

GESTION DES CRUES DE LA SARINE PAR L'UTILISATION DES RETENUES D'ACCUMULATION

Analyse du potentiel de protection par
rétention dans les réservoirs lors des crues

Rapport de l'étude de faisabilité

Rapport N° 24 / 06

Lausanne, novembre 2006

ENAC - Faculté Environnement naturel architectural et construit

ICARE - Institut des infrastructures, des ressources et de l'environnement

LCH - Laboratoire de constructions hydrauliques

EPFL-ENAC-LCH, Bâtiment Génie Civil

CH - 1015 LAUSANNE

tél: 021 - 693 23 85 fax: 021 - 693 22 64



TABLE DES MATIERES

1	PRÉAMBULE	1
2	DONNEES À DISPOSITION	2
2.1	MESURES DE DEBIT	2
2.2	MESURES METEOROLOGIQUES.....	3
2.3	DONNEES LIEES AUX AMENAGEMENTS HYDROELECTRIQUES DU GROUPE E	4
3	CONCEPT DE MODELISATION.....	5
3.1	INTRODUCTION.....	5
3.2	LOGICIEL <i>ROUTING SYSTEM II</i>	5
3.3	MODELE DE PROPAGATION DE MESURES	7
3.4	MODELE POUR L'ANALYSE DE LA SITUATION METEOROLOGIQUE.....	9
4	ANALYSE DE LA SITUATION METEOROLOGIQUE LORS DES CRUES.....	11
4.1	CRUE DE MAI 1999	11
4.2	CRUE D'AOUT 2005	16
4.3	CRUE D'AVRIL 2006.....	21
4.4	CONCLUSIONS DE L'ANALYSE DES SITUATIONS METEOROLOGIQUES.....	25
5	INFLUENCE DES AMENAGEMENTS HYDROELECTRIQUES.....	26
5.1	CRUE DE MAI 1999	26
5.2	CRUE D'AOUT 2005	35
6	INTERET D'UN MODELE DE PREVISION HYDROLOGIQUE.....	42
6.1	DISCUSSION.....	42
6.2	DELAIS D'ANTICIPATION MINIMAUX	43
6.3	SITUATION EN AOUT 2005	44
7	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	46
	REFERENCES	48

1 PRÉAMBULE

Les bassins versants de la Sarine et de la Singine ont subi des fortes crues au cours des dernières années. Lors des événements de mai 1999, août 2005 et mai 2006, il semble que la rétention d'un certain volume d'eau dans le lac de Gruyère ait eu un effet protecteur non négligeable. Il s'agit toutefois de déterminer si cet effet pourrait être amélioré par une gestion basée sur les prévisions hydrologiques.

Dans le but d'apporter une réponse claire au Conseil d'Etat, le service des Ponts et Chaussées du canton de Fribourg aimerait évaluer ce potentiel de protection supplémentaire et définir si ce type de gestion pouvait s'avérer profitable. Il s'agit en particulier de répondre aux questions suivantes :

- définir les conditions météorologiques et hydrologiques qui ont prévalu lors des crues de 1999, 2005 et 2006
- analyser les informations prévisionnelles qui étaient ou auraient été disponibles pour le gestionnaire du barrage
- reconstituer les opérations qui ont été prises par le gestionnaire du barrage lors de ces crues
- analyser les décisions qui auraient pu être prises par le gestionnaire, en fonction des informations prévisionnelles et des possibilités d'exploitation des ouvrages hydrauliques.

La zone d'étude concerne la région fribourgeoise jusqu'à la confluence avec l'Aar à l'amont du canal de Hagneck. Il s'agit en particulier d'analyser le comportement des bassins versants de la Sarine et de la Singine.

Par un courriel du 11 août 2006 du Dr Olivier Overney, du Service des Ponts et Chaussées du canton de Fribourg, à l'attention du Dr. Jean-Louis Boillat, du Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'EPFL, une proposition pour l'analyse préliminaire de la gestion des crues de la Sarine et de la Singine par rétention dans les réservoirs existants était demandée. En réponse à cette demande, une offre a été envoyée le 17 août 2006, LCH 12/2006, dont le volet 1 a été accepté par le canton de Fribourg fin août 2006.

Le présent document synthétise le contenu de l'analyse préliminaire requise concernant l'influence de la gestion des aménagements hydroélectriques de la Sarine lors des crues.

2 DONNEES À DISPOSITION

Dans le but de réaliser les tâches contenues dans le cahier des charges, de nombreuses données indispensables ont dû être acquises auprès de leurs fournisseurs respectifs. Ces données concernent en particulier les mesures de débit aux stations fédérales, cantonales et privées, les observations pluviométriques et de température aux stations ANETZ et aux stations climatologiques de MétéoSuisse, ainsi que les données de production et d'exploitation des aménagements hydroélectriques du Groupe E, situés sur le bassin versant de la Sarine. Les données finalement utilisées dans ce travail sont décrites dans le présent chapitre.

Les dates pour lesquelles ces données ont été importées correspondent aux périodes de 10 jours couvrant les crues observées au cours des 10 dernières années :

- 11 au 18 mai 1999
- 20 au 27 août 2005
- 3 au 12 avril 2006
- 16 au 27 mai 2006

2.1 Mesures de débit

Les données de débit à disposition sur le bassin versant sont la propriété de trois entités différentes : l'Office Fédéral de l'Environnement (9 stations), le canton de Fribourg (2 stations) et le canton de Berne (4 stations). Les informations relatives aux 15 stations de mesure sont répertoriées dans le tableau 1. Des mesures à pas de temps horaire ont pu être exploitées pour la modélisation à toutes ces stations.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des stations de mesure de débit sur les bassins versants de la Sarine et de la Singine.

ID station	Cours d'eau	Nom station	Prop.	X [m]	Y [m]	Z [m s.m.]	S _{BV} [km ²]	Mise en service
651	Sarine	Broc	OFEV	573'520	161'345	682	637	1922
932	Sionge	Vuippens	OFEV	572'420	167'540	681	45.3	1975
470	Sarine	Fribourg	OFEV	579'420	183'670	532	1'369	1911
731	Sarine	Laupen	OFEV	584'440	195'300	480	1'861	1944
292	Aar	Hagneck	OFEV	580'680	211'650	437	5'128	1976
839	Rotenbach	Plaffeien	OFEV	587'980	170'590	1'275	2	1961
840	Schwändlibach	Plaffeien	OFEV	588'340	171'015	1'220	1	1961
978	Singine	Thörishaus	OFEV	593'350	193'050	555	352	1927
985	Aar	Berne	OFEV	600'710	198'000	502	2'969	1917
BE-A011	Louibach	Saanen	BE	589'115	146'130		62	1994
BE-A012	Sarine	Saanen	BE	585'800	148'300		231	1993
BE-A054	Dorfbach	Schwarzenburg	BE	593'255	184'860		11	1996
BE-A055	Dorfbach	Schwarzenburg	BE	592'900	185'460		14	1996
FR-105	Lac Noir	Exutoire	FR	588'400	168'800		21	1999
FR-106	Gottéron	Tavel	FR	582'700	183'700		39	2000

D'autres mesures de débit ont été obtenues auprès du Groupe E et sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Type et caractéristiques des données fournies par le Groupe E.

Nom aménagement	Variable	Type	Fréquence horaire	Autre fréquence
Rossinière	Niveau	retenue	2005-2006	1999
	Débit	turbines	2005-2006	1999
	Débit	déversé	2005-2006	1999
	Débit	entrant	calculé	calculé
Lessoc	Niveau	retenue	2005-2006	1999
	Débit	turbines	2005-2006	1999
	Débit	déversé	2005-2006	1999
	Débit	entrant	calculé	calculé
Montsalvens	Niveau	retenue	2005-2006	1999
	Débit	turbines	2005-2006	1999
	Débit	déversé	2005-2006	1999
	Débit	entrant	calculé	calculé
Rossens	Niveau	retenue	2005-2006	1999
	Débit	turbines	2005-2006	1999
	Débit	déversé	2005-2006	1999
	Débit	entrant	calculé	calculé
Maigrauge	Niveau	retenue	2005-2006	-
	Débit	turbines	2005-2006	-
	Débit	déversé	2005-2006	-
	Débit	entrant	calculé	calculé
Schiffenen	Niveau	retenue	2005-2006	1999
	Débit	turbines	2005-2006	1999
	Débit	déversé	2005-2006	1999
	Débit	entrant	calculé	calculé

2.2 Mesures météorologiques

Les mesures météorologiques ont été obtenues auprès de MétéoSuisse. Les variables utilisées dans cette étude sont les précipitations et les températures. Comme indiqué au tableau 3, la fréquence d'acquisition ainsi que les variables mesurées diffèrent selon le type de station. Les stations ANETZ mesurent plusieurs variables (précipitations, températures, vitesses de vent, etc...) à une fréquence de 10 minutes et les transmettent immédiatement à leur propriétaire. Elles sont donc utilisables en temps réel pour des applications telles que la prévision hydrologique. Les stations climatologiques mesurent certaines variables à pas de temps journalier et les transmettent à cette même fréquence. Finalement, les stations pluviométriques récupèrent les valeurs des précipitations journalières, mais ces dernières ne sont disponibles qu'à la suite de relevés manuels effectués mensuellement.

Il convient également de noter que des mesures de précipitations effectuées par le groupe E au Jaun ainsi qu'à Rougement n'ont pas été exploitées dans cette étude en raison de la variabilité de leur fréquence d'acquisition et de leur mise en service tardive, en 2006. Elles pourront toutefois être exploitées ultérieurement si nécessaire.

Tableau 3 : Liste des stations de mesure météorologiques utilisées dans le cadre de cette étude.

ID station	Nom station	Type	Param. mesuré	Fréq.	Transmission	X [m]	Y [m]	Z [m s.m.]	En service
5620	Moléson	ANETZ	P, T...	10 min	Temps-réel	567'740	155'175	1'972	1985
5890	Payerne	ANETZ	P, T...	10 min	Temps-réel	562'150	184'855	490	1980
5530	Mühleberg	ANETZ	P, T...	10 min	Temps-réel	587'850	202'450	483	1990
5520	Bern	ANETZ	P, T...	10 min	Temps-réel	598'610	197'470	565	1900
5270	Adelboden	ANETZ	P, T...	10 min	Temps-réel	609'400	148'975	1'320	1900
5588	Gstaad	Climato	P, T...	24 h	Journalier	587'070	142'970	1'085	1980
5610	Châteaux-d'Oex	Climato	P, T...	24 h	Journalier	577'200	147'310	985	1900
7958	Le Sépey	Climato	P, T...	24 h	Journalier	570'690	135'610	1'267	
8005	Rochers de Naye	Climato	P, T...	24 h	Journalier	564'600	142'400	1'982	1950
5670	Broc	Climato	P, T...	24 h	Journalier	574'670	162'100	680	1960
5770	Plaffeien	Climato	P, T...	24 h	Journalier	588'920	175'730	850	1970
5740	Fribourg	Climato	P, T...	24 h	Journalier	575'280	179'880	634	1900
5450	Thun	Climato	P, T...	24 h	Journalier	613'480	178'830	558	
6370	Bienne	Climato	P, T...	24 h	Journalier	586'260	218'840	433	1950
8020	Montreux	Climato	P, T...	24 h	Journalier	558'560	143'600	405	1920
7940	Diablerets	Pluvio	P	24 h	Mensuel	577'990	133'590	1'162	1930
5570	Gsteig	Pluvio	P	24 h	Mensuel	587'680	136'130	1'195	1900
5560	Lauenen	Pluvio	P	24 h	Mensuel	590'910	141'700	1'250	1900
7950	Col des Mosses	Pluvio	P	24 h	Mensuel	574'150	138'420	1'445	1970
8010	Les Avants	Pluvio	P	24 h	Mensuel	561'950	144'880	982	1970
8025	Fruence	Pluvio	P	24 h	Mensuel	559'408	152'450	830	1980
5830	Semsaies	Pluvio	P	24 h	Mensuel	561'110	158'430	873	1970
5680	Marsens	Pluvio	P	24 h	Mensuel	571'370	167'230	721	1970
5650	La Valsainte	Pluvio	P	24 h	Mensuel	580'860	166'500	1'015	1900
5630	Jaun	Pluvio	P	24 h	Mensuel	587'520	162'280	1'030	1900
5350	Zweisimmen	Pluvio	P	24 h	Mensuel	594'800	155'730	960	1900
5370	Boltigen	Pluvio	P	24 h	Mensuel	596'150	164'200	855	1900
5760	Gauglera	Pluvio	P	24 h	Mensuel	585'380	177'730	910	1920
5780	Schwarzenburg	Pluvio	P	24 h	Mensuel	592'980	185'060	806	1900
5790	Laupen	Pluvio	P	24 h	Mensuel	584'910	196'300	481	1930
5900	Payerne	Pluvio	P	24 h	Mensuel	561'770	185'570	450	1900
5920	Avenches	Pluvio	P	24 h	Mensuel	569'880	192'150	459	1940
5940	Morat	Pluvio	P	24 h	Mensuel	576'990	199'025	433	1960
5500	Riggisberg	Pluvio	P	24 h	Mensuel	603'425	184'500	775	1970
5784	Gurnigelberg	Pluvio	P	24 h	Mensuel	600'700	178'600	1'200	1970
5510	Belp	Pluvio	P	24 h	Mensuel	604'920	193'330	520	1900
5960	Kerzers	Pluvio	P	24 h	Mensuel	579'710	204'120	434	
5800	Wahlendorf	Pluvio	P	24 h	Mensuel	592'200	206'040	755	1930
5810	Aarberg	Pluvio	P	24 h	Mensuel	587'900	209'930	450	1900

2.3 Données liées aux aménagements hydroélectriques du Groupe E

Outre les mesures de niveau et de débit fournies par le Groupe E, des données structurelles importantes ont été obtenues auprès du producteur d'électricité. Il s'agit des règlements confidentiels appelés "Guide technique hydraulique - Service de Quart", contenant d'une part les principales caractéristiques techniques des aménagements ainsi que les consignes opérationnelles en situation d'étiage et de crue. Ces documents ont été utilisés pour permettre la modélisation de la régulation des aménagements lors de l'analyse des crues.

De plus, les relations niveau-volume des retenues d'accumulation ainsi que les relations niveau-débit sortant des ouvrages d'évacuation documentés ont été considérées dans la modélisation.

3 CONCEPT DE MODELISATION

3.1 Introduction

Dans le cadre du projet MINERVE (*Jordan, 2005*), un modèle de prévision et de gestion des crues du bassin versant du Rhône à l'amont du Léman a été développé au Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL. Ce modèle s'appuie sur un logiciel également développé dans le cadre du projet MINERVE par M. Jérôme Dubois du bureau HydroCosmos SA, et appelé *Routing System II* (*Dubois, 2005*).

Cet outil permet la modélisation fonctionnelle de bassins versants complexes en y intégrant d'une part les différents processus hydrologiques et d'autre part les ouvrages hydrauliques qui s'y trouvent. *Routing System II* est également capable d'intégrer aisément des mesures de précipitations, températures, évapo-transpirations (ETP) ou même de débits dans un modèle de bassin versant.

Pour réaliser les développements liés à l'optimisation des opérations préventives sur les aménagements hydroélectriques du Valais, une approche originale pour l'analyse de l'influence des retenues d'accumulation a été employée. Il s'agit d'une modélisation par propagation de mesures, intégrant tous les ouvrages hydroélectriques et tenant compte de leurs opérations de production (*Boillat, 2005, Jordan et al., 2006*).

3.2 Logiciel *Routing System II*

Le logiciel *Routing System II* est un outil de modélisation hydrologique et hydraulique, développé selon une approche orientée objets, et programmé en langage *Microsoft VB.NET*. Son interface graphique se compose d'une palette d'objets correspondant aux différentes fonctions hydrologiques et hydrauliques existantes, d'une barre de menus permettant d'effectuer les opérations de base (enregistrer, éditer, etc.) et d'une interface sur laquelle le modèle peut être construit. La figure 1 illustre l'interface graphique du logiciel ainsi que la vue à haut niveau du modèle de simulation de la Sarine. Cette dernière est découpée en trois régions (Sarine amont Broc, Sarine aval Broc et Singine), permettant une agrégation des différents composants du modèle numérique en sous-modèles. On distingue également sur cette figure les objets jonction (*Sar5, Sar12*, etc.), les objets cours d'eau (*Sar12 Sar13, Aar-Bern*) et les objets source (*Laupen_Inter, Aare-Bern*). L'objet placé le plus en aval est la jonction nommée *HAGNECK*, représentant la superposition des débits de la Sarine, de la Singine et de l'Aar à l'entrée du canal de Hagneck.

Sur la Figure 1 se trouvent également tous les objets hydrauliques existants dans le logiciel *Routing System II*, visibles dans la palette d'objets sur la gauche de la figure. Apparaissant notamment dans la palette "Normal", les objets *station, réservoir, déversoir, dérivation, turbine, jonction, cours d'eau, sous-modèle* et *source*. Dans les palettes "Regulation" et "Base" se trouvent encore d'autres objets conçus pour les opérations de régulation des ouvrages hydrauliques et pour la modélisation hydrologique.

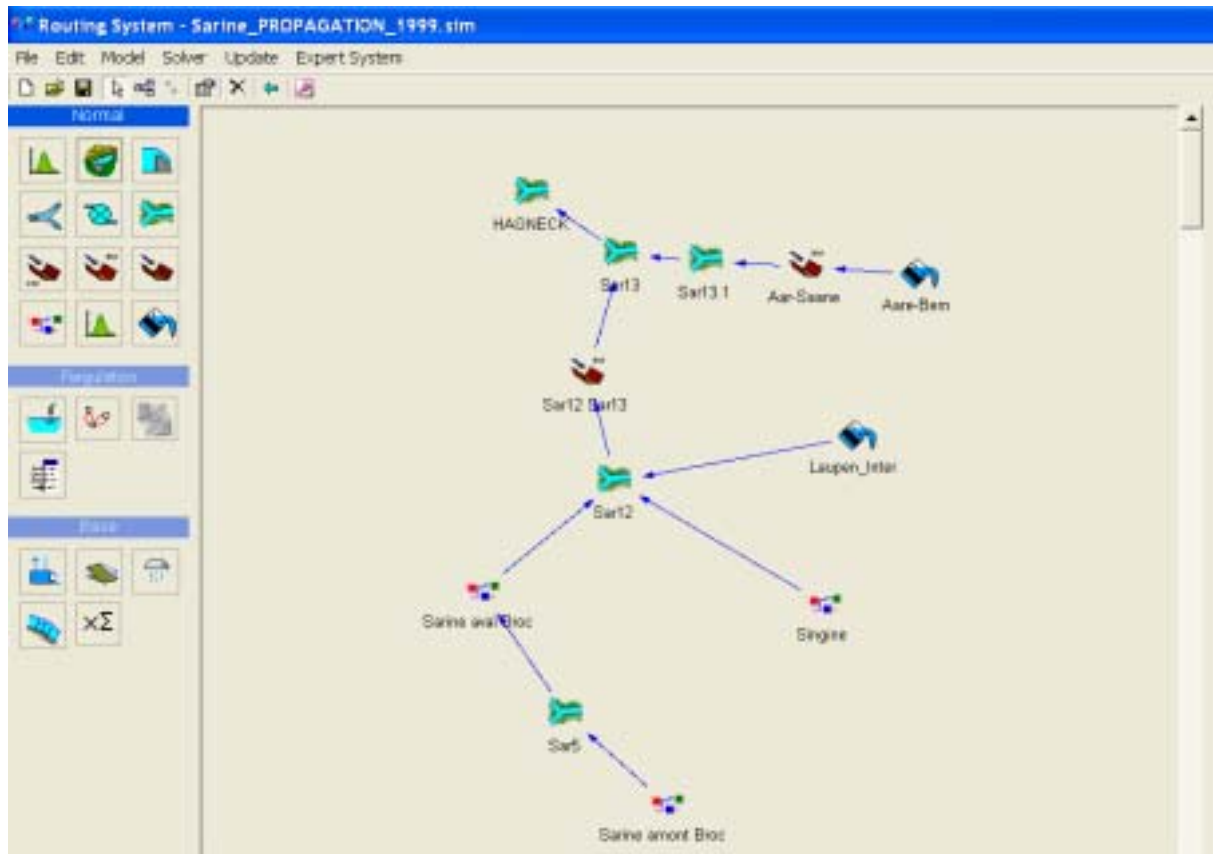


Figure 1 : Interface graphique de Routing System II et vue à haut niveau du modèle de simulation de la Sarine.

Lorsqu'un zoom est effectué dans la région *Sarine amont Broc*, les objets contenus dans le sous-modèle sont alors visibles. La figure 2 présente justement l'aménagement de Rossinière, tel que modélisé dans le sous-modèle *Sarine amont Broc*. L'amont de l'aménagement se trouve à droite de l'image, et la jonction *Sar4.1* représente la somme des débits entrants dans la retenue de Rossinière. La retenue est elle-même reconnaissable et est connectée à d'autres objets régulés qui représentent (du haut de l'image vers le bas) la turbine de dotation, la turbine de production, la vanne de surface, la vanne de fond et le déversoir.

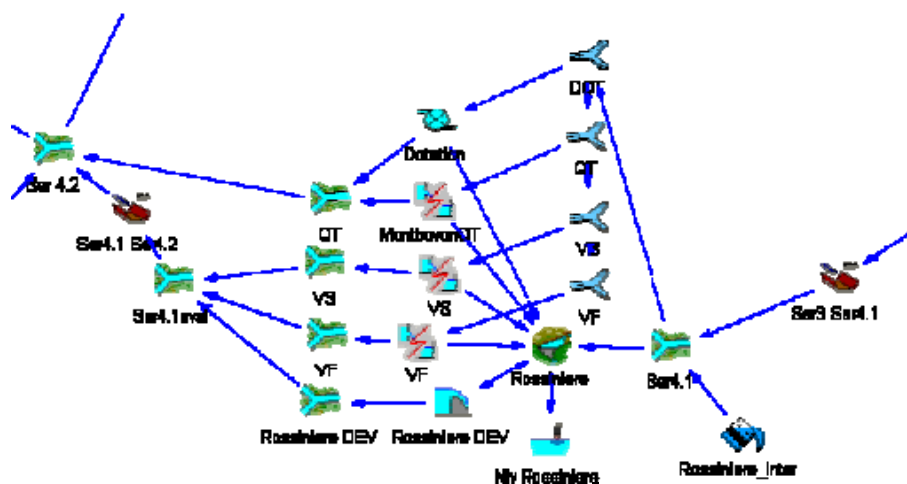


Figure 2 : Aménagement de Rossinière modélisé dans le logiciel Routing System II.

3.3 Modèle de propagation de mesures

Un modèle de propagation de mesures a été développé afin de déterminer le plus exactement possible l'influence réelle des aménagements hydroélectriques lors des crues observées. Ce modèle permet, par comparaison des résultats de simulations avec et sans influence des aménagements, de mesurer l'effet de rétention produit par les retenues d'accumulation en différents points du réseau hydrographique.

