



Evaluation des crues dans les bassins versants de Suisse

Guide pratique

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAG, Serie Acque
No 4 – Berne 2003



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation
Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti,
dell'energia e delle comunicazioni

Evaluation des crues dans les bassins versants de Suisse

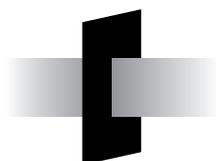
Guide pratique

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAG, Serie Acque
No 4 – Berne 2003

M. Spreafico, R. Weingartner, M. Barben, A. Ryser

Avec des contributions de

M. Barben, Ch. Hegg, B. Hingray, J.-P. Jordan, C. Kan, A. Musy, F. Naef, M. Niggli, S. Scherrer, M. Schilling,
M. Spreafico, St. Vogt, R. Weingartner



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**



Eidg. Forschungsanstalt WSL
Institut fédéral de recherches WSL
Istituto federale di ricerca WSL
Swiss Federal Research Institute WSL



Direction du projet

Prof. Dr M. Spreafico, Office fédéral des eaux et de la géologie
PD Dr. R. Weingartner, Geographisches Institut der Uni Bern

Rédaction

A. Ryser, Ingenieurbüro Hunziker, Zarn & Partner AG

Contributions

Dr. M. Barben
*Geographisches Institut der Uni Bern, Gruppe für Hydrologie
Hallerstr. 12, 3012 Bern*
Chap. 2 et 5.1

Dr. Chr. Hegg
*Eidg. Forschungsanstalt WSL, Abteilung Wasser, Erd- und Felsbewe-
gung*
Chap. 5.2

Dr B. Hingray
*Institut des sciences et technologies de l'environnement, Laboratoire
hydrologie et aménagements, EPFL, Ecublens, 1015 Lausanne*
Chap. 4.1.2, 4.3 et 5.3

Dr J.-P. Jordan
Office fédéral des eaux et de la géologie, 2501 Bienne
Chap. 2.4

Dipl. Geographin C. Kan
Bundesamt für Wasser und Geologie, 3003 Bern-Ittigen
Chap. 4.2

Prof. Dr A. Musy
*Institut des sciences et technologies de l'environnement, Laboratoire
hydrologie et aménagements, EPFL, Ecublens, 1015 Lausanne*
Chap. 4.1.2, 4.3 et 5.3

Dr. F. Naef
*Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich,
8092 Zürich*
Chap. 3 et 4.1.1

M. Niggli, ing. dipl. EPFL
*Institut des sciences et technologies de l'environnement, Laboratoire
hydrologie et aménagements, EPFL, Ecublens, 1015 Lausanne*
Chap. 4.1.2, 4.3 et 5.3

Dr. S. Scherrer
Scherrer AG, Stockackerstrasse 25, 4153 Reinach
Chap. 3 et 4.1.1

Dipl. Kult-Ing ETH M. Schilling
*Ingenieurbüro Hunziker, Zarn & Partner, Schachenallee 29,
5000 Aarau*
Chap. 5.1.6

Prof. Dr. M. Spreafico
Bundesamt für Wasser und Geologie, 3003 Ittigen
Chap. 1 et 4.2

Dipl. Natw. ETH St. Vogt
*Eidg. Forschungsanstalt WSL, Abteilung Wasser, Erd- und Felsbewe-
gungen, 8093 Birmensdorf*
Chap. 5.2

PD. Dr. R. Weingartner
*Geographisches Institut der Uni Bern, Gruppe für Hydrologie
Hallerstr. 12, 3012 Bern*
Chap. 1, 2 et 5.1

Membres du groupe d'experts

Dr. M. Barben, GIUB
Prof. Dr. P. Burlando, ETH-Zürich
P. Dändiker, Amt für Umwelt, Kt. Solothurn
Dr. Ch. Hegg, WSL
Dr. H.P. Hodel, BWG
P. Hohl, Service des Eaux, Sols et Assainissements, Canton de Vaud
Dr J.-P. Jordan, OFEG
Prof. Dr A. Musy, EPF-Lausanne
M. Schilling, Ingenieurbüro Hunziker, Zarn & Partner AG
Prof. Dr. M. Spreafico, BWG
St. Vogt, WSL
PD Dr. R. Weingartner, GIUB

Traductions

P. Buttet, C. Joerin, B. Schäfli, F. Spicher, H.P. Willi

Impressum

Editeur : Office fédéral des eaux et de la géologie
Vente : OFCL, Berne 2003
ISSN : 1660-0746
Tirage : 700 exemplaires
Référence : Office fédéral des eaux et de la géologie :
Estimation des crues dans les bassins
versants de Suisse, rapports de l'OFEG,
série Eaux (Berne, 2003, 114 p.)
Figures de couverture : En haut à gauche : Heinz Hongler (OFEG)
En bas à gauche : Hanspeter Hodel (OFEG)
A droite : Heinz Strässler (OFEG)

Tous les extraits de cartes sont reproduits
avec l'autorisation de l'Office fédéral de
topographie (BM 012073)
La présente publication se trouve sur le site
internet
www.bbl.admin.ch/bundespublikationen
804.504f
No de commande :
Logiciel : un CD-Rom de ce guide peut être coman-
dé au Geographisches Institut der Uni Bern,
Gruppe Hydrologie, Hallerstr.12, 3012 Berne
© BWG, Berne, novembre 2003

Préface

La connaissance des débits de crues pour une période de retour donnée est de la plus grande importance pour la protection et l'exploitation de nos ressources en eau ainsi que pour la défense contre les effets néfastes des hautes eaux.

Alors que des mesures de débits sont disponibles pour les cours d'eau les plus importants, il n'y en a fréquemment pas pour les petits (< 10 km²) et moyens (10 à 50 km²) bassins versants. Il existe actuellement de nombreuses méthodes permettant l'évaluation des débits. Dans la pratique se pose par conséquent le problème du choix de la plus appropriée pour résoudre un problème concret.

La présente publication a pour but de présenter une vue d'ensemble des méthodes utilisées en Suisse et de faciliter le choix de la plus adéquate. En complément, l'Institut de géographie de l'Université de Berne (Gruppe für Hydrologie, M. Barben) et l'Institut de recherches WSL (Abteilung Wasser, Erd- und Felsbewegungen, S. Vogt) ont développé deux paquets de programmes devant aider à l'estimation des crues par les méthodes décrites aux Chap. 5.1 et 5.2.

L'accent a été mis sur l'estimation des crues dans les bassins non jaugés (Chap. 5) et sur les débits de pointe (et non pas sur les volumes d'eau écoulés lors des crues). Les méthodes permettant l'estimation des crues dans les bassins où des mesures de débits existent sont cependant aussi décrites (Chap. 4).

Les processus participant à la formation des hautes eaux ayant une grande importance pour l'estimation des crues, la présente publication leur consacre un chapitre (Chap. 3). Celle-ci n'a pas la prétention de proposer une méthode pour résoudre tous les problèmes re-

latifs à l'évaluation des crues ; elle se veut plutôt une aide pratique utile facilitant les décisions. D'excellentes connaissances en hydrologie sont toutefois toujours nécessaires. L'estimation des crues doit encore être développée. Ainsi, actuellement, de nombreux problèmes ne sont pas résolus en ce qui concerne les hydrogrammes des crues, l'évaluation des crues très rares tout particulièrement dans les bassins de petite et moyenne surface. De nombreuses mesures, recherches et analyses sont encore nécessaires.

La conception et la réalisation de la présente publication ont été dirigées par MM. Spreafico et Weingartner. Qu'ils soient ici remerciés ainsi que tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce guide.

Office fédéral des eaux et de la géologie

Le Directeur



Dr Chr. Furrer

Table des matières

	Préface	3	a)	Génération stochastique de séries pluviométriques et simulation continue	32
	Table des matières	5	b)	Génération stochastique de séries pluviométriques et simulation événementielle ou approche stochastique multi-événementielle	33
1	Introduction	7	c)	Application de la méthodologie au bassin supérieur du Rhône.....	33
	Quels sont les problèmes ?.....	7	d)	Conclusions	38
	Quel est l'objectif du présent «Guide pratique» ?	7	4.2	Statistique des valeurs extrêmes	38
	Estimation et mesure des crues	7	4.2.1	Introduction	38
	Structure du «Guide pratique».....	8	4.2.2	Préparation de l'échantillon.....	38
	Que nous réserve l'avenir ?	8	4.2.3	Calcul des débits de crue pour une fréquence donnée	40
2	Vue d'ensemble des méthodes	9	4.2.4	Exemple	41
2.1	Statistique des valeurs extrêmes	10	4.2.5	Méthodes recommandées à l'étranger et programmes informatiques	44
2.2	Modèles Pluie-Débit	10	4.3	Evaluation des crues extraordinaires et extrêmes	46
2.3	Transfert régional	11	4.3.1	Méthodes pour l'évaluation des crues extrêmes	46
2.4	Définition et utilisation des valeurs de crues extrêmes (EHQ)	12	4.3.2	La méthode CONSECRU (crues extraordinaires)	48
2.4.1	La notion de risque résiduel	12	4.3.3	La méthode CRUEX (crues extrêmes).....	50
2.4.2	Définition de la crue extrême pour la protection contre les crues.....	13	5	Estimation des crues sans mesures de débit	53
2.4.3	Détermination de la crue extrême	13	5.1	Bassins versants de surface moyenne (10 à 500 km ²)	53
2.4.4	Utilisation des valeurs de crues extrêmes.....	13	5.1.1	Démarche	53
2.4.5	Exemple de détermination de la crue extrême	13	5.1.2	Méthodes	54
3	Notions de base sur les processus de formation des écoulements	15	a)	Kürsteiner	55
3.1	Introduction		b)	Müller-Zeller.....	57
3.2	Quels processus d'écoulement connaît-on ?	15	c)	Kölla meso	59
3.3	Quels sont les effets des différents processus d'écoulement ?.....	16	d)	GIUB'96	61
3.4	Détermination des caractéristiques déterminantes pour la formation des écoulements	16	e)	Méthode des moments	66
3.5	Processus d'écoulement dans les versants	17	f)	BaD7.....	67
3.6	Quels sont les effets des processus d'écoulement dans un bassin versant ?	17	5.1.3	Le logiciel HQx_meso_CH	69
3.7	Comment expliquer la réaction aux crues des bassins versants ?.....	23	5.1.4	Déroulement du calcul et interprétation des résultats	70
3.8	Conclusions	23	5.1.5	Exemples généraux d'application	74
4	Estimation des crues à l'aide de mesures de débit	24	5.1.6	Exemples pratiques d'application	76
4.1	Les modèles Pluie-Débit (MPD).....	24	5.2	Petits bassins versants (< 10 km ²)	79
4.1.1	Estimation des crues à l'aide de modèles Pluie-Débit (MPD).....	24	5.2.1	Démarche	79
a)	Possibilités et limites des modèles Pluie-Débit (MPD)	24	a)	Rassembler et préparer les données de base	80
b)	Possibilités d'utilisation des MPD en tenant compte des processus d'écoulement.....	26	b)	Elaboration de l'hypothèse pour la description du bassin	82
c)	Utilisation d'un MPD pour l'estimation des crues dans un bassin du Jura bâlois.....	26	c)	Etude sur le terrain.....	83
d)	Conclusions	31	d)	Application des méthodes.....	84
4.1.2	Estimation des crues extraordinaires par combinaison d'une approche stochastique et d'un modèle de transformation Pluie-Débit	31	e)	Interprétation et validation des résultats.....	84
			5.2.2	Méthodes	84
			a)	Détermination de l'intensité des pluies	85
			b)	Müller modifié	85
			c)	Taubmann/Thiess/Chow	85
			d)	Méthode modifiée du temps d'écoulement ...	86

e)	Kölla	87
f)	Clark-WSL	88
5.2.3	Appréciation	89
5.2.4	Exemple d'application : le Vogelbach (1,55 km ²)	91
a)	Préparation des données de base	91
b)	Elaboration des hypothèses pour la description du bassin	91
c)	Etude sur le terrain	93
d)	Application des méthodes	94
e)	Interprétation et validation des résultats	96
5.3	Méthodes multi-échelles (1–500 km ²)	96
5.3.1	Contexte	96
5.3.2	Modèle HYDRAT	97
a)	Description	97
b)	Domaine de validité	98
5.3.3	Modèle HYDRIF	100
a)	Description	100
b)	Domaine de validité	101
5.3.4	La méthode HYDREG : méthode combinée et multi-échelles	102
a)	Description	102
b)	Application à la Suisse occidentale	102
c)	Temps de retour	104
d)	Surface des bassins	104
e)	Région géographique	104
f)	Données de base	104
g)	Exemples numériques d'application	104
h)	Performance du modèle HYDREG	107
	Bibliographie	108
	Liste des figures	112
	Liste des tableaux	114

1 Introduction

Quels sont les problèmes ?

L'hydrologie des crues a un riche passé en Suisse ; ses origines remontent au 19^{ème} siècle. Elle couvre un domaine étendu allant de l'amélioration des techniques de mesure à la modélisation des systèmes hydrologiques, en passant par l'analyse des crues historiques, l'analyse statistique des valeurs extrêmes et l'étude des processus sur le terrain. Au cours des ans, des méthodes et des modèles ont été élaborés, qui permettent d'estimer les caractéristiques des crues, et tout particulièrement les débits de pointe. Quelles méthodes peuvent être utilisées dans la pratique pour estimer les crues ? Pour répondre à cette question fondamentale, différents aspects du problème doivent être pris en compte :

- Quel est l'objectif de l'étude ? Quels paramètres doit-on estimer, avec quelle précision ?
- Quelle est la surface du bassin versant, quelles informations sont disponibles à son sujet ?
- Existe-t-il des stations de mesure des précipitations et des débits dans le bassin ? Quelle est la longueur des séries de mesures ?

Quels moyens financiers sont-ils disponibles pour l'étude, dans quel délai celle-ci doit-elle être effectuée ?

Sur quels moyens auxiliaires peut-on compter ?

Quelles connaissances en hydrologie les experts doivent-ils avoir ?

Le présent « Guide pratique » aborde ces questions. Son but est de synthétiser les expériences faites en Suisse dans le domaine de l'estimation des crues. Les méthodes les plus utilisées dans la pratique y sont présentées, des plus simples aux plus complexes, des plus anciennes aux plus récentes. Le guide précise les possibilités offertes par ces méthodes ainsi que leurs limites et les incertitudes qui leur sont liées.

Quel est l'objectif du présent «Guide pratique» ?

L'hydrologie appliquée avait et a encore pour but de protéger au mieux notre espace vital contre les hautes eaux. Les crues, qui ont causé des dégâts importants en Suisse ces dernières années montrent qu'il reste encore beaucoup à faire. La loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau du 21 juin 1991 a augmenté les exigences relatives à la protection contre les crues. Autrefois, seule la crue centennale était prise en compte. Aujourd'hui, la loi requiert la détermination de périodes de retour différenciées selon les objets à protéger. Le présent guide doit apporter une aide aux praticiens en

- présentant et décrivant de façon claire et accessible les méthodes et les modèles fréquemment utilisés en Suisse : leurs objectifs (par ex. détermination de HQ₅₀, EHQ), leur domaine d'utilisation, leur structure, les données requises, les erreurs possibles, les difficultés de l'application, etc.
- précisant quels modèles, méthodes ou groupes de méthodes peuvent être utilisés selon le type de problème à résoudre et les données à disposition
- discutant à l'aide de quelques exemples l'application de ces méthodes.

En annexe, on trouvera des programmes informatiques d'une utilisation aisée permettant d'appliquer de façon efficiente la plupart des méthodes présentées.

Le présent rapport n'est pas un recueil de recettes prescrivant une marche à suivre standardisée pour l'estimation des crues : la matière est bien trop complexe pour cela. Le savoir des spécialistes doit toujours intervenir, de même qu'une étude sur le terrain, une analyse des facteurs déterminant la formation des écoulements et une étude des crues historiques. Le but de ce guide est d'apporter une aide aux spécialistes en présentant les méthodes les plus utilisées, en leur donnant des indications sur la façon de les appliquer et d'interpréter les résultats obtenus. Il ne remplace en aucune façon les experts en crues, mais contribue à une évaluation plus précise.

Estimation et mesure des crues

L'hydrologie et le génie hydraulique doivent collaborer étroitement dans tous les projets de protection contre les crues (v. Fig. 1-1). L'hydrologie étudie les bassins versants comme des systèmes produisant des crues. Elle tente de donner des réponses aux questions suivantes :

- Comment se produisent les crues. Mots-clés : formation des crues, compréhension des processus.
- Quand et avec quelle fréquence les crues se produisent-elles ? Mots-clés : variabilité temporelle, distribution des fréquences.
- Quelle est leur ampleur ? Mots-clés : débit de pointe, période de retour.
- Quelles méthodes utiliser pour estimer l'ampleur ?

