elle est déclenchée par des précipitaitons de type « longue pluie » comme la majorité des 20 crues de la série partielle. Les autres événements sont déclenchés par des précipitations de type « averse », sauf le 03.08.2009 par le type « courte pluie ».

#### 7. LE CAS DE FONTANNE

Comme expliqué au chapitre 5.1.2 p.- 61 -, la station GIUB 4 est trop proche de la station de Werthenstein pour pouvoir l'utiliser directement pour la prévision. L'idée est ici de comprendre la réaction des bassins-versants Grosse et Kleine Fontannen à l'aide du pluviomètre E et de la station de jaugeage GIUB 4. Par la suite, la station de jaugeage sera supprimée et la prévision sera basée uniquement sur le pluviomètre.

Après un été de mesures les résultats présentés dans le tableau 37, ne sont pas satisfaisants. Trop peu d'événements ont pu être mesurés avec le pluviomètre et la station de jaugeage à la fois. D'une part parce que la période durant laquelle les mesures ont été faites est très courte, il ne se passe pas forcément plusieurs crues et d'autre part du fait que les données du pluviomètre avant le 31.08.2009 ne sont pas utilisables (Riedener, 2010).

Pour les événements du tableau 37, deux valeurs sont calculées :

- Le temps de réaction : temps entre le début des précipitations sur le pluviomètre E et de la première réaction du débit à la station GIUB 4.
- Le temps entre le début des précipitations sur le pluviomètre E et du pic à la station
   GIUB 4.

Etant donné que le pluviomètre E a réagi après le débit pour les 4 cas étudiés, le temps entre le début des précipitations et le pic est calculé pour augmenter la précision des mesures. Bien que ce phénomène soit inattendu, il est possible que le débit réagisse avant le pluviomètre dans le cas où les précipitations sont très locales, par exemple localisées sur le haut du bassin-versant.

Le temps entre le début des précipitations sur le pluviomètre E et le pic à la station GIUB 4 n'est pas satisfaisant non plus, car il est très diffu (différence de plus de 10 h).

Afin de pouvoir tout de même tenté une interprétation, les mêmes différences de temps sont calculées avec le pluviomètre de MétéoSuisse le plus proche à Napf. Malheureusement, ces données ne sont pas utilisables non-plus, car la corrélation (pour la période 31.08.2009 au 12.10.2009) entre les deux pluviomètres (E et Napf) est mauvaise (Riedener, 2010). Le coefficient de corrélation est de 0.004 pour une résolution de 10 min. Cette corrélation extrêmement faible s'explique par le fait que les précipitations locales ne sont pas mesurées simultanément aux deux stations. Le pas de temps de 10 min est trop précis pour cette opération de corrélation. Le coefficient de corrélation est de 0.63 pour une résolution de 1 h, ce qui n'est pas suffisant pour affirmer que le pluviomètre de Napf représente correctement les précipitations dans le bassin GIUB 4.

Il est intéressant d'étudier encore pendant une durée d'une année la relation entre le pluviomètre et la station de jaugeage, afin de pouvoir analyser un plus grand nombre d'événements. Si les résultats ne sont pas plus significatifs, les données des précipitations radar peuvent alors éventuellement aider. Les données du radar n'ont pas besoin d'être

interpolées ce qui pourrait éliminer des erreurs. Par contre, le radar ne donne que des informations concernant la quantité d'eau tombée mais pas l'intensité. Des pluviomètres au sol pourraient compléter les données du radar.

|           |                  |                   | ,           |                     |             |             |             |            |
|-----------|------------------|-------------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
|           |                  | Temps de réaction |             | Temps début P - pic |             | - (1        | - (1        |            |
|           |                  |                   | Pluviomètre |                     |             |             | Début P     |            |
| Nr.       | Date et heure    | GIUB - Q          | Napf - Q    | GIUB -> pic         | Napf -> pic | pluviomètre | pluviomètre |            |
| événement | du pic à GIUB 4  | GIUB 4            | GIUB 4      | GIUB 4              | GIUB 4      | GIUB        | Napf        | Réaction Q |
|           |                  | [hh:mm]           | [hh:mm]     | [hh:mm]             | [hh:mm]     | [hh:mm]     | [hh:mm]     | [hh:mm]    |
| 1         | 17.07.2009 18:30 | Х                 | 01:40       | Χ                   | 15:50       | X           | 02:40       | 04:20      |
| 2         | 28.07.2009 01:35 | Х                 | 01:10       | X                   | 06:15       | X           | 19:20       | 20:30      |
| 3         | 15.07.2009 07:50 | Х                 | 02:10       | X                   | 03:40       | Χ           | 04:10       | 06:20      |
| 4         | 04.09.2009 23:50 | 00:35             | 01:25       | 11:10               | 13:10       | 12:40       | 10:40       | 12:05      |
| 5         | 03.08.2009 19:45 | Х                 | 04:50       | X                   | 14:25       | X           | 05:20       | 10:10      |
| 6         | 08.08.2009 12:25 | Х                 | 01:45       | X                   | 05:05       | X           | 07:20       | 09:05      |
| 7         | X                | Х                 | Х           | X                   | X           | X           | X           | X          |
| 8         | X                | Х                 | Х           | X                   | X           | X           | X           | X          |
| 9         | 10.10.2009 10:00 | 00:45             | 01:25       | 04:50               | 07:00       | 05:10       | 03:00       | 04:25      |
| 10        | 03.09.2009 05:30 | 00:50             | 00:05       | 03:45               | 04:30       | 01:45       | 01:00       | 00:55      |
| 11        | 10.08.2009 23:20 | Х                 | 01:10       | Χ                   | 08:20       | Χ           | 15:00       | 16:10      |
| 12        | 02.09.2009 15:45 | 00:50             | 01:20       | 01:05               | 03:15       | 14:40       | 12:30       | 13:50      |

Tableau 37: Temps de réaction et temps entre le début de la mesure de précipitations aux stations E (GIUB) et Napf (MétéoSuisse). La légende se trouve dans le tableau 38. Source des données : MétéoSuisse et OFEV.

## Légende:

| 00:00 | Q réagit avant P           |  |  |  |  |
|-------|----------------------------|--|--|--|--|
| Х     | Pas de données disponibles |  |  |  |  |
| Р     | Précipitations             |  |  |  |  |
| Q     | Débit                      |  |  |  |  |

Tableau 38: Légende du tableau 37.

PARTIE 4: LA DÉTERMINATION DES ZONES CLÉ.

Dans cette partie, il s'agit d'évaluer quelles sont les zones clé d'après les résultats obtenus à

l'aide de la modélisation avec HQx\_meso\_CH et PREVAH.

8. HQx\_meso\_CH Qmax :

Etant donné que le travail est basé sur l'étude de crues et que l'on cherche le débit

spécifique maximum avec lequel un sous-bassin peut répondre à une précipitation, les

résultats analysés sont ceux qui déterminent le débit maximum (Qmax).

Les résultats de HQx\_meso\_CH pour les débits maximums se basent sur trois méthodes :

Müller-Zeller, GIUB(Fn), GIUB(MQ). Les deux sous-chapitres suivants sont inspirés de Barben

(2003). Pour plus d'informations, il est possible de consulter cette source.

