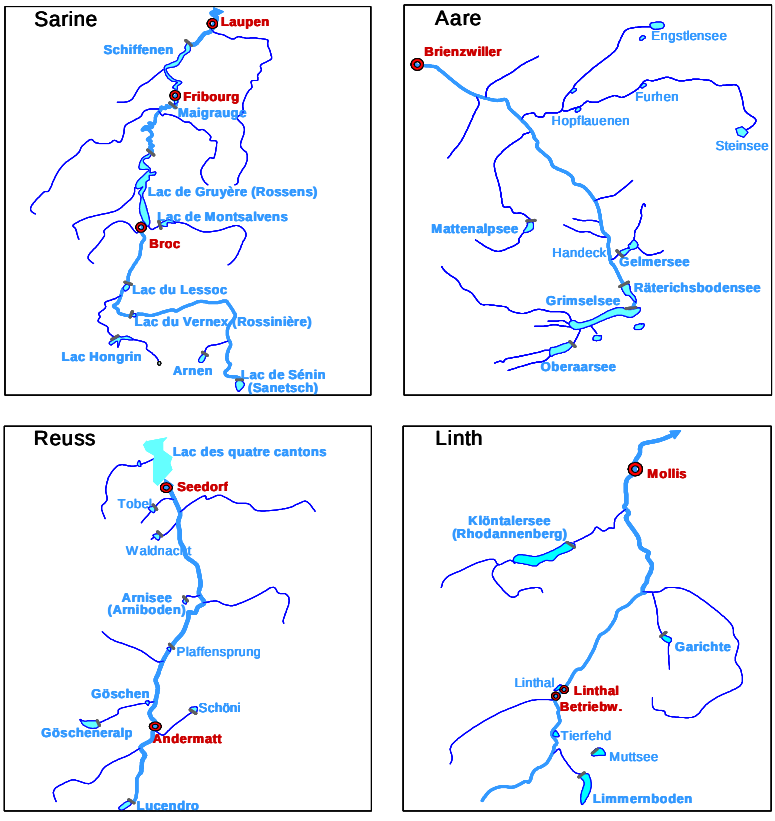
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

INTEMPÉRIES D'AOÛT 2005

Influence des ouvrages d'accumulation sur les cours d'eau de la Sarine, l'Aare, la Reuss et la Linth



Rapport final

Préparé par

AquaVision Engineering Sàrl
Conception et dimensionnement en ingénierie hydraulique, géotechnique et environnementale
Chemin des Champs-Courbes 1
CH-1024 ECUBLENS
Natel: +41 79 775 17 61
Web: www.aquavision-eng.ch

Impressum:
Date: Mars 2007

Mandant:
Office fédéral de l'énergie, Section Barrages, 3003 Berne
Tél. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

Mandataire:
AquaVision Engineering Sàrl, Ecublens

Auteurs:
Dr. Erik Bollaert
Dr. Stéphanie André
(avec la collaboration de Mr P. Schmocker, bhc Projektplanung)

Accompagnement:
Dr. Georges Darbre, Chargé de la sécurité des barrages, Office fédéral de l'énergie

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

TABLE DES MATIERES

I Préambule 4
I.1 Mandat 4
I.2 Objectifs 4
I.3 Méthodologie 4
II Données de base 6
II.1 Inventaires des ouvrages d'accumulation 6
II.2 Base de données pour la modélisation numérique 8
II.2.1 Inventaire des données nécessaires aux calculs numériques 8
II.2.2 Bilan des données disponibles pour la modélisation numérique 9
II.2.3 Problèmes rencontrés dans la récolte des données et hypothèses de calcul 12
II.3 Traitement de données 13
II.3.1 Données mesurées 13
II.3.2 Données calculées 14
III Modélisation numérique des quatre réseaux hydrographiques avec ouvrages d'accumulation 17
III.1 La Sarine 17
III.1.1 Calage du modèle numérique avec ouvrages 17
III.1.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation lors de la crue d'août 2005 22
III.2 L'Aare 22
III.2.1 Calage du modèle numérique avec ouvrages 22
III.2.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation lors de la crue d'août 2005 26
III.2.3 Influence des lacs de Grimsel et Raeterichsboden en exploitation normale 26
III.3 La Reuss 31
III.3.1 Calage du modèle numérique 31
III.3.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation lors de la crue d'août 2005 33
III.4 La Linth 34
III.4.1 Calage du modèle numérique 34
III.4.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation lors de la crue d'août 2005 36
IV Modélisation numérique des quatre réseaux hydrographiques sans ouvrages d'accumulation 38
IV.1 Suppression des ouvrages d'accumulation 38
IV.2 Reconstitution des bassins versants naturels 38
V Influence des ouvrages d'accumulation sur la crue d'août 2005 42
V.1 Réduction de la pointe de la crue par les ouvrages d'accumulation 42
V.1.1 La Sarine 42
V.1.2 L'Aare 45
V.1.3 La Reuss 48
V.1.4 La Linth 50
V.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation 52
V.2.1 La Sarine 52
V.2.2 L'Aare 53
V.2.3 La Reuss 55
V.2.4 La Linth 55
V.3 Récapitulatif 56
VI Conclusions 57
Références 58
Annexes 59
Annexe 1 - LA SARINE 60
Annexe 2 - L'AARE 63
Annexe 3 - LA REUSS 66
Annexe 4 - LA LINTH 68

I Préambule

I.1 Mandat

La présente étude fait suite à la demande faite par Mr Darbre de l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN), Section Barrages, et l'offre AquaVision Engineering Sàrl datant du 2 mars 2006. Elle est conforme au contrat d'étude entre OFEN et AquaVision Engineering Sàrl datant du 28 avril 2006.

I.2 Objectifs

Cette étude a pour objectif d'estimer l'influence des ouvrages d'accumulation lors des intempéries d'août 2005 sur (voir Figure 1) :

- La Sarine sur un tronçon d'environ 82 km, jusqu'à Laupen en aval du lac de Schiffenen,
- L'Aare sur un tronçon d'environ 31 km, jusqu'à Brienzwiler, en amont du lac de Brienz,
- La Reuss sur un tronçon d'environ 40 km, jusqu'à Seedorf, en amont du lac des quatre cantons,
- La Linth sur un tronçon de 25 km, jusqu'à Mollis, en amont du lac de Walen.

La modélisation numérique du fonctionnement des ouvrages d'accumulation sur ces quatre réseaux hydrographiques a pour but de montrer l'effet de la présence de ces ouvrages sur les caractéristiques de propagation, le volume et le débit de pointe de la crue d'août 2005.

I.3 Méthodologie

Dans ce cadre, une première étape a consisté à modéliser numériquement les quatre tronçons de cours d'eau et leurs ouvrages d'accumulation.

L'outil de simulation utilisé, le logiciel « Routing System », [1], répond de manière simple et efficace à la problématique. En effet, il permet la formation, le transfert et le laminage de crues à travers des réseaux hydrauliques complexes en intégrant le fonctionnement d'ouvrages hydroélectriques et de retenues.

Les données intégrées dans le modèle pour caractériser les cours d'eau, les bassins versants et les ouvrages d'accumulations ont été fournies :

- par les exploitants pour les niveaux des retenues, les débits captés, turbinés, évacués, les lois hauteur-volume (loi H-V) caractérisant la retenue,
- par l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) pour les hydrogrammes mesurés à différents points du réseau étudié ainsi que pour les caractéristiques des cours d'eau.

Le modèle numérique a été calé localement pour chaque ouvrage, basé sur les mesures des exploitants, et globalement sur le tronçon étudié grâce aux mesures de débit des cours d'eau par les stations OFEV. Les calculs du routage de la crue d'août 2005 avec ouvrages ont permis de déterminer :

- les débits naturels entrants des retenues et non-mesurés,
- les débits naturels des affluents des cours d'eau étudiées par routage inverse à partir des hydrogrammes mesurés,
- les volumes stockés dans les retenues pendant la crue d'août 2005.

Dans une seconde étape, les quatre réseaux hydrographiques ont été modélisés sans ouvrages d'accumulation. Cela a consisté à :

- supprimer les retenues et les remplacer par un tronçon de routage,
- supprimer les débits turbinés, pompés, captés, de dotation et ne conserver que les débits naturels mesurés ou non mesurés,

- reconstituer les bassins versants naturels et restituer aux cours d'eau et aux affluents les débits captés par les prises d'eau.

Finalement, la comparaison entre les hydrogrammes sans ouvrages et les hydrogrammes avec ouvrages conduit à l'estimation de l'influence des ouvrages sur le laminage de la pointe de la crue et sur le volume de crue stocké durant cette période d'août 2005.

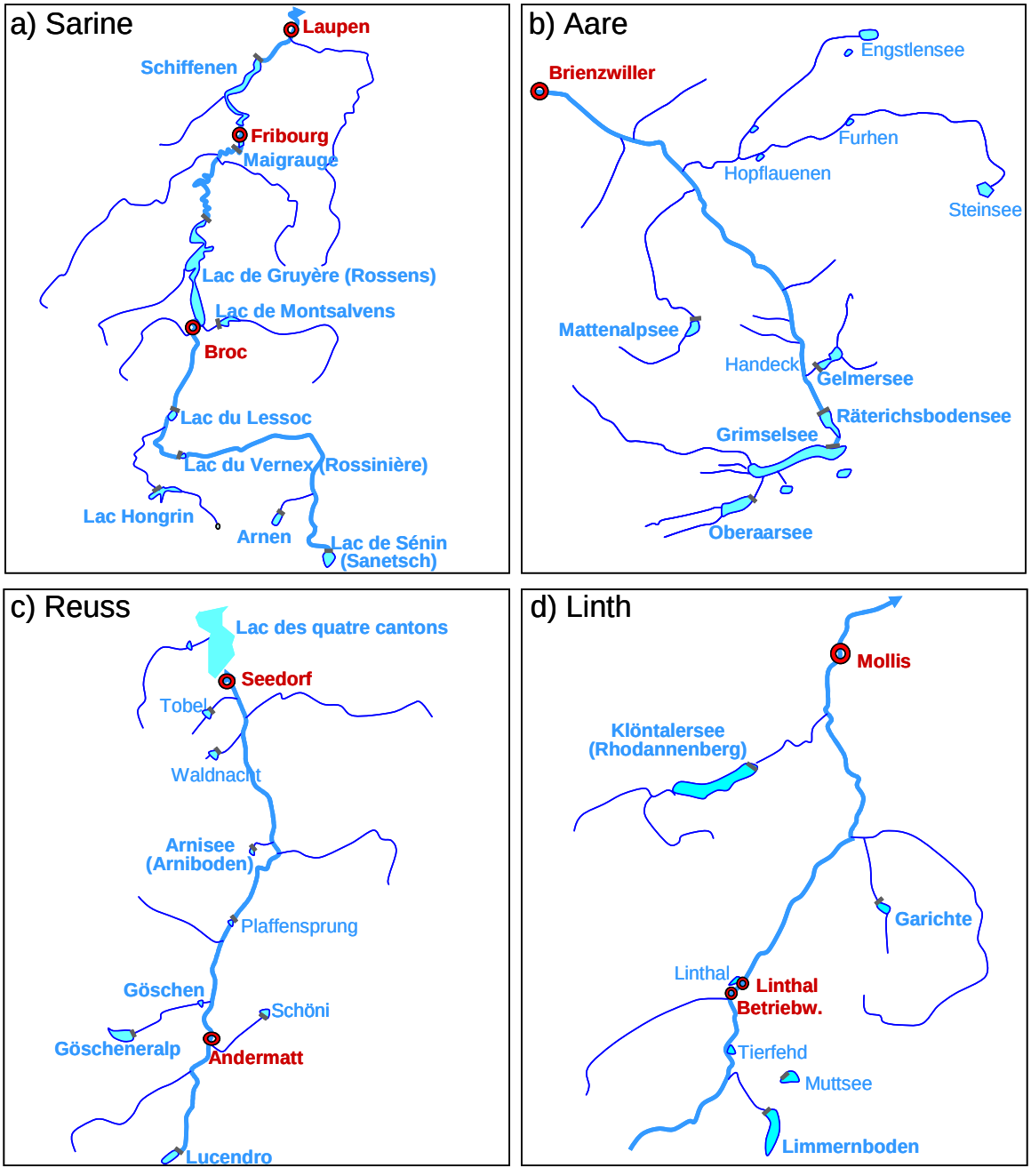


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude pour les quatre cours d'eau a) Sarine, b) Aare, c) Reuss, d) Linth. Les endroits indiqués en rouge disposent d'une station de mesure OFEV.

II Données de base

II.1 Inventaires des ouvrages d'accumulation

La première étape de récolte des données a consisté à faire l'inventaire des principaux ouvrages d'accumulation sur les quatre tronçons de cours d'eau étudiés. Leurs principales caractéristiques sont résumées du Tableau 1 au Tableau 4.

La Sarine

Barrage	Canton	Type	Hauteur (m)	Evacuateur	Volume lac (Mio. m³)	Exploitant
Sanetsch	Valais	Barrage poids	42	Déversoir libre	2.7	KW Sanetsch
Arnen	Bern	Digue en terre	17	Déversoir libre	11	Romande
Hongrin Nord	Vaud	Barrage voûte	125	Déversoir libre	52	FM Hongrin
Hongrin Sud	Vaud	Barrage voûte	90	Déversoir libre	52	FM Hongrin
Rossinière	Vaud	Barrage poids	30	Libre et vanné	2.9	EEF
Lessoc	Vaud	Contreforts	32.5	Déversoir vanné	1.5	EEF
Montsalvens	Fribourg	Barrage voûte	52	Déversoir vanné	9.5	EEF
Rossens	Fribourg	Barrage voûte	83	Déversoir vanné	200	EEF
Maigrauge	Fribourg	Barrage poids	24	Déversoir vanné	0.36	EEF
Schiffenen	Fribourg	Barrage voûte	47	Déversoir vanné	66	EEF

Tableau 1 : Inventaire des principaux ouvrages d'accumulation sur le tronçon d'étude de la Sarine

L'Aare

Dans le cas particulier de l'Aare, les ouvrages d'accumulation sont liés les uns aux autres à travers les usines hydroélectriques et les bassins de compensation du complexe d'Oberhasli (exploitant : KWO). Ils sont représentés à la Figure 2.

Barrage	Canton	Type	Hauteur (m)	Evacuateur	Volume lac (Mio. m³)	Exploitant
Oberaar	Bern	Barrage poids	100	Déversoir libre	61	KWO
Grimsel – Spitallam	Bern	Barrage voûte	114	Déversoir libre	101	KWO
Grimsel - Seeuferegg	Bern	Barrage poids	42	Déversoir libre	101	KWO
Raeterichsboden	Bern	Barrage poids	94	Déversoir libre	27	KWO
Mattenalp	Bern	Barrage poids/en terre	27	Déversoir libre	2.1	KWO
Gelmer	Bern	Barrage poids	35	Déversoir libre	14	KWO

Tableau 2 : Inventaire des principaux ouvrages d'accumulation sur le tronçon d'étude de l'Aare

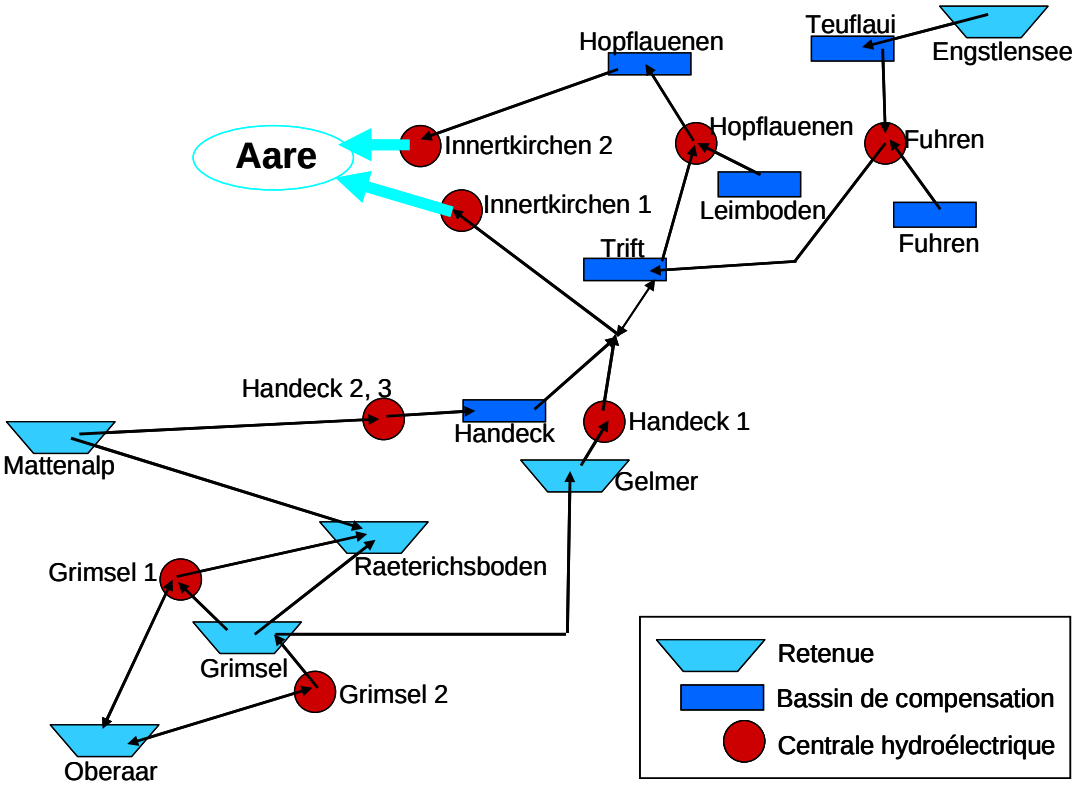


Figure 2 : Schématisation du complexe Oberhasli (KWO)

La Reuss

Barrage	Canton	Type	Hauteur (m)	Evacuateur	Volume lac (Mio. m³)	Exploitant
Lucendro	Tessin	Contreforts	73	Déversoir libre	25	Aare-Tessin AG
Göscheneralp	Uri	Digue en enrochement	155	Libre et vanné	76	KW Göschenen
Göschenerreuss	Uri	Barrage poids	36	Déversoir vanné	0.1	KW Wassen
Pfaffensprung	Uri	Barrage voûte	32	Libre et vanné	0.15	Schweizer Bundesbahnen
Arniboden Sud	Uri	Digue en terre	15	-	0.24	EW Altdorf
Tobel	Uri	Barrage voûte	30	Déversoir libre	0.1	Baudirektion des Kantons Uri, Altdorf
Isenthal	Uri	Barrage poids	20	Déversoir vanné	0.025	EW Altdorf
Schöni-Oberalpreuss	Uri	Barrage poids	17	Déversoir libre	0.02	Elektrizitätswerk Urseren, Andermatt
Waldnacht	Uri	Digue en terre	10	Déversoir libre	0.03	GWE

Tableau 3 : Inventaire des principaux ouvrages d'accumulation sur le tronçon d'étude de la Reuss

La Linth

Barrage	Canton	Type	Hauteur (m)	Evacuateur	Volume lac (Mio. m³)	Exploitant
Limmern	Glaris	Barrage voûte	146	Déversoir libre	93	Linth-Limmern (KLL-NOK)
Garichte Hauptmauer	Glaris	Barrage poids	42	Déversoir vanné	3.29	KW Sernf-Nied.
Garichte Nebenmauer	Glaris	Barrage poids	18	Déversoir vanné	3.29	KW Sernf-Nied.
Rhodannenberg	Glaris	Digue en terre	30	Déversoir libre	56	NOK

Tableau 4 : Inventaire des principaux ouvrages d'accumulation sur le tronçon d'étude de la Linth

Les exploitants ont été sollicités pour fournir toutes les données disponibles caractérisant le fonctionnement des ouvrages lors des intempéries d'août 2005.

II.2 Base de données pour la modélisation numérique

Dans la zone étudiée, la pointe de la crue est arrivée le 22 août 2005, en fin d'après-midi. Pour l'encadrer, la période retenue pour l'étude de l'influence des ouvrages d'accumulation s'étend du 15 août au 31 août 2005.

II.2.1 Inventaire des données nécessaires aux calculs numériques

Pour modéliser les 4 réseaux hydrographiques de la Sarine, l'Aare, la Reuss et la Linth dans Routing System, trois types de données sont nécessaires comme indiqué à la Figure 3:

- Les données hydrauliques relatives aux ouvrages d'accumulation, fournies par les exploitants :
  - Débits « artificiels » : débits turbinés, pompés, captés dans les prises d'eau, évacués (déversement, vidange de fond),
  - Débits « naturels » entrants mesurés,
  - Lois d'exploitation : Loi Hauteur – Volume (loi H-V) de la retenue, loi Hauteur – Débit des organes d'évacuation.
    Ces données permettent de modéliser le fonctionnement des ouvrages pendant la crue, de déterminer le bilan des volumes entrant et sortant dans chaque retenue et d'en déduire les débits entrant et sortant non mesurés telles que la pluie directe, des petits affluents, des rejets.

- Les données hydrauliques des cours d'eau fournies par l'OFEV :
  - Hydrogrammes mesurés en différentes stations OFEV dans les quatre cours d'eau.
    Les hydrogrammes mesurés représentent des points de calage précieux pour les quatre modèles numériques.

- Les données morphologiques sur les cours d'eau
  - Les profils types et la largeur moyenne du lit des tronçons de cours d'eau entre chaque ouvrage fournies par l'OFEV,
  - La longueur et pente moyennes déterminées à partir des cartes nationales au 1:25000
  - La rugosité moyenne des cours d'eau

Ces données influent directement sur le routage de la crue au travers du réseau.

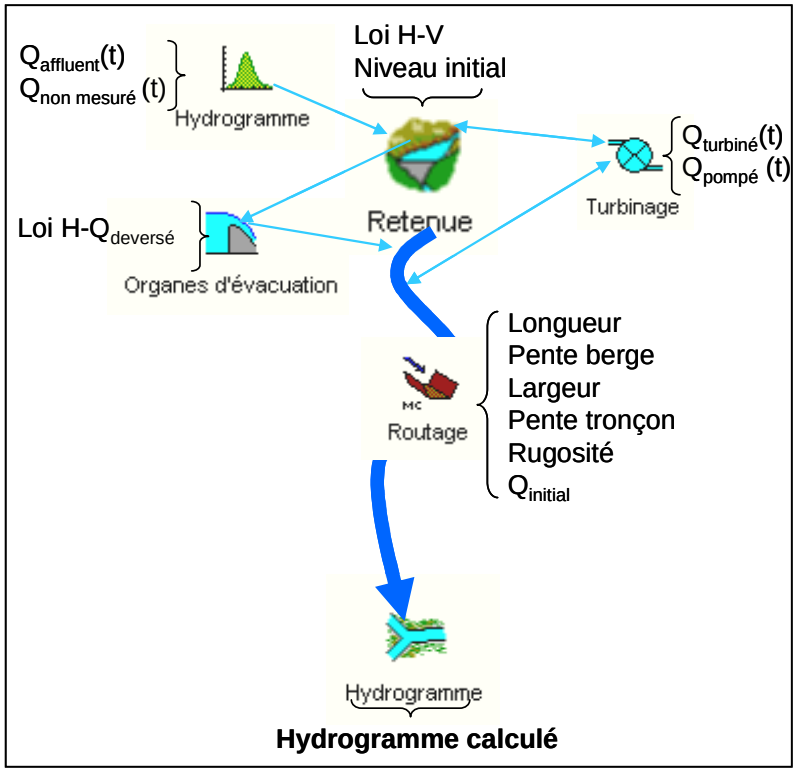


Figure 3 : Schématisation des données nécessaires pour la modélisation dans Routing System

II.2.2 Bilan des données disponibles pour la modélisation numérique

La Figure 4 et la Figure 5 illustrent les données disponibles ou manquantes pour la modélisation numérique des quatre cours d'eau.

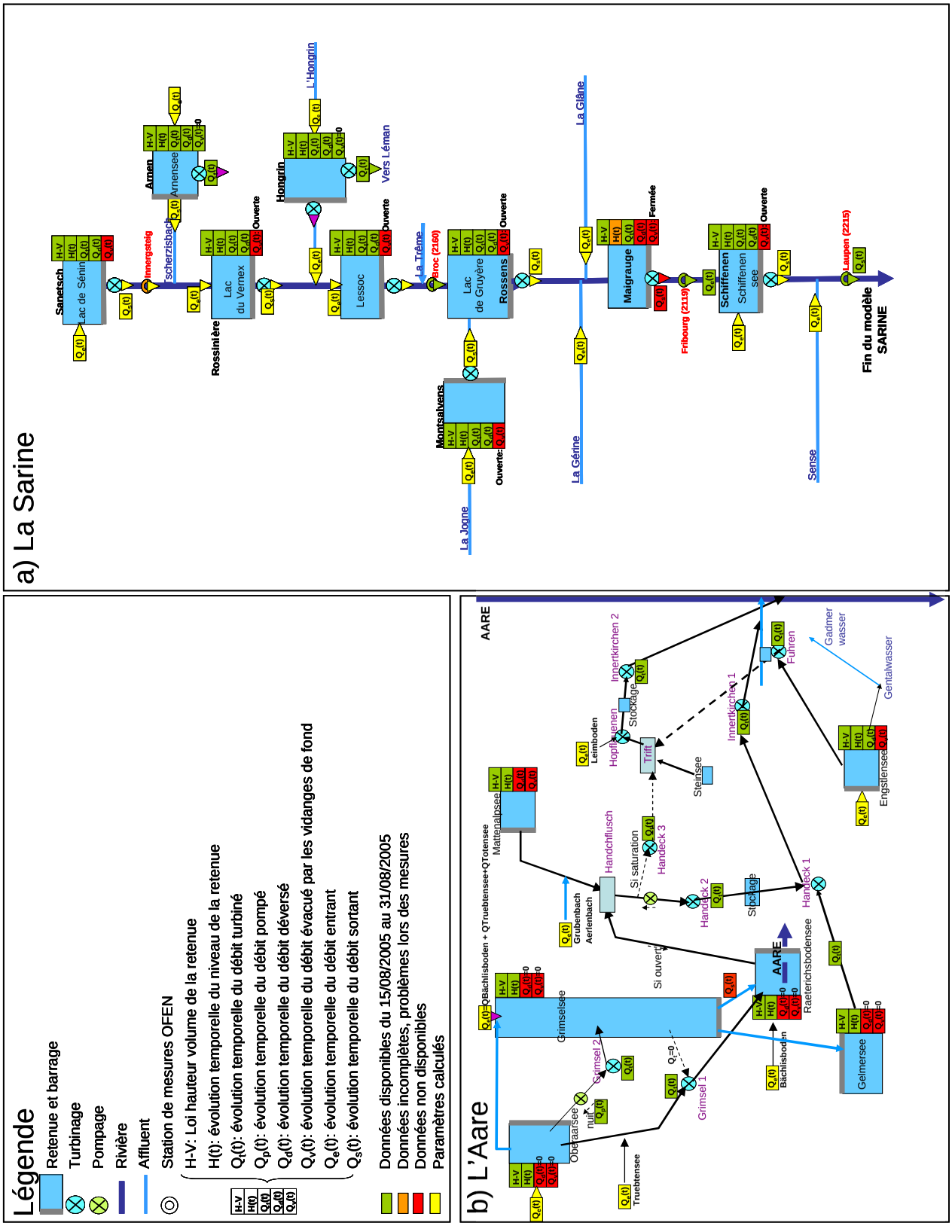


Figure 4 : Bilan des données mesurées disponibles (en vert), des données manquantes (en rouge) et des données calculées (en jaune) pour la Sarine et l'Aare

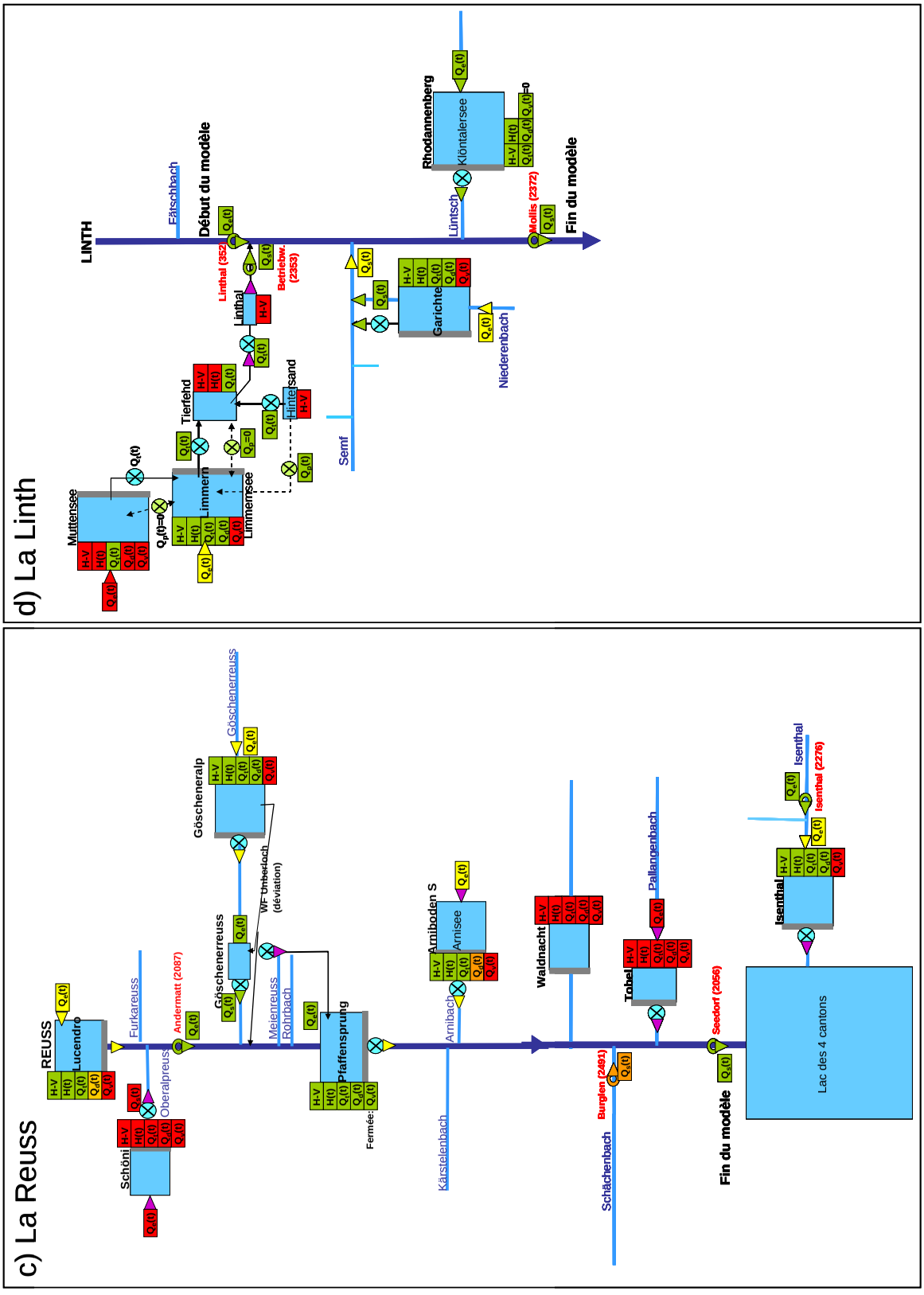


Figure 5 : Bilan des données mesurées disponibles (en vert), des données manquantes (en rouge) et des données calculées (en jaune) pour la Reuss et la Linth

II.2.3 Problèmes rencontrés dans la récolte des données et hypothèses de calcul

La modélisation numérique a connue quelques insuffisances de données. Cela a impliqué des hypothèses de calculs pour estimer les ordres de grandeur des données manquantes.