La réponse à ces questions permet de prévoir au mieux les crues, en particulier celles qui se produisent rarement. Précisons que non seulement les débits de pointe en m³/s doivent être estimés mais que des intervalles de confiance doivent aussi être définis. Ces valeurs constituent le point de départ de la planification

tion des travaux hydrauliques de protection et de l'estimation des risques (par ex. des risques résiduels). Le présent guide apporte une contribution à l'évaluation des crues, sans cependant aborder les problèmes liés à leur mesure ou au dimensionnement des ouvrages de protection. Ces problèmes sont traités, entre autres, dans la publication « Protection contre les crues des cours d'eau, Directives de l'OFEG » (OFEG 2001).

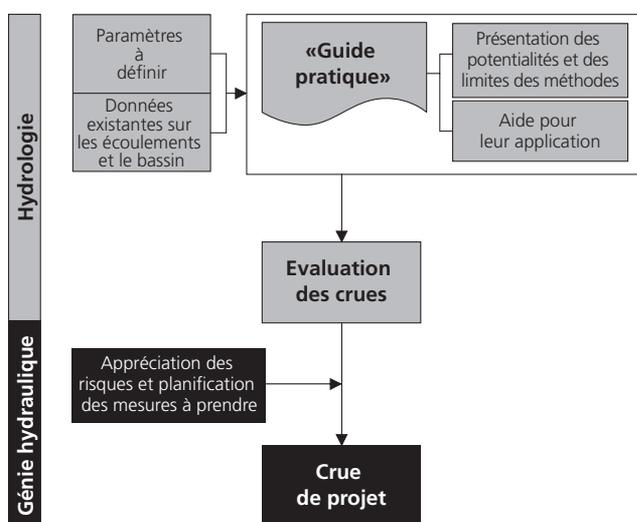


Fig. 1-1 : Place de l'hydrologie et du génie hydraulique dans l'évaluation des crues

Structure du «Guide pratique»

Lors du choix d'une méthode ou d'un ensemble de méthodes pour évaluer les crues, les spécialistes doivent tenir compte d'une série de questions dont les deux suivantes sont particulièrement importantes :

1. *Quel est le problème ?* Quel est l'objectif de l'évaluation ? S'agit-il d'une étude générale ou d'un projet concret ? Quelles mesures de protection sont nécessaires eu égard aux dégâts potentiels et aux risques ? Autre question liée à cette problématique : quels paramètres faut-il connaître, et avec quelle précision ? Le temps et les coûts à prévoir en découlent.

2. *Les données disponibles.* Quelles données existent déjà ? La quantité d'informations disponibles limite en général l'application des méthodes d'évaluation des crues (v. Fig. 2-1) ; c'est la raison pour laquelle le présent guide s'articule sur cette question.

Le déroulement d'une crue peut être décrit selon plusieurs points de vue : la vitesse de la montée des eaux, le débit de pointe, la durée du phénomène, le volume

d'eau écoulé, etc. En pratique, le débit maximum est la caractéristique la plus importante. C'est pour cette raison que le présent guide est basé sur cet aspect des hautes eaux. Un grand nombre de méthodes permet de l'évaluer. Quelques-unes, en particulier les modèles déterministes, font intervenir d'autres caractéristiques (par exemple la forme de l'hydrogramme).

Que nous réserve l'avenir ?

Le présent guide facilite la mise en œuvre des méthodes d'évaluation des crues sans cependant imposer de règles contraignantes. Il est prévu d'organiser des cours de perfectionnement à l'intention de ceux qui s'occupent de ces problèmes, ce qui devrait permettre de fructueux échanges d'idées.

Quelques-unes des méthodes présentées ici sont anciennes. Elles ont l'avantage d'avoir été utilisées avec succès pendant de nombreuses années. L'expérience a montré qu'elles fournissaient de bons résultats dans certaines conditions. La combinaison de plusieurs méthodes ouvre des perspectives intéressantes, qui sont pour la première fois utilisées systématiquement dans le présent guide.

La plupart des méthodes discutées ici ne font intervenir que les pointes de crues, ce qui constitue une lacune. Les volumes d'eau écoulés et les hydrogrammes des crues seront des caractéristiques qui seront de plus en plus nécessaires à l'avenir pour progresser dans la connaissance du transport solide, très important pour l'organisation de la protection contre les crues.

Par ailleurs, la connaissance des crues dans les petits bassins versants (< 10 km²) est aussi très lacunaire en raison, d'une part du manque de données, d'autre part de la difficulté de réaliser des mesures. En Suisse, il n'existe des séries de mesures suffisamment longues pour permettre l'étalonnage des méthodes d'évaluation des crues que pour de rares bassins de ce type. L'évaluation des crues dans ces bassins est particulièrement difficile car les effets positifs de leur atténuation relative avec l'augmentation de la surface y jouent un rôle moindre. Une bonne appréciation des processus y est par conséquent encore plus importante que dans les bassins plus étendus.

L'évaluation des crues doit encore être améliorée.

Quelques directions possibles sont suggérées dans les chapitres 4 et 5. Nous avons essayé d'améliorer la façon d'évaluer les crues en combinant différentes méthodes, par exemple en faisant intervenir dans la détermination des paramètres des modèles les écoulements provenant des sous-bassins, ou en analysant les crues historiques, ou encore en utilisant des modèles Pluie-Débit.

2 Vue d'ensemble des méthodes

Le classement des méthodes présentées ici a été fait tout d'abord en fonction de la quantité de données sur les débits et des connaissances sur les bassins qu'elles requièrent (v. Fig. 2-1). On peut imaginer un classement selon d'autres critères (v. Chap. 1). La statistique des valeurs extrêmes peut être utilisée lorsque de longues séries de données sont disponibles. Alors

que normalement cette statistique n'utilise que les valeurs des débits, la méthode du GRADEX fait en plus intervenir des informations sur les précipitations. Les modèles *Pluie Débit* (MPD) sont utilisés lorsque des informations détaillées sont requises, par exemple si la valeur du débit maximum ne suffisant pas, l'hydrogramme de crue doit être déterminé. En règle généra-

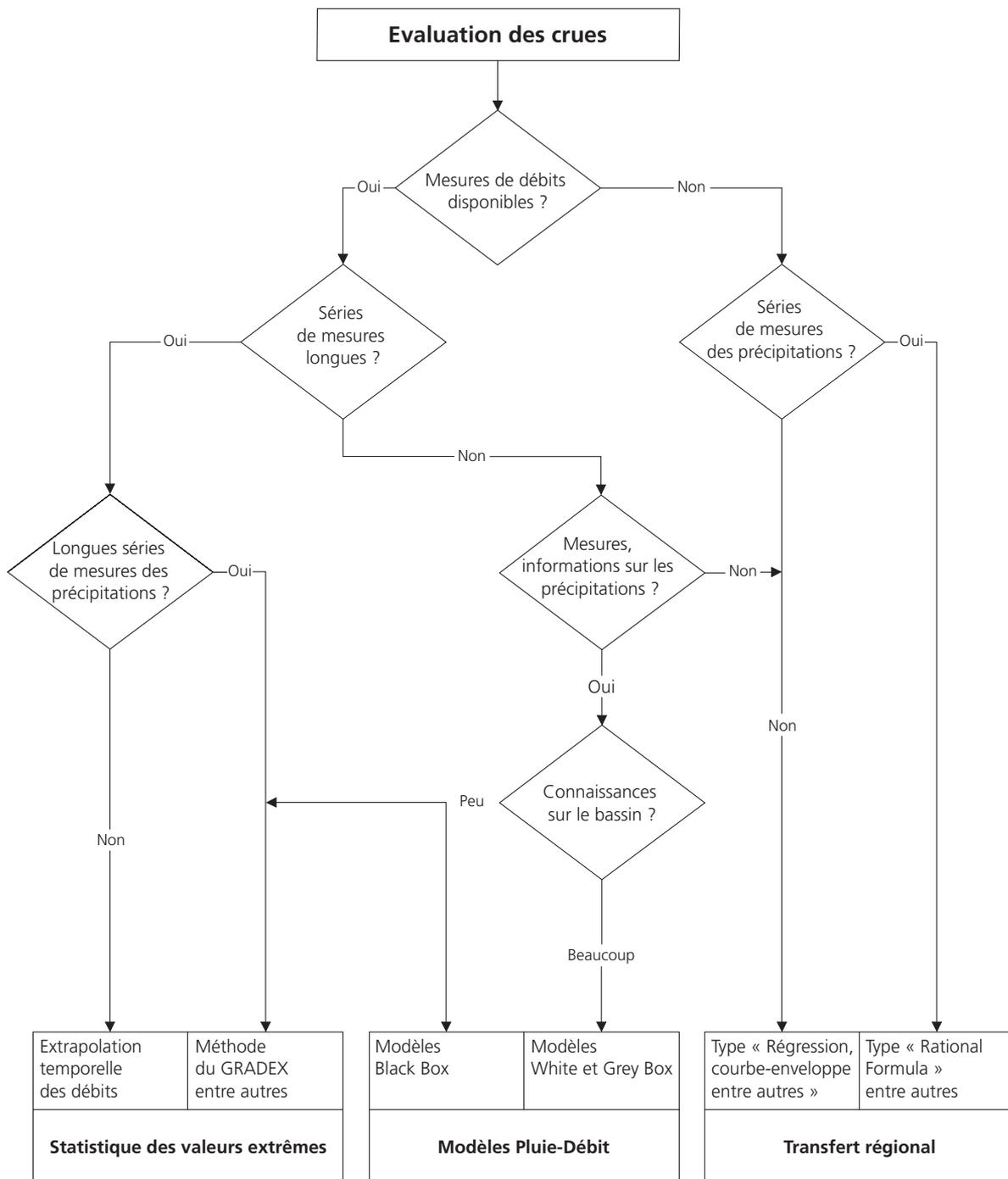


Fig. 2-1 : Classification des méthodes d'évaluation des crues

le, les MPD peuvent être étalonnés même si les séries de mesures des débits ne sont pas très longues. Les modèles Black Box, Grey Box ou White Box se différencient par le degré de détails avec lequel le déroulement des processus physiques est décrit, en fonction des connaissances sur le bassin.

Les fonctions de transfert régional sont utilisées quand il n'y a pas de mesures de débits. On les applique aussi pour valider les valeurs statistiques extrêmes obtenues à partir de courtes séries de mesures (BARBEN 2001). On distingue deux types de fonctions de transfert régional : les modèles « Régression, courbe-enveloppe et autres » et « Rational formula et autres » selon la quantité de données requises (v. Fig. 2-1).

Du point de vue méthodologique, on distingue les « Fonctions de transfert régional » et les « Méthodes taxonomiques régionales » (WEINGARTNER 1999). Comme signalé dans l'Introduction (Que nous réserve l'avenir ?), l'évaluation des crues devrait reposer en grande partie sur la considération des processus de formation des écoulements. Cela permettrait de mettre en évidence des facteurs particuliers susceptibles d'influer fortement sur le résultat final. Nous pensons ici au rôle de la neige dans les bassins de montagne, aux bassins en partie recouverts de glaciers, aux régions karstiques, etc. Le chapitre 3 est consacré aux processus de formation des écoulements.

2.1 Statistique des valeurs extrêmes

Si les séries de mesures des débits sont suffisamment longues, les crues de projet peuvent être calculées à l'aide de la statistique des valeurs extrêmes. La planche 5.6 de l'« Atlas hydrologique de la Suisse » (ASCHWANDEN & SPREAFICO 1995) et les publications de l'OFEG sur les crues (SPREAFICO & STADLER 1986, 1988 ; SPREAFICO & ASCHWANDEN 1991a, 1991b) donnent une vue d'ensemble des données existantes. En pratique, une fonction de distribution théorique est ajustée à la distribution empirique des valeurs mesurées. Les mesures utilisées sont en général les maximums annuels ou toutes les valeurs dépassant un seuil (séries partielles) (v. Chap. 4.2). L'évaluation peut être améliorée si l'on utilise les valeurs de crues historiques bien documentées (GEES 1996) ainsi que le montre le Tableau 2-1. La conversion des niveaux en débits peut être difficile pour ces crues. Souvent, des incertitudes existent quant au niveau maximum atteint, à la section du cours d'eau à l'époque ou à la rugosité du lit. Il faut aussi s'assurer que les séries de mesures soient homogènes.

Données utilisées	Evaluation HQ100 [m³/s]
Débits 1921–1941	155
Débits 1921–1941 et la plus forte crue historique connue (1846 : 245 m³/s)	220
Débits 1921–1941 et les trois plus fortes crues historiques connues (1846, 1880 et 1901)	210
Débits 1921–1941 et les onze crues dépassant un certain seuil ; utilisation de la méthode POT (v. GEES 1996)	193

Tableau 2-1 : Evaluation de la crue centennale de la Sitter à Appenzell à l'aide de différentes séries de données ; le HQ100 de référence est de 210 m³/s (Tiré de Weingartner 1998)

Le modèle du GRADEX repose sur le principe suivant (MARGOUM et al. 1994) : tout bassin versant a une limite de saturation. Une fois cette limite dépassée, la croissance de la fonction de distribution du débit moyen est égale à celle des précipitations (v. Fig. 2-2). L'utilisation de longues séries de mesures des précipitations permet d'améliorer les informations obtenues avec de courtes séries de mesures des débits uniquement.

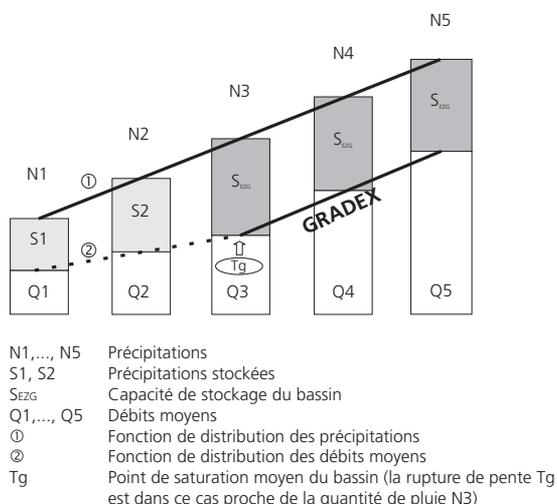


Fig. 2-2 : Principe du modèle GRADEX (Tiré de Elsasser 1996)

2.2 Modèles Pluie-Débit

Les modèles Pluie-Débit (MPD) permettent le calcul des débits en fonction des précipitations. Ils décrivent mathématiquement la relation de cause à effet entre les précipitations et les débits. Ils permettent le calcul des débits provenant d'un bassin versant. On les utilise essentiellement dans « le but de calculer les hydrogrammes de crues résultant d'épisodes pluvieux donnés » (DVWK 199). Une description générale et une

classification de ces modèles peut être trouvée, par exemple, chez NEMEC (1993) ou chez MANIAK (1999).

L'utilisation de MPD n'est pas possible, ou exceptionnellement possible, pour les bassins où aucune mesure de débits n'a été effectuée. Ces modèles demandant, pour être calés, des valeurs d'entrée et de sortie de pas de temps plus petits que ceux des mesures généralement à disposition, ils ne peuvent pas toujours constituer une alternative aux méthodes de transfert régional. Lorsqu'un MPD peut tout de même être utilisé, il offre d'intéressantes possibilités quant à l'évaluation des crues.

Remarquons que le passage entre les MPD et les méthodes de transfert régional est assez aisé. La formule rationnelle (rational formula) peut par exemple entrer dans les deux catégories de méthodes. Une différence importante entre les deux groupes est que, pour les MPD, on utilise des paramètres mesurés dans le bassin étudié, alors que pour les méthodes de transfert régional, il s'agit de paramètres régionalisés.

La modélisation peut se faire de deux façons :

- a) La *modélisation événementielle*, qui permet de calculer la crue résultant de précipitations données sur le bassin. Le choix des conditions aux limites (degré de saturation du sol, variation d'intensité des précipitations) a une très grande influence sur le résultat.
- b) La *simulation pour une longue durée* utilise de longues séries (précipitations, température, rayonnement, etc., selon la complexité du modèle utilisé) et simule une longue série de valeurs de débits, utilisés ensuite pour la statistique des valeurs extrêmes.

La modélisation événementielle ne donne pas d'indication sur la période de retour de l'événement, en raison des incertitudes sur les conditions limites. Elle joue cependant un grand rôle dans la protection contre les crues (OFEE 1995). Des bassins « humides » transformant une pluie centennale en un écoulement totalement différent de celui produit par un bassin « sec » avec un déficit de saturation élevé.