Pour réaliser ce modèle, les crues observées de 1999, 2005 et 2006 ont été reproduites grâce aux mesures de débit disponibles le long de la Sarine et de ses affluents. Au cours d'une phase itérative, des reconstitutions de mesures ont été élaborées, de l'amont vers l'aval, par calage entre les débits simulés et les débits mesurés aux points de contrôle (figure 3). Les opérations de contrôle des retenues sont également introduites dans le modèle conformément aux mesures et consignes fournies par le Groupe E. Une fois ce travail terminé, il est alors possible de supprimer les aménagements hydroélectriques modélisés pour obtenir les débits de crue sans aménagements. Il est également possible de modifier les opérations de turbinage et de vidange effectuées par les aménagements pour optimiser leur fonctionnement lors des crues.

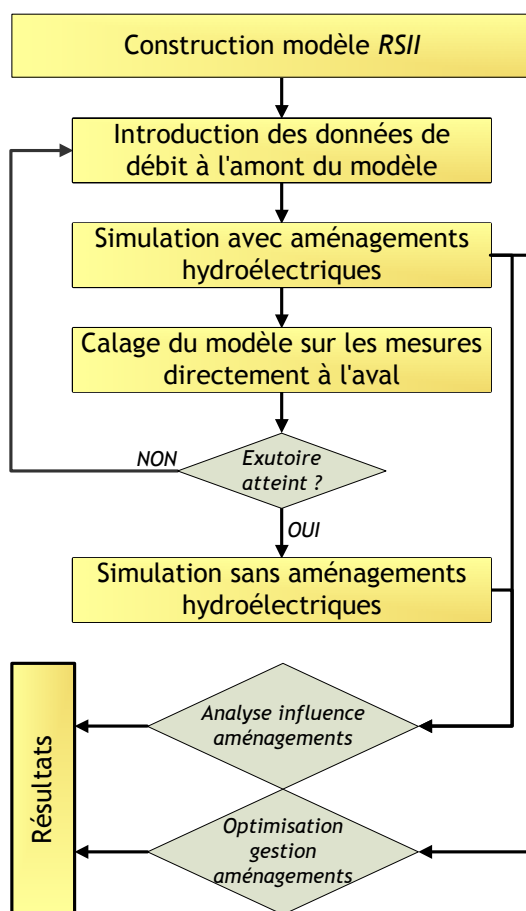


Figure 3 : Schéma de construction et d'utilisation du modèle de propagation de mesures.

La figure 4 présente la topologie du modèle de propagation de mesures *Routing System II*. Elle illustre en particulier les lieux où les mesures ont été introduites dans le modèle, ainsi que les mesures qui ont été reconstituées par calage ou calculées à partir des données des aménagements hydroélectriques du Groupe E.

L'aménagement de l'Hongrin n'a pas été considéré dans la modélisation : le captage qui achemine l'eau de la Sarine vers sa retenue a une faible capacité. Quand bien même cet aménagement a eu un effet protecteur lors des crues, sa prise en compte dans la modélisation ne modifierait les résultats obtenus que de manière marginale.

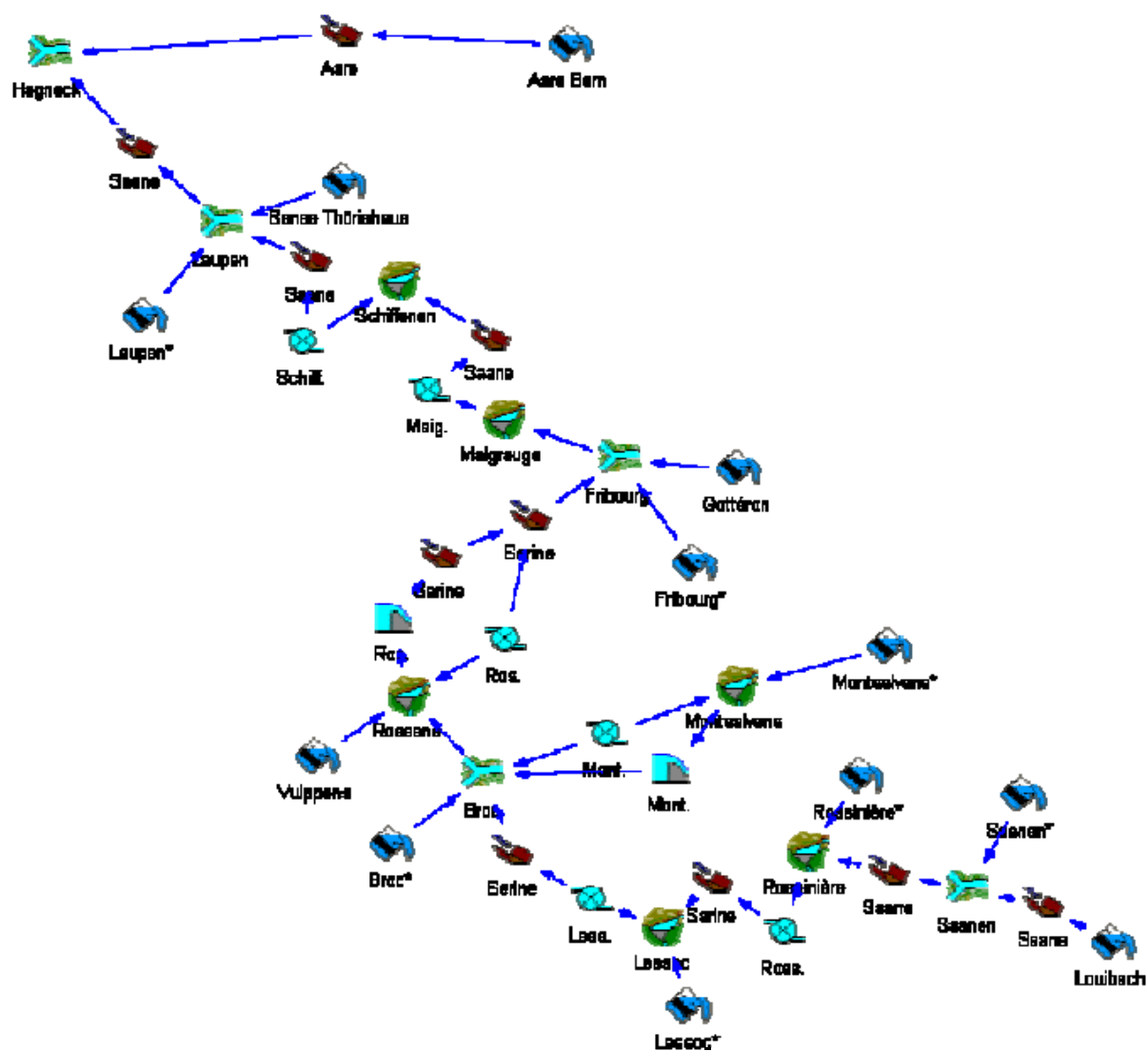


Figure 4 : Topologie du modèle de propagation de mesures de la Sarine, de la Singine et de l'Aar. Les objets "Source" se trouvent aux emplacements où sont introduites les mesures avec leur nom. Les noms contenant le signe * indiquent que les mesures ont été reconstituées ou calculées.

3.4 Modèle pour l'analyse de la situation météorologique

Le modèle utilisé pour l'analyse de la situation météorologique lors des crues de 1999, 2005 et 2006 a été construit à partir de cartes topographiques, du réseau hydrographique et de l'emplacement des stations de mesure des précipitations et températures considérées dans cette étude.

Premièrement, un découpage des sous-bassins versants été réalisé et utilisé pour déterminer les coordonnées de leurs centres de gravité. Cette opération a été effectuée par l'utilisation du modèle numérique de terrain MNA25 de SwissTopo. Deuxièmement, les données des stations de mesure (précipitations et températures) ont été utilisées en relation avec les centres de gravité des bassins versants pour déterminer la répartition spatiale de ces variables météorologiques par interpolation. Le bassin versant, les principaux cours d'eau, les lacs et retenues ainsi que les conduites d'amenée et les stations de mesure météorologiques sont présentés à la figure 5.



Figure 5 : Carte des bassins versants de la Sarine et de la Singine, avec les sous-bassins versants, les cours d'eau, les lacs et retenues ainsi que les conduites d'amenée et les stations météorologiques.

La méthode de spatialisation des prévisions de précipitations choisie est la méthode de Shepard (*Shepard, 1968*). L'évaluation de la précipitation au centre d'un sous-bassin versant i de coordonnées x_i , y_i et z_i dépend du nombre n de stations considérées et de la distance $d_{i,s}$ (équ. 1) entre la station s et le point i . Le poids attribué à chaque station se calcule selon l'équation 2. Aucun gradient altimétrique des précipitations n'a été considéré.

$$d_{i,s} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (1)$$

$$P_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left(P_i \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (2)$$

x_i et y_i sont les coordonnées du centre de gravité du sous-bassin versant i [m], x_s et y_s sont les coordonnées de la station s [m], P_s est la précipitation mesurée à la station s [mm/h], P_i est la précipitation calculée au point i [mm/h] et $d_{i,s}$ la distance entre le point i et la station s [m].

Pour l'interpolation des températures, le gradient altimétrique doit être considéré. La température T_s mesurée à la station s est d'abord ramenée à sa valeur $T_{s,i}$ à l'altitude du centre de gravité du bassin versant i (équ. 3).

$$T_{s,i} = T_s - \frac{dT}{dz} \cdot (z_i - z_s) \quad (3)$$

où $T_{s,i}$ est la température équivalente de la station s au point i [°C], T_s est la température mesurée à la station s [°C], et dT/dz est le gradient altimétrique des précipitations fixé à la valeur de -0.0065 [°C/m], valeur moyenne couramment admise.

Finalement, la température au point i est obtenue par interpolation grâce à l'équation 4.

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left(T_{s,i} \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (4)$$

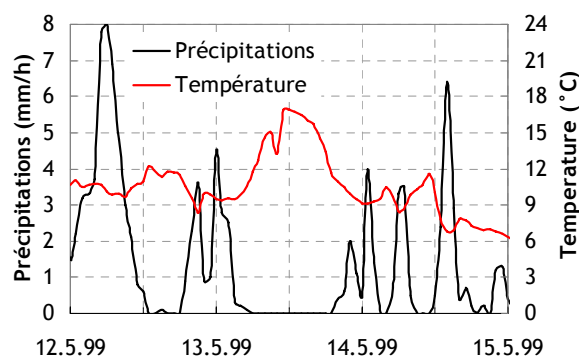
4 ANALYSE DE LA SITUATION METEOROLOGIQUE LORS DES CRUES

L'analyse de la situation météorologique a été effectuée pour les 4 événements de crue cités dans le préambule. De plus, la description des événements d'août 2005 et d'avril 2006 est complétée par les informations provenant des rapports des avis WARN rédigés par MétéoSuisse (*MétéoSuisse 2005, 2006*).

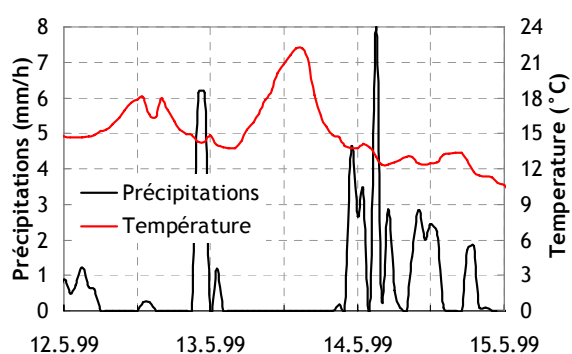
4.1 Crue de mai 1999

4.1.1 Précipitations et températures observées

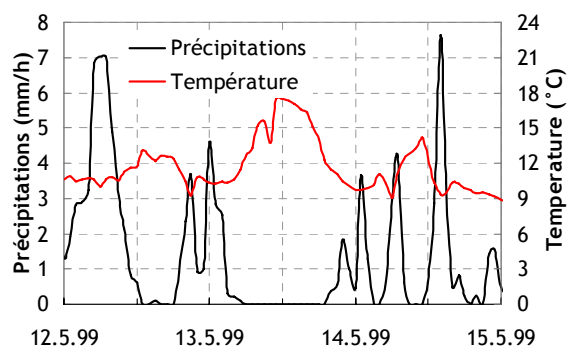
Les observations des précipitations et températures sont présentées à la figure 6 pour les stations d'Adelboden, de Gstaad, de Fribourg et de Berne. Les précipitations se sont déroulées selon deux cycles le 12 mai et le 14 mai. Les intensités moyennes horaires ont atteint 8 mm/h à Adelboden. Dans cette région où naît la Sarine, les précipitations intenses ont duré plus de 12 heures. En plaine, les précipitations ont été moins soutenues, mais régulières. Les volumes cumulés sur 72 h du 12.5.99 à 0 h au 15.5.99 à 0 h ont atteint 101 mm à Adelboden et Gstaad, 74 mm à Berne et 56 mm à Fribourg.



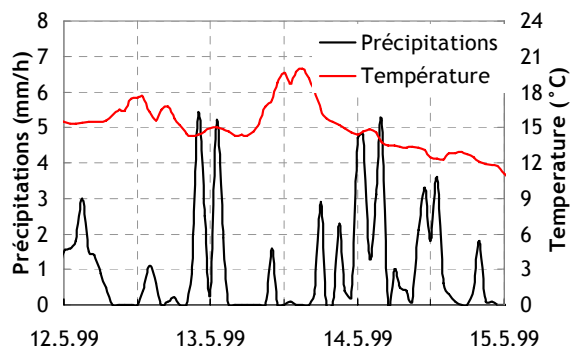
Observations à Adelboden (1320 m s.m.)



Observations à Fribourg (634 m s.m.)



Observations à Gstaad (1085 m s.m.)



Observations à Berne (565 m s.m.)

Figure 6 : Observations des précipitations et températures lors de la crue de mai 1999 dans le bassin versant de la Sarine et à Berne.

Les températures observées montrent un réchauffement momentané de 2 °C environ durant la journée du 13 mai. Le 12 mai et le 14 mai ont été plutôt froids en raison des fortes précipitations qui s'y sont déroulées. L'isotherme 0 °C est passé de 1800 m s.m. à 2200 m s.m. durant cette période. Cela signifie que, en plus du fond neigeux encore existant à cette époque sur les versants Nord et Ouest des massifs montagneux, de la neige est tombée le 12 mai et a partiellement fondu le 13 mai, provoquant une saturation des sols. De plus, l'année 1999 a été remarquable pour les grandes quantités de neige tombées durant l'hiver en Suisse. Le fond neigeux était donc déjà plus important cette année-là que d'habitude.

La répartition spatiale des précipitations donne également des indications intéressantes sur la formation des débits lors des crues. Sur la figure 7 sont présentés les cumuls spatialisés des précipitations selon un découpage en sous-bassins versants adapté au réseau naturel de drainage. Les plus fortes précipitations sont tombées le long des Préalpes et des Alpes, à l'Est et au Sud du bassin versant. La région du Jaun a reçu en 120 h un total excédant 120 mm, de même que les sources de la Sarine (Diablerets, Wildhorn). Les régions de plaine ont été moins arrosées, avec des cumuls sur 120 h d'environ 70 mm dans la région du barrage de Rossens.

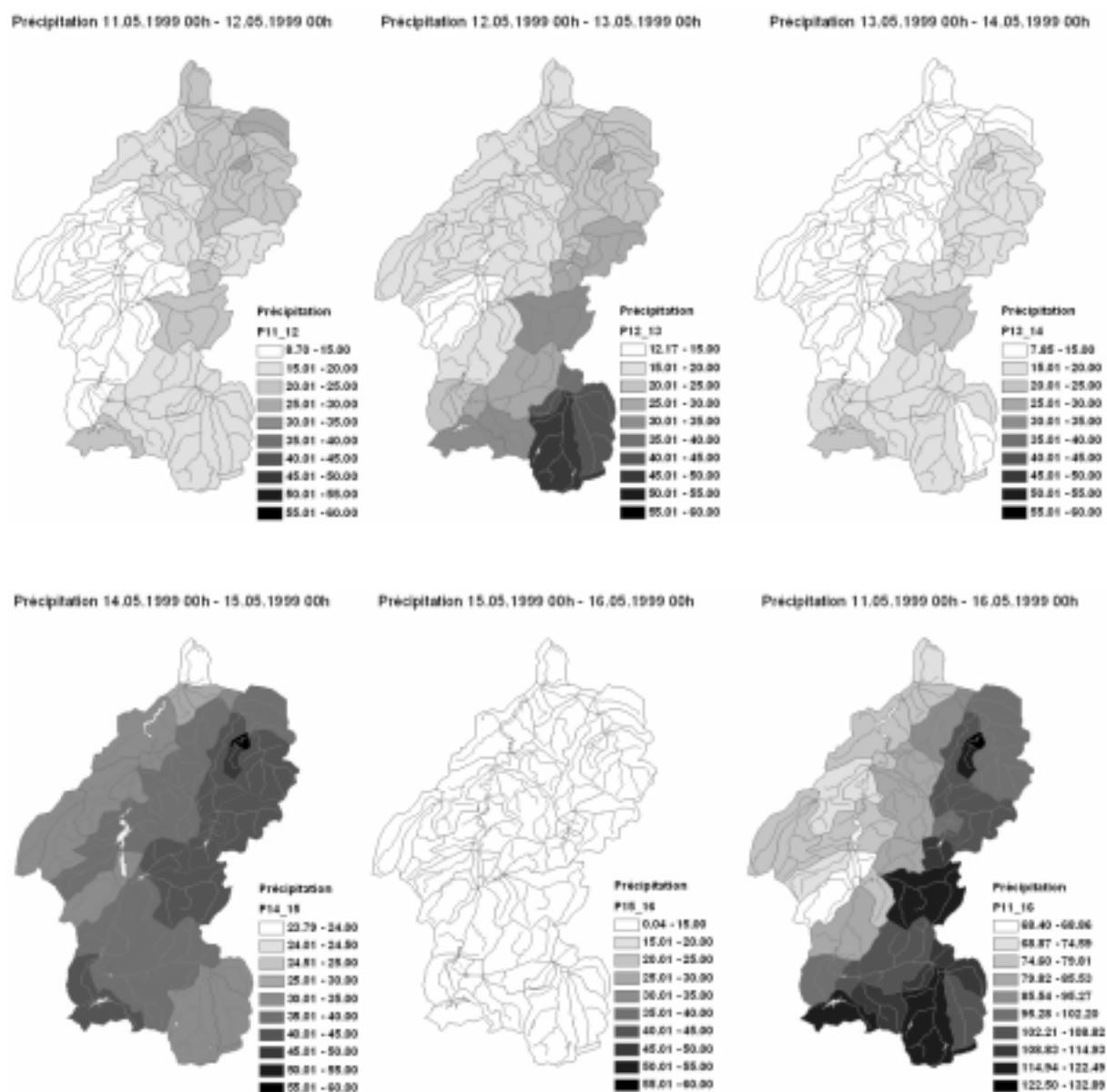


Figure 7 : Répartition spatiale des précipitations, cumuls sur 24 h et cumul sur 120 h.

Les cartes des températures moyennes (figure 8) illustrent le réchauffement observé le 13 mai et mettent en évidence les régions plus élevées du bassin versant où les températures sont plus fraîches. L'analyse de ces cartes ne permet cependant pas de déterminer une structure particulière dans la répartition spatiale de cette variable météorologique.

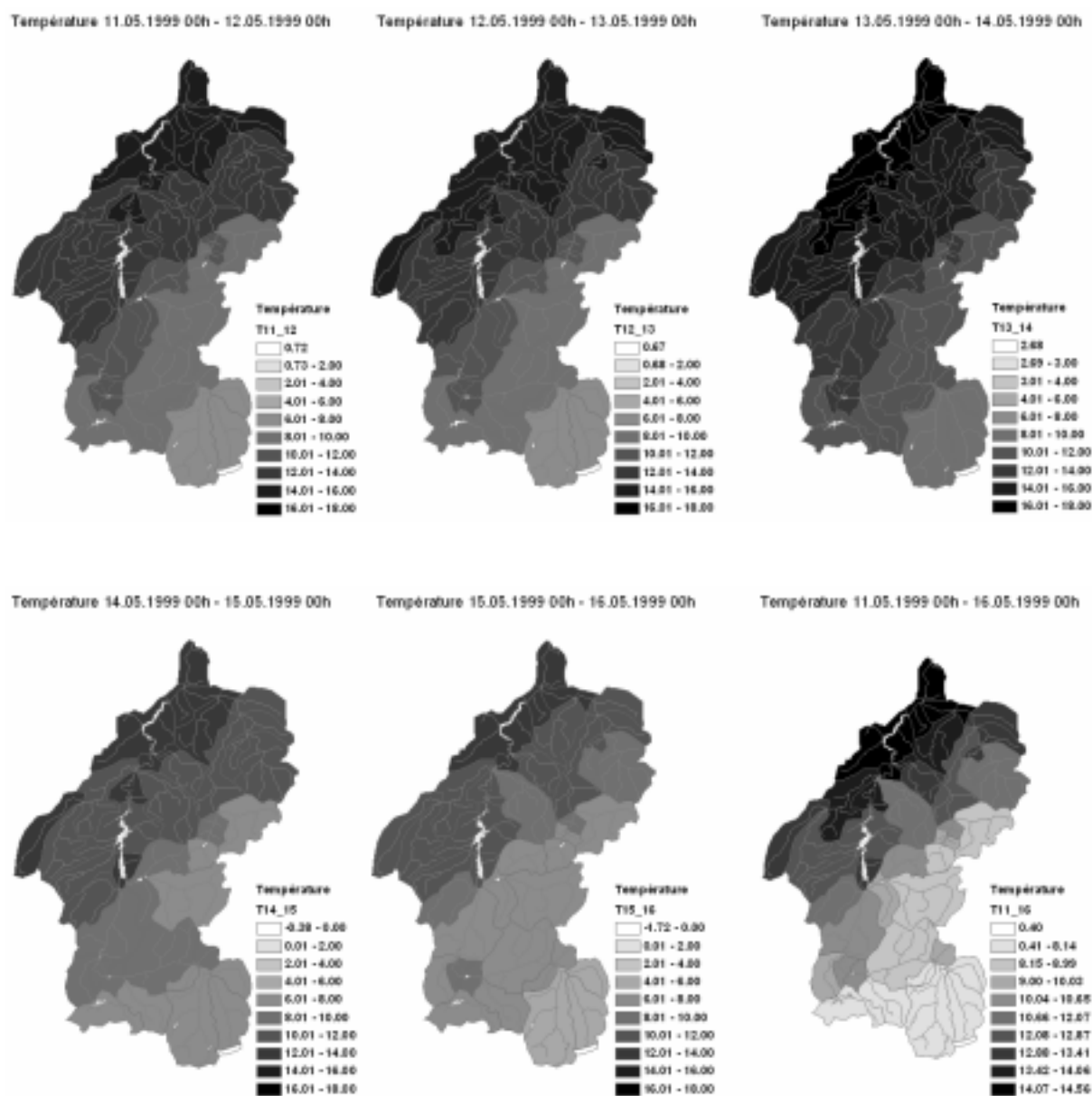


Figure 8 : Répartition spatiale des températures, moyennes sur 24 h et sur 120 h.

4.1.2 Débits observés

Les débits observés lors de la crue de mai 1999 ont atteint leur valeur maximale entre le 14 mai à 18 h et le 15 mai à 6 h (figure 9). La Sarine a atteint 352 m³/s à Fribourg (moyenne horaire), ce qui correspond à un temps de retour de 3 ans, et 435 m³/s à Laupen (temps de retour : 3 ans). Le 14 mai à 20 h, l'Aar avait un débit de 1003 m³/s, et le 15 mai à 3 h, il était encore de 993 m³/s. Ces valeurs correspondent à des temps de retour d'environ 50 ans¹. Le bassin versant de la Singine a également contribué à la crue en acheminant un débit maximum de 150 m³/s le 14 mai à 17 h (temps de retour : 3 ans).