Les principaux problèmes rencontrés sont :

1) Des données avec des pas de temps trop grossiers, i.e. journalier au lieu d'horaire.
   C'est le cas pour :
- la retenue de Sénin sur la Sarine,
- la retenue de Mattenalp sur l'Urbachwasser dans le bassin versant de l'Aare,
- la retenue de Lucendro sur la Reuss

Un pas de temps journalier ne permet pas de calculer avec précision le bilan des volumes entrants et sortants dans la retenue ni de représenter fidèlement les fluctuations du niveau de la retenue pendant la crue. Pour ces retenues, l'estimation des débits entrants et sortants non mesurés reste grossière.

2) Des lois Hauteur-Volume (H-V) peu précises
   Ce problème de précision a été rencontré pour de petites retenues comme :
- lac de Rossinière, de Lessoc, de la Maigrauge sur la Sarine,
- lac de Pfaffensprung sur la Reuss

Avec des lois H-V peu précises, le niveau du lac calculé suit les mêmes tendances que le niveau mesuré mais ne reproduit pas fidèlement les petites amplitudes de fluctuation.

3) Absence de données sur la répartition des débits captés par différentes prises d'eau
   Trois principaux ouvrages captent des eaux dans différentes cours d'eau :
- le barrage de l'Hongrin sur l'Hongrin dans le bassin versant de la Sarine,
- les barrages Göscheneralp-Goschenen et Pfaffensprung sur la Reuss,
- le complexe Linth-Limmern dans le bassin versant de la Linth.

Dans le cas du barrage de l'Hongrin, un débit est capté par huit prises d'eau dont deux seulement sont sur deux affluents de la Sarine, l'une sur la Torneresse à l'amont de l'Etivaz et l'autre sur l'Eau Froide, affluent de la Torneresse [2]. Les autres prises d'eau ne concernent pas le bassin versant de la Sarine. Le débit total capté pendant la crue d'août 2005 n'a pas été mesuré. Cependant, les débits turbinés et pompés ainsi que la variation du volume du lac pendant la crue sont connus. Le débit total qui entre dans la retenue peut alors être estimé d'après le bilan des volumes entrants et sortants (voir § II.3.2). Par hypothèse, ce débit total entrant calculé est réparti par prise d'eau et par affluent naturel du lac de l'Hongrin proportionnellement aux surfaces des sous-bassins versants correspondants.

Pour les autres barrages, le débit total capté par ouvrage est connu pour la période du 15 au 31 août 2005 ainsi que les débits maximum de captage par prise d'eau. Par hypothèse, pour estimer le débit capté par prise d'eau, le débit capté total est alors réparti par prise d'eau proportionnellement à la surface du sous-bassin versant correspondant. Le débit maximal par prise d'eau étant connu, cela a permis de vérifier la fiabilité du débit capté ainsi calculé.

4) Absence de données

Les données hydrauliques ne sont pas disponibles pour trois ouvrages dans le bassin versant de la Reuss : les barrages de Schöni, Waldnacht et Tobel. Cependant, d'après les exploitants, ces ouvrages n'ont pas stocké de volume d'eau pendant la crue d'août 2005. N'ayant pas d'influence pendant ces intempéries, ces trois retenues ne sont pas prises en compte dans le modèle numérique.

5) Cas particulier du problème de fonctionnement du barrage de la Maigrauge sur la Sarine

Pendant la crue d'août 2005, le barrage de la Maigrauge a connu quelques incidents. D'après les données des EEF et le rapport d'expertise [3], pendant la crue, l'évacuateur en rive droite, d'une capacité de 212 m^3/s et qui était en révision, n'a pu être utilisé. Cela a provoqué une accumulation de

corps flottants devant la prise d'eau et par la suite un arrêt du turbinage. En rive gauche, une des vannes d'évacuation n'a pu être momentanément totalement levée à cause de l'importante quantité des bois flottants. De plus, l'écoulement en aval des 3 vannes en rive gauche (capacité 720 m^3/s) a provoqué des dégâts importants en rive droite (voir Figure 6) et sur la route d'accès. La Sarine a en effet débordé sur cette rive, provoquant une forte érosion. Comme décrit en détail dans [3], une des fondations de la passerelle du chemin Ritter s'est alors rompue, détruisant la passerelle.

Par conséquence, la mesure des débits évacués n'a pas été possible pendant la crue et la mesure du niveau du lac semble peu fiable. De ce fait, pour modéliser la retenue de la Maigrauge, un calcul de routage inverse basé sur l'hydrogramme mesuré à la station de Fribourg en aval immédiat de la Maigrauge a permis d'estimer le débit évacué lors de la crue (voir Figure 8, § III.1.1).

Figure 6 : Photographie depuis l'aval du barrage de la Maigrauge le 22 août 2005 [4]

6) Débordement à la station de mesure de Brienzwiler

Lors de la pointe de la crue, l'Aare est sortie de son lit localement au niveau de la station de mesure de Brienzwiler. Dans le cadre de l'étude [5] et à partir d'analyse de photos pendant la crue, il a été estimé que le débit de pointe de la crue d'août 2005 mesuré à Brienzwiler est sous estimée d'environ 76 m^3/s. Etant donné que cette imprécision du débit de pointe à l'aval du modèle n'a a priori pas d'influence sur le calcul des volumes stockés par les retenues, l'hydrogramme mesuré à Brienzwiler est conservé sans modification pour les calculs numériques.

7) Absence de données sur les débits des affluents

Les stations de l'OFEV fonctionnelles lors de la crue d'août 2005 ne concernent que les quatre cours d'eau. Aucune donnée concernant les affluents n'est disponible. Les débits seront alors estimés par routage inverse comme indiqué au paragraphe II.3.2 suivant.

II.3 Traitement de données

II.3.1 Données mesurées

Les données ont été fournies soit par fichiers informatiques soit sur format papier. Le traitement des données a donc consisté à :

- Numériser les « données papier ».
- Mettre au format et synchroniser l'ensemble des données. Pour modéliser le routage de la crue d'août 2005 à travers les 4 réseaux sans erreur de déphasage, il est impératif que la totalité des fichiers de données hydrauliques démarre au même instant, ici fixé au 15 août 2005 à 0h.

- Détecter les valeurs aberrantes. En effet, pendant la pointe de la crue, quelques appareils de mesures perturbés n'ont pu mesurer avec fiabilité les paramètres hydrauliques ou n'étaient pas calibrés pour de telles valeurs.

La précision des données varie d'un ouvrage à l'autre. De manière générale, le cumul des incertitudes sur la mesure des niveaux d'eau (précision de l'ordre du centimètre), des débits (précision de l'ordre de 20 à 50 l/s), des hydrogrammes (précision de l'ordre de 10% pour les stations de mesure les plus performantes), des données géométriques des rivières (précision de l'ordre de 50 m pour la longueur des tronçons et du demi-mètre pour les largeurs) conduit à une précision sur les résultats numériques (volumes stockés, débits de pointe sans ouvrages) de l'ordre de 10-15 %.

II.3.2 Données calculées

Débits entrant et sortant des retenues non mesurés

Pour la majeure partie des retenues, le débit naturel entrant (affluent, apport direct des précipitations) dans la retenue n'est que partiellement ou pas mesuré. De plus, pour certaines retenues, les organes de vidange de fond ont fonctionné pendant la crue mais les données n'étaient pas disponibles. Ces débits non mesurés sont alors calculés analytiquement basé sur le bilan des volumes des retenues.

A chaque pas de temps, la variation totale du volume de la retenue, dV_{total}, s'écrit :

$$dV_{total}=V_{entrant\ total} - V_{sortant\ total}$$

$$V_{entrant\ total} = V_{entrant\ mesuré} + V_{entrant\ non\ mesuré} \quad \text{et} \quad V_{sortant\ total} = V_{sortant\ mesuré} + V_{sortant\ non\ mesuré}$$

La variation totale de volume dV_{total} est déterminée d'après les données des exploitants : le niveau du lac mesuré et la loi H-V correspondante.

La variation du volume mesurée est calculée à partir des volumes entrant et sortant mesurés par les exploitants :

$$dV_{mesuré} = V_{entrant\ mesuré} - V_{sortant\ mesuré}$$

La variation du volume non mesuré $dV_{non\ mesuré}$, est alors déduite par :

$$dV_{non\ mesuré}= dV_{total} - dV_{mesuré}$$

Par hypothèse :

- si $dV_{non\ mesuré}$ est négatif et que la vidange de fond a fonctionné pendant la crue, le volume non mesuré est sortant,
- si $dV_{non\ mesuré}$ est positif et que la vidange de fond était fermée pendant la crue, le volume non mesuré est entrant.

Dans le cas où $dV_{non\ mesuré}$ est alternativement positif et négatif et que la vidange de fond était fonctionnelle, c'est le bilan global $dV_{non\ mesuré}$ qui est intégré dans le calcul hydraulique avec ouvrages, sans distinction de la partie entrante et sortante. Par contre, pour le calcul hydraulique sans ouvrages, seul le volume positif non mesuré sera retenu et pris en compte comme volume entrant naturel.

Affluents non mesurés

Les hydrogrammes mesurés aux stations OFEV résultent des hydrogrammes calculés ou mesurés sortant des différentes retenues et des hydrogrammes non mesurés transportés par les différents affluents. Les débits des affluents sont alors estimés par routage inverse. Par hypothèse, l'hydrogramme de crue mesuré moins les débits turbinés ou évacués est réparti proportionnellement à la surface des sous-bassins versants des affluents.

Cette méthode d'estimation est décrite par étape pour l'exemple de l'Aare. Pour ce cas, les données connues sont :

- l'hydrogramme à Brienzwiler, les débits sortant à Innertkirchen I et II et le débit sortant de la retenue d'Engstlensee dans la Gentalwasser (Figure 7),
- la surface des bassins versants des affluents mesurés sur la carte au 1:25000.

Etape 1) Afin de constituer l'hydrogramme « naturel » à Brienzwiler, les débits sortant des retenues sont déduits de l'hydrogramme mesuré.

Etape 2) L'hydrogramme « naturel » résultant est distribué à chaque affluent proportionnellement à la surface de son bassin versant. Ces hydrogrammes sont intégrés dans le modèle numérique en amont de chaque affluent. A l'aval du modèle, il résulte un hydrogramme calculé à Brienzwiler de même volume que celui mesuré mais déphasé dans le temps, comme le montre la courbe verte, Figure 7 : à cette étape du calcul, le routage à travers les cours d'eau n'est pas pris en compte dans les hydrogrammes amont des affluents.

Etape 3) Par itération dans le modèle numérique, les hydrogrammes amont des affluents sont calés dans le temps pour prendre en compte leur routage. Les déphasages obtenus entre les hydrogrammes amont des affluents et l'hydrogramme mesuré à Brienzwiler atteint jusqu'à 3h45min pour l'Arlenbach et le Loibbach. L'hydrogramme à Brienzwiler résultant de ces itérations est représenté en rouge sur la Figure 7.

Cette méthodologie est appliquée pour les quatre cours d'eau étudiés.

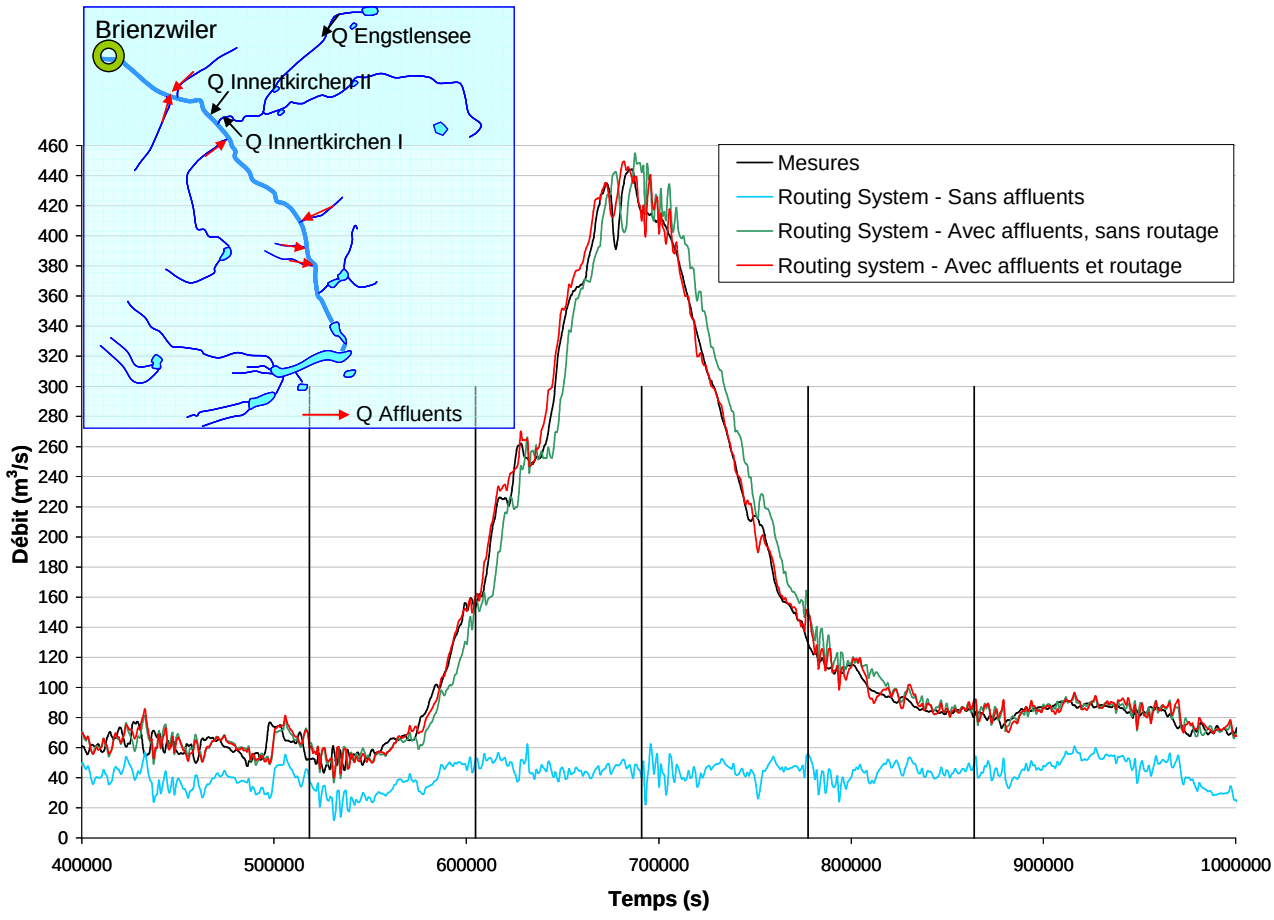


Figure 7 : Hydrogramme calculé avec Routing System à Brienzwiler (Aare)

Débits captés dans les prises d'eau

Pour l'ensemble des ouvrages excepté le barrage de l'Hongrin, le débit total capté par les prises d'eau par barrage est mesuré.

De manière analogue, par hypothèse, le débit total capté est distribué par prise d'eau proportionnellement à la surface du bassin versant concerné.

De plus, le débit maximal capté par prise d'eau est connu. Cette donnée permet de contrôler si l'hydrogramme calculé proportionnellement au bassin versant respecte bien cette valeur maximale. Lors des calculs numériques sans ouvrages, chaque hydrogramme capté est restitué au cours d'eau ou à l'affluent au niveau de la prise d'eau pour être transporté à travers le réseau hydrographique.

III Modélisation numérique des quatre réseaux hydrographiques avec ouvrages d'accumulation

III.1 La Sarine

III.1.1 Calage du modèle numérique avec ouvrages

Les neufs ouvrages d'accumulation présentés dans le Tableau 1 sont modélisés dans Routing System. Ce tronçon d'environ 82 km est étayé tout le long d'hydrogrammes mesurés comme le montre la Figure 8. Ces points de mesures permettent de caler l'ensemble du réseau hydrographique. De plus, le niveau de la retenue a été mesuré pendant la crue pour tous les ouvrages, permettant ainsi d'établir le bilan des volumes entrant et sortant lac par lac. Les débits des affluents sont déterminés par routage inverse basés sur les stations de Laupen, Fribourg et Broc. Le réseau pris en compte dans le modèle numérique et les points de calage sont représentés à la Figure 8.

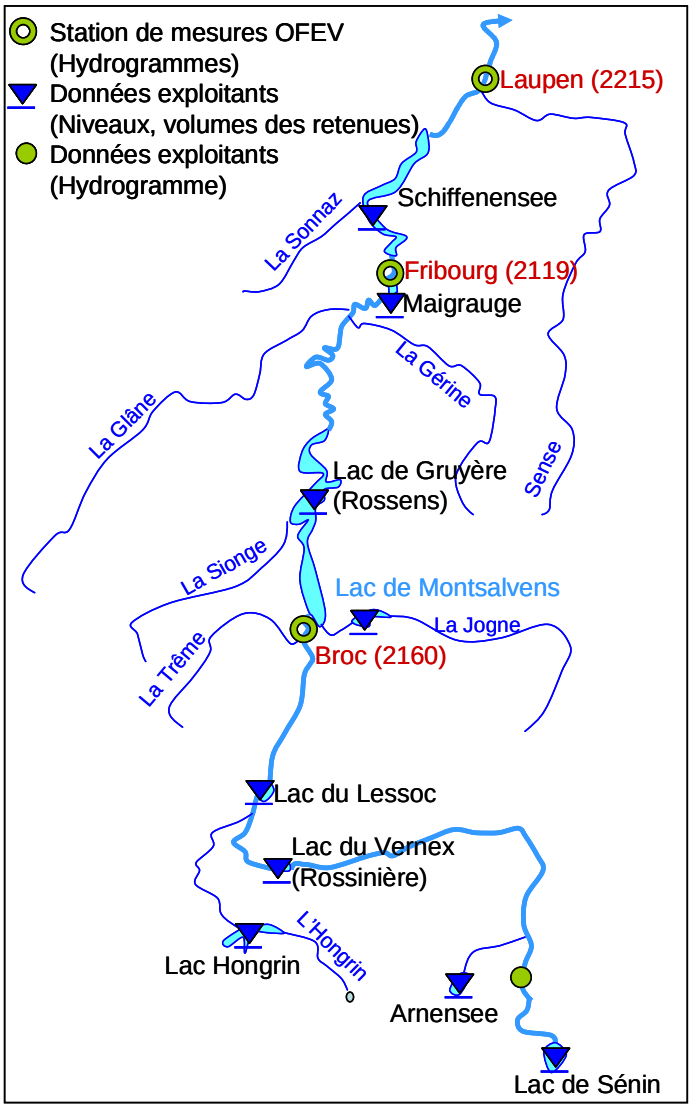


Figure 8 : Réseau hydrographique de la Sarine modélisé dans Routing System
Localisation des points de calage

Calage du niveau des retenues

Pour valider le fonctionnement de chaque ouvrage pendant la crue, les niveaux d'eau des retenues calculés avec Routing System sont comparés aux niveaux d'eau mesurés en Annexe 1.

Dans une première étape, seuls les débits mesurés, les niveaux initiaux des retenues et les lois H-V correspondantes sont intégrés dans le modèle numérique. Pour chaque retenue, ce premier calcul conduit à la variation temporelle du niveau des lacs calculés. Ces niveaux calculés sont alors comparés aux niveaux des retenues mesurés fournis par les exploitants. Il en résulte que globalement, les niveaux des lacs calculés suivent la même variation que les niveaux mesurés. Cependant, de différences ont été détectées pour certaines retenues, comme illustré à la Figure 9 pour le lac de Gruyère. Elles peuvent s'expliquer par l'existence de débits entrant et/ou sortant non mesurés.

Par conséquent, dans une deuxième étape, afin de caler les niveaux des retenues, des débits sortants non mesurés, raisonnablement attribués à l'ouverture des vidanges de fond pendant le passage de la crue, ont été ajoutés au bilan des volumes pour les ouvrages de Rossinière, Montsalvens, Rossens et Schiffenen. De plus, le calage a conduit également à la prise en compte de débits entrants naturels non mesurés dans les retenues tels que les affluents. Ces débits non mesurés ont été estimés analytiquement comme décrit au § II.3.2.

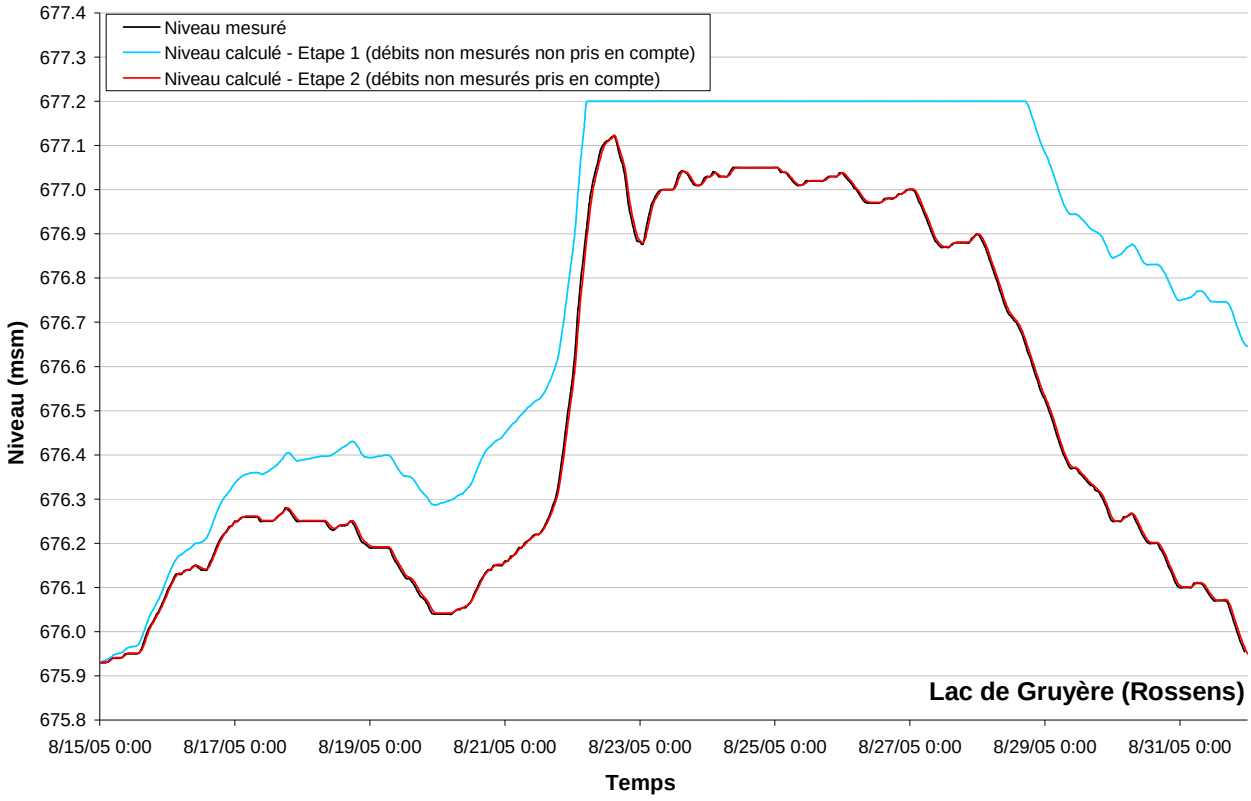


Figure 9 : Calage du niveau de la retenue de Rossens (lac de Gruyère) – Débit de vidange de fond non pris en compte (courbe bleu)

Finalement, après cette seconde étape de modélisation, à l'exception de la retenue de la Maigrauge, les niveaux des retenues calculés représentent réalistement les niveaux mesurés pendant la crue d'août 2005 comme il peut être observé en Annexe 1.

Remarques :
Dans le cas de la digue d'Arnon, les mesures ont été fournies avec un pas de temps journalier. Le bilan des volumes de la retenue ne peut donc pas être calé avec précision comme le montre le graphe correspondant en Annexe 1. L'erreur maximale sur le niveau d'eau est de 13 cm.

Pour la petite retenue de Vernex, le niveau d'eau calculé suit les mêmes fluctuations que les mesures mais avec des amplitudes différentes en période de décrue (erreur maximale de 50 cm). Cette erreur peut provenir de l'imprécision de la loi H-V de la retenue, de l'absence de données sur le débit de la vidange de fond. Cependant, ce décalage n'a pas d'effet significatif sur le bilan du débit stocké à Rossinière pendant la crue. En effet, le volume journalier stocké calculé avec le modèle pendant la crue est comparé au volume estimé dans l'étude [6]. Les résultats, Tableau 5, montrent que les ordres de grandeur sont comparables, la différence étant inférieure à la marge de précision des mesures.

Date	**Etude [6]** $\overline{Q}_{stocké} = \overline{Q}_{entrant} - \overline{Q}_{sortant}$ **(m³/s)**	**Résultats Routing System** $Q_{stocké} = Q_{entrant} - Q_{sortant}$ **(m³/s)**
21/08/2005	≈ 14	10.7
22/08/2005	≈ 19	18.2
23/08/2005	≈ 0	0.2
24/08/2005	≈ 0	-1.3
Pointe du stockage	Le 22 entre 1h45 et 2h $\overline{Q}_{max}$ =36 m³/s	Le 22 à 2h Q_{max}=42.2 m³/s

Tableau 5 : Débits calculés stockés dans la retenue de Rossinière du 21 au 24 août 2005
Comparaison des résultats de la modélisation dans Routing System et de l'étude [6]

Dans le cas de la retenue de la Maigrauge, les données à disposition n'ont pas permis de reproduire la fluctuation du niveau du lac. Pour caler ce niveau, les débits non mesurés qui devraient être pris en compte dans le modèle sont aberrants. Ce problème peut s'expliquer par la concordance de différentes erreurs :

- Le débit déversé n'a pas été mesuré. Dans le modèle numérique, le débit total évacué a été estimé par routage inverse basé sur l'hydrogramme mesuré à Fribourg en aval proche de la Maigrauge (voir Figure 8). Cependant l'étude [3] a montré que les mesures du débit à Fribourg pendant la crue ont été surestimées (courbe de jaugeage niveau – débit de la station erronée pour des débits supérieurs à 450 m³/s). La pointe de crue calculée et corrigée dans [3] est en effet de l'ordre de 650-660 m³/s au lieu de 748.7 m³/s mesuré. Cette erreur du débit de pointe à Fribourg est donc reportée sur le débit évacué calculé dans Routing System.

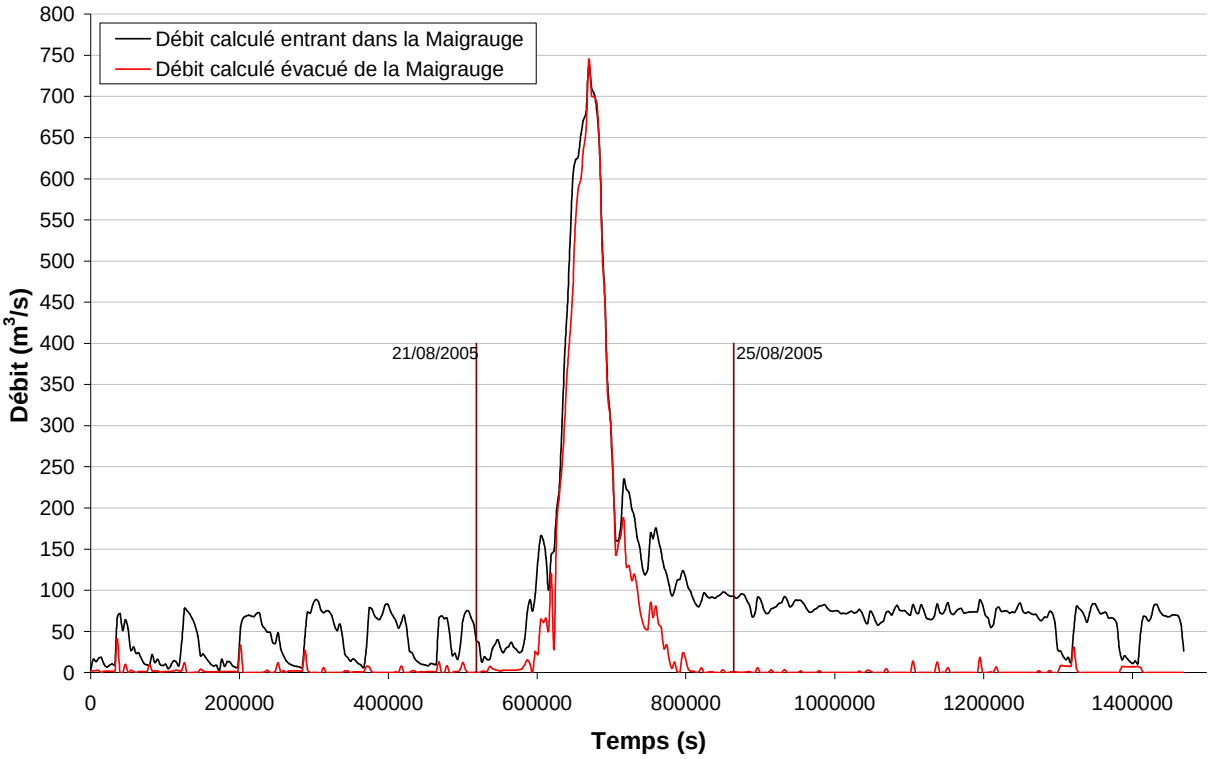


Figure 10 : Retenue de la Maigrauge - Débit entrant calculé d'après le routage amont du modèle et débit évacué calculé basé sur l'hydrogramme de Fribourg

- Un volume d'eau significatif a été retenu sur la rive droite inondée pendant la crue. Ce n'est qu'à la décrue que ce volume a été restitué à la Sarine. Ce volume, estimé à 1 Mio. de m^3 [3], n'a pas été pris en compte dans le bilan des volumes de la Maigrauge.