8.1. LA MÉTHODE MÜLLER-ZELLER

Müller et Zeller proposent la formule suivante:

 $Q_{\text{max}} = \alpha^* \Psi^* F^{2/3}$ 

Avec:

 $\alpha$ : le coefficient de zone [-]

Ψ : le coefficient d'écoulement [-]

F: la surface du bassin-versant [km²]

Zeller (1975) a élaboré une carte représentant les zones de fortes précipitations en Suisse

avec trois valeurs pour  $\alpha$  ( $\alpha$  = 20, 35, 50) (voir figure 116). On remarque que le bassin-

versant de la Kleine Emme se situe dans une zone avec des fortes précipitations.

- 180 -

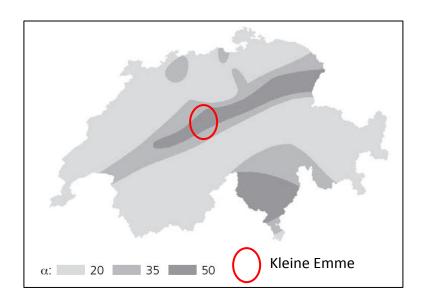


Figure 116: Carte des zones correspondantes aux fortes précipitations selon Zeller (Spreafico, et al., 2003 p. 58).

Le programme HQx\_meso\_CH se base sur les données de la « Statistique de la superficie » (OFS, 1985) pour les données de l'occupation du sol et combinées avec la pente, on obtient une valeur  $\Psi$  (voir tableau 39).

| Altitude                             | Caractère   | Ψ<br>De ¡<br>à ab | olat<br>orupt  |  |
|--------------------------------------|---|-------------------|----------------|--|
| Au-dessus de la limite<br>des forêts | Sols de pâturages<br>imperméables, rocher<br>Pentes d'éboulis (Zeller)        | ,                 | à 0,8<br>à 0,4 |  |
| Proche de la limite<br>des forêts    | Pâturages avec buissons,<br>arbres isolés<br>Forêts clairsemées               | 0,3<br>0,2        | à 0,7<br>à 0,6 |  |
| Altitudes plus basses                | Forêts jeunes, prairies<br>et terres labourées<br>Zones marécageuses (Zeller) | 0,1<br>0,3        | à 0,5<br>à 0,6 |  |

Tableau 39: Coefficient d'écoulement selon Müller et Zeller (Spreafico, et al., 2003 p. 57).

Selon Barben (2003), le modèle est pensé pour un secteur d'opération de 2 à 100 km²; il ne sera pas forcément adapté pour le bassin-versant entier (311 km²) ainsi que pour la station GIUB 2 (149.4 km²). Le fait que le modèle tienne compte de la répartition des précipitations et des caractéristiques régionales améliore ses résultats par rapport à la méthode de Kürsteiner.

#### 8.2. LES MODÈLES GIUB(FN) ET GIUB(MQ)

La construction du modèle GIUB est semblable à celle de Kürsteiner mais intègre des régions homogènes, ce qui permet de déduire des paramètres spécifiques. Il y a deux types d'estimation pour les débits maximums :

- Le débit maximal est mesuré par rapport à la surface du bassin-versant (Fn) GIUB'96
   (Qmax) f(Fn) (ou plus court GIUB(Fn)) avec la formule : Qmax = a Fn<sup>b</sup>
- Le débit maximal est mesuré par rapport au débit annuel moyen (MQ) GIUB'96
   (Qmax) f(MQ) (ou plus court GIUB(MQ)) avec la formule : Qmax = a MQ<sup>b</sup>

Ces modèles divisent la Suisse en régions homogènes (voir figure 117) qui ont chacunes des paramètres a et b spécifiques (Spreafico, et al., 2003 pp. 62-3). Le bassin-versant de la Kleine Emme se trouve à la limite entre les zones N1 et N2.

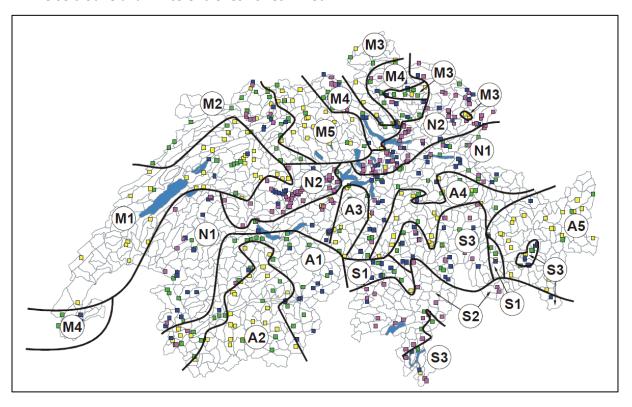


Figure 117: Régions de crues du même type en Suisse selon Kan (1995) dans Barben (2003 p. 45).

Ces régions améliorent la qualité des résultats par rapport aux méthodes sans différentiation.

#### 8.3. LES RÉSULTATS DES SOUS-BASSINS-VERSANTS

La dispersion des résultats est grande (> 25%) pour Kleine Fontanne, GIUB 1, LU14, Wiss Emme, Grosse Entle, Grosse Fontanne et GIUB 4 (voir tableau 30, p.- 158 -).

Les sous-bassins présentant un grand débit spécifique sont dans l'ordre GIUB 1, GIUB 3, Rotbach et Kleine Fontanne (voir figure 106). Etant donné que les sous-bassins GIUB 1 et Kleine Fontanne ont une grande dispersion des résultats, ces valeurs doivent être interprétées avec précaution. Le karst, un phénomène très présent dans le sous-bassinversant GIUB 1 rend l'interprétation plus difficile. Les résultats de HQx\_meso\_CH sont comparés à ceux de PREVAH. Les cas de GIUB 3 et Rotbach sont plus vraisemblables au vu de la dispersion des résultats plus faibles et des visites sur le terrain. En effet, les lits de ces deux sous-bassins indiquent qu'il y a beaucoup de transport de matériaux. On y trouve des blocs d'un diamètre moyen d'environ 20 cm. Pour déplacer ces blocs, le débit doit être relativement fort. A la station GIUB 3, par exemple, on a observé que des blocs d'un diamètre de 20 cm environ, pouvaient être déplacés par le courant à partir d'un débit de 4 m³/s.

## 9. PREVAH

Quatre modélisations sont effectuées avec le programme PREVAH. Elles se rapportent à des précipitations pour des périodes et des mesures de pluviomètres différentes. Cela permet d'interpréter le rôle des précipitations et de la période choisie dans la modélisation.

#### 9.1. PREVAHIET II

PREVAH I modélise les débits spécifiques maximaux avec, comme données d'entrées pour les précipitations, les moyennes horaire de MétéoSuisse, interpolées, pour la période 1984-2008. Les résultats se trouvent dans la figure 107, p.- 163 -.

PREVAH II modélise les débits spécifiques maximaux avec, comme données d'entrées les précipitations régionales (moyennes horaire) de MétéoSuisse, interpolées pour la période 1984-2008. Les résultats sont présentés dans la figure 108, p.- 163 -.

Pour PREVAH I, les débits spécifiques les plus hauts sont clairement situés sur la partie nordouest du bassin-versant dans les sous-bassins Grosse Fontanne, GIUB 4, Kleine Fontanne et Wiss Emme. Les débits spécifiques sont élevés (min 1.03 et max 1.43) par rapport aux autres modélisations de PREVAH (max pour PREVAH II, III, IV respectivement 1.24, 0.54. 0.84). Le

débit spécifique à Werthenstein, plus élevé que celui de GIUB 2 à Schüpfheim sur le cours principal, s'explique par les valeurs élevées du sous-bassin de Fontannen.

