

Ecole Nationale Supérieure d'Electronique, d'Electrotechnique, d'Informatique,
d'Hydraulique et des Télécommunication de Toulouse

Département Hydraulique et Mécanique des Fluides



ETUDE DES STRATEGIES DE COUPLAGE ENTRE UN MODELE HYDROLOGIQUE ET UN MODELE HYDRAULIQUE

**Application à la modélisation-semi distribuée du bassin
versant du Serein**

Florent Lobligeois

Tuteur : Julien Lerat

Rapport de stage de 3^{ème} année

Stage réalisé du 17/03/2008 au 12/09/2008



Remerciements

Je tiens à remercier très chaleureusement Julien Lerat, mon tuteur, pour sa disponibilité, sa patience et ses conseils qui m'ont permis d'acquérir les concepts de l'hydrologie.

Je remercie mes collègues de bureau Lionel Berthet, Pierre Javelle, Audrey Valéry, Nicolas Lemoine et Pierre-François Staub pour leurs astuces et leur bonne-humeur.

Je remercie aussi mes collègues stagiaires Baudouin Saint-Yves et Adnan Tahir pour leur solidarité et amicalité.

Je remercie très sincèrement Vasken Andréassian et Charles Perrin pour tout l'intérêt qu'ils ont porté à mon avenir, et ma formation à l'hydrologie.

Je souhaite aussi remercier la Direction Régionale de l'Environnement en Ile-de-France et Météo-France pour la mise à disposition des données pluviométriques et hydrométriques indispensables dans le cadre de ce stage.

Résumé

Le Serein est un affluent de l'Yonne, bassin contribuant de manière significative aux crues de la Seine à Paris. Cet aspect demande une attention particulière pour les prévisionnistes de la Direction Régionale de l'Environnement Ile-de-France (DIREN) chargé de la prévision des crues dans la région parisienne.

Le Serein qui contribue à la formation des crues de l'Yonne montre des mécanismes de propagation des crues complexes qui ne semblent pas liées à l'hétérogénéité spatiale des précipitations. Ainsi, le CEMAGREF a décidé de proposer une étude pour mieux comprendre l'hydrologie et l'hydraulique de ce bassin et explorer différentes solutions de couplage entre les outils classiques en modélisation.

Le modèle hydrologique GR4J sera utilisé pour générer les apports latéraux. Deux modèles hydrauliques permettront de propager ces apports vers l'exutoire du bassin: le modèle hydraulique simplifié d'Hayami (onde diffusante à célérité et diffusion constante) et un modèle hydraulique complet développé sous le logiciel HEC-RAS. La modélisation couplée sera évaluée sur des événements observés en suivant un protocole de calage/validation sur des événements indépendants.

L'objectif final de ce travail est de proposer une stratégie optimale de couplage entre les deux types d'outils.

Abstract

The Serein River is a tributary of the Yonne River which contributes to the floods of the Seine in Paris. This may cause significant problems in terms of operational forecasts for the flood forecasting service (based at the Regional Direction for Environment – DIREN) in charge of flood forecasting in the Paris area.

The Serein River which contributes to the floods of the Yonne shows complex generation mechanisms and propagation of floods. This complexity does not seem to originate from the spatial distribution of rainfall. Thus, The CEMAGREF decided to carry out a study to better understand the hydrological and hydraulic behaviour of the catchment and to study different simulation schemes that couple usual modelling tools.

The hydrologic GR4J model will be used to generate lateral inflows. Two hydraulic models will use the wave propagation of the lateral inflow: the simplified hydraulic Hayami model (analytical solution for the diffusive wave flood) and the fully dynamic hydraulic model HEC-RAS. The coupled model is evaluated on past observed events in validation.

The aim of this study is to find the best simulation scheme of the coupled model between the hydrologic and hydraulic modelling tools.

KEYWORDS : COUPLAGE HYDROLOGIE-HYDRAULIQUE, HAYAMI, MODELISATION SEMI-DISTRIBUEE

REMERCIEMENTS	3
RESUME	5
ABSTRACT	5
INTRODUCTION	8
1 PRESENTATION GENERALE DU SEREIN	9
1.1 GEOGRAPHIE, GEOLOGIE ET STATIONS DE MESURES DU SEREIN	9
1.2 SINGULARITES HYDRAULIQUES REMARQUABLES	11
1.3 LES CRUES DU SEREIN	11
2 ETUDE DE L'IMPACT DES PRECIPITATIONS SUR LES PHENOMENES D'AMPLIFICATION ET D'ATTENUATION DES CRUES	12
2.1 METHODOLOGIE	12
2.1.1 Choix des crues	12
2.1.2 Comparaison avec les pluies	13
2.2 ETUDE SUR CINQ CRUES SELECTIONNEES	14
2.2.1 Crue de Janvier 1998	14
2.2.2 Crue de Février 1999	15
2.2.3 Crue de Mars 1999	15
2.2.4 Crue de Décembre 1999	16
2.2.5 Crue de Février 2002	17
2.3 SYNTHESE	17
3 MODELISATION HYDROLOGIQUE GLOBALE	19
3.1 PRESENTATION DU MODELE	19
3.1.1 Structure du modèle	19
3.1.2 Calage et validation du modèle	20
3.1.3 Evaluation du modèle	21
3.2 METHODOLOGIE	22
3.3 EVALUATION DES SIMULATIONS	22
4 MODELISATION HYDROLOGIQUE COUPLEE AVEC LE MODELE HYDRAULIQUE SIMPLIFIE HAYAMI	24
4.1 METHODOLOGIE DE LA MODELISATION SEMI-DISTRIBUEE	24
4.1.1 Définition de la semi-distribution	24
4.1.2 Construction de la distribution	25
4.2 MODELE HYDROLOGIQUE	26
4.3 PRESENTATION DU MODELE DE PROPAGATION HYDRAULIQUE HAYAMI	27
4.3.1 Solution analytique	27
4.3.2 Applicabilité du modèle Hayami	28
4.3.3 Calage des paramètres	28
4.4 RESULTATS DES DIFFERENTS CALAGES DU MODELE SEMI-DISTRIBUE	29
4.4.1 Calage avec un jeu de paramètre de GR4J identique sur tous les sous-bassins	29
4.4.2 Calage du paramètre X4 optimisé sur chaque sous-bassin	30
4.4.3 Calage du paramètre X2 optimisé sur chaque sous-bassin	33
4.4.4 Synthèse	36
5 MODELISATION HYDROLOGIQUE COUPLEE AVEC LE MODELE HYDRAULIQUE HEC – RAS 38	38
5.1 CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE AVEC HEC-RAS	38
5.1.1 Conditions du calcul et équations mises en jeu	38
5.1.2 Définition de la géométrie du cours d'eau	39
5.1.3 Conditions limites et conditions initiales	39
5.2 RESULTATS DE LA MODELISATION	39
5.2.1 Méthodologie	40
5.2.2 Calage du Strickler	41
5.2.3 Localisation d'un tronçon de rivière anormalement dissipatif	42
CONCLUSION	44

BIBLIOGRAPHIE	45
ANNEXE 1 : GLOSSAIRE.....	46
ANNEXE 2 : RAPPORT DU BRGM SUR LES PERTES DU SEREIN.....	47
ANNEXE 3 : DONNEES DES CRUES DU SEREIN	48
ANNEXE 4 : HYDROGRAMMES DES CINQ CRUES ETUDIEES.....	49
ANNEXE 6 : COMPLEMENTS SUR LE MODELE HYDROLOGIQUE GR4J	54
ANNEXE 7 : MODELE HAYAMI : INFLUENCE DES PARAMETRES ET DU CALAGE.....	57
ANNEXE 8 : HYDROGRAMMES DES DIFFERENTES MODELISATIONS POUR LES CINQ CRUES DE REFERENCE.....	59
ANNEXE 9 : SURFACE DES BASSINS INTERMEDIAIRES D'APPORTS DIFFUS	61
ANNEXE 10 : PROFILS EN TRAVERS DU SEREIN.....	62

INTRODUCTION

Le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable a engagé une réforme en profondeur visant à passer de l'ancien système d'annonce de crue à une démarche de prévision de crue. Pour mettre en place cette réforme, les nouveaux Services de Prévision des Crues (SPC), sous l'impulsion du Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Crues (SCHAPI), doivent développer des modèles de prévision adaptés aux cours d'eau de leur territoire. Certains SPC disposent déjà d'outils opérationnels, d'autres à l'état de prototype, mais plusieurs d'entre eux n'en sont pas encore pourvus.

Le Cemagref (Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts) est un organisme public de recherche finalisé sur la gestion des eaux et des territoires. Ses recherches sont orientées vers la production de connaissances nouvelles et d'innovations techniques utilisées par les gestionnaires, les décideurs et les entreprises pour répondre à des questions concrètes de société dans les domaines de la gestion des ressources, de l'aménagement et de l'utilisation de l'espace. Les travaux de recherche de l'unité HBAN ont permis le développement de logiciels de prévision des crues depuis les années 1980. L'un de ces projets de recherche est d'étudier les stratégies de couplage entre des modèles hydrologiques et des modèles hydrauliques. L'objectif de cette étude est d'améliorer les simulations des crues de certains cours d'eau posant des problèmes de modélisation avec les outils classiques.

Dans le cadre d'un partenariat entre la Direction Régionale de l'Ile-de-France (DIREN) et le Cemagref, la rivière Serein a été choisie pour étudier les possibilités de couplage entre modèles hydrologiques et hydrauliques. Cette rivière est un affluent de l'Yonne dont le bassin contribue activement à la genèse des crues de la Seine. Il génère d'importantes quantités d'eau qui peuvent atteindre Paris en moins de quatre jours. Le Serein qui participe à ce comportement montre des mécanismes de propagation. Dans ce contexte, le Service de Prévision des Crues de la DIREN (SPC) a mis à disposition du Cemagref les données nécessaires afin d'explorer les possibilités d'amélioration des modèles de prévision des crues.

L'objectif de ce stage s'inscrit dans l'étude du Cemagref d'une amélioration des outils de simulation des crues par un couplage entre un modèle hydrologique et un modèle hydraulique. Le Serein, qui présente un comportement hydraulique complexe, constitue notre système d'étude. Dans un premier temps nous présentons le Serein d'un point de vue hydrologique et hydraulique. Parallèlement nous étudions la complexité de ses mécanismes de propagation afin de s'assurer qu'il ne s'agit pas d'un problème météorologique, extérieur à la modélisation hydrologique. Dans un deuxième temps nous procédons à la modélisation. Nous commençons par une simulation du Serein par une modélisation hydrologique globale avant de coupler les modèles hydrologique et hydraulique. L'étude du couplage se décompose en deux études indépendantes. L'une consiste à rechercher de la meilleure stratégie de couplage par une approche semi-distribuée, l'autre vise à comparer la qualité des simulations entre un modèle de propagation hydraulique simplifié et un modèle hydraulique complet.

1 PRESENTATION GENERALE DU SEREIN

1.1 Géographie, géologie et stations de mesures du Serein

Le Serein est une rivière française qui coule dans les départements de la Côte-d'Or et de l'Yonne. C'est un affluent de l'Yonne qui est lui-même un affluent de la Seine. Le Serein prend sa source au plateau de Saulieu, proche du Morvan, et se jette sur la rive droite de l'Yonne à Bassou, au sud de Joigny. Il s'agit d'une rivière de 120 km de long entre Bierre-lès-Sémur (amont du Serein) et Beaumont (aval du Serein) avec une surface du bassin versant⁽¹⁾ de 1337 km² à Beaumont.

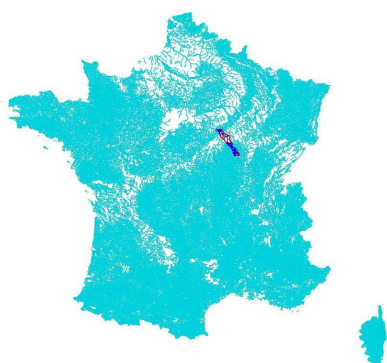


Figure 1 : Le Serein



Figure 2 : Le Serein à Noyer

Le bassin versant du Serein compte quatre stations hydrométriques situées uniquement sur le Serein et sept stations pluviométriques. Ces stations nous ont permis de disposer des mesures de débit et de pluie de 1995 à 2005 au pas de temps horaire.

Les stations hydrométriques mesurent les hauteurs et les convertissent en débits suivant une courbe de tarage⁽²⁾ (cf. Tableau 1).

	Stations	Code	Surface (km ²)	Distance (km)
AMONT	Bierre-lès-Sémur	H2322010	267	0
	Dissangis	H2332020	643	51
	Chablis	H2342020	1120	96
AVAL	Beaumont	H2342030	1337	120

Tableau 1 : les stations hydrométriques du Serein

Les précipitations tombées sur le bassin versant du Serein sont mesurées ponctuellement par les stations pluviométriques de Météo-France. La densité de couverture atteint 130 km²/poste. La pluie moyenne annuelle est homogène sur tout le bassin versant et s'élève à 780 mm. L'estimation des pluies globales tombées sur ce bassin versant sont calculées à partir des mesures ponctuelles par la méthode des polygones de Thiessen⁽³⁾ : soient P la pluie globale, P_i et S_i respectivement une mesure de pluie et la surface du pluviomètre i , S_{bv} la surface du sous-bassin versant, alors

$$P = \sum_{i=1}^N \alpha_i P_i \quad \text{et} \quad \alpha_i = \frac{S_{bv} \cap S_i}{S_{bv}} \quad (\text{cf. Tableau 2}).$$

La Figure 3 présente les pluviomètres et leurs polygones de Thiessen ainsi que les stations hydrométriques de ce bassin versant.

	Bierre-lès-Semur H2322010	Dissangis H2332020	Châblis H2342020	Beaumont H2342030
POSTE	α_i (%)	α_i (%)	α_i (%)	α_i (%)
89346001				2%
89068001			14%	26%
89279001		8%	34%	28%
21425001		3%	1%	1%
89025006		19%	11%	9%
21603001	36%	44%	25%	21%
21501003	64%	27%	15%	13%

Tableau 2 : Poids des pluviomètres (méthode des polygones de Thiessen)

Les pluviomètres sont classés de haut en bas de l'aval à l'amont du Serein. Les coefficients α_i en gras correspondent au pluviomètre qui a le plus de poids pour le bassin versant considéré et qui est donc le plus représentatif des précipitations reçues.

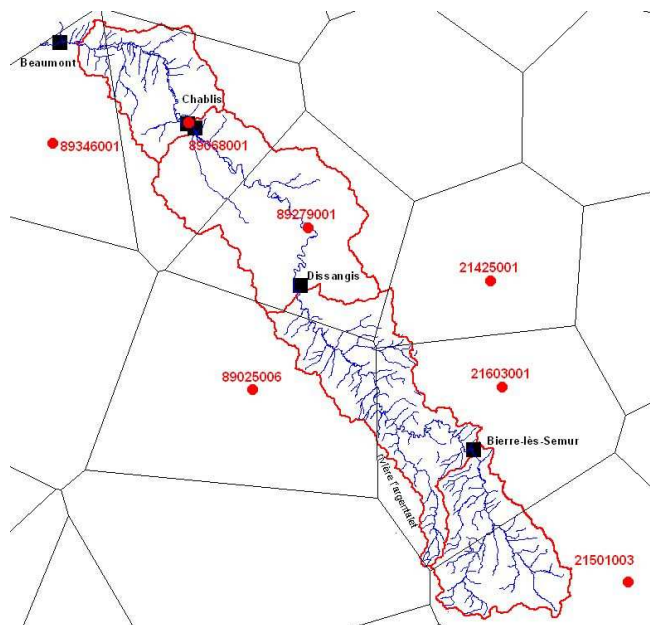


Figure 3 : Le bassin versant du Serein

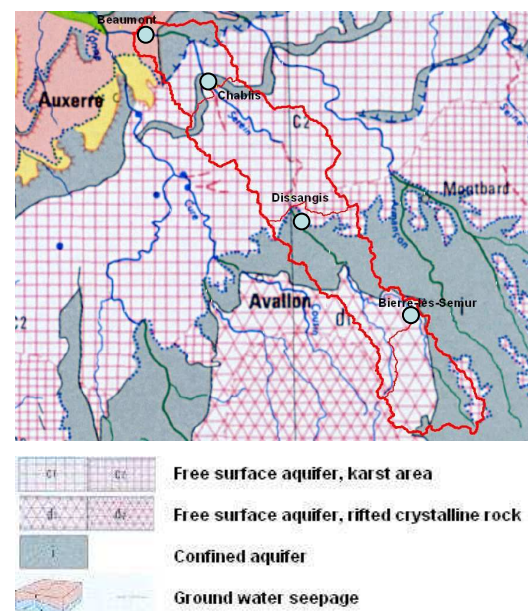


Figure 4 : Topographie souterraine du bassin versant du Serein

Les Figures 3 et 4 du bassin versant du Serein mettent en évidence un karst⁽⁴⁾ entre Dissangis et Châblis. Effectivement cette région pauvre en eau de ruissellement fait apparaître une région calcaire qui peut amener à des échanges d'eau par voies souterraines avec d'autres bassins versants. Une étude réalisée par le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) sur les pertes du Serein entre Dissangis et Châblis [1] est résumée en annexe (cf. annexe 2). Le bassin versant du Serein est un bassin versant qui échange avec ses voisins. Si l'étude du BRGM a identifié les pertes du Serein entre Dissangis et Châblis, les échanges entre Bierre-lès-Sémur et Dissangis ou Châblis et Beaumont ne sont pas connus. De plus des possibles "gains d'eau" du Serein n'ont jamais été étudiés.

1.2 Singularités hydrauliques remarquables

Il n'y a aucune singularité remarquable, si ce n'est la présence de nombreux seuils fixes et anciennes chaussées de moulins médiévaux, notamment celui, imposant, de Noyers.

Les nombreuses infrastructures routières (ponts) induisent une réduction de la section du lit mineur et obstruent transversalement le lit majeur. Lors des crues, ces obstacles peuvent entraîner un ralentissement dynamique de la crue lors de sa propagation. La DIREN ne dispose pas de données topographiques sur ces ouvrages, nous n'avons donc pas pu en tenir compte dans le modèle hydraulique. Ceci constitue une piste d'amélioration importante de nos travaux.

1.3 Les crues du Serein

Le débit moyen à Beaumont (aval du Serein) est d'environ 7.8 m³/s. Les crues peuvent atteindre 160 m³/s. Le Serein est un affluent de l'Yonne connu pour être un affluent de la Seine qui génère d'importantes quantités d'eau avec un temps de réponse très rapide.

L'anticipation de ces apports importants peut poser certains problèmes pour le service de prévision des crues de la Direction Environnementale (DIREN) Ile-de-France en charge du dispositif de surveillance et de l'annonce des crues du bassin versant de la Seine. Le Serein qui contribue à ce comportement spécifique montre des mécanismes de propagation des crues surprenants : certaines crues sont amplifiées de l'amont vers l'aval tandis que d'autres sont atténuées. Ces comportements sont difficiles à modéliser et encore plus à prédire. Les Figures 5 et 6 illustrent ces deux types de crues.

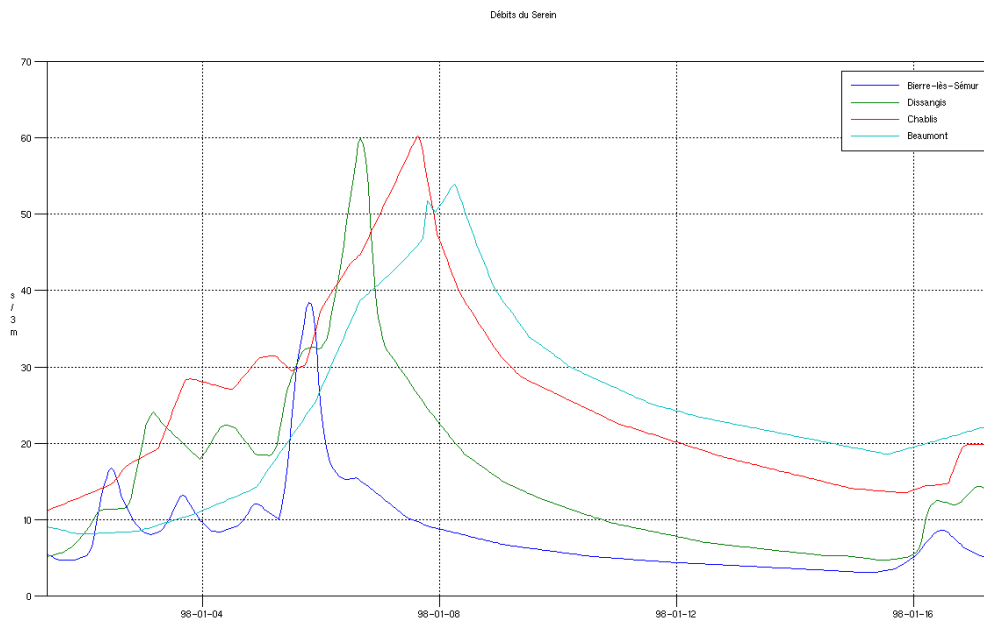


Figure 5 : Crue de Janvier 1998 - atténuation

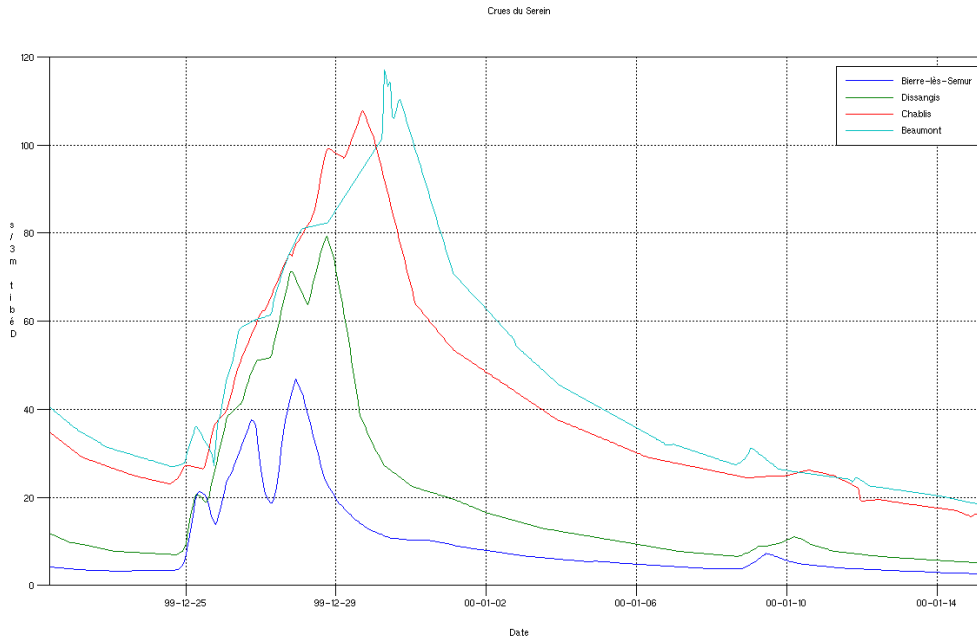


Figure 6 : Crue de Décembre 1999 - amplification

Les causes des amplifications ou des atténuations ne sont pas connues. Il se pourrait que les échanges avec des bassins versants voisins par cheminement des eaux souterraines soient responsables de ces mécanismes de propagation complexes. Cependant des fortes précipitations hétérogènes sur le bassin versant du Serein pourraient aussi expliquer ces atténuations ou amplifications des crues.

2 Etude de l'impact des précipitations sur les phénomènes d'amplification et d'atténuation des crues

Afin d'améliorer de mieux comprendre la genèse des crues sur le bassin du Serein, la DIREN Ile-de-France a souhaité étudier en détail l'amplification et l'atténuation des crues entre l'amont et l'aval du bassin. Les résultats de ce chapitre s'inscrivent en parallèle de l'objectif général de nos travaux visant une amélioration du couplage entre modèles hydrologiques et hydrauliques.