La simulation sur une longue durée offre des possibilités intéressantes, mais il n'est aujourd'hui encore pas facile de trouver des séries de mesures représentatives suffisamment longues (Interpolation à partir de stations météorologiques proches ou utilisation de générateurs de situations météorologiques).

Une méthode combinée, décrite au chapitre 4.1.2, a été développée pour minimiser les inconvénients des deux méthodes.

2.3 Transfert régional

On utilise en général des méthodes de régionalisation pour l'évaluation des débits de crues dans les bassins versants non jaugés. Dans la littérature, on parle parfois d'«analyse hydrologique régionale» au lieu de «régionalisation» (WEINGARTNER 1999).

Fonctions de transfert régional

L'analyse, la simulation ainsi que l'interpolation et l'extrapolation de structures variables dans l'espace sont les principales opérations de l'analyse hydrologique régionale (WEINGARTNER 1999). Les fonctions de transfert y jouent un grand rôle (SCHWENTKER & STREIT 1983). Le principe à la base des fonctions de transfert régional est de déterminer les valeurs ou les paramètres hydrologiques d'un modèle en fonction de paramètres variables ou invariables d'une région voisine. Les processus se déroulant dans le bassin lui-même n'y sont donc pas analysés en tant que causes. Ces fonctions utilisent des mesures de débits et de crues de bassins dont les caractéristiques physiques sont connues. Ces caractéristiques invariables comprennent

- l'ensemble du bassin (par ex. situation géographique, surface, altitudes, pentes, exposition, forme)
- le lit du cours d'eau (par ex. longueur, pente)
- le sous-sol (par ex. perméabilité, capacité de rétention)
- la végétation et l'utilisation du sol (par ex. surfaces boisées)
- le climat (par ex. rayonnement, température, précipitations) et
- les modifications dues à l'homme (par ex. surfaces imperméabilisées).

Les méthodes dites « empiriques » constituent un groupe important parmi les fonctions de transfert régional. Plusieurs sont nées à la fin du 19^{ème} siècle, mais, sont toujours très utilisées. Le type de fonction y est prescrit (par ex. $Q_{\max} = a F n^b$) et il s'agit de caler les paramètres des bassins à l'aide des mesures de débits. Les fonctions de régionalisation permettent donc de formuler mathématiquement la variabilité spatiale de paramètres hydrologiques de façon à pouvoir évaluer les crues dans un bassin pour lequel il n'y a pas de mesures.

Méthodes taxonomiques régionales

Les méthodes taxonomiques régionales constituent un autre groupe important de méthodes. Elles se basent sur la régionalisation au sens d'une « subdivision du ter-

ritoire en régions de régime semblable ou uniforme » (BECKER 1992). SCHWENTKER & STREIT (1983) appellent ces procédés classiques, structurés par une analyse hydrologique régionale, « procédés basés sur la taxonomie régionale » : « l'objectif de la taxonomie régionale étant de *caractériser des unités spatiales* pour les regrouper en fonction de similitudes préalablement définies ». Si ces unités spatiales sont contiguës, on parle de régions. Si elles ne le sont pas, on parlera de *types régionaux*. Les méthodes taxonomiques régionales permettent de définir des structures hydrologiques spatiales. La variabilité régionale des paramètres hydrologiques est ainsi mise en évidence et peut être modélisée, ce qui permet de réduire la complexité naturelle. Les méthodes taxonomiques se basent sur une régionalisation et/ou sur des caractéristiques hydrologiques.

La mise en évidence de régions hydrologiques réagissant de façon semblable lors de crues constitue un défi et n'est souvent pas possible, comme le prouve l'expérience. Ajoutons qu'il n'existe pas, au sens large du terme, de bassins ou de régions ayant des caractéristiques hydrologiques identiques ou très semblables : on ne peut définir des ressemblances que d'un certain point de vue, donc par rapport à certains caractères hydrologiques.

La démarche suivante peut être suggérée pour la définition de caractères hydrologiques dans des bassins non jaugés :

1. Définir des types spatiaux ou des régions par rapport à certaines caractéristiques, en fonction du problème à résoudre.
2. Attribuer les sous-bassins sans mesures à un type spatial ou régional (province).
3. Assigner à ces sous-bassins des caractéristiques hydrologiques ou paramètres du modèle.

Les *méthodes taxonomiques régionales et les fonctions de transfert régional* peuvent être regroupées sous le nom de « Transfert régional » (SCHWENTKER & STREIT 1983). Il peut dans certains cas être avantageux de combiner les deux types de méthodes. Lors d'une analyse taxonomique, des bassins ou des régions réagissant de façon analogue peuvent être identifiés et servir à développer des fonctions de régionalisation. L'expérience montre que, pour des modèles régionaux différenciés, les intervalles entre les valeurs des paramètres du modèle deviennent plus petits que pour les modèles dits globaux. Les modèles hydrologiques sont ainsi améliorés (WEINGARTNER 1999).

Rôle de la surface des bassins versants

Plus un bassin est petit, plus le rôle des facteurs influant sur les écoulements est important. Les effets

d'amortissement, qui peuvent améliorer le résultat lors de l'évaluation des crues dans les bassins de moyenne grandeur, ont une moins grande influence dans les petits bassins. On ne procédera donc pas de la même façon pour évaluer les crues dans les bassins très petits (< 10 km²) que pour les bassins de grandeur moyenne (10 à 500 km²). C'est pour cela que ces deux cas ont été traités séparément dans le présent guide.

2.4 Définition et utilisation des valeurs de crues extrêmes (EHQ)

2.4.1. La notion de risque résiduel

Dès le début des années 1990, une nouvelle approche dans le domaine de la protection contre les crues s'est imposée. Ce changement marque le passage d'une politique de lutte contre les crues à celle de la culture du risque. Cette dernière approche part de la constatation qu'une protection absolue ne peut jamais être atteinte et que l'accent doit être mis sur une meilleure gestion des risques résiduels.

Auparavant, les ouvrages de protection étaient conçus pour remplir leurs fonctions jusqu'à une valeur seuil, généralement un débit de projet correspondant à la crue centennale. L'expérience des événements catastrophiques récents a montré que les dommages constatés étaient la plupart du temps provoqués par des événements dépassant les valeurs généralement retenues pour le dimensionnement des ouvrages de protection. Afin de mieux intégrer ces événements hors normes dans les politiques de prévention, la réflexion s'est portée sur les solutions permettant de diminuer les risques subsistants après la réalisation des mesures de protection. Ces risques sont communément appelés risques résiduels.

En simplifiant, il est constaté que pour des valeurs très élevées ou en présence de risques spéciaux, les dommages lors d'événements exceptionnels ne sont pas acceptables et doivent être contrôlés. On peut, soit augmenter le niveau de protection (buts de protections), soit réduire la vulnérabilité. Pour définir les moyens d'action, les conséquences d'un événement plus important que la crue de projet doivent donc être connues et les mesures proposées adaptées à la situation. Les mesures possibles portent sur des prescriptions liées à l'aménagement du territoire (réglementation de construction), sur la protection d'objets, sur une adaptation des ouvrages de protection pour éviter leur rupture en cas de surcharge et, enfin, sur la planification d'interventions d'urgence.

Dans le but de planifier, un événement représentatif d'une situation exceptionnelle doit donc être défini.

2.4.2. Définition de la crue extrême pour la protection contre les crues

La crue extrême est alors définie comme l'événement très rare qui dépasse les valeurs généralement admises pour le dimensionnement. Le choix de cet événement tient compte de nombreux facteurs, eux-mêmes très variables, si bien qu'une définition précise, notamment l'attribution d'un temps de retour, n'est pas indispensable et appropriée. La notion de crue extrême intègre également les incertitudes sur les processus à l'origine du danger et n'est pas donc exclusivement liée à un débit de pointe. Dans ce sens, la crue extrême est interprétée comme un événement contrôlant la sécurité du dispositif de protection contre les crues par analogie à la pratique dans le domaine de la statique ou de la géotechnique (charge extraordinaire, charges utiles et additionnelles).

Dans le cas où le débit de pointe serait déterminant pour la définition d'un événement extrême, la règle est toutefois d'attribuer un temps de retour associé à cet événement d'environ 1000 ans. Cette crue extrême doit alors être distinguée de la crue maximale (Q_{\max}) qui résulte de l'application de certaines méthodes empiriques. La crue maximale est effectivement liée à la plus grande valeur observée sur un bassin versant jaugé. Cette valeur peut donc être fréquemment inférieure à la crue extrême. Elle est également différente de la crue de sécurité utilisée dans le dimensionnement des grands barrages.

2.4.3. Détermination de la crue extrême

Pour l'analyse d'un événement extrême EHQ, des événements qui présentent une charge supplémentaire significative pour le système étudié doivent donc être retenus. Dans ce but, l'analyse de la situation (type de bassin versant, données disponibles, processus en jeu, dangers résultants) est déterminante pour le choix des caractéristiques de cet événement. Les commentaires qui suivent se rapportent uniquement à la détermination du débit de pointe.

Lorsque les données disponibles sur les débits sont en nombre suffisant ou lorsque les enjeux le nécessitent, l'application d'une méthode évoluée peut être requise pour déterminer le débit de pointe extrême. Ces méthodes sont présentées au chapitre 4.3.

Compte tenu des nombreux autres facteurs en jeu, un calcul spécifique de la crue extrême n'est souvent pas nécessaire. Une estimation grossière s'avère en général suffisante. On a alors recours à des valeurs tirées de l'événement centennal. Des facteurs de multiplication de 1,3 à 1,5 fois le Q_{100} défini sont appliqués. Le gradient entre la crue moyenne annuelle et la crue cen-

tennale ($Q_{100}/Q_{2,33}$) issu d'une analyse fréquentielle peut éventuellement fournir des informations complémentaires utiles pour évaluer ce facteur

Concernant les insécurités dans des plus petits bassins versants, des facteurs de sécurité s'élevant jusqu'à 2 sont raisonnables (en comparaison, pour la sécurité des barrages un facteur de sécurité de 2,25 est exigé).

2.4.4. Utilisation des valeurs de crues extrêmes

En résumé, nous rappellerons que l'utilisation de la crue extrême se retrouve à différents niveaux de l'établissement d'un projet de protection contre les crues :

- Lors de l'examen des dangers dus aux crues. La matrice des dangers utilisée pour la cartographie des dangers intègre cet événement extrême (risques restants = surfaces jaunes striées).
- Lors de l'établissement du concept de protection, dans le cadre de l'optimisation des mesures pour la recherche des solutions visant à minimiser les risques résiduels.
- Lors du dimensionnement des ouvrages. Certains ouvrages de protection contre les crues doivent être capables de résister à une crue extrême (sécurité constructive de l'ouvrage).

2.4.5. Exemple de détermination de la crue extrême

Dans le cadre du grand projet de la 3^{ème} correction du Rhône dans le canton du Valais, une étude hydrologique approfondie a été effectuée pour l'estimation des débits. L'analyse a été basée d'une part sur une analyse statistique des débits observés aux stations hydrométriques du Service hydrologique national et d'autre part sur une modélisation hydrologique en s'appuyant sur une génération stochastique de précipitations. Cette dernière analyse sera présentée au chapitre 4.1.2.

L'analyse statistique, effectuée dans le cadre de CONSECRU par le laboratoire HYDRAM de l'EPFL, se base sur l'ajustement statistique d'une série homogène d'observations (BÉROD ET CONSUEGRA 1995). En effet, les grands barrages réalisés au milieu des années 1950 ont fortement influencé les débits de crues par leurs effets de stockage et d'écrêtage des crues. La figure 2-3 montre les ajustements des deux séries de mesures : avant (1941–1957) et après construction des grands barrages (1958–1994). Compte tenu que l'effet des barrages ne peut être garanti en tout temps, en particulier en automne lorsque ils sont pratiquement pleins, la série de référence pour l'estimation des débits doit être celle d'avant la réalisation des

barrages. Dans le cas où un volume pour la protection contre les crues est réservé comme à Mattmark, son effet peut être intégré.

Afin d'utiliser au maximum l'information disponible, cette série a été complétée par les débits de pointes des événements historiques de 1987 et 1993 reconstitués après évaluation de l'effet des barrages. La crue d'octobre 2000 a été placée dans le diagramme, mais n'a pas été utilisée pour l'analyse statistique.

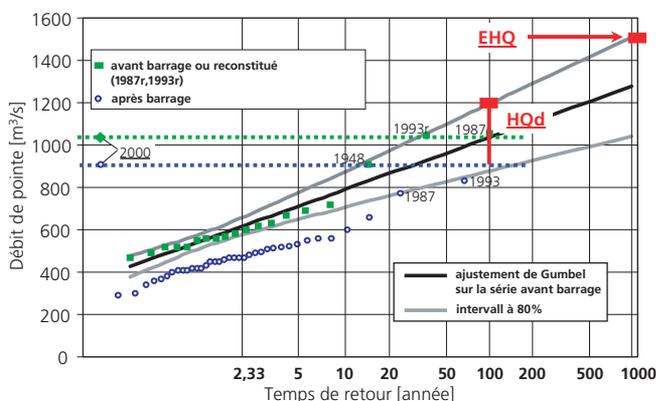


Fig. 2-3 Bases hydrologiques de la 3^{ème} correction du Rhône et crue du 15 octobre 2000 pour la station de Sion.

L'ajustement a été complété par la détermination d'un intervalle de confiance à 80%. Les débits de dimensionnement retenus correspondant à une crue centennale devront se situer dans une gamme de débits situés entre la valeur historique observée maximale et la valeur supérieure de l'intervalle de confiance. La valeur maximale correspond à un débit de 1'200 m³/s.

Pour la crue extrême, la valeur retenue correspond, afin de tenir compte des incertitudes, à la valeur supérieure de l'intervalle de confiance pour la crue millénaire. Le débit correspond à une valeur d'environ 1'550 m³/s. Le rapport entre Q_{100} max. et la crue extrême est donc ici de 1,3. En tenant compte de la valeur médiane de Q_{100} (1'050 m³/s), le rapport est approximativement de 1,5. Ces évaluations correspondent par conséquent aux facteurs trouvés pour d'autres cours d'eau de Suisse (Reuss, Engerlbergeraa).

Sur la base de la modélisation hydrologique, le débit extrême finalement retenu a été de 1'600 m³/s.

3 Notions de base sur les processus de formation des écoulements

3.1 Introduction

L'analyse des principaux processus de formation des écoulements est très importante pour une évaluation fiable des crues. Il s'agit surtout de savoir quelle est la participation des précipitations au cours de la crue. Le chapitre 3 montre que la formation des écoulements peut varier énormément selon la nature du terrain naturel, qui a une grande influence sur le débit des crues. La part de précipitation se transformant en écoulement dépend de la capacité de rétention des sols. Cette capacité leur permet de stocker des quantités d'eau plus ou moins grandes et de les restituer aux cours d'eau avec plus ou moins de retard. Sur les sols très peu perméables, l'écoulement de surface se produit rapidement. En revanche, les terrains très perméables doivent être saturés avant que des écoulements de surface aient lieu et que les débits augmentent. Les processus d'écoulement, déterminants pour la vitesse avec laquelle les débits augmentent, sont donc différents selon le type de terrain.

3.2 Quels processus d'écoulement connaît-on ?

La figure 3-1 illustre les différents types d'écoulements en fonction de coupes schématiques du terrain.

Un *écoulement de surface* (Hortonian overland flow, HOF) est observé si le terrain est imperméable.

Un *écoulement superficiel par saturation* (Saturation overland flow, SOF) se produit après la saturation du terrain, donc très rapidement sur les sols superficiels et humides dont la capacité de rétention est faible. On distingue les écoulements de surface sur sols vite saturés (SOF1), les écoulements retardés (SOF2) et les écoulements fortement retardés (SOF3). Cette distinction est aussi valable pour les autres types de processus d'écoulement.

Un *écoulement souterrain* (Sub-surface flow SSF) a lieu lorsque des couches très perméables reposent sur un soubassement imperméable ou lorsque des macropores permettent à l'eau de s'infiltrer rapidement. Si le sol a une bonne perméabilité et repose sur des couches géologiques elles aussi perméables, de grandes quantités d'eau peuvent pénétrer dans le sol et le sous-sol par *infiltration en profondeur* (Deep percolation DP) pour y être stockées sans qu'il y ait écoulement.