Cette répartition des débits spécifiques est vraisemblablement due aux emplacements des stations pluviométriques. La station fédérale de Napf se situe proche de la partie supérieure en limite des sous-bassins Grosse et Kleine Fontanne. Elle a une résolution temporelle de 10 min ce qui est suffisamment précis pour localiser les orages. Il se peut que les intensités élevées, mesurées ne soient pas visibles sur les stations à résolution moins précises, car l'intensité moyenne pour une journée ne représente pas le maximum atteint dans la journée. Les valeurs élevées dans la partie nord-ouest du bassin d'étude sont donc certainement le résultat d'un événement très intense. En analysant les données de la modélisation de plus près, on s'apperçoit que les plus grands débits spécifiques de chaque sous-bassins-versants sont mesurés le 22.08.2005. Ils étaient les plus grands pour les sous-bassins Grosse Fontanne, GIUB 4, Kleine Fontanne et Wiss Emme.

On remarque que PREVAH I, qui tient compte de la répartition des précipitations, a des débits spécifiques plus élevés dans la partie nord-ouest que les autres parties du bassin, mais que pour PREVAH II qui modélise une précipitation régionale, les sous-bassins-versants du sud-est (GIUB 3, Rotbach, LU14 et Schüpfheim) réagissent avec un plus grand débit spécifique. PREVAH II démontre que, sans tenir compte de la répartition des précipitations, les caractéristiques du bassin-versant sont plus propices à former un fort débit dans les bassins du sud-est. Autrement dit, ils ont une faible capacité à stocker l'eau.

La valeur relativement élevée (1.21) à Schüpfheim (en comparaison avec CKW (1.21)) signifie que les affluents Steinibach et/ou Wiss Emme amènent beaucoup d'eau.

#### 9.2. PREVAH III

PREVAH III modélise les débits spécifiques maximaux avec, comme données d'entrées pour les précipitations, les moyennes horaire de MétéoSuisse que l'on a interpolées, pour la période du 26.06.2009 au 10.10.2009. Les résultats sont présentés dans la figure 109.

Les plus hauts débits spécifiques sont modélisés dans le sud du bassin-versant dans l'ordre aux stations de Sörenberg, Südelgraben et avec les mêmes résultats Rotbach et CKW. Dans le nord-ouest du bassin d'étude, les débits spécifiques sont plus faibles que dans les autres parties. Pourtant, la figure 118 avec les précipitations pour la même période et les mêmes

stations pluviométriques que celles utilisées pour la modélisation avec PREVAH montre des précipitations plus abondantes au nord-ouest<sup>10</sup>. Cela s'explique par le fait que la carte des précipitations représente la quantité de précipitations tombées. Cette quantité était plus grande dans la partie nord-ouest du bassin d'étude. Les résultats de PREVAH représentent le plus grand débit spécifique pour chaque sous-bassin-versant. Ces débits spécifiques maximums sont engendrés par des précipitations intenses qui, selon l'interpolation, devaient se situer au-dessus des sous-bassins du sud. Ces précipitations intenses ne sont pas visibles sur la figure 118 p.- 164 -. Par contre, en analysant les résultats de PREVAH III, on s'apperçoit que les débits spécifiques maximums ont eu lieu pour tous les sous-bassins-versants le 18.07.2009 à 01:00. Ces débits spécifiques maximums étaient pour cet événement plus grands aux stations LU14, GIUB 1, Rotbach et CKW.

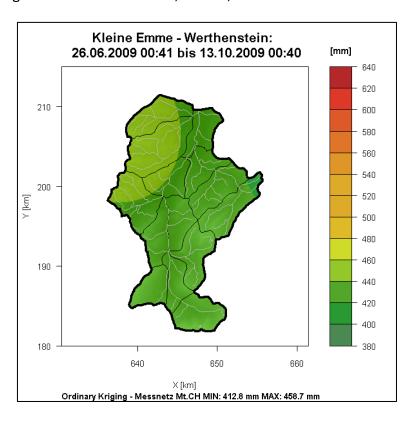


Figure 118: Somme des précipitations mesurées par les stations de MétéoSuisse, puis interpolées pour la période du 26.06.2009 au 13.10.2009 dans le bassin-versant de la Kleine Emme (Riedener, 2010).

\_

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> La quantité des précipitations plus élevée dans la partie nord-ouest du bassin d'étude s'explique par le fait que le pluviomètre de Napf se trouve dans les environs et il conduit à une surestimation des précipitations lors de l'interpolation.

#### 9.3. PREVAH IV

PREVAH IV modélise les débits spécifiques maximaux avec, comme données d'entrées pour les précipitations, les moyennes horaire de MétéoSuisse que l'on a interpolées, ainsi que les moyennes horaire des pluviomètres GIUB interpolées également pour la période du 26.06.2009 au 10.10.2009 (figure 110, p.- 164 -).

Les sous-bassins-versants qui réagissent avec les plus grands débits spécifiques sont GIUB 3 et Rotbach. Si l'on compare ces résutats avec la figure 119 qui représente les précipitations pour la même période et avec les données des mêmes pluviomètres que ceux utilisés pour la modélisation de PREVAH IV, le résultat de Rotbach s'explique par la grande quantité de précipitations tombées dans ce sous-bassin. Les cartes des sommes de précipitations horaire (Riedener, 2010) montrent que Rotbach est, pour beaucoup d'événements de l'été 2009, le sous-bassin avec les plus grandes intensités de précipitations. Le haut débit spécifique dans le bassin GIUB 3 est vraisemblablement dû à des événements de fortes intensités. Le pluviomètre installé dans le sous-bassin de la Wiss Emme a également enregistré une quantité relativement grande de précipitations (entre 480 et 500 [mm]). Il y a effectivement eu deux événements pluvieux relativement intenses (le 28.07.2009 et le 08.08.2009) dans cette région durant l'été 2009 (voir les cartes des sommes horaire des précipitations pour les événements de l'été 2009 (Riedener, 2010)). Cela ne se remarque pas sur le débit spécifique de la modélisation avec PREVAH.

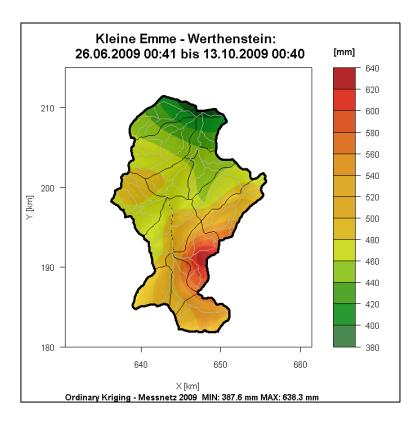


Figure 119: Somme des précipitations mesurées par les stations de MétéoSuisse et GIUB puis interpolées pour la période du 26.06.2009 au 13.10.2009 (Riedener, 2010).

Les résultats de PREVAH I et III donnent des informations concernant les précipitations, en particulier les précipitations intenses. Les résultats de PREVAH II sont vraisemblablement les plus proches de la réalité, car ils représentent une longue période et les caractéristiques du bassin-versant sont valorisées. La modélisation avec PREVAH IV est plus proche de la réalité que celle de PREVAH III, qui ne contient que les données de MétéoSuisse, car les pluviomètres GIUB permettent de mieux localiser les précipitations.