Ce chapitre analyse le lien entre l'hétérogénéité des pluies et les phénomènes d'amplification ou d'atténuation des crues entre la station de Bierre-les-Semur et celle de Beaumont. Une atténuation (respectivement amplification) de crue ne serait-elle pas simplement due à des pluies tombées uniquement à l'amont (respectivement à l'aval) du Serein ?

2.1 Méthodologie

2.1.1 Choix des crues

Une crue est la résultante de précipitations antérieures. Elle peut être générée instantanément par un violent événement pluvieux ou par un cumul sur plusieurs jours ou semaines. Cependant, bien qu'elles soient différentes les unes des autres, certains comportements semblables permettent d'imaginer une classification de ces crues. L'objectif est ici de choisir des crues appartenant à une gamme de crues le

plus large possible afin de comprendre et décrire au mieux les phénomènes d'amplification-atténuation.

Après analyse des données de crue sur dix années (entre 1995 et 2005), il apparaît que les pics de crue sont quasiment toujours amplifiés entre Bierre-lès-Sémur (station de mesure la plus en amont) et Dissangis (station de mesure suivante). Par contre, entre les stations en aval de Dissangis, il peut se produire une atténuation des pics de crues ou une amplification. Par ailleurs une amplification (ou respectivement une atténuation) entre Dissangis et Chablis ne conduit pas forcément au même phénomène entre Chablis et Beaumont (station de mesure la plus en aval). Dans tous les cas, le débit entre Bierre-lès-Sémur et Beaumont est toujours amplifié, ceci est naturel compte tenu de la différence de surface de bassin versant. Les éventuelles amplifications entre les autres stations situées en aval sont semblables (cf. annexe 3).

L'importance des crues ne semblent pas déterminer le mécanisme de propagation puisque les phénomènes d'atténuation ou amplification sont observés aussi bien sur les fortes crues que sur les petites crues.

Suite à ces observations, les crues du Serein sont classées en fonction des critères suivants :

- l'importance du pic de crue à l'aval du Serein (Beaumont) qui détermine si la crue est faible ($Q < 52 \text{ m}^3/\text{s}$), moyenne ($52 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 100 \text{ m}^3/\text{s}$) ou forte ($Q > 100 \text{ m}^3/\text{s}$)
- le ratio ou facteur d'amplification du pic de crue entre l'amont (Bierre-lès-Sémur) et l'aval (Beaumont) du Serein
- le mécanisme de propagation entre Chablis et Beaumont : amplification ou atténuation que nous définissons par le ratio de leurs pics de crue.

Parmi les dix années de données entre 1995 et 2005, cinq crues appartenant à des classes différentes ont été sélectionnées afin d'effectuer des études différenciées. Afin de disposer de données fiables, les crues présentant des lacunes ou des incertitudes de mesures trop importantes selon les critiques de la DIREN [2] ont été écartées de la sélection. Le Tableau 4 présente ces cinq crues.

Crues SEREIN	21/01/1998	22/02/1999	11/03/1999	30/12/1999	23/02/2002
Pic de crue	petit	moyen	grand	grand	Petit
Débit à Beaumont (m3/s)	54.89	86.5	105.51	116.98	52.51
Amplification	faible	moyenne	forte	moyenne	Faible
Ratio $Q_{\text{Bierre}}/Q_{\text{Beaumont}}$	1.56	3.16	4.07	2.49	1.96
Propagation	atténuation	amplification	atténuation	amplification	Amplification

Tableau 4 : Crues du Serein sélectionnées

Le pic de crue est celui observé à l'aval du Serein (Beaumont). Le facteur d'amplification est le ratio entre le débit observé à l'aval (Beaumont) et celui observé à l'amont (Bierre-lès-Sémur) du Serein. Les hydrogrammes de ces crues sont présentés en annexe 4.

2.1.2 Comparaison avec les pluies

Tout d'abord, nous étudions le comportement des crues par rapport aux précipitations mesurées ponctuellement. Il faut vérifier que les amplifications des pics de crues ne sont pas simplement dues à des précipitations hétérogènes spatialement. Cependant, un pluviomètre qui ne permet qu'une mesure ponctuelle n'est pas toujours représentatif de la pluie reçue par un bassin versant. Pour chaque sous-bassin versant du Serein et pour chacune des crues étudiées, nous comparerons donc les pluies globales calculées par la méthode des polygones de Thiessen (cf. Tableau 2).

De plus, nous voulons savoir si les pluies reçues par le bassin-versant se retrouvent dans les crues du Serein. Nous calculons donc les volumes ruisselés, qui correspondent aux volumes d'eau des

précipitations, et les volumes écoulés, qui correspondent aux volumes d'eau transportés par les crues. Les volumes écoulés sont calculés à partir des hydrogrammes par la méthode des trapèzes. Les volumes ruisselés V_{ruiss} sont calculés par la formule suivante :

$$V_{ruiss} = \frac{P_{cum} S_{bv}}{1000} \text{ avec } P_{cum} \text{ (en mm) la pluie cumulée sur toute la durée de crue et } S_{bv} \text{ (en km}^2\text{)}$$

la surface du bassin versant.

2.2 Etude sur cinq crues sélectionnées

2.2.1 Crue de Janvier 1998

Il s'agit d'une crue de faible amplitude à Beaumont pour laquelle on observe une atténuation (cf. annexe 4 – Figure 7) entre la station de Chablis et celle de Beaumont (ratio = 0.93). Entre les stations de Bierre-lès-Sémur et de Beaumont, l'amplification est faible (ratio =1.56).

On regroupe dans le Tableau 5 les pics de crue mesurés, les cumuls sur 24 heures et 10 jours des précipitations P et les volumes d'eau ruisselés et écoulés. Les volumes d'eau ont été calculés pour chaque sous-bassin versant en choisissant les mêmes dates : du 16/01/1998 au 30/01/1998. Les hyétogrammes des sept pluviomètres sont présentés en annexe 5 (Figure 12).

CRUE SEREIN	21/01/1998			
	QBeaumont/QBierre=1,56		QBeaumont/QChablis=0.93	
STATION HY,	Bierre-lès-Semur	Dissangis	Châblis	Beaumont
Débit (m3/s)	35	57	59	55
P sur 24 h. (mm)	6.9	4.58	3.57	3.36
P sur 10 j. (mm)	46.29	40.07	41.04	41.07
V écoulé (1e6 m3)	9	17.78	31.67	35.44
V ruisselé (m3)	11.04	22.12	40.07	47.26
ΔV écoulé (1e6 m3)	-	8.78	13.9	3.77
ΔV ruisselé (m3)	-	11.09	17.94	7.19

Tableau 5 : Crue de Janvier 1998 - Pics de crue, pluies cumulées et volumes d'eau écoulés et ruisselés

Pour chaque tronçon du Serein (Bierre-Dissangis, Dissangis-Chablis, Chablis Beaumont), les différences des volumes d'eau ruisselés et écoulés ont été calculées : $\Delta V = V_{aval} - V_{amont}$. Ce calcul permet de déterminer quel volume est reçu par chacun des tronçons et où est tombée la pluie : il s'écoule plus d'eau dans la rivière (ΔV écoulé) aux endroits où il pleut le plus (i.e. où le ruissellement ΔV ruisselé est le plus important).

Les précipitations sont très clairement plus importantes à l'amont du Serein que ce soit pour le cumul sur 24 heures ou 10 jours.

Il s'agit d'une crue atténuée en aval de Chablis avec des précipitations importantes à l'amont.

2.2.2 Crue de Février 1999

Il s'agit d'une crue d'amplitude moyenne à Beaumont et d'amplification assez forte (cf. annexe 4 – Figure 8) entre Bierre-lès-Sémur et Beaumont (ratio = 3.16). On remarque cette fois-ci une amplification entre Chablis et Beaumont (ratio = 1.09).

On regroupe dans le Tableau 6 les pics de crue mesurés, les cumuls sur 24 heures et 10 jours des précipitations P et les volumes d'eau ruisselés et écoulés. Les volumes d'eau ont été calculés pour chaque sous-bassin versant en choisissant les mêmes dates : du 17/02/1999 au 06/03/1999. Les hyétogrammes des sept pluviomètres sont présentés en annexe 5 (Figure 13).

CRUE	22/02/1999			
SEREIN	QBeaumont/QBierre=3.16		QBeaumont/QChablis=1.09	
STATION HY,	Bierre-lès-Semur	Dissangis	Châblis	Beaumont
Débit (m3/s)	27	65	79	86
P sur 24 h. (mm)	2.06	2.84	3.37	3.29
P sur 10 j. (mm)	46.14	46.10	44.09	42.99
V écoulé (1e6 m3)	13.63	34.75	58.21	69.45
V ruisselé (m3)	20.23	46.29	81.97	96.4
ΔV écoulé (1e6 m3)	-	21.11	23.46	11.24
ΔV ruisselé (m3)	-	26.06	35.69	14.42

Tableau 6 : Crue de Février 1999 - Pics de crue, pluies cumulées et volumes d'eau écoulés et ruisselés

Pour chaque tronçon du Serein (Bierre-Dissangis, Dissangis-Chablis, Chablis Beaumont), les différences des volumes d'eau ruisselés et écoulés ont été calculées : $\Delta V = V_{aval} - V_{amont}$. Comme précédemment (cf. 2.2.1 Crue de Janvier 1998), il s'écoule plus d'eau dans la rivière (ΔV écoulé) aux endroits où il pleut le plus (i.e. où le ruissellement ΔV ruisselé est le plus important).

Bien que les cumuls de pluie sur 10 jours soient plus importants à l'amont (augmentation de 20% par rapport à l'aval), les cumuls de pluie sur 24 heures montrent que la pluie est plutôt tombée à l'aval du Serein (augmentation de 60% par rapport à l'amont). Par conséquent, nous considérons que les précipitations sont plus importantes à l'aval du Serein.

C'est une crue amplifiée en aval de Chablis où les précipitations sont les plus importantes.

2.2.3 Crue de Mars 1999

C'est une crue de forte amplitude et de forte amplification (cf. annexe 4 – Figure 9) entre Bierre-lès-Sémur et Beaumont (ratio = 4.07). Cependant, L'amplification entre Chablis et Beaumont est très faible et peut s'apparenter à une atténuation de crue (ratio = 1.03).

On regroupe dans le Tableau 7 les pics de crue mesurés, les cumuls sur 24 heures et 10 jours des précipitations P et les volumes d'eau ruisselés et écoulés. Les volumes d'eau ont été calculés pour chaque sous-bassin versant en choisissant les mêmes dates : du 08/03/1999 au 18/03/1999. Les hyétogrammes des sept pluviomètres sont présentés en annexe 5 (Figure 14).

CRUE	11/03/1999 11:50			
SEREIN	QBeaumont/QBierre=4.07		QBeaumont/QChablis=1.03	
STATION HY,	Bierre-lès-Semur	Dissangis	Châblis	Beaumont
Débit (m3/s)	26	77	102	106
P sur 24 h. (mm)	1.03	1.83	3.10	3.64
P sur 10 j. (mm)	48.10	58.31	65.64	64.17
V écoulé (1e6 m3)	6.49	21.61	45.4	53.45
V ruisselé (m3)	7.76	25.76	49.96	57.66
ΔV écoulé (1e6 m3)	-	15.12	23.79	8.04
ΔV ruisselé (m3)	-	18	24.19	7.7

Tableau 7 : Crue de Mars 1999 - Pics de crue, pluies cumulées et volumes d'eau écoulés et ruisselés

Pour chaque tronçon du Serein (Bierre-Dissangis, Dissangis-Chablis, Chablis Beaumont), les différences des volumes d'eau ruisselés et écoulés ont été calculées : $\Delta V = V_{aval} - V_{amont}$. Nous constatons une fois de plus qu'il s'écoule plus d'eau dans la rivière (ΔV écoulé) aux endroits où il pleut le plus (i.e. où le ruissellement ΔV ruisselé est le plus important).

Les précipitations sont beaucoup plus importantes à l'aval du Serein comme le montrent les cumuls de pluie sur 24 heures et 10 jours.

C'est une crue atténuée en aval de Chablis alors que les précipitations y sont les plus importantes.

2.2.4 Crue de Décembre 1999

C'est une crue de forte amplitude mais contrairement à la crue de Mars 1999, l'amplification est moyenne (cf. annexe 4 – Figure 10) entre Bierre-lès-Sémur et Beaumont (ratio = 2.49). De plus, on remarque une amplification des crues entre Chablis et Beaumont (ratio=1.10).

On regroupe dans le Tableau 8 les pics de crue mesurés, les cumuls sur 24 heures et 10 jours des précipitations P et les volumes d'eau ruisselés et écoulés. Les volumes d'eau ont été calculés pour chaque sous-bassin versant en choisissant les mêmes dates : du 12/12/1999 au 11/01/2000. Les hyétoigrammes des sept pluviomètres sont présentés en annexe 5 (Figure 15).

CRUE	30/12/1999 22:00			
SEREIN	QBeaumont/QBierre=2.49		QBeaumont/QChablis=1.09	
STATION HY,	Bierre-lès-Semur	Dissangis	Châblis	Beaumont
Débit (m3/s)	47	79	108	117
P sur 24 h. (mm)	15.28	15.44	18.26	19.73
P sur 10 j. (mm)	36.99	36.56	42.37	44.94
V écoulé (1e6 m3)	17.7	35.33	73.14	82.85
V ruisselé (m3)	18.88	44.79	84.87	104.11
ΔV écoulé (1e6 m3)	-	17.64	37.81	9.7
ΔV ruisselé (m3)	-	25.91	40.08	19.24

Tableau 8 : Crue de Décembre 1999 - Pics de crue, pluies cumulées et volumes d'eau écoulés et ruisselés

Pour chaque tronçon du Serein (Bierre-Dissangis, Dissangis-Chablis, Chablis Beaumont), les différences des volumes d'eau ruisselés et écoulés ont été calculées : $\Delta V = V_{aval} - V_{amont}$. Ils montrent les mêmes tendances que précédemment : il s'écoule plus d'eau dans la rivière (ΔV écoulé) aux endroits où il pleut le plus (i.e. où le ruissellement ΔV ruisselé est le plus important).

Les précipitations sont nettement plus importantes à l'aval du Serein que ce soit le cumul de pluie sur 24 heures ou 10 jours.

C'est une crue amplifiée en aval de Chablis où les précipitations sont les plus importantes.

2.2.5 Crue de Février 2002

Il s'agit d'une crue semblable à celle de Janvier 1998 avec un petit pic de crue et une faible amplification (cf. annexe 4 – Figure 11) entre Bierre-lès-Sémur et Beaumont (ratio = 1.96). Par contre, on aperçoit une amplification entre Chablis et Beaumont (ratio=1.10).

On regroupe dans le Tableau 9 les pics de crue mesurés, les cumuls sur 24 heures et 10 jours des précipitations P et les volumes d'eau ruisselés et écoulés. Les volumes d'eau ont été calculés pour chaque sous-bassin versant en choisissant les mêmes dates : du 20/02/2002 au 10/03/2002. Les hyétogrammes des sept pluviomètres sont présentés en annexe 5 (Figure 15).

CRUE SEREIN	23/02/2002 2:00			
	QBeaumont/QBierre=1.96		QBeaumont/QChablis=1.10	
STATION HY,	Bierre-lès-Semur	Dissangis	Châblis	Beaumont
Débit (m3/s)	27	39	48	53
P sur 24 h. (mm)	2.11	2.05	2.29	2.15
P sur 10 j. (mm)	43.66	47.01	52.22	51.78
V écoulé (1e6 m3)	10.64	28.88	43.83	56.49
V ruisselé (m3)	14.49	34.47	63.37	74.7
ΔV écoulé (1e6 m3)	-	18.25	14.95	12.65
ΔV ruisselé (m3)	-	19.98	28.9	11.33

Tableau 9 : Crue de Février 2002 - Pics de crue, pluies cumulées et volumes d'eau transportés

Pour chaque tronçon du Serein (Bierre-Dissangis, Dissangis-Chablis, Chablis Beaumont), les différences des volumes d'eau ruisselés et écoulés ont été calculées : $\Delta V = V_{aval} - V_{amont}$. La répartition est la même entre le ruissellement et l'écoulement : il s'écoule plus d'eau dans la rivière (ΔV écoulé) aux endroits où il pleut le plus (i.e. où le ruissellement ΔV ruisselé est le plus important).

Les cumuls de pluie sur 10 jours montrent une pluie plus abondante à l'aval du Serein avec une augmentation de 15%. Les cumuls de pluie sur 24 heures traduisent une pluie homogène sur tout le bassin. Nous considérons donc que les pluies sont essentiellement tombées à l'aval du Serein.

C'est une crue amplifiée en aval de Chablis où les précipitations sont plus importantes à l'aval.

2.3 Synthèse

La Figure 17 illustre les caractéristiques des cinq crues de notre étude : les pics de crues et les volumes d'eau écoulés le long du Serein. Contrairement aux débits du Serein, notons que les volumes d'eau ne sont pas comparables entre des crues différentes puisqu'ils ne sont pas calculés sur la même durée de crue.

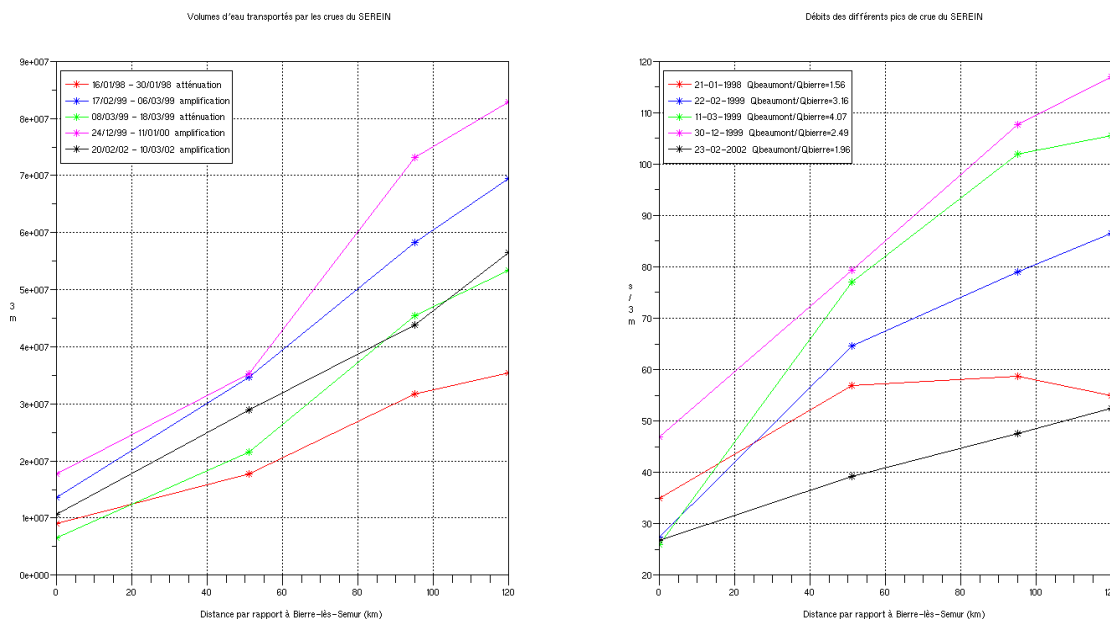


Figure 17 : Volumes d'eau transportés par les crues et Débits du Serein

Les crues du Serein sont toujours amplifiées entre le bassin versant le plus en amont (Bierre-lès-Sémur : 0 km) et celui le plus en aval (Beaumont : 120 km). Cependant, entre Dissangis (51 km) et Chablis (95 km) ou entre Chablis et Beaumont, il peut se produire une atténuation des crues avec une diminution des pics de crues. En général, l'amplification de crue la plus importante a lieu entre Bierre-lès-Sémur et Dissangis.

Ces mécanismes de propagation des crues (atténuation ou amplification) ne semblent pas dépendre de l'importance des crues. Une petite crue, caractérisée par un petit pic de crue à Beaumont, peut être amplifiée (Février 2002) ou atténuée (Janvier 1998). Il en est de même pour les fortes crues (Mars 1999 et Janvier 2000).

Le calcul des volumes d'eau montrent que les précipitations semblent plus importantes entre Dissangis et Chablis. De plus, nous avons montré que les volumes d'eau écoulés (transportés par les crues) et les volumes d'eau ruisselés (générés par les pluies) suivent la même répartition spatiale : il s'écoule plus d'eau dans la rivière aux endroits où il pleut le plus.

De même, les amplifications (respectivement atténuation) de crue en aval de Chablis semblent liées à des précipitations plus importantes à l'aval (respectivement à l'amont) du Serein. Cependant une crue peut être atténuée en aval de Chablis (Mars 1999) alors que les précipitations y sont les plus importantes.

Il est donc difficile de conclure sur le lien entre la spatialisations des pluies et les mécanismes de propagation des crues du Serein. Par ailleurs, il ne faut pas oublier que les phénomènes hydrogéologiques peuvent aussi contribuer à ce comportement de propagation hydraulique.

Par la suite nous ne nous intéressons plus à ce comportement particulier. Cependant nous réutiliserons ces cinq crues, sélectionnées selon des critères de diversification afin d'effectuer des études différenciées, pour l'étude de la modélisation hydrologique et hydraulique du Serein.

3 MODELISATION HYDROLOGIQUE GLOBALE

Dans le cadre de l'étude des stratégies de modélisation hydrologiques et hydrauliques du Serein, nous avons commencé par une étude hydrologique pure avec le modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journaliers (GR4J). Dans cette partie, nous présentons le modèle, la méthodologie et les résultats des simulations par le modèle hydrologique uniquement.

3.1 Présentation du Modèle

GR4J est un modèle hydrologique empirique global à 4 paramètres. Développé par le CEMAGREF depuis les années 1980, ce modèle est utilisé aujourd'hui pour des applications de gestion de la ressource en eau et en ingénierie. C'est un modèle pluie-débit à réservoirs dont la sortie correspond à la réponse en débit d'un bassin calculée à partir des données de pluie et d'évapotranspiration. Les paramètres du modèle sont déterminés par un calage qui vise à minimiser les écarts entre les séries observées et calculées.

3.1.1 Structure du modèle

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Edijatno et Michel (1989) [3]; Edijatno (1991) [4]; Nascimento (1995) [5]; Edijatno et al. (1999) [6]; Perrin (2000) [7]; Perrin (2002) [8] et Perrin et al. (2003) [9] qui est présenté ici. Il est basé sur une structure qui associe une fonction de production et une fonction de routage. Il intègre notamment des hydrogrammes unitaires et autres fonctions permettant de simuler le comportement hydrologique du bassin.

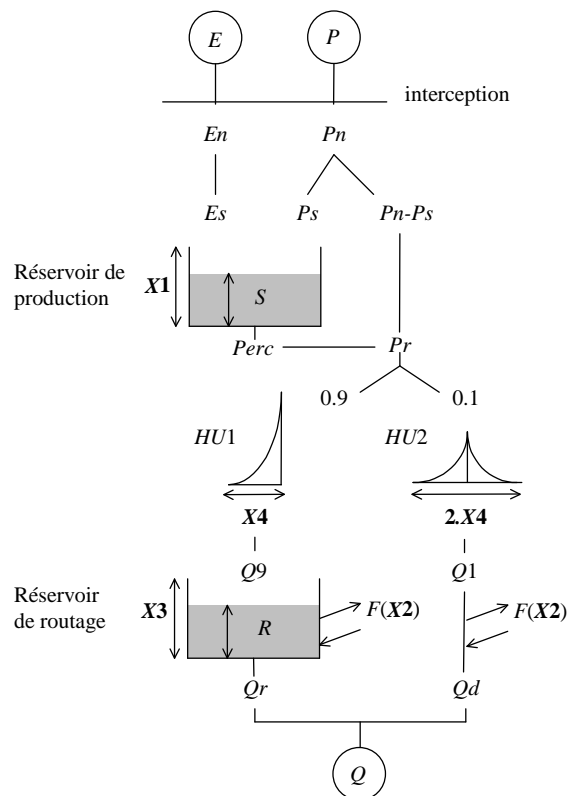


Figure 18 : Schéma de la structure du modèle GR4J (E: ETP; P: Pluie; Q: Débit)

La Figure 18 donne une représentation de la structure du modèle qui permet de comprendre comment interagissent les fonctions de production et de routage qui traduisent le comportement hydrologique d'un bassin. Les équations mises en jeu dans ce modèle sont données en annexe. Dans ce qui suit on ne détaille que les principes du modèle.