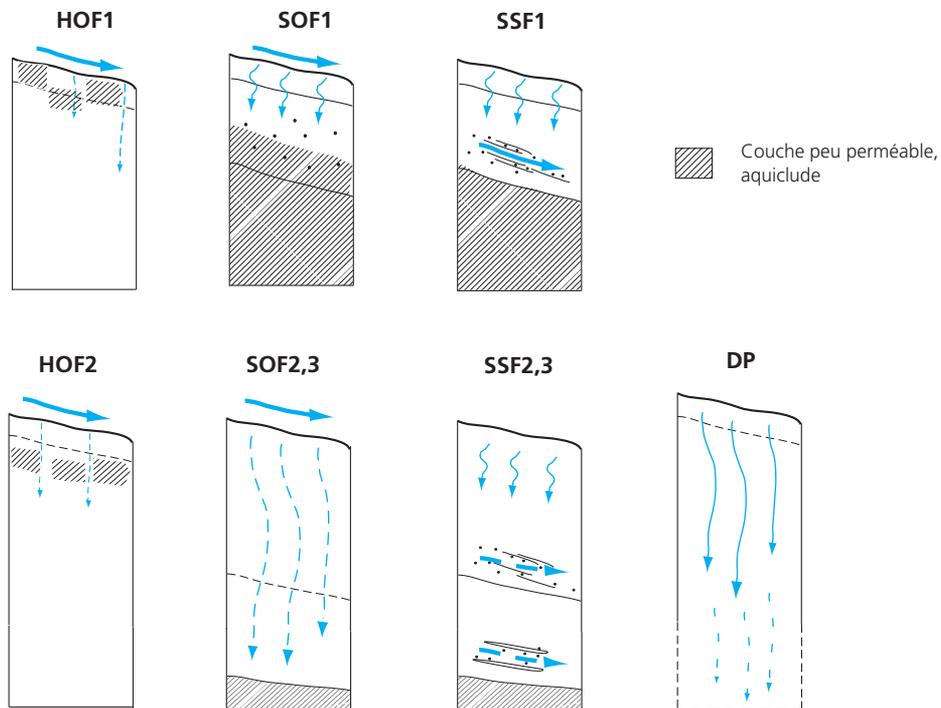


Fig. 3-1 : Processus d'écoulement et réaction lors de fortes pluies

HOF = Écoulement de surface hortonien (Écoulement de surface en raison d'obstacles à l'infiltration) ; HOF1 rapide, HOF2 légèrement retardé.

SOF = Écoulement superficiel par saturation ; SOF1 rapide, SOF2 légèrement retardé, SOF3 fortement retardé.

SSF = Écoulement souterrain (Subsurface flow) ; SSF1 légèrement retardé, SSF2 retardé, SSF3 fortement retardé.

DP = Infiltration en profondeur (Deep percolation).

D'autres facteurs ont une influence sur la formation des écoulements : les pluies antécédentes (celles qui sont tombées les jours précédant l'épisode pluvieux principal) peuvent par exemple augmenter les écoulements. La fonte des neiges peut aussi influencer de différentes façons les écoulements : de l'eau retenue sous forme solide peut être libérée. Si la fonte a lieu lors de fortes précipitations, l'effet des précipitations est augmenté. Les quantités d'eau provenant de la neige sont cependant relativement faibles comparées à celles qu'apportent de fortes précipitations. L'effet de la fonte des neiges sur les crues de 1999 a été étudié (OFEG 2000). La fonte de la neige peut aussi fournir de l'eau aux couches du sol sous-jacentes et ainsi accélérer le processus de saturation. L'exemple donné au chapitre 3.6 montre comment ces différents facteurs peuvent contribuer aux crues.

3.3 Quels sont les effets des différents processus d'écoulement ?

Des expériences de pluies artificielles sur des pentes naturelles, aspergeant des surfaces de 60 m², ont permis d'étudier les processus d'écoulement (SCHERRER 1996 ; NAEF et al. 1998). Ces essais d'arrosage ainsi que les principaux résultats obtenus sont décrits dans L'Atlas hydrologique de la Suisse (Planche 5.7) (NAEF et al. 1999). La figure 3-2 montre la réaction à de fortes pluies (50–100 mm/h) des 18 emplacements étudiés. Quatre d'entre eux, ayant une réaction typique, sont présentés en détail ci-dessous. Un écoulement de surface hortonien (HOF) a été observé à la station du col du St-Gothard (TI). L'épaisse couche compacte d'humus de surface, pauvre en micropores, agit ici comme une barrière contre l'infiltration, si bien que presque 90% de l'eau de l'arrosage s'y écoule en surface. A la station de Willerzell près du lac de Sihl (SZ), en forte pente, la mince couche de sol à terre brune perméable a permis à toute l'eau de s'infiltrer et de s'écouler assez rapidement après un passage dans les grès sous-jacents (SSF2). A Therwil (BL), une épaisse couche de sol brun, riche en macropores et reposant aussi sur des grès n'a permis des écoulements superficiels qu'avec un fort retard (plus d'une heure), toute l'eau s'infiltrant au début dans le sol, qui ne se sature que lentement (SOF3). A Blauen (BL), toute l'eau s'est infiltrée dans le sol brun de surface pendant des heures, pour pénétrer en profondeur dans des calcaires karstifiés. Même lors de fortes précipitations, les pentes de Therwil et de Blauen ne contribuent pratiquement pas à l'écoulement.

Le processus d'infiltration dépend donc de l'environnement et détermine la quantité d'eau qui va s'écouler. Si, dans un bassin versant donné, les processus prédo-

minants peuvent être déterminés, il est possible de prévoir si les écoulements seront rapides, légèrement ou fortement retardés lors de pluies abondantes et quelle importance ils auront.

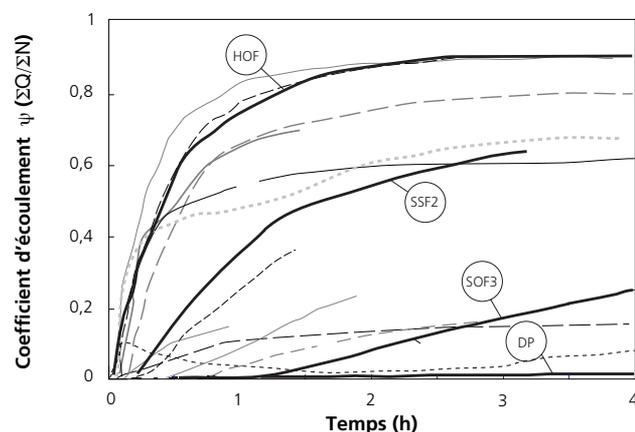


Fig. 3-2 : Evolution des coefficients d'écoulement $\Psi = (\sum Q / \sum N)$ des 18 emplacements situés dans des pentes. Les lignes épaisses correspondent aux emplacements où un processus d'écoulement domine (HOF = écoulement de surface hortonien ; SOF3 = fortement retardé en raison de la lente saturation du sol ; SSF2 = écoulement retardé ; DP = infiltration en profondeur). ($Y = SQ/SN$)

3.4 Détermination des caractéristiques déterminantes pour la formation des écoulements

L'analyse des essais d'aspersion a montré que certaines caractéristiques déterminent le type d'écoulement. Ces caractéristiques sont présentées dans la figure 3-3, pour un terrain sans nappe phréatique. La figure 3-4 présente un schéma de détermination du processus (SDP), développé sur la base de la connaissance des caractéristiques décrites plus haut, pour un sol herbeux. Le SDP facilite la reconnaissance du processus dominant à un endroit donné (SCHERRER & NAEF 2002, SCHERRER 2001). Le terrain y est subdivisé en surface, sol superficiel, sol profond et soubassement rocheux.

Pour un sol peu épais, herbeux, en forte pente avec un soubassement rocheux compact, la détermination se déroule de la façon suivante : si la couverture est quasi continue, et en l'absence d'humus hydrophobe, on passe à l'examen de la matrice. Dans l'exemple présenté, elle n'est pas compacte et sa perméabilité est bonne, ce qui permet à l'eau de pénétrer dans le sol profond. Son épaisseur est comprise entre 0,5 et 1 m. Si le sol profond a une forte macroporosité, une matrice de perméabilité élevée, si le soubassement est compact et la pente forte, il faut s'interroger sur la

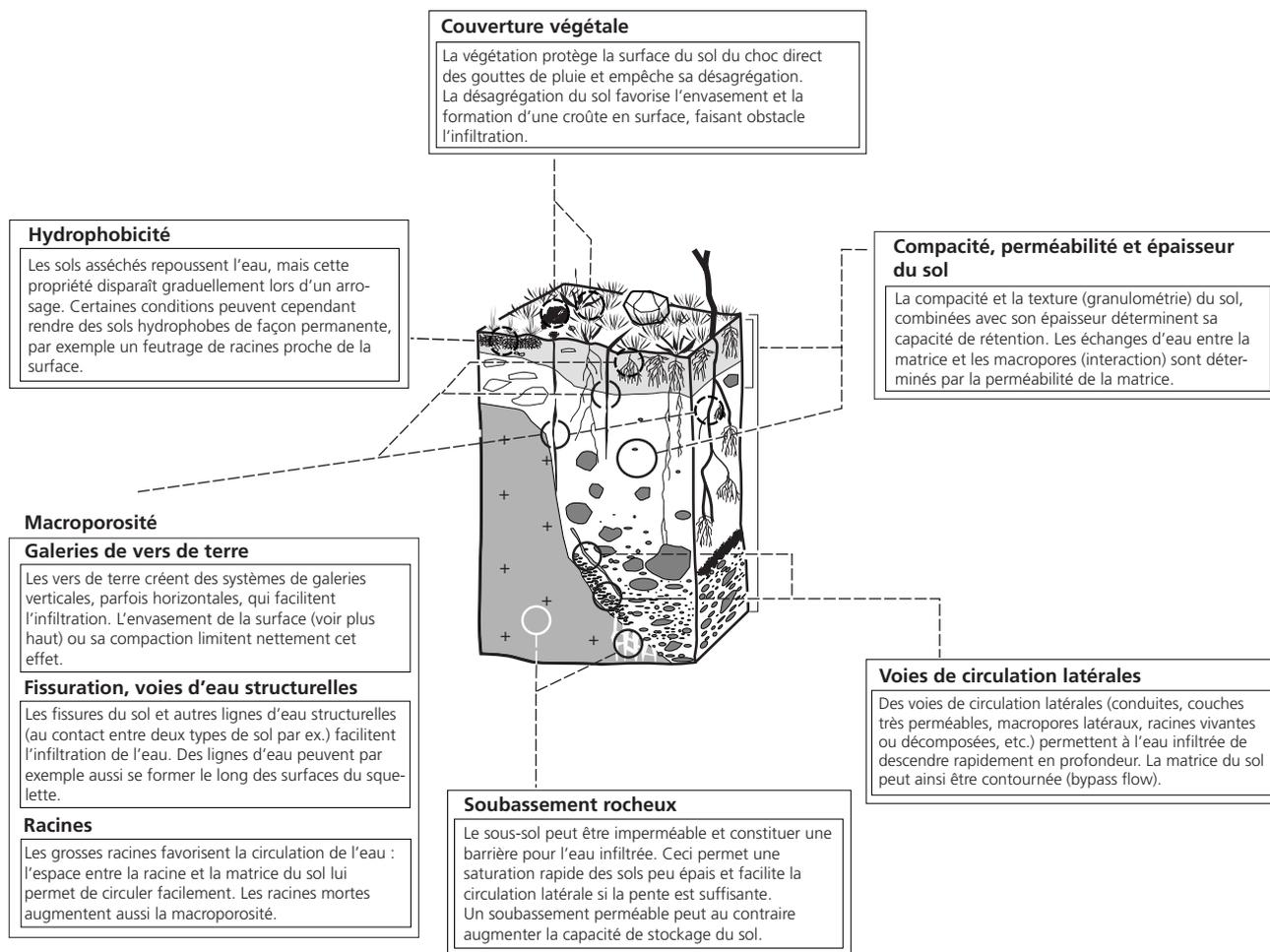


Fig. 3-3 : Coupe montrant les caractéristiques agissant sur l'infiltration et la circulation de l'eau dans le sol et déterminant le type de processus d'écoulement pour un sol non saturé. La figure 3-4 explique comment ces caractéristiques agissent.

présence de voies de pénétration latérales. S'il en existe, on obtient le cas SSF2. En terrain plat, on obtiendrait SOF2.

3.5 Processus d'écoulement dans les versants

Le SDP permet de déterminer les processus d'écoulement dominants à un endroit donné. Plusieurs types de processus peuvent se dérouler en même temps dans les différentes parties du versant. La figure 3-5 présente les processus dominants déterminés sur le terrain dans une pente du bassin versant de l'Idarbach (Rhénanie-Palatinat). Les raisons de l'apparition d'un type de processus déterminé sont décrites dans les textes encadrés. Les interactions entre les différents processus peuvent être appréciées selon les réflexions de l'« hillslope hydrology ».

Dans le cas présenté ici, peu d'écoulement a été mis en évidence (DP) au haut de la pente. Cette partie du

bassin n'intervient donc pratiquement pas dans les écoulements plus bas dans la pente. Si, par exemple, il y avait des sols faiblement perméables au sommet des pentes, les écoulements y seraient plus importants et nettement augmentés plus bas.

3.6 Quels sont les effets des processus d'écoulement dans un bassin versant ?

Les réactions aux fortes pluies sont très différentes d'un bassin à un autre. Ces différences sont dues avant tout à la capacité de stockage des sols, qui diffère fortement d'un endroit à un autre. Quand les types SOF1 et HOF prédominent, les écoulements sont plus rapides que dans les régions de type SOF2, SOF3, SSF2, SSF3 ou DP. À l'aide des cartes géologiques et pédologiques, ainsi que d'études sur le terrain, on peut établir la carte des différents types d'écoulements (zones à écoulement rapide, légèrement retardé, retar-

dé, fortement retardé). Les surfaces respectives de chacune de ces zones, ainsi que leur position dans le bassin permettent d'estimer de quelle façon les précipitations (orages, pluies prolongées) vont se traduire en écoulements. On a illustré l'influence des processus d'écoulement sur le débit du cours d'eau par trois exemples (l'Allenbach à Adelboden, la Saltina à Brigue et la Suze à Sonceboz) tirés de l'Atlas hydrologique de la Suisse, HADES (Planche 5.7).

Le bassin versant de l'Allenbach est situé dans des flyschs argileux, des calcaires et des moraines locales. Les flyschs des versants sud, très abrupts, sont recouverts par endroits de lithosols. Sur les pentes nord, parallèles aux couches, on trouve de puissants sols d'altération à gleys. Ces pentes sont fréquemment instables et affectées de glissements de terrain. Lors de précipitations brèves et intenses, les fortes pentes de roche nue ou de lithosol réagissent instantanément en raison de leur faible capacité de stockage (Fig. 3-6a, surfaces en rouge). Ces surfaces sont en grande partie contiguës, pourvues d'un réseau de ruisseaux bien développé et peuvent être affectées par des orages locaux, limités. Les écoulements sont donc ici essentiel-

lement du type HOF et SOF1 à réaction rapide. Les parties du bassin recouvertes de dépôts morainiques et de sols à gleys contribuent dans une moindre mesure aux débits de crue (SOF2 et SSF2), alors que les zones couvertes d'épais éboulis ou de puissantes masses de déjection réagissent à peine (DP, SSF3 et SOF3).

Les fortes crues de l'Allenbach, caractérisées par des hydrogrammes très pointus, sont causées par les orages d'été (Fig. 3-6b). Lors d'épisodes pluvieux prolongés, les pointes de crues sont moins accentuées. Dans le bassin versant de la Saltina, les parcelles à réaction rapide sont très dispersées (Fig. 3-7a). Ce sont les zones de roche affleurante ou recouvertes de sols minces vite saturés. Une averse orageuse d'extension limitée ne peut pas toutes les atteindre uniformément et avec une intensité suffisante. Des précipitations abondantes et de longue durée sont nécessaires pour provoquer de fortes crues, car alors les zones à réaction retardée se saturent, contribuant aussi aux écoulements (Fig. 3-7b). Ces zones, très étendues dans ce bassin, sont constituées de moraines et d'éboulis, parfois à très gros blocs.