Quoiqu'il en soit, comme le montre la variation du volume de la retenue, la Maigrauge n'a pas stocké pendant la crue d'août 2005. Ce problème rencontré n'a donc a priori pas d'influence sur l'estimation du volume stocké par les ouvrages d'accumulation.

Calage des hydrogrammes aux stations OFEV

Le calage des hydrogrammes de Broc et de Laupen ont permis de déterminer les débits des affluents principaux de la Sarine par distribution proportionnelle aux surfaces des sous-bassins versants et par routage inverse (§ II.3.2).

Le calage de l'hydrogramme de Fribourg a permis d'estimer le débit évacué par le barrage de la Maigrauge comme décrit ci-dessus.

Les hydrogrammes calculés sont représentés à la Figure 11 pour la station de Broc et Figure 12 pour la station de Laupen.

L'erreur sur la pointe de crue est inférieure à 1%.

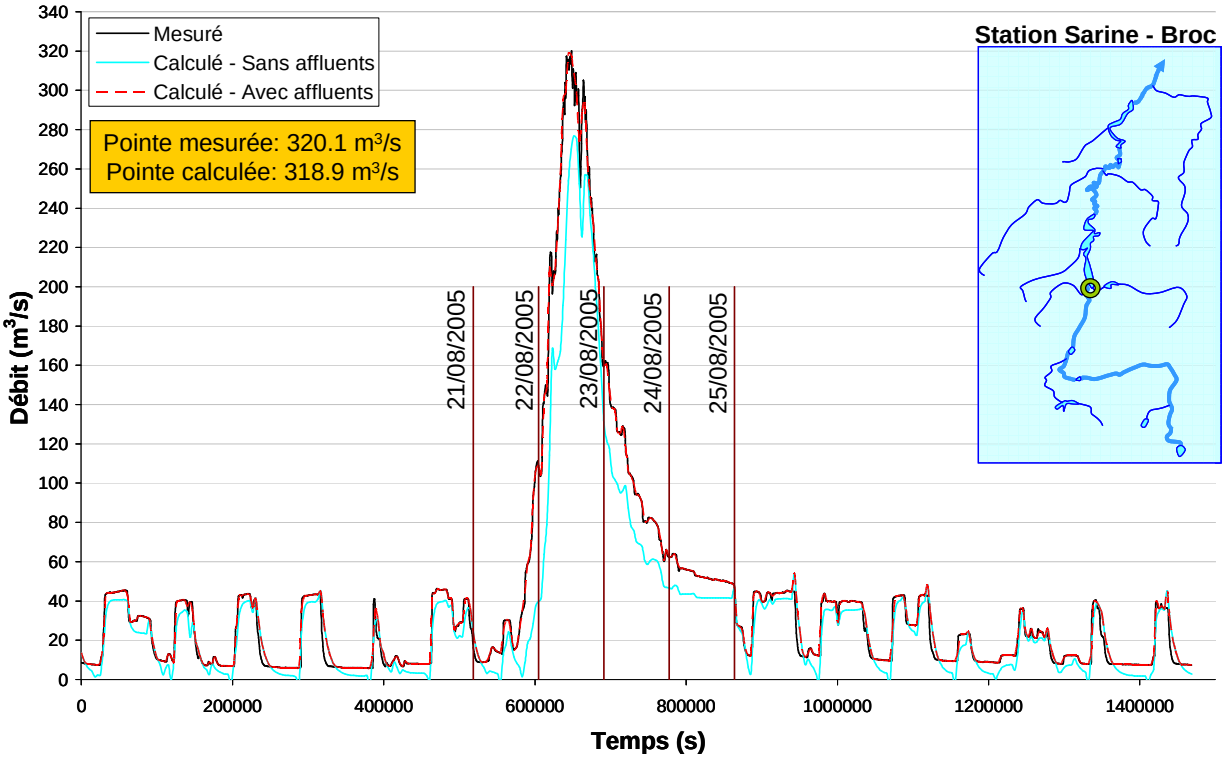


Figure 11 : Hydrogramme mesuré (en noir) et calculé (en rouge) à la station de Broc sur la Sarine

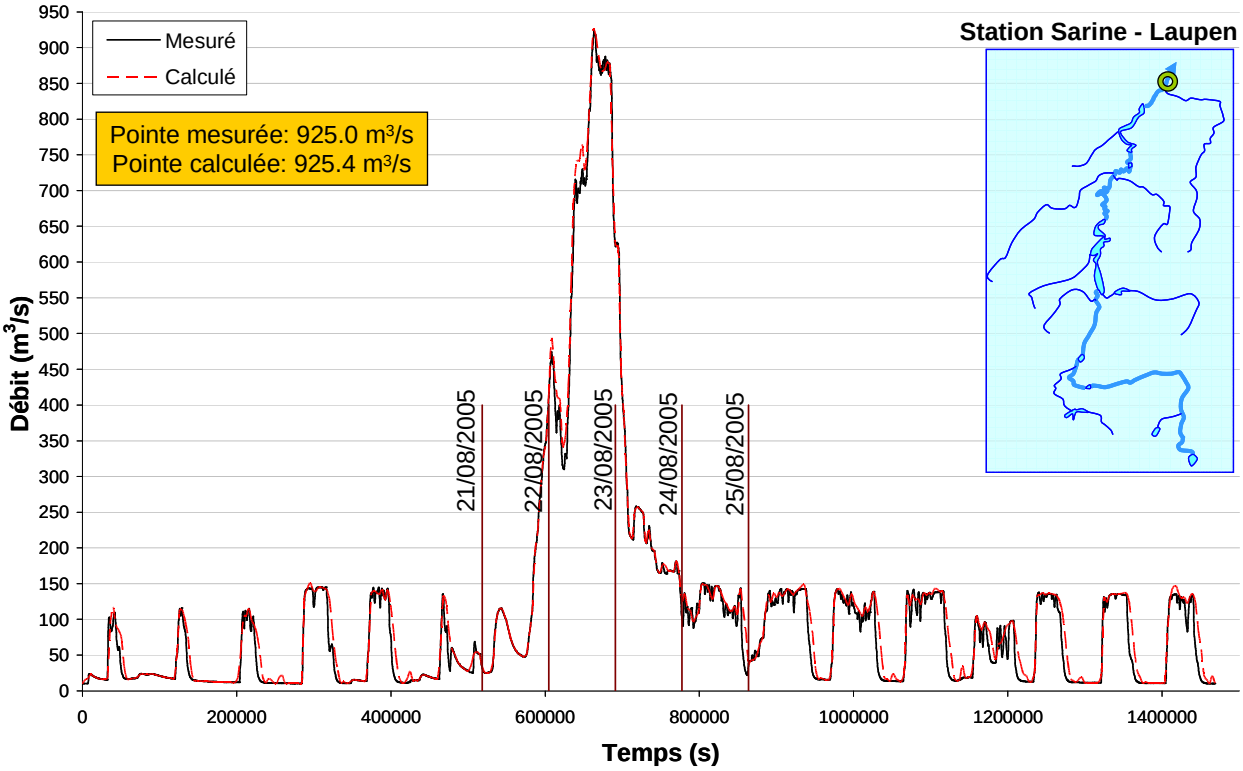


Figure 12 : Hydrogramme mesuré (en noir) et calculé (en rouge) à la station de Laupen, sur la Sarine

III.1.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation lors de la crue d'août 2005

Le modèle numérique étant calé, le bilan du volume entrant dans la retenue, naturel, capté et/ou pompé, et du volume sortant de la retenue, permet de déterminer le volume stocké par chaque ouvrage lors de la crue d'août 2005. Ces volumes stockés par retenue du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h) sont donnés dans le Tableau 6 ainsi que la part de contribution des ouvrages par rapport au volume totale stocké sur le tronçon d'étude.

Retenue	Volume stocké (Mio. de m^3)	% du stockage total
Sénin	0.20	1.0
Arnon	0.71	3.6
Vernex	0.82	4.2
(Hongrin*)	(5.27)	(26.8)
Lessoc	0.42	2.1
Montsalvens	2.30	11.7
Gruyère	8.35	42.5
Maigrauge	Pas de stockage	0
Schiffenen	1.60	8.1
Total	**19.67**	**100**

Tableau 6 : Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation sur la Sarine du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h)

**Cas particulier de la retenue de l'Hongrin* :
Contrairement aux autres ouvrages de la Sarine jusqu'à Schiffenen, le barrage de l'Hongrin dévie les eaux accumulées vers le lac Léman et non dans la Sarine. Ces eaux stockées dans le barrage proviennent seulement en partie du bassin versant de la Sarine (environ 17%) et du bassin versant du lac lui-même (environ 53 %). Une autre partie provient d'autres bassins versants, soit par pompage des eaux du Léman depuis l'usine de Veytaux, soit par captage par des prises d'eau. Toutes ces eaux sont turbinées à la centrale de Veytaux et restituées au lac Léman. C'est dans le seul cas d'un déversement qu'une partie significative du volume stocké pourrait être transférée vers la Sarine. Lors de la crue d'août 2005, la cote maximale de la retenue était à 1254.70 msm, soit environ 2 m en dessous de la cote de déversement. Le volume stocké n'a donc pas été transféré à la Sarine.

Ce sont donc les retenues de Gruyère, de l'Hongrin, de Montsalvens et de Schiffenen qui contribuent principalement au stockage de la crue. A l'exception de la digue d'Arnon, tous les ouvrages d'accumulation ont déversé pendant le passage de la crue.

III.2 L'Aare

III.2.1 Calage du modèle numérique avec ouvrages

Le réseau complexe de KWO, schématisé à la Figure 2, est caractérisé par six ouvrages d'accumulation reliés par des conduites forcées, des usines hydroélectriques avec turbinage et pompage, et des bassins de compensation. L'ensemble a été modélisé dans Routing System ainsi que le tronçon de 31 km de l'Aare.

Comme représenté à la Figure 13, seul l'hydrogramme de Brienzwiler en aval du tronçon étudié permet de caler l'hydrogramme calculé dans le modèle numérique. Cependant, ce tronçon de l'Aare a déjà fait l'objet de différentes études. Notamment, dans le cadre de l'étude [5], la pointe de la crue aux divers points de l'Aare (localisés à la Figure 13) a été estimée à partir d'analyse de photos pendant la crue et de la capacité théorique de l'Aare. Ces informations servent aussi de calage au modèle numérique.

Le réseau pris en compte dans le modèle numérique et les points de calage sont représentés à la Figure 13.

Figure 13 : Réseau hydrographique de l'Aare modélisé dans Routing System
Localisation des points de calage

Calage du niveau des retenues

Les niveaux d'eau calculés et calés sont représentés en Annexe 2 avec les niveaux d'eau mesurés dans les retenues.

Excepté pour le lac de Mattenalp où le niveau calculé est déphasé avec le niveau mesuré pendant le passage de la crue, les niveaux des lacs calculés correspondent aux niveaux mesurés. Ce calage par retenue a conduit à la détermination des débits entrants naturels non mesurés dans les retenues.

Pour les quatre principaux ouvrages, Oberaar, Grimsel, Raeterichsboden et Gelmer, le bilan des débits entrants et sortants turbinés, pompés ou naturels est comparé avec le débit stocké estimé dans le cadre de l'étude [6]. Les résultats, Figure 14 et Tableau 8, montrent que le calcul numérique dans Routing System conduit aux mêmes ordres de grandeur.

Pour Mattenalpsee, étant donné que les mesures hydrauliques ont un pas de temps journalier, le calage ne peut être plus précis. Cependant, pendant la crue, le volume stocké calculé reste dans le même ordre de grandeur que le volume stocké estimé par l'exploitant à 1.8 % près.

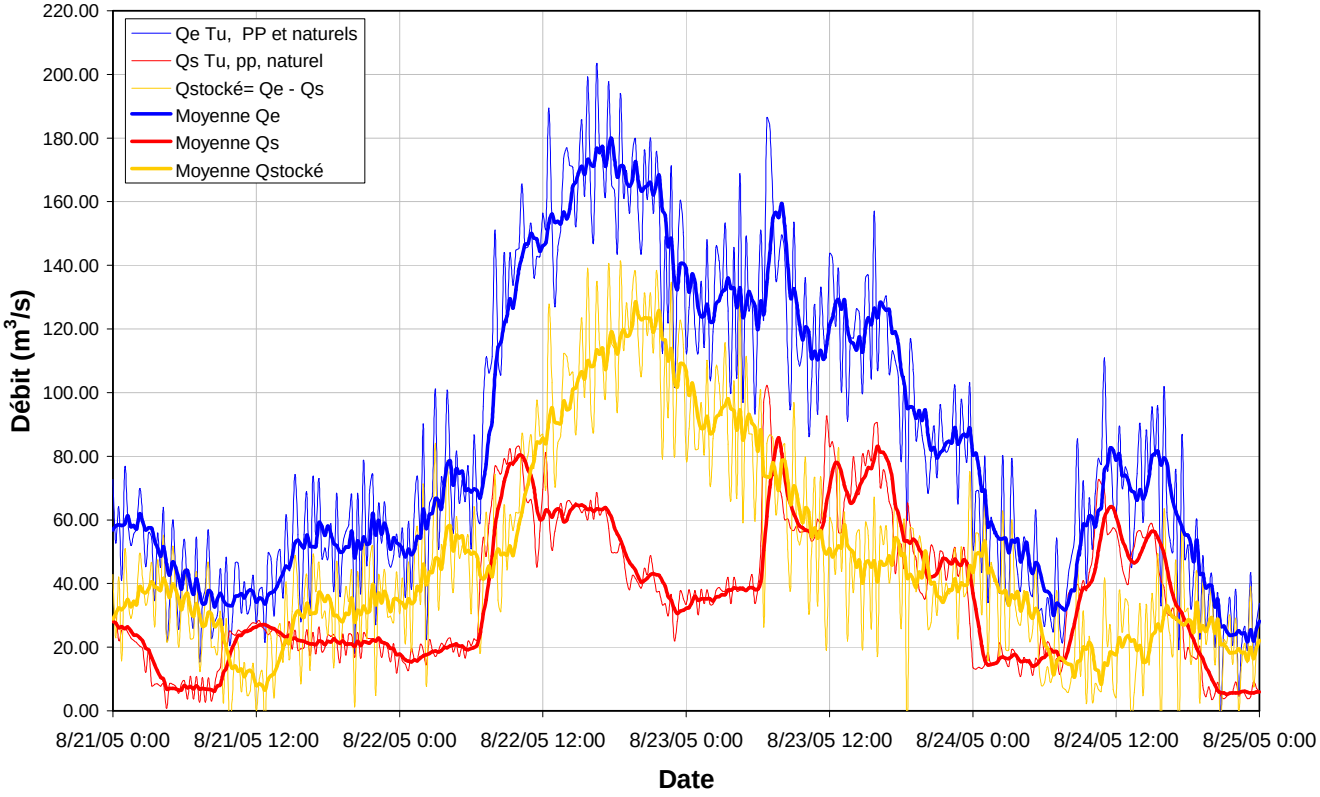


Figure 14 : Comparaison du bilan des débits stockés dans les retenues d'Oberaar, Grimsel, Raeterichsboden et Gelmer calculé dans le modèle Routing System et selon l'étude [6] (avec Q_e : débit entrant, Q_s : débit sortant, Tu : turbiné, pp : pompé)

Date	Etude [6] $\overline{Q}_{stocké} = \overline{Q}_{entrant} - \overline{Q}_{sortant}$ (m³/s)	Résultats Routing System $Q_{stocké} = Q_{entrant} - Q_{sortant}$ (m³/s)
21/08/2005	≈ 30	30.0
22/08/2005	35 à 40	34.3
23/08/2005	100 à 105	106.8
24/08/2005	40 à 45	43.5
Pointe du stockage	le 22 entre 19h30 et 20h $\overline{Q}_{max}$ =125 à 130 m³/s	le 22 à 19h45 Q_{max}=128.5 m³/s

Tableau 7 : Débits calculés stockés dans les retenues d'Oberaar, Grimsel, Raeterichsboden et Gelmer du 21 au 24 août 2005
Comparaison des résultats de la modélisation dans Routing System et de l'étude [6]

Calage des hydrogrammes aux stations OFEV

Le calage de l'hydrogramme à la station de Brienzwiler a permis de déterminer les hydrogrammes des affluents de l'Aare dans ce tronçon comme décrit au § II.3.2.

L'hydrogramme à Brienzwiler calculé (en rouge) est comparé à l'hydrogramme mesuré (en noir) sur la Figure 15. La différence relative du débit de pointe est de l'ordre de 1.1 %.

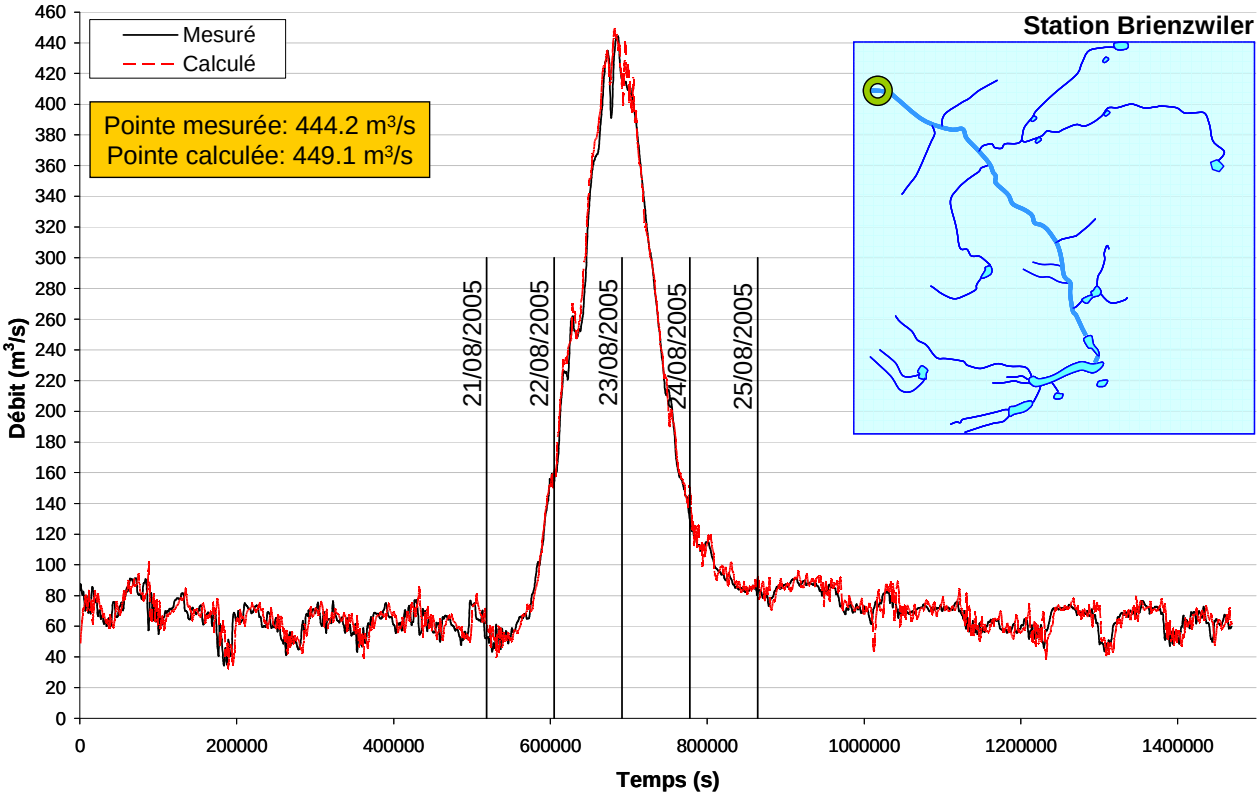
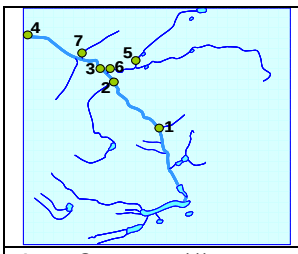


Figure 15 : Hydrogramme mesuré (en noir) et calculé (en rouge) à la station de Brienzwiler, sur l'Aare

Débits de pointe à travers le réseau

Les pointes de crue calculées dans le modèle numérique sont comparées aux pointes de crue estimées dans [5], au Tableau 8. Les ordres de grandeurs sont comparables quoique les méthodes d'estimation soient différentes. Le calage du modèle est ainsi confirmé tout le long du réseau hydrographique.

	**Débits calculés dans Routing System [m³/s]**	**Débits estimés d'après photos et statistique des crues dans [5] [m³/s]**
Aare Guttanen (1)	84	60 à 80
Aare Urbachwasser (2)	189.2*	130 à 150
Aare Innertkirchen (3)	339.4	340
Aare Brienzwiler (4)	449.1	444.2 (mesuré)
Gentalwasser (5)	40.4	45
Gadmerwasser (6)	179.1	180-200
Alpbach (7)	91.2*	>50

* Inclus également le débit des petits affluents en aval immédiat sur la rive gauche pour (2) et droite pour (7)

Tableau 8 : Comparaison des débits de pointes le long du tronçon de l'Aare calculés dans Routing System et estimés dans [5]

III.2.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation lors de la crue d'août 2005

Le modèle numérique étant calé, le bilan du volume entrant dans la retenue, naturel, capté et/ou pompé, et du volume sortant de la retenue, permet de déterminer le volume stocké par chaque ouvrage lors de la crue d'août 2005. Ces volumes stockés par retenue du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h) sont donnés dans le Tableau 9 ainsi que la part de contribution de chaque ouvrage par rapport au volume totale stocké sur le tronçon d'étude.

Retenue	Volume stocké (Mio. de m^3)	% du stockage total
Oberaarsee	1.95	10.3
Grimselsee	9.76	51.7
Raeterichsbodensee	5.42	28.7
Gelmersee	Ne stocke pas	0
Mattenalpsee	1.39	7.4
Engstlensee	0.08	0.4
Bassins de compensation	0.3	1.6
Total	**18.90**	**100**

Tableau 9 : Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation sur l'Aare du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h)

Ce sont donc les retenues d'Oberaar, de Grimsel, de Raeterichsboden et de Mattenalp qui contribuent principalement au stockage de la crue. Il est cependant important de noter que pendant le mois d'août 2005, les niveaux des lacs de Grimsel et Raeterichsboden étaient maintenus très bas (environ de 26 m à 18 m au dessous du niveau normal d'exploitation) à cause de travaux de réfection. Les volumes stockés pendant la crue par ces deux ouvrages ne sont donc pas représentatifs d'une situation normale. Afin d'estimer l'influence de ces deux retenues en condition normale d'exploitation, les calculs ont été menés pour différents scénarios comme décrit dans le § III.2.3 ci-dessous.

Seul le barrage d'Engstlensee a déversé pendant le passage de la crue. La capacité de stockage des autres ouvrages d'accumulation n'a pas été atteinte. Ces ouvrages ont conservé une revanche significative par rapport à la cote de déversement, de 1 m pour Gelmersee et Mattenalpsee à 20 m pour Grimselsee.

III.2.3 Influence des lacs de Grimsel et Raeterichsboden en exploitation normale

Pendant l'été 2005, l'usine de Grimsel I était en réfection. Ainsi, lors de la crue d'août 2005, d'une part il n'y a pas eu d'eaux turbinées du lac de Grimsel par Grimsel I et d'autre part, le niveau du lac de Grimsel était anormalement bas. En effet, sa cote à environ 1882 msm à l'arrivée de la crue était 26 m en dessous du niveau moyen du lac en conditions normales d'exploitation (fixé à 1908.74 msm). Le lac de Raeterichsboden qui reçoit les eaux turbinées de Grimsel I et les eaux évacuées du lac de Grimsel était également maintenu à un niveau très bas avant l'arrivée de la crue, de l'ordre de 1749 msm, soit 18 m en dessous du niveau normal d'exploitation.

Par conséquence, ces deux lacs ont eu une capacité de stockage exceptionnelle pendant la crue d'août 2005. A eux deux, ils ont contribué à 80.4 % du stockage de la crue. Cette capacité n'est pas représentative d'une situation de passage de crue en conditions normales d'exploitation.

<u>Méthodologie</u>

Pour estimer l'influence du lac de Grimsel et du lac de Raeterichsboden pour une crue du type de celle d'août 2005 mais en conditions normales d'exploitation, divers scénarios d'exploitation de ces lacs ont été modélisés et testés dans Routing System. Ces scénarios supposent que, en été, les retenues

stockent, maintenant le niveau du lac à sa cote d'exploitation. Dans ce cadre, les organes d'évacuation sont supposés ouverts dès que le niveau du lac est supérieur à sa cote d'exploitation.

Pour chaque scénario, les débits entrants naturels dans les lacs, les débits turbinés, les débits non mesurés et les lois H-V des retenues restent inchangés. Seule la cote initiale des deux lacs est modifiée dans le module « retenue » du modèle numérique. Les lois Hauteur-Débit des différents organes d'évacuation du barrage de Grimsel vers le lac de Raeterichsboden et du barrage de Raeterichsboden vers l'Aare (représentés Figure 16) sont rajoutées dans le modèle. Les deux scénarios « enveloppes » des volumes stockables en conditions normales d'exploitation sont décrits dans le Tableau 10. Pour ces deux scénarios, l'évacuateur « Spuelstollen » est supposé fermé.

	Grimsel			Raeterichsboden	
	Niveau initial (msm)	**Umleitstollen**	**Grundablass**	**Niveau initial (msm)**	**Grundablass+Überfall+ Saugüberfall**
Situation 2005	1882.78	Ne fonctionne pas	Ne fonctionne pas	1749.06	Ne fonctionne pas
Scénario 1	1908.74	Ouverture=0.7m Fonctionne pour H>1908 msm	4 vannes ouvertes Ouverture=0.7 m Fonctionne pour H>1908 msm	1749.06	Fonctionne dès H>1767 msm
Scénario 2	1908.74	Ouverture=0.7m Fonctionne pour H>1908 msm	4 vannes ouvertes Ouverture=0.7 m Fonctionne pour H>1908 msm	1767.00	Fonctionne dès H>1767 msm

Tableau 10 : Scénarios testés dans le modèle numérique de l'Aare

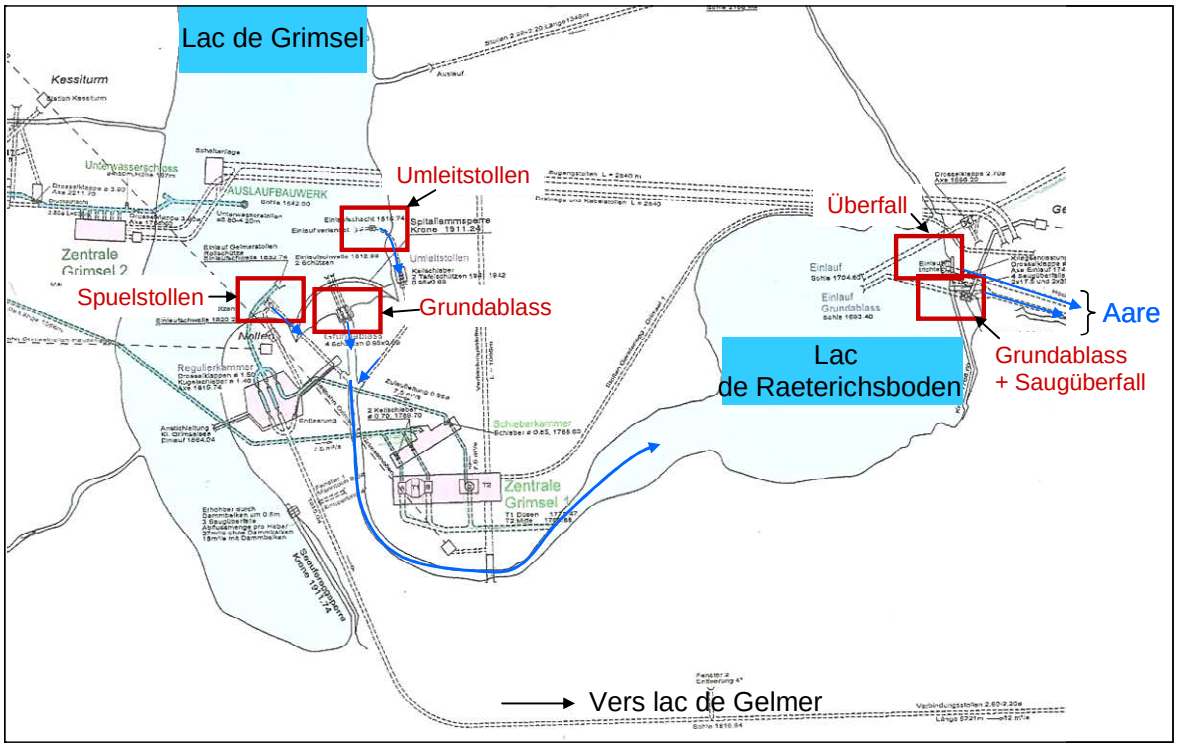


Figure 16 : Localisation des organes d'évacuation simulés dans le modèle numérique de l'Aare avec ouvrages

Volumes stockés en conditions normales d'exploitation pendant la crue d'août 2005

Ces scénarios n'ont qu'une incidence locale sur les débits entrants et sortants des lacs de Grimsel et Raeterichsboden et sur les volumes stockés par ces deux ouvrages. Ils n'interfèrent pas sur les autres ouvrages. Les niveaux du lac de Grimsel et de Raeterichsboden du 15 au 31 août 2005 pour les deux scénarios retenus sont donnés respectivement à la Figure 17 et à la Figure 18. L'augmentation de la cote initiale du lac a pour conséquence l'évacuation d'un débit supplémentaire de Grimsel vers Raeterichsboden et de Raeterichsboden dans l'Aare par rapport à la situation exceptionnelle mesurée en août 2005. Les débits évacués sont représentés à la Figure 17 et à la Figure 18.