- La neutralisation

La première opération est la neutralisation sur un pas de temps de la lame d'eau précipitée P par une évapotranspiration potentielle⁽⁶⁾ E pour déterminer une pluie nette P_n et une évapotranspiration nette E_n . Ceci permet de traduire le phénomène de reprise directe par l'atmosphère de l'eau de pluie tombée sur le sol et la végétation. En cas de non consommation totale de la pluie, la pluie nette alimentera les autres parties du modèle. La neutralisation est assimilable à une fonction d'interception avec un réservoir de capacité nulle :

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

- La fonction de production

Cette fonction est directement liée au fait que les volumes d'eau écoulés correspondent à une fraction de la pluie tombée. Ainsi cette fonction a pour but de répartir la part de la pluie qui alimente le débit, celle qui sera évaporée ou perdue vers l'extérieur du bassin et celle qui sera stockée :

- une partie P_s de la pluie nette P_n alimente le réservoir de production
- une quantité d'évapotranspiration E_s est retirée du réservoir à un taux dépendant de la disponibilité en eau
- la part de la pluie qui alimente le débit est $P_n - P_s$ à laquelle on ajoute une percolation $Perc$ issue du réservoir

- La fonction de routage

Cette fonction traduit le fait que les variations de débits sont plus lissées que les variations de pluie et de plus interviennent avec un certain retard. Ainsi la fonction de routage permet de réaliser une répartition temporelle des quantités d'eau. La répartition est effectuée grâce aux hydrogrammes unitaires et au réservoir de routage qui reconstituent la réponse en débit à une séquence de pluie. Pour une pluie donnée jusqu'à un pas de temps donné, l'hydrogramme donne le débit engendré par cette pluie aux différents pas de temps successifs. La sortie Q à un pas de temps i est alors la somme des pluies jusqu'au pas de temps i pondérées par les ordonnées de l'hydrogramme.

- La fonction d'échange

Une dernière fonction est introduite pour traduire les phénomènes d'apport ou de perte vers des nappes profondes ou l'extérieur topographique du bassin.

- Paramètres

Le modèle GR4J ne comporte que 4 paramètres à caler qui sont censés représenter l'hydrologie du bassin :

- X1 : capacité du réservoir de production (mm.)
- X2 : coefficient d'échange souterrain (mm.)
- X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm.)
- X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire, décalage temporel entre pluie et débit (heures)

3.1.2 Calage et validation du modèle

La plupart des modèles hydrologiques nécessitent une phase de calage. Cette phase permet au modèle d'assimiler le fonctionnement hydrologique du bassin. Il se fait en général sur une période de

plusieurs années. La méthode de calage est basée sur la modification des paramètres, fixés initialement de façon arbitraire, afin que les données de sortie soient le plus proche possible des données observées.

Dans un second temps, on est amené à procéder à un examen critique de la validité du modèle. Pour cela il est nécessaire de mettre en place une phase de validation. Cette dernière s'effectue sur une période différente de la période de calage afin d'apprécier la qualité du modèle sur des données qui n'ont pas servi au calage.

Dans notre étude nous disposons de donnée de pluies, évapotranspirations et débits du Serein de 1995 à 2005. Cette période de donnée est divisée en deux demi-périodes indépendantes. Un calage des paramètres est réalisé sur chaque demi-période puis nous contrôlons chaque jeu de paramètre sur l'autre demi-période.

3.1.3 Evaluation du modèle

Un modèle hydrologique est évalué par les critères d'évaluation de la qualité d'une simulation qui peuvent être parfois utilisés comme fonction objectif lors du calage du modèle, ou comme mesure d'évaluation de ses performances en validation. Il n'existe pas de critère d'évaluation universel. Dans notre étude, nous utilisons les critères numériques qui se basent sur le calcul de l'erreur du modèle, c'est-à-dire la distance (évaluée de différentes manières selon le critère utilisé) entre les débits observés et simulés.

Dans tout ce qui suit, nous évaluons nos simulations en validation par les critères de Nash et Sutcliffe (1970) [10], Root Mean Square Error (RMSE) et l'erreur relative sur les pics de crue:

- Critère de Nash-Sutcliffe

C'est un critère qui est comparable entre deux bassins versants différents. C'est un critère de référence pour les hydrologues. Une simulation est souvent jugée satisfaisante pour un critère supérieur à 80%.

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

où $Q_{obs,i}$, $Q_{calc,i}$ et $\overline{Q_{obs}}$ sont respectivement les débits observés et simulé sur un pas de temps et la moyenne des débits observés. Le nombre total de pas de temps est n.

- RMSE

Ce critère n'est pas comparable entre deux bassins versants différents. Il donne seulement une unité d'erreur.

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

- Erreur d'amplitude sur les pics

L'objectif des prévisionnistes, chargés de l'annonce des crues, est de prédire au mieux les hauteurs d'eaux maximales. Ce critère nous donne l'erreur commise par le modèle sur les pics de crue :

$$E_A = \frac{|\max(Q_{obs}) - \max(Q_{calc})|}{\max(Q_{obs})}$$

3.2 Méthodologie

Nous cherchons à étudier la qualité de la simulation hydrologique du Serein par une modélisation pluie-débit globale qui utilise des entrées moyennées sur la surface du bassin versant. Pour chacun des quatre sous-bassins versants du Serein (Bierre-lès-Sémur, Dissangis, Chablis, Beaumont), nous calculons le débit à leur exutoire en réponse aux précipitations et évapotranspirations du bassin considéré. La Figure 19 représente les quatre sous-bassins versants du Serein avec leur station hydrométrique associée.

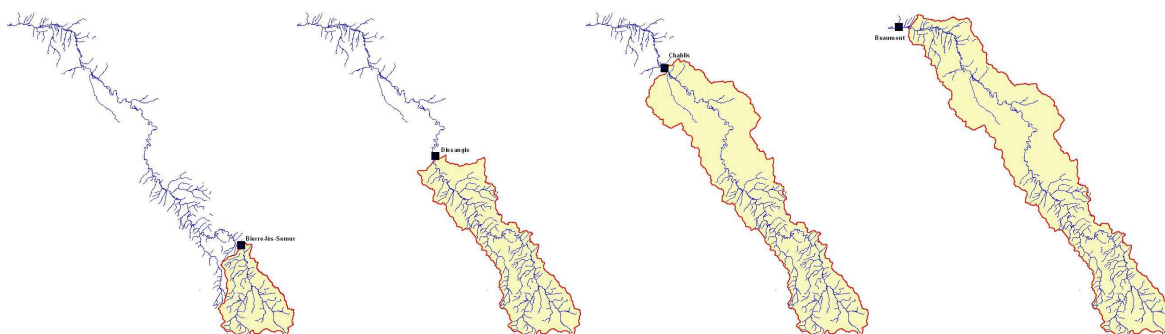


Figure 19 : Sous-bassins versants du Serein (Bierre-lès-Sémur, Dissangis, Chablis et Beaumont)

Nous disposons de 10 années de données (pluie, évapotranspiration et débit), de 1995 à 2005, au pas de temps horaire. Les pluies globales de chaque sous-bassin versant sont calculées à partir des mesures ponctuelles des pluviomètres par la méthode des polygones de Thiessen (Tableau 4). L'évapotranspiration est connue d'après les données de Météo-France. Les débits observés sont connus grâce aux stations hydrométriques de chaque sous-bassin (Tableau 1).

Le modèle pluie-débit GR4J calcule le débit au pas de temps horaire à l'exutoire de chaque sous-bassin versant en réponse aux précipitations et évapotranspirations du bassin considéré. Chaque simulation est ensuite évaluée en validation par les critères de Nash et RMSE.

3.3 Evaluation des simulations

L'intérêt de cette étude est d'étudier l'aptitude d'un modèle à simuler un débit. Les performances des simulations sont donc étudiées en validation. C'est-à-dire que les paramètres du modèle utilisé ont été calés sur une période différente de la simulation.

Le Tableau 10 rapporte les paramètres calés du modèle GR4J sur chaque demi-période P1 et P2 ainsi que leur moyenne.

	Bierre-lès-Sémur			Dissangis			Chablis			Beaumont		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
X1	236	325	280	217	261	239	222	220	221	194	246	220
X2	-0.62	-1.13	-0.88	-0.88	-0.45	-0.67	-0.82	-0.84	-0.83	-0.55	-0.71	-0.63
X3	66	76	71	65	58	61	115	102	108	145	127	136
X4	14	13	13	29	27	28	56	51	53	67	68	68

Tableau 10 : Paramètres calés du modèle pluie-débit GR4J pour chaque sous-bassin du Serein

Un jeu de paramètre a été calé sur la demi-période P1 puis un autre sur P2. Le calage des paramètres X1, X2 et X4 semble cohérent puisque les valeurs des paramètres varient peu d'une période à l'autre (moins de 20% de variation). Par contre le paramètre d'échange X2 varie beaucoup d'une demi-période à l'autre. Ceci signifie que ce paramètre est difficilement identifiable, sa valeur a été forcée par le modèle pour obtenir les meilleurs critères d'évaluation. Le calage des paramètres de production (X1), de routage (X3) et de délai (X4) donnent une première vision de l'hydrologie du Serein mais le paramètre d'échange (X2) doit être considéré avec prudence. Ainsi nous ne pouvons pas assurer que les valeurs de ces paramètres sont représentatives de l'hydrologie du Serein mais constituent seulement une première estimation.

Le Tableau 11 rapporte les critères d'évaluation en validation sur chaque demi-période P1 et P2 ainsi que leur moyenne.

	Bierre-lès-Sémur			Dissangis			Chablis			Beaumont		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
RMSE (mm/h)	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
Nash	0.72	0.68	0.70	0.78	0.79	0.79	0.84	0.88	0.86	0.89	0.85	0.87

Tableau 11 : Critères d'évaluation du modèle pluie-débit GR4J en validation pour chaque sous-bassin du Serein

Nous constatons que les performances en validation sont semblables d'une période sur l'autre. La simulation est moins satisfaisante sur le bassin versant de Bierre-lès-Sémur puisque le critère de Nash est inférieur à 80%. Les simulations s'améliorent en revanche vers l'aval du Serein.

Le Tableau 12 rapporte les erreurs d'amplitude obtenues en validation sur les cinq crues du Serein choisies comme crues de référence (Tableau 3).

	Bierre-lès-Sémur		Dissangis		Chablis		Beaumont	
	Débit max (m3/s)	Erreur	Débit max (m3/s)	Erreur	Débit max (m3/s)	Erreur	Débit max (m3/s)	Erreur
janv.-98	35	60%	56	38%	58	32%	55	-
févr.-99	27	49%	64	33%	79	32%	86	37%
mars-99	25	32%	77	-4%	102	3%	105	7%
déc.-99	47	65%	79	33%	107	18%	117	23%
févr.-02	27	62%	39	32%	47	27%	52	21%

Tableau 12 : Erreur d'amplitude du modèle pluie-débit GR4J en validation sur cinq crues du Serein

Le débit maximum présenté est le débit maximum mesuré par la station hydrométrique de chaque sous-bassin. Les phénomènes d'atténuation des crues (Janvier 1998 et Mars 1999) sont plus ou moins bien simulées (respectivement 35% et 3% d'erreur d'amplitude) tout comme les phénomènes d'amplification (entre 20% et 30% d'amplitude).

De plus, ces erreurs d'amplitudes varient indépendamment des amplitudes des pics de crue : entre 3% et 46% pour les grosses crues de Chablis en moyenne et entre 15% et 37% pour celles de Beaumont. Les erreurs commises sur l'estimation des pics de crues sont ainsi importantes bien que le modèle reproduise la dynamique de la crue de manière satisfaisante (cf. annexe 8 - Figure 31).

Ces premiers tests montrent la difficulté du modèle hydrologique global GR4J à reproduire correctement les crues du Serein. Ce modèle pluie-débit n'étant pas suffisant, un modèle hydrologique couplé avec un modèle hydraulique peut-il améliorer la modélisation du bassin versant du Serein ?

4 MODELISATION HYDROLOGIQUE COUPLEE AVEC LE MODELE HYDRAULIQUE SIMPLIFIE HAYAMI

Dans cette partie nous procédons à une modélisation couplée entre le modèle hydrologique pluie-débit GR4J et le modèle hydraulique Hayami. Le système modélisé diffère du système précédent: la modélisation n'est plus globale (transformation d'une pluie de bassin en débit à un exutoire) mais semi-distribuée avec une condition aux limites à l'amont (transformation d'un débit amont et de pluies sur les sous-bassins latéraux en débit à l'exutoire) comme indiqué dans le paragraphe suivant.

4.1 Méthodologie de la modélisation semi-distribuée

4.1.1 Définition de la semi-distribution

La modélisation semi-distribuée consiste à partager le bassin versant du Serein en plusieurs sous-bassins versants. Sur chaque sous-bassin versant, on simule le débit à l'exutoire en réponse aux pluies reçues à l'aide du modèle hydrologique global pluie-débit GR4J. Ce débit est rattaché à l'équation d'Hayami pour être injecté ponctuellement ou uniformément réparti sur le Serein. Ainsi, le modèle d'Hayami propage une onde de crue de l'amont du Serein (Bierre-lès-Sémur) tout en prenant en compte les apports latéraux générés sur chaque sous-bassin par GR4J. Les entrées du modèle sont donc les données hydrologiques de pluie et d'évapotranspiration au pas de temps horaire d'une part, et l'hydrogramme amont de Bierre-lès-Sémur d'autre part.

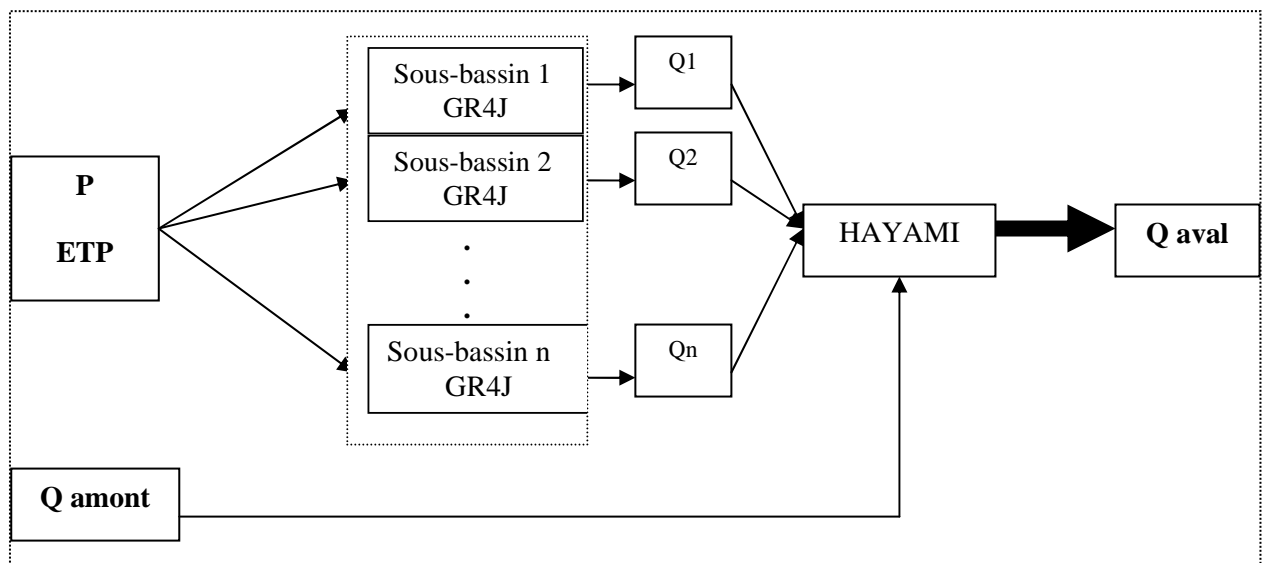


Figure 20 : Schéma d'une modélisation couplée – Distribution en "n" sous-bassins

Le but de cette approche distribuée est de comparer les performances d'une telle modélisation par rapport à une approche plus grossière pour déterminer la meilleure configuration de modélisation. Nous étudions différentes configurations en augmentant petit à petit le degré de distribution (i.e. le nombre de sous-bassins) tout en faisant varier la nature des apports : ponctuels ou diffus (Figure 23). Dans un premier temps, le calage des paramètres de GR4J et du modèle d'Hayami est le même pour tous les sous-bassins versants. Dans un second temps, le paramètre X4 de GR4J qui quantifie le décalage temporel entre pluie et débit est optimisé sur chaque sous-bassin. Enfin, la dernière série de tests est l'optimisation du paramètre X2 qui modélise les échanges entre les bassins.

4.1.2 Construction de la distribution

L'objectif principal de notre travail est de tester plusieurs niveaux de distribution spatiale des apports latéraux. Deux types d'apport sont pris en compte ici :

- les apports latéraux ponctuels qui correspondent aux apports provenant des affluents du Serein. Ces apports sont injectés à la confluence entre le Serein et l'affluent,
- les apports latéraux diffus qui correspondent aux apports provenant des bassins intermédiaires drainés par le Serein. Ces apports sont uniformément répartis sur le tronçon de rivière correspondant à l'apport.

Le bassin modélisé (bassin drainé par le Serein entre Bierre-les-Semur et Beaumont) est ainsi partagé en plusieurs entités injectées en utilisant les deux possibilités évoquées plus haut.

Il est important de noter que la même pluie et la même évapotranspiration sont affectées aux différents sous-bassins. En effet, les données disponibles ne permettent pas de discrétiser finement ces entrées (nombre insuffisant de pluviomètre, il faudrait plus de mesures ponctuelles).

Les caractéristiques des sous-bassins ont été déterminées par l'acquisition des données du Modèle Numérique de Terrain⁽⁷⁾ (MNT). La Figure 21 présente l'évolution de la surface drainée d'amont en aval et la localisation des affluents du Serein.

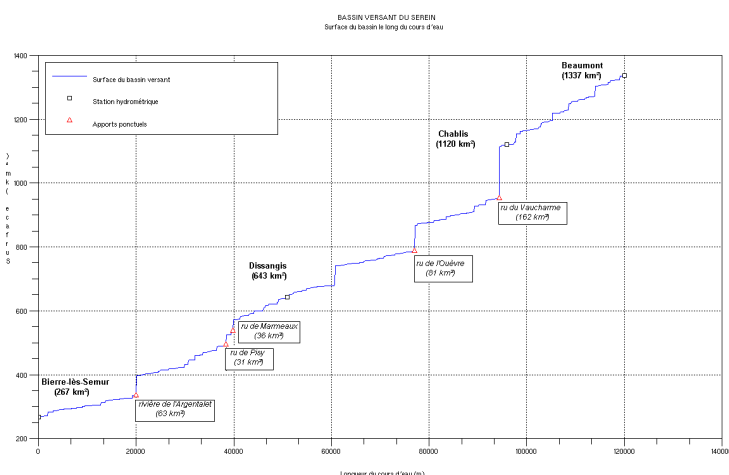


Figure 21 : Evolution des surfaces drainées



Figure 22 : Les bassins versants d'affluents du Serein

Les surfaces des bassins versants des 5 premiers affluents du Serein sont présentées dans le Tableau 13.

ru de Vaucharme	ru de l'Ouèvre	ru de Marmeaux	ru de Pisy	rivière l'Argentalet
162	81	36	31	63

Tableau 13 : Surface des bassins versants des affluents (km²)

La Figure 23 présente 4 options de modèle semi-distribué.

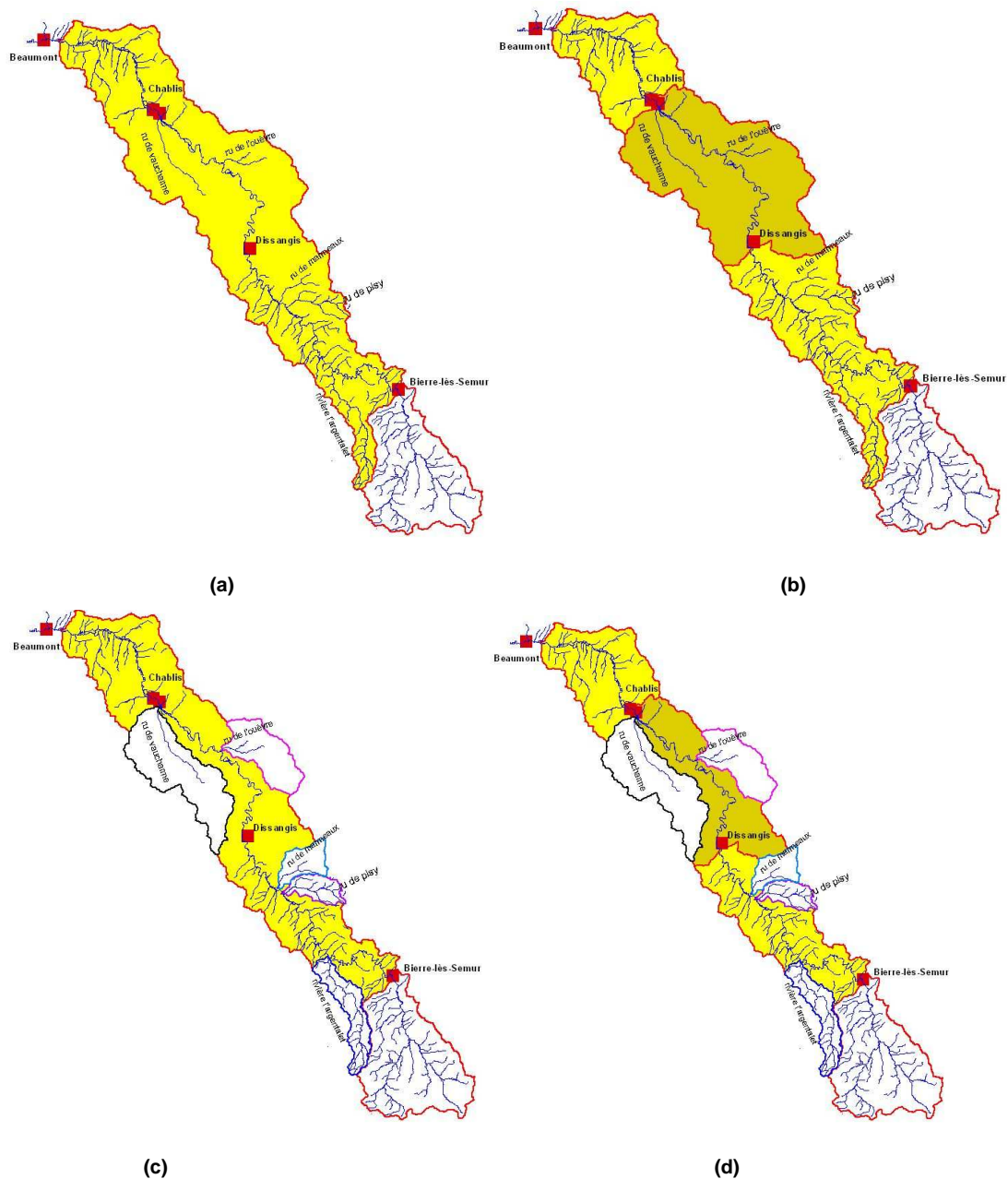


Figure 23 : Exemple de partitions du bassin versant du Serein pour une approche semi-distribuée
 (a) 1 apport diffus ; (b) 3 apports diffus; (c) 1 apports diffus et 5 ponctuels; (d) 3 apports diffus et 5 ponctuels

Concernant les sous-bassins intermédiaires (apports latéraux diffus), il est important d'obtenir des surfaces identiques pour chaque sous-bassin afin d'éviter un déséquilibre entre les différents apports. Cette volonté d'homogénéisation est cependant limitée par la précision du MNT (cf. annexe 9 - Tableau 14).