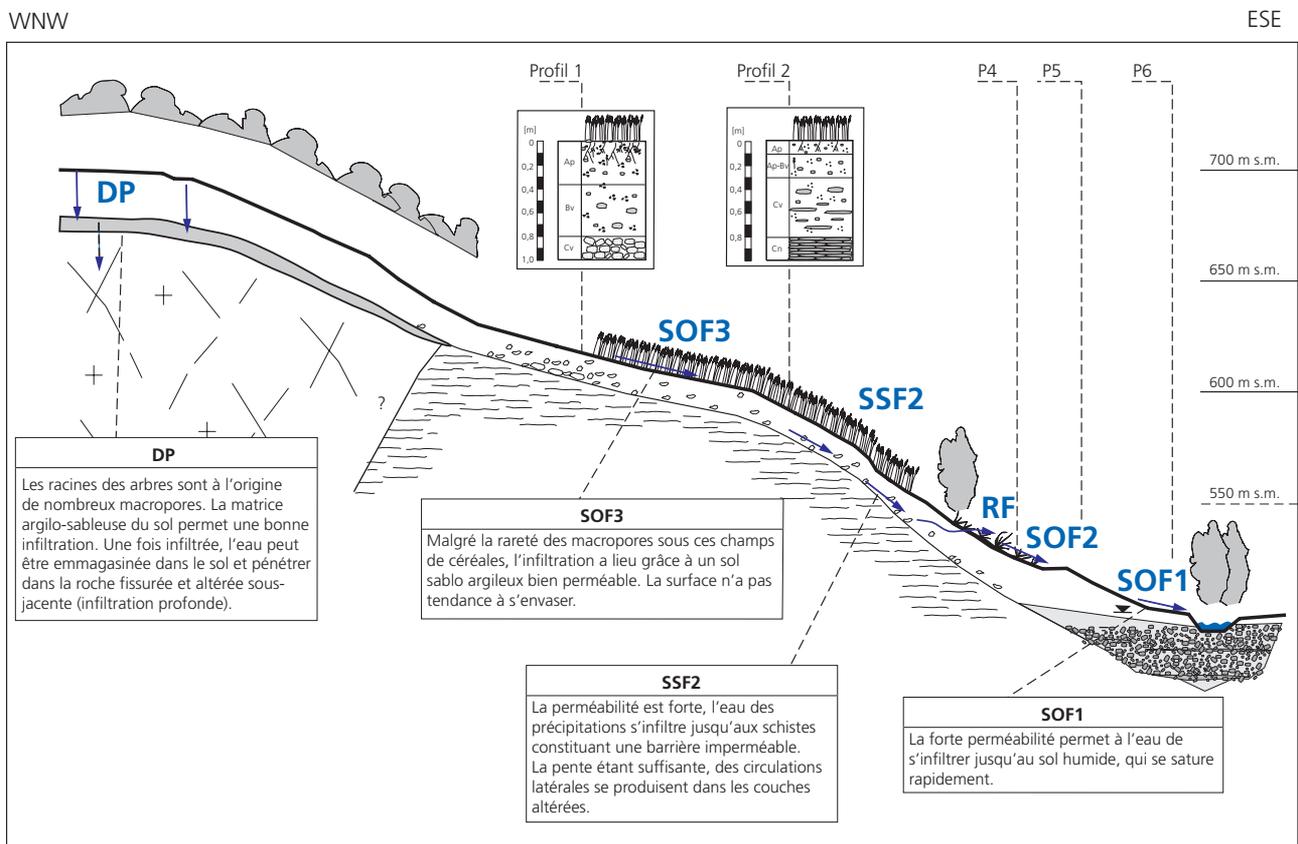


Fig. 3-5 : Principaux processus d'écoulement dans une pente du Hundsrück (Rhénanie-Palatinat) sur la base d'une étude de terrain. P1 à 6 sont des sondages. Les textes encadrés expliquent la raison pour laquelle un certain type d'écoulement se produit.

a) Réaction forte et rapide

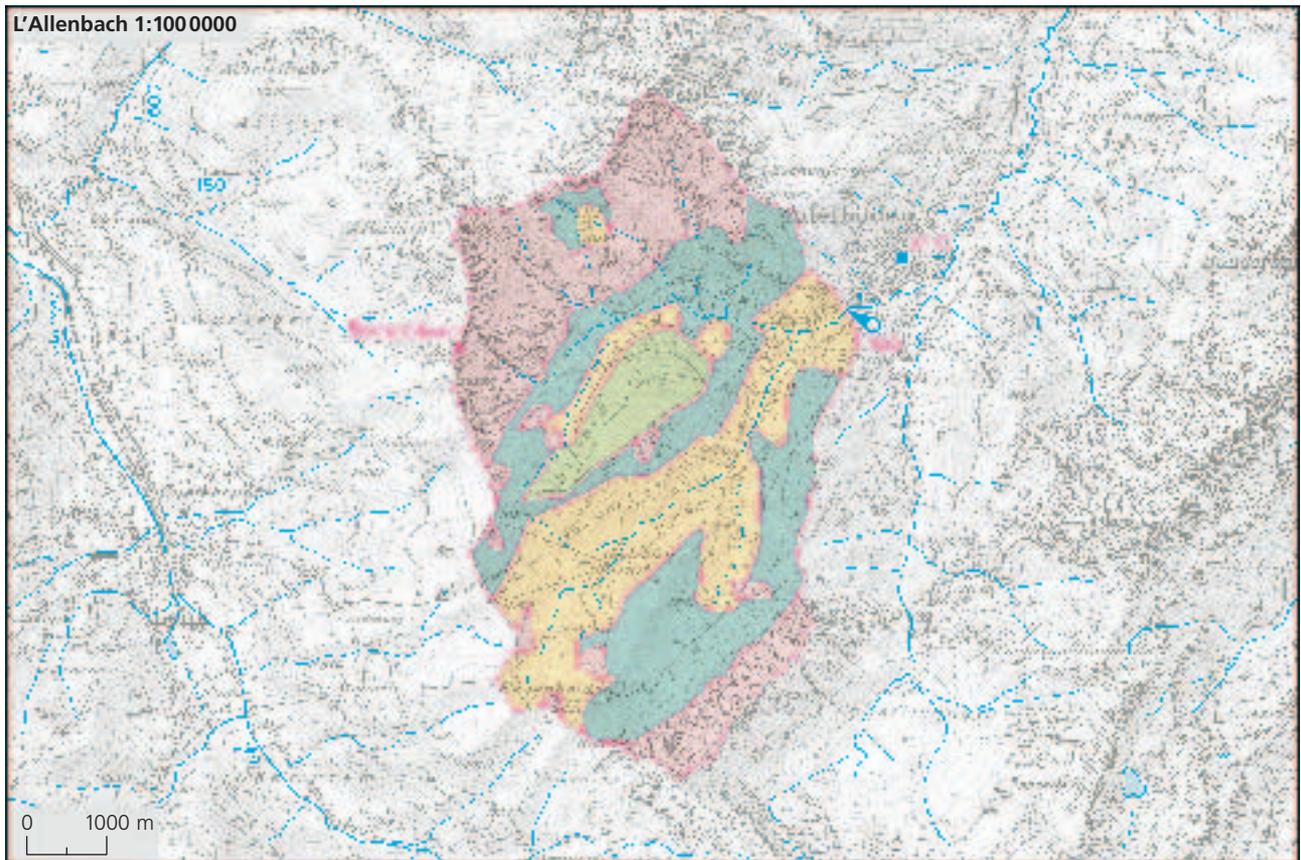


Fig. 3-6 : a) Surfaces contribuant de la même façon aux écoulements dans le bassin versant de l'Allenbach (Atlas hydrologique de la Suisse, HADES).

b) La plus forte crue mesurée (à Adelboden)



Légende

Variation du débit lors de fortes pluies

- Surfaces réagissant rapidement
- Surfaces à faible capacité de stockage : rocher, sols très superficiels, sols très humides, sols de perméabilité très faible, surfaces bâties
- Surfaces réagissant avec un léger retard
- Surfaces à capacité de stockage moyenne : sols superficiels, sols humides, sols de faible perméabilité
- Surfaces réagissant avec retard
- Surfaces à grande capacité de stockage : sols perméables, d'épaisseur moyenne à forte
- Surfaces réagissant avec un fort retard
- Surfaces à grande capacité de stockage : sols perméables et de forte épaisseur, sols perméables recouvrant des sédiments meubles ou de la roche en place perméables

Autres surfaces

- Glacier

Stations de mesures utilisées pour l'analyse

- 862 Station de jaugeage (numéro, v. Planche HADES 5.1)
- 280 Station pluviométrique (numéro, v. Planche HADES 2.1)

Chronique des précipitations et des débits pour la plus forte crue mesurée dans le bassin

- Intensité des précipitations [mm/h]
- Hauteur cumulée des précipitations [mm]
- Débit spécifique [m³/s · skm²]

b) Réaction caractéristique du bassin versant de l'Allenbach aux fortes précipitations.

a) Réaction retardée et modérée

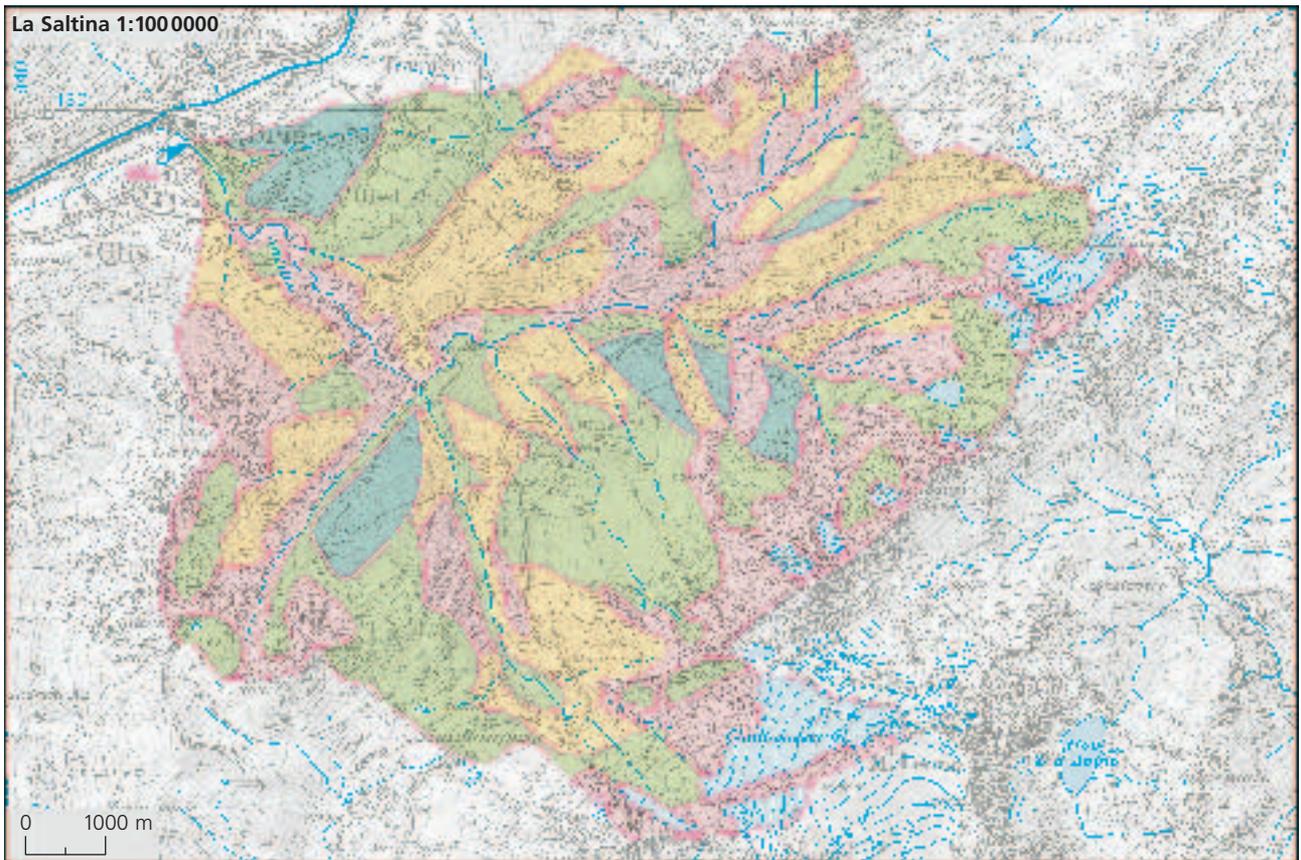
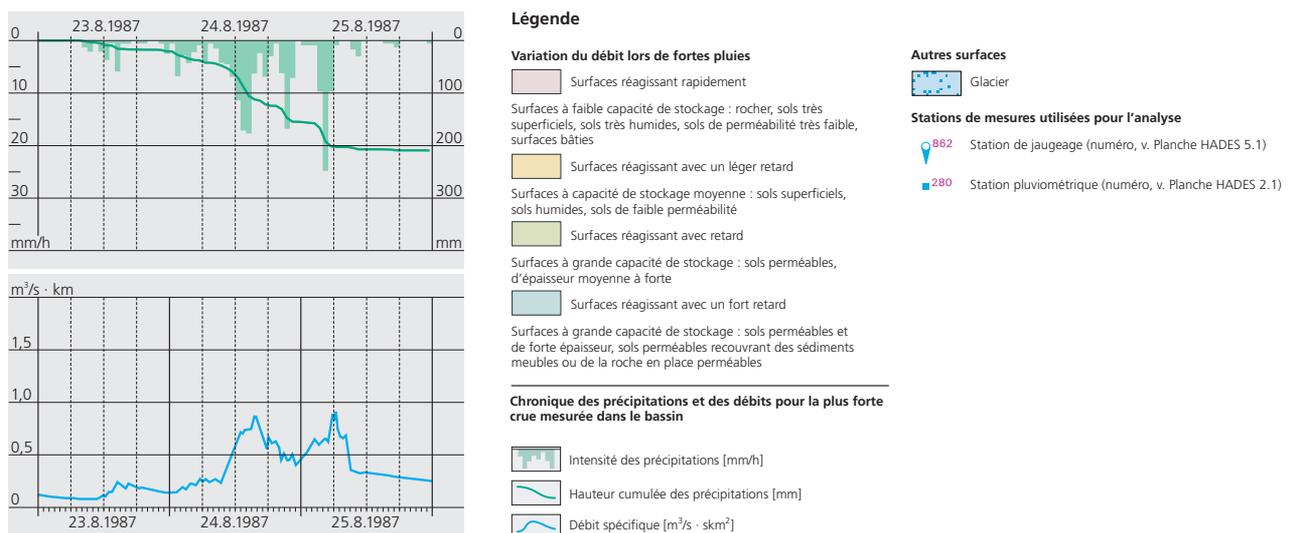


Fig. 3-7 : a) Surfaces contribuant de la même façon aux écoulements dans le bassin versant de la Saltina à Brigue (Atlas hydrologique de la Suisse, HADES).

b) La plus forte crue mesurée (à Brigue)



b) Réaction caractéristique du bassin versant de la Saltina aux fortes précipitations.