## 10. Zones clé

Pour résumer les différentes modélisations élaborées avec HQx\_meso\_CH et PREVAH en une carte, le procédé suivant est choisi :

- les sous-bassins-versants sont numérotés de 1 à 12 selon l'ordre de grandeur de leur débit spécifique maximum. On obtient le classement des sous-bassins-versants pour chacune des cinq modélisations.
- Les cinq rangs des cinq méthodes sont additionnés par sous-bassin.
- Les sommes obtenues sont à nouveau classées dans l'ordre de grandeur par bassinversant. On obtient ainsi le classment de chaque sous-bassin. Le rang 1 correspond

au sous-bassin-versant qui a le plus souvent un débit spécifique faible et le rang 12 est le sous-bassin qui a le plus souvent le débit spécifique le plus élevé. Les sous-bassins à surveiller sont ceux qui ont une place élevée dans le classement.

La modélisation de PREVAH II est celle qui se rapproche vraisemblablement le plus de la réalité. La période modélisée de 1984 à 2008 correspond à la période de mesure entière et pas seulement à un été comme les modélisations PREVAH III et IV. Les événements de précipitations ponctuelles très intenses influencent moins le résultat avec les précipitations régionales. Pour ces raisons, le classement de PREVAH II est compté deux fois dans la somme afin de lui donner plus de poids. Les résultats des classements sont pareils au final avec ou sans pondération. Cela confirme le fait que PREVAH II est la modélisation la plus vraisemblable. Le classement des sous-bassins se trouve dans la figure 120.

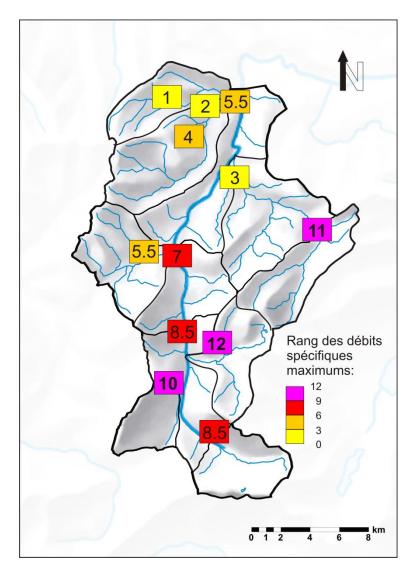


Figure 120: Classement des sous-bassins-versants selon la fréquence des plus hauts débits spécifiques maximums pour les cinq modélisations. Avec 1 le moins fréquent et 12 le plus fréquent.

Les zones clé sont divisées en deux catégories, les zones clé de 1<sup>er</sup> et de 2<sup>ème</sup> ordre. Dans la première catégorie se trouvent les trois sous-bassins-versants qui réagissent avec le débit spécifique le plus élevé, il s'agit de Rotbach, GIUB 3 et GIUB 1. Dans la deuxième catégorie se trouvent les trois sous-bassins-versants qui arrivent ensuite dans le classement. LU14 et CKW ont le même rang puis vient Schüpfheim.

On remarque que les rangs les plus élevés se trouvent dans les sous-bassins-versants du sudest du bassin d'étude. Le bassin d'étude pourrait être divisé en deux entre nord-ouest et sud-est. Cette séparation est également visible sur les cartes représentant la lithologie et la capacité de rétention hydrique (voir figure 121 et figure 122).

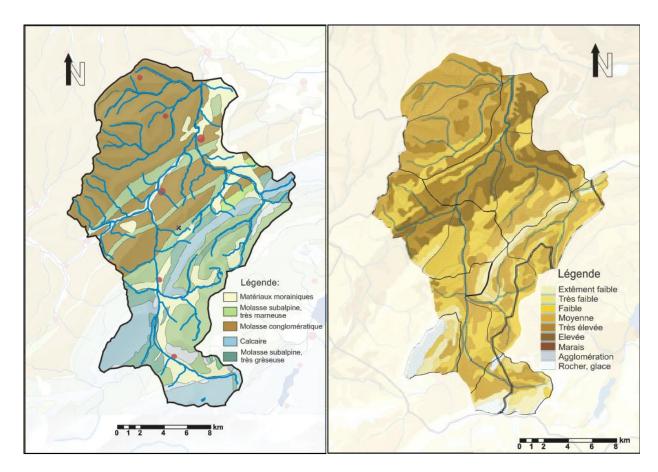


Figure 121: Lithologie du bassin-versant de la Kleine Emme. Source du fond de carte : Atlas de la Suisse (2004).

Figure 122: Capacité de rétention hydrique. Source du fond de carte : Atlas de la Suisse (2004).

La partie sud-est du bassin-versant est principalement constituée de calcaire et de molasse marneuse et grèseuse. C'est dans cette partie également que se trouve le karst (voir figure 10, p.- 45 -). La molasse marneuse est une couche imperméable qui laisse l'eau ruisseler en surface et former ainsi un écoulement rapide. Dans la partie nord-ouest, on trouve de la molasse conglomératique. La figure 122, qui représente la capacité de rétention hydrique, montre la même limite entre la partie sud-est et la partie nord-ouest. Au sud-est la capacité de rétention est plus faible que dans le nord-ouest.

La figure 123 représente les résultats de la modélisation avec PREVAH du stockage de l'humidité dans le sol (ssm, soil moisture storage). Les sous-bassins-versants qui ont le plus faible stockage d'humidité sont Südelgraben, Sörenberg, Grosse Entle et Rotbach. Ce sont ceux qui sont déterminés comme zones clé dans ce travail. L'écoulement rapide de ces sous-bassins est donc étroitement lié à la faible capacité de stockage du sol.

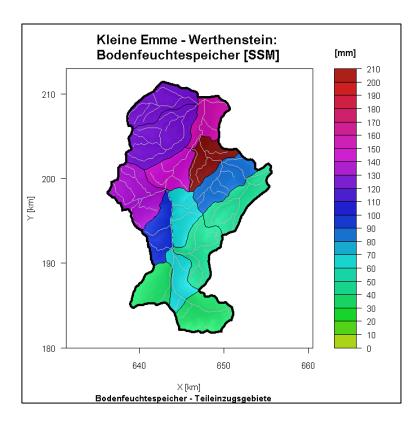


Figure 123: Stockage de l'humidité dans le sol (Riedener, 2010).

Les plus hautes régions du bassin d'étude se trouvent également dans la partie sud-ouest du bassin-versant avec le Brienzer Rothorn à 2350 m et le Fürstein à 2040 m. Ce sont donc aussi les régions qui ont les plus grandes pentes.

Les figure 124 à figure 127 et les tableau 40 à tableau 43 présente la répartition de la couverture du sol pour les zones clé. Les éléments dominants sont la forêt et les terres cultivées ou les pâturages. Le sous-bassin LU14 est celui des zones clé qui est le moins couvert par la forêt, c'est celui qui contient les ommet le plus élevé du bassin d'étude. La forêt joue un rôle sur l'écoulement au travers de l'interception, qui engendre un certain délais avant que l'eau atteigne le sol. Les terres cultivées ont des sols relativement compacts à cause du travail avec les tracteurs. Les précipitations qui tombent sur dernier type de sol s'écoulement vraisemblablement en surface. Dans les pâturages, le bétail trace des petites « tranchées » qui servent de canneaux à l'écoulement de pluie. Les marais sont un type de couverture du sol qui est également représenté (entre 4 et 13% selon le sous-bassin). Ils permettent de concerver une partie de l'eau dans le bassin avant qu'elle ne s'écoule.