4.2 Modèle hydrologique

Le modèle hydrologique GR4J est utilisé pour transformer les pluies tombées sur chaque sous-bassin en débit à l'exutoire de ces entités. Ces débits sont ensuite injectés dans le modèle hydraulique.

Dans un premier temps, un jeu de paramètre unique sera appliqué pour faire fonctionner GR4J sur chacun des sous-bassins. Cette option permet de limiter le nombre de paramètre à caler (cf. paragraphe 4.4.1).

Dans un deuxième temps (cf. paragraphe 4.4.2 et 4.4.3), certains paramètres pourront prendre des valeurs différentes sur chaque sous-bassins. Cette option permet de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des apports mais ajoute des paramètres à caler.

4.3 Présentation du modèle de propagation hydraulique Hayami

Le modèle Hayami est une solution analytique du système d'équations simplifiées décrivant le phénomène de propagation. Il permet une description très condensée d'un tronçon de rivière puisqu'il ne fait intervenir que deux paramètres : la célérité et le coefficient de diffusion, en plus de la longueur du tronçon. Le principal problème pratique pour son emploi concerne son domaine d'acceptabilité et la détermination des paramètres par calage.

4.3.1 Solution analytique

L'écoulement d'une rivière en crue, c'est-à-dire en régime transitoire, est décrit par les équations de Saint Venant. En supposant que les forces de frottement, gravité et pression sont dominantes dans la description du phénomène, les termes d'inertie sont négligeables et on obtient l'équation de l'onde de crue diffusante avec apports latéraux :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C\left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q\right) - D\left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \frac{\partial q}{\partial x}\right) = 0 \quad (1)$$

où Q est le débit (m^3/s), C la célérité (m/s), D le coefficient de diffusion (m^2/s) et q la distribution des apports latéraux (m^2/s).

Si l'on considère les paramètres C et D constants, alors on arrive à un modèle diffusif qui a été proposé par Shoitiro Hayami en 1951 [10]. Ce modèle, connu comme modèle Hayami, présente l'intérêt d'avoir des solutions analytiques si l'on suppose des caractéristiques globales pour le cours d'eau et l'indépendance de la condition limite aval. La méthode analytique générale pour résoudre l'équation de propagation Hayami avec apports latéraux a été détaillée par Roger Moussa (1996) [11] avec une résolution par transformée de Laplace:

$$O(t) = \Phi(t) + \int_0^t [I(t - \tau) - \Phi(t - \tau)]K(\tau)d\tau \quad (2)$$

avec $I(t)$ et $O(t)$ les débits à l'amont et à l'aval du tronçon de rivière sans les débits de base, $K(t)$ le noyau d'Hayami et $\Phi(t)$ la fonction qui caractérise les apports latéraux :

$$I(t) = Q(0,t) - Q(0,0) \quad (3)$$

$$O(t) = Q(L,t) - Q(L,0)$$

$$K(t) = \frac{L}{2(\pi D)^{1/2}} \frac{e^{\frac{CL}{4D}\left(2 - \frac{L}{Ct} - \frac{Ct}{L}\right)}}{t^{3/2}} \quad (4)$$

$$\Phi(t) = \frac{C}{L} \int_0^t [Q_a(\lambda) - Q_a(0)]d\lambda \quad (5)$$

avec Q_a le débit total des apports latéraux (m^3/s) : $Q_a(t) = \int_0^L q(u,t) du$.

Cette solution analytique est inconditionnellement stable et requiert seulement une condition limite amont.

4.3.2 Applicabilité du modèle Hayami

Le modèle d'Hayami est un cas particulier du modèle d'onde de crue diffusante et possède donc son domaine de validité.

Ce modèle simplifie l'équation dynamique du système de Saint Venant en négligeant les termes d'inertie. Les forces de frottement, de pression et de gravité doivent alors être dominantes, ce qui se vérifie pour les crues lentes naturelles en rivière ayant une pente de fond non négligeable.

De plus, la solution analytique d'Hayami est dépendante d'une seule condition limite. Par conséquent, les effets des conditions aval doivent être minimales.

Enfin, le modèle Hayami repose sur des valeurs constantes des coefficients de célérité (C) et diffusion (D) de l'équation (1). Ce modèle ne peut donc être utilisé que sur une gamme de débit où C et D peuvent être considérés comme constants. Sachant que les coefficients C et D sont des paramètres globaux qui caractérisent toute la physique du cours d'eau, cette approximation est raisonnable au-delà d'un certain seuil (débit de plein bord) et pour des cours d'eau à géométrie simple. D'après l'étude de Marcio Baptista (1990) [12], l'hypothèse d'invariabilité de la célérité et du coefficient de diffusion avec la crue est souvent acceptable, au moins pour des situations où l'on n'a pas de changements brutaux, et la réponse du modèle Hayami est en général très satisfaisante.

Dans notre cas, le Serein, qui se caractérise par une géométrie simple (pas de casiers hydrauliques) avec des crues lentes, semble vérifier les conditions d'applicabilité du modèle Hayami.

4.3.3 Calage des paramètres

Les paramètres de célérité (C) et diffusion (D) constituent les deux paramètres du modèle, en plus de la longueur, nécessaires à l'utilisation de la méthode. Leur valeur peut être obtenue par un calcul direct à partir de formules hydrauliques (Marcio Baptista, 1990) [12]. Ces formules n'étant applicables que pour des géométries rectangulaires ou prismatiques, il est préférable d'utiliser un calage sur des crues déjà observées.

La célérité modifie la vitesse de propagation de la crue tandis que la diffusion influence la forme de l'hydrogramme. Des tests préalables montrent que la diffusion influence peu la solution (annexe 7). Dans la pratique de l'hydrologie des cours d'eau naturels, les valeurs de C varient entre 0.7 et 6 m/s, et les valeurs de D sont entre 70 et 10 000 m^2/s (Marcio Baptista (1990) [12]).

Dans notre étude nous disposons de donnée de crues de 1995 à 2005. Cette période de donnée est divisée en deux demi-périodes indépendantes. Un calage du paramètre C est réalisé sur chaque demi-période. Le paramètre D est fixé à 5000 m^2/s , valeur de référence pour une rivière telle que celle du Serein, afin de limiter le nombre de degré de liberté de notre calage. Afin de se rendre compte de la dépendance de la célérité avec l'amplitude des crues, plusieurs tests de calage en ne considérant que certaines gammes de débits sont présentés en annexe 7.

4.4 Résultats des différents calages du modèle semi-distribué

4.4.1 Calage avec un jeu de paramètre de GR4J identique sur tous les sous-bassins

Le Tableau 15 présente les résultats du calage des paramètres de GR4J et Hayami sur chaque demi-période de 1995 à 2005 pour chacune des configurations présentées dans le tableau 14.

Nous constatons que les paramètres obtenus après calage dépendent peu du niveau de distribution et de la nature des apports: la célérité moyenne des ondes de crues du Serein est de 0.72 m/s pour un coefficient de diffusion fixé à 5000 m²/s. De plus le calage paraît robuste avec valeurs de paramètres semblables sur les deux sous-périodes.

0 apport ponctuel												
PARAMETRE	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
X1	178	223	201	180	224	202	180	224	202	180	224	202
X2	-0.51	-0.73	-0.62	-0.50	-0.71	-0.61	-0.50	-0.71	-0.61	-0.50	-0.71	-0.61
X3	163	146	155	163	146	155	163	146	155	163	146	155
X4	28	41	35	34	44	39	34	45	40	35	45	40
C (m/s)	0.64	0.80	0.72	0.65	0.78	0.72	0.65	0.80	0.73	0.65	0.79	0.72
D (m ² /s)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
3 apports ponctuels												
PARAMETRE	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
X1	180	224	202	180	224	202	180	224	202	180	224	202
X2	-0.50	-0.72	-0.61	-0.50	-0.72	-0.61	-0.50	-0.80	-0.65	-0.50	-0.71	-0.61
X3	163	146	155	164	146	155	163	146	155	163	146	155
X4	32	43	38	33	44	39	34	44	39	35	45	40
C (m/s)	0.64	0.79	0.72	0.64	0.78	0.71	0.65	0.79	0.72	0.64	0.78	0.71
D (m ² /s)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
5 apports ponctuels												
PARAMETRE	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
X1	179	224	202	180	224	202	180	224	202	180	224	202
X2	-0.51	-0.72	-0.62	-0.50	-0.72	-0.61	-0.60	-0.71	-0.66	-0.50	-0.72	-0.61
X3	165	146	156	163	146	155	163	146	155	164	146	155
X4	31	42	37	32	43	38	34	44	39	33	44	39
C (m/s)	0.64	0.79	0.72	0.64	0.79	0.72	0.64	0.78	0.71	0.63	0.78	0.71
D (m ² /s)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000

Tableau 15 : Calage des paramètres de GR4J et Hayami en fonction du niveau de la semi-distribution

Le Tableau 16 présente les performances des différentes configurations des distributions pour un modèle pluie-débit identique sur chaque sous-bassin. Il s'agit des moyennes des deux demi-périodes des critères de Nash et RMSE calculés en validation.

Les simulations à Beaumont sont satisfaisantes avec un critère de Nash de 91%. Le niveau de distribution n'a aucune influence sur les simulations obtenues à l'aval.

Les simulations à l'intérieur de notre domaine d'étude sont bonnes avec un critère de Nash moyen de 90% à Chablis et 83% à Dissangis. Il est important de noter que les données à ces deux stations n'ont pas été utilisées pendant le calage. Ces données servent de contrôle indépendant et permettent de juger de la cohérence spatiale de notre modèle.

La qualité des simulations est plus sensible au niveau de distribution mais il n'y a pas d'améliorations notables. En effet certaines configurations de distribution améliorent les simulations tandis que d'autres les dégradent. Dans tous les cas, ces variations sont faibles avec un écart maximal de 2 points sur le critère de Nash. Nous constatons cependant que la simulation sans distribution (c'est-à-dire avec 1 seul bassin versant d'apport diffus) est la plus mauvaise puisque nous observons la performance minimale à Dissangis.

0 PONCTUELS						
N	Dissangis		Chablis		Beaumont	
	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH
1	3.30	0.79	3.61	0.90	4.09	0.91
2	2.99	0.83	3.68	0.90	4.08	0.91
3	3.02	0.82	3.88	0.89	4.08	0.91
4	2.99	0.83	3.88	0.89	4.08	0.91
3 PONCTUELS						
N	Dissangis		Chablis		Beaumont	
	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH
1	3.04	0.82	3.74	0.89	4.08	0.91
2	2.99	0.83	3.70	0.89	4.08	0.91
3	3.01	0.83	3.61	0.90	4.08	0.91
4	2.97	0.83	3.59	0.90	4.08	0.91
5 PONCTUELS						
N	Dissangis		Chablis		Beaumont	
	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH
1	3.16	0.80	3.80	0.88	4.08	0.91
2	3.10	0.82	3.76	0.89	4.08	0.91
3	3.00	0.83	3.61	0.90	4.08	0.91
4	3.02	0.83	3.64	0.90	4.08	0.91

Tableau 16 Critère d'évaluation de la semi-distribuée (N est le nombre de sous-bassins intermédiaires d'apport diffus)

La qualité des simulations s'améliore vers l'aval du Serein avec les meilleurs critères de performance relevés à Beaumont et les plus mauvais à Dissangis.

Enfin, nous concluons qu'il ne sert à rien d'utiliser une distribution trop importante puisqu'une sur-distribution influence très peu les simulations.

4.4.2 Calage du paramètre X4 optimisé sur chaque sous-bassin

Dans les tests suivants, le jeu de paramètre retenu pour GR4J n'est plus identique sur chacun des sous-bassins. Trois paramètres demeurent identiques mais le quatrième (X4) correspondant au temps de transfert entre la pluie et le débit est autorisé à prendre des valeurs distinctes sur chacun des sous-bassins.

Le Tableau 17 présente les résultats du calage des paramètres X1, X2, X3 de GR4J et les paramètres du modèle Hayami sur chaque demi-période de 1995 à 2005. Le calage des paramètres X1, X2 et X3 est quasiment identique à celui des tests précédents (cf. 4.3.1 Calage identique sur chaque sous-bassin). Le calage semble cohérent au vu des valeurs des paramètres d'une période à l'autre. Le niveau de distribution influence peu ce calage. Nous retrouvons une célérité moyenne des crues du Serein de 0.73 m/s pour un coefficient de diffusion de 5000 m²/s.

0 apport ponctuel												
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
PARAMETRE	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
X1	179	223	201	181	223	202	183	224	204	183	227	205
X2	-0.51	-0.73	-0.62	-0.48	-0.74	-0.61	-0.45	-0.77	-0.61	-0.44	-0.70	-0.57
X3	163	146	155	159	147	153	146	146	146	140	130	135
X4												
C (m/s)	0.64	0.80	0.72	0.72	0.77	0.75	0.75	0.67	0.71	0.72	0.63	0.68
D (m ² /s)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
3 apports ponctuels												
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
PARAMETRE	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
X1	182	224	203	182	226	204	183	225	204	181	224	203
X2	-0.45	-0.73	-0.59	-0.44	-0.69	-0.57	-0.42	-0.72	-0.57	-0.46	-0.86	-0.66
X3	143	146	145	141	138	140	131	139	135	140	147	144
X4												
C (m/s)	0.69	0.77	0.73	0.77	0.77	0.77	0.78	0.69	0.74	0.74	0.70	0.72
D (m ² /s)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
5 apports ponctuels												
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
PARAMETRE	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
X1	182	221	202	183	223	203	182	225	204	182	223	203
X2	-0.45	-0.72	-0.59	-0.42	-0.74	-0.58	-0.44	-0.70	-0.57	-0.43	-0.76	-0.60
X3	144	140	142	133	143	138	140	139	140	137	148	143
X4												
C (m/s)	0.69	0.73	0.71	0.76	0.71	0.74	0.76	0.74	0.75	0.76	0.72	0.74
D (m ² /s)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000

Tableau 17 : Calage des paramètres X1, X2, X3 de GR4J et des paramètres Hayami en fonction du niveau de la semi-distribution

Le Tableau 18 présente le calage du paramètre X4 pour chaque sous-bassin de la distribution du modèle et sur chaque demi-période de 1995 à 2005. Les données des sous-bassins en italique correspondent aux sous-bassins d'apport ponctuel. Ils sont classés par ordre décroissant de leur surface (soit n le nombre d'apports ponctuels : *Sbv 1* est le plus grand des sous-bassins d'apport ponctuel, *Sbv n* est le plus petit des sous-bassins d'apport ponctuel). Le calage du paramètre X4 est très instable. En effet, pour un même sous-bassin, la valeur du paramètre est très différente suivant le niveau de distribution. Dans la plupart des cas, le calage concorde peu entre les deux demi-périodes et on observe des mécanismes de compensations entre sous-bassins.

X4	0 apport ponctuel											
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
Sbv 1	28	41	34.50	50	30	40.17	30.28	0.5	15.39	31.11	0.5	15.81
Sbv 2				35	56	45.34	87.59	40.95	64.27	47.98	0.5	24.24
Sbv 3							32.19	59.85	46.02	137.01	133.96	135.49
Sbv 4										31.59	57.98	44.79
X4	3 apports ponctuels											
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
Sbv 1	65	57	61.34	4.57	56.17	30.37	4.75	56	30.38	57.41	56.4	56.91
Sbv 2	134	49	91.32	135.05	140.03	137.54	164.29	137.36	150.83	143.15	46.37	94.76
Sbv 3	113	1	56.72	117.77	0.5	59.14	28.28	0.5	14.39	0.5	0.5	0.50
Sbv 4	26	39	32.76	35.92	27.41	31.67	24.76	0.5	12.63	23.43	0.5	11.97
Sbv 5				51.63	52.07	51.85	93.49	39.13	66.31	35.72	32.01	33.87
Sbv 6							56.08	58.11	57.10	88.31	44.94	66.63
Sbv 7										8.44	60.64	34.54
X4	5 apports ponctuels											
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
Sbv 1	65	56	60	4.58	0.5	2.54	4.54	55.72	30.13	55.78	56.35	56.07
Sbv 2	59	0.5	30	131.86	129.85	130.86	137.57	137.9	137.74	133.76	45.81	89.79
Sbv 3	113	0.5	57	113.35	0.5	56.93	25.09	0.5	12.80	116.44	0.5	58.47
Sbv 4	121	6571	3346	119.16	0.5	59.83	125.89	0.5	63.20	40.43	0.5	20.47
Sbv 5	119	0.5	60	123.62	0.5	62.06	119.01	0.5	59.76	120.5	0.5	60.50
Sbv 6	24	40	32	28.17	26.33	27.25	23.51	24.74	24.13	20.04	22.83	21.44
Sbv 7				56.06	52.06	54.06	57.94	41.67	49.81	45.11	33.62	39.37
Sbv 8							57.58	59.3	58.44	52.95	46.21	49.58
Sbv 9										8.13	61.35	34.74

Tableau 18 : Calage du paramètre X4 de GR4J optimisé sur chaque sous-bassin (Les données en italique correspondent aux sous-bassins d'apport ponctuel)

Le Tableau 19 présente les performances des différentes configurations des distributions de notre modélisation à l'aval du Serein (Beaumont) et des stations hydrométriques intérieures (Dissangis et Chablis). Il s'agit des moyennes des deux demi-périodes des critères de Nash et RMSE calculés en validation.

Les simulations à Beaumont sont toujours aussi satisfaisantes avec un critère de Nash de 91%. Le niveau de distribution n'influence presque pas les simulations obtenues à l'aval.

Les simulations à l'intérieur de notre domaine d'étude sont bonnes avec un critère de Nash moyen de 88% à Chablis et 82% à Dissangis. Par rapport à la série de tests avec un calage identique, les simulations de Dissangis sont bien meilleures dans certains cas tandis que celles de Chablis ont plutôt tendance à être dégradées. La qualité des simulations est plus sensible au niveau de distribution avec des simulations qui sont parfois très mauvaises (cas d'une distribution de 6 bassins versants avec 5 apports ponctuels et 1 apport diffus).

0 PONCTUELS						
N	Dissangis		Chablis		Beaumont	
	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH
1	3.30	0.79	3.61	0.90	4.09	0.91
2	2.64	0.87	3.76	0.89	4.10	0.91
3	2.70	0.86	3.88	0.89	4.10	0.91
4	2.69	0.86	3.88	0.89	4.08	0.91
3 PONCTUELS						
N	Dissangis		Chablis		Beaumont	
	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH
1	3.27	0.80	4.03	0.87	4.09	0.91
2	3.02	0.83	4.01	0.87	4.09	0.91
3	3.08	0.82	3.99	0.87	4.10	0.90
4	3.15	0.82	3.83	0.89	4.12	0.90
5 PONCTUELS						
N	Dissangis		Chablis		Beaumont	
	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH
1	3.42	0.77	4.08	0.86	4.10	0.91
2	2.76	0.85	4.22	0.86	4.08	0.91
3	3.05	0.82	3.93	0.88	4.09	0.91
4	3.20	0.81	3.86	0.88	4.11	0.91

Tableau 19 : Critère d'évaluation de la semi-distribuée avec un calage du paramètre X4 de GR4J optimisé (N est le nombre de sous-bassins intermédiaires d'apport diffus)

Les simulations s'améliorent vers l'aval du Serein avec les meilleurs critères de performance relevés à Beaumont et les plus mauvais à Dissangis. L'optimisation du calage du paramètre X4 conduit à des simulations qui varient avec le niveau de distribution. Ces simulations sont parfois de meilleure qualité par rapport à celles du calage identique mais ce n'est pas général. Bien qu'il ne semble pas y avoir de liens logiques entre le niveau de distribution et la qualité des simulations, nous constatons qu'une sur-distribution tend à dégrader les simulations.

Le calage du paramètre X4 étant instable, et insignifiant "hydrologiquement parlant", et vu qu'il n'y a pas d'améliorations considérables des simulations, nous concluons que l'optimisation du paramètre de décalage temporel entre pluie et débit n'est pas valable pour la modélisation semi-distribuée du Serein.

4.4.3 Calage du paramètre X2 optimisé sur chaque sous-bassin

La géologie du Serein évolue spatialement avec une zone karstique d'infiltration entre Dissangis et Chablis. D'après un rapport du BRGM [1] (cf. annexe 2), le Serein est soumis à des échanges avec les bassins voisins dans cette zone. Ainsi, le paramètre X2 de GR4J, qui modélise les échanges entre bassins versants, est calé sur chaque sous-bassin indépendamment des autres. Les autres paramètres sont identiques pour tous les sous-bassins. Nous espérons traduire les caractéristiques de ce bassin versant par les paramètres du modèle pluie-débit. Nous présentons ci-dessous les résultats de la modélisation hydrologique GR4J couplée avec le modèle Hayami pour un modèle hydrologique pluie-débit optimisé par le calage du paramètre X2 sur chaque sous-bassin.

Le Tableau 20 présente les résultats du calage des paramètres X1, X3, X4 de GR4J et les paramètres du modèle Hayami sur chaque demi-période de 1995 à 2005. Le calage des paramètres X1, X3 et X4 est quasiment identique à celui des tests précédents (cf. 4.3.1 Calage identique sur chaque sous-bassin). Les valeurs des paramètres d'une période à l'autre étant semblables, le calage semble cohérent. Par ailleurs, il apparaît que le niveau de distribution influence peu le calage de ces trois

paramètres. Nous retrouvons une célérité moyenne des crues du Serein de 0.72 m/s pour un coefficient de diffusion de 5000 m²/s.

0 apport ponctuel												
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
PARAMETRE	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
X1	179	223	201	180	224	202	179	223	201	180	223	202
X2												
X3	163	146	155	163	146	155	162	143	153	161	144	153
X4	28	41	35	35	44	40	34	46	40	35	46	41
C (m/s)	0.64	0.80	0.72	0.64	0.78	0.71	0.64	0.79	0.72	0.64	0.79	0.72
D (m ² /s)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
3 apports ponctuels												
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
PARAMETRE	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
X1	179	222	201	180	222	201	179	223	201	179	223	201
X2												
X3	163	147	155	163	144	154	163	144	154	163	145	154
X4	32	42	37	34	45	40	35	46	41	35	45	40
C (m/s)	0.64	0.79	0.72	0.64	0.78	0.71	0.64	0.78	0.71	0.63	0.78	0.71
D (m ² /s)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
5 apports ponctuels												
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
PARAMETRE	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
X1	179	22	101	180	223	202	179	223	201	179	222	201
X2												
X3	163	147	155	162	144	153	162	144	153	163	145	154
X4	31	41	36	32	44	38	34	46	40	33	44	39
C (m/s)	0.64	0.79	0.72	0.63	0.78	0.71	0.63	0.79	0.71	0.63	0.78	0.71
D (m ² /s)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000

Tableau 20 : Calage des paramètres X1, X3, X4 de GR4J et des paramètres Hayami en fonction du niveau de la semi-distribution

Le Tableau 21 présente le calage du paramètre X2 pour chaque sous-bassin de la distribution. Les données des sous-bassins en italique correspondent aux sous-bassins d'apport ponctuel. Ils sont classés par ordre décroissant de leur surface (soit n le nombre d'apports ponctuels : *Sbv 1* est le plus grand des sous-bassins d'apport ponctuel, *Sbv n* est le plus petit des sous-bassins d'apport ponctuel).