Les précipitations du 12 mai, surtout concentrées dans la région des sources de la Sarine (Alpes vaudoises et bernoises) ont provoqué une première pointe de crue, observée à Lessoc (figure 9). Cette pointe, produite par les 70 mm tombés les 11 et 12 mai, était d'ailleurs aussi importante que celle du 14 mai. Elle n'a toutefois pas conduit à des débits trop importants à Fribourg, car le barrage de Rossens a pu stocker ce volume. Les autres affluents (Singine, Gottéron), n'ont pas apporté de trop importants débits dans la Sarine à la suite des précipitations du 12 mai. C'est donc surtout sur l'Aar que le débit a atteint une amplitude rare, renforcée par les eaux de la Sarine en crue moyenne (période de retour d'environ 3 ans).

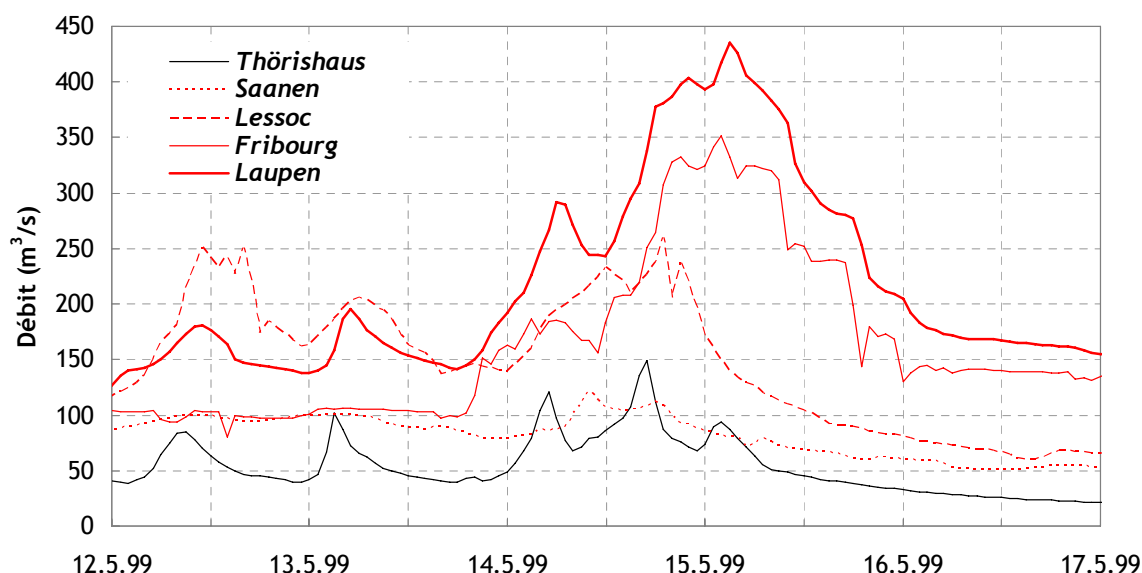


Figure 9 : Débits observés lors de la crue de mai 1999 dans le bassin versant de la Sarine.

Les précipitations plus généralisées du 14 mai, associées à la fonte de la neige tombée les jours précédents, ont par contre provoqué une onde de crue sur la Sarine. Tant la Sarine elle-même que la Singine ont vu leurs eaux gonfler pour atteindre près de 435 m³/s à Laupen. De plus, le bassin versant de l'Aar a également subi ces précipitations et a vu son débit atteindre 600 m³/s à Berne.

¹ Les temps de retour proposés dans cette étude proviennent des statistiques officielles de l'Office Fédéral de l'Environnement et peuvent être consultés à l'adresse : <http://www.bwg.admin.ch/service/hydrolog/f/index.htm>

4.1.3 Analyse volumétrique

Une analyse volumétrique simple a été effectuée pour le bassin versant de la Sarine à Broc. Les volumes précipités bruts (calculés d'après la méthode de spatialisation présentée dans ce rapport) sont comparés avec les volumes ruisselés mesurés aux stations de Broc et Saanen. La surface du bassin versant considéré est de 637 km². Le tableau 4 illustre la différence entre la situation du 12 mai et celle des 14-15 mai. En effet, le coefficient de ruissellement moyen est passé de 0.80 à 1.26, et indique la grande saturation du sol suite au premier épisode de précipitations. Cette explication ne suffit toutefois pas à expliquer un coefficient de ruissellement supérieur à 1, dû essentiellement à la fonte de neige durant les 14 et 15 mai. Les résultats à Saanen sont encore plus impressionnants, puisque les volumes ruisselés étaient de 35 mm le 12 mai et 62 mm les 14 et 15 mai, pour des précipitations de 40 mm environ lors de ces épisodes. Le coefficient de ruissellement est alors passé de 0.81 à 1.67 pendant la crue et illustre à nouveau la forte contribution apportée par la fonte de neige (au moins 25 mm) les 14 et 15 mai.

Tableau 4 : Volumes précipités et ruisselés lors de la crue de mai 1999 à Broc et à Saanen.

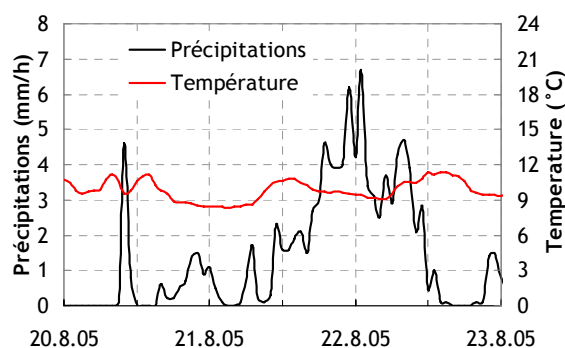
		12 mai 1999	14-15 mai 1999
Broc	Volume précipité (mm)	31.48	37.38
	Volume ruisselé (mm)	25.08	47.03
	Coefficient de ruissellement	0.80	1.26
Saanen	Volume précipité (mm)	43.85	37.61
	Volume ruisselé (mm)	35.64	62.84
	Coefficient de ruissellement	0.81	1.67

4.2 Crue d'août 2005

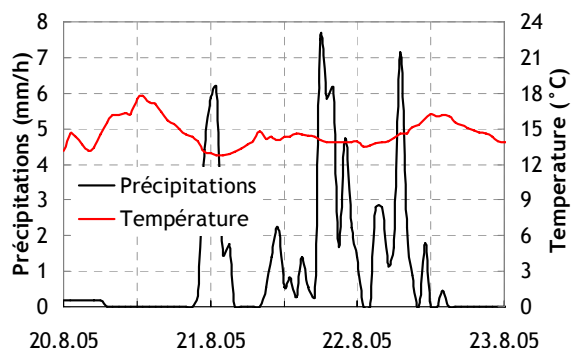
Le vendredi 19 août 2005 dans l'après-midi, un front froid peu actif traverse la Suisse et quelques orages éclatent. Le 20 août, une goutte froide se forme sur le centre de la France, et de l'air froid d'altitude se dirige sur la Méditerranée, particulièrement chaude à cette époque, et se charge en humidité. Des précipitations orageuses comprises entre 5-10 mm sur le plateau et 50 mm dans les Alpes se produisent, tandis que la limite des chutes de neige se situe à 2400 m s.m. Le 21 août, la goutte froide se déplace vers le Sud sur la Corse. La limite des chutes de neige remonte à 3000 m s.m., et les précipitations deviennent persistantes. Dans la nuit du 21 au 22 août, la dépression d'altitude se déplace vers le Nord-Est, ce qui oriente le courant au Nord et provoque une situation de barrage du Nord. Les précipitations sont alors intenses le long du versant Nord des Alpes, et se déplacent lentement vers l'Est. Alors que les précipitations cessent le 22 août sur l'Ouest du plateau suisse, elles continuent encore jusqu'au 23 août en soirée en Suisse orientale (*MétéoSuisse, 2005*).

Les dégâts constatés à la suite de cet événement ont été importants, notamment en Suisse centrale où des inondations ont été subies à Engelberg et où l'autoroute et la ligne CFF du Gothard ont été fermées durant plusieurs jours. Dans le canton de Fribourg, des débordements de rivières se sont produits sur la Glâne, en Gruyère, dans la région du Lac Noir et la Sarine à débordé en ville de Fribourg, provoquant une coupure importante de l'eau potable en ville (*MétéoSuisse, 2005*).

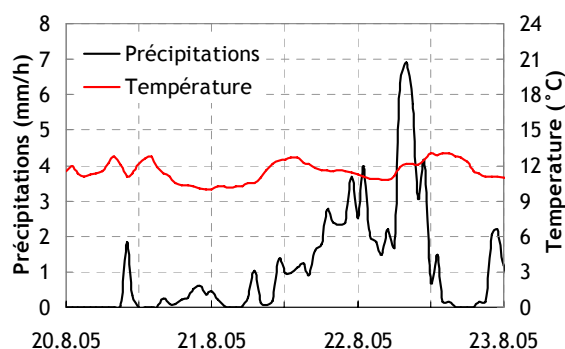
4.2.1 Précipitations et températures observées



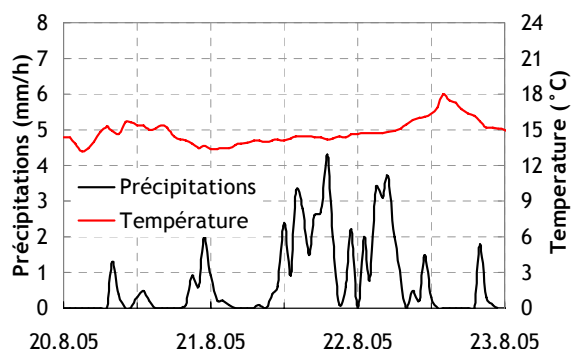
Observations à Adelboden (1320 m s.m.)



Observations à Fribourg (634 m s.m.)



Observations à Gstaad (1085 m s.m.)



Observations à Berne (565 m s.m.)

Figure 10 : Observations des précipitations et températures lors de la crue d'août 2005 dans le bassin versant de la Sarine et à Berne.

La figure 10 présente les précipitations et températures observées du 20 au 23 août 2005 à Adelboden, Gstaad, Fribourg et Berne. La structure temporelle des précipitations est ici bien différente de l'événement de mai 1999, puisque les précipitations sont surtout concentrées sur 24 heures du 21 août à 12 h au 22 août à 12 h, en particulier dans les Alpes (Adelboden, Gstaad, temps de retour de 2-3 ans sur 48 h, 8 ans sur 24 h). Les volumes cumulés lors de cet événement sont présentés à la figure 11, où le total atteint 170 mm dans la région du Jaun, 95 mm vers les Diablerets et 140 mm dans la région de Broc. Les plus grandes valeurs ont été enregistrées à Meiringen (205 mm en 48 h, période de retour de 500 ans), Engelberg (190 mm en 48 h, période de retour de 500 ans) et au Moléson (125 mm en 48 h, 0 fois en 22 ans) (*MétéoSuisse, 2005*).

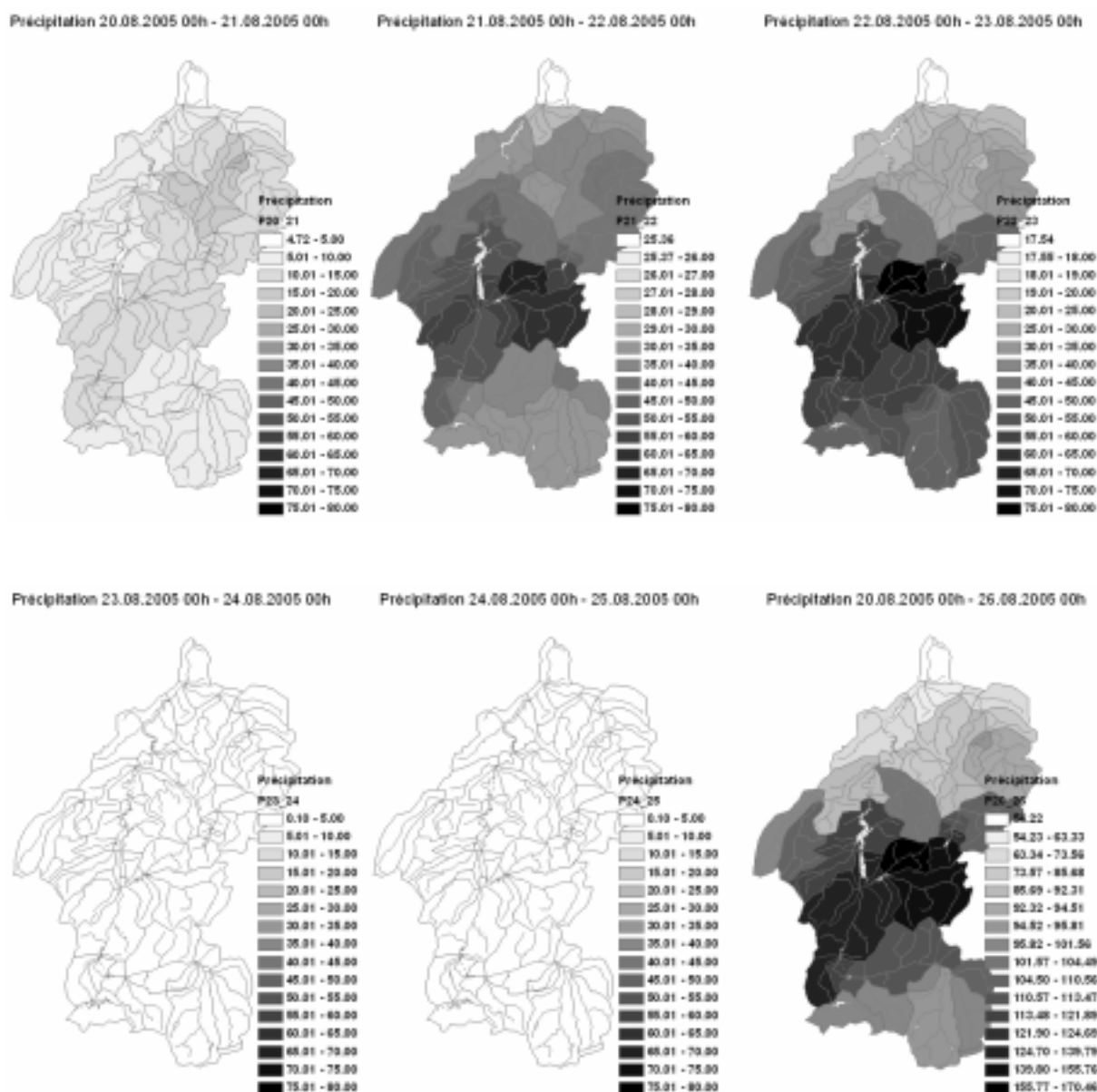


Figure 11 : Répartition spatiale des précipitations, événement d'août 2005, cumuls sur 24 h et cumul sur 120 h.

L'analyse des températures (figure 10) montre qu'elles sont restées relativement stables durant tout l'épisode pluvieux, avec un léger réchauffement dès le 21 août en mi-journée, alors même que les précipitations s'intensifiaient. La répartition spatiale des températures est présentée à la figure 12, où le réchauffement du 22 août n'est que peu perceptible. Une analyse plus fine des stations situées en altitude (stations IMIS, non considérées dans ce travail) pourrait permettre de mettre en évidence ce phénomène dans les régions alpines.

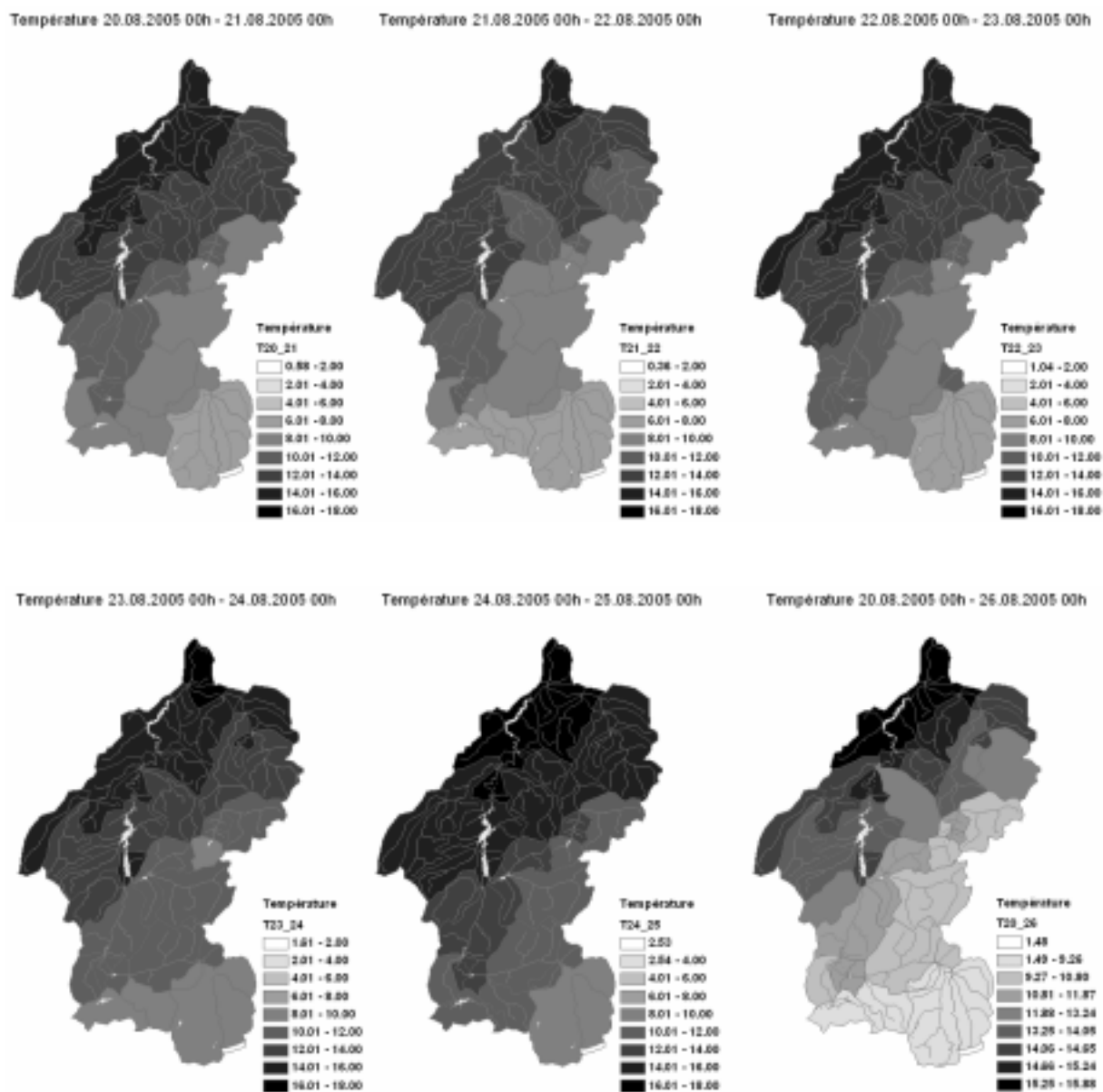


Figure 12 : Répartition spatiale des températures, événement d'août 2005, moyennes sur 24 h et sur 120 h.

Les modèles de prévision de MétéoSuisse avaient relativement bien prévu ces événements. En effet, le modèle européen (ECMWF) avait annoncé pour le 21 août dès 12 h des cumuls de 40 mm sur le Nord-Est de la Suisse (run du 19.8 à 0 h), et pour le 21 août dès 18 h des cumuls de 50-80 mm sur le Nord des Alpes et la Suisse orientale (run du 21.8 à 0 h). Le modèle aLMO a quant à lui prévu des volumes nettement supérieurs pour la période du 21 août à 18 h au 22 août à 18 h (figure 13, *MétéoSuisse, 2005*).

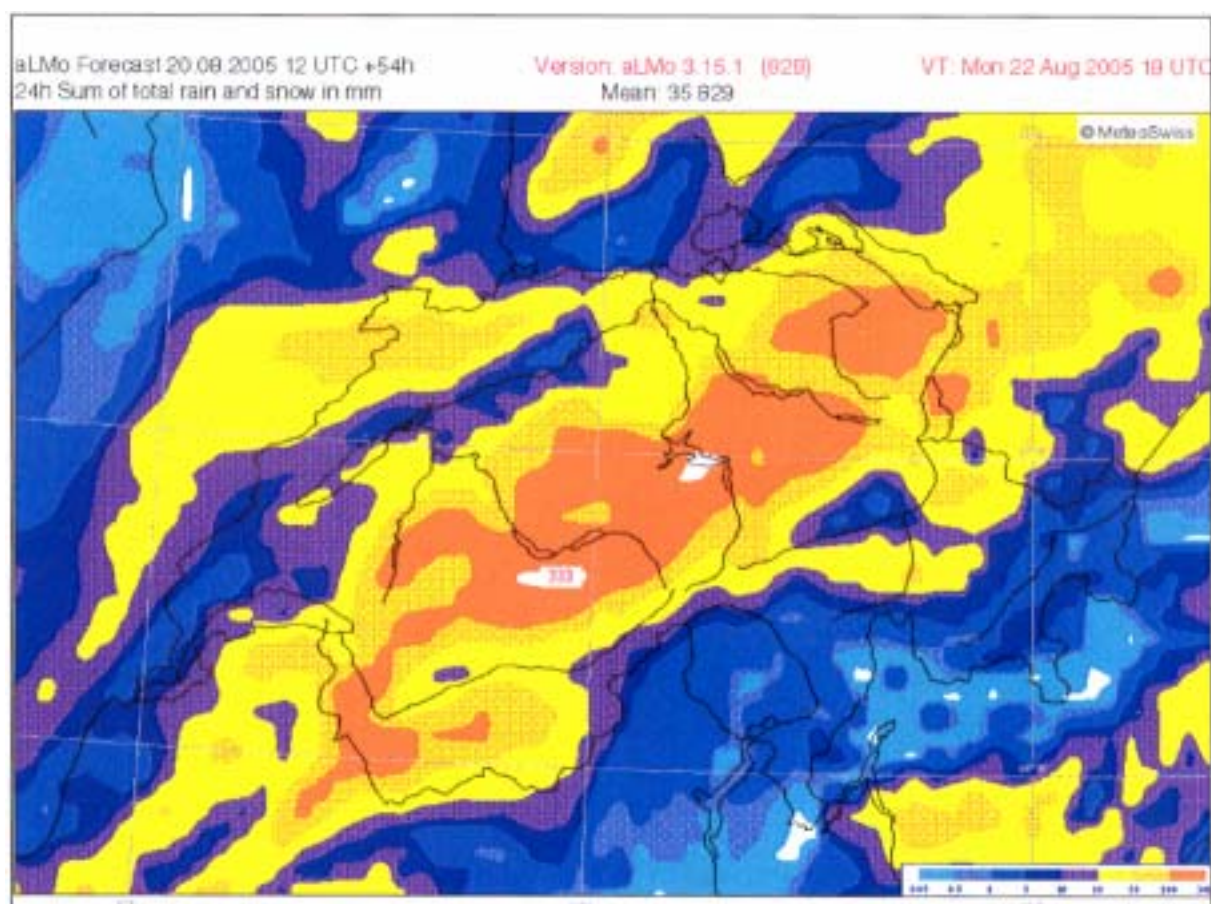


Figure 13 : Prévisions de précipitations du modèle aLMo, cumul sur 24 h du 21.8.99 à 18 h au 22.8.99 à 18 h (MétéoSuisse, 2005).