a) Réaction lente et faible

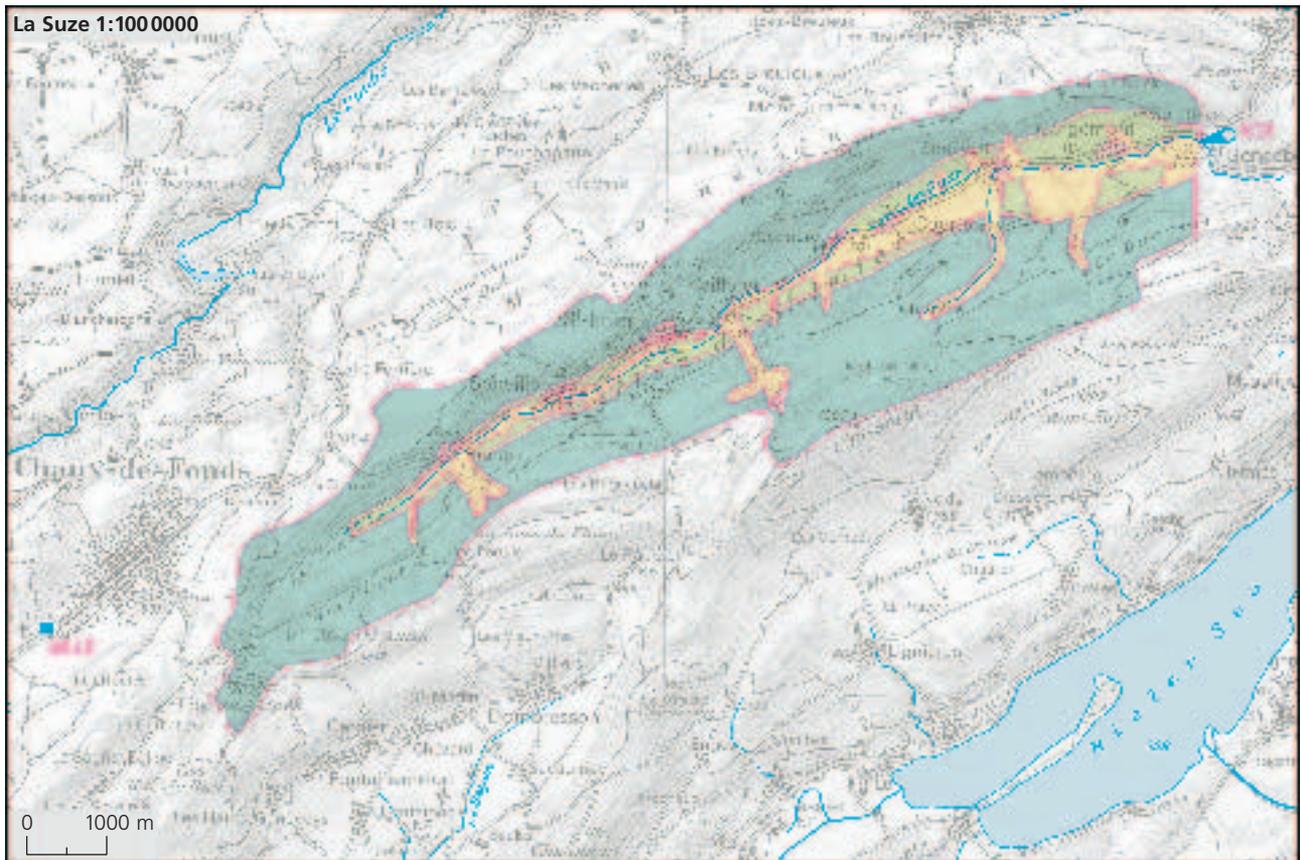
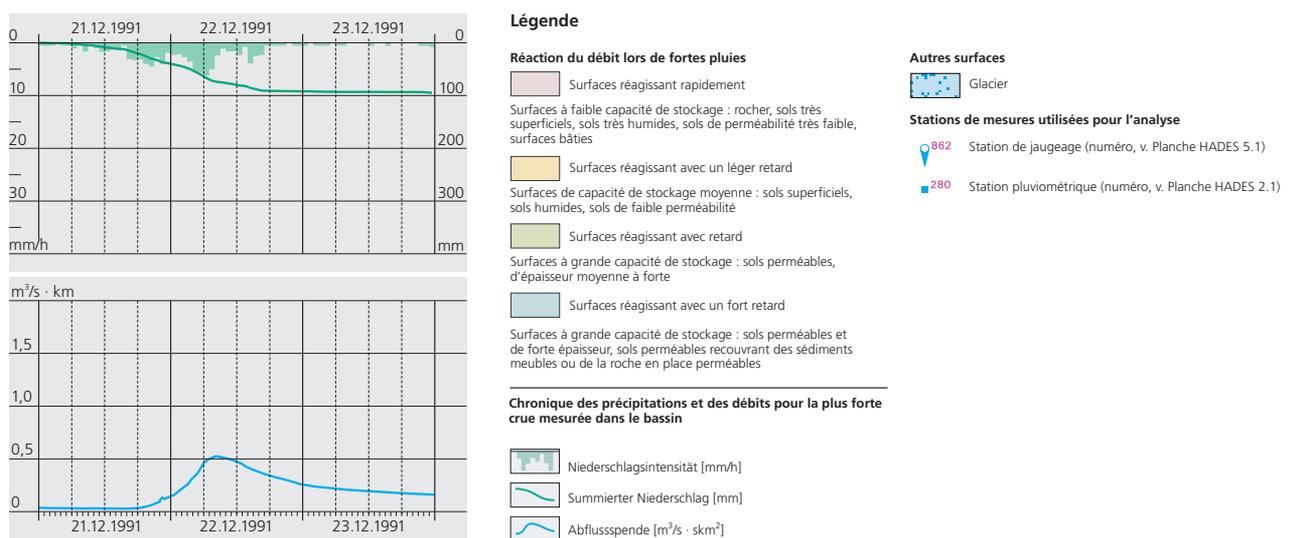


Fig. 3-8 : a) Surfaces contribuant de la même façon aux écoulements dans le bassin versant de la Suze à Sonceboz (Atlas hydrologique de la Suisse, HADES).

b) La plus forte crue mesurée (à Sonceboz)



b) Réaction caractéristique du bassin versant de la Suze aux fortes précipitations.

Le bassin versant de la Suze, dans le Jura plissé, est essentiellement entaillé dans des calcaires karstiques. Les sols y sont de façon générale minces et perméables, laissant pénétrer l'eau des précipitations dans le sous-sol karstique (Deep percolation). La réaction du bassin aux pluies est donc fortement retardée. Le fond de la vallée est constitué de couches de marnes et de grès recouverts en partie par des moraines de fond argileuses. Des sols peu perméables s'y sont développés, qui permettent un écoulement de surface lors de fortes pluies. Comme la plus grande partie du bassin présente une perméabilité bonne à très bonne (Fig. 3-8a), les fortes crues ne s'y produisent qu'en hiver lorsque le sol est très mouillé ou qu'il est gelé, ce qui réduit l'infiltration. On observe alors des écoulements de surface aux endroits où l'eau peut s'infiltrer en temps normal. Les hydrogrammes de crues sont ici caractérisés par un très long temps de montée, un débit de pointe faible et un fort volume écoulé (Fig. 3-8b).

3.7 Comment expliquer la réaction aux crues des bassins versants ?

Les exemples de l'Allenbach et de la Saltina mettent en évidence l'importance de la capacité de stockage du bassin pour la formation des crues. L'interaction entre les différents types d'écoulements et les caractéristiques des précipitations jouent ici un rôle déterminant dans la formation des crues. L'effet d'autres facteurs tels que la fonte des neiges ou le gel est sensible dans le cas de la Suze. Le chapitre 4.1 décrit comment les modèles Pluie-Débit peuvent tenir compte de ces interactions.

3.8 Conclusions

- La nature du sol détermine la réaction des bassins aux fortes pluies. Alors que certains sols peuvent stocker toutes les précipitations, d'autres les laissent s'écouler.
- Ces différences sont dues à des processus d'infiltration différents. Le type de processus est déterminé par certaines caractéristiques du sol.
- Des connaissances sur les bassins sont nécessaires pour expliquer la façon dont les crues s'y forment.
- La nature du sol est la caractéristique déterminante pour la formation des crues. La végétation, la densité du réseau hydrographique, la géomorphologie, la géologie et la répartition des pluies dans l'espace et le temps jouent aussi un rôle non négligeable.
- Les écoulements provenant de l'ensemble d'un bassin versant dépendent de la proportion et de la position des zones réagissant de la même façon aux précipitations. Les modèles Pluie-Débit permettent d'évaluer les interactions entre ces différents facteurs (v. Chap. 4.1)

4 Evaluation des crues à l'aide de mesures de débits

4.1 Les modèles Pluie-Débit (MPD)

4.1.1 Evaluation des crues à l'aide de modèles Pluie-Débit (MPD)

a) Possibilités et limites des modèles Pluie-Débit (MPD)

Les modèles Pluie-Débit (MPD) décrivent une partie du cycle hydrologique par des équations. Ils permettent de calculer le débit du cours d'eau qui draine un bassin versant, partant de données météorologiques et de paramètres le caractérisant. Depuis l'apparition de puissants ordinateurs, une quantité de modèles de ce type ont été créés dans différents buts. Une partie d'entre eux a été conçue spécialement pour simuler le débit des crues. Nous présentons ici quelques réflexions sur les possibilités offertes par ces modèles ainsi que sur leurs limites. Plusieurs aspects du problème de la formation des écoulements lors de fortes pluies sont encore l'objet de recherches. Certains sont malaisément saisissables, la complexité de la nature ne pouvant que difficilement être mise en équations avec un nombre acceptable de paramètres. On montre un peu plus en détail sous b) et c) comment la connaissance des processus de formation des écoulements d'un bassin peut améliorer les résultats fournis par un modèle. L'évaluation de la précipitation efficace est au coeur de tous les MPD. On a donné, dans le chapitre 3, un aperçu des différents processus d'écoulements. L'infil-

tration et la capacité de stockage présentent des différences importantes dans les sols naturels. Les mécanismes qui commandent ces phénomènes sont complexes et liés les uns aux autres. Actuellement, aucun modèle n'est en mesure d'en rendre compte en faisant intervenir uniquement des paramètres définissables sur le terrain.

Par ailleurs, les modèles existants présentent de grandes différences entre eux. Le modèle idéal devrait être en mesure de décrire physiquement les phénomènes se déroulant dans les sous-bassins et l'ensemble du bassin, à toutes les échelles (Fig. 4-1). Un tel modèle n'aurait pas besoin d'être calé étant donné que ses paramètres auraient été déterminés sur le terrain et il livrerait des résultats fiables même pour les pluies extrêmes. Il existe actuellement des modèles qui décrivent de façon convenable les processus déterminants pour de petites surfaces. Mais même les modèles les plus élaborés nécessitent de telles simplifications que l'on ne peut pratiquement plus parler d'une base physique. On devrait les appeler modèles conceptuels. Lorsque le concept de base décrit de façon satisfaisante les principaux processus se déroulant dans le bassin, on obtient des résultats valables. Les modèles black-box, très utilisés, constituent une simplification dans laquelle un signal d'entrée (précipitations) est transformé en un signal de sortie (débits) à l'aide d'une fonction, sans tenir compte des phénomènes à la base de cette transformation.

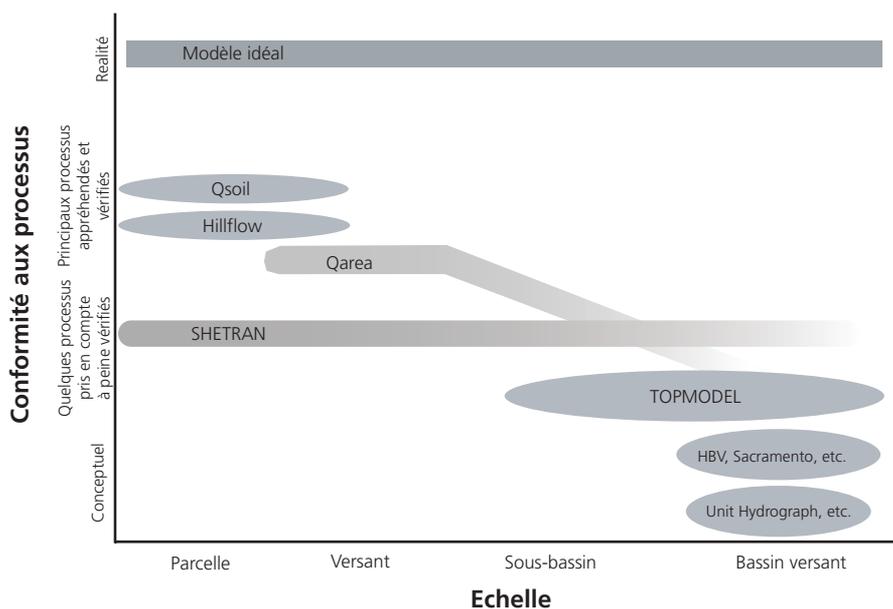


Fig. 4-1 : Prise en compte des processus déterminant les écoulements à différentes échelles pour quelques modèles Pluie-Débit.

Les modèles conceptuels ou black-box sont adaptés au bassin étudié à l'aide de paramètres, par une opération qui s'appelle le calage. Elle consiste à modifier systématiquement les paramètres jusqu'à ce que les débits calculés se rapprochent le plus possible des valeurs mesurées. Le dilemme apparaît clairement : pour utiliser ces modèles, on doit pouvoir disposer de mesures de précipitations et de débits. S'il n'existe pas de mesures de débits, le modèle ne peut pas être calé. S'il y en a pour une période suffisamment longue, les crues d'une période de retour donnée peuvent être calculées plus simplement par analyse statistique. C'est pour cette raison que ce type de modèle n'est utilisé qu'exceptionnellement ou comme outil de recherche lorsque, par exemple, on veut connaître l'hydrogramme de la crue, en plus du débit de pointe, (projets de bassins de rétention, superposition des

crues de différents sous-bassins, etc.) ou lorsque le déroulement de la crue doit être décrit. Ces modèles sont aussi utilisés quand il s'agit de prolonger des séries de mesures des débits trop courtes à l'aide de simulations. Le modèle est alors calé à l'aide de courtes périodes de mesures simultanées de précipitations et de débits. Une série de valeurs de débits peut ensuite être générée à l'aide d'une longue série de mesures de précipitations. Les valeurs extrêmes sont alors analysées statistiquement.

Les modèles conceptuels et black box fournissent, s'ils sont utilisés à bon escient, des résultats satisfaisants pour des événements survenus au cours de la période utilisée pour le calage. Par contre, leur comportement dans le domaine de l'extrapolation est difficilement prévisible en raison de plusieurs facteurs. Lors du calage de ces modèles, de nombreux paramètres n'ayant

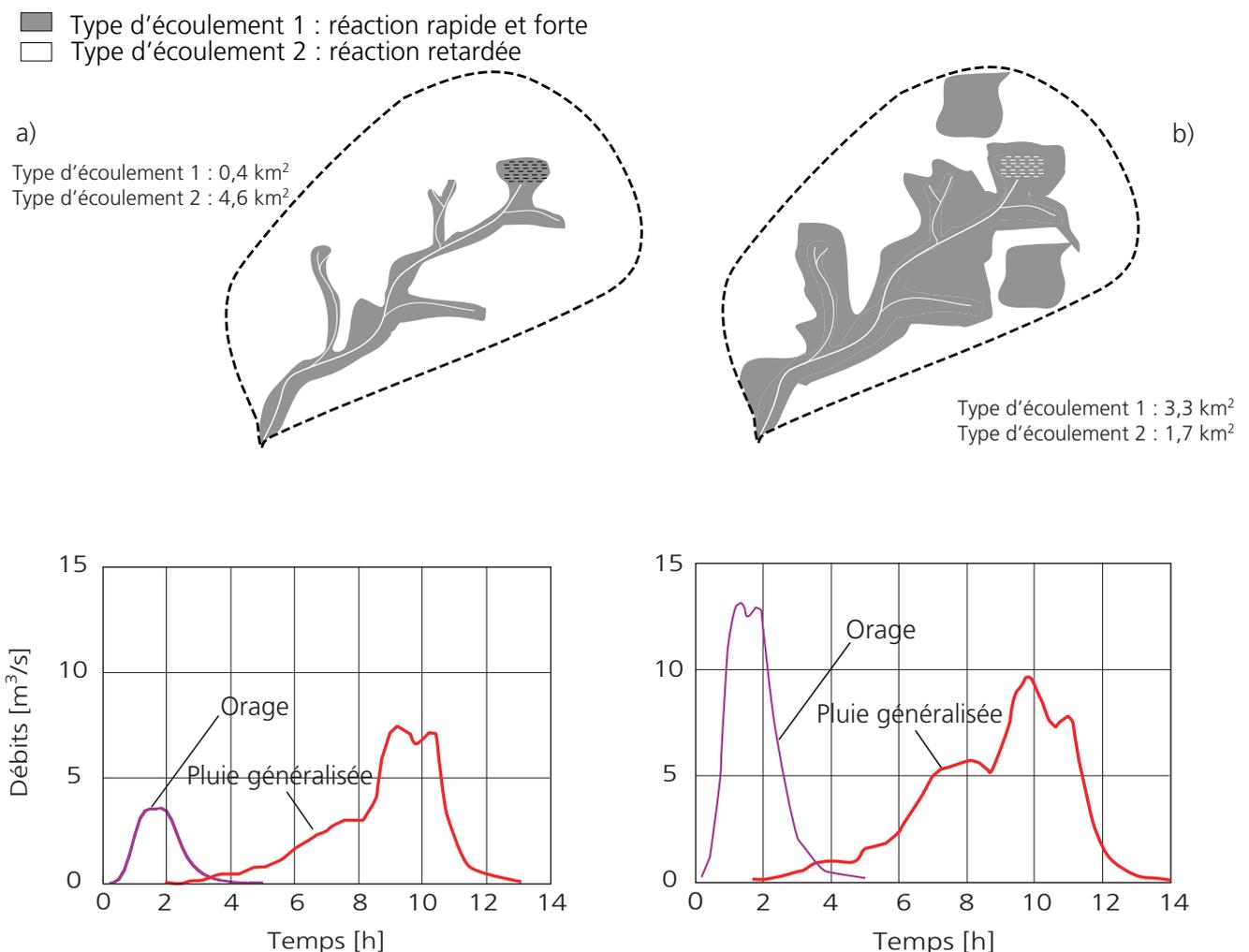


Fig. 4-2 : En haut : Deux bassins versants de 5 km² avec des proportions différentes de surfaces réagissant rapidement aux précipitations (respectivement 8% et 66%). En bas : Réaction des deux bassins à un orage (en violet) et à une pluie généralisée (en rouge).

aucune réalité physique doivent être déterminés, et donc ne correspondent pas à des caractéristiques du bassin. Souvent, différentes combinaisons de paramètres fournissent des résultats semblables, si bien que le modèle ne s'applique pas au bassin de façon univoque. Comme on essaye d'ajuster le mieux possible les valeurs de débits calculées à celles qui ont été mesurées, les erreurs sont compensées par le choix des paramètres, ce qui n'a que peu d'effet dans la cas de crues moyennes mais peut mener à des écarts importants pour les extrapolations. Plus les séries de mesures sont courtes, plus les interpolations sont hasardeuses. Pour que le calage soit plus stable, on peut tenir compte des processus d'écoulement dans le bassin. La manière de procéder est décrite plus bas.

b) Possibilités d'utilisation des MPD en tenant compte des processus d'écoulement

L'exemple suivant montre comment combiner un MPD avec des informations sur les processus de formation des écoulements pour résoudre des problèmes de crues. Il a été montré au chapitre 3.6 comment les bassins réagissent aux fortes pluies en fonction des caractéristiques des différentes zones qui les constituent. Quand on veut évaluer les crues, il est important de savoir si le bassin réagit plutôt aux orages qu'aux pluies plus soutenues. L'ordre de grandeur des débits de crue en dépend.