Bien que le calage du paramètre X2 semble plus stable que celui du paramètre X4 (cf. 4.3.2 Calage du paramètre X4 optimisé sur chaque sous-bassin), les valeurs du paramètre ne concordent pas toujours d'une période à l'autre. Nous ne pouvons donc pas faire confiance à ce calage pour analyser les pertes ou gains de ce bassin à travers le paramètre X2.

X2	0 apport ponctuel											
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
Sbv 1	-0.51	-0.73	-0.62	-0.72	-0.73	-0.73	-0.73	-1.44	-1.09	-0.73	-0.61	-0.67
Sbv 2				-0.32	-0.70	-0.51	-0.53	-0.52	-0.53	-0.68	-1.58	-1.13
Sbv 3							-0.29	-0.49	-0.39	-0.41	-0.55	-0.48
Sbv 4										-0.29	-0.53	-0.41
X2	3 apports ponctuels											
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
Sbv 1	-0.29	-1.67	-0.98	-0.3	-0.49	-0.40	-0.34	-0.54	-0.44	-0.3	-0.5	-0.40
Sbv 2	-0.39	-1.59	-0.99	-0.45	-0.51	-0.48	-0.42	-0.56	-0.49	-0.44	-0.5	-0.47
Sbv 3	-0.77	-0.59	-0.68	-0.74	-0.55	-0.65	-0.73	-0.6	-0.67	-0.76	-0.25	-0.51
Sbv 4	-0.54	-0.58	-0.56	-0.75	-1.48	-1.12	-0.75	-1.6	-1.18	-0.75	-1.35	-1.05
Sbv 5				-0.37	-0.5	-0.44	-0.58	-0.58	-0.58	-0.73	-0.57	-0.65
Sbv 6							-0.29	-0.53	-0.41	-0.46	-0.52	-0.49
Sbv 7										-0.3	-1.55	-0.93
X2	5 apports ponctuels											
	1 apport diffus			2 apports diffus			3 apports diffus			4 apports diffus		
	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne	P1	P2	Moyenne
Sbv 1	-0.29	-1.79	-1.04	-0.29	-0.27	-0.28	-0.30	-0.5	-0.40	-0.29	-0.5	-0.40
Sbv 2	-0.36	-0.54	-0.45	-0.37	-0.57	-0.47	-0.43	-0.53	-0.48	-0.41	-0.27	-0.34
Sbv 3	-0.80	-0.66	-0.73	-0.75	-0.61	-0.68	-0.75	-1.54	-1.15	-0.74	-0.59	-0.67
Sbv 4	-0.75	-0.62	-0.69	-0.69	-0.6	-0.65	-0.73	-0.25	-0.49	-0.69	-0.54	-0.62
Sbv 5	-0.80	-1.65	-1.23	-0.74	-0.57	-0.66	-0.69	-1.54	-1.12	-0.76	-0.54	-0.65
Sbv 6	-0.52	-0.61	-0.57	-0.73	-1.56	-1.15	-0.73	-1.47	-1.10	-0.75	-1.53	-1.14
Sbv 7				-0.35	-0.53	-0.44	-0.57	-0.56	-0.57	-0.71	-0.56	-0.64
Sbv 8							-0.29	-0.53	-0.41	-0.4	-0.52	-0.46
Sbv 9										-0.28	-1.56	-0.92

Tableau 21 : Calage du paramètre X2 de GR4J optimisé sur chaque sous-bassin (les données en italique correspondent aux sous-bassins d'apport ponctuel)

Le Tableau 22 présente les performances des différentes configurations des distributions de notre modélisation à l'aval du Serein (Beaumont) et des stations hydrométriques intérieures (Dissangis et Chablis). Il s'agit des moyennes des deux demi-périodes des critères de Nash et RMSE calculés en validation.

Les simulations à Beaumont sont toujours aussi satisfaisantes avec un critère de Nash de 91%. Le niveau de distribution n'influence pas les simulations obtenues à l'aval.

Les simulations à l'intérieur de notre domaine d'étude sont bonnes avec un critère de Nash moyen de 86% à Chablis et 81% à Dissangis. Par rapport à la série de tests avec un calage identique (cf. 4.3.1 Calage identique sur chaque sous-bassin), les simulations de Dissangis et de Chablis sont moins bonnes. La qualité des simulations est plus sensible au niveau de distribution dont certaines sont parfois très mauvaises (cas d'une distribution de 7 bassins versants avec 5 apports ponctuels et 2 apports diffus). Bien qu'il semble que les simulations s'améliorent en augmentant la distribution, ce n'est pas une constatation générale.

0 PONCTUELS						
N	Dissangis		Chablis		Beaumont	
	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH
1	3.30	0.79	3.61	0.90	4.09	0.91
2	3.11	0.82	4.52	0.85	4.08	0.91
3	3.06	0.82	4.88	0.82	4.10	0.91
4	3.12	0.82	4.87	0.82	4.10	0.91
3 PONCTUELS						
N	Dissangis		Chablis		Beaumont	
	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH
1	3.11	0.81	4.03	0.87	4.11	0.91
2	3.05	0.82	3.95	0.87	4.10	0.91
3	3.06	0.82	3.73	0.89	4.10	0.91
4	2.98	0.83	3.72	0.89	4.11	0.91
5 PONCTUELS						
N	Dissangis		Chablis		Beaumont	
	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH	RMSE (m3/s)	NASH
1	3.18	0.80	4.08	0.86	4.10	0.91
2	3.30	0.79	4.29	0.85	4.10	0.91
3	3.07	0.82	3.77	0.89	4.10	0.91
4	3.09	0.82	3.83	0.88	4.11	0.91

Tableau 22 : Critère d'évaluation de la semi-distribuée avec un calage du paramètre X2 de GR4J optimisé (N est le nombre de sous-bassins intermédiaires d'apport diffus)

La qualité des simulations s'améliore vers l'aval du Serein avec les meilleurs critères de performance relevés à Beaumont et les plus mauvais à Dissangis. Le calage du paramètre X2 n'est pas stable et ne peut donc pas être considéré d'un point de vue hydrologique. De plus, nous n'obtenons pas d'amélioration significative des simulations. Nous concluons que l'optimisation du paramètre des échanges entre bassins versants n'est pas valable pour la modélisation semi-distribuée du Serein.

4.4.4 Synthèse

Les trois séries de test précédentes ont montré qu'une optimisation des paramètres du modèle pluie-débit GR4J conduit à un calage instable. Ces simulations ne sont donc pas valables. La modélisation semi-distribuée fait apparaître des résultats satisfaisants avec des simulations qui s'améliorent vers l'aval du Serein. Enfin le principal constat est qu'il ne sert à rien de construire un modèle sur-distribué puisque le niveau de distribution influence peu la qualité des simulations. Après analyse des résultats de la modélisation semi-distribuée avec couplage entre le modèle pluie-débit GR4J et le modèle de propagation Hayami, la meilleure configuration retenue est une distribution de deux sous-bassins d'apports diffus avec un calage identique sur chaque élément de la distribution. La Figure 24 représente les deux sous-bassins versants avec leur surface et leur localisation sur les données MNT.

A partir de cette configuration, nous étudions maintenant les performances de la semi-distribution pour simuler les mécanismes complexes de propagation de nos cinq crues de référence. Le Tableau 23 présente les erreurs d'amplitude des simulations en validation. Les hydrogrammes sont présentés en annexe 8.

MODELISATION SEMI-DISTRIBUEE
 2 sous-bassins : 0 apport(s) ponctuel(s) et 2 apport(s) diffus
 Surface des apports diffus :
 518.542 km²
 551.7 km²

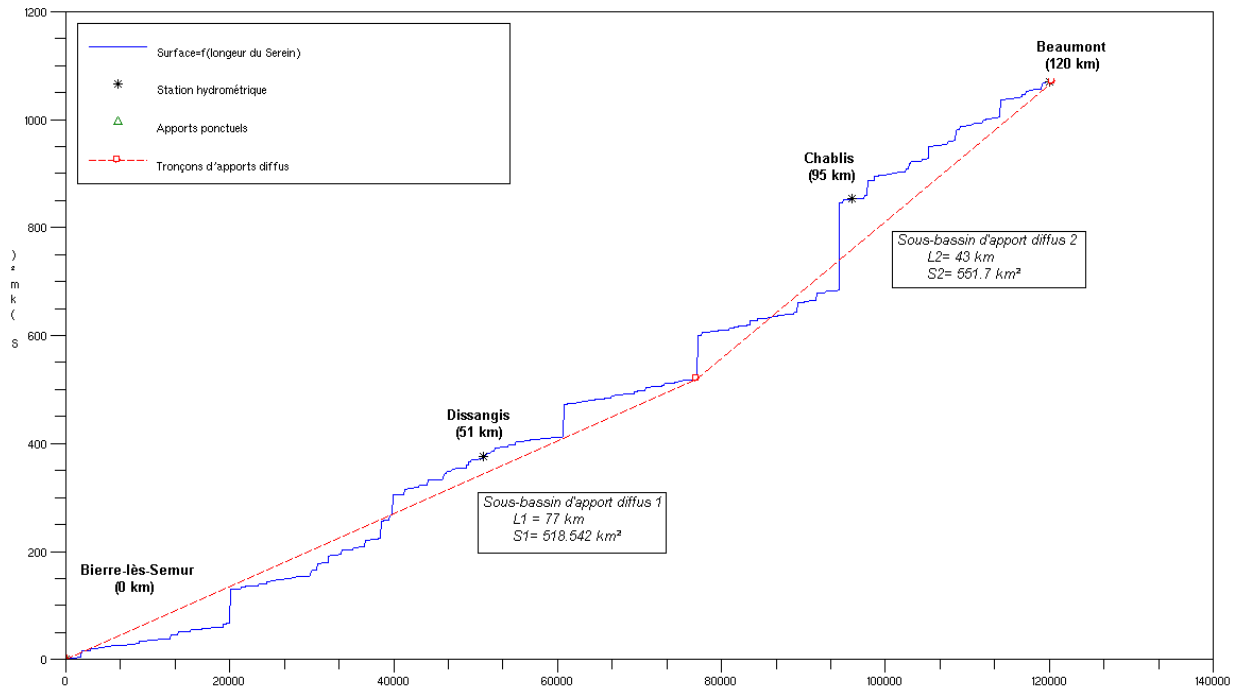


Figure 24 : Données MNT du Serein avec les tronçons des deux sous-bassins d'apports diffus

2 apports diffus			
Beaumont			
	Débit max (m3/s)		Erreur
janv-98	55		5%
févr-99	86		39%
mars-99	105		6%
déc-99	117		1%
févr-02	52		8%

Tableau 23 : Erreur d'amplitude du modèle pluie-débit GR4J couplé avec le modèle de propagation Hayami en validation sur cinq crues du Serein

Nous constatons que malgré des critères de Nash indiquant de bonnes simulations (91% à Beaumont, 90% à Chablis et 83% à Dissangis) certaines simulations présentent des erreurs d'amplitude de l'ordre de 30% qui sont tout de même moins importantes que celles de la modélisation globale (cf. 3 Modélisation hydrologique globale). Cependant, les simulations sont bien en phase avec l'observation (cf. annexe 8 – Figure 32).

Après avoir déterminé la meilleure configuration pour une modélisation semi-distribuée du bassin versant du Serein, nous allons maintenant étudier les améliorations possibles par l'utilisation d'un modèle hydraulique complet au lieu du modèle simplifié d'Hayami.

5 MODELISATION HYDROLOGIQUE COUPLEE AVEC LE MODELE HYDRAULIQUE HEC – RAS

Nous cherchons maintenant à comparer les simulations de la modélisation hydrologique GR4J couplée avec un modèle de propagation hydraulique simplifié ou avec un modèle hydraulique complet. Dans la partie précédente (cf. 4 Modélisation hydrologique couplée avec le modèle hydraulique Hayami), nous avons déterminé la meilleure configuration semi-distribuée : une distribution de deux sous-bassins d'apports diffus avec un calage identique sur chaque sous-bassin. Dans ce qui suit nous utilisons cette même configuration pour simuler les crues du Serein avec un modèle hydraulique complet. Nous présentons tout d'abord le modèle hydraulique HEC-RAS avant de présenter les résultats des simulations comparées avec celles du modèle simplifié Hayami.

5.1 Construction du modèle hydraulique avec HEC-RAS

Le code de calcul HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) est un logiciel d'hydraulique fluvial en une dimension développé au Hydrologic Engineering Center du US Army Corps of Engineers. Ce logiciel permet d'effectuer des calculs d'écoulement à surface libre filaire permanent, transitoire ou critique. Ce modèle hydraulique nécessite la résolution des lois physiques des écoulements, la connaissance de la géométrie du cours d'eau et de ses caractéristiques de rugosité et du débit d'écoulement.

5.1.1 Conditions du calcul et équations mises en jeu

Dans notre cas d'étude, nous utilisons le noyau de calcul non-permanent. HEC-RAS résout numériquement les lois physiques qui gouvernent les écoulements fluviaux non-permanents en une dimension [13]. Il s'agit des équations de Saint-Venant :

$$\begin{cases} \frac{\delta S}{\delta t} + \frac{\delta U}{\delta x} - q_l = 0 \\ \frac{\delta U}{\delta t} + U \frac{\delta U}{\delta x} = -g \cos \alpha \frac{\delta h}{\delta x} + g \sin \alpha - S_f \end{cases} \quad (6)$$

avec S la section du cours d'eau, t le temps, x la distance le long du canal, U la vitesse de l'écoulement, q_l les apports latéraux par unité de longueur, g l'accélération gravitationnelle, α la pente du cours d'eau, h le tirant d'eau, S_f les forces de frottement déterminés par l'équation de Manning :

$$S_f = g \frac{Q|Q|n^2}{2.208R_H^{4/3}S^2} \quad (7)$$

avec R_H le rayon hydraulique, Q le débit et n le coefficient de Manning.

Ces équations sont discrétisées par la méthode des différences finies. Le schéma de discrétisation utilisé est un schéma implicite de Priesmann. Dans ce schéma, les dérivées spatiales et les valeurs des fonctions sont calculées en un point intérieur $(n+\theta)$ et au point $(n+1)$ si n est l'indice de discrétisation temporel. Ce type de schéma permet de prendre en compte l'information d'une partie de notre système hydraulique en tout point de la discrétisation. Ce schéma est inconditionnellement stable pour $0.5 < \theta < 1$, conditionnellement stable pour $\theta = 0.5$ et instable pour $\theta < 0.5$.

En pratique, d'autres facteurs peuvent aussi contribuer à la non-stabilité des calculs tels que des changements brusques dans la géométrie du cours en plus des contraintes de discrétisations. C'est pourquoi nous nous sommes avant tout assurés de la robustesse et précision des calculs de notre modélisation du Serein par différents tests en variant les discrétisations spatiales et temporelles.

5.1.2 Définition de la géométrie du cours d'eau

Les réseaux de cours d'eau sont organisés en biefs séparés par des connections où s'opèrent les additions et séparations de débits. Les données relatives à chaque section sont : les profils en travers, les coefficients de rugosité, pertes de charge et la distance à la section suivante.

Dans notre cas nous modélisons le Serein sur 120 km de Bierre-lès-Sémur à Beaumont. Nous avons les données de 32 profils en travers entre Dissangis et Beaumont. Entre deux profils successifs, nous extrapolons les profils afin d'obtenir une discrétisation spatiale suffisante pour assurer la précision des calculs. Le profil en travers de Dissangis a été extrapolé jusqu'à Bierre-lès-Sémur pour combler le manque de données (cf. annexe 10). L'extrapolation a été réalisée par un module du logiciel HEC-RAS. La visualisation de ces profils extrapolés permet de s'assurer qu'ils sont valables. Les coefficients de rugosité (coefficient de Strickler ou Manning) seront déterminés par un calage avec les débits observés.

Le Serein contient de nombreux seuils tels que des ouvrages de franchissement (ponts, chaussées...) qui obstruent l'écoulement et induisent des pertes de charge. Cependant, nous ne disposons pas des données de géométrie et emplacement de ces seuils pour pouvoir les prendre en compte. Il conviendra donc de se rappeler lors de nos simulations que notre modèle hydraulique ne contient pas ces seuils, ce qui peut conduire à des caractéristiques du cours d'eau disproportionnées.

5.1.3 Conditions limites et conditions initiales

Les conditions limites et initiales sont parfois délicates pour ce genre de modélisation puisqu'elles peuvent conduire à des instabilités. En général, il faut éviter les discontinuités (changements brusques des hauteurs d'eau, débits...). Dans notre cas nous réalisons une modélisation semi-distribuée du Serein entre Bierre-lès-Sémur avec deux sous-bassins d'apports diffus:

- La condition limite amont est l'hydrogramme de Bierre-lès-Sémur (station hydrométrique de l'amont du Serein) qui représente le débit observé au cours du temps.
- La condition limite aval est une hauteur d'eau. Le problème est que nous cherchons à simuler l'hydraulique de l'aval du Serein, nous ne disposons donc pas de ces données. Un tronçon fictif a donc été rajouté à l'aval de Beaumont (station hydrométrique aval du Serein) pour lequel nous définissons une condition limite de hauteur d'eau arbitraire. La longueur de ce tronçon fictif a été dimensionnée de manière à ce que l'écoulement calculé à Beaumont ne dépende pas de cette condition limite fictive.
- Enfin nous avons deux conditions limites "de bord" le long du Serein. Il s'agit des hydrogrammes des apports latéraux des sous-bassins d'apports diffus. Ces hydrogrammes sont calculés sur chacun des deux sous-bassins par le modèle hydrologique pluie-débit GR4J en réponse aux précipitations observées.

5.2 Résultats de la modélisation

Nous procédons à la simulation couplée entre le modèle pluie-débit GR4J et le modèle hydraulique complet HEC-RAS avec une distribution de deux sous-bassins d'apports diffus.

5.2.1 Méthodologie

Nous voulons comparer les performances des simulations entre le couplage avec le modèle hydraulique simplifié Hayami et le couplage avec le modèle hydraulique complet HEC-RAS. Nous effectuons les simulations dans la meilleure configuration de distribution qui a été déterminée précédemment : deux sous-bassins d'apport diffus (cf. 4.3.4 Synthèse - Figure 24).

Tout comme la modélisation couplée avec le modèle Hayami, les débits à l'exutoire des deux sous-bassins sont générés par le même calcul hydrologique GR4J (cf. 4.3.1 Calage identique sur chaque sous-bassin) correspondant à la distribution choisie. Les entrées de GR4J (pluies globales et évapotranspiration) sont considérées homogènes et identiques sur tout le bassin versant. Les paramètres de GR4J, obtenus par le calage pour une distribution de deux sous-bassins versants d'apport diffus, sont les mêmes pour tous les sous-bassins. Le débit observé à l'amont du Serein (Bierre-lès-Sémur) ainsi que les débits des deux sous-bassins d'apports diffus (uniformément répartis sur chaque sous-bassin) sont propagés vers l'aval par le modèle hydraulique HEC-RAS.

Les calculs du modèle hydraulique, qui résout en chaque point de la discrétisation les équations numérisées de Saint Venant, sont très longs et nécessitent un espace mémoire trop important. C'est pourquoi nous avons décidé de ne simuler que nos cinq crues de référence et la crue de Novembre 2000. La Figure 25 présente notre hydrogramme recomposé.

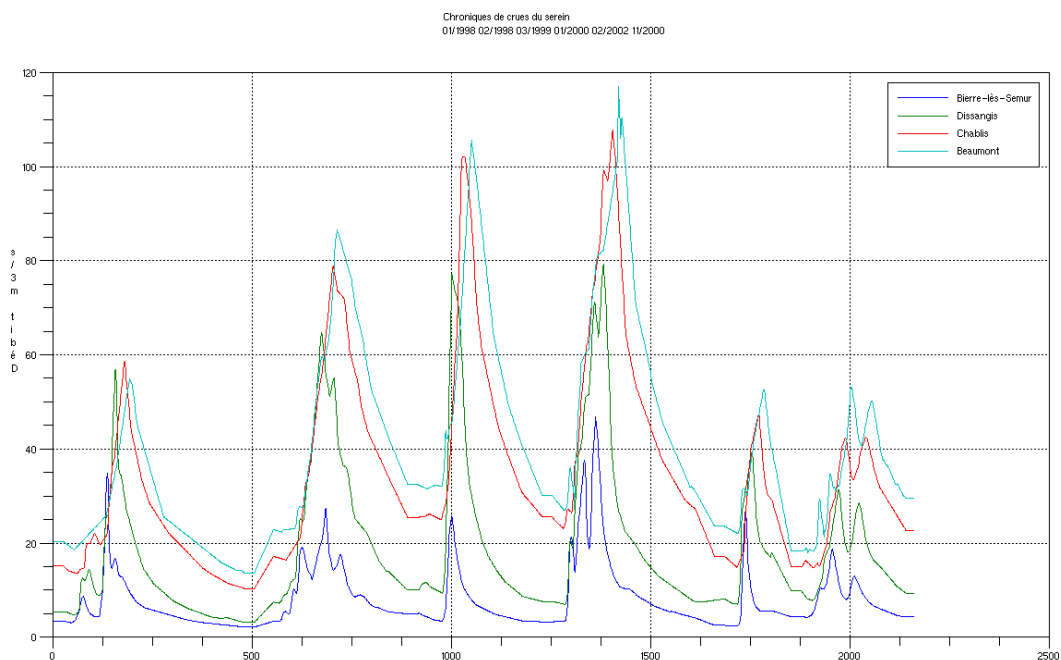


Figure 25 : Chronique de six crues observées du Serein

Deux crues successives doivent être suffisamment éloignées afin que l'hydrogramme d'une crue ne soit pas influencé par celui de la crue précédente lors des simulations. Après plusieurs tests variant la durée de séparation, la taille limite de raccordement entre deux crues successives correspond à trois jours de données au pas de temps horaire.

Le coefficient de Strickler, nécessaire au calcul hydraulique, est calé de manière à obtenir les meilleurs résultats par rapport aux six crues observées. Ce calage est effectué sur la période des données de la chronique de crues présentée ci-dessus. Nous ne faisons plus de contrôle. Afin de comparer au mieux les performances du modèle hydraulique HEC-RAS par rapport au modèle Hayami, nous avons calculé les critères de qualité à Beaumont de la modélisation couplée avec le modèle Hayami pour la simulation des six crues choisies uniquement (cf. annexe8 – Figure 32). Le Tableau 24 présente ces résultats.

HAYAMI	
2 apports diffus	
RMSE (m3/s)	8.11
Nash	0.86

Tableau 24 : Critères de qualité de la simulation d'une chronique de six crues avec le couplage Hayami à Beaumont

Nous constatons que les critères de qualité à Beaumont pour une simulation sur une chronique de crue sont moins bons (Nash=91% et RMSE=4.08 m3/s pour la simulation sur la totalité des données de 1995 à 2005).

5.2.2 Calage du Strickler

Les critères de performance sont calculés à Beaumont pour différentes valeurs du Strickler K (ou coefficient de Manning n avec $n=1/K$). La simulation de la chronique de crue montre qu'il y a très peu de débordement en lit majeur. Le Strickler du lit majeur est donc fixé à 10, valeur de référence pour un lit majeur, tandis que celui du lit mineur est calé. Le Tableau 25 présente les performances de la simulation en validation couplée avec HEC-RAS.

2 apports diffus		
Beaumont		
Strickler	RMSE (m3/s)	Nash
44	14	0.61
40	13.2	0.62
36	12.98	0.63
20	10.68	0.75
13	8.01	0.86
12	7.88	0.86
11	7.73	0.87
10	7.97	0.86

Tableau 25 : Critères de qualité en validation à Beaumont de la simulation d'une chronique de six crues avec le couplage HEC-RAS

La modélisation couplée avec le modèle hydraulique HEC-RAS montre qu'il existe un Strickler K optimal pour lequel on obtient les meilleures performances : $K=11$. Ce résultat est peu réaliste. Un Strickler $K=11$ correspond à des surfaces très rugueuses du type des lits majeurs.