4.2.2 Débits observés

Les crues observées dans le bassin versant de la Sarine se sont produites dans la journée du 22 août 2005 (figure 14). Le débit de pointe a atteint $100 \text{ m}^3/\text{s}$ à Saanen à 12 h, $276 \text{ m}^3/\text{s}$ à Lessoc à 13 h. A Fribourg, le débit de pointe était de $727 \text{ m}^3/\text{s}$ à 18 h selon les données de l'OFEV², et à Laupen, le débit maximal mesuré de $916 \text{ m}^3/\text{s}$ le 22 août à 16 h correspond à une période de retour supérieure à 20 ans.

Il convient de noter que l'Aar a en outre vu son débit passer à $1505 \text{ m}^3/\text{s}$ à Hagneck, soit $470 \text{ m}^3/\text{s}$ de plus qu'en 1999. Cela représente un temps de retour supérieur à 50 ans. L'Aar à Berne avait un débit maximum de $600 \text{ m}^3/\text{s}$, similaire à celui observé en 1999. C'est donc bien les débits exceptionnels produits par le bassin versant de la Sarine qui ont fortement surchargé l'Aar dès la jonction à Oltigen.

² Selon le rapport d'expertise LCH 13/2006 (LCH, 2006), ce débit est surestimé. Toutefois, pour des raisons de cohérence, aucune modification n'a été apportée aux données brutes dans le cadre de la présente étude. Un ajustement de la courbe de jaugeage de la station de Fribourg ne changerait cependant pas l'effet produit par les aménagements hydroélectriques.

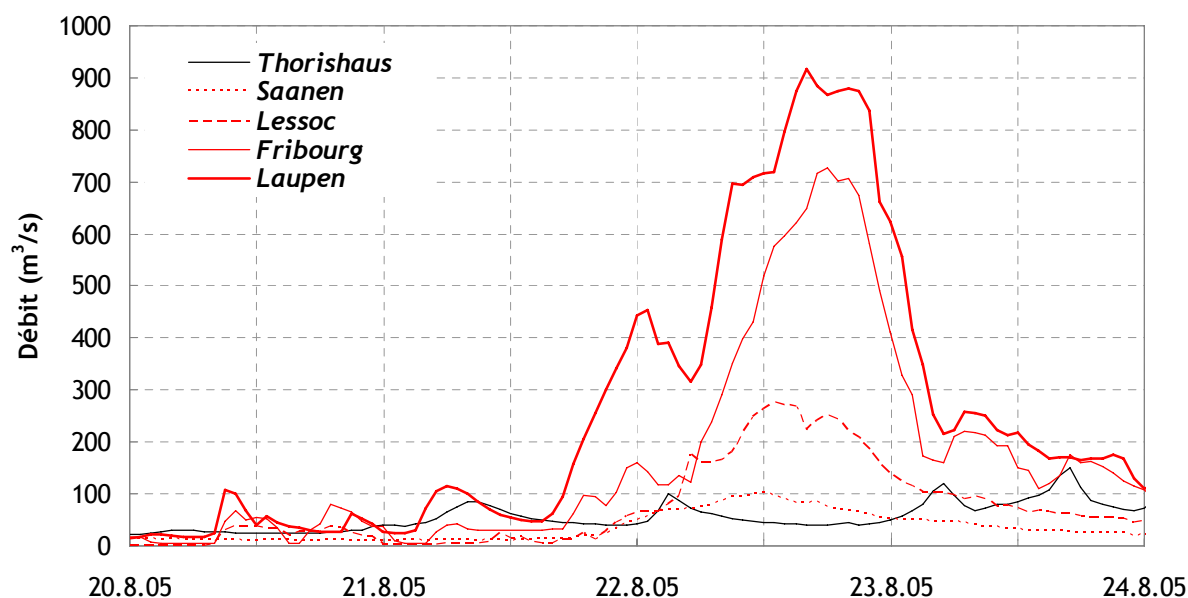


Figure 14 : Débits observés lors de la crue d'août 2005 dans le bassin versant de la Sarine.

4.2.3 Analyse volumétrique

Les résultats du calcul des volumes précipités et ruisselés sont présentés au tableau 5. Par comparaison des précipitations observées lors de l'événement de mai 1999, les valeurs sont ici supérieures en volume et en intensité. En effet, 86 mm sont tombés en moyenne en 36 h sur le bassin versant de la Sarine à Broc, contre un total de 70 mm en 72 heures. De plus, la grande étendue des précipitations est également soulignée par le volume cumulé moyen du bassin versant à Laupen de 79 mm, soit presque autant qu'à Broc.

Les coefficients de ruissellement ont été également calculés sur la même période de 36 h et ont des valeurs similaires à Broc ou à Laupen, atteignant une moyenne de 0.42. Cela indique que les précipitations ont été suffisamment importantes pour humidifier et saturer un sol relativement sec, car les précipitations antécédentes se sont produites le 1^{er} août et le 14 août.

Tableau 5 : Volumes précipités et ruisselés lors de la crue d'août à Broc et à Laupen.

21.8.05 12h - 23.8.05 00h		
Volume précipité (mm)		85.8
Volume ruisselé (mm)		36.1
Coefficient de ruissellement	Broc	0.42
Volume précipité (mm)		79.5
Volume ruisselé (mm)		34.3
Coefficient de ruissellement	Laupen	0.43

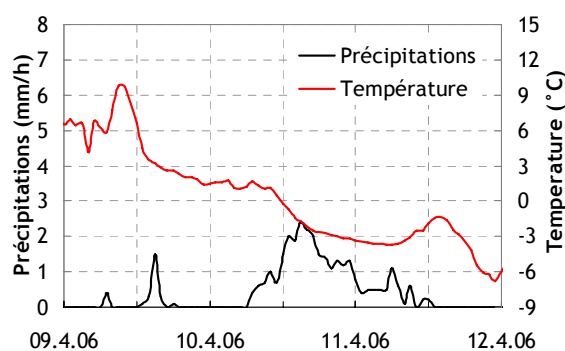
4.3 Crue d'avril 2006

Le 9 avril 2006, une dépression peu creusée mais de grande ampleur se trouve au large de l'Espagne. Cette dépression, qui s'étend de l'Espagne à l'Allemagne, se déplace alors très lentement vers l'Est, car elle est contrariée par un effet de foehn dans les Alpes. La rencontre entre les masses d'air humide en provenance du Sud et des masses froides du Nord-Ouest génère des précipitations importantes du 9 avril à 12 h au 10 avril à 20 h. En raison des températures fraîches de la saison printanière, la limite des chutes de neige varie fortement au cours de cet événement et redescend régulièrement par isothermie (*MétéoSuisse, 2006*).

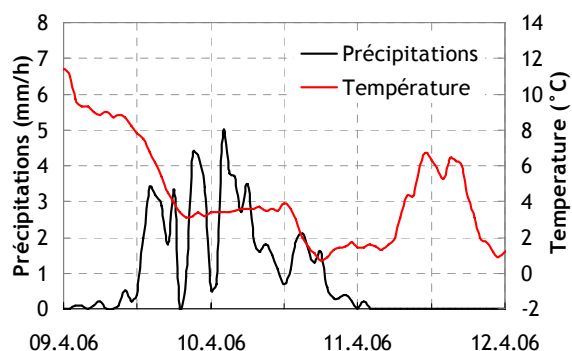
4.3.1 Précipitations et températures observées

Les précipitations se sont produites d'abord en plaine, ensuite dans les Alpes, en raison de la provenance Nord-Ouest du front. Elles ont atteint 5 mm/h à Payerne et à Berne dès le 9 avril, et des intensités plus faibles à Adelboden et Gstaad dès le 10 avril à 12 h (figure 15). Les plus fortes précipitations ont été observées à Lausanne, où 85 mm sont tombés en 36 h (dont 70 mm en 24 h), ce qui correspond à un temps de retour de 7-8 ans.

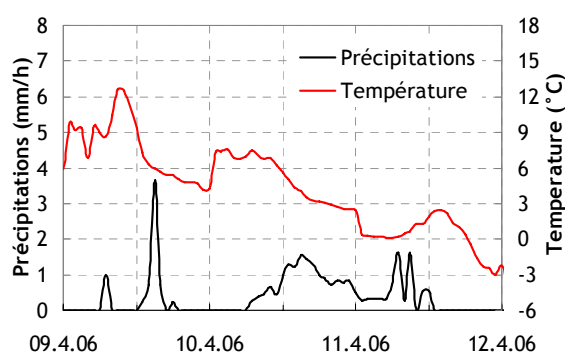
La baisse des températures provoquée par l'effet d'isothermie est bien visible sur la même figure et les valeurs observées passent de 6 °C à 1'000 m s.m. le 9 avril à -3 °C le 12 avril avec une grande régularité.



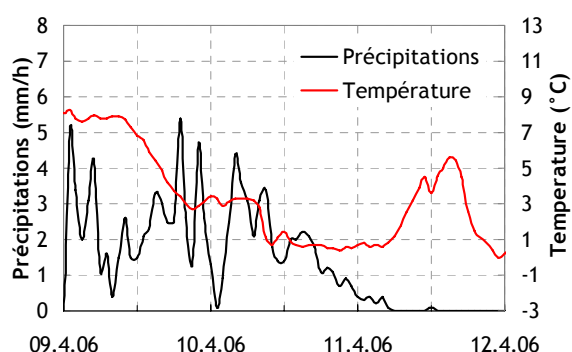
Observations à Adelboden (1320 m s.m.)



Observations à Payerne (450 m s.m.)



Observations à Gstaad (1085 m s.m.)



Observations à Berne (565 m s.m.)

Figure 15 : Observations des précipitations et températures lors de l'événement d'avril 2006 dans le bassin versant de la Sarine et à Berne.

La répartition spatiale des précipitations est présentée à la figure 16. Il apparaît que les plus importantes précipitations se sont déroulées sur le plateau, au Nord de la chaîne préalpine des Vanils. Les précipitations sont concentrées sur les 9 et 10 avril 2006. Ce schéma est à nouveau très différent des schémas de 1999 et 2005, où les précipitations avaient tout de même été plus intenses à proximité des chaînes montagneuses.

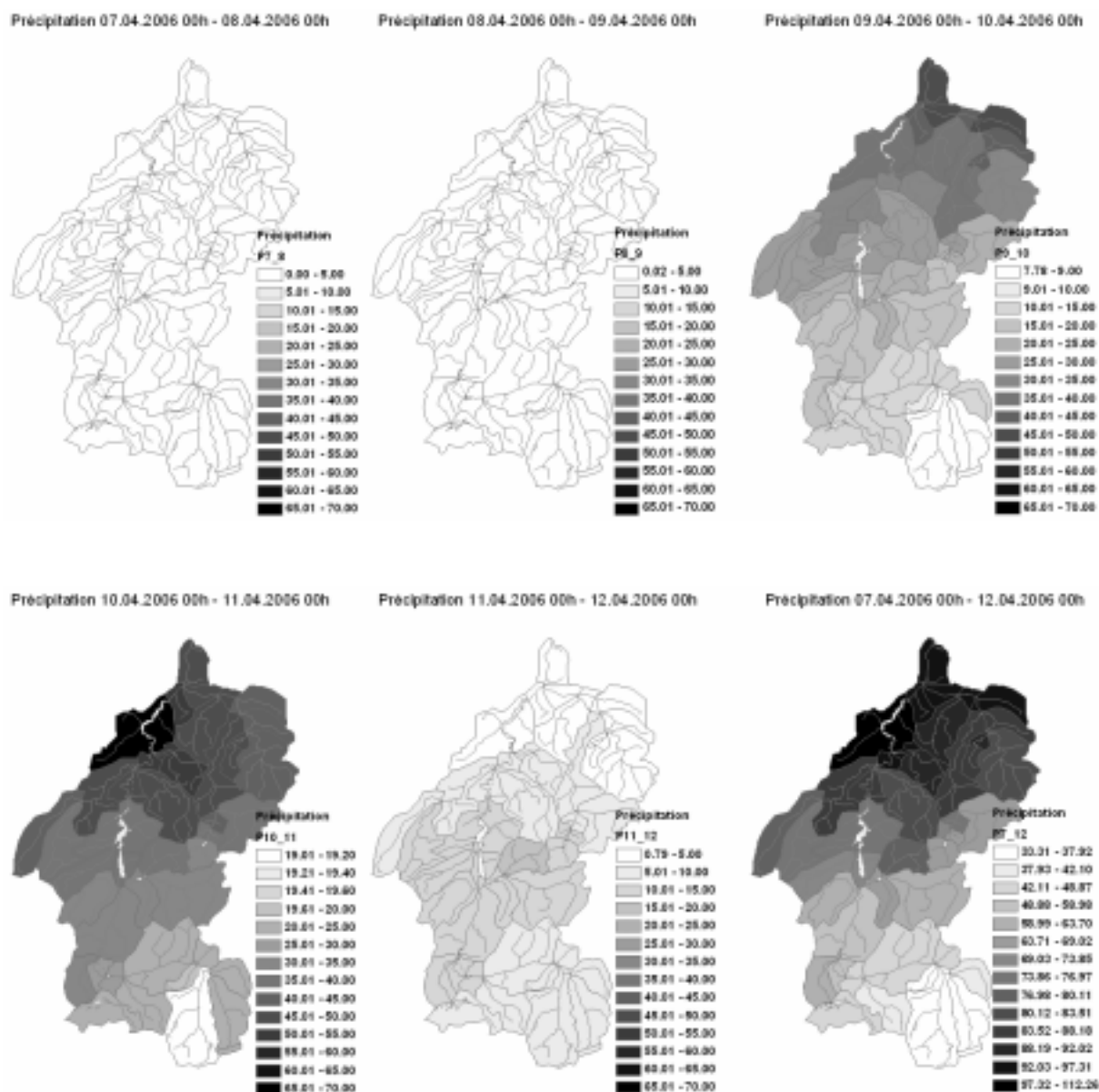


Figure 16 : Répartition spatiale des précipitations, événement d'avril 2006, cumuls sur 24 h et cumul sur 120 h.

Le refroidissement qui s'opère dès le 10 avril est nettement visible sur la figure 17, où la chute des températures atteint 6-8 °C en 48 h. C'est pourtant grâce à ce phénomène que les débits dans les cours d'eau ont été limités. En effet, les débordements locaux des lacs de Morat et de Neuchâtel ainsi que de la Glâne et de la Venoge se sont produits suite aux volumes précipités sur le plateau. Dès le 10 avril, les précipitations sont tombées sous forme de neige sur une grande partie du territoire situé au-dessus de 600 m s.m.

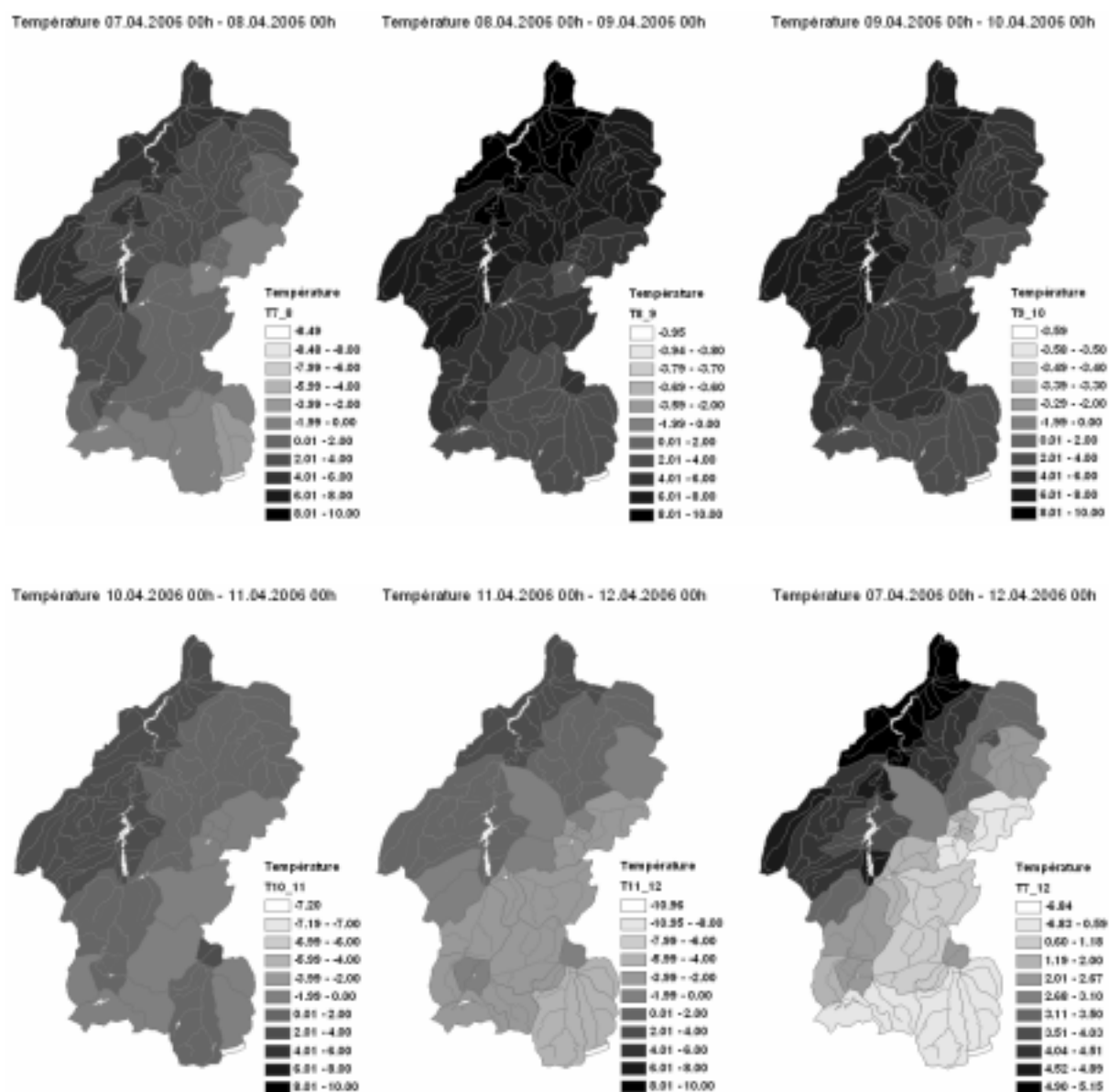


Figure 17 : Répartition spatiale des températures, moyennes sur 24 h et sur 120 h.

4.3.2 Débits observés

Les débits observés n'ont pas atteint des valeurs très importantes suite à ces précipitations (figure 18). La montée des eaux a débuté le 9 avril vers 12 h et la pointe de crue a été observée le 10 avril à 11 h à Fribourg à 206 m³/s et à 12 h à Laupen à 310 m³/s. Au même moment, le débit de l'Aar à Berne n'atteignait pas 170 m³/s.

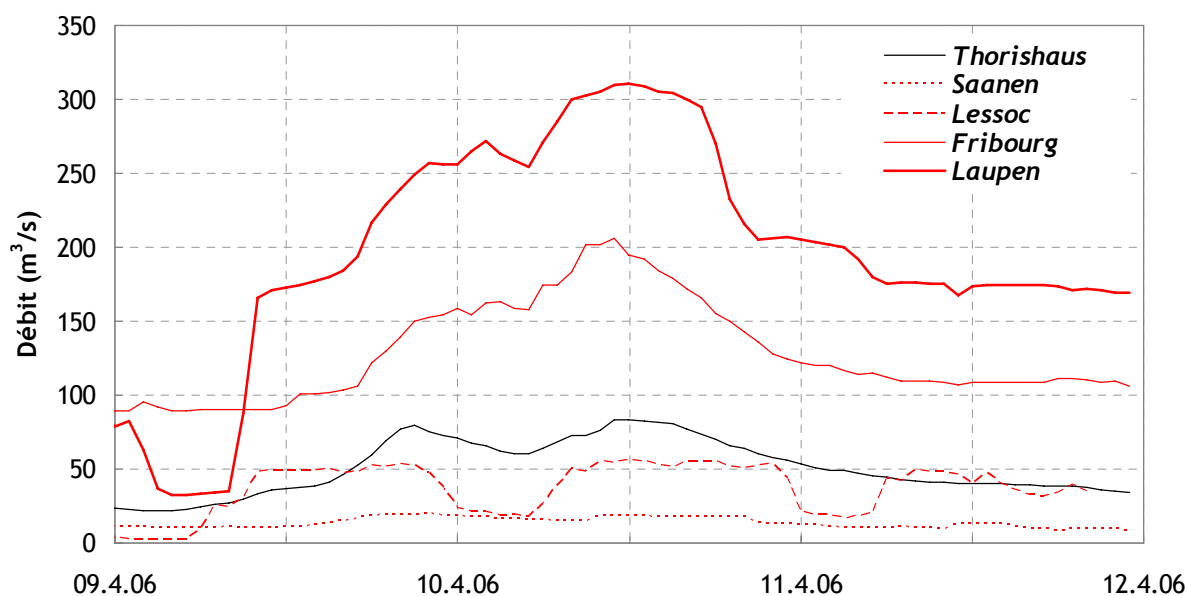


Figure 18 : Débits observés lors de la crue d'avril 2006 dans le bassin versant de la Sarine.

4.3.3 Analyse volumétrique

Les volumes précipités et ruisselés moyens des 9 et 10 avril 2006 sont présentés dans le Tableau 6. Les volumes journaliers précipités sont relativement faibles mais il est à nouveau remarquable qu'ils sont nettement supérieurs en plaine qu'en montagne. Ces volumes ont d'ailleurs pratiquement doublé du 9 au 10 avril.

L'analyse des coefficients de ruissellement montre également l'effet salvateur du refroidissement. A Saanen, ce coefficient est passé de 0.59 à 0.32, alors que les précipitations s'intensifiaient. Cela signifie qu'elles se sont plus largement produites sous forme de neige et qu'elles n'ont que peu contribué à l'écoulement. Le même remarque est valable à Broc, où ce coefficient passe de 0.56 à 0.38. Par contre, le coefficient de ruissellement moyen à Laupen augmente de 0.28 à 0.35, en raison de la forte proportion de surfaces à basse altitude qui ont reçu des pluies et donc vu leur sol se saturer pour produire plus d'écoulement.

Ces valeurs sont encore plus faibles qu'en août 2005 où elles atteignaient 0.42 et qu'en mai 1999 où elles se situaient entre 0.80 et 1.20 sous l'effet de la fonte de neige.

Tableau 6 : Volumes précipités et ruisselés lors de la crue de d'avril 2006 à Saanen, Broc et Saanen.

		9 avril 2006	10 avril 2006
Saanen	Volume précipité (mm)	8.6	19.5
	Volume ruisselé (mm)	5.1	6.3
	Coefficient de ruissellement	0.59	0.32
Broc	Volume précipité (mm)	12.0	24.5
	Volume ruisselé (mm)	6.7	9.4
	Coefficient de ruissellement	0.56	0.38
Laupen	Volume précipité (mm)	23.5	36.5
	Volume ruisselé (mm)	6.6	12.6
	Coefficient de ruissellement	0.28	0.35

4.4 Conclusions de l'analyse des situations météorologiques

L'analyse de trois événements de crue a montré la diversité des processus qui peuvent générer des débits importants dans la Sarine. Les événements frontaux du Nord-Ouest, associés à des températures relativement élevées et à de la fonte de neige, peuvent provoquer des crues catastrophiques, surtout si la couverture neigeuse existant avant le début des précipitations est importante, ce qui était le cas en mai 1999.