La figure 4.2 montre deux bassins de 5 km². Bien que leur surface soit égale, leur réaction aux pluies est très différente. Dans le bassin a), seul 1/10^{ème} de la surface réagit fortement, le reste ne participant que tardivement aux débits. Dans le cas b), environ 2/3 de la surface réagissent rapidement et le tiers restant avec retardement. La réaction des ces deux bassins à un orage (60 mm d'eau en 1 heure) et à un épisode pluvieux de longue durée (100 mm en 10 heures) est illustrée par la figure 4-2.

Dans le cas b), la réaction est nettement plus forte après un orage que dans le cas a) où les débits n'augmentent presque pas. Par contre, dans a) ils augmentent fortement après des pluies soutenues, lorsque les surfaces réagissant avec retard interviennent.

Si des informations sur les caractéristiques des sous-bassins sont disponibles, un MPD approprié permet de prévoir quel type de précipitations est déterminant pour la formation de fortes crues et de mieux évaluer les crues rares.

c) Utilisation d'un MPD pour l'évaluation des crues dans un bassin du Jura bâlois

Introduction

Un MPD, combiné avec des informations sur les processus de formation des écoulements, a été utilisé pour le bassin du Eibach (27 km²), qui se trouve dans la région bâloise, à cheval sur le Jura tabulaire et le Jura plissé.

Des inondations affectent régulièrement la vallée de l'Ei. Chaque fois, les mêmes questions se posent : avec quelle fréquence ces crues vont-elles se reproduire ? Jusqu'à quel point la capacité du cours est-elle suffisante pour garantir la sécurité ? Pour le calcul statistique, seule une courte série de mesures des débits de 25 ans était à disposition. Le Service des ponts et chaussées de Bâle-Campagne a par conséquent décidé de faire faire une étude hydrologique détaillée sur les crues rares de ce bassin.

Démarche

Pour ce type d'étude, les étapes suivantes doivent être franchies :

- Récolte d'informations sur les processus de formation des écoulements.
- Etude de la répartition spatiale de ces processus
- Mise sur pied d'un MPD (test de plausibilité du type de réaction).
- Calcul des débits selon plusieurs scénarios.

Si les premiers calculs donnent des résultats divergeant fortement des valeurs des débits mesurées, la répartition spatiale des zones du bassin est revue. De nouvelles études sur le terrain peuvent s'avérer nécessaires pour préciser quels processus sont actifs lors des crues.

Des cartes pédologiques détaillées sont très utiles pour la détermination des processus. Comme elles n'existent que rarement, il faudra recourir aux cartes géologiques et prévoir des sondages pour établir une carte de répartition des sols adaptée aux besoins. Celle-ci devra être axée essentiellement sur la perméabilité du sol (matrice, macroporosité) et son épaisseur (v. Chap. 3). Ces informations permettront de préciser les processus d'écoulement dominants dans les différentes parties du bassin.

La validité du MPD est contrôlée à l'aide des mesures de crues passées. Si les valeurs calculées et les valeurs mesurées concordent de façon satisfaisante, le modèle tient suffisamment bien compte des processus déterminants. Si les valeurs sont très différentes, l'étude des processus de formation des écoulements doit être reprise. Des recherches supplémentaires sur le terrain peuvent être nécessaires.

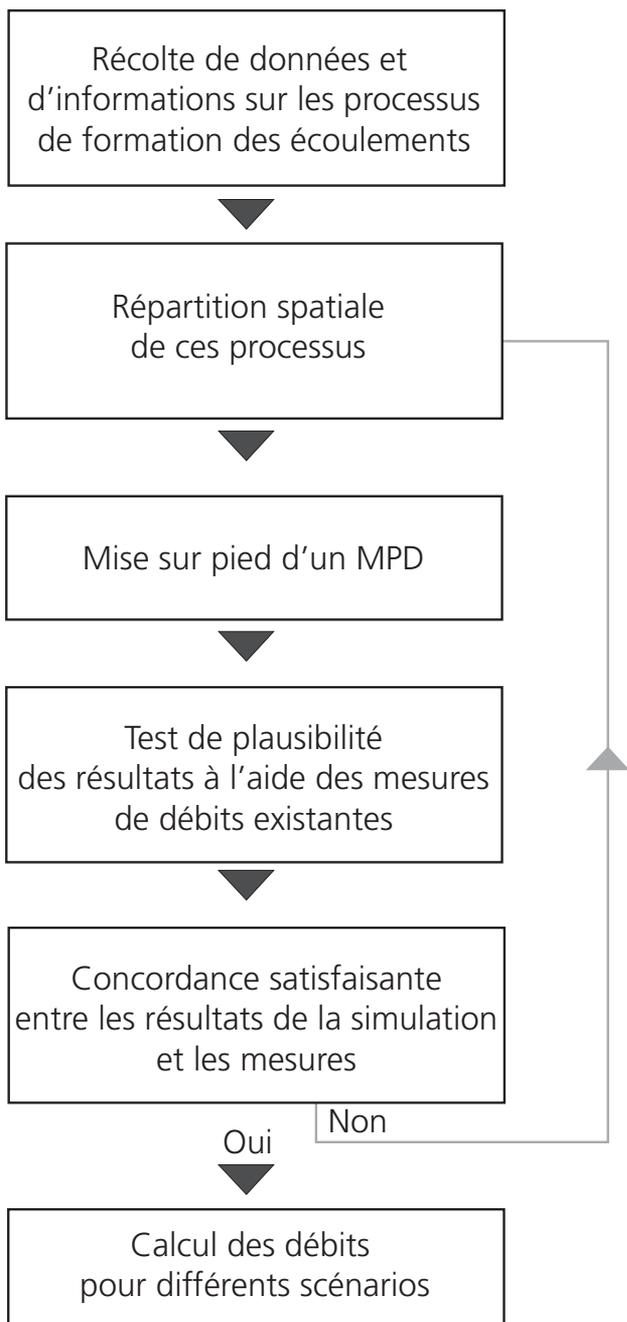


Fig. 4-3 : Manière de procéder pour utiliser un modèle d'évaluation des crues en tenant compte des processus de formation des écoulements.

Si le modèle rend bien compte de la crue étudiée, il doit encore être testé sur d'autres épisodes de hautes eaux (validation). Ensuite seulement il pourra être utilisé pour le calcul de la réaction du bassin aux pluies exceptionnelles.

Aptitude aux crues

Sols et géologie

La partie la plus méridionale du bassin de l'Eibach se trouve dans le Jura plissé où les pentes sont fortes, alors que le nord est situé dans le Jura tabulaire, formé de plateau cultivés (terres labourées) et de pentes boisées plus raides. Le Jura plissé, plus accidenté, est couvert de pâturages et de forêts. Le sous-sol du bassin est très varié : on y trouve des marnes à Opalinus, très peu perméables, et des calcaires bajociens du Hauptrogenstein très perméables. Les sols qui se sont développés sur ces formations ont des perméabilités et des capacités de rétention très variées. Il faut donc compter avec des différences appréciables dans la formation des écoulements, ce qui a une influence sur la formation des crues.

Sur la base des cartes pédologiques, géologiques, topographiques, des photos aériennes et des profils de sondages disponibles, une image générale des sols du bassin a pu être dégagée. Sur les plateaux de calcaires karstiques, des sols bruns sablo-argileux très perméables et des rendzines se sont développées. Sur les versants, où des éboulis se sont accumulés, les sols sont aussi très perméables. Le bassin de l'Eibach se caractérise donc par des sols très perméables et une bonne capacité de rétention. Quelques zones de sols moins perméables, mouillés à saturés, se sont développées sur des substrats limoneux ou argileux (marnes à Opalinus, moraines du Riss, etc.).

Processus et types d'écoulements

Aux endroits où les sols et les roches sont très perméables, les conditions pour l'infiltration et le stockage de l'eau sont bonnes. Une infiltration profonde (DP) s'y produit. Les zones de sols moins perméables (par ex. au SE de Wenslingen, moraines rissiennes ; W et E de Zeglingen) produisent rapidement des écoulements de surface lors de fortes pluies, l'infiltration y étant difficile. Sur les sols perméables des plateaux, où la pluie n'est pas absorbée par le sous-sol et dans les pentes à sol argileux, les écoulements sont retardés à fortement retardés, les sols ne se saturant que lentement. Il se produit rarement des écoulements souterrains abondants, étant donné que les sols très perméables reposant sur des couches peu perméables sont assez rares. Les versants escarpés des plateaux, souvent recouverts d'une épaisse couche d'éboulis,

permettent une percolation en profondeur. Des écoulements fortement retardés sont observés dans ces régions boisées.

Structure du modèle

Le modèle intègre les caractéristiques relevées sur le terrain. Il sert à vérifier la validité des généralisations faites au sujet des écoulements et constitue un outil pour les extrapolations. Il n'est utilisable pour étudier les événements rares que lorsqu'il rend compte correctement des débits de crue du passé.

Le modèle utilisé (QArea) a été développé à l'ETH de Zurich (Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft). Sa structure est présentée dans la figure 4-5 et ses éléments dans la figure 4-6. QArea tient compte de la répartition spatiale des précipitations (un maillage

permet de situer les cellules de pluie) et des différents types d'écoulements dans le bassin ainsi que des isochrones (temps de propagation dans les chenaux et sur la surface). Les courbes de réaction décrivent la part des précipitations s'écoulant pour chacun des types de réactions de la figure 4-4.

La figure 4-4 montre les zones réagissant de la même façon aux pluies. Environ 14% du bassin permet des écoulements rapides ou légèrement retardés (types d'écoulement 1 et 2), environ 1/3 des écoulements retardés (type d'écoulement 3) et plus de 50% des écoulements fortement à très fortement retardés (types d'écoulement 4 et 5).

Lors de précipitations abondantes et de courte durée, seules les surfaces des types 1 à 3 contribuent aux écoulements. Si les précipitations se prolongent, des

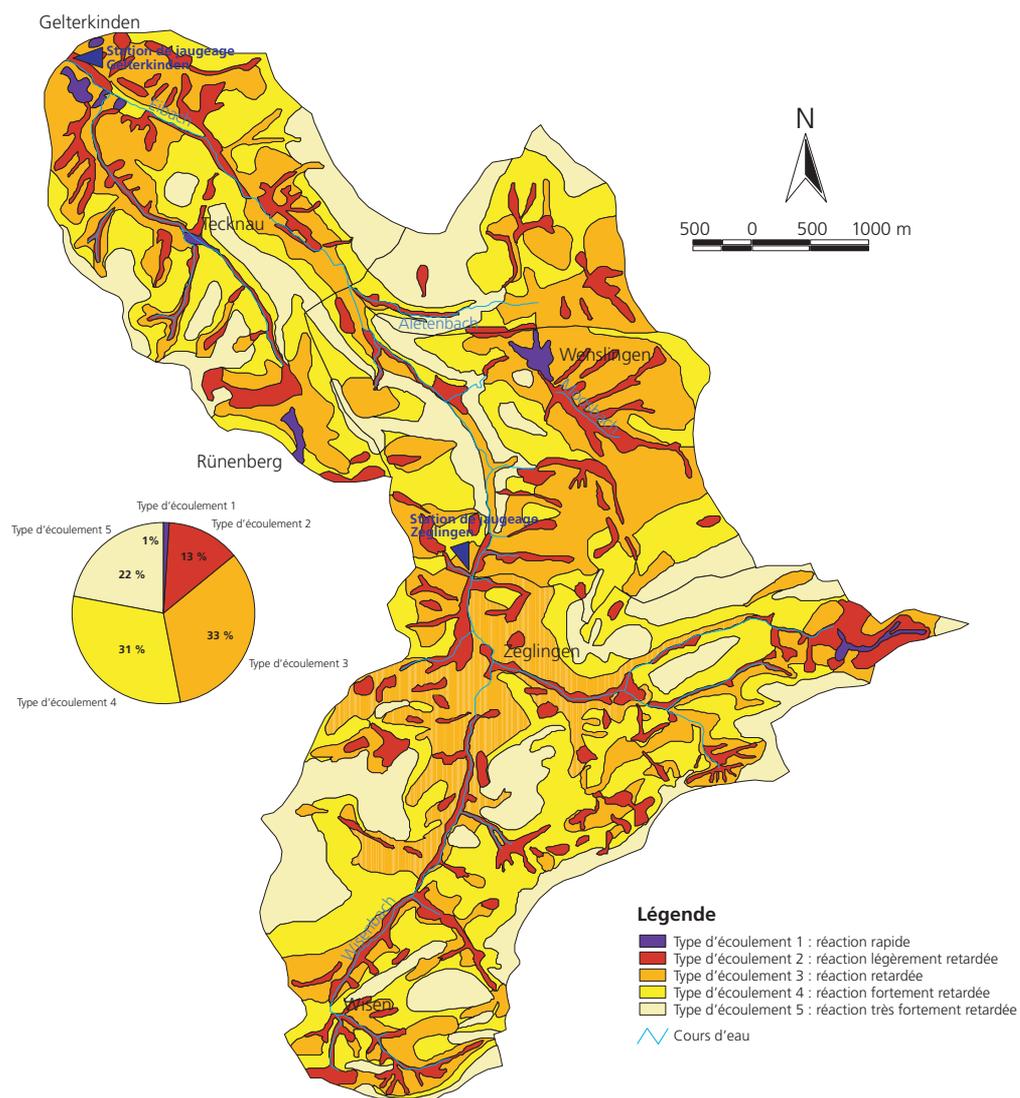


Fig. 4-4 : Le bassin versant de l'Eibach (BL) : les différents types d'écoulements décrivent la réaction à prévoir dans les différentes zones du bassin.

écoulements du type 4 apparaissent. Les surfaces du type 5 ne contribuent que peu aux écoulements, même si les pluies sont de très longue durée. Les zones des types 1 et 2 sont réparties dans tout le bassin.

Structure du modèle

Le modèle intègre les caractéristiques relevées sur le terrain. Il sert à vérifier la validité des généralisations faites au sujet des écoulements et constitue un outil pour les extrapolations. Il n'est utilisable pour étudier les événements rares que lorsqu'il rend compte correctement des débits de crue du passé.

Le modèle utilisé (QArea) a été développé à l'ETH de Zurich (Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft). Sa structure est présentée dans la figure 4-5 et ses éléments dans la figure 4-6. QArea tient compte de la répartition spatiale des précipitations (un maillage

permet de situer les cellules de pluie) et des différents types d'écoulements dans le bassin ainsi que des isochrones (temps de propagation dans les chenaux et sur la surface). Les courbes de réaction décrivent la part des précipitations s'écoulant pour chacun des types de réactions de la figure 4-4.

On distingue dans ce modèle les précipitations provoquant un écoulement direct et les précipitations s'infiltrant dans le sol. La pluie s'infiltrant est stockée et ne s'écoule en surface qu'avec un certain retard. La réaction de ces différentes zones du bassin est modélisée en série, les caractéristiques de chacun des types d'écoulements est ainsi prise en compte. L'écoulement direct est freiné dans le lit du cours d'eau par rétention (réservoir de surface), qui est simulée comme un réservoir linéaire.