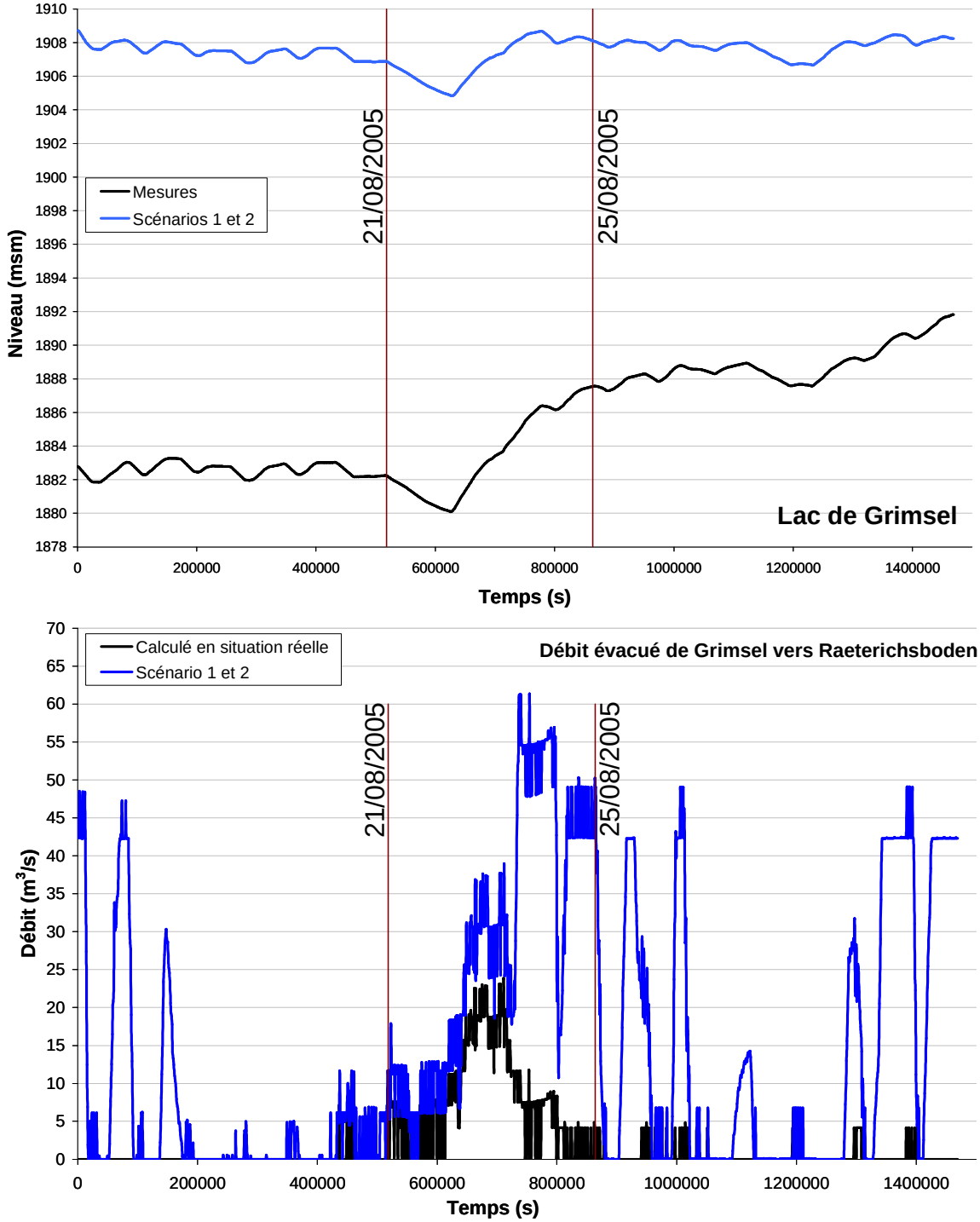


Figure 17 : Niveau calculé du lac de Grimsel et débits évacués calculés pendant la crue d'août 2005 pour les scénarios 1 (bleu) et 2 (orange)

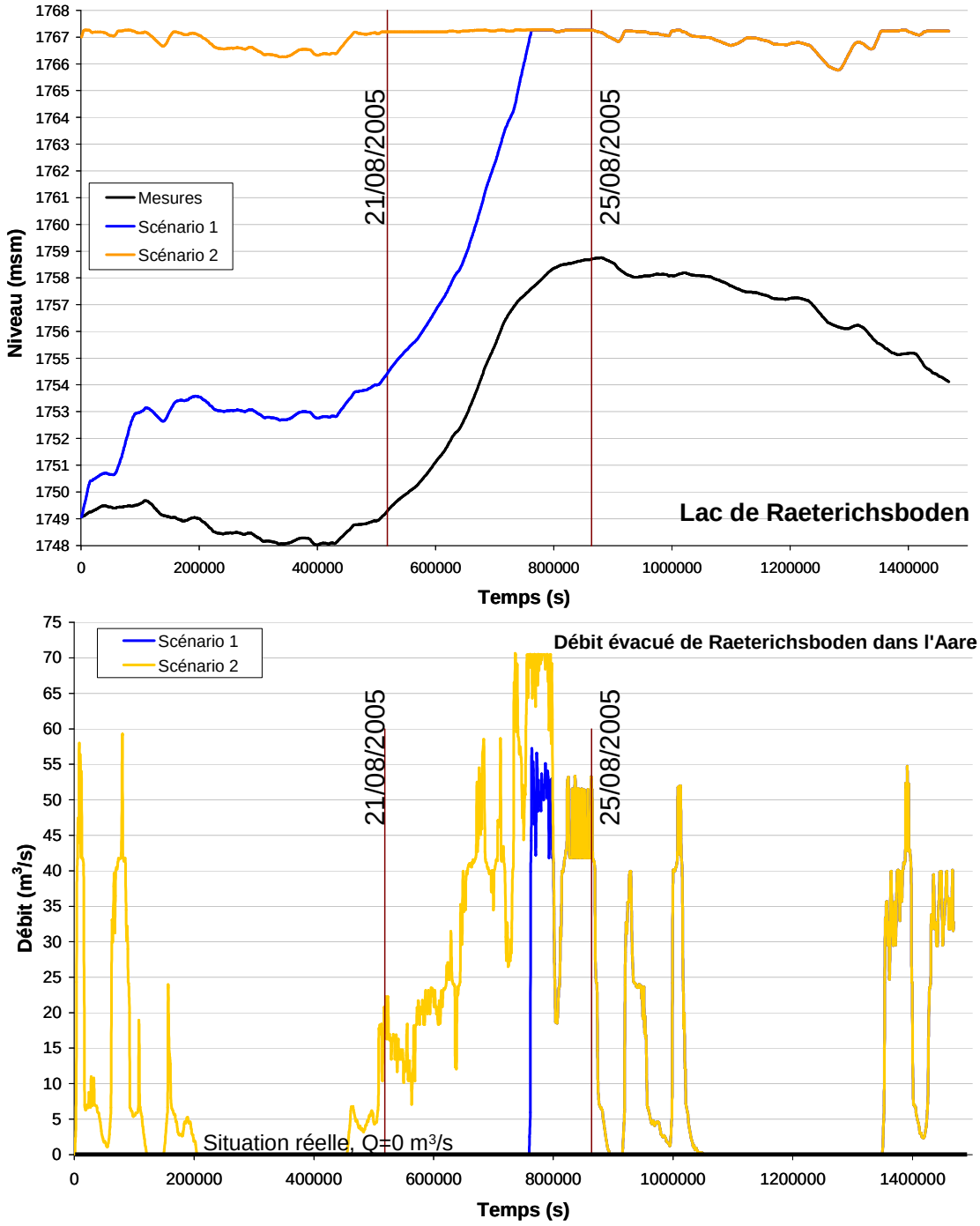


Figure 18 : Niveaux calculé du lac de Raeterichsboden et débits évacués calculés pendant la crue d'août 2005 pour les scénarios 1 (bleu) et 2 (orange)

Dans le Tableau 11, les volumes stockés par les deux lacs pour ces scénarios sont comparés aux volumes stockés exceptionnellement du 21 août (0h) au 24 août (24h) 2005. Ces résultats montrent que si la retenue de Grimsel est maintenue à son niveau normal d'exploitation, sa capacité de stockage pendant la crue d'août 2005 pourrait être réduite de plus du quart par rapport à la situation exceptionnelle produite en été 2005. De plus, le lac de Raterichsboden ne pourrait pas stocker le débit provenant de Grimsel pendant la crue, s'il est maintenu à son niveau normal d'exploitation.

	Situation réelle exceptionnelle	Scénario 1	Scénario 2
Lac de Grimsel	9.76 Mio. de m³	2.56 Mio. de m³	2.56 Mio. de m³
Lac de Raeterichsboden	5.42 Mio. de m³	7.76 Mio. de m³	0.04 Mio. de m³

Tableau 11 : Volumes stockés par les retenues pendant la crue du 21 août (0h) au 24 août (24h) 2005

Hydrogramme de crue à Brienzwiler

Le scénario 2 permet de montrer l'hydrogramme probable attendu à Brienzwiler en conditions normales d'exploitation des ouvrages de Grimsel et Raeterichsboden, pour un évènement semblable à la crue d'août 2005 (voir Figure 19).

Dans cette situation, la pointe de crue serait de l'ordre de 497.9 m³/s, soit 53.6 m³/s de plus que celle mesurée pendant les conditions exceptionnelles de l'été 2005. Cet ordre de grandeur recoupe les résultats de l'étude [5] qui estimait une augmentation de la pointe de la crue dans l'Aare de 50 à 80 m³/s si les retenues de Grimsel et Raeterichsboden étaient en conditions normales d'exploitation.

Il peut également être constaté sur la Figure 19 que, si le niveau du lac de Raeterichsboden est maintenu bas avant la crue alors que Grimsel est à son niveau normal d'exploitation (scénario 1), cela a peu d'effet sur la pointe de crue qui reste à 444.3 m³/s. Seul le volume de stockage est réduit de 5.5 % par rapport à la situation observée en été 2005.

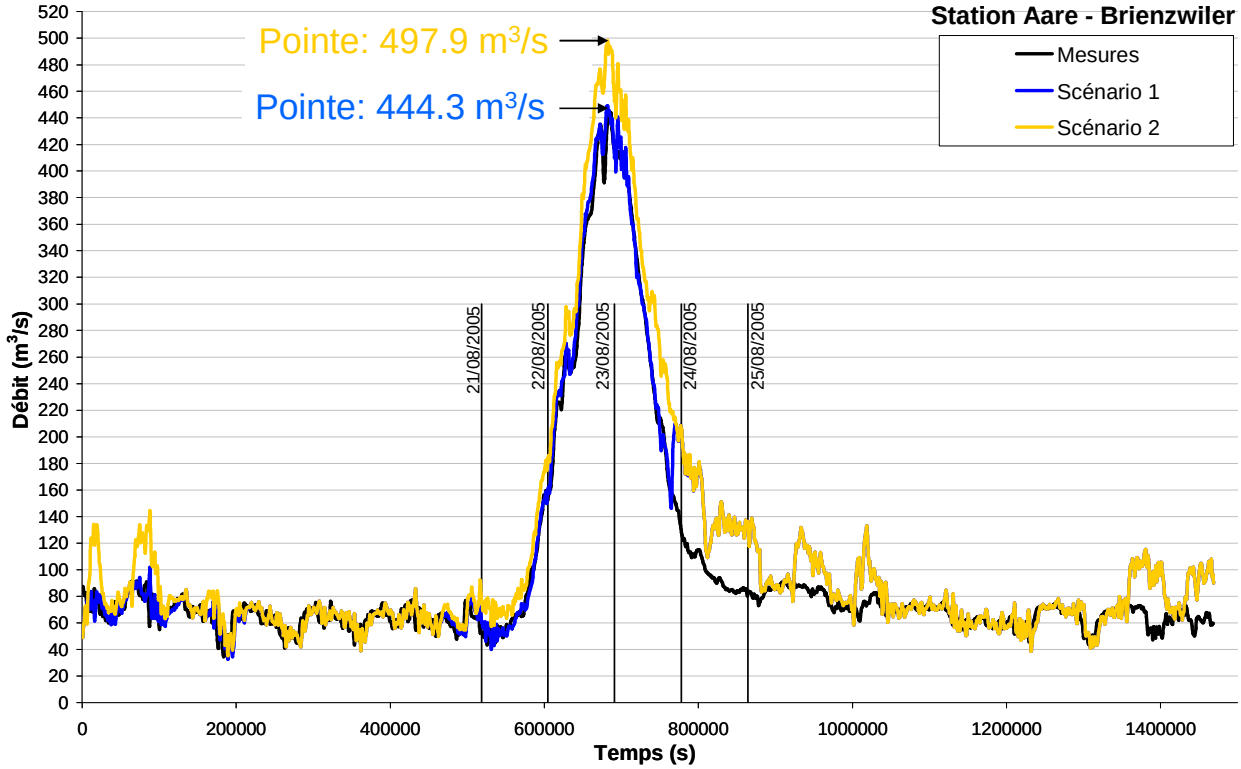


Figure 19 : Hydrogramme de la crue d'août 2005 mesuré (en noir), calculé-scénario 1 (en bleu) et calculé-scénario 2 (en orange) à la station de l'Aare-Brienzwiler – Avec ouvrages d'accumulation

III.3 La Reuss

III.3.1 Calage du modèle numérique

Le tronçon de la Reuss étudié, d'environ 40 km de long, est modélisé dans Routing System avec ses 5 principaux ouvrages d'accumulation comme indiqué à la Figure 20. En effet, les barrages de Schöni, Waldnacht et Tobel n'ayant pas stocké pendant la crue d'août 2005, ils n'ont pas été modélisés. Les points de calage fiables et disponibles sur cette zone d'étude sont indiqués sur la Figure 20.

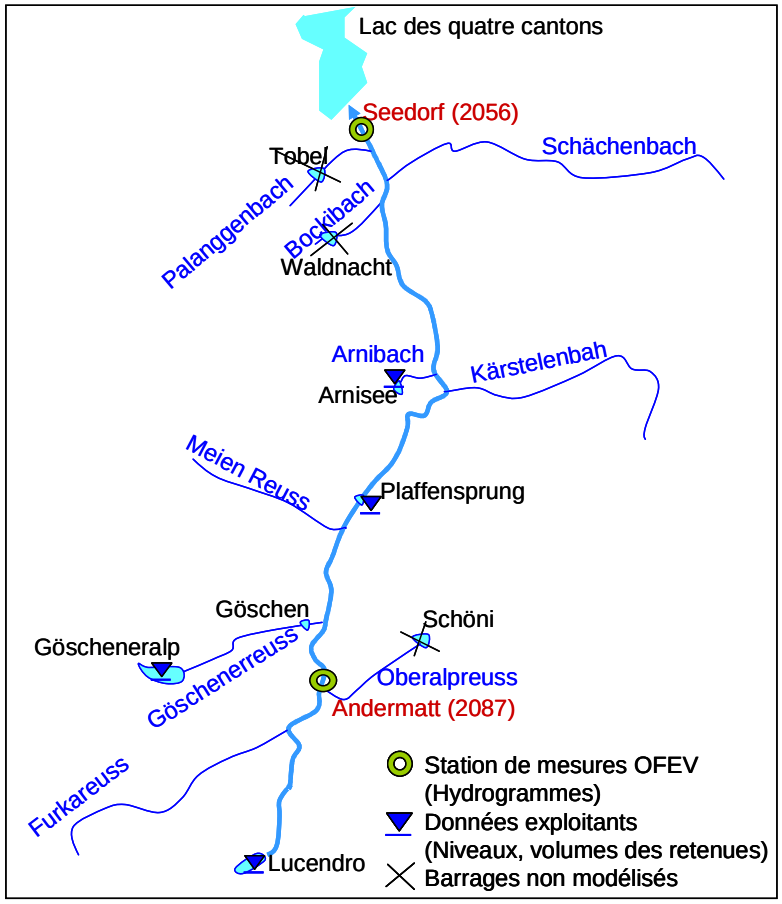


Figure 20 : Réseau hydrographique de la Reuss modélisé dans Routing System Localisation des points de calage

Calage du niveau des retenues

Les niveaux des retenues calés dans Routing System sont donnés en Annexe 3. Comme observé, le niveau de la petite retenue de Pfaffensprung n'a pu être modélisé correctement. Pour cet ouvrage, les débits entrants turbinés ou naturels, les débits sortants turbinés, captés ou évacués ont été mesurés avec un pas de temps de 15 min (voir Figure 21). Seules les mesures du niveau du lac n'ont été fournies qu'avec un pas de temps journalier. D'après l'exploitant, seule la mesure du débit entrant à la station 2 (voir Figure 21) pourrait être peu précise car cette station souffre de l'influence de la courbe de remous du lac lorsque le niveau y est élevé. Cependant, cette imprécision ne pourrait pas justifier le niveau du lac obtenu par le calcul. Ce résultat pourrait également s'expliquer par la loi H-V qui est peu précise.

Dans tous les cas, le mauvais calage obtenu pour la fluctuation du niveau d'eau n'a pas d'influence significative sur les calculs et sur l'estimation du volume stocké par les ouvrages. En effet, la retenue de Pfaffensprung n'a pas stocké pendant la crue, comme le montre l'évolution du bilan de débit (débit entrant – débit sortant) du 21 août au 24 août 2005, Figure 24.

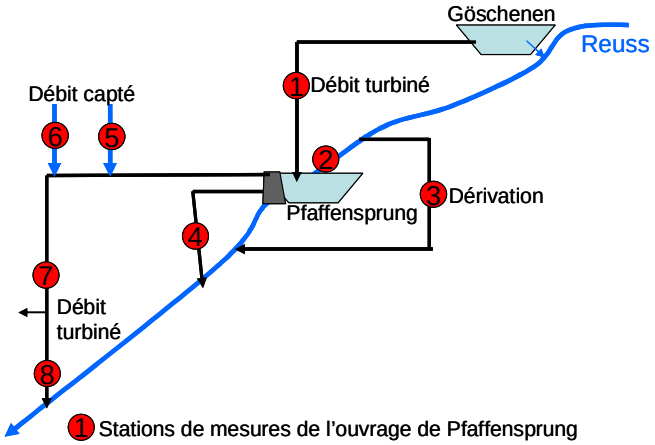


Figure 21 : Schématisation des entrées et sorties de l'ouvrage de Pfaffensprung et localisation des stations de mesure

Pour le reste des retenues, le calage du niveau des lacs a permis de déterminer fiablement le bilan des volumes stockés dans les retenues.

Calage des hydrogrammes aux stations OFEV

La station d'Andermatt a permis d'estimer les débits des affluents dans la partie aval de la Reuss et la station de Seedorf des affluents du tronçon aval. Les hydrogrammes calculés sont représentés à la Figure 22 pour Andermatt et à la Figure 23 pour Seedorf.

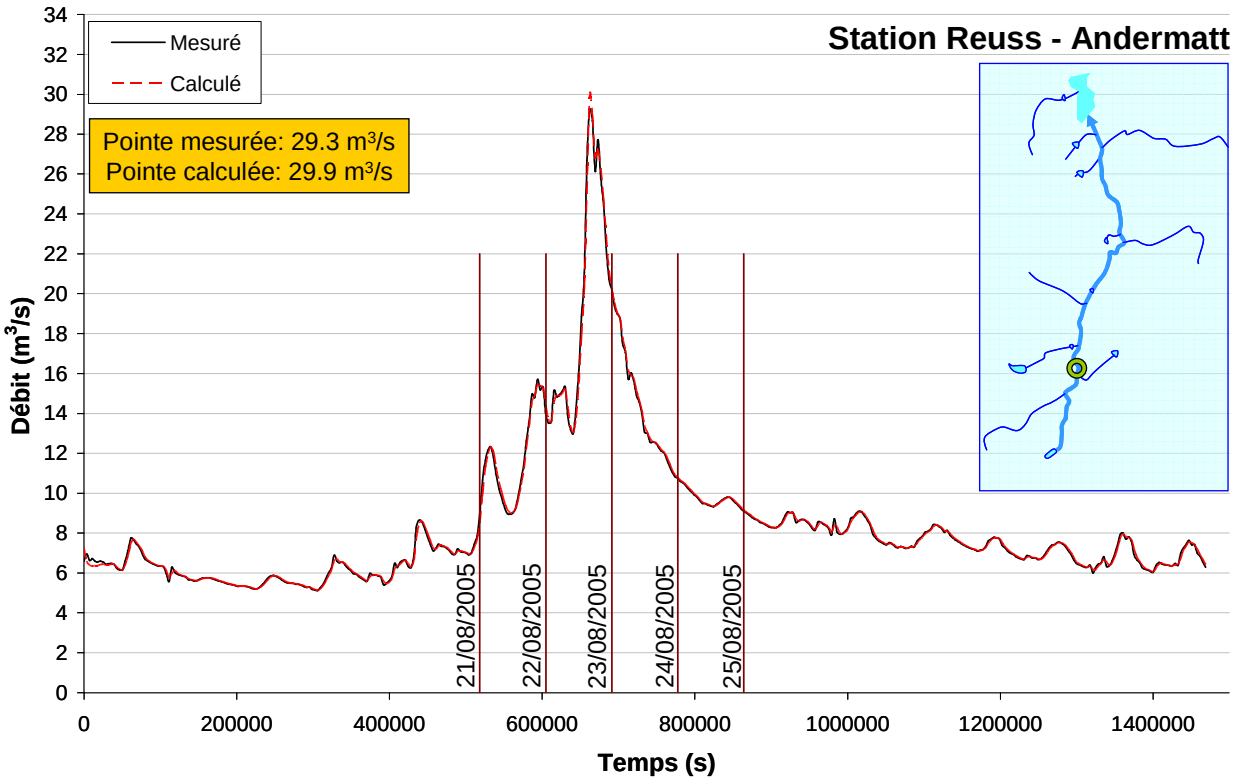


Figure 22 : Hydrogramme mesuré (en noir) et calculé (en rouge) à la station d'Andermatt, sur la Reuss

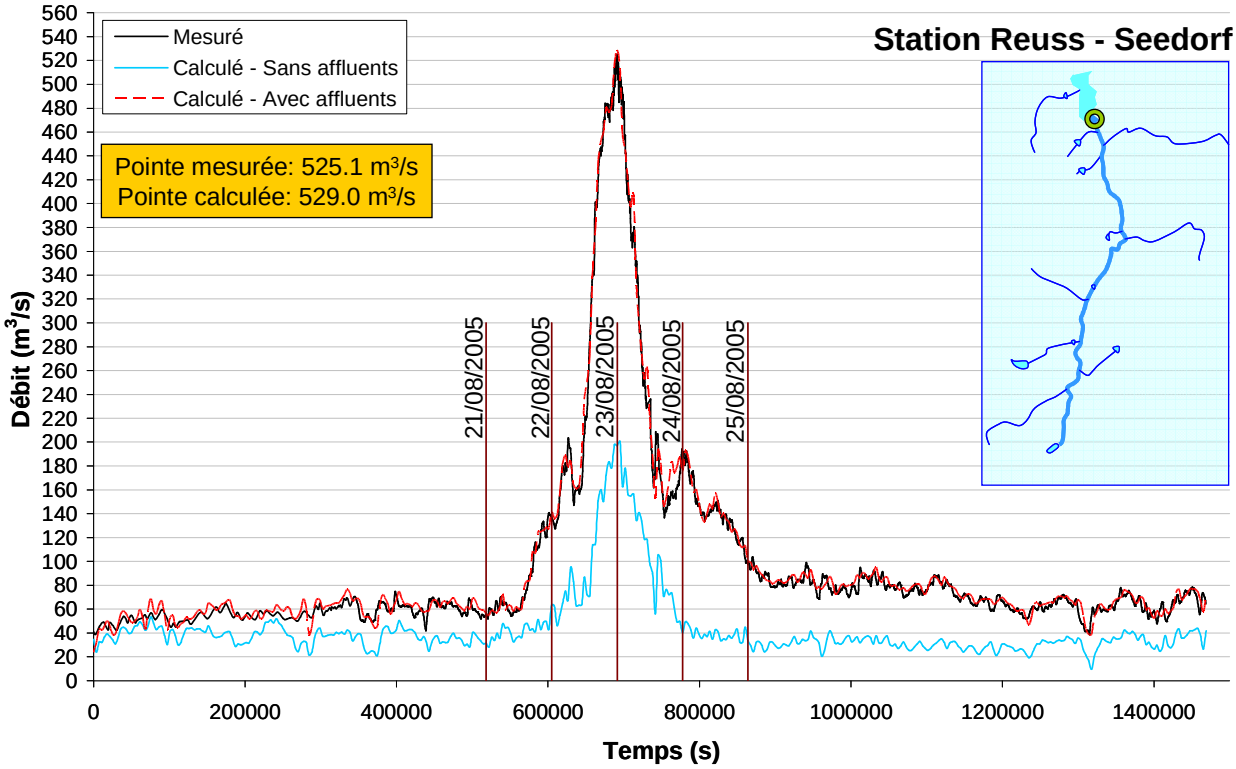


Figure 23 : Hydrogramme mesuré (en noir) et calculé (en rouge) à la station de Seedorf, sur la Reuss

III.3.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation lors de la crue d'août 2005

Les volumes stockés par retenue du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h) sont donnés dans le Tableau 12 ainsi que la part de contribution des ouvrages par rapport au volume total stocké sur le tronçon d'étude.

Retenue	Volume stocké (Mio. de m³)	% du stockage total
Lucendro	0.369	4.9
Schöni	Pas de stockage	0
Göscheneralp	7.14	94.7
Pfaffensprung	Pas de stockage	0
Arniboden	0.029	0.4
Waldnacht	Pas de stockage	0
Tobel	Pas de stockage	0
Total	**7.54**	**100**

Tableau 12 : Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation sur la Reuss du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h)

Sur ce tronçon de la Reuss, c'est donc principalement le barrage de Göscheneralp qui stocke significativement une partie du volume de la crue. De plus, le niveau maximal de la retenue atteint pendant le passage de la crue était environ 7 m en dessous du niveau de déversement, laissant une grande marge de stockage. Le barrage de Lucendro n'a pas rencontré de problème lors du passage de la crue, avec une faible élévation du niveau de la retenue. La capacité de stockage reste quasi-intacte après le passage de la crue.

Comme le montre les résultats de la Figure 24 basés sur les mesures des débits entrants et sortants, la retenue de Pfaffensprung n'a pas stocké au passage de la crue. En effet, à l'arrivée de la crue, la vanne de captage dans la Reuss (station 2, Figure 21) a été fermée et les eaux de la Reuss ont été en quasi-totalité dérivées (station 3, Figure 21).

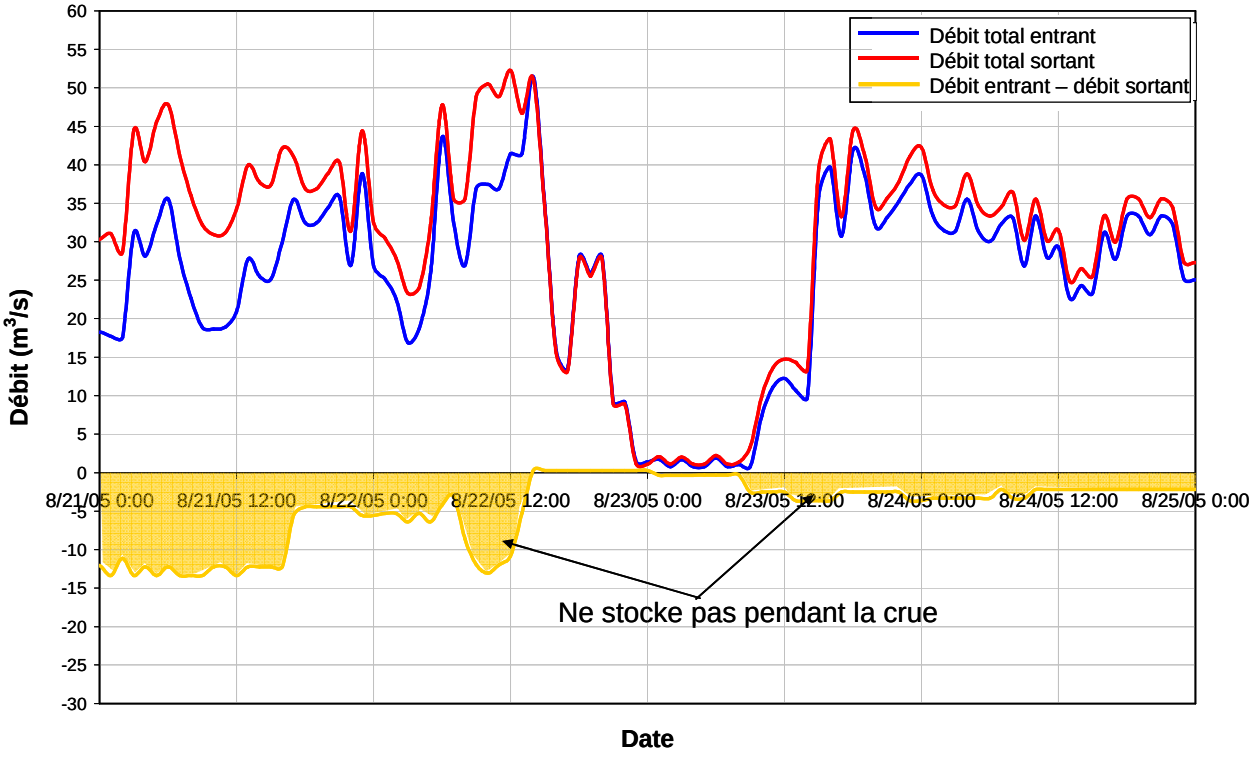


Figure 24 : Bilan des débits entrants et sortant pour la retenue de Pfaffensprung sur la Reuss au passage de la crue d'août 2005

III.4 La Linth

III.4.1 Calage du modèle numérique

Le tronçon modélisé de la Linth ne démarre qu'à la station de mesure du Linthal et se termine à la station de mesure de Mollis (voir Figure 1), ce qui représente environ 20 km de longueur. Cependant, le bassin versant modélisé englobe le complexe Linth-Limmern qui voit son exutoire dans le bassin du Linthal. Seulement trois ouvrages d'accumulation caractérisent cette zone modélisée. Les points de calage fiables et disponibles sur cette zone d'étude sont indiqués sur la Figure 20.