Si ces événements, qui peuvent durer plusieurs jours en raison de l'effet de barrage provoqué par les Alpes, se produisent suffisamment tôt dans la saison et que seule peu de chaleur est disponible dans l'atmosphère, le phénomène d'isothermie vient alors limiter les précipitations liquides, la température moyenne se refroidit au cours de l'événement et la limite des chutes de neige s'abaisse. Les débits ne sont alors plus produits dans les régions alpines, mais en plaine uniquement, ce qui limite leurs valeurs maximales comme ce fut le cas en avril 2006.

L'été est cependant une saison où le danger est tout aussi important, malgré l'absence de couverture neigeuse sur le relief. Les masses d'air sont plus chaudes et peuvent donc contenir plus d'humidité. Cela conduit à des précipitations intenses et de longue durée qui, associées à un effet de barrage du Nord, provoquent des débits très importants dans la Sarine dès sa source dans l'Oberland bernois. Ce fut le cas en août 2005 et des valeurs record furent atteintes localement.

Le risque d'inondation à Fribourg dépend fortement du régime hydrologique de la Sarine. A Laupen, la conjonction de la Sarine et de la Singine complique la donne et l'addition d'importants débits des deux bassins versants peut devenir problématique. Enfin, le débit de la Sarine peut conduire à des débordements de l'Aar en cas de perturbation intense et étendue comme en août 1999. Dans ce cas, si un moyen de contrôler la phase des ondes de crues n'est pas vraiment disponible le long de l'Aar (régulation du lac de Thun), il l'est peut-être le long de la Sarine, grâce à la flexibilité des aménagements de Montsalvens et Rossens.

5 INFLUENCE DES AMÉNAGEMENTS HYDROELECTRIQUES

L'influence des aménagements hydroélectriques a été analysée pour les deux événements de crue de mai 1999 et août 2005. Les débits observés ont été comparés aux débits qui se seraient produits sans la présence des retenues d'accumulation et aux débits qui auraient été observés si un contrôle des crues actif avait pu être réalisé. Finalement, une analyse de sensibilité et une analyse des coûts possibles d'un tel contrôle ont été effectuées et sont présentées dans ce chapitre.

5.1 Crue de mai 1999

5.1.1 Influence observée et optimisée des retenues d'accumulation

Les hydrogrammes observés, calculés sans considérer l'effet des retenues et calculés avec une gestion optimisée des retenues pendant la crue de mai 1999 sont présentés à la figure 19. Les hydrogrammes sans retenues ont été obtenus en supprimant, dans le modèle numérique *Routing System II*, tous les objets associés aux aménagements hydroélectriques. Il n'y a donc ni retenue, ni prise d'eau, ni centrale et ouvrages de restitution. Cela correspond donc à la situation d'avant la construction des aménagements hydrauliques.

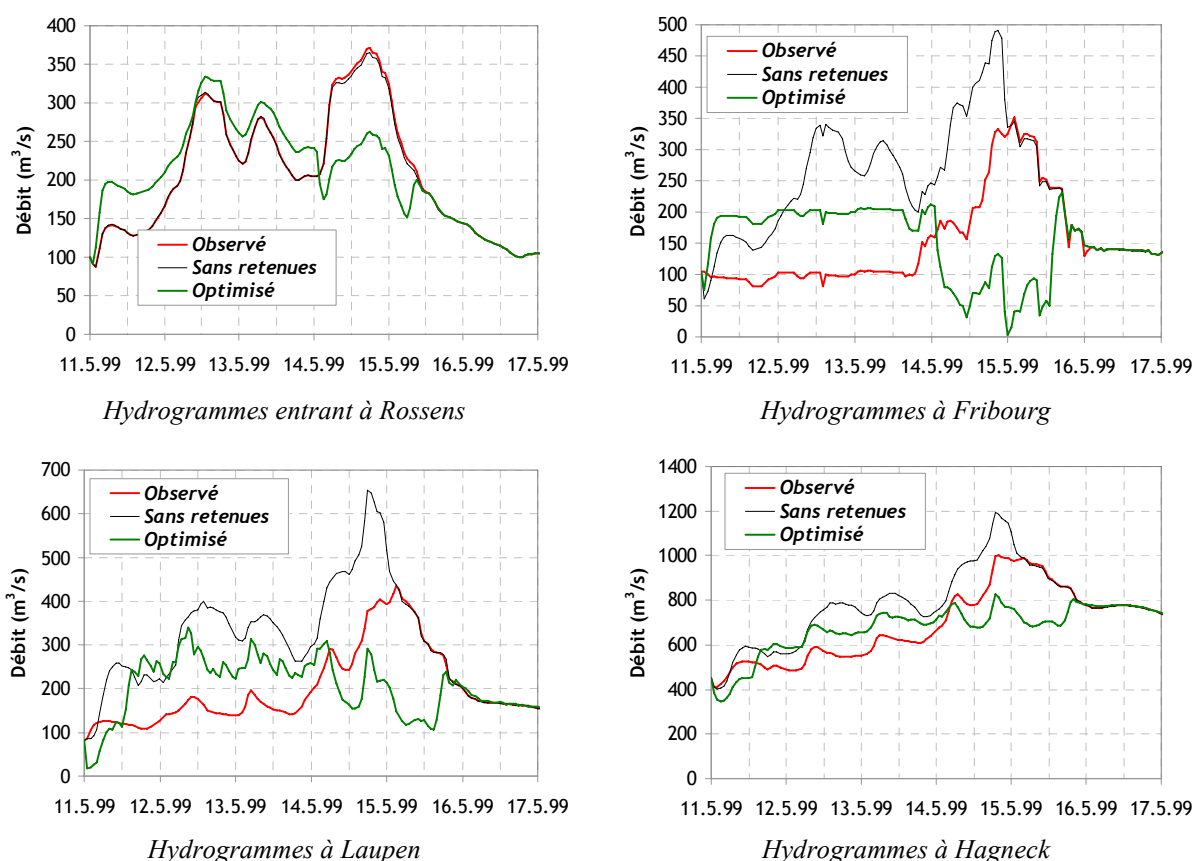


Figure 19 : Comparaison entre hydrogrammes observés, sans retenues et optimisés à quatre points de contrôle le long de la Sarine et de l'Aar.

La gestion optimisée a été réalisée sur les aménagements de Montsalvens et de Rossens, car l'influence des autres retenues (Rossinière, Lessoc, Maigrauge, Schiffenen) est négligeable lors des crues. En plus du turbinage à pleine capacité, les ouvrages de vidange ont été considérés pour les opérations préventives.

Les résultats indiquent d'abord que les retenues ont eu une influence protectrice par réduction du débit dans les cours d'eau aval. En effet, le débit observé à Fribourg le 14 mai à 21 h était de 332 m³/s, alors qu'il aurait été de 490 m³/s sans l'influence des retenues. Cela correspond à une réduction de 158 m³/s, ou 32%, du débit maximum. A Laupen, la réduction de débit due aux retenues hydroélectriques était de 276 m³/s le 14 mai à 18 h, le débit observé étant de 378 m³/s contre 654 m³/s sans retenues. Le débit maximum observé à Laupen, de 403 m³/s le 14 mai à 22 h est donc arrivé plus tard que la pointe sans influence des retenues. Cela signifie qu'en plus de la réduction de débit, les retenues engendrent un décalage temporel des débits de pointe dans les cours d'eau aval. L'analyse des résultats sur l'Aar montre que le débit "naturel" maximal aurait été de 1193 m³/s à l'entrée du canal de Hagneck le 14 mai à 19 h, alors que le débit observé a été de 1000 m³/s à 20 h.

A Rossens, il n'y a presque pas de différence entre le débit entrant sans retenues et le débit entrant observé. La retenue de Montsalvens n'a donc joué aucun rôle sur la rétention de volume durant cette crue et le débit a atteint 371 m³/s le 14 mai à 18 h.

Si les aménagements hydroélectriques du Groupe E ont joué un rôle protecteur lors de la crue de mai 1999, ils auraient pu être encore plus efficaces pour la réduction des débits de pointe. Les résultats présentés dans la figure 19 et au tableau 7 montrent en effet que les débits auraient pu être contrôlés totalement par l'abaissement préventif du niveau de la retenue avec un préavis de 72 heures (pour le débit proposé dans cette analyse).

Tableau 7 : Synthèse des débits de pointe observés (m³/s), simulés sans aménagements et optimisés lors de la crue de mai 1999.

Scénario	Rossens	Fribourg	Laupen	Hagneck
Sans aménagements	365	490	654	1194
Observé	371	352	435	1004
Optimisé	334	232	341	825
Réduction observée	-1.6%	28%	33%	16%
Réduction maximale	8.5%	53%	48%	31%

La gestion des aménagements hydroélectriques concernés a été modélisée de façon à reproduire l'application du règlement d'exploitation. Il s'agit dans tous les cas d'une régulation selon le niveau de la retenue. Celui-ci doit être maintenu à sa cote maximale et ne doit pas monter plus haut. Cela signifie que le gestionnaire doit ouvrir les organes de vidange de manière à laisser sortir autant de débit que ce qui entre. Lorsque la capacité d'un des organes est atteinte (par exemple les vannes de surface), l'organe suivant est utilisé (les vannes de fond) de sorte à maintenir le niveau du lac en dessous de la cote d'alerte.

L'optimisation consiste donc à éviter que la retenue n'atteigne trop tôt le niveau pour lequel le règlement d'exploitation doit être appliqué. Concrètement, un abaissement préventif du niveau permettra de laisser entrer un débit important sans devoir l'évacuer au même moment, et donc de laminier l'hydrogramme de crue. La gestion optimisée des retenues présentée dans cette étude a été calculée en considérant le turbinage préventif et l'ouverture des vannes de surface. Lors de la pointe de crue entrante, les turbines sont arrêtées et les vannes fermées, jusqu'à ce que la retenue n'atteigne sa cote maximale et que le règlement d'exploitation ne s'applique. La figure 20 illustre la stratégie de gestion : alors que le débit sortant de Rossens avant la crue est

de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ (turbines), la gestion optimisée effectue une vidange supplémentaire par les vannes de surface de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Dès le 14.5 à 0 h, les turbines sont arrêtées et les vannes de surface refermées. Plus aucun débit ne sort alors de la retenue qui peut se remplir. Le règlement d'exploitation s'applique dès le 15.9 à 12 h et le débit évacué correspond au débit entrant dans la retenue. Dans ce cas, l'opération a été initiée 3 jours avant le début de la crue.

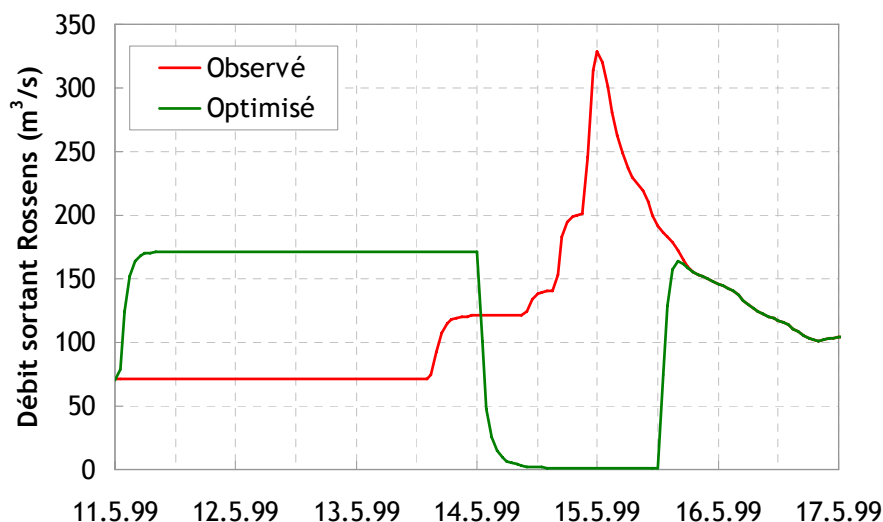


Figure 20 : Débits sortants de Rossens, comparaison entre observations et débits optimisés pour la crue de mai 1999

5.1.2 Analyse de sensibilité

Influence de Montsalvens

L'influence de la retenue de Montsalvens a été analysée par calcul des débits entrant dans le lac de Gruyère en fonction des opérations de vidange préventive de cet aménagement. Ces opérations ont été effectuées par turbinage ($25 \text{ m}^3/\text{s}$) et ouverture de la vanne de surface (de 15 à $89 \text{ m}^3/\text{s}$), en considérant les niveaux initiaux des retenues tels que mesurés le 11.5.99 à 0 h.

Dans les figures 21 et 22 sont présentés les débits entrant dans le lac de Gruyère selon le volume évacué de la retenue de Montsalvens avant la crue. Les volumes sont l'indicateur retenu, car ils n'impliquent pas d'hypothèse particulière sur la façon d'évacuer ce volume, comme par exemple le débit sortant et son horaire. La période de vidange a été gardée constante et égale à 3 jours et le débit total a été varié de 40 à $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Il est donc possible de répartir autrement ce volume dans le temps pour aboutir au même volume évacué.

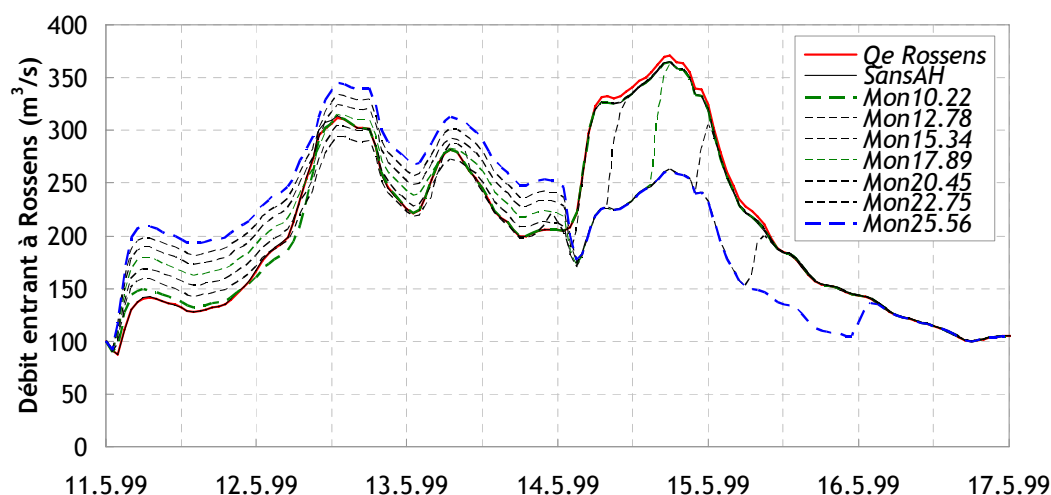


Figure 21 : Débits entrant dans la retenue de Rossens en fonction des opérations de vidange préventive de la retenue de Montsalvens, crue de mai 1999.

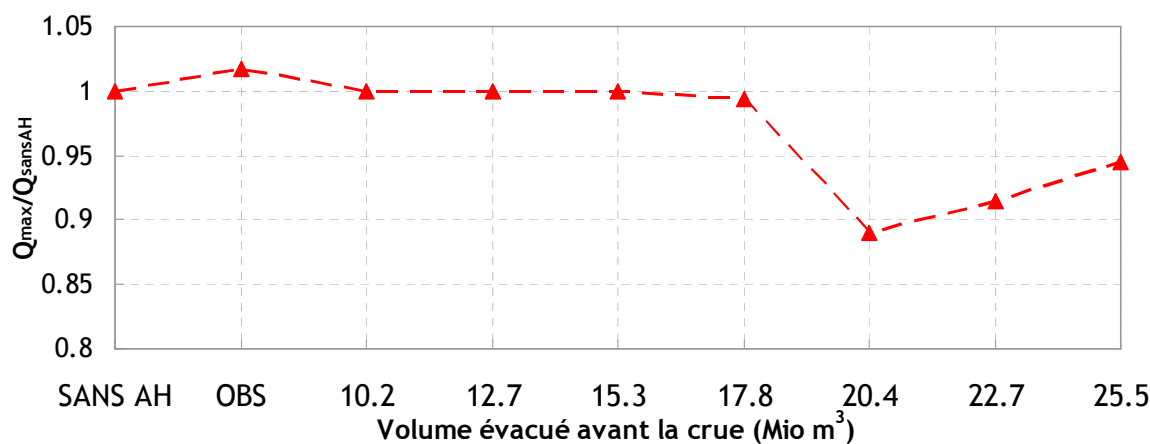


Figure 22 : Rapport entre le débit maximum entrant dans le lac de Gruyère et le débit maximum sans aménagements selon le volume évacué préventivement à Montsalvens, crue de mai 1999.

Les résultats montrent que le débit de pointe observé à l'entrée du lac Gruyère en mai 1999 a été légèrement supérieur au débit sans retenues. Une vidange préventive supérieure à 18 Mio m³ aurait toutefois été nécessaire pour réduire le débit de pointe entrant à Rossens. Bien que la retenue de Montsalvens ait un volume de 8 Mio m³, il est possible de vidanger un volume supérieur à cette valeur. Il suffit pour cela de maintenir la retenue à son niveau le plus bas avant la pointe de la crue. Le volume évacué correspond alors au volume utile de la retenue ajouté au volume entrant. Si une opération préventive de 17.89 Mio m³ est effectuée, le débit de pointe entrant dans le lac de Gruyère diminue de 60 m³/s, mais le débit augmente avant la pointe. C'est pour cette raison que la courbe présentée à la figure 22 remonte au-delà de 20 Mio m³.

On retient de cette analyse que la retenue de Montsalvens peut être gérée de manière à laminier significativement couper une crue comme celle de mai 1999.

Influence de Rossens

Le même type d'analyse est effectué pour l'influence des opérations préventives de l'aménagement de Rossens sur le débit de la Sarine à Fribourg. La retenue de Rossens a un volume utile de 170 Mio m³, une capacité de turbinage de 70 m³/s et plusieurs ouvrages de vidange d'une capacité totale de 930 m³/s.

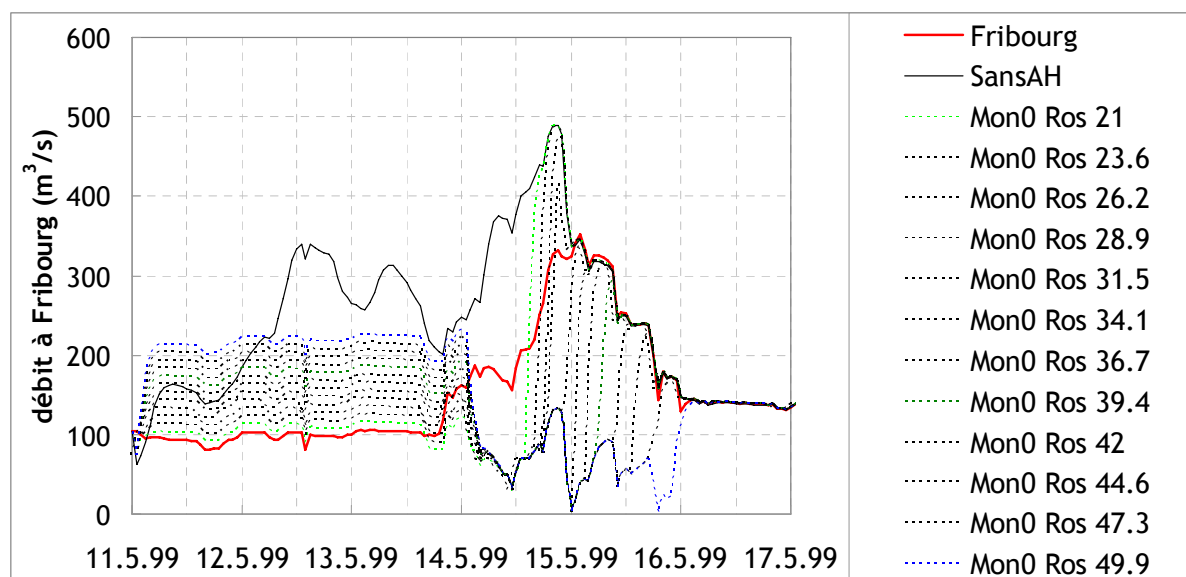


Figure 23 : Débits à Fribourg en fonction des opérations de vidange préventive de la retenue de Rossens, crue de mai 1999.

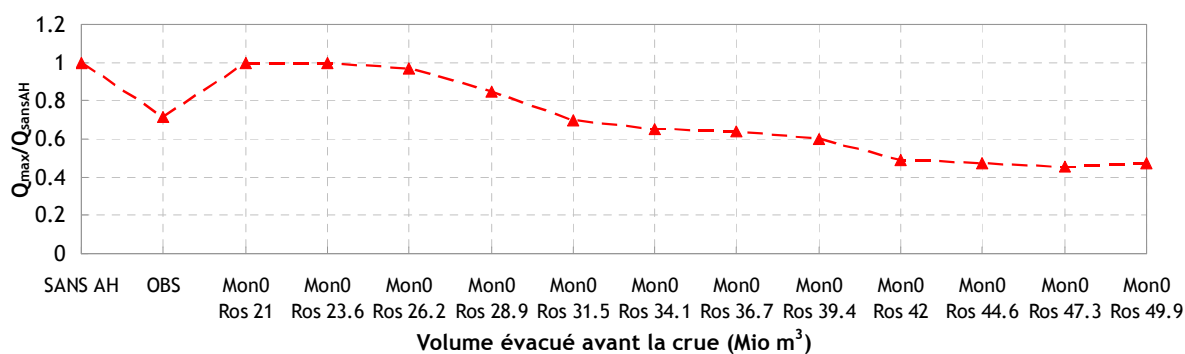


Figure 24 : Rapport entre le débit maximum à Fribourg et le débit maximum sans aménagements selon le volume évacué préventivement à Rossens, crue de mai 1999.

Les figures 23 et 24 montrent que la retenue de Rossens influence significativement les débits de la Sarine à Fribourg. Les opérations effectuées par le Groupe E avant la pointe de la crue de mai 1999 correspondent à un volume de 33 Mio m³, par turbinage et par ouverture de l'évacuateur de surface. Pour augmenter cet effet, il aurait fallu évacuer des volumes totaux très légèrement supérieurs : dès 34 Mio m³, une réduction de 45% du débit de pointe pouvait être obtenue.

Montsalvens et Rossens

La même analyse a été effectuée, en considérant que les deux retenues de Montsalvens et Rossens étaient préventivement abaissées dès le 11.5.99 à 0 h (figures 25 et 26). Pendant la période précédant la crue, le débit dans la Sarine aurait atteint entre 150 et 200 m³/s, soit jusqu'au double du débit observé. Pour évacuer préventivement un volume similaire au volume calculé ici mais pendant une période plus courte, il faudrait augmenter le débit d'évacuation des deux retenues. Pour information, la capacité d'évacuation maximale de la retenue de Montsalvens est de 131 m³/s sans les hausses fusibles et sans turbines, tandis que celle de Rossens est de 930 m³/s sans les turbines. Cependant, c'est bien la capacité des cours d'eau à l'aval de ces aménagements qui doit limiter le débit évacué préventivement, ainsi que les dispositions d'évacuation des cours d'eau.