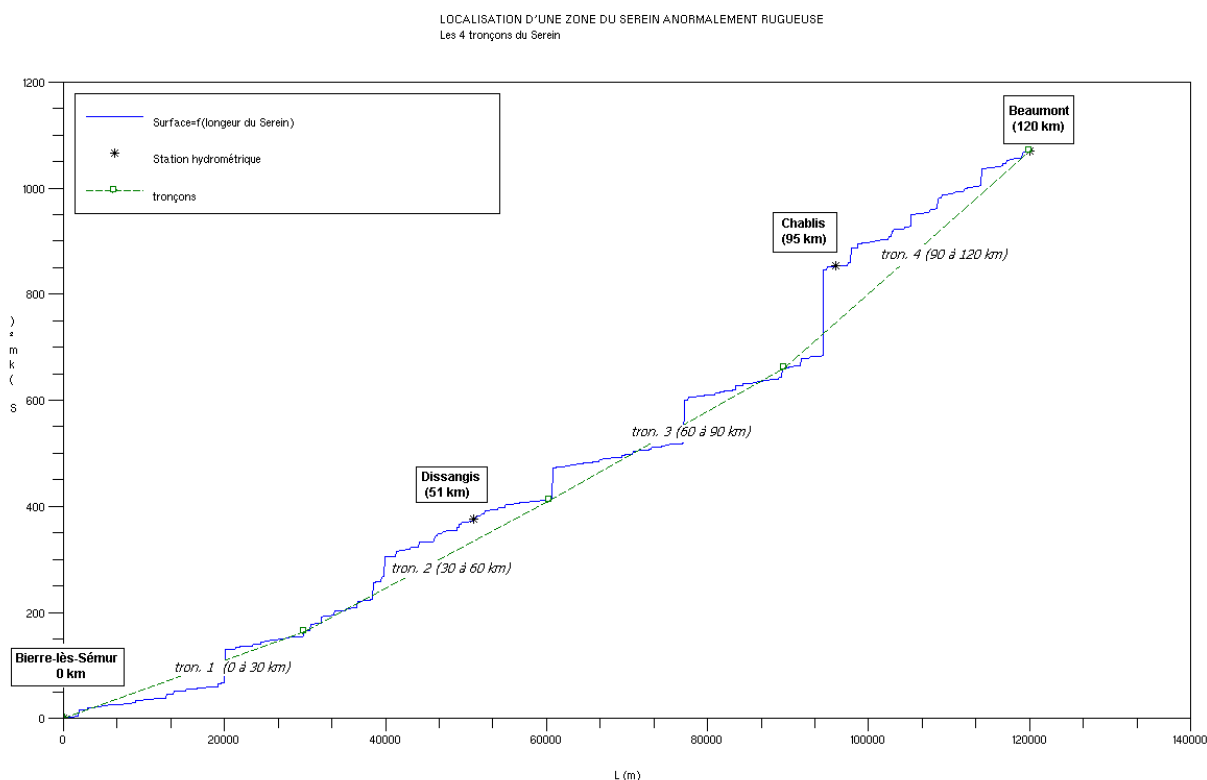
Nous rappelons que le modèle hydraulique que nous avons construit ne prend pas en compte les nombreux seuils présents sur le Serein. Ces ouvrages hydrauliques induisent des pertes de charge qui ralentissent l'écoulement. Ainsi, nous pensons que ce Strickler, trop rugueux pour un lit mineur, compense l'absence de ces seuils non entrés dans le modèle hydraulique.

Mise à part le calage surprenant du Strickler en lit mineur, les simulations sont d'une bonne qualité avec un critère de Nash de 87% à Beaumont. Par rapport au modèle hydraulique simplifié Hayami, le modèle hydraulique complet HEC-RAS est meilleur avec une différence d'un point sur le critère de Nash et de 5% en RMSE. Cependant, même si le modèle hydraulique complet est plus précis que le modèle simplifié, la différence est moindre et la rentabilité en temps de calcul n'est pas intéressante.

5.2.3 Localisation d'un tronçon de rivière anormalement dissipatif

Face au calage du Strickler en lit mineur qui donne une valeur beaucoup trop rugueuse, nous voulons savoir si l'écoulement ne serait pas ralenti à un endroit particulier du cours d'eau. Pour ce faire nous décomposons le Serein en quatre tronçons de même longueur.

Le Strickler du lit mineur est fixé à 40 sur tous les tronçons sauf sur un où il est calé. Le Strickler du lit majeur est fixé à 10 sur tous les tronçons. Le calage utilise les critères de Nash et RMSE comme fonction objectif par rapport aux observations de la première station hydrométrique à l'aval du tronçon étudié. Une fois que le Strickler en lit mineur est calé sur un tronçon, nous calculons les critères de performance de la simulation à l'aval du Serein (Beaumont). La Figure 26 présente les tronçons du Serein.



Le Tableau 26 présente les critères de Nash et RMSE utilisés comme fonction objectif pour le calage du Strickler sur chaque tronçon.

Strickler	Tronçon 1 Critères calculés à Dissangis		Tronçon 2 Critères calculés à Chablis		Tronçon 3 Critères calculés à Chablis		Tronçon 4 Critères calculés à Beaumont	
	RMSE (m3/s)	Nash	RMSE (m3/s)	Nash	RMSE (m3/s)	Nash	RMSE (m3/s)	Nash
12.5	8.37	0.71	9.59	0.78	9.11	0.80	11.09	0.73
11.8	8.53	0.70	-	-	-	-	10.92	0.74
11.1	7.85	0.75	-	-	-	-	10.73	0.75
10.5	8.91	0.67	-	-	-	-	10.56	0.76
10	9.10	0.66	9.36	0.79	9.09	0.80	10.40	0.76
9			9.28	0.80	6.54	0.90	-	-
8			9.21	0.80	9.28	0.80	-	-
7			9.18	0.80	9.48	0.79	-	-

Tableau 26 : Calage du Strickler en lit mineur sur chacun des quatre tronçons du Serein

Les résultats du calage sont très intéressants puisque nous observons un cas qui est bien meilleur que les autres. En effet, si on fixe un Strickler en lit majeur à 10, un Strickler en lit mineur à 40 sauf sur le tronçon 3 où il vaut 9, alors les simulations se rapprochent considérablement de l'observation avec un Nash de 90%. Le Tableau 27 présente les meilleurs critères de qualité calculés à Beaumont pour chaque tronçon.

Critères calculés à Beaumont							
Tronçon 1		Tronçon 2		Tronçon 3		Tronçon 4	
Strickler=11.1		Strickler=7		Strickler=9		Strickler=10	
RMSE (m3/s)	Nash	RMSE (m3/s)	Nash	RMSE (m3/s)	Nash	RMSE (m3/s)	Nash
12.6	0.65	10.95	0.74	10.02	0.78	10.4	0.76

Tableau 27 : Critères de qualité évalués à Beaumont sur chaque tronçon pour la localisation d'une zone anormalement rugueuse

Nous remarquons une fois de plus que la meilleure simulation est obtenue pour un Strickler en lit mineur calé à 9 sur le tronçon 3 et à 40 ailleurs. Cette observation montre que nos crues semblent surtout être ralenties sur le tronçon 3 entre 60 km et 90 km à l'aval de Bierre-lès-Sémur. Ce tronçon du Serein se situe entre Tormancy (60 km à l'aval de Bierre-lès-Sémur) et Chablis (95 km à l'aval de Bierre-lès-Sémur) où le BRGM a identifié les pertes du Serein par voies souterraines. Les échanges entre bassins versants pourraient-ils être liés à un ralentissement de l'écoulement ? C'est un point qui doit être étudié plus profondément avant de tirer des conclusions. Il faudrait avant tout vérifier si le ralentissement de l'écoulement sur ce tronçon 3 n'est pas provoqué par les pertes de charge d'un ouvrage hydraulique important dans cette région. N'ayant pas de données sur les seuils du Serein, nous ne pouvons pas conclure sur ce constat.

CONCLUSION

Le Serein présente des mécanismes complexes de propagation des crues qui pourraient s'expliquer par la spatialisation des pluies et par des phénomènes hydrogéologiques.

Le couplage entre les modèles hydrologiques et hydrauliques ont conduit à l'étude du Serein par une modélisation semi-distribuée. Une distribution trop importante n'est pas nécessaire: la qualité des simulations est peu affectée par le niveau de distribution. **La meilleure configuration de distribution retenue consiste à partager le Serein en deux sous-bassins d'apports diffus.** Par ailleurs, un calage distinguant les paramètres du modèle hydrologique sur chaque sous-bassin s'est avéré inefficace. Il est préférable d'utiliser un jeu de paramètres identique pour chaque sous-bassin (tout en conservant la discrétisation spatiale mentionnée plus haut). Les simulations sont performantes mais ne sont pas comparables à la modélisation hydrologique globale puisqu'une information supplémentaire est utilisée : l'hydrogramme observé amont. Cependant, les erreurs d'amplitude des pics de crues sont encore importantes, qu'ils soient amplifiés ou atténués.

L'étude comparative entre le modèle hydraulique simplifié Hayami et le modèle hydraulique complet HEC-RAS ne montre pas de supériorité manifeste du modèle hydraulique complet. Les simulations sont sensiblement meilleures avec HEC-RAS mais les temps de calculs sont beaucoup plus longs et ce modèle nécessite des données de profils en travers. Ce résultat montre que le modèle d'Hayami constitue une solution intéressante en première approche.

Lors des simulations avec le modèle hydraulique complet, le calage du coefficient de Strickler aboutit à des valeurs peu réalistes de ce paramètre. Les valeurs obtenues sont beaucoup trop faibles (i.e. lit mineur rugueux) pour un fleuve comme le Serein. Ce problème est peut-être lié à la non-prise en compte des ouvrages hydrauliques par manque de données. Un calage différencié du Strickler sur 4 sous-tronçons a permis de circonscrire ce problème au tronçon situé entre Tormancy et Chablis. Ce tronçon qui par ailleurs correspond à la zone de perte du Serein par infiltration semble demander un ralentissement élevé de l'écoulement.

Cette étude a permis de définir les meilleures configurations pour la modélisation du Serein. Cependant, les simulations doivent encore être améliorées. Il serait intéressant d'effectuer une campagne de mesures afin de prendre en compte les ouvrages hydrauliques susceptibles de ralentir l'écoulement. Le modèle hydraulique HEC-RAS, avec une représentation complète du Serein, permettrait ainsi de conclure sur un éventuel lien entre les pertes d'eau du Serein par infiltration et les pertes de charge?

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BRGM (1971), les pertes du Serein dans le bathonien – Expérience du printemps 1971
- [2] DIREN, Service de Prévision des Crues Seine moyenne Yonne Loing, Fonctionnement hydrologique de l'Yonne et de ses affluents
- [3] Edijatno (1991), Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur/ENGEES, Strasbourg, 242pp.
- [4] Edijatno & Michel, C. (1989), Un modèle pluie débit-journalier à trois paramètres, la Houille Blanche (2), 113-121
- [5] Nascimiento, N.O. (1995), Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin-versant. Thèse de doctorat Thesis, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 pp.
- [6] Edijatno, Nascimiento, N.O., Yang, X., Makhlof, Z. & Michel, C. (1999), GR3J : a daily watershed model with three free parameters. Hydrol. Sci. J. 44(2), 263-277.
- [7] Perrin, C. (2000), Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat Thesis, INPG (Grenoble)/Cemagref (Antony), 530 pp.
- [8] Perrin, C. (2002), Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. La Houille Blanche (6/7), 84-91.
- [9] Perrin, C., Michel, C. & Andréassian, V. (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. J. Hydrol. 279 (1-4), 275-289.
- [10] Chow V.T. (1959), Open channel hydraulics, Mc Graw Hill Book Company, 22ème édition-1974.
- [11] Roger Moussa (1996), Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow. Hydrological Processes, vol. 10, 1209-1227.
- [12] Marcio Baptista (1990), Contribution à l'étude de la propagation de crues en hydrologie. Thèse de doctorat Thesis, ENSPC/Cemagref (Antony), 287 pp.
- [13] US Army Corps of Engineers (2002), HEC-RAS River Analysis system – Hydraulic reference manual version 3.1 November 2002

Annexe 1 : Glossaire

- (1) **Bassin versant** : surface réceptrice des eaux qui alimentent une nappe souterraine, un lac, une rivière ou un réseau complexe. Le bassin versant est à la fois l'aire drainée, à l'intérieur de la ligne de partage des eaux, par le réseau hydrographique et la surface des hydrométéores qui alimentent plus ou moins directement, rapidement, les cours d'eau compris dans ce même espace. On parle parfois de sous-bassin versant qui est une partie de cet espace (ex : bassin versant d'un affluent ou d'un sous affluent ...)
- (2) **Loi de tarage** : relation empirique "hauteur-débit". Elle est décrite par des courbes de tarage établies à partir de mesures de vitesses à travers une section de référence. Les stations hydrométriques mesurent les hauteurs d'eau qui sont ensuite converties en débit grâce à ces courbes de tarage.
- (3) **Polygone de Thiessen** : ils sont formés autour de chaque points par les médiatrices des lignes reliant deux points voisins. Ils permettent de matérialiser la zone de desserte de chaque point.
- (4) **Karst** : région de formation calcaire caractérisée par la prédominance du drainage souterrain et par le développement d'une topographie originale due à la corrosion de la roche (grottes, gouffres, résurgences...)
- (5) **Hvétogrammes** : représentation de l'intensité de la pluie en fonction du temps.
- (6) **Evapotranspiration** potentielle : l'évapotranspiration est la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. L'évapotranspiration potentielle est le pouvoir évaporant de l'atmosphère sur un sol avec couvert végétal disposant de l'eau en abondance.
- (7) **MNT** : un Modèle Numérique de Terrain est une représentation de la topographie d'une zone terrestre sous forme adaptée à son utilisation par un calculateur numérique (ordinateur).

Annexe 2 : Rapport du BRGM sur les pertes du Serein

Le BRGM a réalisé une étude quantitative par jaugeages et colorations des pertes du Serein dans la région de Tormancy situé entre Dissangis et Chablis en Mars 1971. Le but de cette expérience était d'étudier, dans le cadre de l'aménagement de barrages régulateurs sur le haut Serein, le comportement de lachures de 3 à 5 m³/s en basses eaux, compte tenu de la présence des pertes. Il fallait donc déterminer le volume des pertes pour de telles lachures, si ces pertes gagnaient bien la Seine, et estimer le retard entraîné par la présence des pertes dans la régularisation de la Seine en étiage.

Les conclusions de cette étude se résument par les points suivants :

- les pertes du Serein ont lieu entre Tormancy (10 km en aval de Dissangis) et Cours (5 km en aval de Tormancy) sur quelques kilomètres avec un débit constant d'environ 1 m³/s
- ¾ de ces pertes sont récupérés à Clavisy et Perrigny (environ 25 km en aval de Dissangis) après un temps de trajet souterrain de 4 à 6 jours respectivement en hautes et basses eaux
- ¼ de ces pertes rejoins la Cure (affluent de l'Yonne, fleuve voisin du Serein) à Vermenton après un trajet souterrain de 17 à 19 jours respectivement en hautes et basses eaux.

Annexe 3 : Données des crues du Serein

Le tableau 2 ci-dessous présente les mesures des pics de crue (Qp) et le facteur d'amplification qui est le ratio des pics de crue entre 2 bassins versants. Les crues surlignées en jaune sont les crues que nous avons choisies pour notre étude.

Date	Stations hydrométriques				Facteur d'amplification Qp_aval / Qp_amont			
	Bierre-lès-Sémur	Dissangis	Chablis	Beaumont	Bierre-Diss	Diss-Chablis	Chablis-Beau	Bierre-Beau
	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)				
11/01/1995 13:00	39,7	47	74,4		1,183879	1,582978723	0	0
25/01/1995 21:00	46,8	46,1	86,4		0,985043	1,874186551	0	0
25/02/1995 22:00	26,7	37,6	61,8		1,40824	1,643617021	0	0
20/03/1995 04:00	33,7	34,8	59		1,032641	1,695402299	0	0
13/02/1996 08:00	31,8	65,9			2,072327	0	0	0
30/11/1996 10:00	57,3	90,4			1,577661	0	0	0
19/12/1997 12:00	25,2	21		38,8	0,833333	0	0	1,53968254
06/01/1998 10:00	38,6	60		54,2	1,554404	0	0	1,404145078
19/01/1998 15:00	35,5	57,2	58,64	55,1	1,611268	1,025174825	0,939631651	1,552112676
18/04/1998 10:00	22	41,6		51,5	1,890909	0	0	2,340909091
27/04/1998 07:00	74,7	153		142	2,048193	0	0	1,900937082
01/05/1998 17:00	25,4	39,2		53,2	1,543307	0	0	2,094488189
15/01/1999 00:00	13,9	23,5		38,4	1,690647	0	0	2,762589928
29/01/1999 06:00	23	38,7		49,9	1,682609	0	0	2,169565217
09/02/1999 18:00	14,5	28,8		40,8	1,986207	0	0	2,813793103
18/02/1999 23:00	27,4	64,9	78,96	86,8	2,368613	1,216640986	1,09929078	3,167883212
09/03/1999 12:00	25,9	77,1	102,01	106	2,976834	1,3230869	1,039113812	4,092664093
28/12/1999 13:15	47,3	79,6	107,73	119	1,682875	1,35339196	1,104613385	2,515856237
16/02/2000 10:00	13,8	27,5		51,1	1,992754	0	0	3,702898551
01/03/2000 14:45	19,3	36,3		53,8	1,880829	0	0	2,787564767
24/11/2000 05:00	18,7	22,4		53,2	1,197861	0	0	2,844919786
26/11/2000 14:00	13	28,7		50,4	2,207692	0	0	3,876923077
04/03/2001 09:00	24,2	40,8	41,4	49,3	1,68595	1,014705882	1,190821256	2,037190083
14/03/2001 05:00	60,5	113	114	158	1,867769	1,008849558	1,385964912	2,611570248
21/03/2001 17:00	19,7	36,7	50,9	70,1	1,862944	1,386920981	1,377210216	3,558375635
10/04/2001 18:00	11,6	31,4	35,9	47,9	2,706897	1,143312102	1,334261838	4,129310345
05/05/2001 18:00	43	79	80,8	89,5	1,837209	1,02278481	1,107673267	2,081395349
30/12/2001 08:00	40,2	64	68,4	73,5	1,59204	1,06875	1,074561404	1,828358209
21/02/2002 04:00	27	39,5	47,7	52,8	1,462963	1,207594937	1,106918239	1,955555556
28/02/2002 07:20	15,5	31	40,1	45,4	2	1,293548387	1,132169576	2,929032258
02/03/2002 10:30	15,4	30,5	39,9	44,8	1,980519	1,308196721	1,122807018	2,909090909
04/01/2003 11:00	36,4	64,9	72,9	82,3	1,782967	1,123266564	1,128943759	2,260989011
04/02/2003 05:00	42,5	74,1	78,9	99,4	1,743529	1,064777328	1,25982256	2,338823529
13/01/2004 21:00	59,9	74,6	79,1	81,3	1,245409	1,060321716	1,027812895	1,357262104
17/01/2004 09:00	60,2	87,6	88,9	101	1,45515	1,014840183	1,136107987	1,677740864
20/01/2004 19:00	31,8	55,6	65,8	76,1	1,748428	1,183453237	1,156534954	2,393081761
27/01/2004 04:00	37,9	47,2	54,4	66,9	1,245383	1,152542373	1,229779412	1,765171504
Date	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Bierre-Diss	Diss-Chablis	Chablis-Beau	Bierre-Beau
	Bierre-lès-Sémur	Dissangis	Chablis	Beaumont	Facteur d'amplification Qp_aval / Qp_amont			
	Stations hydrométriques				Facteur d'amplification Qp_aval / Qp_amont			

Tableau 2 : Mesures des crues du Serein

Annexe 4 : Hydrogrammes des cinq crues étudiées

Les hydrogrammes suivants sont les débits mesurés (en m³/s) des quatre sous-bassins du Serein pour chacune des cinq crues sélectionnées pour notre étude.