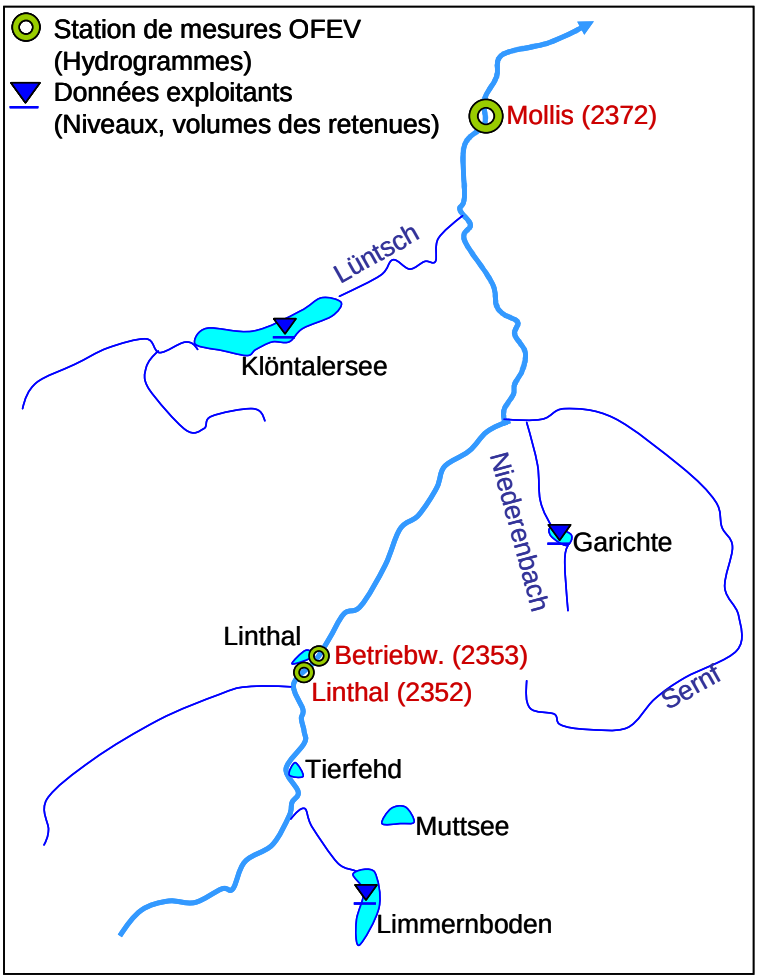


Figure 25 : Réseau hydrographique de la Linth modélisé dans Routing System
Localisation des points de calage

Calage du niveau des retenues

Les niveaux des retenues calés dans Routing System sont donnés en Annexe 4. Les niveaux des retenues calculés concordent avec les niveaux mesurés. Seul le niveau maximal calculé à Klöntalersee est 10 cm supérieur au niveau mesuré et décalé de 8h dans le temps. La loi H-V disponible n'a pas permis de corriger réalistement cette différence. Ce déphasage local n'a pas d'influence significative sur le calcul du volume stocké dans ce grand réservoir.

Calage des hydrogrammes aux stations OFEV

L'hydrogramme de Linthal fournit le débit entrant dans la Linth modélisée. L'hydrogramme de Mollis a permis de déterminer les débits des affluents le long du modèle. L'hydrogramme calculé à la station de Mollis est représenté à la Figure 26.

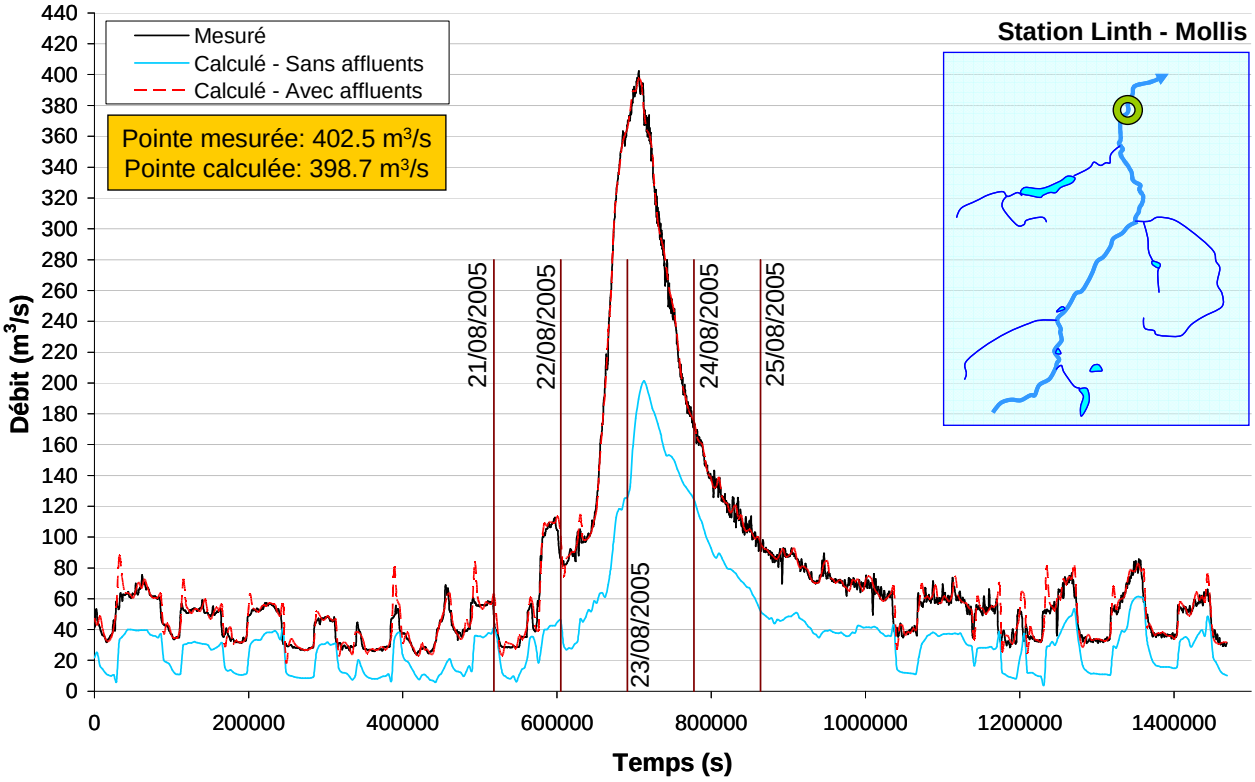


Figure 26 : Hydrogramme mesuré (en noir) et calculé (en rouge) à la station de Mollis, sur la Linth

III.4.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation lors de la crue d'août 2005

Cas particulier Linth-Limmern

Le complexe Linth-Limmern, schématisé à la Figure 27, est caractérisé par la grande retenue de Limmern (volume maximal de 92 Mio. m³), mais aussi par la retenue de Muttsee (capacité de 25 Mio. m³) ainsi que trois bassins d'équilibre, celui de Hintersand (volume de 0.11 Mio m³), de Tierfehd (0.56 Mio de m³) et du Linthal (0.21 Mio de m³).

Comme le montre le schéma à la Figure 27, tout au long de ce système, de nombreuses prises d'eau captent une partie des débits des affluents et de la Linth pour turbinage. Par hypothèse, le débit capté par ces prises d'eau est proportionnel à la surface du bassin versant de la prise (voir § II.2.3). Le calcul dans Routing System permet alors d'estimer le volume total stocké par l'ensemble du complexe Linth-Limmern.

En y déduisant le volume stocké par la seule retenue de Limmernboden, il peut être déduit le volume stocké par les bassins de compensation et le lac Muttsee malgré que leur loi H-V ne soit pas connue. Ces calculs montrent qu'environ la moitié des débits captés sont stockés par le système Linth-Limmern.

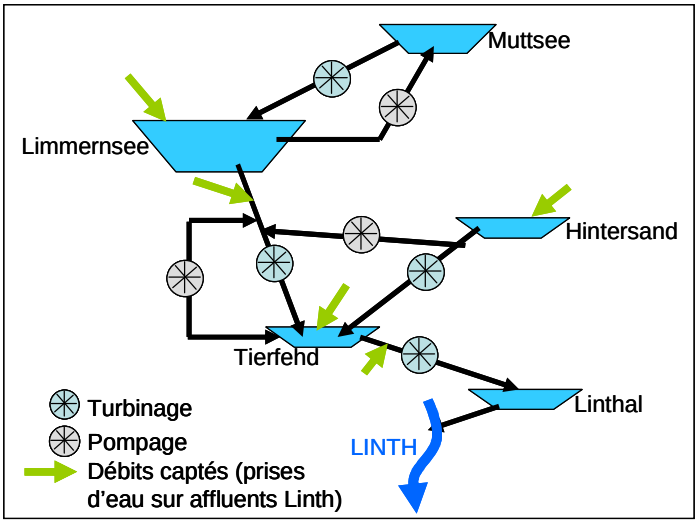


Figure 27 : Schématisation du complexe Linth-Limmern

Le bilan des volumes stockés par retenue du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h) est donné au Tableau 13.

Retenue	Volume stocké (Mio. de m³)	% du stockage total
Limmernboden	3.34	32.7
Complexe Linth-Limmern sans Limmernboden	2.84	27.8
Garichte	0.09	0.9
Klöntalersee	3.94	38.6
Total	**10.21**	**100**

Tableau 13 : Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation sur la Linth du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h)

Plus de la moitié du volume stocké est retenue par le complexe Linth-Limmern. Pourtant, au passage de la crue, le niveau maximal du lac de Limmernboden était environ 10 m en dessous de la cote de déversement. Sa capacité de stockage n'a été que très peu utilisée pendant la crue d'août 2005.

Par contre, le barrage de Rhodannenberg, qui a largement contribué au stockage du volume de la crue, a atteint sa capacité maximale de stockage au passage de la pointe de la crue.

IV Modélisation numérique des quatre réseaux hydrographiques sans ouvrages d'accumulation

Pour estimer le volume total stocké dans chaque cours d'eau lors des intempéries d'août 2005 et la réduction de la pointe de la crue grâce aux ouvrages d'accumulation, chaque réseau hydrographique décrit à la Figure 1 a été modélisé sans ouvrages d'accumulation.

IV.1 Suppression des ouvrages d'accumulation

Toutes les retenues artificielles sont supprimées des quatre modèles numériques. Si la longueur de la retenue est supérieure à 1000 m, elle est alors remplacée par un tronçon de routage. Ces tronçons assurent la continuité entre les caractéristiques des tronçons amont et aval immédiats (pente, largeur, coefficient de Strickler).

Les débits artificiels, soit les débits turbinés, pompés, déversés, de dotation, sont supprimés du réseau. Seuls les débits entrant naturels mesurés ou non mesurés sont conservés. Les débits captés par les prises d'eau sont restitués aux cours d'eau. Le réseau hydrographique est complété afin de tenir compte du routage de ces débits restitués aux affluents.

Un exemple du schéma numérique de l'Aare avec ouvrages d'accumulation et sans ouvrages d'accumulation est donné à la Figure 28.

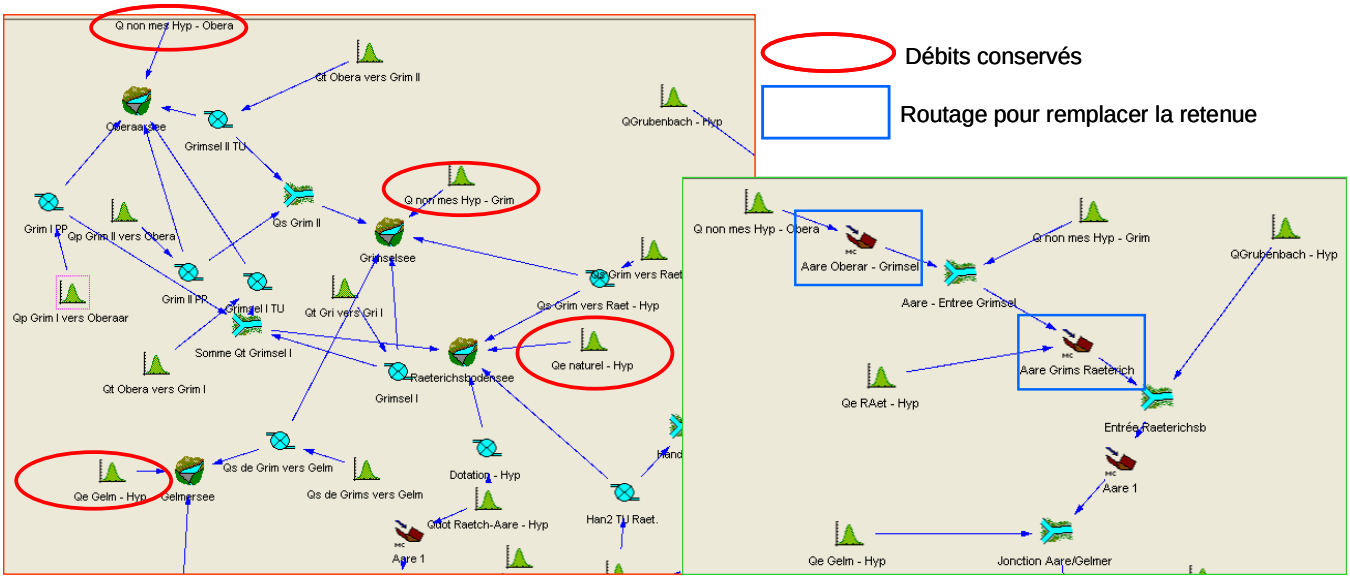


Figure 28: Exemple dans Routing System du passage de l'Aare avec ouvrages à l'Aare sans ouvrages, dans son tronçon amont

IV.2 Reconstitution des bassins versants naturels

Dans le cas de l'Aare et de la Linth, les ouvrages d'accumulation dévient une grande partie du débit naturel des sous-bassins versants en les transportant d'une usine hydroélectrique à l'autre par turbinage, pompage ou captage. L'exutoire de ces débits déviés se retrouve artificiellement concentré à Innertkirchen pour l'Aare (voir Figure 29) ou au Linthal pour la Linth (Figure 30).

La modélisation des réseaux hydrographiques sans ouvrages a donc également consisté à reconstituer les sous-bassins versants naturels des cours d'eau. Pour se faire, après analyse des sous-bassins

versants concernés sur les cartes au 1 :25000, les débits naturels mesurés ou non mesurés sont redistribués aux affluents naturels.

Pour l'Aare, la comparaison des sous-bassins versants actuels avec ouvrages (en rouge) et naturels sans ouvrages (en vert) est donnée à la Figure 29.

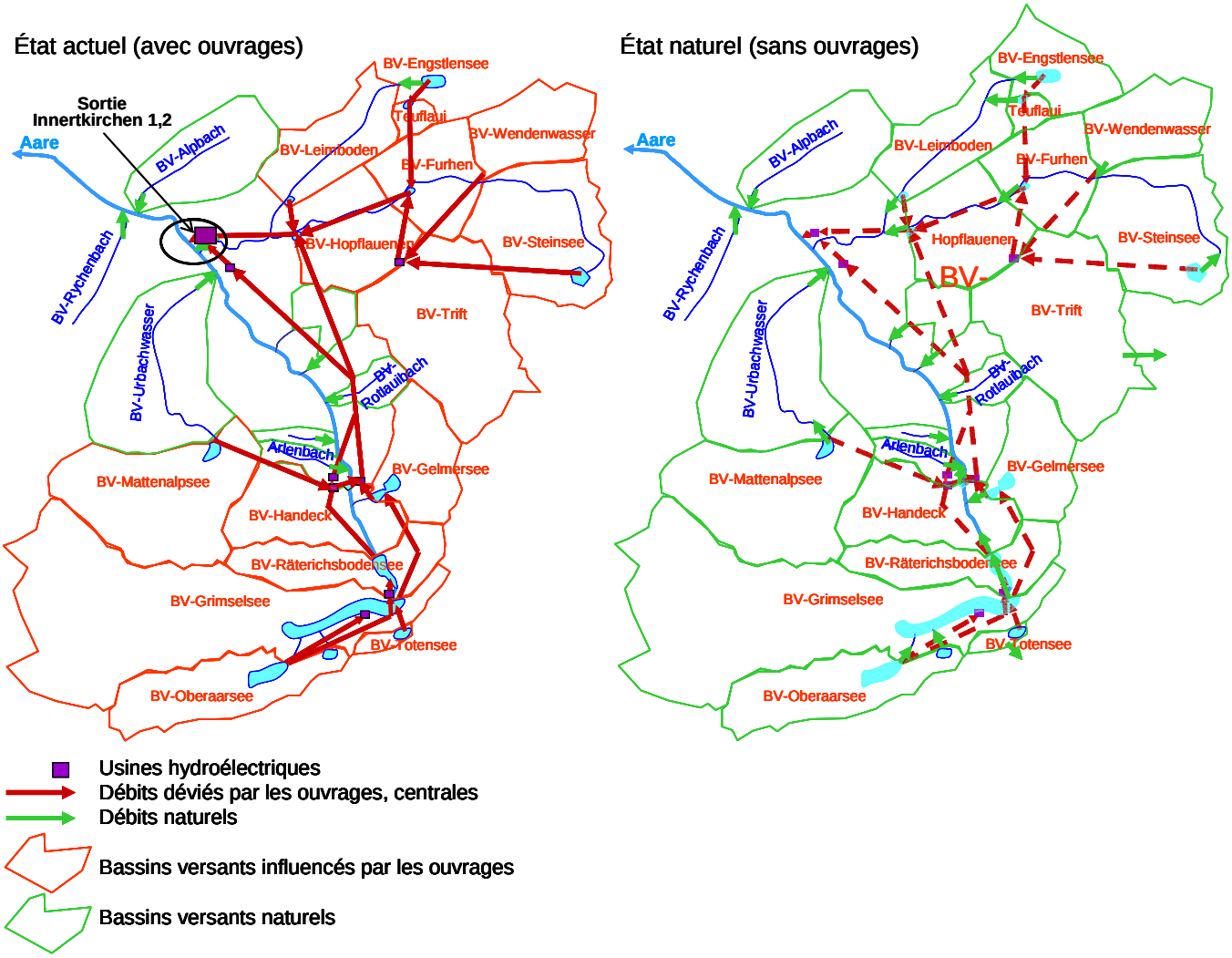


Figure 29: Définition des sous-bassins versants artificiels (en rouge) avec ouvrages et naturels (en vert) sans ouvrages de l'Aare en amont de Brienzwiler

Il ressort que, sur le bassin versant de l'Aare jusqu'à Brienzwiler d'environ 480 km^2, 70 % de la surface est influencé par les ouvrages d'accumulation. Le débit sortant de ce système complexe est concentré à Innertkirchen I et II. Parmi les sous-bassins versants influencés par les barrages et conduites forcées, environ 88 % devraient alimenter de manière naturelle l'Aare en amont d'Innertkirchen. Par contre, 12 % des sous-bassins versants n'appartiennent pas au bassin versant de l'Aare, comme par exemple le sous-bassin versant de l'usine de Trift (Figure 29).

En amont de la station Linthal sur la Linth, la Figure 30 représente les sous-bassins versants sous l'influence du système Linth-Limmern (en rouge) et les sous-bassins versants naturels redéfinis sans ouvrages (en vert) avec les restitutions des débits captés aux nombreuses prises d'eau.

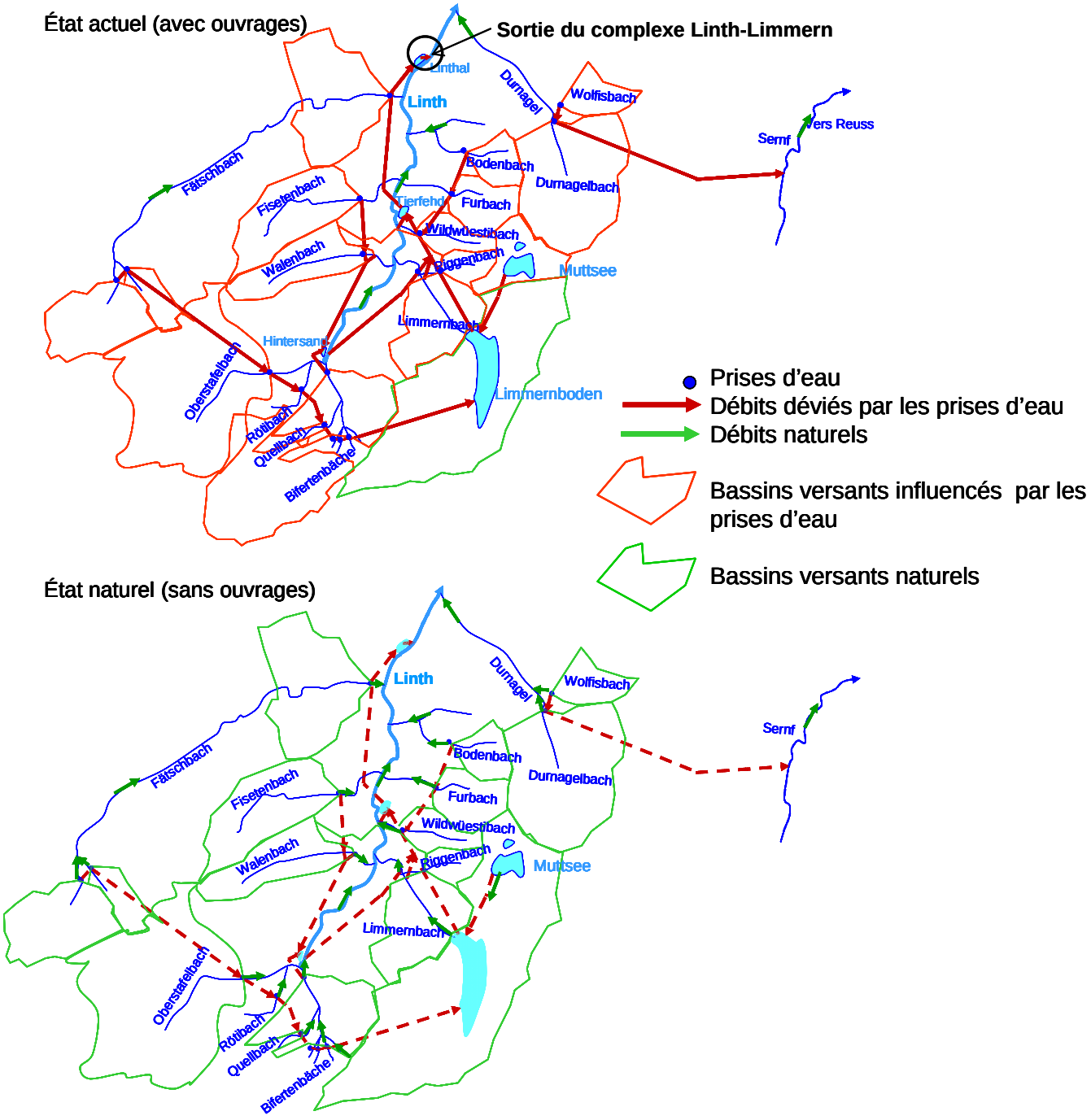


Figure 30: Définition des sous-bassins versants artificiels (en rouge) avec ouvrages et naturels (en vert) sans ouvrages de la Linth en amont du Linthal

Dans ce cas, le bassin versant total des prises d'eau représente 81 km^2, dévié par les ouvrages du système Linth-Limmern. En termes de débit, cela représente une pointe de crue captée dans les prises d'eau d'environ 50 m^3/s. Les ouvrages stockent environ 67.3 % du volume d'eau capté par ces prises.

La Sarine jusqu'à Laupen a été modélisée sans ouvrages, en redistribuant dans la Torneresse et l'Eau Froide les débits captés par le barrage de l'Hongrin et en restituant au cours d'eau l'Hongrin, le débit naturel associé à son sous-bassin versant.

La Reuss jusqu'à Seedorf a été modélisée sans ouvrages en redistribuant les débits captés par le complexe Göscheneralp-Göschenen et par Pfaffensprung.

Les quatre modèles numériques ainsi modifiées ont alors permis de calculer le routage de l'hydrogramme de la crue d'août 2005 sans ouvrages à travers La Sarine, l'Aare, la Reuss et la Linth et d'en déterminer son volume.

V Influence des ouvrages d'accumulation sur la crue d'août 2005

Afin d'estimer l'influence des ouvrages d'accumulation sur le laminage de la pointe de crue et le volume de crue stocké pendant l'évènement d'août 2005, les hydrogrammes de crue calculés avec ouvrages et les hydrogrammes de crue calculés sans ouvrages sont comparés en différents points de la Sarine, l'Aare, la Reuss et la Linth.

V.1 Réduction de la pointe de la crue par les ouvrages d'accumulation

V.1.1 La Sarine

L'hydrogramme de crue « naturel » obtenu à Laupen pour la Sarine sans ouvrages d'accumulation est comparé avec l'hydrogramme actuel (avec ouvrages) sur la Figure 31.

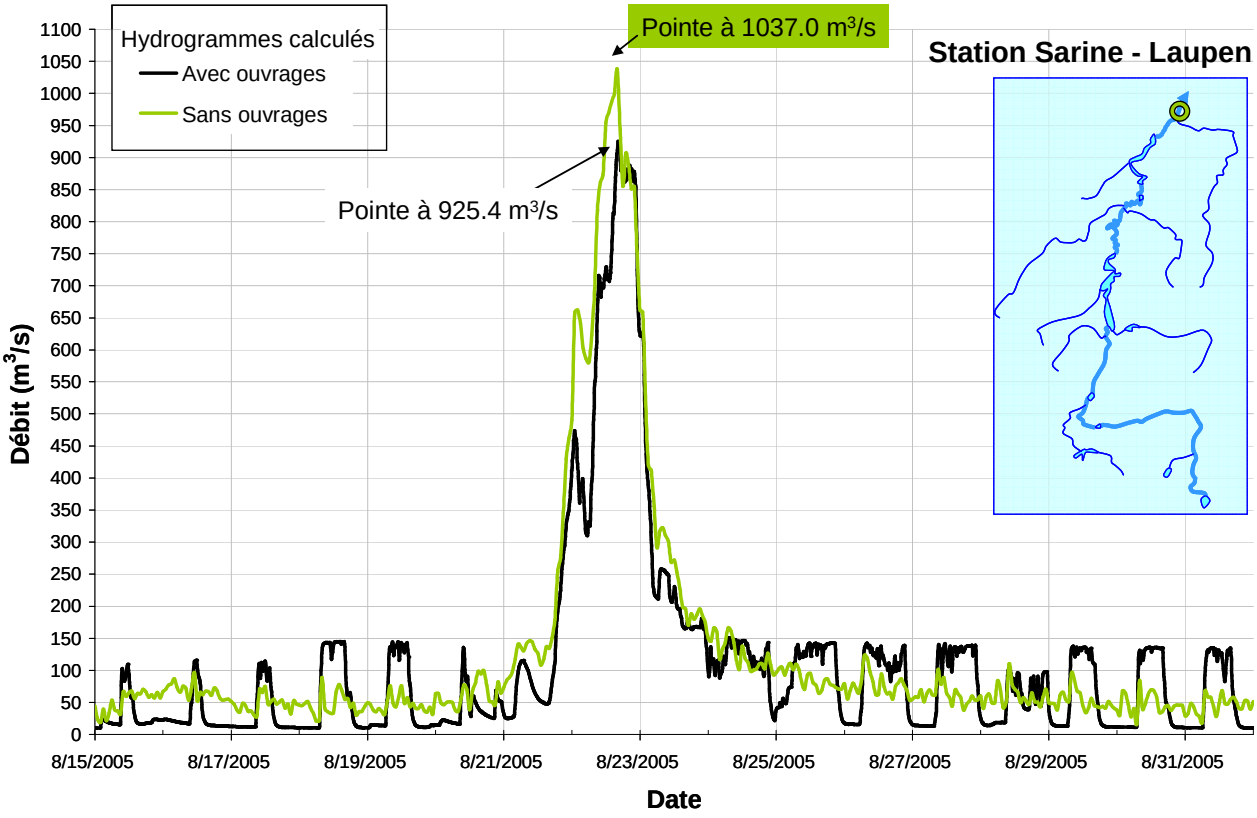


Figure 31 : Hydrogramme actuel avec ouvrages (en noir) et naturel sans ouvrages (en vert) à la station de Laupen sur la Sarine

Ce résultat montre que, sur l'ensemble de ce tronçon de la Sarine, les ouvrages d'accumulation ont pour effet de réduire d'environ 111.6 m³/s la pointe de la crue à Laupen. Les retenues ont donc conduit au total à **une diminution de 10.8 % du débit de pointe**.