Les résultats indiquent que pour obtenir une réduction du débit à Fribourg de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ environ, il faudrait évacuer 20 Mio m^3 à Montsalvens et 42 Mio m^3 à Rossens. Avec des opérations préventives plus importantes, il est possible de réduire plus fortement encore le débit de pointe de la Sarine à Fribourg, de 50% à 60%.

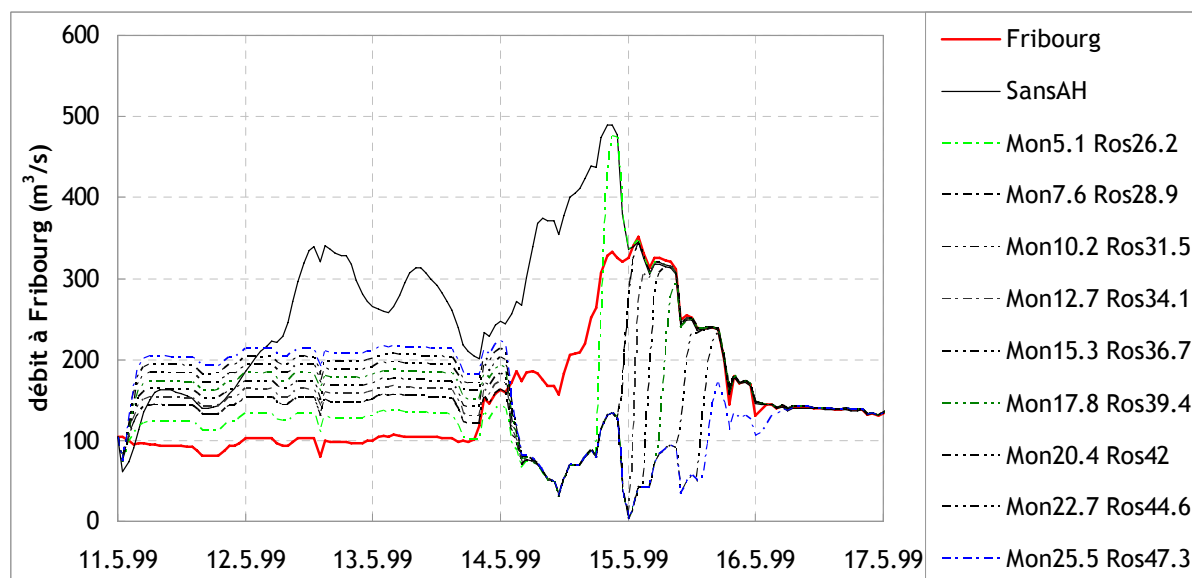


Figure 25 : Débits à Fribourg en fonction des opérations de vidange préventive de la retenue de Montsalvens et Rossens, crue de mai 1999.

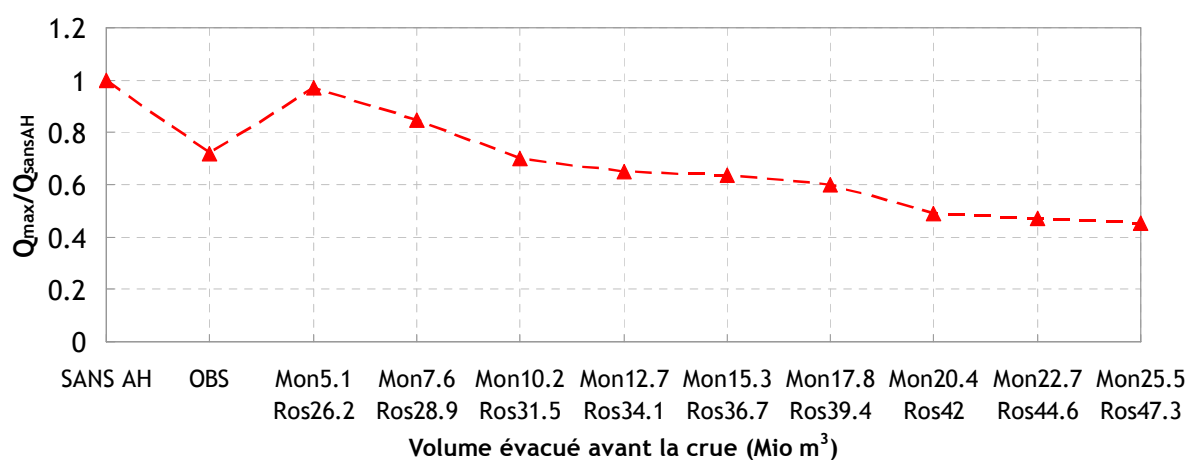


Figure 26 : Rapport entre le débit maximum à Fribourg et le débit maximum sans aménagements selon le volume évacué préventivement à Montsalvens et Rossens, crue de mai 1999.

Il est aussi intéressant d'analyser la réduction du débit de pointe de l'Aar à Otlingen (jonction avec la Sarine) résultant des opérations préventives de Montsalvens et Rossens (figures 27 et 28). Les résultats indiquent qu'une vidange préventive plus faible que celle observée aurait légèrement augmenté le débit de pointe de l'Aar à l'entrée du canal de Hagneck. Par contre, une vidange préventive de 7.6 et 28.9 Mio m^3 , respectivement, à Montsalvens et Rossens, permet déjà de retarder la pointe de crue de 9 h et de la réduire de $50 \text{ m}^3/\text{s}$. La plus forte réduction du débit maximum obtenue par abaissement préventif des niveaux de Montsalvens et Rossens est de $311 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 31% du débit maximum observé et 42% du débit sans influence des retenues d'accumulation.

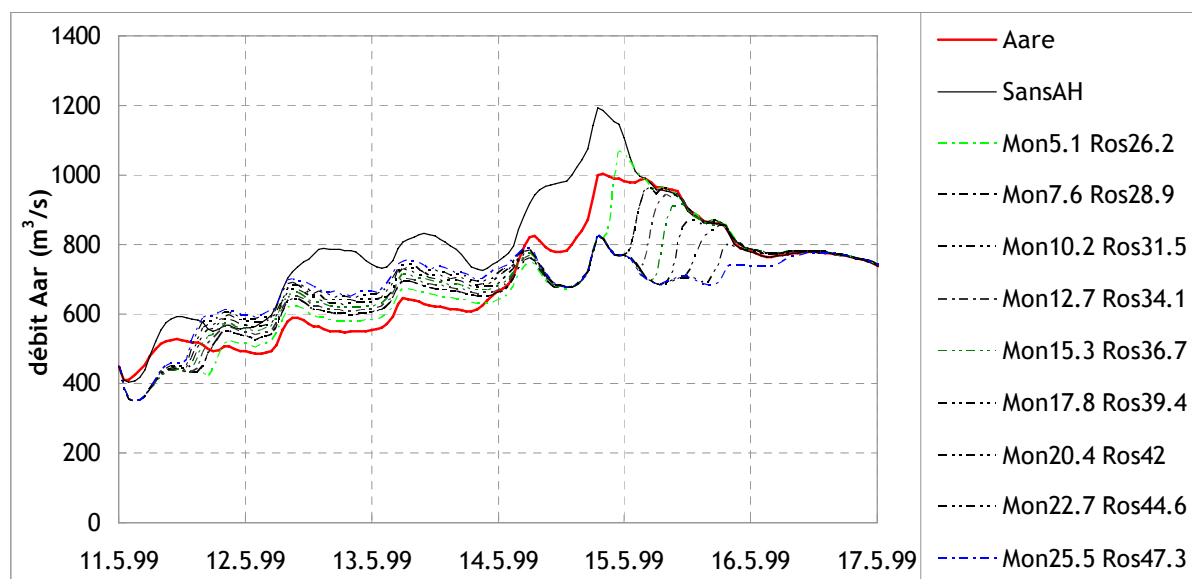


Figure 27 : Débits dans l'Aar à Otlingen en fonction des opérations de vidange préventive de la retenue de Montsalvens et Rossens, crue de mai 1999.

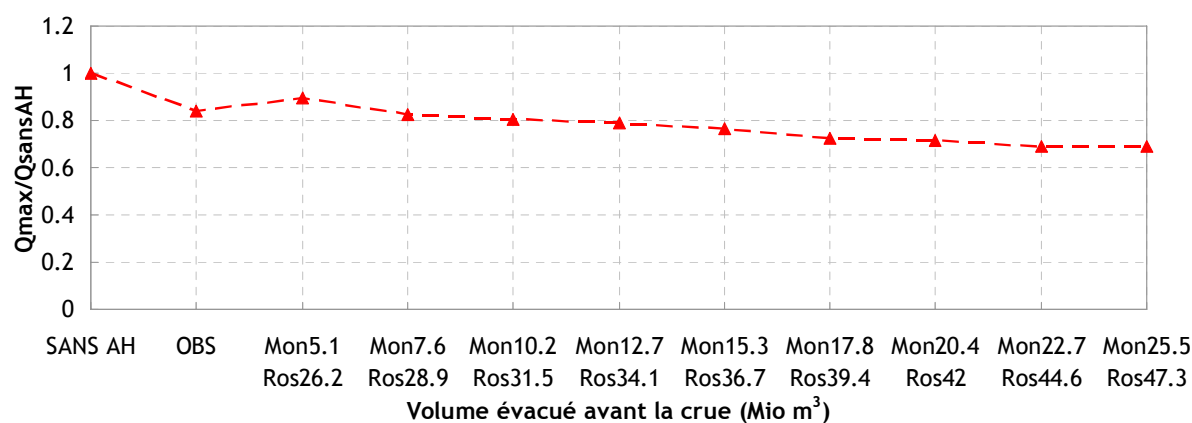


Figure 28 : Rapport entre le débit maximum de l'Aar (Otlingen) et le débit maximum sans aménagements selon le volume évacué préventivement à Montsalvens et Rossens, crue de mai 1999.

Commentaires

Ces résultats suscitent les commentaires suivants :

1. Les aménagements de Rossinière, Lessoc, Maigrauge et Schiffenen n'ont pratiquement joué aucun rôle lors de la crue de mai 1999. Leurs volumes utiles, de l'ordre du Mio m³, ainsi que leur disposition en série le long de la Sarine ne leur laisse aucune chance d'influencer significativement le débit lors des crues.
2. L'aménagement de Montsalvens, malgré son volume utile de 8 Mio m³, offre un potentiel intéressant pour le contrôle du débit entrant dans la retenue de Rossens. Cependant, si une vidange préventive de la retenue de Montsalvens est demandée, il faut vérifier que ce volume soit disponible dans le lac de Gruyère, ou bien que ce volume soit simultanément libéré de ce lac. Sinon, le lac de Gruyère serait rempli trop tôt avant la crue et perdrait tout ou partie de sa capacité à réduire le débit dans la Sarine.
3. Le contrôle des crues par opérations préventives des aménagements hydroélectriques du Groupe E est efficace. Il nécessite l'usage des vidanges de surface (à Montsalvens et Rossens) pour permettre de libérer en 30-48 h un volume intéressant. Ce délai représente un horizon relativement réaliste en fonction des prévisions météorologiques du modèle aLMO qui sont fournies pour les 3 prochains jours. Avec une prévision météorologique parfaite et des opérations préventives optimales, la réduction du débit de pointe de la crue de mai 1999 aurait pu être supérieure à 55% à Fribourg et 31% dans l'Aar à sa jonction avec la Sarine.
4. Lors d'un abaissement préventif du plan d'eau, un volume important (de l'ordre de 30-45 Mio m³) est envoyé plus tôt dans la Sarine, puis dans l'Aar et enfin dans le lac de Bienne. Celui-ci doit par conséquent être en mesure d'absorber ce volume en maintenant son niveau constant de manière à ensuite pouvoir amortir la crue naturelle.

5.1.3 Analyse coût-bénéfice

Une analyse coût-bénéfice simplifiée relative aux opérations préventives sur les aménagements de Montsalvens et Rossens lors de la crue de mai 1999 est présentée dans ce paragraphe. Les situations observée et optimisée sont comparées en fonction des revenus et des pertes d'exploitation. La puissance produite avant et lors de la crue est considérée comme un gain, tandis que le volume perdu à travers la vidange est considéré comme une perte. Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- Puissance produite par turbinage :

$$P_{el} = \eta \cdot \gamma_w \cdot Q_T \cdot h$$

où $\eta = 0.8$ est le rendement total, $\gamma_w = 9.81 \text{ (KN/m}^3\text{)}$ est le poids volumique de l'eau, $Q_T \text{ (m}^3\text{/s)}$ est le débit turbiné et $h \text{ (m)}$ la chute brute selon les niveaux simulés avec le logiciel *Routing System II*.

- Le revenu de la vente de l'énergie produite dépend de la durée pendant laquelle la puissance est produite et du prix de vente du kWh. Ce prix a été fixé à 11 ct./kWh de 7 h à 20 h, et de 4 ct./kWh le reste de la journée.
- La perte de production due au déversement ou à la vidange correspond à l'énergie qui aurait pu être produite par le volume perdu à retenue pleine au prix de 11 ct./kWh.

Le Tableau 8 présente les volumes vidangés et turbinés, ainsi que les coûts et revenus associés, en fonction du scénario. Le revenu total est calculé sur la base du volume turbiné et ne tient pas compte du volume vidangé. Les chiffres présentés sont à considérer comme des indicateurs de type "borne supérieure" et ne correspondent pas à la situation réelle de mai 1999. Ils permettent cependant de fixer l'ordre de grandeur des coûts associés à de telles opérations.

Les résultats indiquent qu'une opération préventive optimisée aurait conduit à une perte d'exploitation de l'ordre de CHF 230'000.-. Cette perte provient de l'arrêt de turbinage du 14.5.99 à 1 h au 15.5.99 à 12 h. Il aurait naturellement été possible de continuer à produire de l'énergie pendant cette période, ce qui aurait conduit à des débits plus élevés de $70 \text{ m}^3\text{/s}$ lors de la pointe de la crue à Fribourg, et qui aurait été acceptable. Par conséquent, il aurait été possible d'éviter toute perte de production lors de la crue de mai 1999 en regard de la capacité des cours d'eau à l'aval de Rossens.

Le volume vidangé et son coût associé optimisé indiquent la borne supérieure de la perte en cas d'erreur totale de prévision. En effet, si une vidange préventive par lâcher d'eau d'un volume total de 42.61 Mio m^3 avait été effectuée, et qu'aucun débit n'était arrivé dans la retenue lors de la crue (erreur de prévision), la perte aurait été de 1.11 Mio m^3 . Ce cas est toutefois peu probable, car le bassin versant de la Sarine à Rossens est important et la rivière n'est jamais asséchée. Il s'agit donc bien d'une borne supérieure.

Tableau 8 : Coût des opérations préventives des aménagements de Montsalvens et Rossens lors de la crue de mai 1999, comparaison entre opérations observées et optimisées.

		Observé		Optimisé		Revenu	Perte
		Vidanges	Turbines	Vidanges	Turbines	total	maximale
Montsalvens	Mio m ³	16.92	17.72	19.05	15.06	-2.66	16.69
	Mio CHF	0.50	0.38	0.56	0.31	-0.07	0.49
Rossens	Mio m ³	28.90	48.64	37.31	39.31	-9.33	25.92
	Mio CHF	0.69	0.84	0.89	0.68	-0.16	0.62
Total	Mio m ³	45.82	66.36	56.36	54.37	-11.99	42.61
	Mio CHF	1.19	1.22	1.45	0.99	-0.23	1.11

5.2 Crue d'août 2005

5.2.1 Influence observée et optimisée des retenues d'accumulation

Les hydrogrammes observés, calculés sans retenues et calculés avec optimisation de la gestion des retenues pendant la crue d'août 2005 sont présentés à la figure 29. Pour les quatre points de contrôle considérés (Rossens, Fribourg, Laupen, jonction avec l'Aar), l'influence observée des aménagements hydroélectriques du Groupe E était quasi nulle. Le débit entrant dans le lac de Gruyère n'a pas été réduit par la retenue de Montsalvens, dont la production a été effectuée au fil de l'eau. A Fribourg, le débit observé était même légèrement supérieur au débit qui aurait été obtenu sans influence des retenues de Montsalvens et Rossens. Cela provient de l'opération de la retenue de Rossens lors de la crue, lorsque le débit de $681 \text{ m}^3/\text{s}$ évacué le 22.8.05 à 18 h était supérieur au débit entrant de $627 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une différence de $54 \text{ m}^3/\text{s}$.

La gestion optimisée des aménagements par un abaissement préventif des retenues de Montsalvens et Rossens 60 h avant la pointe de la crue aurait permis d'abaisser significativement le débit dans la Sarine et dans l'Aar. En effet, la retenue de Montsalvens aurait pu réduire le débit entrant dans le lac de Gruyère de $155 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une diminution de 24%. Avec une vidange de la retenue de Rossens à un débit de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ($70 \text{ m}^3/\text{s}$ par turbinage et $130 \text{ m}^3/\text{s}$ par la vanne de surface), la Sarine aurait pu être asséchée pendant la pointe de la crue le 22.8.05 à 18 h. Cela aurait eu pour conséquence une réduction du débit de pointe de $310 \text{ m}^3/\text{s}$ à Laupen, soit 33%, et de $416 \text{ m}^3/\text{s}$ ou 28% dans l'Aar à l'aval de la jonction avec la Sarine. Le turbinage en continu de Rossens aurait également été possible et le débit à Fribourg, Laupen et au canal de Hagneck aurait été augmenté de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ par rapport au débit optimisé calculé ici, ce qui n'aurait pas été un problème au vu de la capacité hydraulique de la Sarine et de l'Aar.

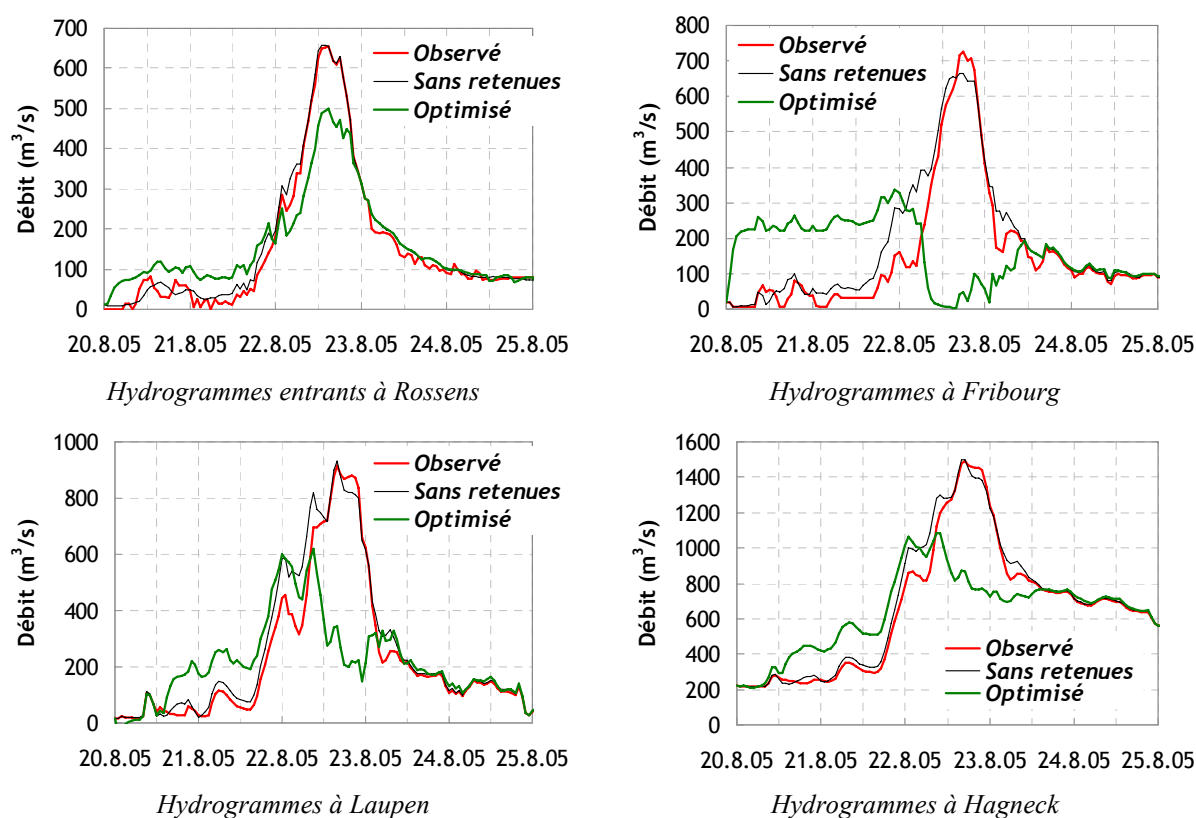


Figure 29 : Comparaison entre hydrogrammes observés, sans retenues et optimisés à quatre points de contrôle le long de la Sarine et de l'Aar.

Le tableau 9 synthétise les débits de pointe observés, calculés sans influence des retenues et optimisés.

Tableau 9 : Synthèse des débits de pointe observés (m^3/s), simulés sans aménagements et optimisés lors de la crue d'août 2005.

Scénario	Rossens	Fribourg	Laupen	Hagneck
Sans aménagements	658	666	930	1499
Observé	654	727	916	1489
Optimisé	500	339	620	1083
Réduction observée	0.06%	-9%	1.5%	0.7%
Réduction maximale	24%	49%	33%	28%

5.2.2 Analyse de sensibilité

Influence de Montsalvens

L'influence de la retenue de Montsalvens a été analysée par calcul des débits entrant dans le lac de Gruyère en fonction des opérations de vidange préventive de cet aménagement. Ces opérations ont été effectuées par turbinage ($25 \text{ m}^3/\text{s}$) et ouverture de la vanne de surface (de 15 à $89 \text{ m}^3/\text{s}$), en considérant les niveaux initiaux des retenues tels que mesurés le 20.8.05 à 0 h. Le turbinage observé effectué avant la crue était de 3.5 Mio m^3 .

Dans les figures 30 et 31 les débits entrants dans le lac de Gruyère sont présentés en fonction du volume évacué de la retenue de Montsalvens avant la crue. La durée de l'opération préventive a été gardée constante et égale à 2 jours et le débit total a été varié de 55.5 à $105.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Il est bien entendu possible de répartir autrement ces volumes dans le temps pour aboutir aux mêmes volumes évacués.

Dès un volume évacué de 11.5 Mio m^3 , le débit de pointe entrant dans le lac de Gruyère est réduit au minimum. Cela correspond à une réduction de 24%, soit $155 \text{ m}^3/\text{s}$. Toute opération préventive supplémentaire n'entraîne aucun gain marginal, mais contribue plutôt à remplir la retenue de Rossens, qui devra être gérée en conséquence.