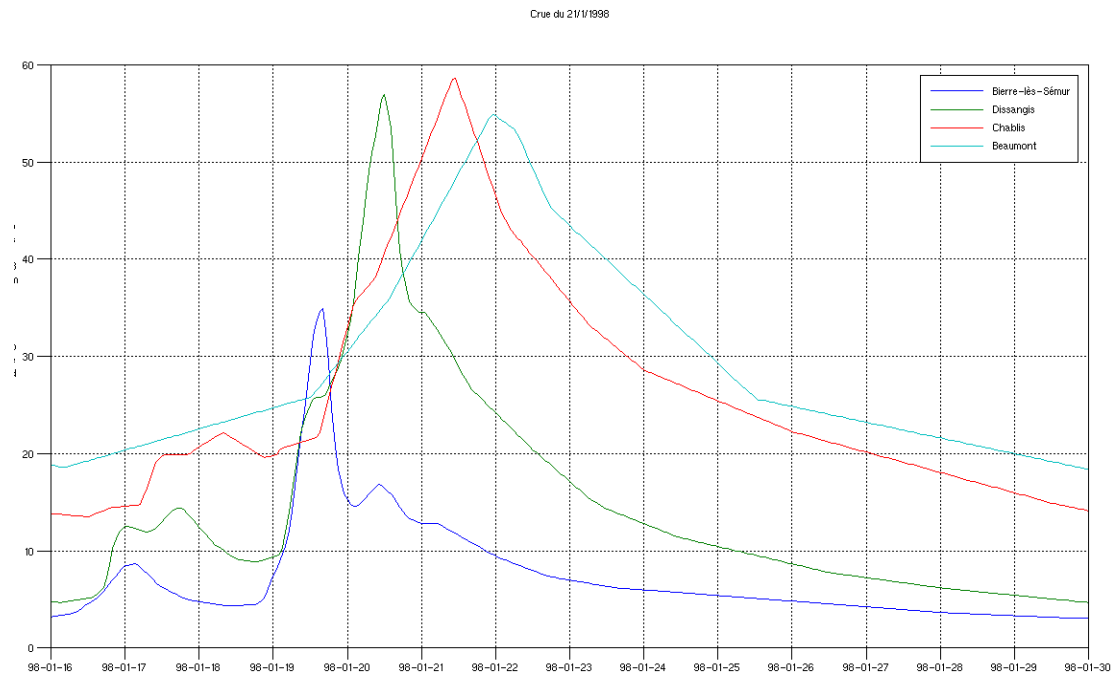


Figure 7 : Crue de Janvier 1998 - atténuation

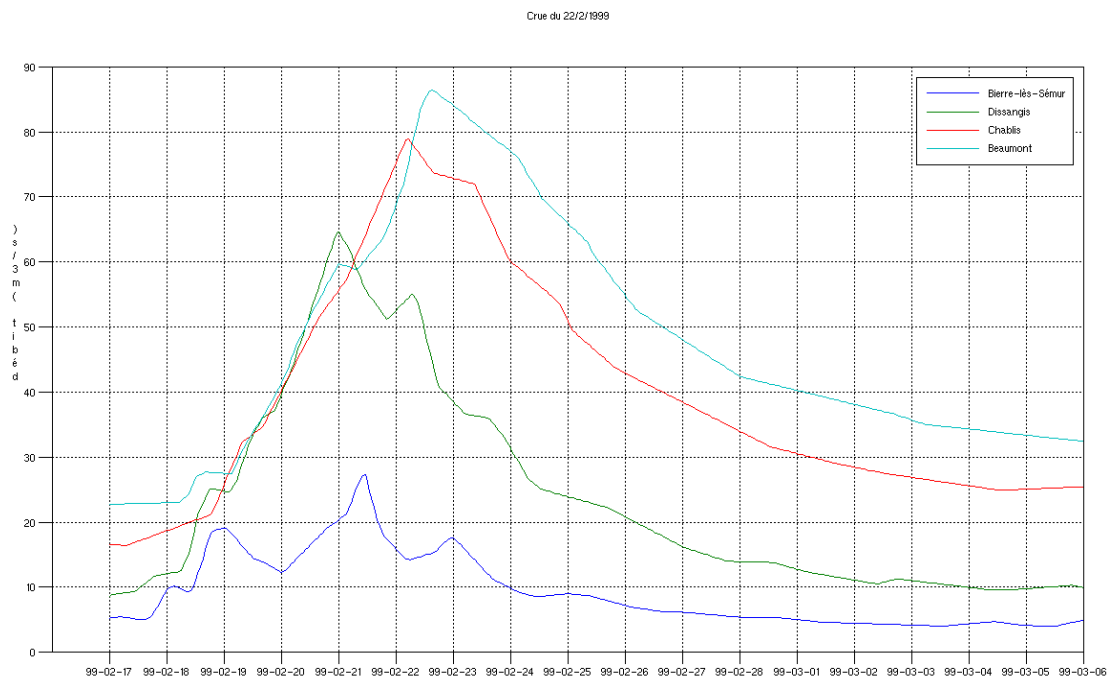


Figure 8 : Crue de Février 1999 - amplification

Cru de 11/3/1999

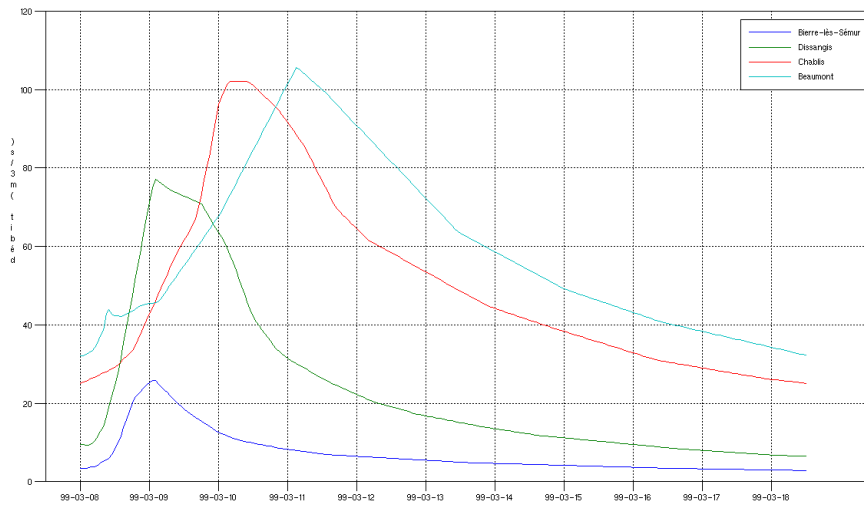


Figure 9 : Crue de Mars 1999 - atténuation

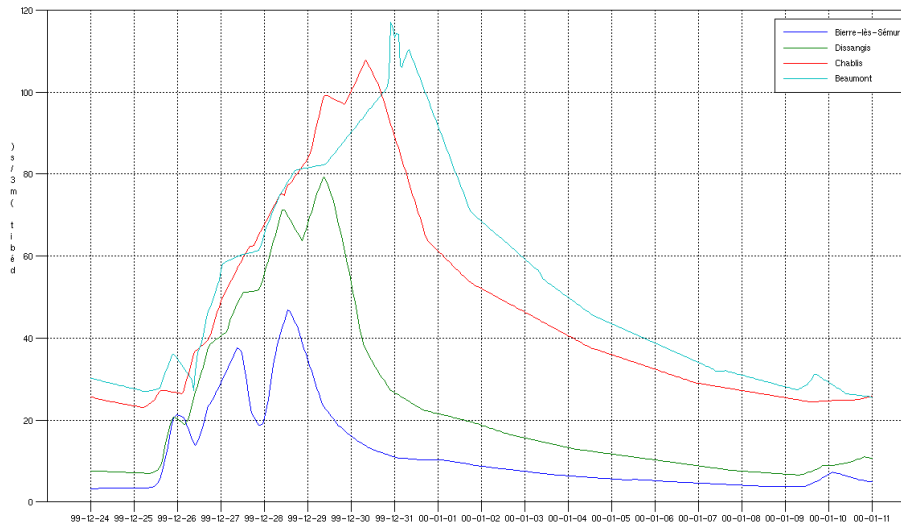


Figure 10 : Crue de Décembre 1999 - amplification

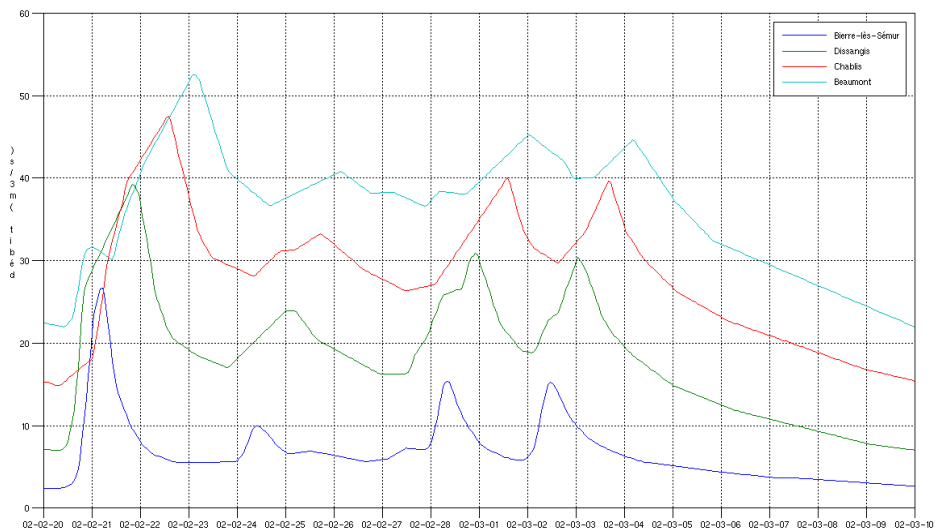


Figure 11 : Crue de Février 2002 - amplification

Annexe 5 : Hyétogrammes des pluviomètres du Serein

Les figures suivantes présentent les hyétogrammes des mesures de pluies ponctuelles des sept pluviomètres du bassin-versant du serein pour chacune des cinq crues de notre étude.

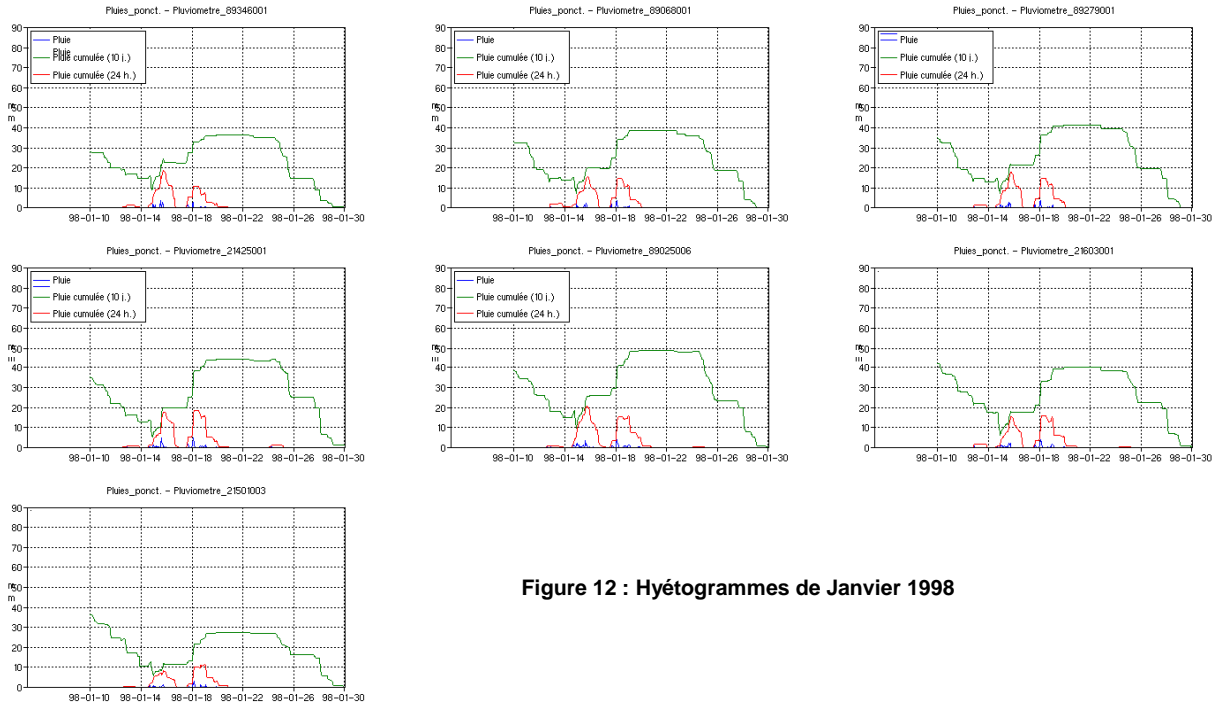


Figure 12 : Hyétogrammes de Janvier 1998

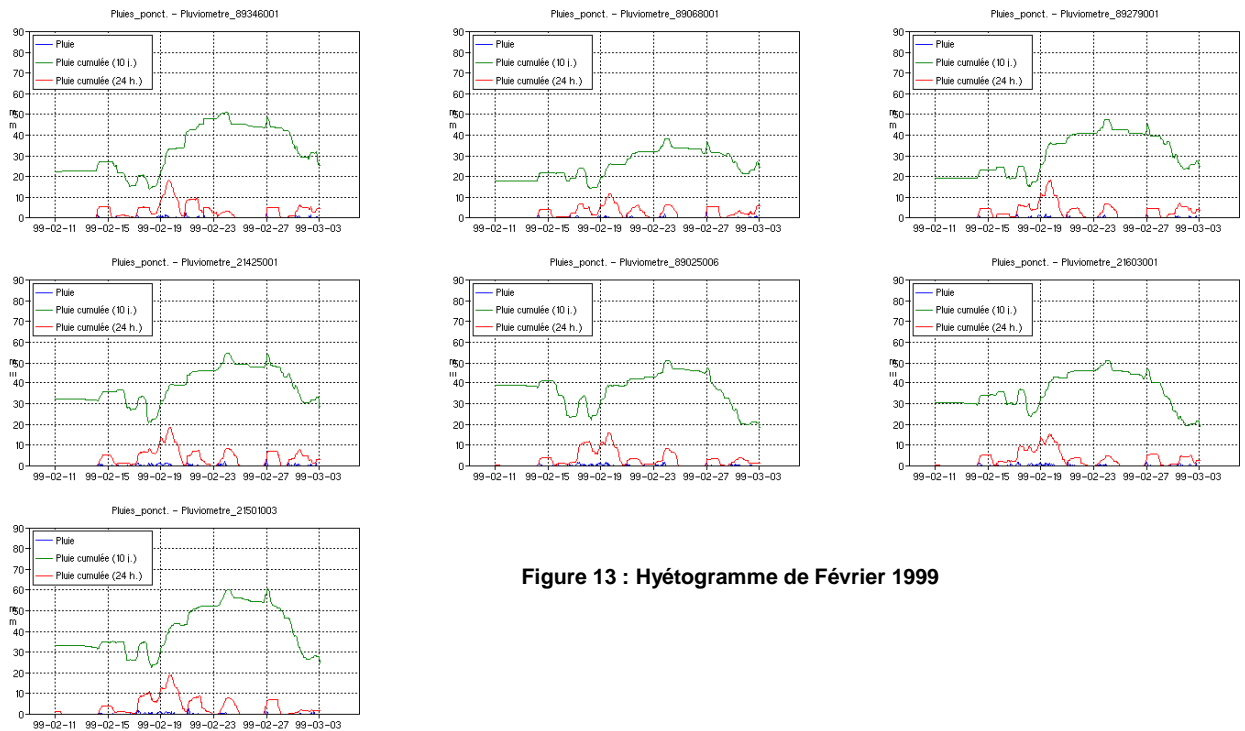


Figure 13 : Hyétogramme de Février 1999

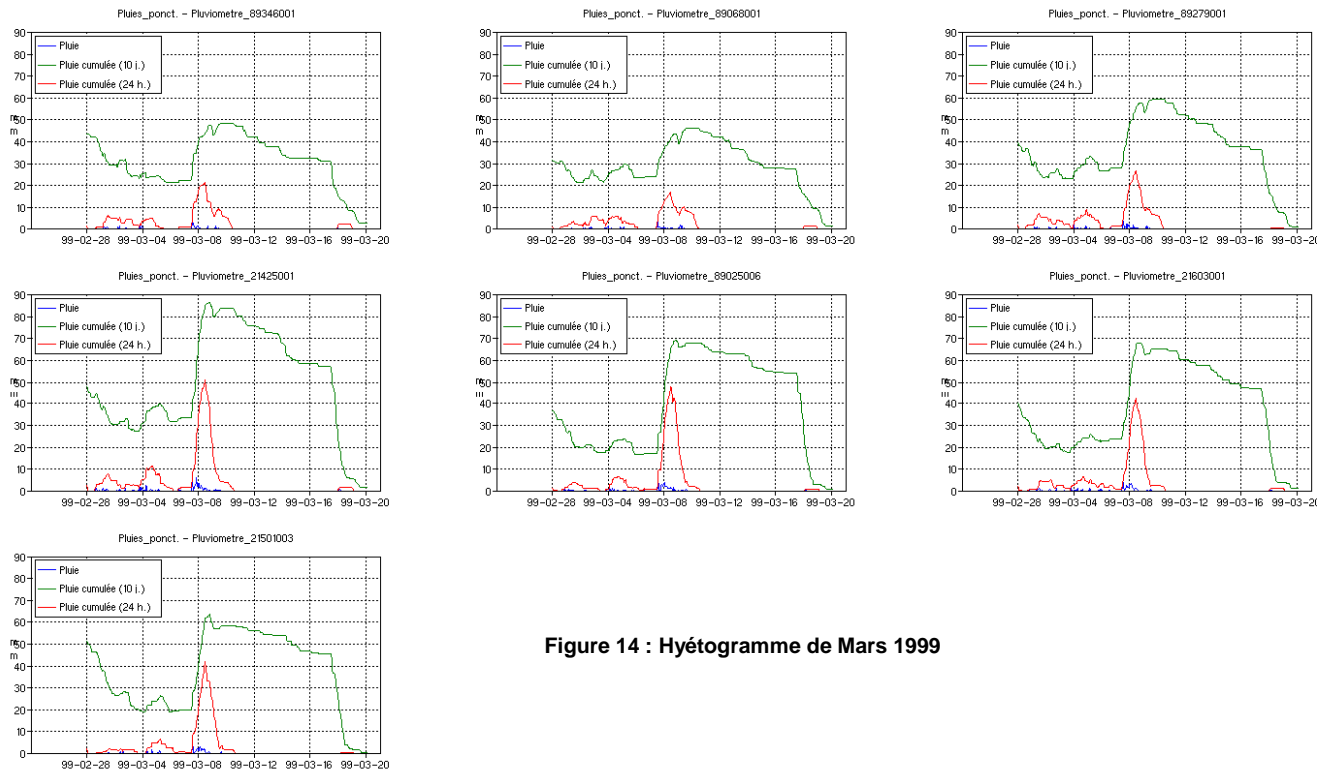


Figure 14 : Hyétoqramme de Mars 1999

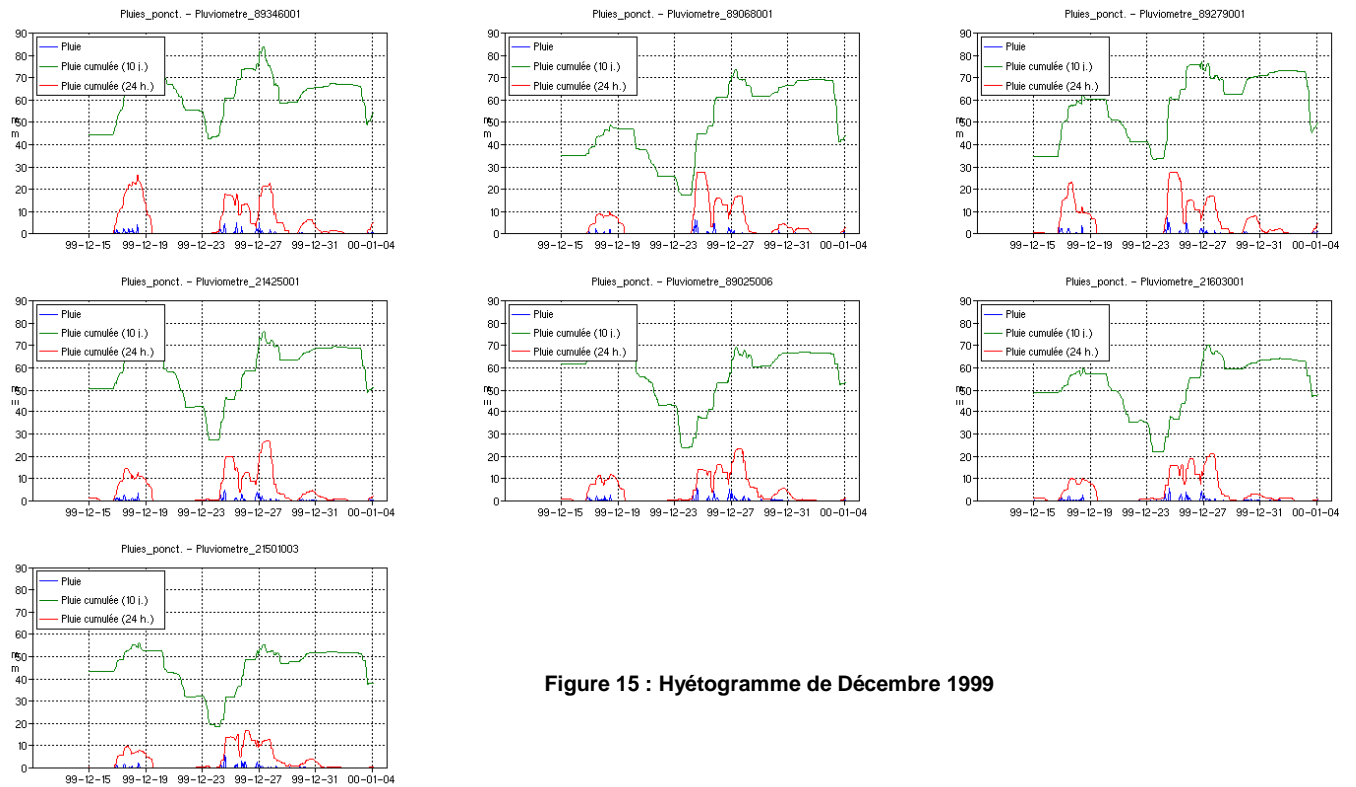


Figure 15 : Hyétoqramme de Décembre 1999

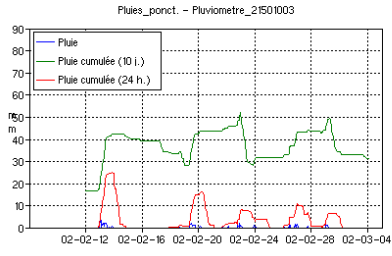
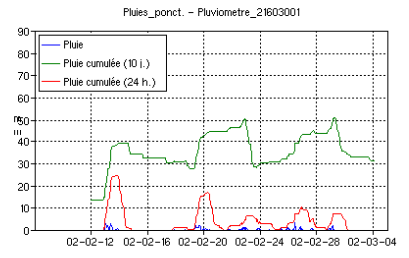
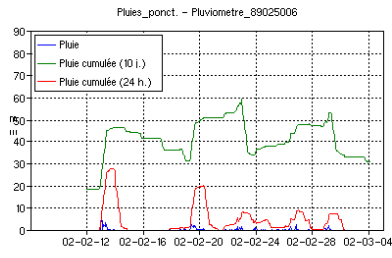
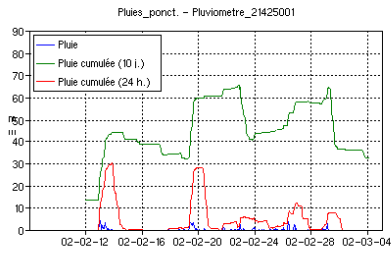
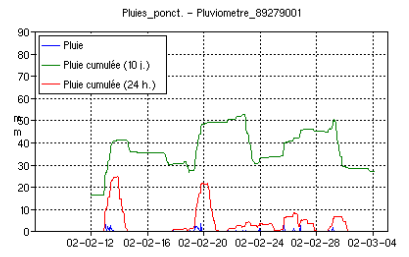
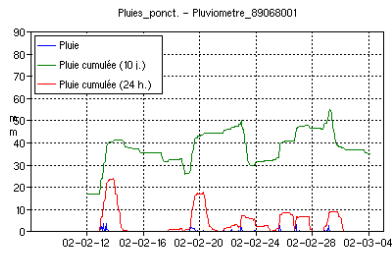
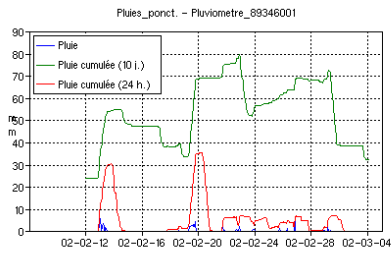


Figure 16 : Hyétogramme de Février 2002

Annexe 6 : Compléments sur le modèle hydrologique GR4J

Nous détaillons ici les équations mises en jeu par les fonctions de production, fonctions de routage et les fonctions d'échanges du modèle hydrologique GR4J.

Dans le cas où la pluie nette P_n est différente de zéro, une partie P_s de P_n alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X1 \left(1 - \left(\frac{S}{X1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left(\frac{P_n}{X1} \right)}{1 + \frac{S}{X1} \cdot \tanh \left(\frac{P_n}{X1} \right)}$$

où $X1$ (mm) et S (mm) sont respectivement la capacité maximum et le niveau du réservoir de production.

Dans le cas contraire, lorsque E_n est différent de zéro, une quantité d'évaporation E_s est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X1} \right)}$$

Le contenu du réservoir est mis à jour par : $S = S - E_s + P_s$.

Une percolation P_{erc} issue du réservoir de production est alors calculée :

$$P_{erc} = S \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S}{9 X1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Le contenu du réservoir est de nouveau mis à jour par : $S = S - P_{erc}$

La quantité d'eau P_r qui atteint finalement la partie routage du modèle est :

$$P_r = P_{erc} + (P_n - P_s)$$

P_r est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10 % par un unique hydrogramme unitaire HU2. HU1 et HU2 dépendent du même paramètre $X4$, temps de base de HU1 exprimé en jours. Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S (cumul de la proportion de la pluie unitaire traitée par l'hydrogramme en fonction du temps) notées respectivement SH1 et SH2. SH1 est définie en fonction du temps par :

Pour $t = 0$
 $SH1(t) = 0$

Pour $0 < t < X4$

$$SH1(t) = \left(\frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}}$$

Pour $t > X4$
 $SH1(t) = 1$

SH2 est définie en fonction du temps par:

Pour $t = 0$
 $SH2(t) = 0$

Pour $0 < t < X4$
 $SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}}$

Pour $X4 < t < 2X4$
 $SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}}$

Pour $t > 2X4$
 $SH2(t) = 1$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

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

où j est un entier.

A chaque pas de temps i, les sorties Q9 et Q1 des deux hydrogrammes sont calculées par :

$$\begin{aligned}Q9(i) &= 0,9 \cdot \sum_{k=1}^l UH1(k) \cdot \Pr(i - k + 1) \\Q1(i) &= 0,1 \cdot \sum_{k=1}^m UH2(k) \cdot \Pr(i - k + 1)\end{aligned}$$

où $l = \text{int}(X4) + 1$ et $m = \text{int}(2 \cdot X4) + 1$, avec $\text{int}(\cdot)$ désignant la partie entière.