Plus en détail, le Tableau 14 donne les débits de pointe « naturels » (sans ouvrages) résultants le long du tronçon ainsi que l'influence des ouvrages sur ce paramètre.

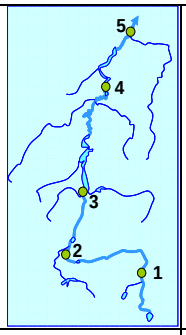
Cours d'eau 	Pointe de crue sans ouvrages [m³/s]	Pointe de crue avec ouvrages [m³/s]	Réduction due aux ouvrages $\Delta Q=Q_{avec}- Q_{sans}$ [m³/s]
Sarine Tscherzisbach (1)	15.1	7.9	- 7.2 (-47.7 %)
Sarine Montbovon (2)	227.6	208.2	- 19.4 (- 8.5 %)
Sarine Broc (3)	372.0	320.1	- 51.9 (-13.9 %)
Sarine Fribourg (4)	727.9	748.7	+ 20.8 (+ 2.9 %)
Sarine Laupen (5)	1037.0	925.4	- 111.6 (-10.8 %)

Tableau 14 : Comparaison de la pointe de la crue d'août 2005 avec ouvrages et sans ouvrages le long de la Sarine jusqu'à Laupen

Il ressort que les ouvrages de Sénin et d'Arnon permettent une réduction d'environ 47.7 % de la pointe dans la Sarine amont à la jonction avec la Tscherzisbach. A Broc, les ouvrages de l'Hongrin, de Lessoc et de Rossinière apportent une diminution plus faible, de l'ordre de 14 % de la pointe de crue. Par contre, à la station de Fribourg, les résultats montrent que la pointe de crue n'a pas été laminée malgré la présence de la grande retenue qu'est le lac de Gruyère. Ceci est discuté ci-après.

Cas particulier de l'effet du lac de Gruyère

La comparaison de l'hydrogramme de crue avec et sans ouvrages à Fribourg (Figure 32) montre que, si les ouvrages d'accumulation ont stocké du volume de la crue du 21 au 24 août 2005 (environ 18.9 Mio. de m³, soit 22.4 % du volume de la crue), ils n'ont pas eu d'effet sur la pointe de crue.

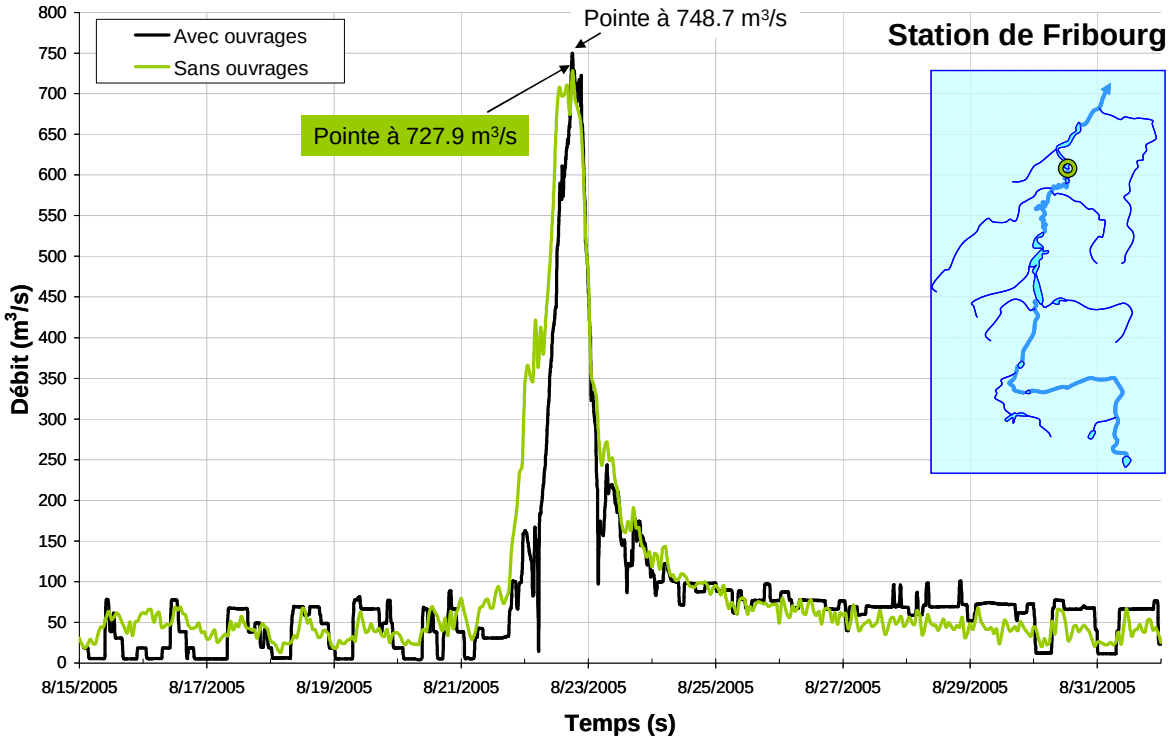


Figure 32 : Hydrogramme actuel avec ouvrages (en noir) et naturel sans ouvrages (en vert) à la station de Fribourg sur la Sarine

Ce résultat ne met en évidence qu'en termes de protection contre les crues, ce n'est pas uniquement la capacité de stockage qui est significative. En effet, la coordination concernant le moment des déversements pendant ou après le passage de la crue a un rôle direct sur le laminage de la pointe de crue. Dans ce cas, en observant les hydrogrammes naturels et avec ouvrages à Hauterive (Figure 33a), il peut être constaté qu'au barrage de Rossens, le débit maximal qui est évacué environ 3 heures après la pointe de la crue dans la Sarine coïncide avec la pointe de la crue naturelle de la Gérine à sa jonction avec la Sarine (Figure 33b). Ainsi, avec ouvrages, le débit maximal déversé à Rossens se cumule avec la pointe de la crue arrivant de la Gérine, entraînant ainsi un deuxième pic de débit dans la Sarine. Sans ouvrage, ce cumul de débit est évité.

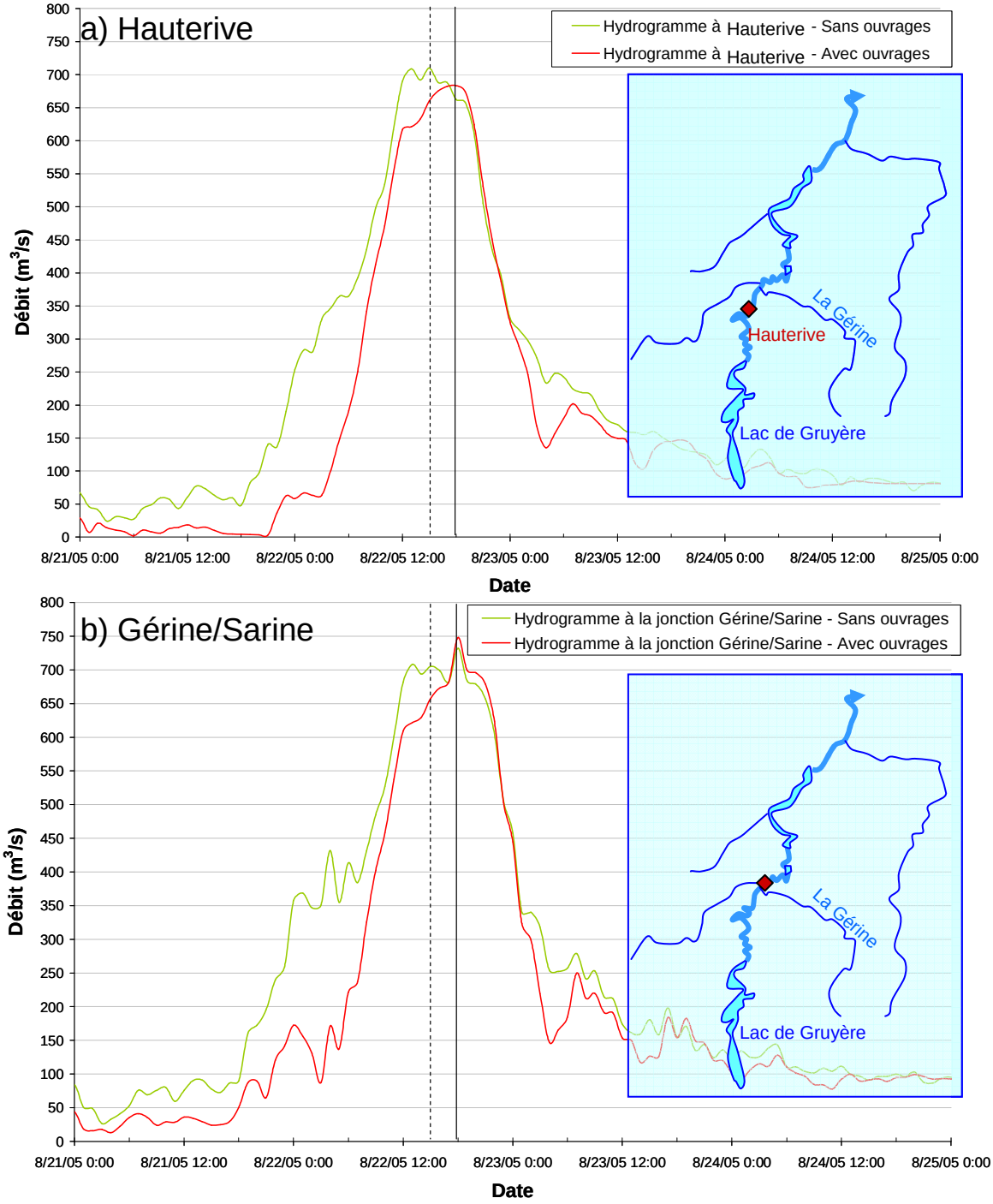


Figure 33 : Hydrogramme calculé avec ouvrages (en rouge) et sans ouvrages (en vert) sur la Sarine, a) à Hauterive, b) à la jonction Gérine/Sarine

V.1.2 L'Aare

Conditions exceptionnelles d'exploitation en août 2005

Les hydrogrammes de crue de l'Aare à Guttanen, à sa jonction avec l'Urbachwasser et à Brienzwiler avec ouvrages et sans ouvrages sont représentés respectivement à la Figure 34a, b et c.

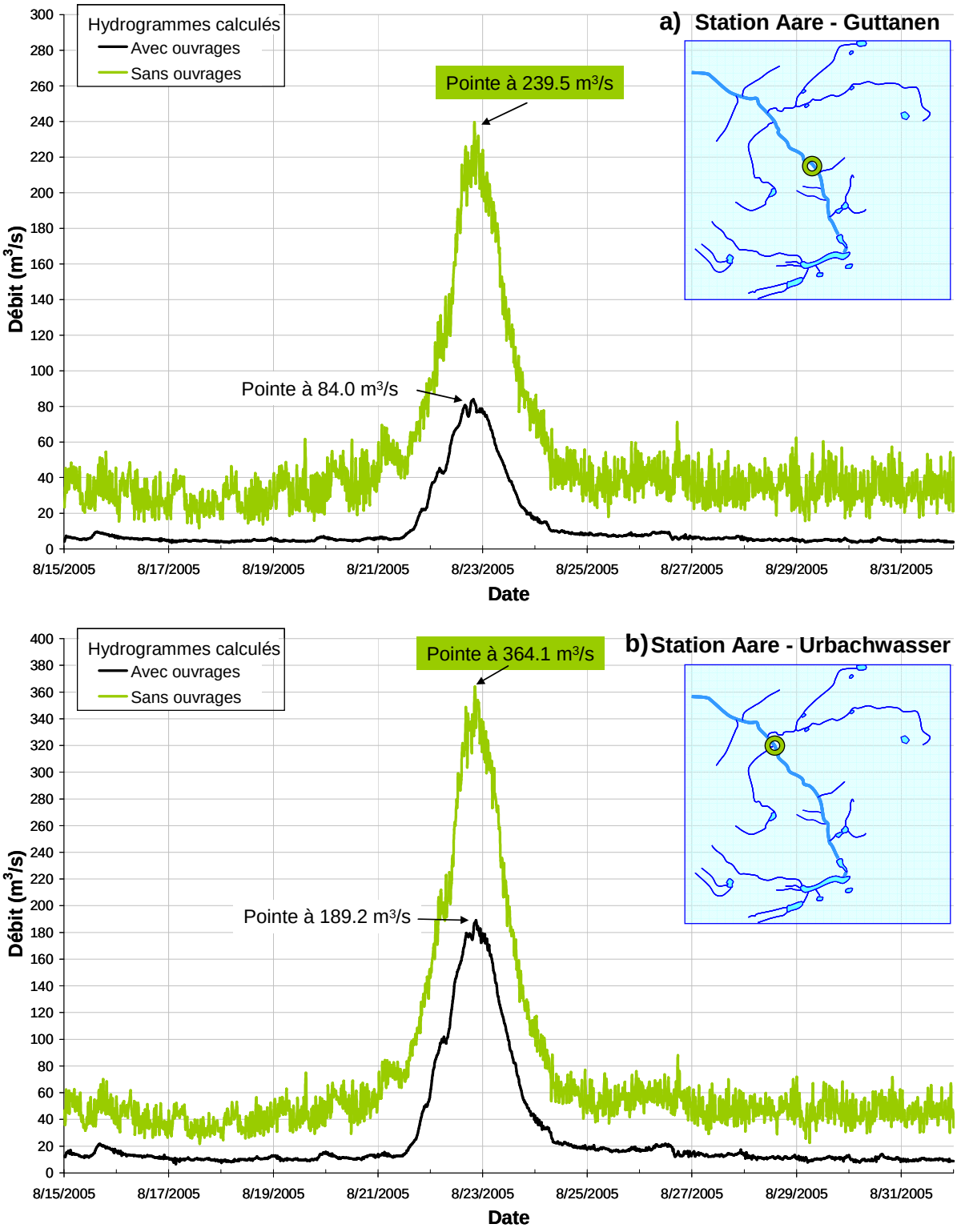


Figure 34 Hydrogramme actuel avec ouvrages (en noir) et naturel sans ouvrages (en vert) de l'Aare à Guttanen (a), à la jonction avec l'Urbachwasser (b) et à Brienzwiler (c)

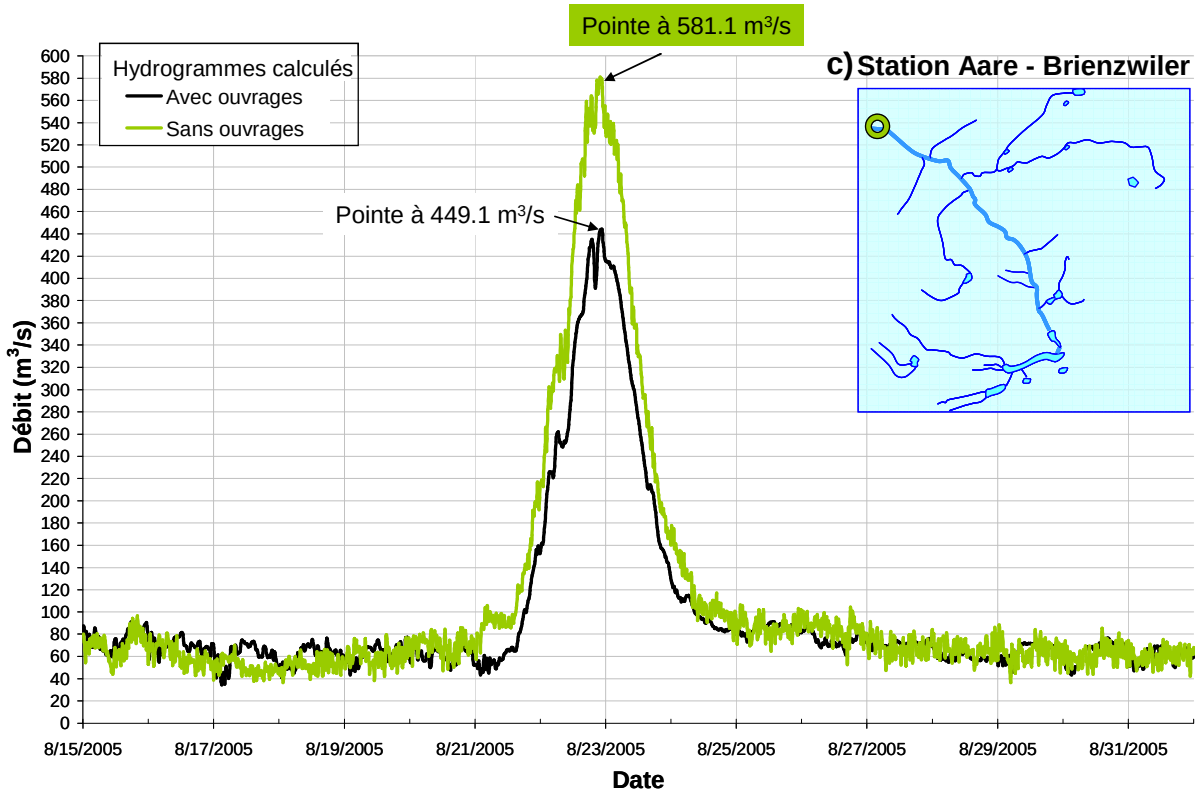


Figure 34 : Hydrogramme actuel avec ouvrages (en noir) et naturel sans ouvrages (en vert) de l'Aare à Guttanen (a), à la jonction avec l'Urbachwasser (b) et à Brienzwiler (c)

Ce résultat montre que sur l'ensemble de ce tronçon de l'Aare, avec les niveaux des lacs de Grimsel et de Raeterichsboden exceptionnellement bas, les ouvrages d'accumulation ont pour effet de réduire d'environ 132 m³/s la pointe de crue à Laupen. Les retenues ont donc conduit au total à **une diminution de 22.7 % du débit de pointe**.

Dans le détail, la réduction de la pointe de crue grâce aux ouvrages d'accumulation est donnée le long de l'Aare dans le Tableau 15.

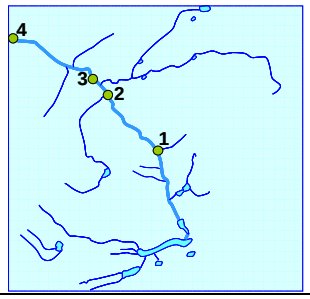
Cours d'eau 	**Pointe de crue sans ouvrages [m³/s]**	**Pointe de crue avec ouvrages [m³/s]**	**Réduction due aux ouvrages $\Delta Q = Q_{avec} - Q_{sans}$ [m³/s]**
Aare Guttanen (1)	239.5	84.0	- 155.5 (-64.9 %)
Aare Urbachwasser (2)	364.1	189.2	-174.9 (-48.0 %)
Aare Innertkirchen (3)	497.9	339.4	-158.5 (-31.8 %)
Aare Brienzwiler (4)	581.1	449.1	-132.0 (-22.7 %)

Tableau 15 : Comparaison de la pointe de la crue d'août 2005 avec ouvrages et sans ouvrages le long de l'Aare jusqu'à Brienzwiler

L'influence la plus significative des ouvrages d'accumulation est donc à Guttanen. Les retenues d'Oberaarsee, Grimsel, Raeterichsboden et Glemersee réduisent à eux quatre d'environ 65 % la pointe de la crue. A la jonction Urbachwasser/Aare, la diminution de la pointe de crue due au seul ouvrage de Mattenalpsee est de l'ordre de 15.6 %.

Si seul l'effet de l'ouvrage d'Engstlensee est examiné (réduction à Aare Innertkirchen moins réduction à Aare Urbachwasser), il apparaît qu'avec ouvrage, la pointe de crue est 12.2 % supérieure que sans ouvrage. Ceci s'explique car tout le débit stocké pendant la crue est dévié et concentré en deux points de sortie du système KWO : Innertkirchen I et II. Ainsi, localement et sans cumuler les effets de rétention des ouvrages, il apparaît que sur le tronçon entre Urbachwasser et Innertkirchen (du point 2 au point 3) les ouvrages augmentent légèrement le débit de pointe de la crue. Mais en totalité, les ouvrages réduisent fortement ce débit de crue.

Conditions normales d'exploitation

Comme décrit au § III.2.3, deux scénarios supplémentaires ont été calculés pour le cas de l'Aare. Le scénario 1 qui consiste à maintenir un niveau d'eau initial bas à Raeterichsboden mais à imposer un niveau normal d'exploitation à Grimsel (26 m plus haut que le niveau mesuré en août 2005) et le scénario 2 qui considère le niveau d'eau initial de Grimsel et Raeterichsboden (18 m plus haut que le niveau mesuré en août 2005) égal au niveau normal d'exploitation des lacs à l'arrivée de la crue.

L'hydrogramme sans ouvrages est comparé à celui avec ouvrages pour le cas du scénario 2 le plus défavorable à la Figure 35.

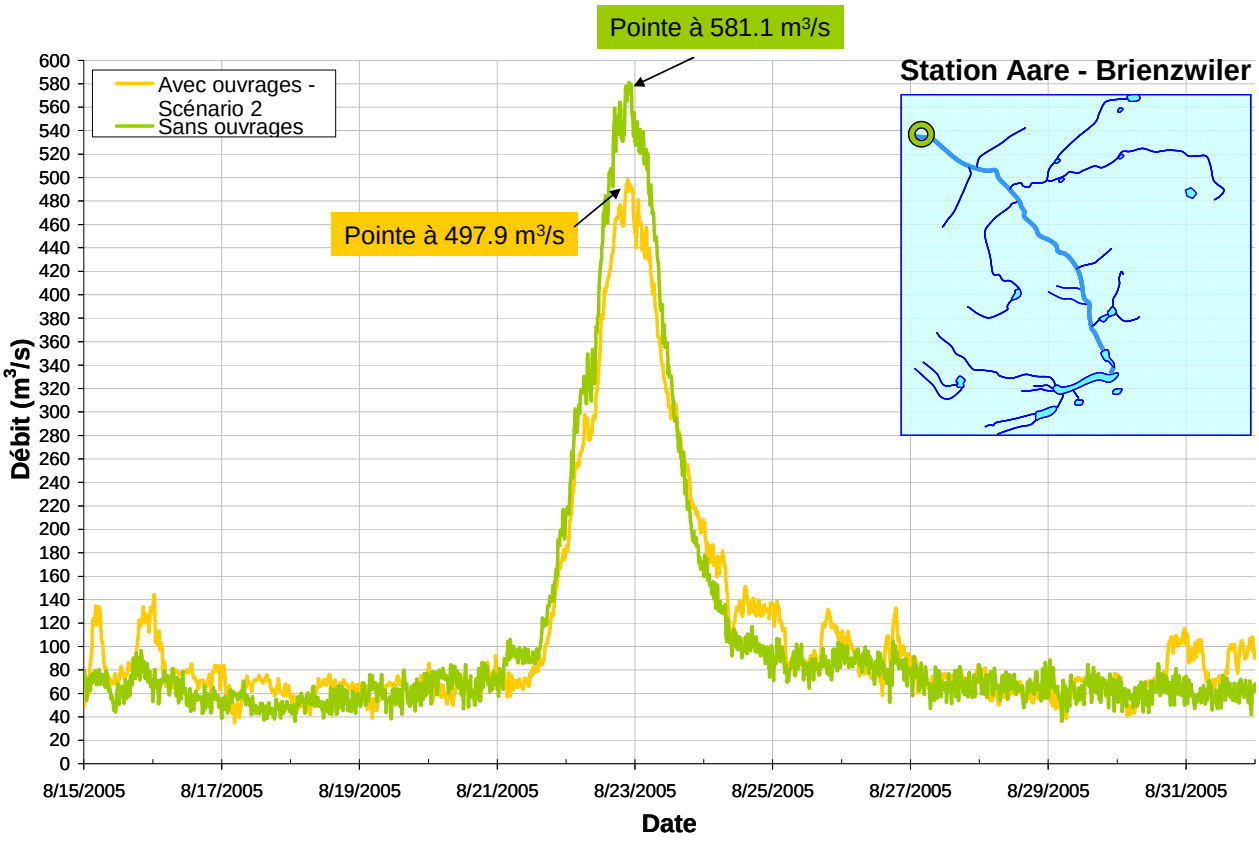


Figure 35 : Hydrogramme avec ouvrages pour le scénario 2 (voir Tableau 10) (en orange) et naturel sans ouvrages (en vert) à la station de Brienzwiler sur l'Aare

Les ouvrages d'accumulation pour ce scénario 2 n'entraînent plus qu'une **réduction de 14.3 % de la pointe de la crue à Brienzwiler** au lieu de 22.7 % calculé en condition exceptionnelle d'août 2005. Donc en situation normale d'exploitation, l'efficacité des ouvrages d'accumulation est de 9 à 10 % moins importante que par rapport à la situation exceptionnelle produite en été 2005.

V.1.3 La Reuss

Les hydrogrammes de crue « naturels » de la Reuss sans ouvrages d'accumulation obtenus à Andermatt en aval de la jonction avec l'Oberalpreuss, à Amsteg en aval de la jonction avec la Chärstelenbach et à la station de Seedorf sont comparés respectivement avec les hydrogrammes actuels (avec ouvrages), Figure 36 a), b) et c).

Les ouvrages d'accumulation ont donc pour effet de réduire d'environ 66.8 m³/s la pointe de crue de la Reuss à Seedorf, en amont du lac des quatre Cantons. Les trois retenues Lucendro, Göscheneralp, et Arniboden ont donc conduit au total à **une diminution de 11.2 % du débit de pointe**.

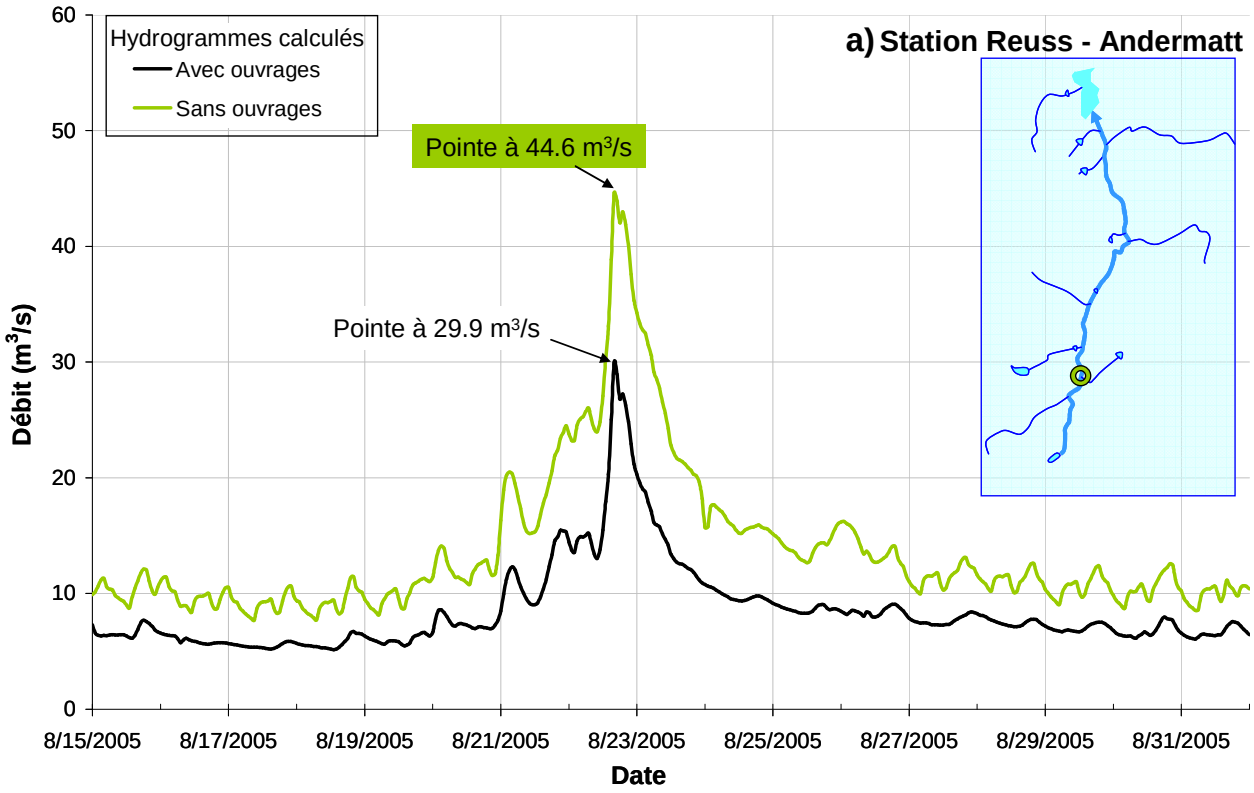


Figure 36 : Hydrogrammes actuels avec ouvrages (en noir) et naturel sans ouvrages (en vert) à la station d'Andermatt (a), à Amsteg (b) et à la station de Seedorf (c) sur la Reuss

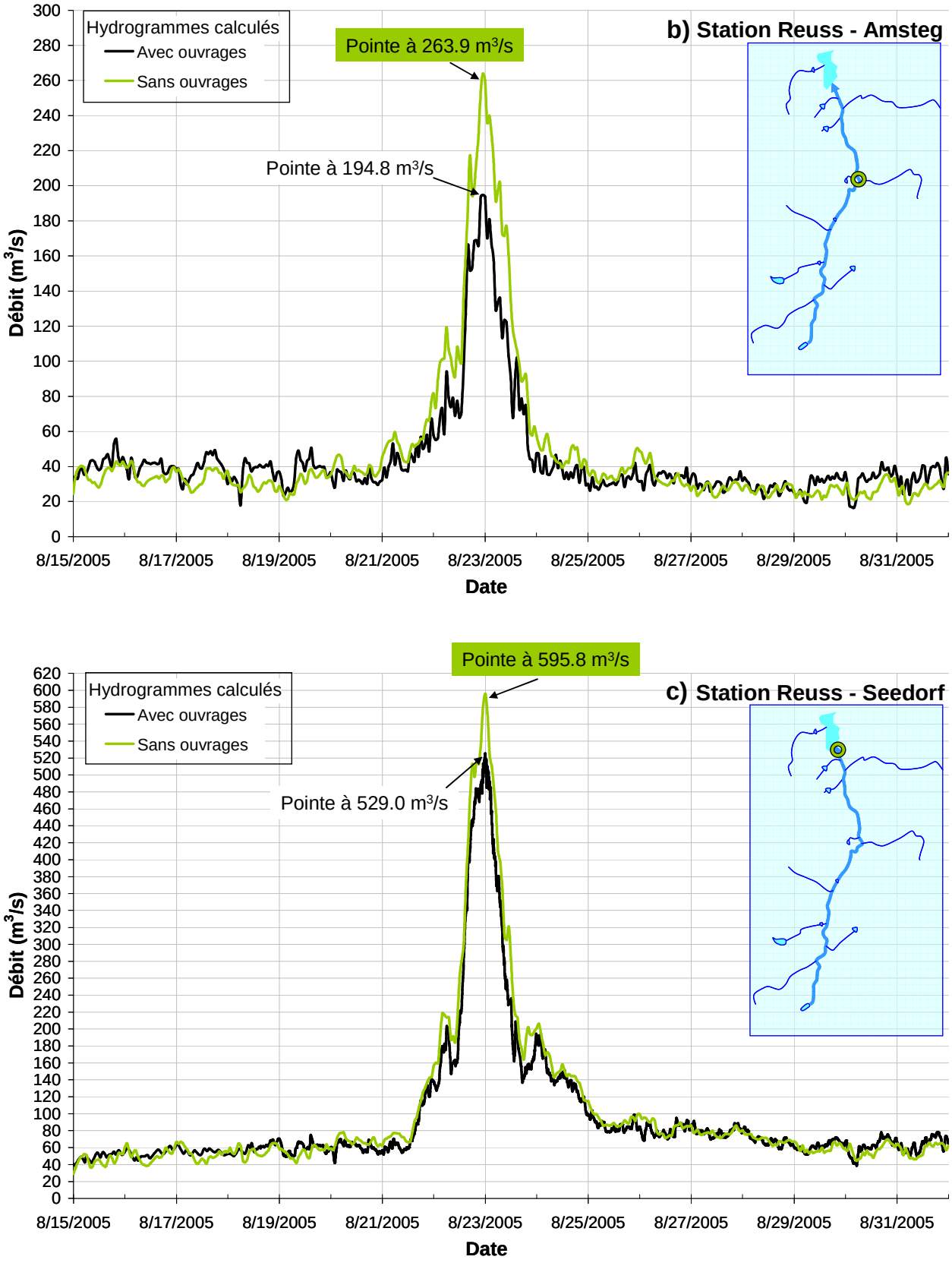


Figure 36 : Hydrogrammes actuels avec ouvrages (en noir) et naturel sans ouvrages (en vert) à la station d'Andermatt (a), à Amsteg (b) et à la station de Seedorf (c) sur la Reuss

Dans le détail, la réduction de la pointe de crue grâce aux ouvrages d'accumulation est donnée le long de la Reuss dans le Tableau 16.