## La couverture du sol du sous-bassin de Rotbach

| Forêt                    | 25.4 |
|--------------------------|------|
| Terre cultivée, Pâturage | 17.9 |
| Marais                   | 12.8 |
| Eau                      | 0.9  |
| Surface non-productive   | 2.4  |
| Agglomération            | 0.5  |
| Pas de données           | 40   |
| disponibles              |      |

Tableau 40: Proportion des différents types de couverture du sol pour le sous-bassin de Rotbach. Source des données : (UWE, 2009).

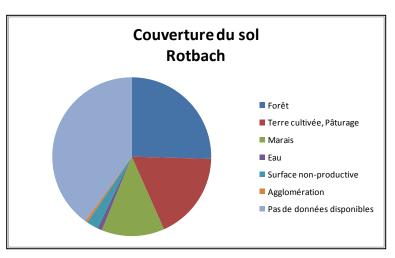


Figure 124: Carte de la couverture du sol du sous-bassin-versant Rotbach.

Source des données : (UWE, 2009).

#### La couverture du sol du sous-bassin GIUB 3

| Forêt                    | 33.2 |
|--------------------------|------|
| Terre cultivée, Pâturage | 29.9 |
| Marais                   | 8.3  |
| Eau                      | 1.1  |
| Surface non-productive   | 6.3  |
| Agglomération            | 0.6  |
| Pas de données           | 20.6 |
| disponibles              |      |

Tableau 41: Proportion des différents types de couverture du sol pour le sousbassin GIUB 3. Source des données : (UWE, 2009).

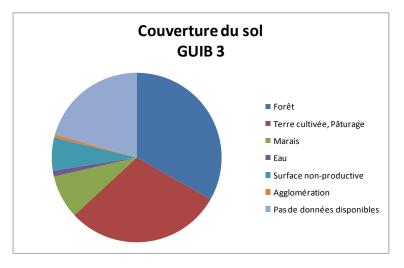


Figure 125: Carte de la couverture du sol pour le sous-bassin-versant de GIUB 3. Source des données : (UWE, 2009).

## La couverture du sol du sous-bassin GIUB 1

| Forêt                    | 37   |
|--------------------------|------|
| Terre cultivée, Pâturage | 25.7 |
| Marais                   | 7.4  |
| Eau                      | 0.2  |
| Surface non-productive   | 28.6 |
| Agglomération            | 0.9  |
| Pas de données           | 0    |
| disponibles              |      |

Tableau 42: Proportion des différents types de couverture du sol pour le sous-bassin GIUB 1. Source des données : (UWE, 2009).

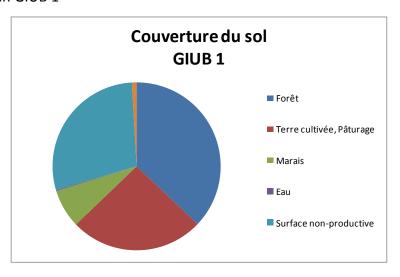


Figure 126: Carte de la couverture du sol pour le sous-bassin-versant de GIUB 1. Source des données : (UWE, 2009).

#### La couverture du sol du sous-bassin LU14

| Forêt                    | 5.3  |
|--------------------------|------|
| Terre cultivée, Pâturage | 19.9 |
| Marais                   | 4.2  |
| Eau                      | 0.3  |
| Surface non-productive   | 7.8  |
| Agglomération            | 3.7  |
| Pas de données           | 58.9 |
| disponibles              |      |

Tableau 43: Proportion des différents types de couverture du sol pour le sous-bassin LU14. Source des données : (UWE, 2009).

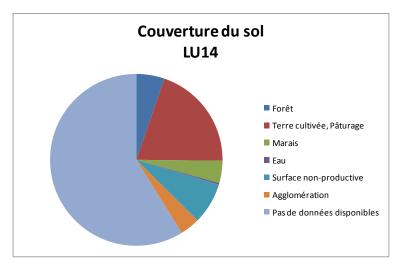


Figure 127: Carte de la couverture du sol pour le sous-bassin-versant de LU14. Source des données : (UWE, 2009).

## VII. CONCLUSIONS

Ce chapitre est consacré en première partie à la réponse aux questions posées en tout début de travail puis à une conclusion générale ce qui a été fait pendant les 18 mois qu'a duré ce travail de Master.

## 1. RÉPONSE AUX QUESTIONS

## Quelles sont les caractéristiques du débit de crue du bassin-versant de la Kleine Emme ?

L'hydrogramme du bassin-versant de la Kleine Emme est caractérisé par une montée très rapide du débit suite aux précipitations. Le débit diminue également rapidement. Cela signifie que l'eau est rapidement drainée vers le lit du cours d'eau. Le bassin-versant a une faible capacité de rétention.

Lors de plusieurs événements, un ou plusieurs pic(s) avant et/ou après le pic principal apparaissent. Ces phénomènes sont dus aux précipitations et à la forme du bassin-versant et de ses affluents. Pour deux cas, survenus en hiver, un plateau avant la crue correspond à une augmentation du débit par la fonte de la neige. L'arrivée de précipitations sur la neige fait augmenter le débit très rapidement. Le plateau qui arrive dans plusieurs cas après le pic principal est formé par l'eau qui provient des parties les plus éloignées de l'exutoire.

54% des 70 crues de la série partielle se sont produites aux mois de juin, juillet et août. Mais des crues peuvent survenir tout au long de l'année (voir figure 128).

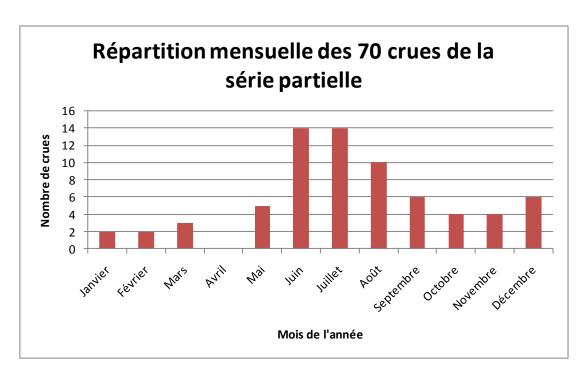


Figure 128: Répartition mensuelle des 70 crues de la série partielle.

En moyenne, pour les 8 événements de l'été 2009 mesurés à Schüpfheim, la proportion du volume de crue de Werthenstein est de 49%. Cela signifie que la moitié du volume d'eau mesuré à Werthenstein provient des sous-bassins de la Waldemme. Le reste du volume de crue à Werthenstein provient en grande partie de la Grosse Entle et en petite partie des Grosse et Kleine Fontannen. Le sous-bassin-versant de Sörenberg contribue à lui seul en moyenne pour les 10 événements mesurés, durant l'été 2009 à 13% du volume de crue de Werthenstein.