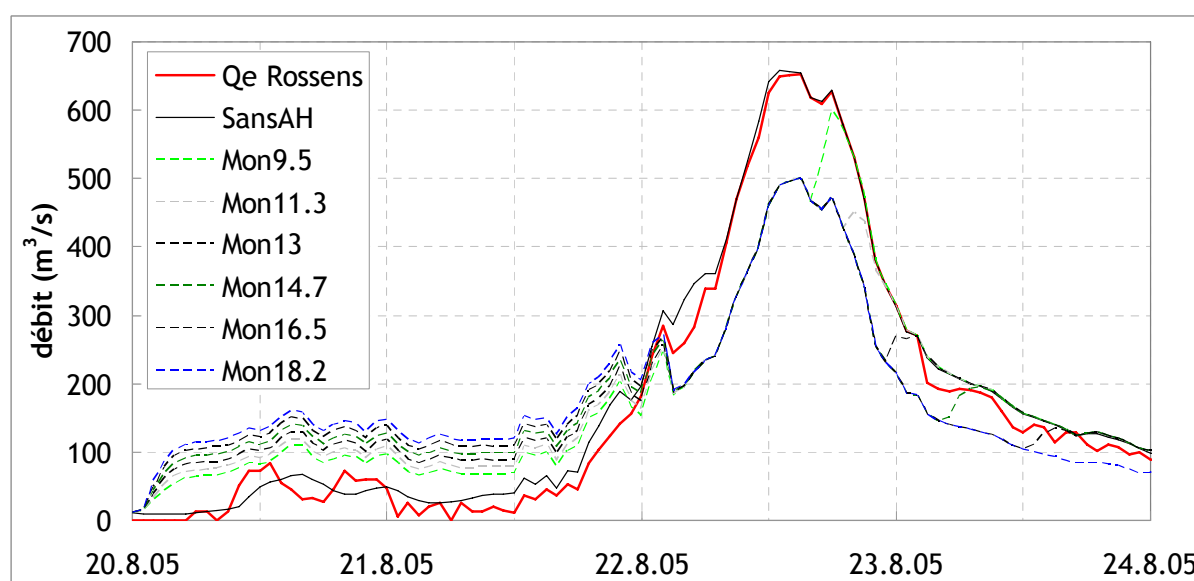


Figure 30 : Débits entrant dans la retenue de Rossens en fonction des opérations de vidange préventive de la retenue de Montsalvens, crue d'août 2005.

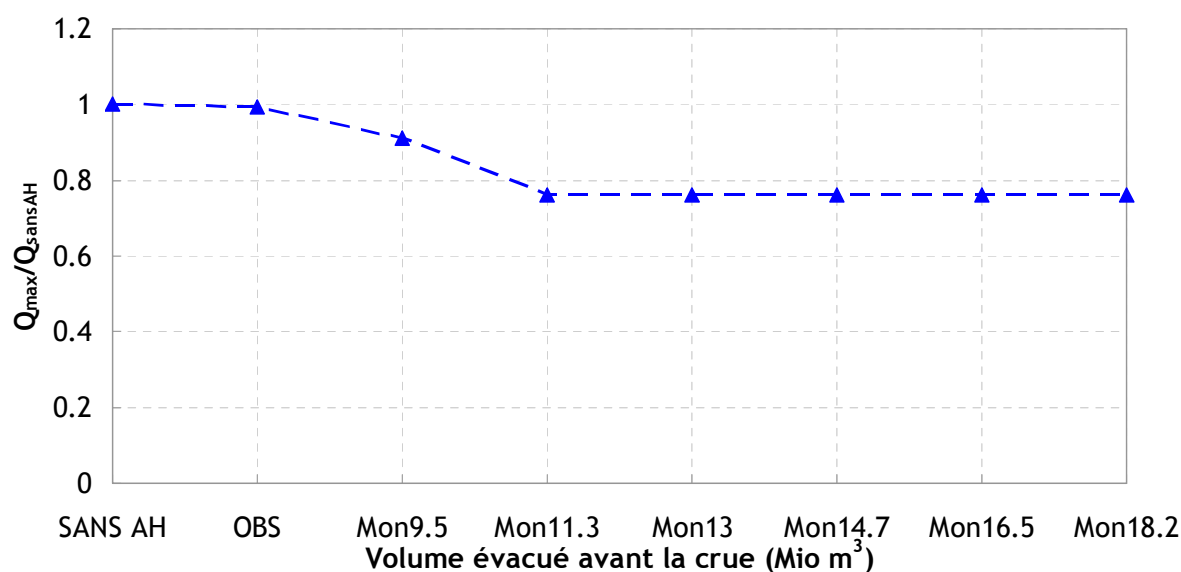


Figure 31 : Rapport entre le débit maximum entrant dans le lac de Gruyère et le débit maximum sans aménagements selon le volume évacué préventivement à Montsalvens, crue d'août 2005.

Influence de Rossens

L'analyse est à nouveau effectuée pour évaluer l'influence des opérations préventives de l'aménagement de Rossens sur le débit de la Sarine à Fribourg. La figure 32 montre que la vidange préventive de l'aménagement de Rossens et l'application du règlement d'exploitation auraient permis de ne pas dépasser le débit obtenu sans retenues. Une évacuation de 30.5 Mio m³ avant la crue aurait déjà permis de ramener le débit de pointe à Fribourg à 458 m³/s, soit une réduction de 37%. Le turbinage réellement effectué avant la crue a été de 8.4 Mio m³.

La figure 33 confirme ce résultat et montre que pour la crue d'août 2005, un volume supérieur à 30 Mio m³ aurait dû être évacué entre le 20.8 et le 22.8 pour obtenir une réduction significative du débit de pointe à Fribourg.

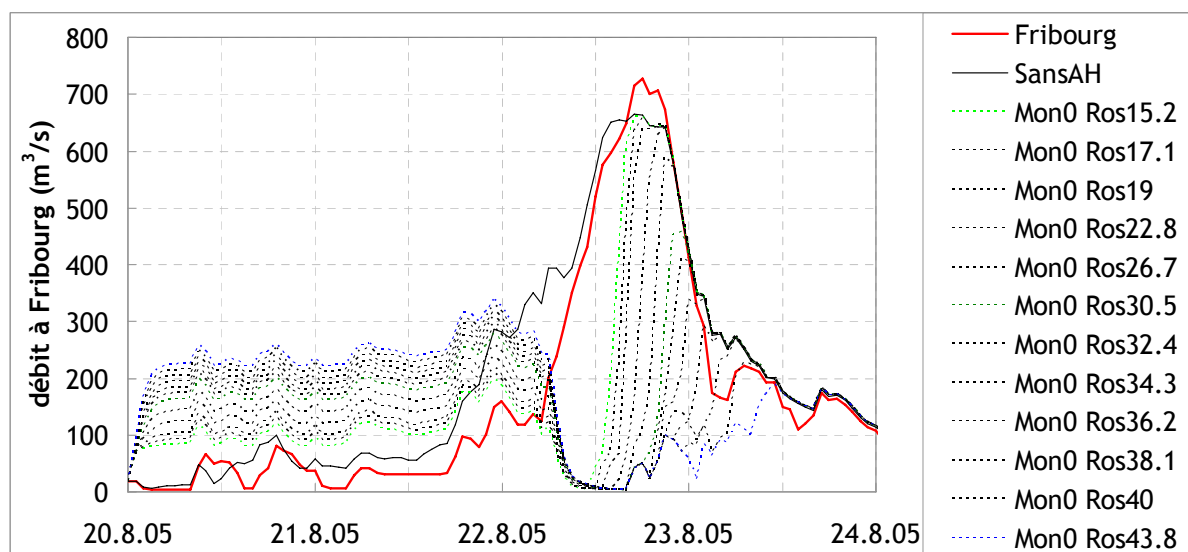


Figure 32 : Débits à Fribourg en fonction des opérations de vidange préventive de la retenue de Rossens, crue d'août 2005.

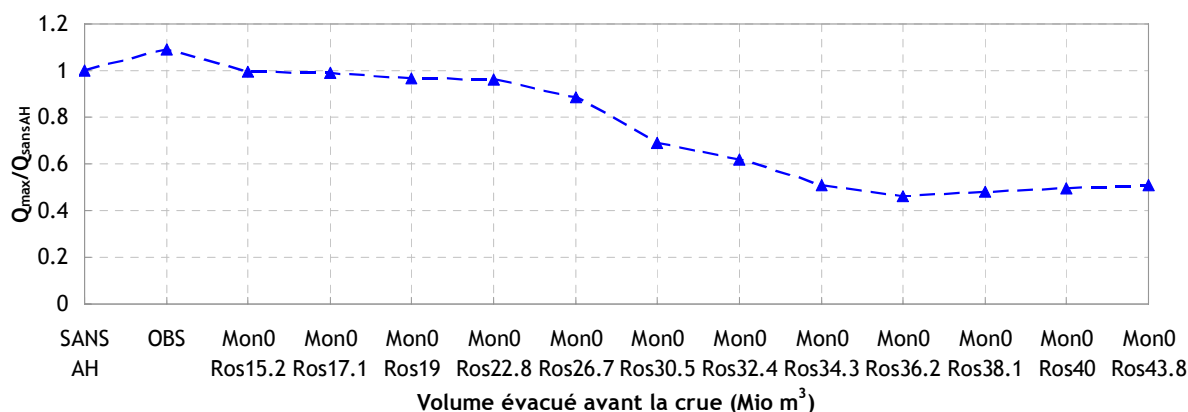


Figure 33 : Rapport entre le débit maximum à Fribourg et le débit maximum sans aménagements selon le volume évacué préventivement à Rossens, crue d'août 2005.

Montsalvens et Rossens

L'analyse a ensuite été effectuée en considérant les deux retenues de Montsalvens et Rossens. Celles-ci ont été préventivement abaissées dès le 20.8.05 à 0 h jusqu'au 22.8.05 à 6 h (figures 34 et 35). Le débit total dans la Sarine à Fribourg avant la pointe de crue atteint alors jusqu'à 280 m³/s.

Les résultats montrent que pour obtenir une réduction du débit à Fribourg de 100 m³/s environ, il faudrait évacuer 7.8 Mio m³ à Montsalvens et 34.3 Mio m³ à Rossens. La réduction du débit de pointe est alors maximale et vaut 390 m³/s, soit 54%. Il n'est ensuite plus utile d'abaisser davantage le niveau des retenues de Montsalvens et Rossens.

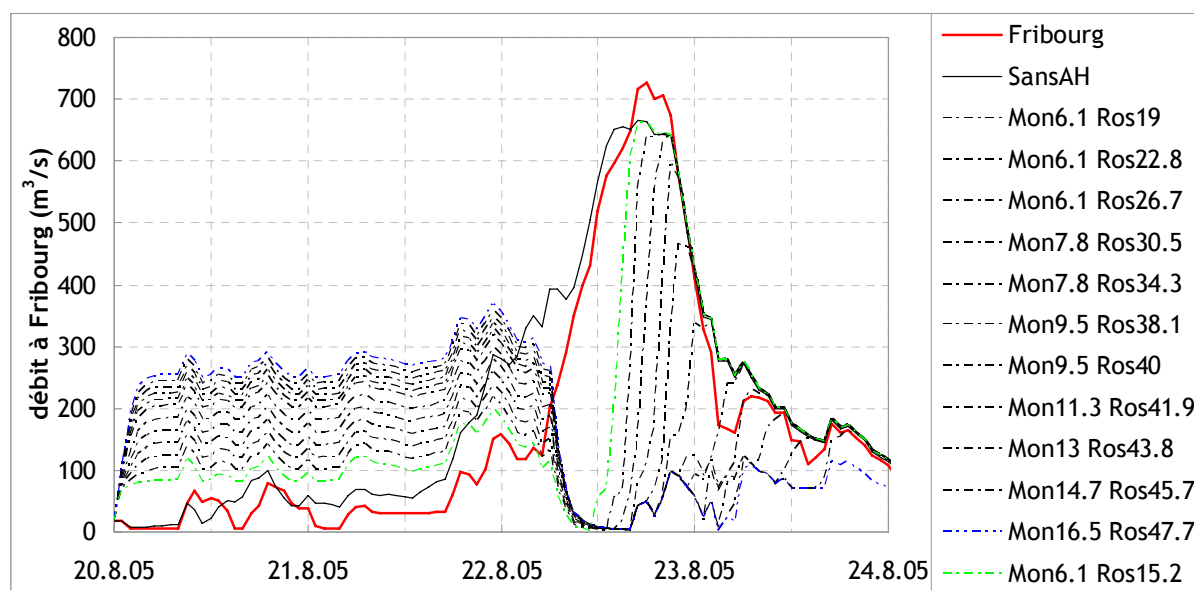


Figure 34 : Débits à Fribourg en fonction des opérations de vidange préventive de la retenue de Montsalvens et Rossens, crue de mai 1999.

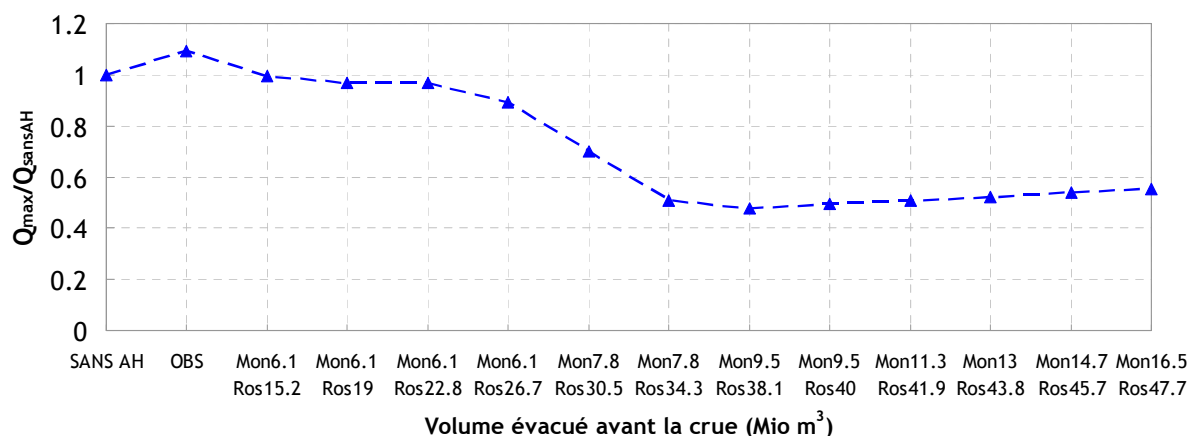


Figure 35 : Rapport entre le débit maximum à Fribourg et le débit maximum sans aménagements selon le volume évacué préventivement à Montsalvens et Rossens, crue d'août 2005.

L'analyse de la réduction du débit de pointe de l'Aar à Otlingen grâce aux opérations préventives de Montsalvens et Rossens montre que les effets sur le débit de l'Aar auraient été significatifs lors de la crue d'août 2005 (figures 36 et 37). Les résultats indiquent qu'une vidange préventive minimale de 6.1 et 15.2 Mio m³ à Montsalvens et Rossens respectivement aurait déjà permis de réduire le débit de pointe de l'Aar de près de 105 m³/s, soit 10%. Cela correspond environ au double des volumes effectivement évacués avant la crue (3.4 et 8.4 Mio m³ à Montsalvens et Rossens respectivement).

L'évacuation préventive de 7.8, respectivement 30.5 Mio m³ à Montsalvens et Rossens avant la crue aurait permis d'atteindre la réduction optimale du débit de pointe dans l'Aar de 404 m³/s, soit 27%.

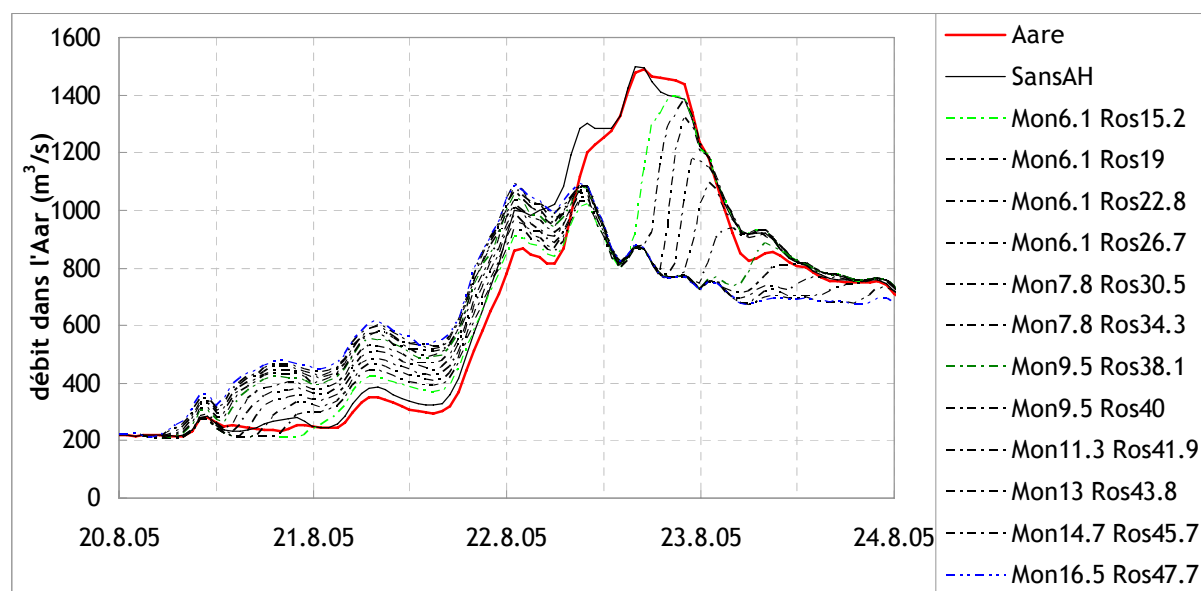


Figure 36 : Débits dans l'Aar à Otlingen en fonction des opérations de vidange préventive des retenues de Montsalvens et Rossens, crue d'août 2005.

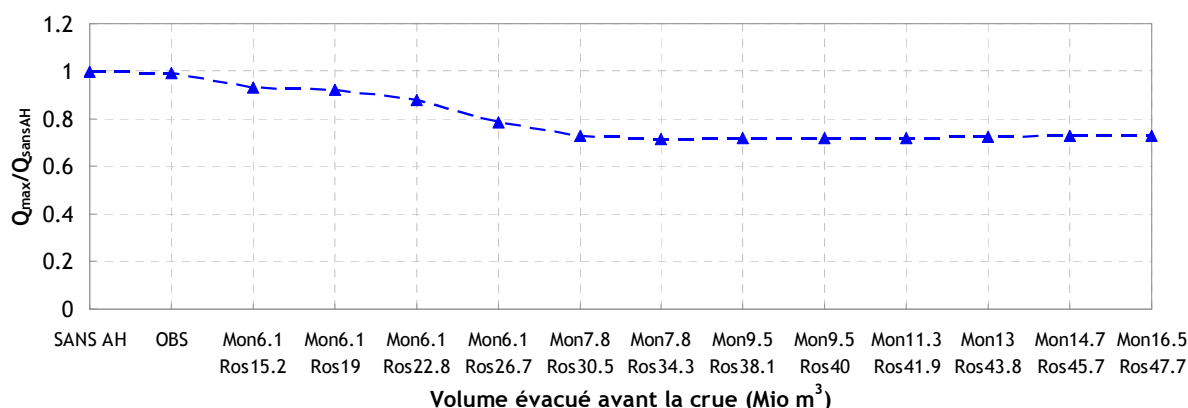


Figure 37 : Rapport entre le débit maximum dans l'Aar (Otlingen) et le débit maximum sans aménagements selon le volume évacué préventivement à Montsalvens et Rossens, crue de mai 1999.

Commentaires

Les analyses présentées dans ce chapitre confirment les résultats obtenus pour la crue de mai 1999. En effet, malgré un volume de crue beaucoup plus important en août 2005, les retenues de Montsalvens et Rossens sont en mesure d'influencer fortement le débit de pointe dans la Sarine et l'Aar. A nouveau, quelques points méritent d'être relevés :

1. Seuls les aménagements de Montsalvens et Rossens peuvent être utilisés pour contrôler les débits de crue. Leur influence peut être significative et contribuer à limiter les dégâts aux abords de la Sarine et de l'Aar.
2. La vidange préventive de Montsalvens permet de limiter les débits de pointe de la Jogne à l'amont de Rossens mais le volume évacué alimente la retenue de Rossens. Il doit donc être directement transféré à l'aval. L'opération peut quand même se révéler utile puisqu'elle offre de la marge dans le stockage total (8 Mio m³)
3. 40 Mio m³ évacués avant la crue ne doivent pas faire monter le niveau du lac de Bienne. Il faut donc directement les laisser transiter plus en aval. Dans le cas contraire, le niveau du lac de Bienne peut devenir une contrainte de l'optimisation des opérations préventives et limiter son efficacité. Ce problème doit être examiné plus en détail.
4. Le débit observé à Fribourg a été déterminé d'après les données de l'OFEV. Il semble que ce débit ait été surévalué de 60 m³/s environ (LCH, 2006), mais cela ne remet pas en cause l'influence de la retenue de Rossens sur les débits de pointe. En effet, les calculs étant effectués par différence entre deux modèles, le résultat de ces différences aurait été exactement le même. La retenue de Rossens possède donc bien le potentiel pour déduire une crue comme celle de 2005 de 80 à 400 m³/s selon l'opération préventive effectuée.

5.2.3 Analyse coût-bénéfice

L'analyse coût-bénéfice a été appliquée à la crue d'août 2005 et les résultats sont synthétisés au tableau 9. Il montrent que les opérations préventives auraient permis d'une part d'augmenter les revenus de la production hydroélectrique, et d'autre part de limiter les volumes déversés et vidangés par les ouvrages de décharge. Cela provient de la faible production observée durant les 20 et 21 août 2005.

Si la crue ne s'était jamais produite et que les opérations préventives complètes avaient effectivement été réalisées, la perte maximale par lâcher d'eau aurait été de 0.91 Mio CHF, ce qui correspond à un volume de 36.22 Mio m³ non vendu à 11 ct./kWh.

Tableau 10 : Coût des opérations préventives des aménagements de Montsalvens et Rossens lors de la crue d'août 2005, comparaison entre opérations observées et optimisées.

		Observé		Optimisé		Revenu	Perte
		Vidanges	Turbines	Vidanges	Turbines	total	maximale
Montsalvens	Mio m ³	12.77	11.84	11.58	12.94	1.1	7.06
	Mio CHF	0.37	0.26	0.34	0.26	0	0.21
Rossens	Mio m ³	43.13	21.86	35.04	37.80	15.94	29.16
	Mio CHF	1.03	0.58	0.84	0.65	0.07	0.70
Total	Mio m ³	55.90	33.7	46.62	50.74	17.04	36.22
	Mio CHF	1.40	0.84	1.18	0.91	0.07	0.91

6 INTERET D'UN MODELE DE PREVISION HYDROLOGIQUE

6.1 Discussion

L'intérêt d'un outil de prévision hydrologique pour la gestion des aménagements hydroélectriques de la Sarine en situation de crue dépend de plusieurs facteurs. Les plus importants peuvent se résumer comme suit :

- Performance potentielle des aménagements existants pour le contrôle des crues de la Sarine et de l'Aar
- Délai d'anticipation nécessaire pour les opérations de vidange préventive
- Potentiel de dégâts à l'aval des retenues
- Sensibilité de l'opération de vidange préventive à l'incertitude de prévision hydrologique
- Coût et risque associés aux opérations préventives inappropriées

Suite à l'analyse présentée au chapitre 5, il ressort que la performance potentielle des retenues de Montsalvens et Rossens pour le contrôle des crues est très importante. En effet, des réductions de 40% des débits de pointe de la Sarine et 30% sur l'Aar peuvent être atteintes pour des crues de temps de retour de 50-100 ans environ.

Le délai d'anticipation nécessaire est d'environ 48 h si les débits dans les cours d'eau lors des opérations préventives doivent être limités. Il peut être plus court comme le montre l'analyse présentée au point 6.2. Un modèle de prévision hydrologique peut donc être utilisé pour permettre la gestion optimale des retenues lors des crues.