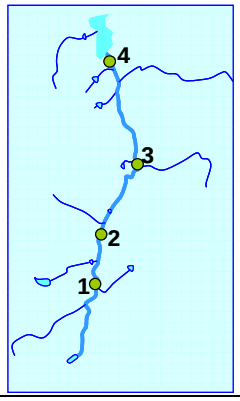
Cours d'eau 	**Pointe de crue sans ouvrages** **[m³/s]**	**Pointe de crue avec ouvrages** **[m³/s]**	**Réduction due aux ouvrages** $\Delta Q = Q_{avec} - Q_{sans}$ **[m³/s]**
Reuss Andermatt (1)	44.6	29.9	- 14.7 (-33.0 %)
Reuss Wattigen (2)	86.7	40.2	-46.5 (-53.6 %)
Reuss Amsteg (3)	263.9	194.8	-69.1 (-26.2 %)
Reuss Seedorf (4)	595.8	529	-66.8 (-11.2 %)

Tableau 16 : Comparaison de la pointe de la crue d'août 2005 avec ouvrages et sans ouvrages le long de la Reuss jusqu'à la station de Seedorf

Pendant ce mois d'août 2005, les ouvrages de ce tronçon de la Reuss ont moins été touchés par les intempéries et la crue y a été moins sévère que pour des bassins versants comme l'Aare ou la Sarine. Les capacités maximales de rétention des lacs de Lucendro, de Göscheneralp et d'Arniboden n'ont pas été atteintes.

V.1.4 La Linth

L'hydrogramme de crue « naturel » (sans ouvrages) de la Linth en aval du bassin du Linthal est comparé à l'hydrogramme avec ouvrages à la Figure 37a). A ce lieu, la diminution de la pointe de crue d'environ 26.9 m³/s est due à l'effet du complexe Linth-Linthal.

En aval du tronçon étudié, la comparaison de l'hydrogramme naturel sans ouvrages et l'hydrogramme avec ouvrages (Figure 37b) à la station de Mollis sur la Linth montre que les ouvrages d'accumulation ont permis de réduire de 119.2 m³/s la pointe de la crue d'août 2005. Ainsi, le complexe Linth-Limmern, les barrages de Garichte et de Rhodannenberg ont eu pour effet **une diminution de 23.0 % de la pointe de crue à Mollis.**

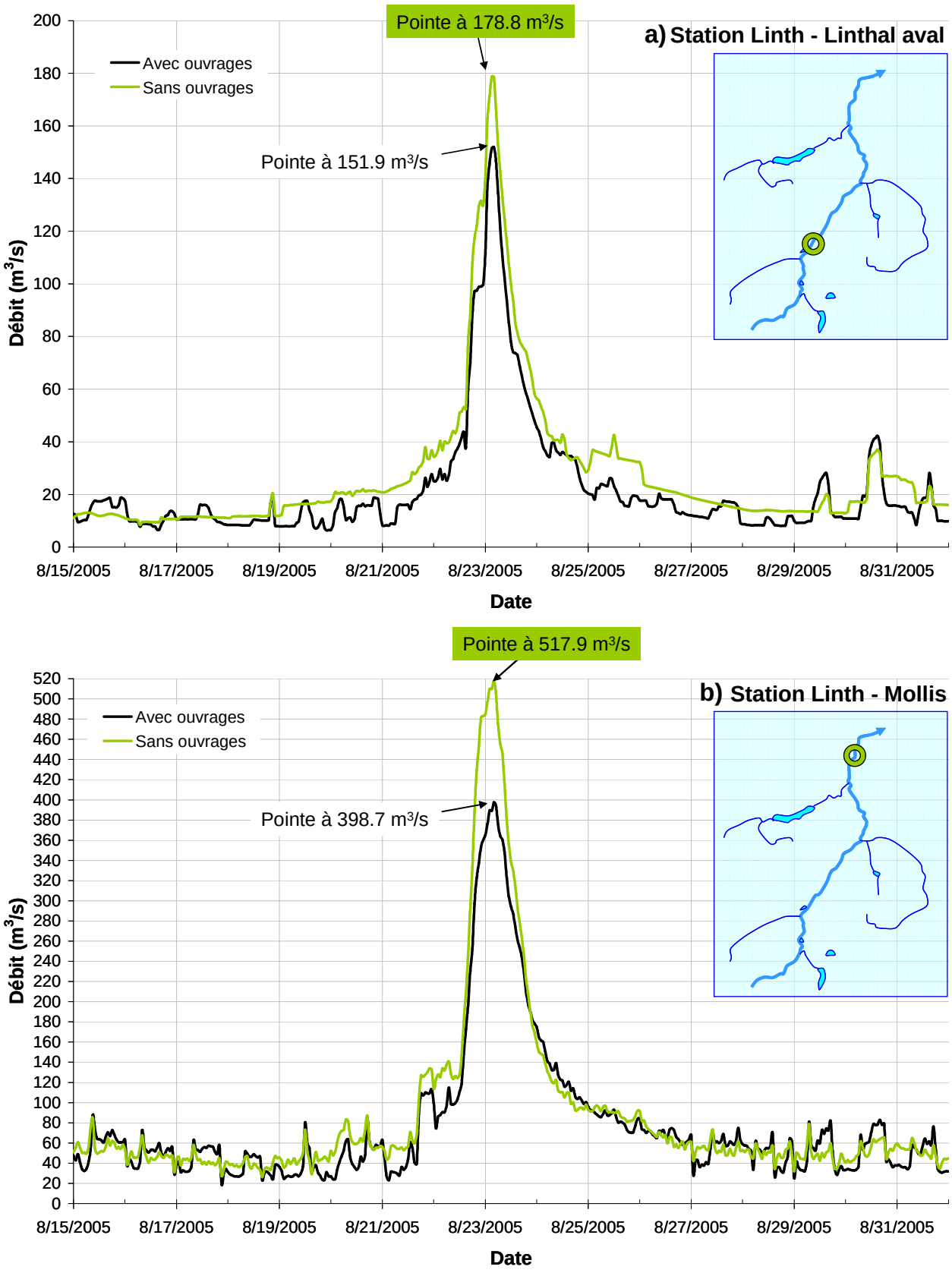


Figure 37 : Hydrogramme actuel avec ouvrages (en noir) et naturel sans ouvrages (en vert) au Linthal, en aval du baddin du Linthal (a) et à la station de Mollis (b) sur la Linth

Dans le détail, la réduction de la pointe de crue grâce aux ouvrages d'accumulation est donnée le long de la Linth dans le Tableau 16.

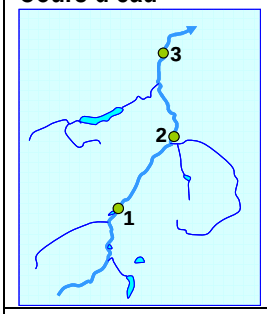
Cours d'eau 	**Pointe de crue sans ouvrages** **[m³/s]**	**Pointe de crue avec ouvrages** **[m³/s]**	**Réduction due aux ouvrages** $\Delta Q = Q_{avec} - Q_{sans}$ **[m³/s]**
Linth aval Linthal (1)	178.8	151.9	- 26.9 (-15.0 %)
Linth Schwanden (2)	378.6	345.5	-33.1 (-8.7 %)
Linth Mollis (3)	517.9	398.7	-119.2 (-23.0 %)

Tableau 17 : Comparaison de la pointe de la crue d'août 2005 avec ouvrages et sans ouvrages le long de la Linth jusqu'à la station de Mollis

Puis, depuis le Linthal jusqu'à la station de Mollis, c'est la retenue de Klöntalersee qui joue le principal rôle de laminage de la crue: dans ce tronçon, la pointe est réduite de plus de 84 m³/s (soit 25 % de réduction).

V.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation

V.2.1 La Sarine

A Laupen, pendant la période du 21 août (0h) au 24 août (24h) 2005, **le volume de la crue de la Sarine est réduit de 16.9 %, soit de 20.5 Mio. de m³**, sous l'influence des 9 ouvrages d'accumulation qui la longent. Seul le barrage de la Maigrauge n'a pas contribué à cet effet de stockage. Cette influence englobe la capacité de rétention de chaque retenue, mais aussi l'effet de dérivation des débits captés dans le bassin versant de la Sarine.

L'influence des ouvrages d'accumulation sur la réduction du volume de la crue le long de la Sarine jusqu'à Laupen pendant cette période du 21 août (0h) au 24 août (24h) 2005 est donnée à la Figure 38. Les réductions caractérisent une situation locale incluant l'influence des affluents et des ouvrages à chaque endroit. Elles ont été calculées comme suit :

$$\text{Réduction locale [\%]} = 100 \cdot ((Vol_{\text{avec ouvrages}} - Vol_{\text{sans ouvrages}}) / Vol_{\text{sans ouvrages}})$$

Etant donné qu'à l'exception de la digue d'Arnon, les retenues ont atteint leur cote maximale d'exploitation, cette capacité de rétention pourrait être difficilement augmentée pour un tel évènement.

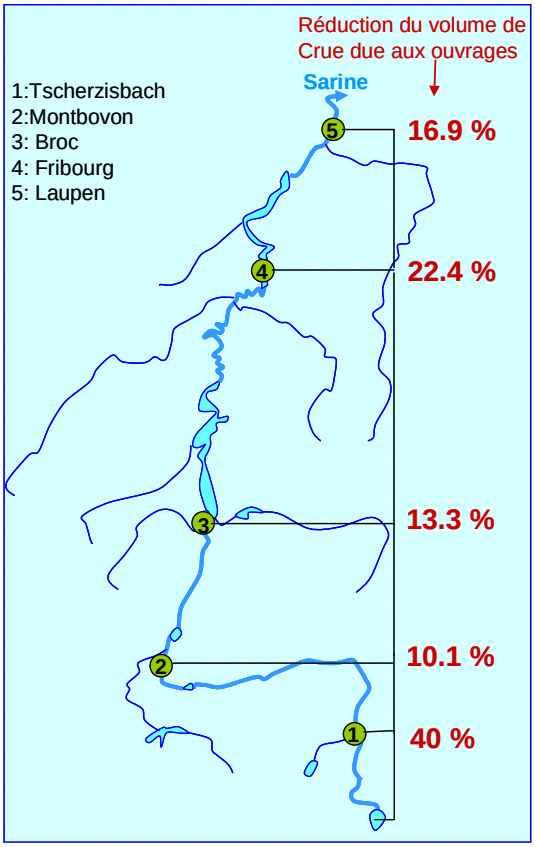


Figure 38 : Réduction locale du volume de la crue grâce aux ouvrages d'accumulation le long de la Sarine jusqu'à Laupen du 21 août 2005 (0 h) au 24 août 2005 (24 h)

V.2.2 L'Aare

Condition exceptionnelle d'exploitation en août 2005

Avec les niveaux des lacs de Grimsel et Raeterichsboden exceptionnellement bas, les ouvrages d'accumulation dans le bassin versant de l'Aare ont permis de stocker 18.4 Mio. de m^3 d'eaux au passage de la crue pendant la période du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h). **Ces ouvrages ont réduit le volume de la crue de 21.5 %.** Parmi les six ouvrages modélisés, seul le barrage de Gelmersee n'a pas joué un rôle de rétention pendant la crue.

Pour cette condition, l'influence des ouvrages d'accumulation sur la réduction locale (voir § V.2.1) du volume de la crue le long de l'Aare jusqu'à Brienzwiler pendant cette période du 21 août (0h) au 24 août (24h) 2005 est donnée à la Figure 39.

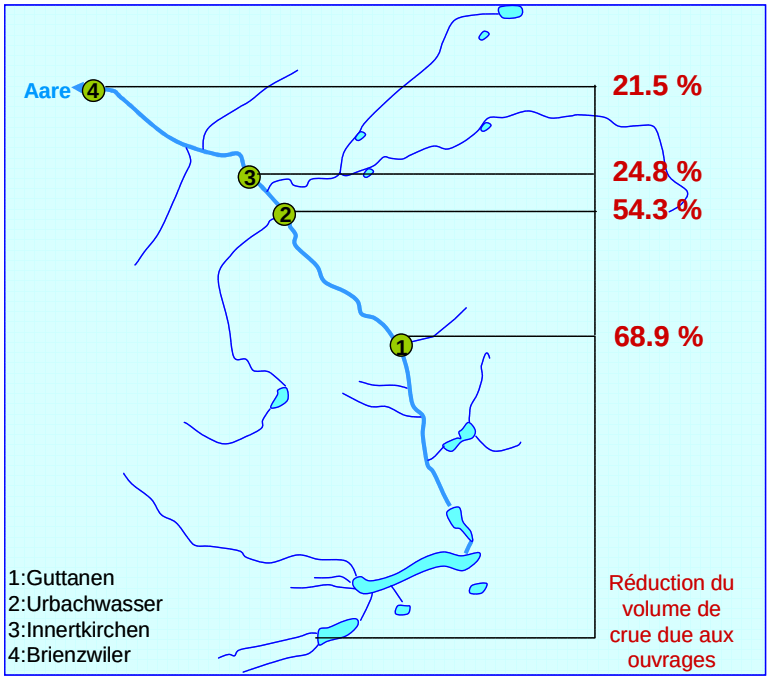


Figure 39 : Réduction locale du volume de la crue grâce aux ouvrages d'accumulation le long de l'Aare jusqu'à Brienzwiler du 21 août 2005 (0 h) au 24 août 2005 (24 h)

Grimsel en conditions normales d'exploitation

Le volume total stocké de la crue du 21 août 2005 à 0h au 24 août 2005 24h par les ouvrages d'accumulation pour les scénarios 1 et 2 est donné dans le Tableau 18.

	Situation réelle exceptionnelle	**Scénario 1**	**Scénario 2**
Stockage total [Mio. de m³]	18.4	13.8	5.9
Influence des ouvrages [%]	21.5	16.0	6.9

Tableau 18 : Volume total stocké par les retenues pendant la crue du 21 août (0h) au 24 août (24h) 2005 à l'Aare Brienzwiler

Le scénario 2 qui suppose les deux retenues en conditions normales d'exploitation montre que le volume stocké par les ouvrages sur le tronçon de l'Aare jusqu'à Brienzwiler est faible, de 6.9 %, ce qui est moins du tiers de ce qu'il s'est produit lors des conditions exceptionnelles de l'été 2005.

Ce résultat montre que, dans le cadre de la protection contre les crues, le contrôle du niveau des deux lacs de Grimsel et Raeterichsboden est décisif. A priori, les actions suivantes pourraient avoir leur utilité avant l'arrivée d'un événement exceptionnel :

- Activer les organes de pompage vers le lac d'Oberaar pour abaisser le niveau du lac de Grimsel avant et pendant la pointe de la crue. Ceci limiterait l'évacuation des eaux dans Raeterichsboden pendant la crue.
- Abaisser le niveau du lac de Raeterichsboden par turbinage ou évacuation dans l'Aare avant l'arrivée de la crue pour libérer un volume de stockage et retenir la crue pendant la durée de sa pointe.

Ces interventions permettraient d'augmenter l'influence des ouvrages d'accumulation de l'Aare vers des valeurs de 15 à 20 %, i.e. proches de celles estimées pour la Sarine et la Linth.

V.2.3 La Reuss

A Seedorf, pendant la période du 21 août (0h) au 24 août (24h) 2005, **le volume de la crue de la Reuss est réduit de 10.7 %, soit de 8.2 Mio. de m³**, sous l'influence des ouvrages d'accumulation qui la longent. Cependant, le complexe de Göscheneralp-Göschenen est le principal acteur de cet effet de rétention (contribution de 94.7 % du volume total stocké) et seul le barrage de Pfaffensprung n'a pas eu de capacité de rétention.

Durant ces intempéries, à l'exception de Pfaffensprung, aucun des ouvrages n'a atteint sa capacité maximale d'exploitation.

L'influence des ouvrages d'accumulation sur la réduction locale (voir § V.2.1) du volume de la crue le long de la Reuss jusqu'en amont du lac des quatre cantons pendant cette période du 21 août (0h) au 24 août (24h) 2005 est donnée à la Figure 40.

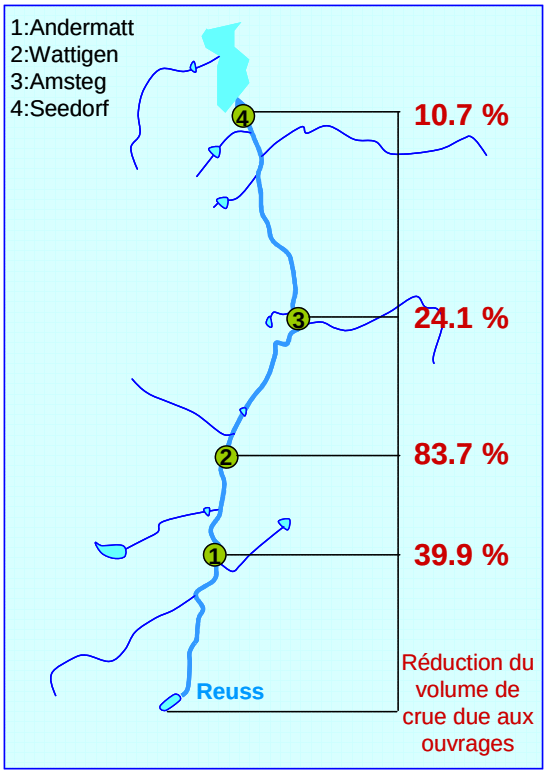


Figure 40 : Réduction locale du volume de la crue grâce aux ouvrages d'accumulation le long de la Reuss jusqu'à Seedorf du 21 août 2005 (0 h) au 24 août 2005 (24 h)

V.2.4 La Linth

Les ouvrages d'accumulation de la Linth jusqu'à Mollis ont eu pour effet de réduire de 15.1 %, soit 10.15 Mio. de m³, le volume de la crue à Mollis, du 21 août (0h) au 24 août (24h) 2005.

Plus en détail, à la Figure 41 est donnée la réduction locale du volume de la crue le long de la Linth jusqu'à Mollis due aux ouvrages d'accumulation (période du 21 août (0h) au 24 août (24h) 2005).

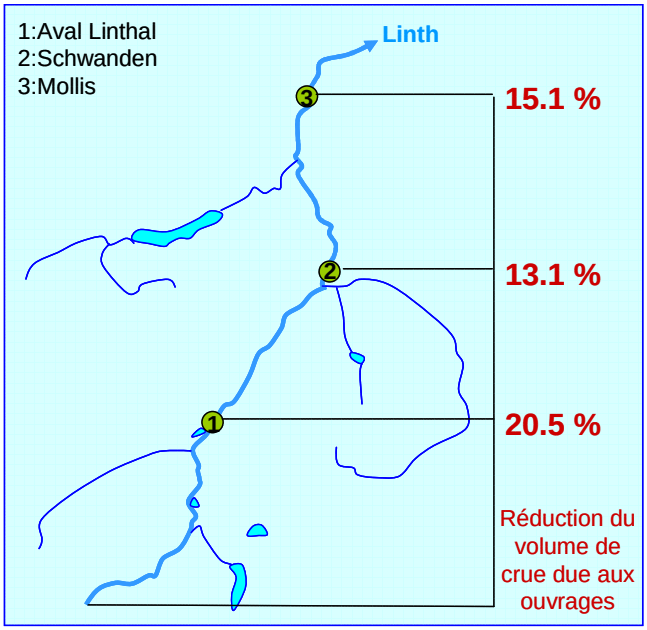


Figure 41 : Réduction locale du volume de la crue grâce aux ouvrages d'accumulation le long de la Linth jusqu'à Mollis du 21 août 2005 (0 h) au 24 août 2005 (24 h)

Le complexe Linth-Linthal, qui a lui seul a retenu plus de 60 % du volume de la crue, était loin de sa capacité maximale de rétention.

Par contre, la capacité de rétention du barrage de Rhodannenberg, qui a stocké 38.6 % du volume déversé, était maximale pour un tel évènement.

V.3 Récapitulatif

Un résumé de l'influence des ouvrages d'accumulation pendant la crue d'août 2005 (du 21 août 0h au 24 août 24h) est donné dans le Tableau 19.

Cours d'eau	Volume retenue [Mio. de m³ / jour] Août 2005				Effet total de rétention		Effet total de laminage	
	21 0h à 24h	22 0h à 24h	23 0h à 24h	24 0h à 24h	[10^6.m³]	[%]	[m³/s]	[%]
Sarine jusqu'à Laupen	5.55	10.65	3.86	0.45	20.51	**16.9**	111.6	**10.8**
Aare jusqu'à Brienzwiler	3.15	7.92	6.00	1.34	18.41	**21.5**	132.0	**22.7**
Reuss jusqu'à Seedorf	0.85	3.02	3.45	0.88	8.20	**10.7**	66.8	**11.2**
Linth jusqu'à Mollis	1.61	4.74	4.78	-0.98	10.14	**15.1**	119.2	**23.0**

Tableau 19 : Récapitulatif de l'effet des ouvrages d'accumulation sur la rétention du volume de la crue et sur la réduction du débit de pointe de la crue du 21 août 2005 à 0h au 24 août 2005 à 24h

VI Conclusions

La présente étude avait pour objectif de déterminer l'influence des ouvrages d'accumulation pendant les intempéries d'août 2005 sur les rivières de la Sarine, l'Aare, la Reuss et la Linth, en Suisse. Dans ce cadre, la Sarine jusqu'à Laupen, l'Aare jusqu'à Brienzwiler, la Reuss jusqu'à Seedorf et la Linth jusqu'à Mollis ont été modélisées numériquement dans le logiciel Routing System avec les ouvrages hydroélectriques qui influencent les bassins versants de ces quatre cours d'eau.

Les mesures des niveaux d'eau des retenues, des débits turbinés/pompés, captés et évacués par les ouvrages, ainsi que les mesures des stations OFEV du débit des cours d'eau pendant la crue d'août 2005, ont permis d'une part de caler les modèles numériques et d'autre part d'estimer les bilans des volumes entrant, sortant et stocké à chaque retenue pendant la crue.

Les quatre réseaux hydrographiques ont par la suite été modélisés sans les ouvrages d'accumulation. Cela a consisté à supprimer les retenues artificielles, ne conserver que les débits naturels, redistribuer les eaux captées aux affluents concernés et reconstituer les sous-bassins versants naturels. Cette simulation numérique a permis de déterminer le routage « naturel » de la crue d'août 2005 dans la Sarine, l'Aare, la Reuss et la Linth sans aucun ouvrage d'accumulation.

La comparaison des hydrogrammes pour les quatre cours d'eau avec ouvrages et sans ouvrages a conduit à déterminer la contribution des ouvrages d'accumulation sur la réduction de la pointe et du volume de la crue d'août 2005. Les résultats montrent que les ouvrages d'accumulation ont eu pour effet une réduction de la pointe de la crue de 10.8 % pour la Sarine, 11.2 % pour la Reuss, 22.7 % pour l'Aare et 23.0 % pour la Linth. Pendant la période du 21 août 2005 à 0h au 24 août 2005 à 24h, les ouvrages ont permis un stockage du volume de la crue de 10.7% pour la Reuss, 15.1 % pour la Linth, 16.9 % pour la Sarine et 21.5 % pour l'Aare.

Dans le cas particulier de l'Aare, les niveaux des lacs de Grimsel et Raeterichsboden étaient exceptionnellement bas en août 2005 (environ 20 m en dessous de la cote d'exploitation) ce qui explique l'important stockage lors de la crue. En conditions normales d'exploitation (niveaux des deux lacs à la cote d'exploitation), la capacité de stockage du volume de la crue serait réduite à 7 %. Ce résultat montre l'effet significatif du niveau des retenues à l'arrivée d'une crue et par conséquence l'importance d'une anticipation appropriée de l'arrivée d'un événement exceptionnel.

Pour la Sarine, les résultats ont montré la possibilité d'optimiser la gestion de la crue (synchronisation de l'abaissement de la retenue à la décrue avec l'hydraulique des affluents) au barrage de Rossens pour optimiser le laminage de la pointe de crue.

Enfin, pour la Reuss et la Linth, dont les bassins versants ont moins été touchés par les intempéries d'août 2005, la capacité maximale de stockage de tout le système n'a pas été atteinte en août 2005.

AquaVision engineering Sàrl
Design and consulting
in hydraulic, geotechnic and environmental engineering

AquaVision Engineering Sàrl

Ecublens, le 28 février 2007

Dr S. André
Ingénieure de projet

Dr E. Bollaert
Directeur

Références

[1] LCH-ENAC-EPFL (2005). « Simulation des systèmes hydrauliques et hydrologiques complexes: Routing System II. » J. Dubois. Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la 3e Correction du Rhône - Nouveaux développements dans la gestion des crues, Communication LCH, Volume 21, pp. 133-145

[2] LCH-ENAC-EPFL (1996). Alluvionnement du Lac de Vernex – Etude des processus de transport solide. Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

[3] LCH-ENAC-EPFL (2006). Crue de la Sarine du 22 août 2005 à la Maigrauge (Fribourg) – Rapport d'expertise. Rapport n°13/06. Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

[4] Site web www.Mair.ch

[5] Hunziker, Zarn & Partner, ARGE, Geo7 (2006). Gefahrenkarten – Hydrologie im OIK I. Tiefbauamt des Kantons Bern.

[6] Hunziker, Zarn & Partner, IUB, Emch+Berger (2006). EHQ-Studie Aare/Zwischenphase HW2005. TBA/WWA.