Un échange souterrain en eau (perte ou gain) est calculé par :

$$F = X2 \left(\frac{R}{X3} \right)^{7/2}$$

où R est le niveau dans le réservoir, X3 la capacité à un jour du réservoir et X2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.

Le niveau dans le réservoir de routage est mis à jour en ajoutant la sortie Q9 de l'hydrogramme HU1 et F : $R = \max(0 ; R + Q9 + F)$

Il se vidange ensuite en une sortie Q_r donnée par :

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X^3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Le niveau dans le réservoir devient : $R = R - Q_r$

La sortie Q_1 de l'hydrogramme HU2 est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Q_d : $Q_d = \max(0 ; Q_1 + F)$

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

Annexe 7 : Modèle Hayami : influence des paramètres et du calage

Les Figures 27 et 28 présentent une crue propagée par le modèle Hayami, sans apports latéraux, pour différents paramètres C et D. On notera qu'il s'agit des débits en fonction du temps propagés sur une distance de 100 km.

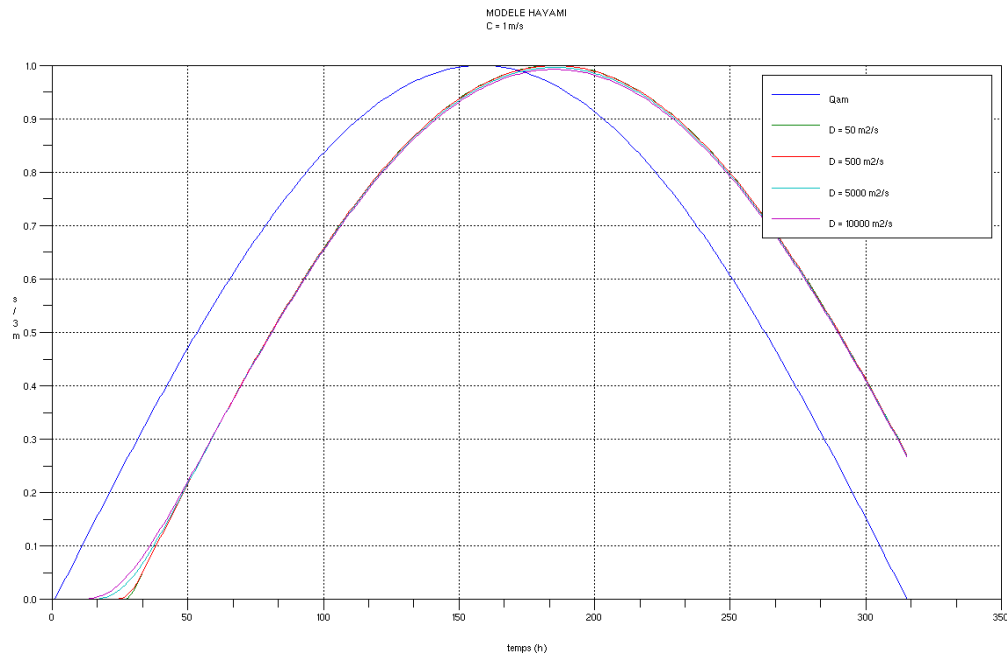


Figure 27 : Crue propagée par Hayami pour différentes valeur du paramètre de diffusion

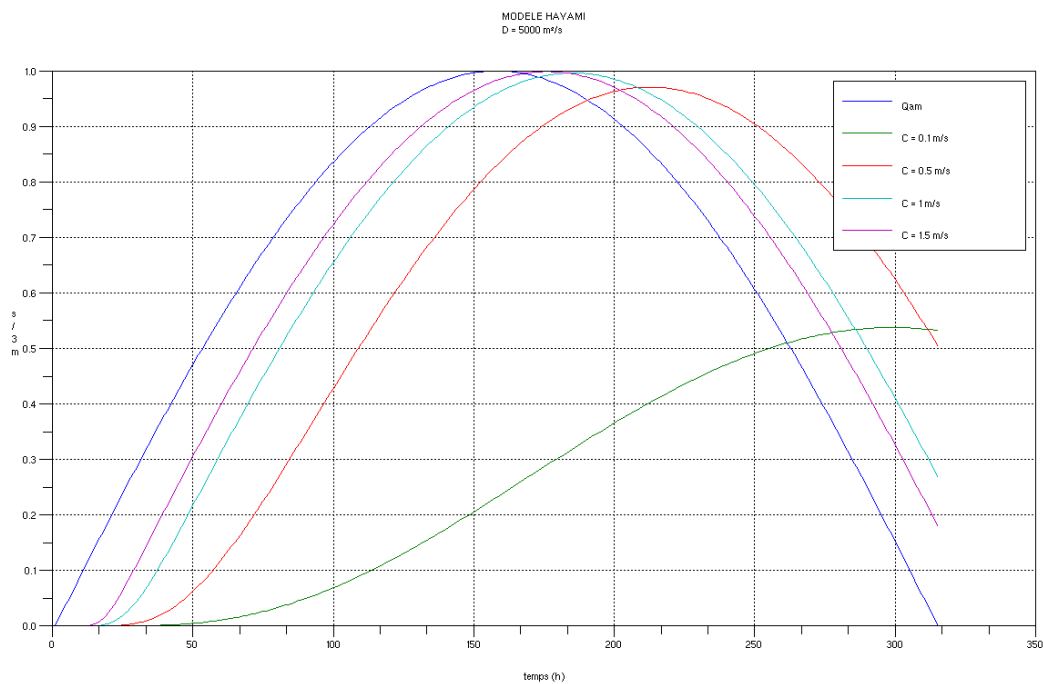


Figure 28 : Crue propagée par Hayami pour différentes valeur du paramètre de célérité

La célérité joue sur la phase de l'hydrogramme tandis que la diffusion modifie la forme de l'hydrogramme et change l'amplitude. Le paramètre de diffusion est peu influent comparé à la célérité.

La Figure 30 présente le calage de la célérité pour différents quantiles de débits observés.

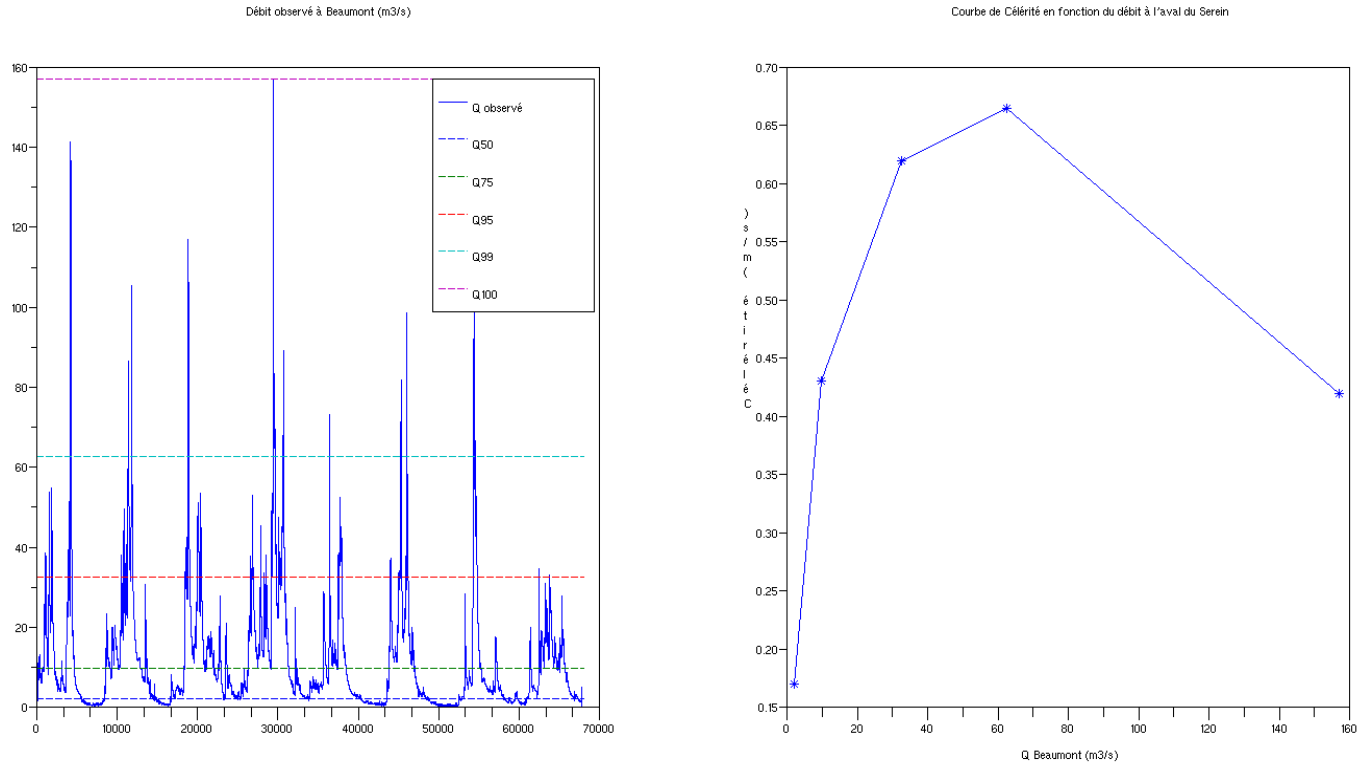


Figure 30 : Calage de la célérité pour différentes gammes de débit

La célérité a été calée en ne considérant que les petites crues, moyennes crues et fortes crues déterminées par les pics de crue. Ce résultat est intéressant puisque l'on obtient une courbe de célérité en fonction du débit. Effectivement, suivant l'importance de la crue, il peut se produire un débordement dans le lit majeur. Les frottements sont alors très important et l'écoulement ralenti.

Annexe 8 : Hydrogrammes des différentes modélisations pour les cinq crues de référence

L'hydrogramme suivant représente nos 5 crues de référence et la crue de Novembre 2000 ainsi que les débits calculés par le modèle hydrologique GR4j, le couplage avec le modèle Hayami et le couplage avec HEC-RAS.

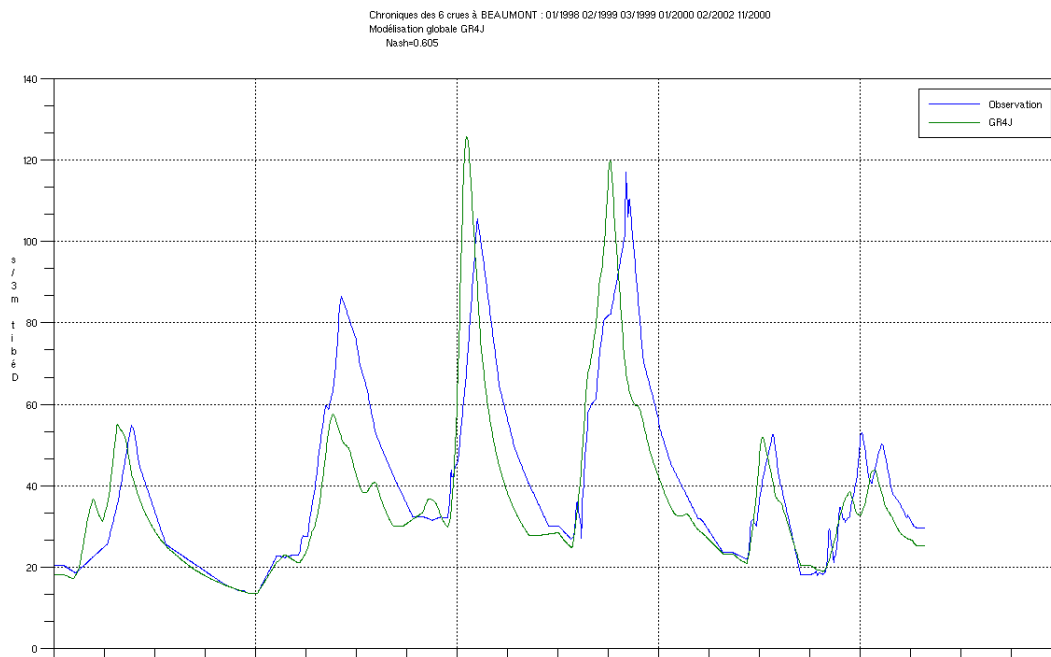


Figure 31 : Hydrogrammes de la chronique des 6 crues observé et simulés par GR4J

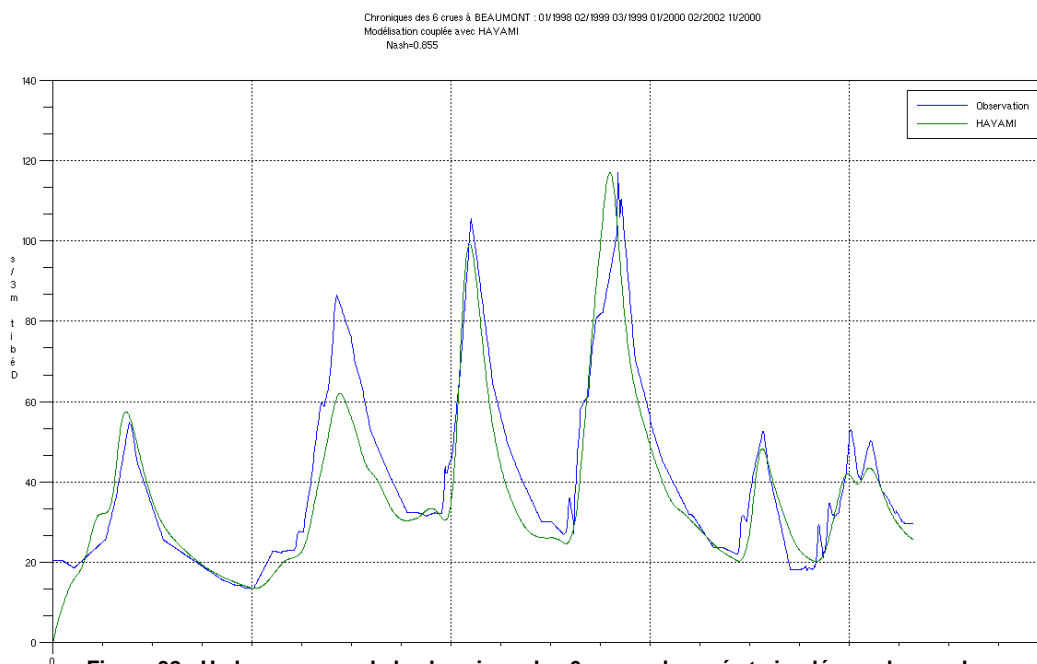


Figure 32 : Hydrogrammes de la chronique des 6 crues observé et simulés par le couplage avec HAYAMI

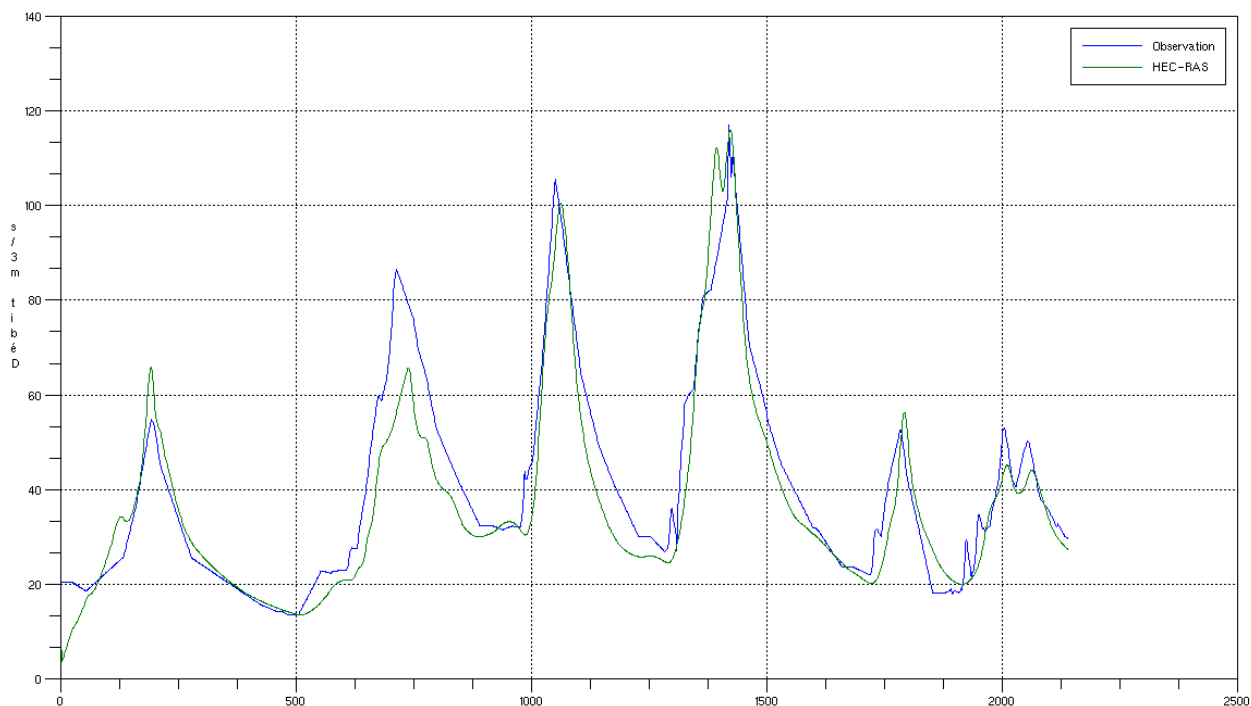


Figure 32 : Hydrogrammes de la chronique des 6 crues observé et simulés par le couplage avec HEC-RAS

On ne peut pas comparer les critères de qualité de GR4J et des modélisations couplées puisque ces dernières utilisent une information supplémentaire : le débit amont. Nous avons représenté ici les trois hydrogramme pour donner une idée des représentations de chaque simulation.

Annexe 9 : Surface des bassins intermédiaires d'apports diffus

Le Tableau 14 présente les surfaces des sous-bassins intermédiaires (apports latéraux diffus) pour chaque configuration de la modélisation semi-distribuée. Ainsi avec aucun apport ponctuel (0), la surface des sous-bassins est de 1070 km² avec 1 sous-bassin, 518 et 551 km² avec 2 sous-bassins, etc...

0 apport ponctuel				
1 apport diffus	2 apports diffus	3 apports diffus	4 apports diffus	5 apports diffus
1070	518 – 551	354 - 330 - 386	265 - 253 - 165 - 387	208 - 205 - 225 - 214 - 216
1 apport ponctuel				
1 apport diffus	2 apports diffus	3 apports diffus	4 apports diffus	5 apports diffus
908	414 – 494	268 - 336 - 303	225 - 189 - 266 - 227	179 - 181 - 158 - 205 - 183
2 apports ponctuels				
1 apport diffus	2 apports diffus	3 apports diffus	4 apports diffus	5 apports diffus
826	411 – 415	268 - 282 - 276	204 - 207 - 205 - 210	165 - 158 - 172 - 163 - 167
3 apports ponctuels				
1 apport diffus	2 apports diffus	3 apports diffus	4 apports diffus	5 apports diffus
763	351 – 412	254 - 244 - 265	162 - 189 - 202 - 210	145 - 158 - 152 - 145 - 161
4 apports ponctuels				
1 apport diffus	2 apports diffus	3 apports diffus	4 apports diffus	5 apports diffus
726	314 – 412	235 - 248 - 242	161 - 152 - 228 - 183	145 - 141 - 147 - 147 - 147
5 apports ponctuels				
1 apport diffus	2 apports diffus	3 apports diffus	4 apports diffus	5 apports diffus
695	347 – 348	229 - 223 - 243	173 - 174 - 174 - 174	131 - 146 - 138 - 138 - 142

Tableau 14 : Surface des bassins versants intermédiaires (km²)

Annexe 10 : Profils en travers du Serein

Voici ci-dessous quelques exemples des profils en travers du Serein. Les Figures sont extraites du logiciels hydraulique à surface libre HEC-RAS.

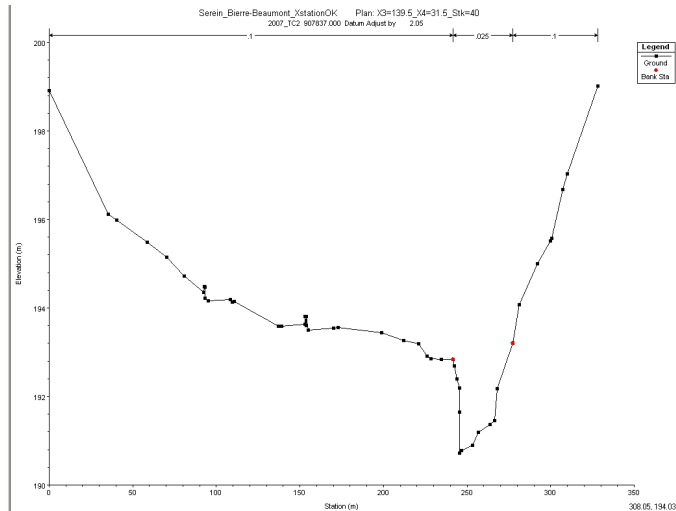


Figure 33 : Profil en travers du Serein à Dissangis

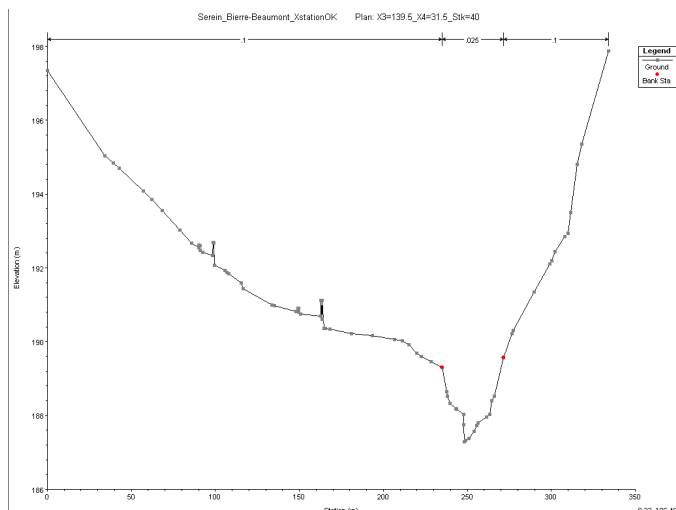


Figure 34 : Extrapolation d'un Profil en travers du Serein à 2 km en aval de Dissangis

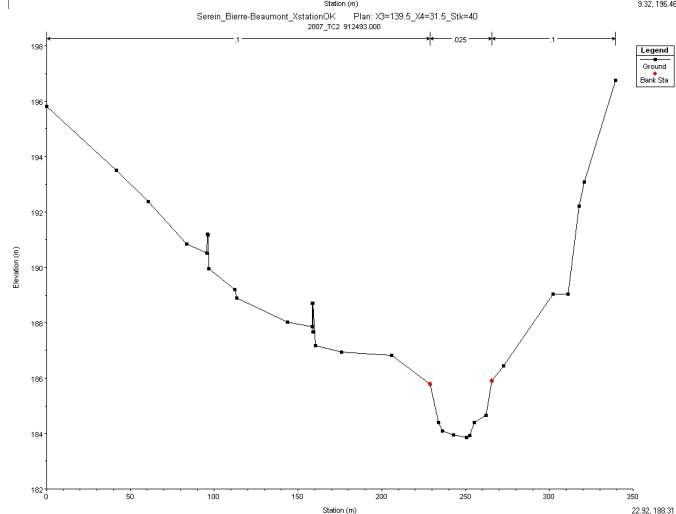


Figure 35 : Profil en travers du Serein à 4 km en aval de Dissangis