Le potentiel de dégâts à l'aval des retenues est important, en particulier à Fribourg. L'Aar peut également être fortement soulagée, même en amont de sa jonction avec la Sarine en raison de la courbe de remous provoquée à cet endroit. Si le volume évacué préventivement de Rossens est directement transféré à l'aval des Trois Lacs, les débordements du lac de Bienné peuvent être fortement limités lors de la crue, car pas moins de 30-50 Mio m³ ne seront plus acheminés dans ce lac lors de la crue.

La sensibilité de la vidange préventive en fonction de l'incertitude de prévision ne peut être évaluée dans ce travail. Cependant, il convient de noter qu'une vidange préventive trop faible sera toujours meilleure que pas de vidange préventive du tout : elle permettra au moins de retarder l'échéance des débordements éventuels. En raison des règlements d'exploitation, une telle opération ne risque pas d'augmenter les dégâts à l'aval de la retenue de Rossens, puisque le débit entrant doit être évacué lors de la crue et non un débit supérieur. De plus, une vidange préventive excessive provoquera éventuellement des pertes économiques si la retenue ne se remplit pas totalement pendant la crue. Toutefois, les bassins versants de la Jogne et de la Sarine à l'amont de Montsalvens et Rossens possèdent une grande surface et même des crues "avortées" comme celle de 2006 apportent d'importants volumes dans ces retenues.

Finalement, les coûts directement associés aux opérations préventives ne résultent que de l'interdiction de turbiner pendant la pointe de la crue. Il s'agit donc d'un manque à gagner et non d'une perte. Pour autant que les prix de vente de l'électricité soient faibles à ce moment (ce qui est probable en situation de crue), le manque à gagner se transformera au moins en résultat neutre selon l'exploitation de la retenue. A l'inverse, si la vidange préventive ne peut pas être compensée en raison d'apports trop faibles pendant la crue, les pertes pourraient atteindre au maximum CHF 1 Mio.

Pour connaître exactement les risques associés à la mise en place d'un tel système, il faudrait disposer d'un outil de prévision hydrologique et le tester avec l'utilisation des prévisions météorologiques réelles.

6.2 Délais d'anticipation minimaux

Les outils de prévisions météorologiques disponibles sur le marché sont nombreux. Les plus appropriés se trouvent certainement chez MétéoSuisse, puisqu'il s'agit du fournisseur local, dont les modèles sont développés pour une utilisation en Suisse. Parmi ceux-ci, les prévisions ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) sont disponibles 10 jours en avance et produisent 50 réalisations (prévisions météorologiques) à une résolution spatiale de 40 km. Ensuite, MétéoSuisse dispose de prévisions probabilistes 5 jours en avance à une résolution spatiale de 10 km : il s'agit du produit COSMO-LEPS, qui fournit 10 réalisations obtenues à partir des 50 simulations ECMWF. Enfin, le modèle opérationnel aLMo (aLpine Model) fournit des prévisions déterministes 72 h en avance à une résolution de 7 km (Figure 38).

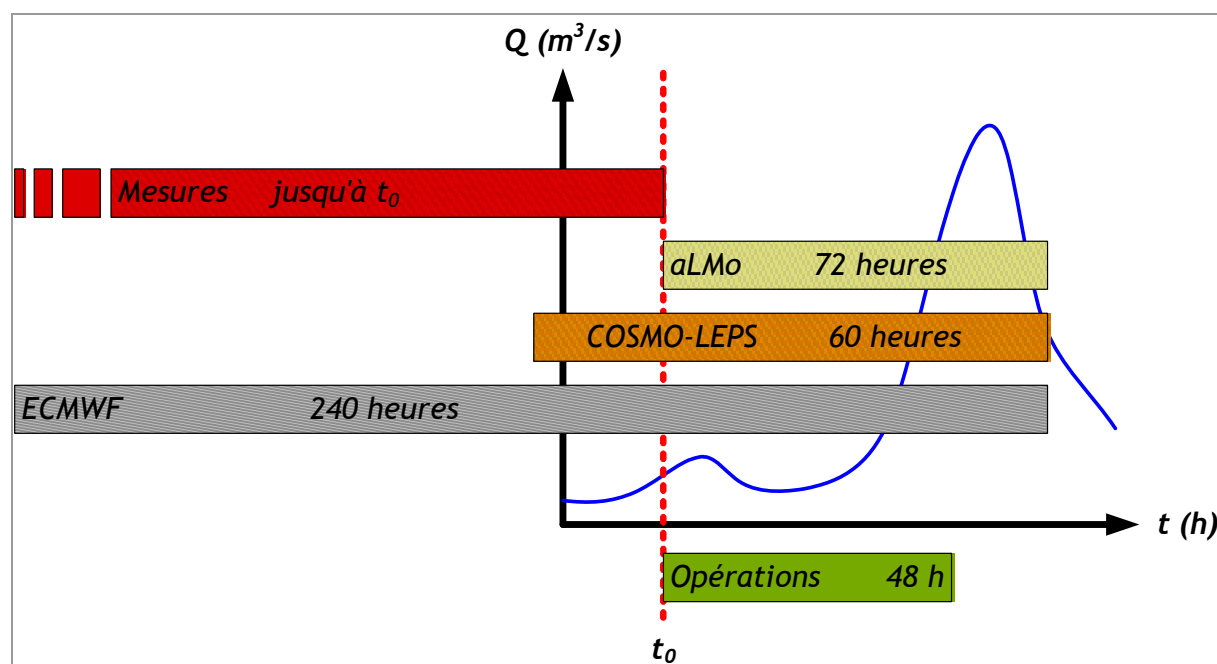


Figure 38 : Schéma présentant les délais disponibles selon les produits de prévisions météorologiques de MétéoSuisse.

Soit une prévision hydrologique disponible au temps t_0 : sur la base d'une prévision météorologique aLMo, la pointe de crue apparaîtra sur la prévision au plus tôt 60 heures avant sa réalisation, en tenant compte du délai opérationnel (7 heures environ) pour disposer des données. Cela laisse encore 50 heures avant que le débit dans le cours d'eau ne commence à monter. Il est alors possible d'attendre la prévision suivante, arrivant 12 heures plus tard, pour

décider d'une opération préventive. Cela laisse suffisamment de temps pour effectuer une vidange préventive permettant une protection optimale du bassin versant. Cette manoeuvre peut d'ailleurs être réévaluée par l'observation des mesures de débit et des précipitations avant de considérer la dernière prévision météorologique.

6.3 Situation en août 2005

Selon le rapport de MétéoSuisse suite à l'avis de fortes précipitations (*MétéoSuisse, 2005*), l'avis a été émis le 21 août à 17h20 pour la période du 21.8.05 à 18h00 au 22.8.05 à 18h. Cependant, les simulations ECMWF montraient dès le run du 18.8.05 à 12h que des fortes précipitations allaient s'abattre sur le Nord des Alpes. Dès le 19.8.05 à 12h, la localisation précise des précipitations au Nord des Alpes était simulée. Enfin, le modèle aLMO a fourni ses plus fortes valeurs lors du run du 20.8.05 à 12h.

En considérant que les simulations ont été effectuées dès le 20.8.05 à 21h (2h de décalage horaire et 7 heures de délai opérationnel), les débits de pointe pouvaient encore parfaitement être contrôlés en utilisant les turbines et vidanges de Montsalvens et Rossens. La figure 39 illustre les hydrogrammes tels qu'ils auraient pu être influencés par des opérations préventives effectuées dès le 20.8.05 à 21 h. Ces opérations consistent en un turbinage à pleine puissance (25.5 et 70 m³/s à Montsalvens et Rossens) et en une ouverture des ouvrages de vidange à des débits de 89 et 150 m³/s à Montsalvens et Rossens. Cela aurait permis la stabilisation du débit à 300 m³/s à Fribourg, 700 m³/s à Laupen et moins de 1200 m³/s dans l'Aar, soit une réduction de 300 m³/s ou 20%.

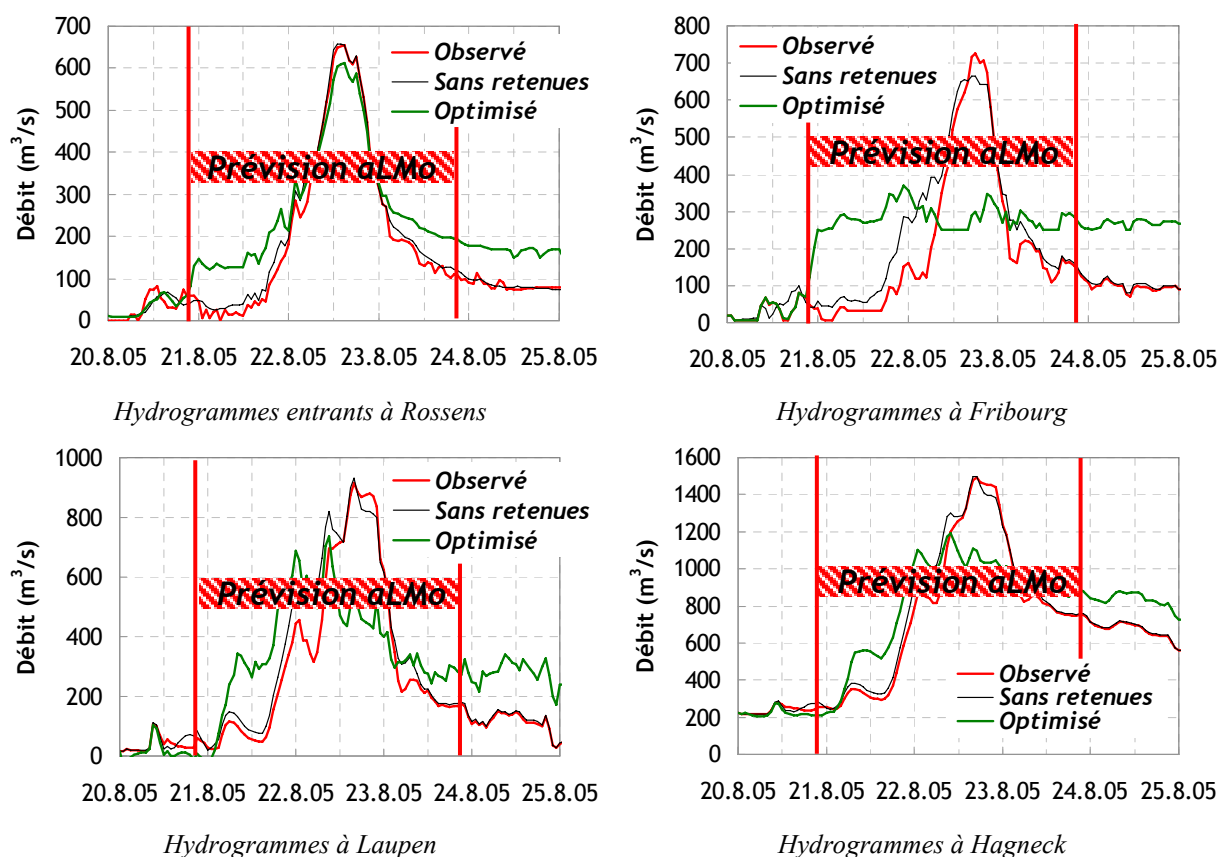


Figure 39 : Comparaison entre hydrogrammes observés, sans retenues et optimisés à quatre points de contrôle le long de la Sarine et de l'Aar. Début des opérations préventives selon prévisions météorologiques le 20.8.05 à 21 h.

Imaginons maintenant que la décision n'ait été prise qu'à la suite de l'avis de fortes précipitations du 21.8.05 à 18 h. Les opérations auraient pu immédiatement être effectuées et les hydrogrammes correspondants sont présentés à la figure 40. Les résultats indiquent que les débits pouvaient encore être réduits à Fribourg, Laupen et dans l'Aar. Les opérations préventives considérées sont le turbinage à plein régime des deux retenues dès le 21.8.05 à 18 h et l'ouverture des vidanges (89 et 250 m³/s pour Montsalvens et Rossens respectivement) au même moment. Le débit de pointe à Fribourg restait ainsi inférieur à 500 m³/s et dans l'Aar il atteignait 1258 m³/s.

Si la crue n'était pas venue, les pertes auraient été limitées à une borne supérieure de $0.22 + 0.52 = 0.74$ Mio CHF.

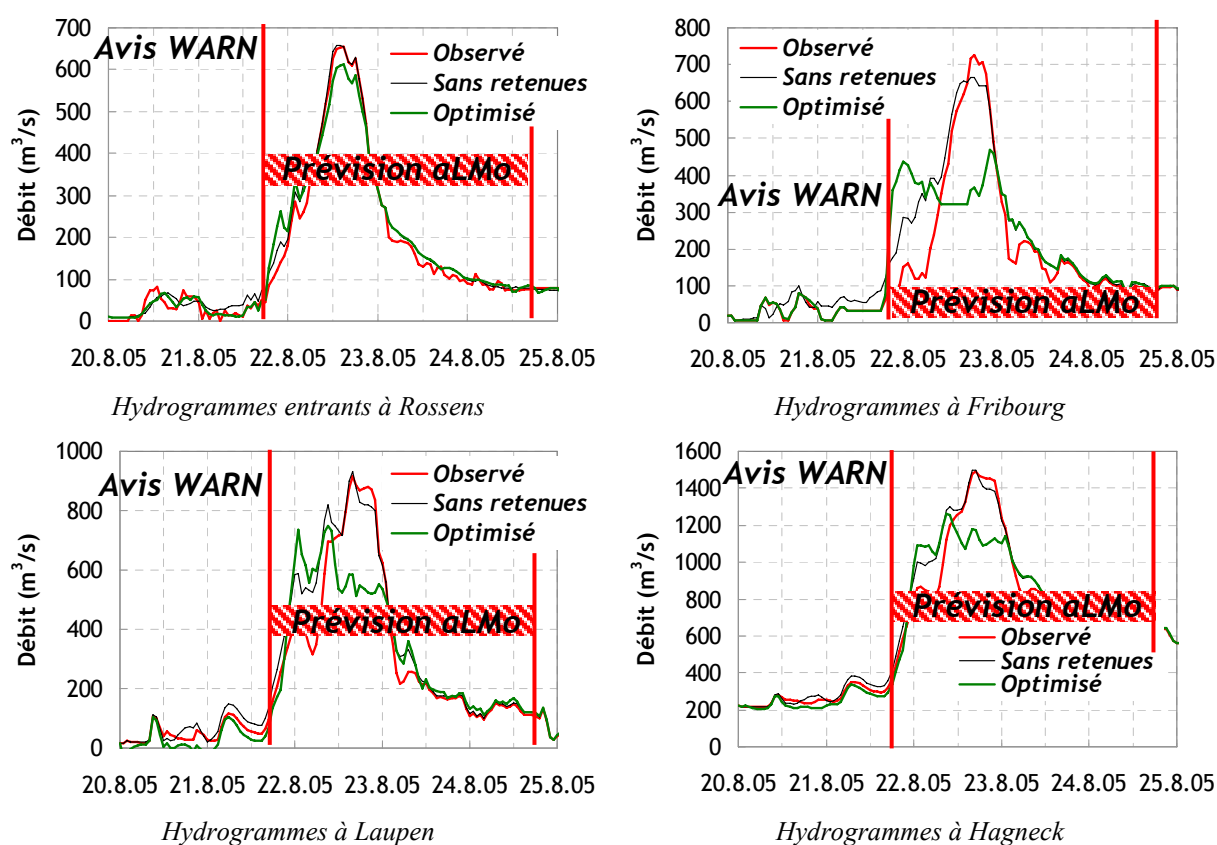


Figure 40 : Comparaison entre hydrogrammes observés, sans retenues et optimisés à quatre points de contrôle le long de la Sarine et de l'Aar. Début des opérations préventives avis WARN du 21.8.05 à 18h.

7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'analyse des situations météorologiques conduisant à des crues ainsi que l'étude de faisabilité d'un contrôle des crues par abaissement préventif du niveau des retenues présentes le long de la Sarine ont été effectuées par modélisation hydraulique des bassins versants de la Sarine et de la Singine jusqu'à leur embouchure dans l'Aar à Otlingen.

L'analyse des situations météorologiques lors des crues de mai 1999, août 2005 et avril 2006 a montré que différentes configurations des variables météorologiques peuvent provoquer des événements de crue importants. Les situations de Nord-Ouest associées à des fortes précipitations ainsi qu'à de la fonte de neige au printemps apportent des volumes très importants à partir des Alpes vaudoises et bernoises. Les coefficients de ruissellement peuvent alors être supérieurs à l'unité. Les situations de barrage du Nord estivales, avec composante convective, peuvent également mener à d'intenses précipitations de longue durée sur le Nord des Alpes. Les débits peuvent alors se former sur le plateau, où les sous-bassins versants ont de grandes surfaces.

La Sarine est un bassin versant de plus de 1860 km² son débit peut atteindre des valeurs de près de 900 m³/s à Laupen lors d'une crue de temps de retour entre 50 et 100 ans. Elle constitue un affluent important de l'Aar et le contrôle de son débit lors des crues permet de fortement décharger l'Aar dès sa jonction et jusqu'au lac de Bienne. Lors des dernières crues, la Sarine a en effet fourni plus de la moitié du débit de pointe total de l'Aar à l'entrée du canal de Hagneck.

La présence des aménagements hydroélectriques à accumulation du Groupe E le long de la Sarine peut contribuer à réduire significativement les débits de pointe dans la Sarine. L'ordre de grandeur réaliste, estimé en tenant compte des délais opérationnels liés à une prévision hydrologique, est une réduction de 40% du débit de pointe de la Sarine à Fribourg et de 20% du débit de pointe de l'Aar à l'entrée du canal de Hagneck. Un délai opérationnel même inférieur à 24 h avant la pointe de la crue est suffisant pour maintenir des crues centennales de la Sarine et de l'Aar à des débits inférieurs au seuil de débordement.

Le contrôle des crues par abaissement préventif des retenues d'accumulation de la Sarine doit cependant respecter quelques règles :

1. Seuls les aménagements de Montsalvens et Rossens font l'objet d'une opération spéciale lors des crues et sont utilisés pour stocker un volume d'eau.
2. Le turbinage seul ne suffit pas : en plus du turbinage à plein régime, l'ouverture des vidanges doit être effectuée pour abaisser suffisamment le plan d'eau des retenues. Pour un délai opérationnel de 36 h, les ordres de grandeur sont 89 m³/s à Montsalvens et 200 m³/s à Rossens. Avant de débiter ces opérations, la sécurité du cours d'eau doit être assurée et l'évacuation des personnes se trouvant à proximité du lit de la Sarine doit impérativement être effectuée.
3. La capacité hydraulique des cours d'eau à l'aval des retenues ne doit pas être dépassée par l'utilisation des vidanges avant que la crue ne se produise.
4. Si la retenue de Montsalvens est vidangée préventivement, la retenue de Rossens doit être vidée en conséquence de manière à ne pas provoquer son débordement avant l'arrivée de la crue.

5. Le même principe s'applique pour le lac de Bienne qui doit pouvoir évacuer le volume provenant de Rossens avant que la crue ne parvienne au canal de Hagneck, de façon à disposer de son volume de stockage pendant la pointe de crue et ne pas être en surcharge au début de l'événement.

Pour pouvoir réaliser une telle stratégie de manière opérationnelle, les autorités doivent disposer d'un outil de prévision hydrologique basé sur des prévisions météorologiques spatialement distribuées, telles que celles fournies par MétéoSuisse, au minimum 72 h en avance. Cet outil doit fournir, au minimum, les débits entrant prévisibles dans les retenues de Montsalvens et Rossens, ainsi que les débits prévus à Fribourg, Laupen et Hagneck. Ce modèle devrait fonctionner en continu, car les informations prévisionnelles optimales peuvent être obtenues avant l'émission d'un avis WARN de la part de MétéoSuisse. Un tel modèle serait ainsi capable de déterminer des stratégies de gestion des crues moins précipitées, car applicables dans un meilleur délai avant l'arrivée de la crue.

Au vu du potentiel de protection de la Sarine et de l'Aar qu'offrent les retenues de Montsalvens et Rossens, le Laboratoire de Constructions Hydrauliques recommande le développement et la mise en place d'un système de prévision hydrologique intégrant les aménagements hydroélectriques du Groupe E et fonctionnant en continu.

La construction des modèles, les développements et l'analyse ont été réalisés par MM. Javier García Hernández et Frédéric Jordan, ingénieurs au Laboratoire de Constructions Hydrauliques, et le rapport a été rédigé par M. Frédéric Jordan.

LCH-EPFL

Le directeur

Le responsable des mandats

Prof. Dr A. Schleiss

Dr Jean-Louis Boillat

REFERENCES

- Boillat J.-L. (2005). " L'influence des retenues valaisannes sur les crues - le projet MINERVE", Communication du Laboratoire de Constructions Hydrauliques n°21, Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la 3e Correction du Rhône - Nouveaux développements dans la gestion des crues, Ed. A. Schleiss, Martigny, pp. 133-145.
- Dubois J. (2005). "Simulation des systèmes hydrauliques et hydrologiques complexes: Routing System II", Communication du Laboratoire de Constructions Hydrauliques n°21, Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la 3e Correction du Rhône - Nouveaux développements dans la gestion des crues, Ed. A. Schleiss, Martigny, pp. 133-145.
- Groupe E (2006). "Guide technique hydraulique - Service de Quart, aménagement de Rossinière", DPE Gestion Production, rapport non publié, Fribourg
- Groupe E (2006). "Guide technique hydraulique - Service de Quart, aménagement de Lessoc", DPE Gestion Production, rapport non publié, Fribourg
- Groupe E (2006). "Guide technique hydraulique - Service de Quart, aménagement de Montsalvens", DPE Gestion Production, rapport non publié, Fribourg
- Groupe E (2006). "Guide technique hydraulique - Service de Quart, aménagement de Rossens", DPE Gestion Production, rapport non publié, Fribourg
- Groupe E (2006). "Guide technique hydraulique - Service de Quart, aménagement de la Maigrauge", DPE Gestion Production, rapport non publié, Fribourg
- Groupe E (2006). "Guide technique hydraulique - Service de Quart, aménagement de Schiffenen", DPE Gestion Production, rapport non publié, Fribourg
- Jordan F. (2005). "Gestion des crues par opérations préventives sur les aménagements hydroélectriques à accumulation", Communication du Laboratoire de Constructions Hydrauliques n°21, Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la 3e Correction du Rhône - Nouveaux développements dans la gestion des crues, Ed. A. Schleiss, Martigny, pp. 121-132
- Jordan F., Boillat, J.-L., Dubois, J., et Schleiss, A. (2006). "Prévision et gestion des crues par opérations préventives sur les retenues alpines", Proc., Vingt Deuxième Congrès des Grands Barrages, CIBG/ICOLD, Barcelone, pp. 497-510.
- LCH (2006). "Crue de la Sarine du 22 août 2005 à la Maigrauge (Fribourg)", rapport d'expertise LCH 13/2006, non publié, Lausanne
- Shepard D. (1968). "A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data", Proc., 23th Conference ACM, 517-524
- MétéoSuisse (2005). "Rapport de l'avis WARN du 22 août 2005", rapport non publié, MétéoSuisse, Genève
- MétéoSuisse (2006). "Rapport de l'avis WARN du 9/10 avril 2006", rapport non publié, MétéoSuisse, Genève