Les temps de transit moyens indicatifs mesurés entre les stations à l'intérieur du bassinversant et l'exutoire à Werthenstein sont indiqués dans le tableau 44. Ils sont peu robustes car ils sont basés sur peu d'événements. Seule la période de l'été 2009 est prise en compte et pour les événements lors desquels la pointe de crue arrive en premier dans le bassinversant puis à l'exutoire (ce qui n'est pas toujours le cas suivant où se trouvent les cellules principales des précipitations). De plus l'été 2009 ne comprend qu'une crue qui dépasse un temps de retour d'une année. Elle n'a pas pu être mesurée à toutes les stations. Les valeurs présentées dans le tableau 44 sont donc indicatives. Le temps de transit entre la station GIUB 4 et Werthenstein est surestimé. Il correspond à une vitesse d'écoulement de 1.5 km/h, ce qui est peu pour un événement. Le temps entre LU14 et Werthenstein est lui sous-estimé. En effet, il ne peut pas être plus rapide que le temps nécessaire pour le trajet

entre CKW et Werthenstein. Les autres temps semblent probables en les comparant aux résultats du temps de concentration calculé empiriquement, sachant que le temps de concentration mesure un débit moyen et le temps de transit un débit plus élevé que la moyenne.

|                       | Temps de          |
|-----------------------|-------------------|
| Chemin                | transit indicatif |
| LU 14 - Werthenstein  | 01:21             |
| GIUB 1 - Werthenstein | 01:36             |
| CKW - Werthenstein    | 01:24             |
| GIUB 2 - Werthenstein | 00:59             |
| GIUB 3 - Werthenstein | 01:41             |
| GIUB 4 - Werthenstein | 00:39             |

Tableau 44: Temps de transit indicatifs entre les stations à l'intérieur du bassin-versant et la station de Werthenstein.

## Quel type de précipitations provoque les plus grandes crues de la série de mesures (1984-2009) et les événements de l'été 2009 ?

45% des 20 plus grandes crues de la série partielle (1984-2009) se sont produites suite à des précipitations de type « longue pluie ». Les autres sont réparties de la façon suivante :

- 35% de « courte pluie »
- 10% de « averse »
- 10% de « pluie sur neige » (voir figure 114).

Pour les événements de l'été 2009, la situation est différente. La majorité est déclenchée par des précipitations de type « averse ». La seule crue d'un temps de retour supérieur à une année est de type « longue pluie ». Un événement est de type « courte pluie ». Les types « pluie sur neige », « fonte de la neige » et « fonte de la glace » n'ont pas lieu car seuls les événements de l'été ont été étudiés.

On constate donc que les plus grandes crues ont lieu principalement suite à une longue période de précipitations (> 1 jour selon Diezig (2006)). Les crues d'un temps de retour inférieur à une année sont vraisemblablement les suites d'orages parfois très locaux. Elles sont relativement fréquentes à la Kleine Emme. Cela s'explique par le nombre élevé d'orages dans cette région par rapport au reste de la Suisse (figure 129).

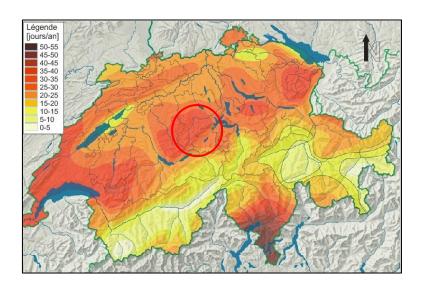


Figure 129: Fréquence annuelle des orages proches et lointains (moyenne 1931-1980) (Atlas de la Suisse, 2004).

Quels sont les sous bassins-versants qui réagissent avec les plus grands débits spécifiques ? Les sous-bassins-versants avec les débits spécifiques les plus grands et les plus fréquents sont déterminés à l'aide des modèles HQx\_meso\_CH et PREVAH. Les résultats sont représentés dans la figure 120 p.- 189 -.

Le sous-bassin-versant du Rotbach est celui qui réagit le plus souvent avec le plus grand débit spécifique. Viennent ensuite les sous-bassins GIUB 3 et GIUB 1. Ces trois sous-bassin-versants se trouvent dans les parties les plus élevées du bassin. Lessous-bassins LU14, CKW et GIUB 2 arrivent ensuite. La réaprtitioin des zones clé dessine une séparation du bassin en deux parties. Les zones clé se trouvent dans la partie sud-est. Cette partie est également celle qui comprend les plus hauts sommets du bassin-versant d'étude et les sols qui ont une capacité de rétention hydrique la plus faible. La partie sud-est comprend une lithologie de calcaire, molasse très grèsseuse et molasse marneuse.

# Comment placer les stations hydrométriques dans le bassin-versant pour obtenir un maximum d'informations pour un système de prévision contre les crues à Werthenstein.

Le sous-bassin-versant Rotbach n'est pas directement mesuré par une station de jaugeage, car la mise en place d'une station à l'aval de ce sous-bassin est techniquement compliqué. Le cours d'eau transporte beaucoup de matériaux, ce qui restreint les possibilités de placer une sonde à pression. L'installation d'un radar est également difficile, car l'eau change de lit suivant son niveau et le déplacement du matériau. Cependant, la station radar CKW est

située sur la Waldemme, juste en aval de la confluence avec le Rotbach. Il est donc possible de connaître par ce biais la réaction de ce dernier.

Les stations GIUB 3 et GIUB 1 sont bien placées selon la répartition des zones clé. La station LU14 du Canton de Lucerne est également positionnée de façon efficace à l'aval d'un sous-bassin qui peu réagire avec un débit spécifique élevé.

La station GIUB 4, placée très proche de la station Werthenstein, n'est pas directement utile à la prévision. Son but, avec le pluviomètre E, est de comprendre la réaction du sous-bassin GIUB 4. Les mesures de l'année 2009 ne permettent pas de tirer de conclusions satisfaisantes. Peut être qu'une ou deux années de mesures en plus sont nécessaires pour avoir des données complémentaires. Il est recommandé d'essayer avec des données radar.

L'emplacement actuel des stations de jaugeage est donc bien choisi en fonction des zones clé et des possibilités techniques.

## 2. CONCLUSION GÉNÉRALE

Quatre nouvelles stations de mesure du niveau d'eau sont installées dans le bassin-versant pour densifier le réseau existant. Leur calibrage est en cours, plusieurs mesures du débit ont été effectuées. Il manque des mesures en période de crue pour pouvoir élaborer la courbe de tarage, mais une stratégie de mesure est élaborée. Ces stations sont positionnées stratégiquement selon la faisabilité technique, selon les temps de transit et les zones clé du bassin-versant.

Les zones clé, sous-bassins-versants qui engendrent les débits spécifiques les plus élevés, sont déterminées à l'aide des modèles HQx\_meso\_CH et PREVAH. Elles se trouvent dans la partie sud-est du bassin-versant. Cette partie est caractérisée par les sommets les plus hauts du bassin, une faible capacité de rétention hydrique, une lithologie de type calcaire, molasse très grèseuse et molasse marneuse qui contraste avec la molasse conglomératique du nordouest du bassin.

Les nouvelles stations hydrométriques et la modélisation des zones clé permettent une meilleure compréhension de la réaction du débit de crue dans le bassin de la Kleine Emme.

L'analyse des hydrogrammes de crues sur une période prolongée permettrait des résultats plus robustes. En particulier pour les temps de transit entre les stations. Toutefois ce travail fourni les éléments de bases pour un système d'alarme de crue.

#### Littérature

**Aschwanden, H. et Spreafico, M. 1995.** Débits de crues - Analyse de longues séries de mesure. Feuille 5.6 Atlas hydrologique de la Suisse HADES. Berne : Service hydrologique national, Office fédéral des eaux et de la géologie, 1995.