Annexes

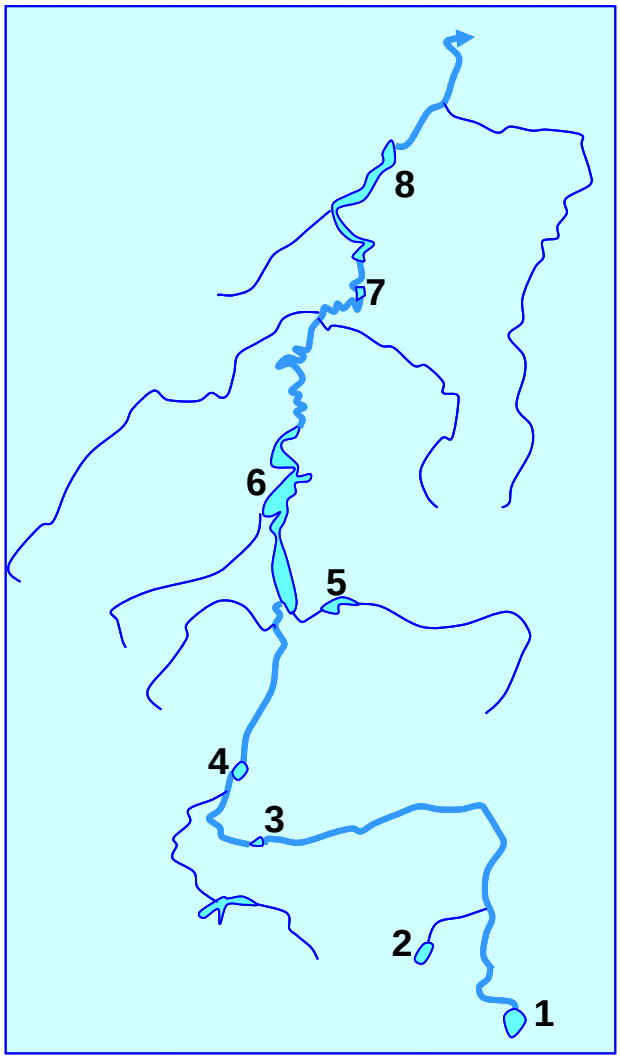
Annexe 1: Comparaison des niveaux d'eau calculés (en rouge) aux niveaux d'eau mesurés (en noir) des retenues de la Sarine

Annexe 2 : Comparaison des niveaux d'eau calculés (en rouge) aux niveaux d'eau mesurés (en noir) des retenues de l'Aare

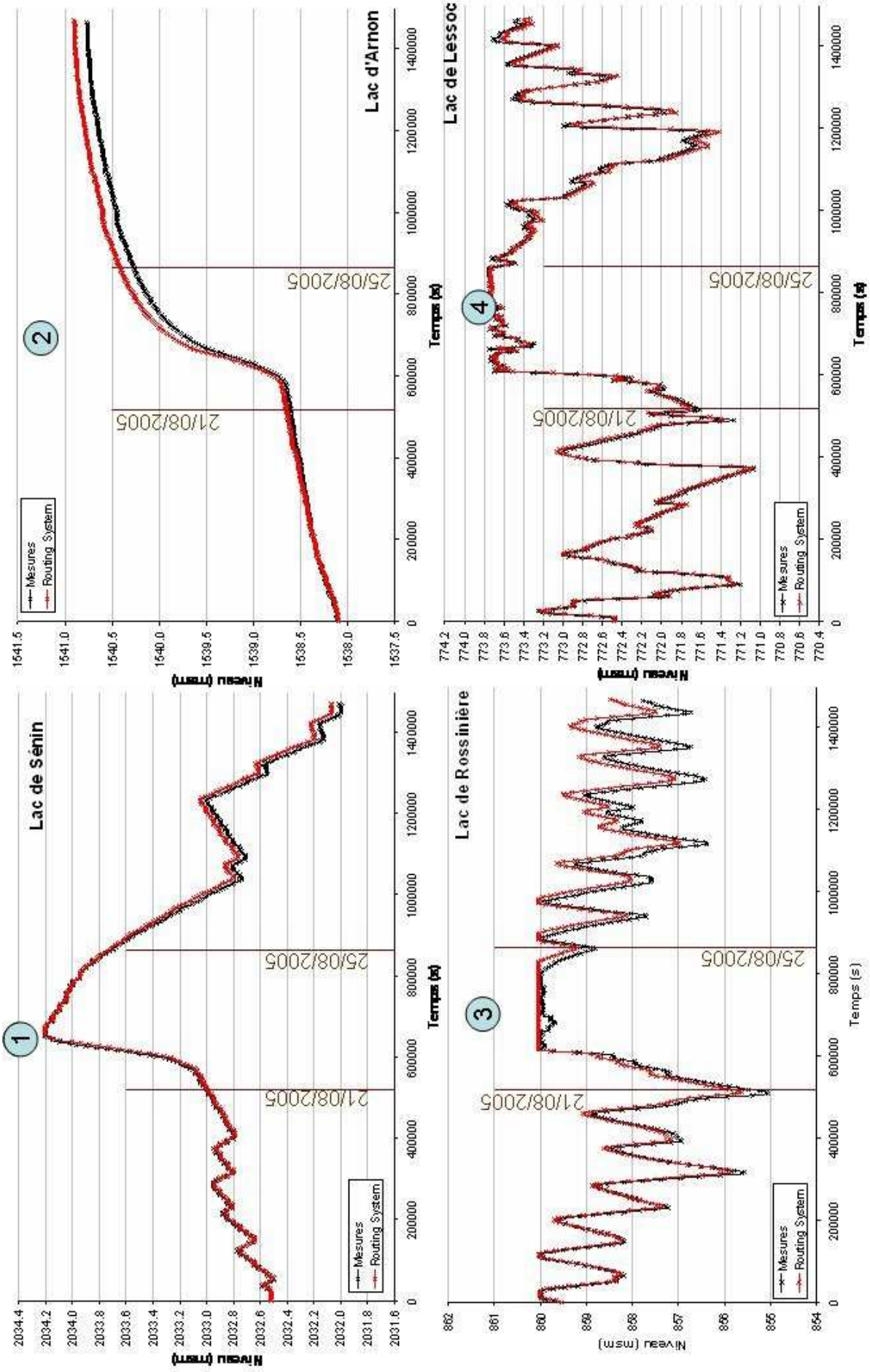
Annexe 3 : Comparaison des niveaux d'eau calculés (en rouge) aux niveaux d'eau mesurés (en noir) des retenues de la Reuss

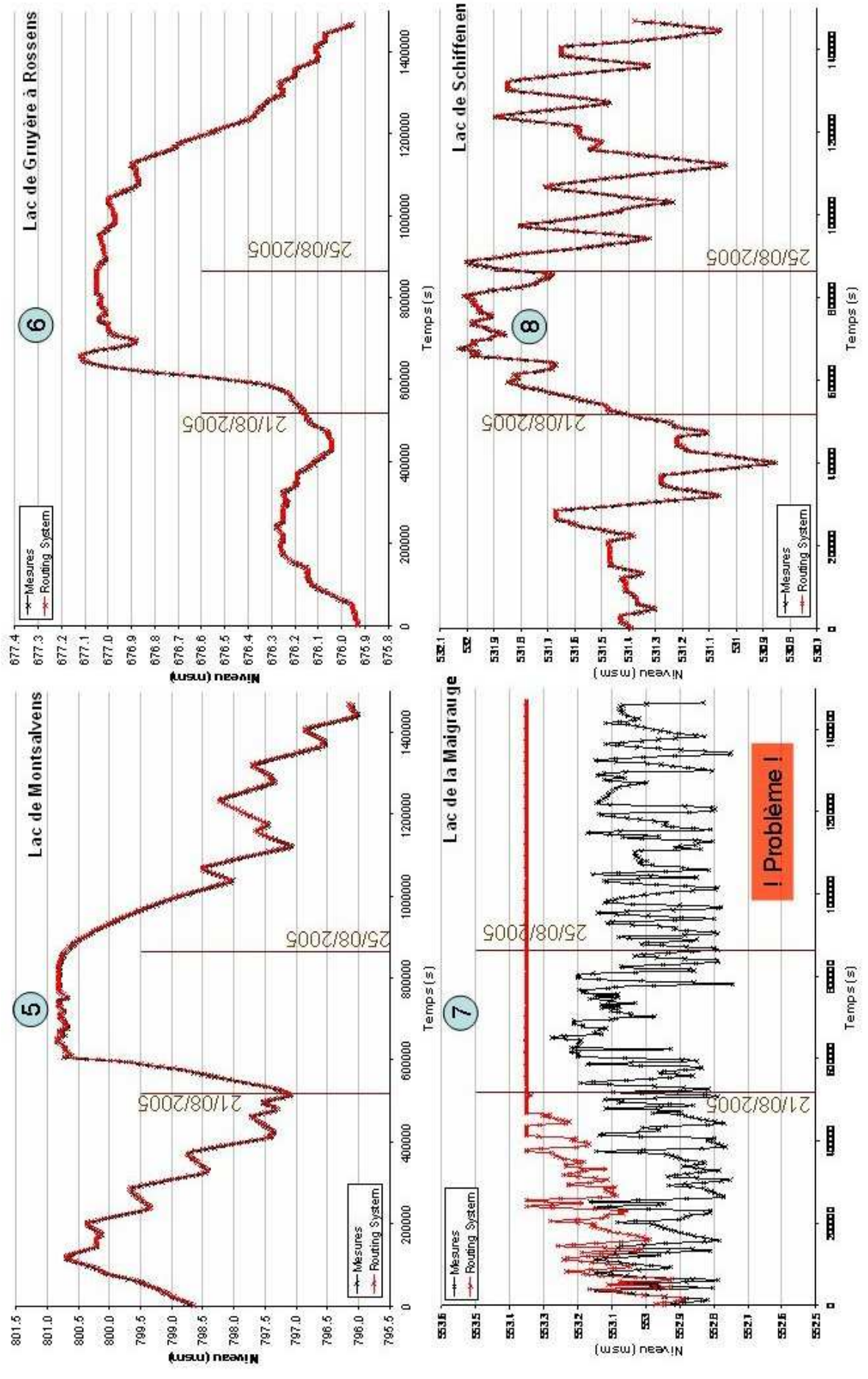
Annexe 4 : Comparaison des niveaux d'eau calculés (en rouge) aux niveaux d'eau mesurés (en noir) des retenues de la Linth

Annexe 1 - LA SARINE

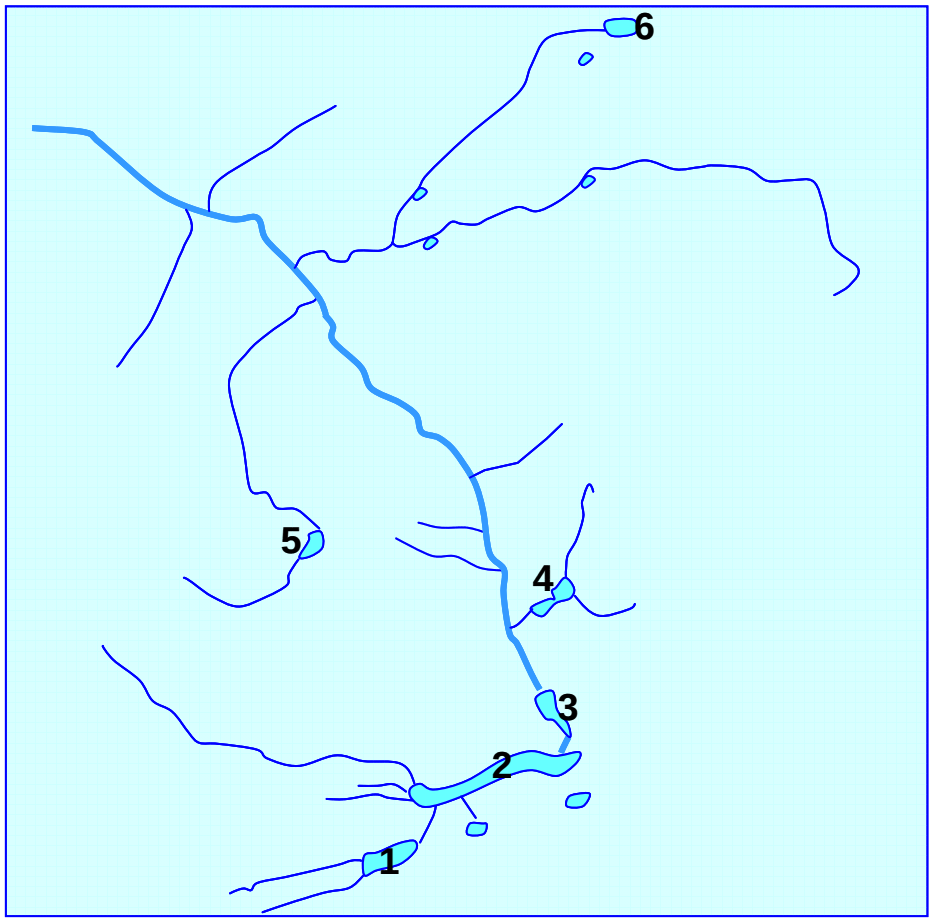


Localisation des retenues

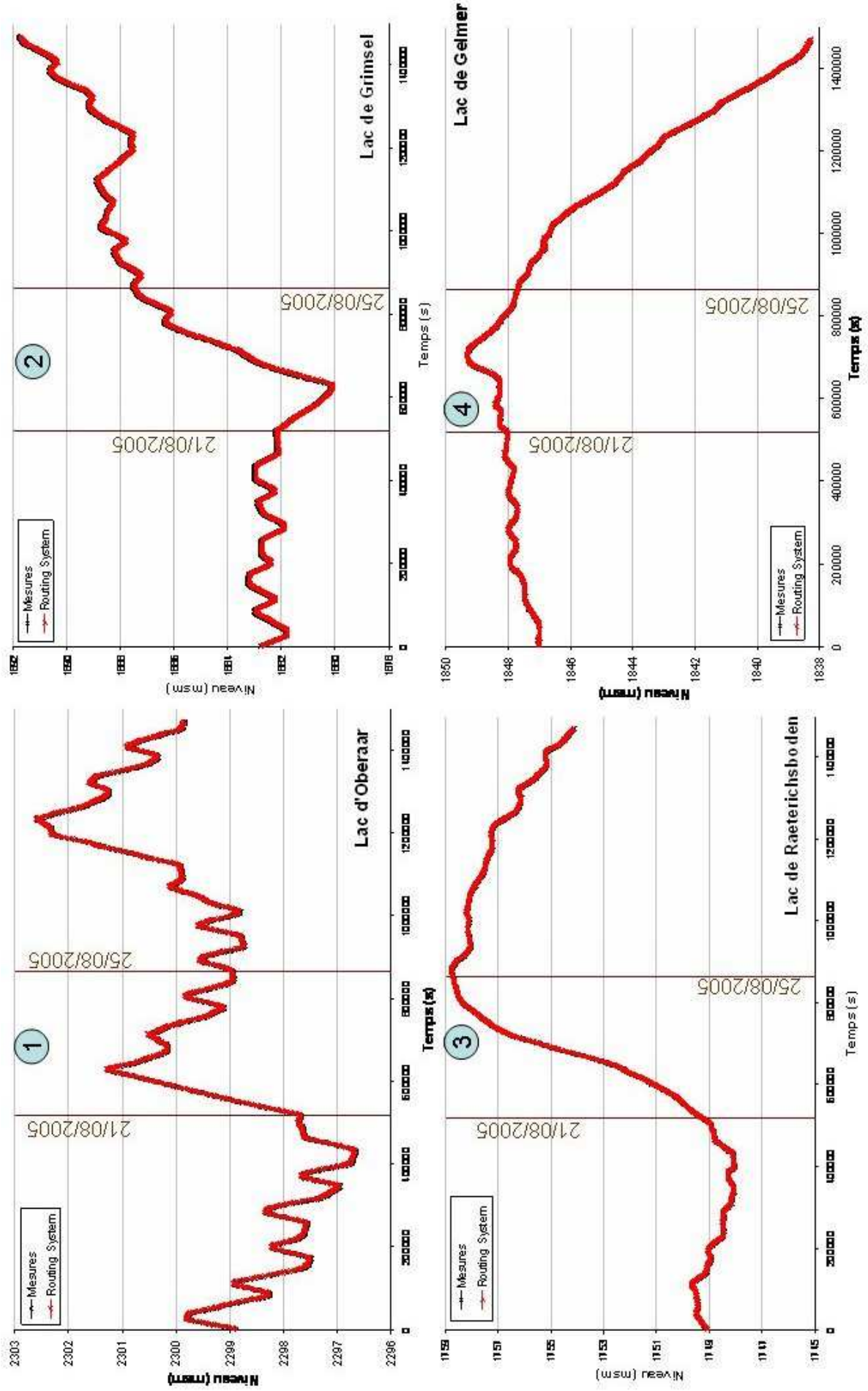

1
Lac de Sénin
Niveau (masl)
Temps (s)
Mesures
Routing System
21/08/2005
25/08/2005
2
Lac d'Arnon
3
Lac de Rossinière
Niveau (msm)
4
Lac de Lessoc

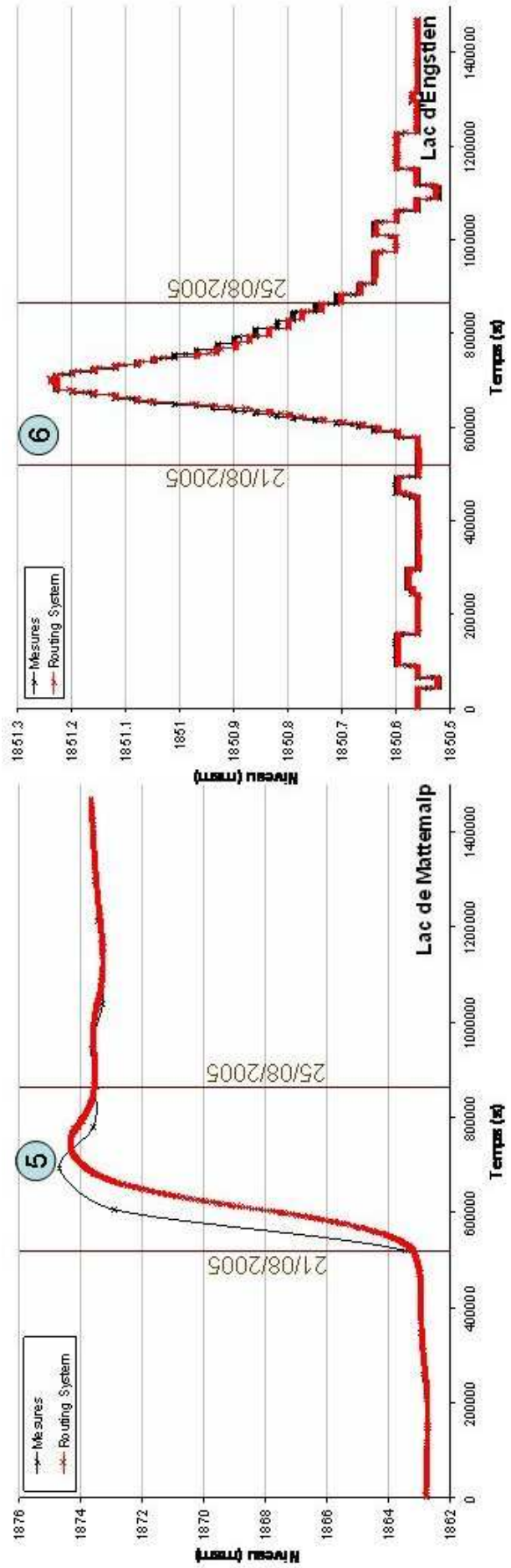

5
Lac de Montsalvens
6
Lac de Gruyère à Rossens
7
Lac de la Maigrauge
8
Lac de Schiffenen
Mesures
Routing System
Niveau (msm)
Temps (s)
21/08/2005
25/08/2005
! Problème !

Annexe 2 - L'AARE

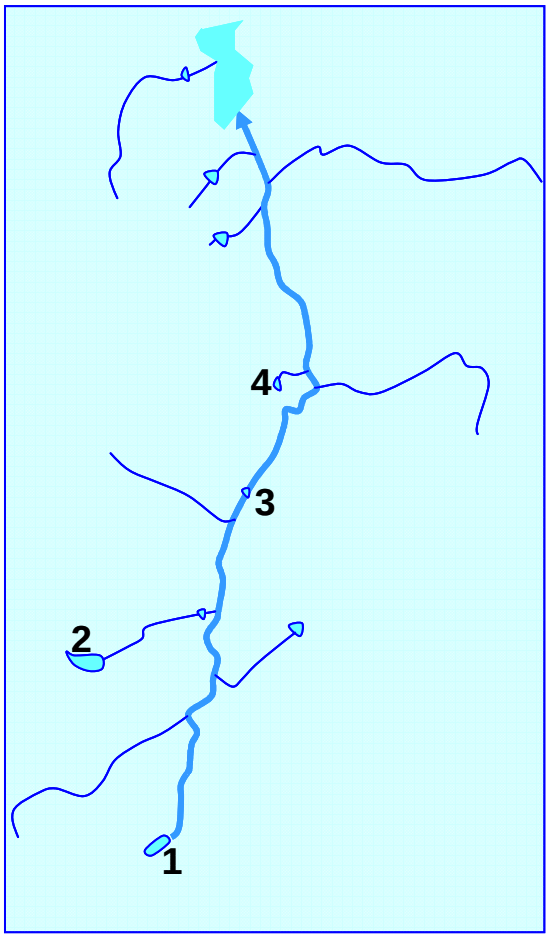


Localisation des retenues

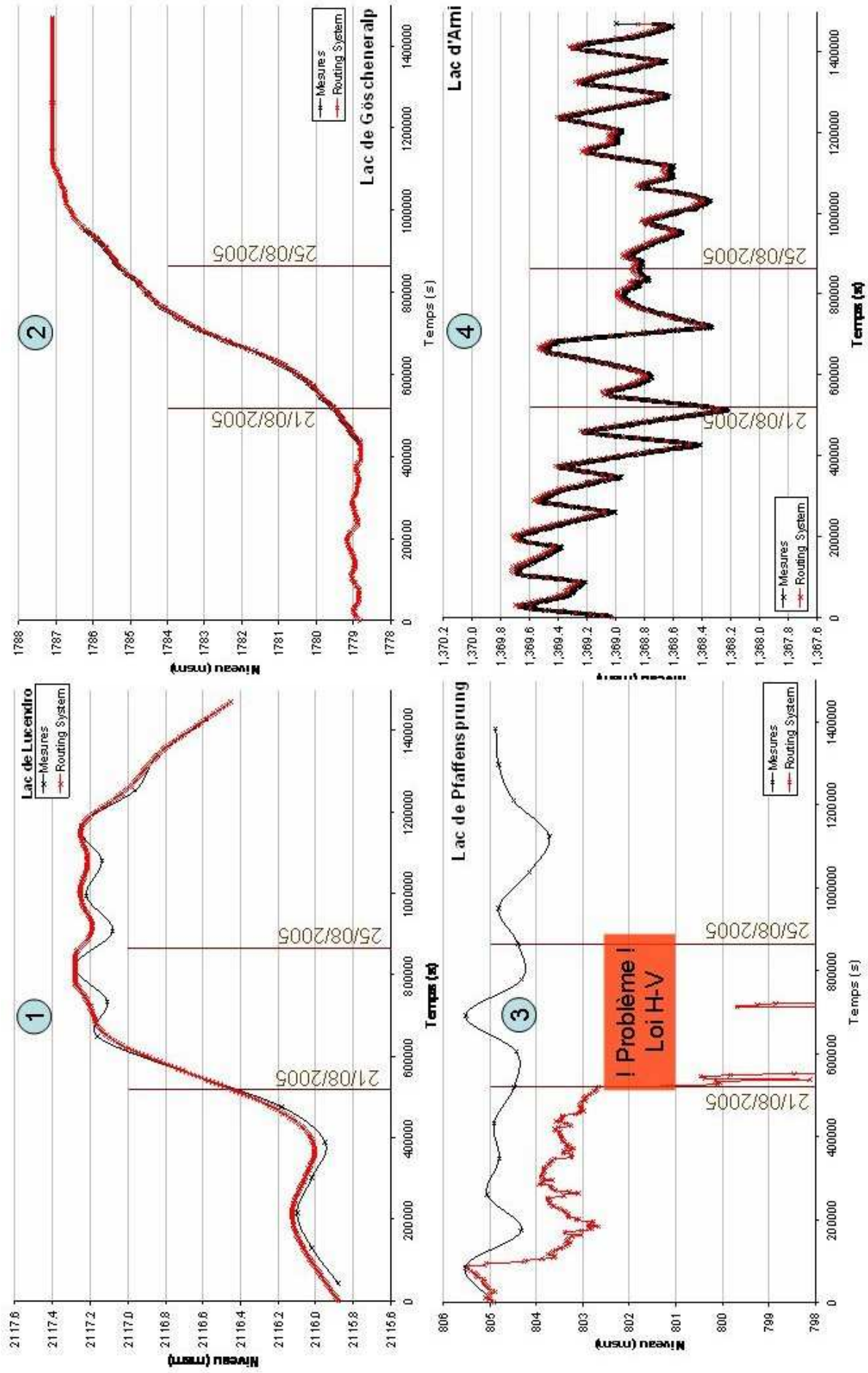

Lac d'Oberaar
Lac de Grimsel
Lac de Gelmer
Lac de Raeterichsboden
Mesures
Routing System
21/08/2005
25/08/2005
Niveau (msm)
Temps (s)
1
2
3
4


Lac de Mattemalp
Lac d'Engstlen
Mesures
Routing System
Niveau (masl)
Temps (s)
21/08/2005
25/08/2005
5
6

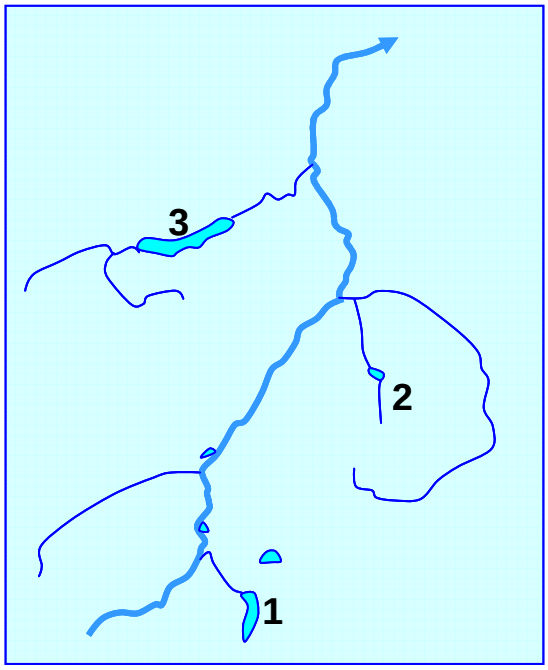
Annexe 3 - LA REUSS



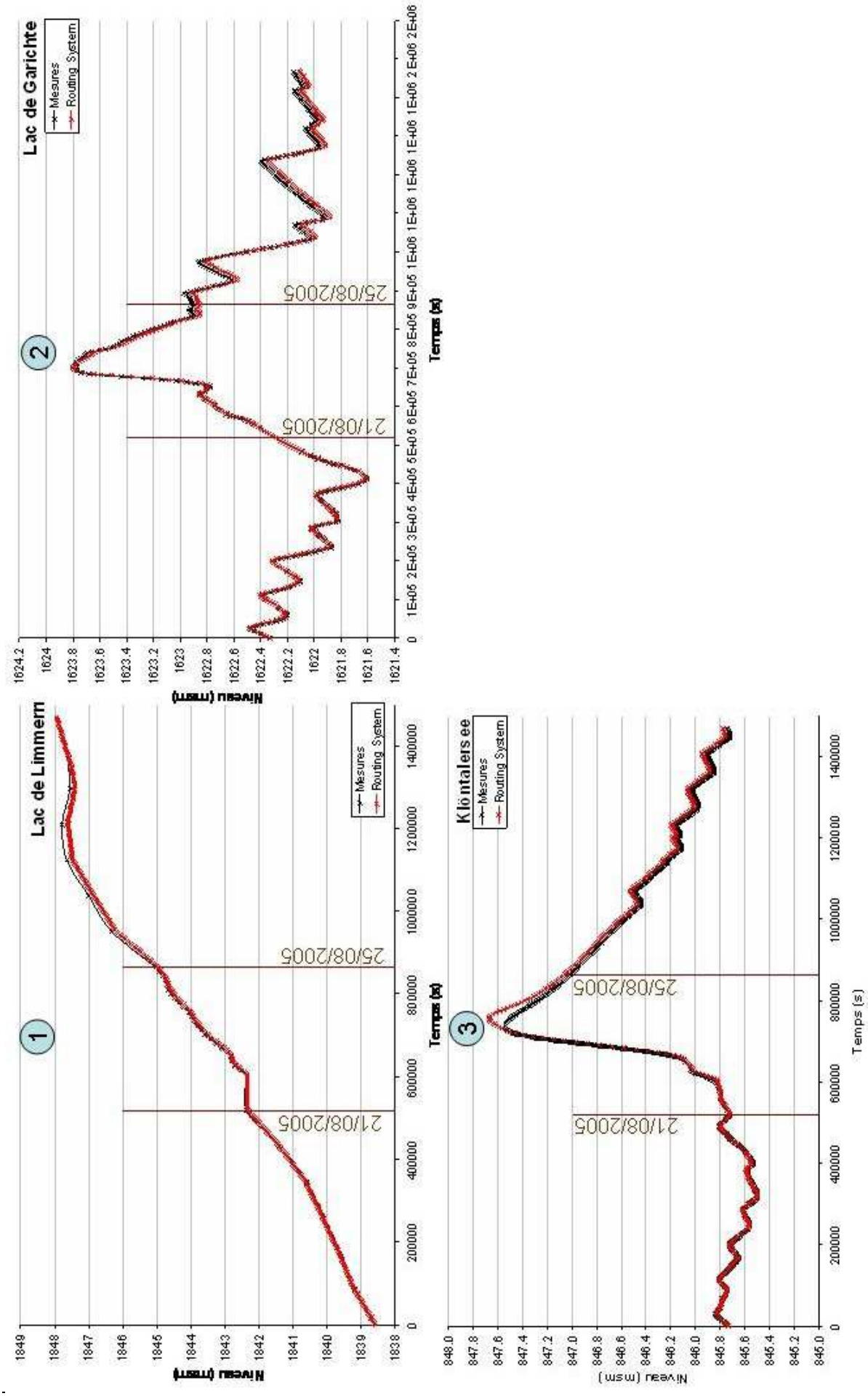
Localisation des retenues


1
Lac de Lucendro
Mesures
Routing System
Niveau (msnm)
Temps (s)
25/08/2005
21/08/2005
2
Lac de Göschenealp
Mesures
Routing System
Niveau (msnm)
Temps (s)
25/08/2005
21/08/2005
3
Lac de Pfaffensprung
Mesures
Routing System
! Problème !
Loi H-V
Niveau (msnm)
Temps (s)
25/08/2005
21/08/2005
4
Lac d'Ami
Mesures
Routing System
Temps (s)
25/08/2005
21/08/2005

Annexe 4 - LA LINTH



Localisation des retenues


Lac de Garichte
Mesures
Routing System
25/08/2005
21/08/2005
Temps (s)
Niveau (masl)
Lac de Limmern
Klöntalersee
Niveau (msm)