**Atlas de la Suisse. 2004.** Nature et environnement. *Météo et climat, précipitations, température, orages.* Zürich : Institut de cartographie ETH Zürich, 2004. 2.0.

—. **2004.** Nature et environnement. *Géologie.* Zürich : Institut de cartographie ETH Zürich, 2004. 2.0.

**Barben, M. 2003.** Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflusse in mesoskaligen Einzugsgebieten. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern, 2003. Geographica Bernensia G71.

**Baumgartner, A. et Liebscher, H.J. 1996.** *Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie, 2. Auflage.* Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1996.

**Behrens, H. et al., et. 2001.** Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. *Hydrogeology Journal.* 2001. 9, pp. 321-325. Cité de Schudel et al. (2002).

Bezzola, G.R et Hegg, C. 2008. Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 - Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL., 2008. p. 429 S. Vol. Umwelt-Wissen Nr. 0825.

**Bezzola, G.R. et Hegg, C. 2007.** *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 - Prozesse, Schäden und erste Einordung.* Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL., 2007. p. 215 S. Vol. Umwelt-Wissen Nr. 0707.

**BFS, Bundesamt für Statistik. 2001.** *Bodennutzung im Wandel. Arealstatistik Scweiz.* Neuchatel: Bundesamt für Statistik, 2001.

**Birsan, M.V., Molnar, P. et Pfaundler, M. 2005.** Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*. 03 06 2005, 314, pp. 312-329.

**Blüthgen, J. et Weischt, W. 1980.** *Lehrbuch der Allgemeinen Geographie, allgemeine Klimageographie.* Berlin : De Gruyter, 1980. Cité de Riedener 2010.

**Chapman, T.G. et Maxwell, A.I. 1996.** Baseflow separation - comparison of numerical methods with tracer experiments. [éd.] Aust. natl. Conf. 1996, Publication 96/05, pp. 539-545. Cité de Merz et al. 2006.

**Chapman, Tom. 1999.** A comparaison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. School of civil and Environemental Engineering, The University of New South Wales, Syndey 2052, Australia, 1999, Hydrological processes 13, pp. p.701-714.

**Diezig, R. 2006.** *Hochwasserprozesstypen in der Schweiz.* Bern: Philosophischnaturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, 2006.

—. **2006.** Hochwasserprozesstypen in der Schweiz, Eine prozessorientierte Typisierung grosser Hochwasserereignisse in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Diplomarbeit. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern, 2006.

**DVWK. 1982.** Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil 1: Analyse. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey, 1982. Cité de Steiner 2007. Regeln zur Wasserwirtschaft Heft 112.

- —. **1979.** Empfehlungen zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. Regeln zur Wasserwirtschaft. Hamburg: s.n., 1979. 101.
- —. 1999. Statistische Analyse von Hochwasseabflüssen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Bonn: Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 1999. Heft 251.

- **Dyck, S. et Peschke, G. 1989.** *Grundlagen der Hydrologie, 2. bearbeitete Auflage.* Berlin : Verlag für Bauwesen VEB, 1989.
- **FUB. 2007.** E-Learning Karstmorphologie. [En ligne] Freie Universität Berlin (FUB), 2007. [Citation: 28 08 2010.] http://www.geo.fuberlin.de/fb/e-learning/pg-net/themenbereiche/geomorphologie/karstmorphologie/index.html.
- Geiger H., Röthlisberger G., Zeller J. 1978. Starkniederschläge des schweizerischen Alpenund Alpenrandgebietes. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstlt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 1978. Vol. Band 3. Glarus, Schwyz, Uri, Zug, Luzern, Nidwalden, Obwalden, Cité de Riedener 2010.
- **Graf, W.H. et Altinakar, M.S. 2008.** Hydraulique fluviale, Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple. Lausanne : Traité de Génie Civil TGC 16, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2008.
- **Grebner, D., Rösch, T. et Schwab, M. 1999.** Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1981.1993. Tafel 2.5 Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES. Bern: s.n., 1999.
- **Haller, T. 2007.** *Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES.* Bern : Geographisches Institut der Universität Bern Hydrologie, 2007. Cité de Masson 2010.
- **Helbling, A., Kan, C. et Vogt, S. 2006.** Dauerregen, Schauer oder Schmelze- welche ereignisse lösen in der Schweiz die Jahreshochwasser aus? *Wasser Energie Luft.* 2006, Heft 3.
- —. **2006.** Dauerregen, Schauer oder Schmelze-welche Ereignisse lösen in der Schweiz die Jahreshochwasser aus? Baden: Wasser Energie Luft, 2006. Heft 3.
- Hingray, B., Picouet, C. et Musy, A. 2009. *Hydrologie 2 Une science pour l'ingénieur*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009. ISBN 978-2-88074-798-5.
- **Hodel, H.P. 1993.** Untersuchung zur Geomorphologie, der Rauhigkeit des Strömungswiederstandes und des Fliessvorganges in Bergbächen. s.l.: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich ETHZ, 1993.
- **Jordi, B. 2006.** Dossier au fil de l'eau. *Environnement*. Office fédéral de l'environnement OFEV, 2006, 4.
- **Kan, C. 1995.** Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990. Diplomarbeit. Bern: Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, 1995. Publikation Gewässerkunde Nr. 169.
- —. 2007. Hochwassertypisierung auslösendes Ereignis. Ittigen: BAFU, 2007.
- **—. 2002.** Réseaux hydrométriques. Feuille 5.1^2 Atlas hydrologique de la Suise HADES. Berne: s.n., 2002.
- **Kirpich, Z.P. 1940.** *Time of Concentration od Small Agricultural Watersheds.* [éd.] Am Soc. Civ. Engrs Civ. Eng. 1940. p. 362. Cité de Nachtnebel 2008. Vol. 10.
- **Labhart, T. 2009.** *Geologie des Schweiz 8. Auflage.* Bern : Ott Sachbuchverlag. Hep Verlag AG., 2009. Cité de Masson 2010.
- **Laborde, J. P. 2000.** *Elément d'hydrologie de surface.* Nice : Université de Nice Sophia Antipolis, Centre National de la Recherche Scientifique, 2000.
- **Lang, M. 2006.** Incertitudes sur les débits de crues. *La Houille Blanche.* 2006, 6, pp. 33-41. Cité de Hingray et al. 2009.
- **Loat, R. et Meier, E. 2003.** *Dictionnaire de la protection contre les crues.* [éd.] Haupt. Berne : Office fédéral des eaux et la géologie, Chancellerie fédérale, 2003.
- **Lukes, R. 2002.** Eine Praktische Einführung in die Abflussmessung mit dem hydrometrischen Kleinflügel. 2002.

**Maniak, U. 2005.** Hydrologie und Wasserwirtschaft, Eine Einführung für Ingenieure, 5. bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer, 2005.

**Masson, P. 2010.** Hochwasserwarnung in kleinen Einzugsgebieten. Entwicklung eines Hochwasserwarnsystems im Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Teilaspkt Interaktion. Bern: Geographishces Institut der Universität Bern, 2010.

McCuen, R.H. 2004. Hydrologic Analysis and Design. New Jersey: s.n., 2004. 3. edition.

Merz, R. 2002. Understanding and estimating flood probablities at the regional scale. Wiener Mitteilungen. Wien: Wasser Abwasser Gewässe, Technische Universität Wien, 2002. Band 181.

Merz, R., Blöschl, G. et Parajka, J. 2006. Spatio-temoral varaibility of event runoff coefficients. [éd.] Vienne University of Technology, Karlsplatz 13/E222, A-1040 Wien, Austria Institute for Hydraulic and Water Ressouces Engineering. *Journal of Hydrology*. 2006, 331, pp. p.591-6.

#### MétéoSuisse.

**Moor, R.D. 2004.** Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurment part I, Streamline, Watershed management bulltin Vol 7. 2004.

Musy, A. et Higy, C. 2009. *Hydrologie, 1 Une science de la nature*. Lausanne : Presses polythechniques et universitaires romandes, 2009. ISBN 978-2-88074-546-2.

**Nachtnebel, H.P. 2008.** *Hydrologie und Flussgebietsmanagement.* s.l.: Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, 2008.

Näef F., Zuidema P., Kölla E. 1986. Abschätzung von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten. zürich: Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 1986.

**OcCC. 1998.** La Suisse face aux changements climatiques, Impacts des précipitations extrêmes, Rapport sur l'état des connaissances. Berne : OcCC, 1998. Cité de Musy et al. 2009. **OFEG. 2005.** Bericht über die Hochwasser 2005. Bern : Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG, 2005.

#### OFEV.

- —. **2010.** Données et bases hydrologiques. *OFEV.* [En ligne] 2010. [Citation : 20 04 2010.] www.hydrodaten.admin.ch/lhg/map/M2487.gif.
- —. **2009.** Hochwasserwahrscheinlikeiten (Jahreshochwasser). [En ligne] Office fédéral de l'environnement OFEV, Division Hydrologie, 31 07 2009. [Citation : 20 04 2010.] www.hydrodaten.admin.ch/lhg/hq/2487hq.pdf.
- **—. 2009.** Les crues de 2005. [En ligne] 31 08 2009. [Citation : 11 05 2010.] www.bafu.admin.ch/hydrologie/01834/02041/02043/index.html?lang=fr.
- —. **2009.** Réseau de base: niveau d'eau et débit des eaux de surface. *Données et bases hydrologiques*. [En ligne] 18 11 2009. [Citation : 20 04 2010.] www.bafu.admin.ch/hydrologie/01831/01839/index.html?lang=de.

**OFS. 1985.** Statistique suisse de la superficie (AS85R) 1979/85. Bern: GEOSTAT, 1985.

**Press, F. et Siever, R. 2003.** *Allgemeine Geologie. Einführung in das System Erde. 3. Auflage.* München: Spektrum Akademischer Verlag. Elsevier GmbH, 2003. Cité de Masson 2010.

**Riedener, S. 2010.** *Grundlage zur Hochwasserwarnung an der Klinen Emme. Teilaspekt Niederschlag.* Bern : Geographisches Institut der Universität Bern, 2010. Masterarbeit.

**Schädler, B. et Weingartner, R. 1992.** Débits naturels 1961-1980. Feuille 5.4 Atlas hydrologique de la Suisse HADES. Berne : s.n., 1992.

**Schaffner, F. 2007.** Hochwasserabschätzung in Wildbacheinzugsgebieten auf der Grund von Einzugsgebietskenngrössen. Diplomarbeit. Bern: Philosophisch- naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, 2007.

**Schlunegger, Fritz. 2006.** Geologie und Geomorphologie des Entlebuchs - eine kleine Landschaftsgeschichte. *Entlebucher Brattig 2006.* Entlebuch : Kunstverein Amt Entlebuch, 2006.

Schudel, B., et al. 2002. *Utilisation des traceurs artificiels en hydrologie - Guide pratique.* Berne : Société Suisse d'hydrologie SSH, Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG, 2002. Vol. Série Géologie 3.

**Seyhan, E. 1976.** *Calculation of runoff from basin physiography.* Utrecht: s.n., 1976.

**Spreafico, M. et Weingartner, R. 2005.** *Hydrologie der Schweiz - Ausgewählte Aspekte und Resultate.* Bern : Bericht des Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, 2005.

**Spreafico, M., et al. 2003.** Evaluation des crues dans les bassins-versants de Suisse, Guide pratique. Berne : Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG, 2003.

**Spreafico, M., et al. 1994.** Handbuch für die Abflussmengenbestimmung mittels Verdünnungsverfahren mit Fluoreszentracer. Bern: Service hydrologique et géologique national - Communication Nr. 20, 1994.

**Steiner, S. 2007.** Emme-Hochwasser, Dokumentation, Typisierung und Analyse der 25 grössten Ereignisse von 1930-2005. Diplomarbeit. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern, 2007.

**Umweltbundesamt. 1997.** Human- und ökotoxikologische Bewertung von Markierungsmitteln in Gewässern. s.l.: Arbeitskreis beim Umweltbundesamt, D-Langen. Grundwasser, 1997. 2/97, pp. 15-22. Cité de Schudel et al. (2002).

**UWE. 2009.** *Teileinzugsgebiete Kanton Luzern.* Luzern: Umwelt+Energie, Kanton Luzern, 2009.

—. **2010.** Umwelt+Energie. *Umwelt-Luzern.* [En ligne] 2010. [Citation: 16 08 2010.] www.umwelt-luzern.ch/kleine emme.

**Vischer, D. 2010.** Die Entwicklung der Abflussmesser vom treibenden Blatt zum Messflügel und wieder zurück. s.l.: Sonderdruck aus Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2010. pp. 129-137. 54. Hahrgang, Heft 2.

**Viviroli, D., et al. 2009.** An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*. Elsevier, 2009, 24.

Weingartner, R. et Aschwanden, H. 1992. Régimes d'écoulement comme base pour l'estimation des valeurs moyennes des débits. Feuille 5.2 Atlas hydrologique de la Suisse HADES. Berne : Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG, 1992.

**Wernli, H.R. 2009.** *Einführung in die Tracerhydrologie. Hydrologisches Praktikum.* Bern : Geographisches Institut der Universität Bern, 2009.

WMO. 2004. 2004. Cité de Riedener 2010.

**Wyder, D. 1998.** *Handbuch der Pegelmessung.* Bern : Département fédéral de l'intérieur-Service hydrologique et géologique national - Communications hydrologiques Nr. 26, 1998.

**Zeller, J. 1975.** *Berechnung der Abflusswassermenge. Beilage zur Vorlesung "Wildbach- und Hangverbau".* Zürich : Abteilung VI, ETH Zürich, 1975.

**Zemp, Franz et Schlunegger, Fritz. 2005.** Geo-Pfad. Geomorphologie Escholzmatt. Thun: Ott Verlag + Druck AG, 2005.

## VIII. Annexes

A1: Indications pour l'entretien des stations de mesure du niveau d'eau

A2 : Exemple de formulaire d'entretien des stations du niveau d'eau

A3: Stratégie de mesure du débit aux stations GIUB

A4 : Script R : Données du débit à partir du coffret de mesure

A5 : Indications pour l'utilisation des conductimètres WTW 3310

A6 : Script R : Données du débit à partir des conductimètres WTW 3310

A7 : Protocole des mesures du débit par dilution au sel

A8 : Protocole des mesures du débit par dilution à l'uranine

A9 : Marche à suivre pour les mesures au théodolite

A10 : Script R : Série partielle

A11: Script R: Résultats PREVAH