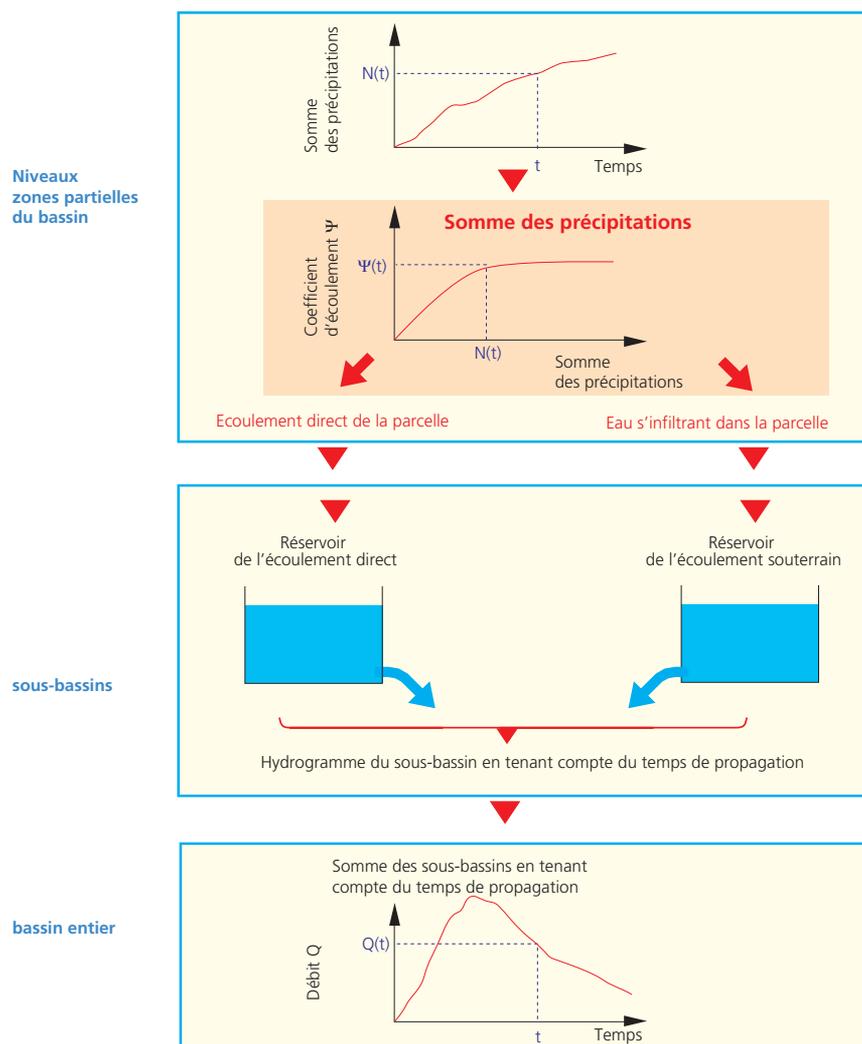


Fig. 4-5 : Structure du modèle QArea.

Calcul de l'écoulement

Plausibilité du modèle

Le contrôle de la plausibilité a été fait sur deux crues (Fig. 4-7) : celle du 19 mai 1994 (82 mm de pluie en 20 heures) et celle du 6 août 2000 (orage de 2 heures, 60 mm de pluie). La figure 4-7 montre que le modèle rend aussi bien compte de la pointe de crue que du volume d'eau écoulé.

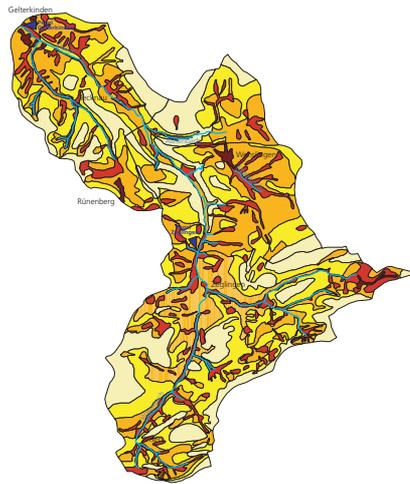
Fig. 4-6 : Bases du modèle QArea. a) La carte des types d'écoulements donne la répartition spatiale de la

réaction des différents bassins versants. b) Isochrones, en considérant les temps d'écoulements dans le chenal et sur la surface de la parcelle, en minutes. Le quadrillage c) permet de placer les cellules de pluie dans les différents bassins. d) Les courbes de réaction du débit décrivent la proportion de pluie qui s'écoule selon la quantité précipitée.

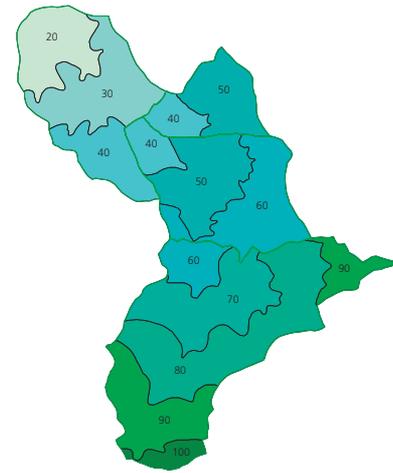
Calcul du débit

On a étudié à l'aide de ce modèle la façon dont le bassin réagit à des pluies rares et abondantes. On a

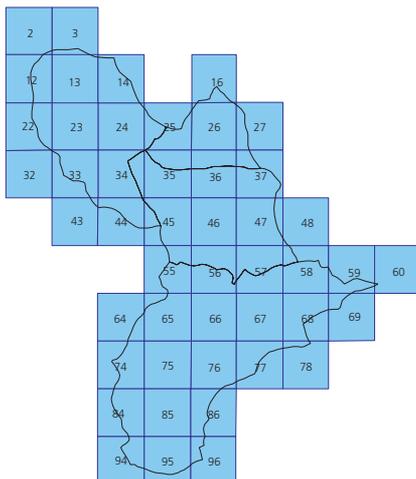
(a) Types d'écoulements



(b) Isochrones



(c) Entrées : précipitations différenciées spatialement



(d) Ecoulements

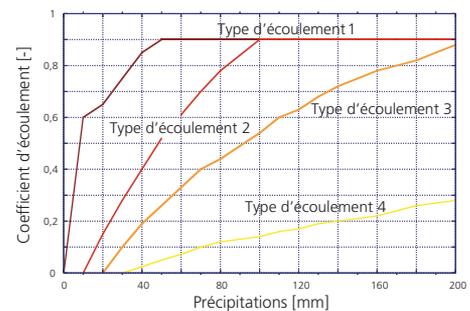


Fig. 4-6 : Bases du modèle QArea. a) La carte des types d'écoulements donne la répartition spatiale de la réaction des différents bassins versants. b) Isochrones en minutes, en considérant les temps d'écoulements dans le chenal et sur la surface de la parcelle. Le quadrillage c) permet de placer les cellules de pluie dans les différents bassins. d) Les courbes de réaction du débit décrivent la proportion de pluie qui s'écoule selon la quantité précipitée.

essayé de savoir si les crues les plus fortes étaient provoquées par des orages ou des épisodes pluvieux prolongés. Un orage dure peu de temps et n'atteint pas toute la surface du bassin de 27 km² en même temps. Comme le modèle tient compte de la formation des écoulements par zones, la réaction de l'ensemble du bassin peut être étudiée pour des foyers orageux situés à différents endroits. Malgré la surface assez grande du bassin, de forts orages locaux peuvent être à l'origine de crues nettement plus importantes que

peuvent être obtenus si l'on tient compte de la réaction des sols aux fortes pluies, et donc des processus déterminant les écoulements. Les MPD peuvent ainsi être nettement améliorés. Ainsi il est possible de mieux estimer qu'avec un MPD classique, la façon dont le bassin réagit aux pluies extrêmes et quel est le type de pluie (de courte durée, intense, prolongée) qui est déterminant pour la formation des écoulements.

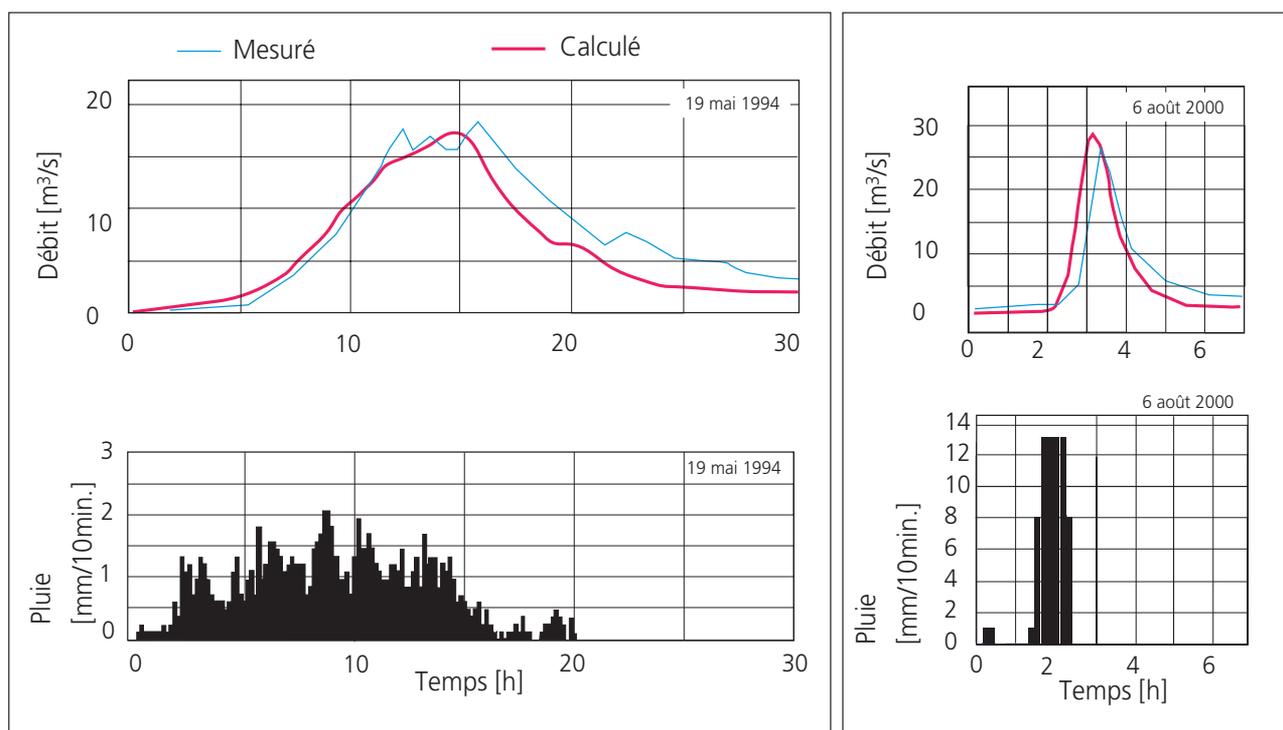


Fig. 4-7 : Plausibilité du MPD à l'aide de deux crues de l'Eibach.

des pluies de longue durée affectant toute sa surface, à condition que ces orages s'abattent sur les zones les moins perméables, propices à la formation d'écoulements (par ex. la zone comprise entre Wenslingen et Zeglingen). Des recherches sur les crues historiques des 100 dernières années ont confirmé ce fait. Les plus grandes crues connues (1917, 1985, 2000) ont été causées par des orages. Des pluies de longue durée (par ex. mai ou février 1999), combinées avec la fonte de la neige, n'ont pas provoqué des pointes aussi fortes. Le modèle a permis d'estimer les crues très rares : HQ100 doit être de l'ordre de 35 m³/s.

d) Conclusions

Les modèles Pluie-Débit sont en général calés par ajustement de leurs paramètres, puis utilisés pour l'extrapolation des débits de crues. Des résultats plus stables

4.1.2 Estimation des crues extraordinaires par combinaison d'une approche stochastique et d'un modèle de transformation Pluie-Débit

L'approche présentée ci-dessous a été mise au point par l'HYDRAM (Laboratoire Hydrologie et Aménagements de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL) pour étudier les crues rares (temps de retour de l'ordre de 100 ans). Elle peut être aussi appliquée à l'étude des crues extraordinaires (temps de retour supérieurs à 100 ans, v. chapitre 4.3.). La méthodologie présentée au chapitre 4.1.2.3 ci-dessous a été mise au point pour l'étude des crues du bassin supérieur du Rhône dans le cadre du projet CONSECRU (CONSUEGRA et al. 1998). Cette étude commanditée par le Conseil d'Etat du canton du Valais avait pour but de

prévenir et d'évaluer les conséquences des crues extraordinaires dans le Rhône. Elle a été réalisée suite aux inondations catastrophiques de septembre 1993 dans le Haut-Valais et à Brigue en particulier. L'approche multi-événementielle développée par l'HYDRAM est une approche mixte : elle utilise un générateur stochastique de séries chronologiques de précipitations et un modèle de transformation Pluie-Débit événementiel. Elle est voisine de l'approche basée sur l'utilisation exclusive de la technique dite de simulation continue exposée ci-dessous.

a) Génération stochastique de séries pluviométriques et simulation continue

Principe

L'idée de cette méthode est d'étudier les crues rares et extraordinaires en simulant la réponse du bassin d'intérêt à un maximum de configurations pluviométriques et hydrologiques possibles. Pour ce faire, un modèle de génération stochastique de séries temporelles de précipitations est couplé à un modèle de transformation Pluie-Débit approprié au contexte du bassin. Le modèle Pluie-Débit est utilisé en simulation continue pour dériver à partir d'une série chronologique de pluies produite par le générateur stochastique de pluies une série chronologique de débits à l'exutoire du bassin. Différents générateurs de pluies permettent en effet de générer des séries chronologiques de pluies dont les caractéristiques statistiques sont identiques à celles de séries de pluies observées (probabilité de temps sec, variance ou valeurs extrêmes des hauteurs de pluie sur un ou plusieurs pas de temps donné). Le générateur stochastique des pluies permet de créer autant de scénarios pluviométriques plausibles pour le contexte climatique actuel que désirés : on peut donc générer des pluies de formes et d'intensités différentes, des durées inter-événements plus ou moins longues, des successions rapprochées d'événements pluviométriques peu fréquents conduisant à des situations hydrologiques exceptionnelles.

Parallèlement, les modèles de simulation continue sont censés permettre le suivi de l'état de saturation du bassin versant et par suite l'évolution dans le temps de la capacité d'infiltration du compartiment souterrain du bassin versant. Ils nécessitent un module qui permette de simuler la composante souterraine des écoulements contrairement aux modèles événementiels qui peuvent se contenter de représenter les écoulements superficiels rapides. Le modèle de simulation continue permet donc de reproduire de façon artificielle un grand nombre d'événements hydrologiques plausibles déterminés par les sollicitations pluviométriques elles-

mêmes et par la façon dont réagit le bassin ensuite : on reproduit par exemple, sur la durée de la simulation, différentes situations initiales possibles de saturation du bassin. De même on peut produire différentes configurations de crues et de sur-crues dans le cas de pluies très rapprochées.

Périodes de retour, hydrogrammes de projet, crues extraordinaires

Le débit maximum correspondant à une période de retour T donnée (par exemple $T=100$ ans) peut être simplement estimé en appliquant une analyse fréquentielle classique à une série de débits préalablement simulée à partir d'une série de pluie générée (durée X) et à l'aide du modèle Pluie-Débit approprié. La représentativité de la période de retour à affecter aux événements générés par une telle méthode ou aux débits maximaux annuels correspondants est cependant problématique. Il suffit en effet de générer une autre série chronologique de précipitations de même durée ainsi que la série de débits correspondante pour obtenir d'autres valeurs maximales annuelles et par suite une autre estimation du débit centennal. C'est ce que l'on observe sur le diagramme de Gumbel ci-dessous (Fig. 4-8), représentant pour le Rhône à Brigue les quantiles des débits maximaux obtenus pour plusieurs séries de débits générées par simulation continue.

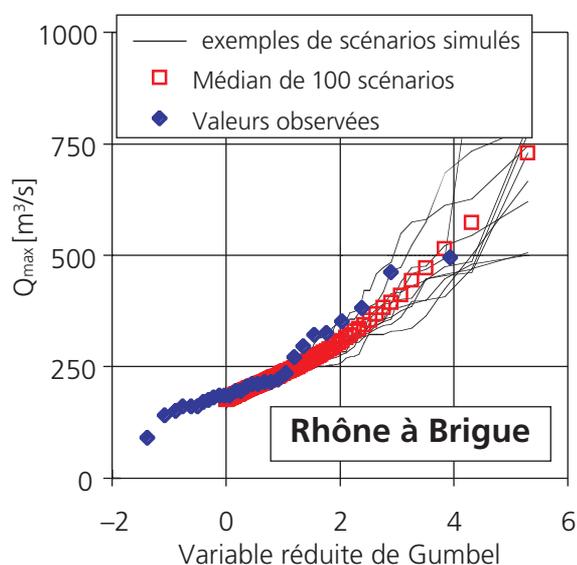


Fig. 4-8 : Comparaison des distributions statistiques des débits observés et simulés (tiré de CONSUEGRA et al. 1998).

Il est pour cette raison recommandé de générer N séries chronologiques de pluies avec le générateur stochastique de précipitations, qui permettront de pro-

duire à l'aide du modèle hydrologique N séries continues de débits. Par suite, N ajustements fréquentiels (par exemple ajustements de Gumbel) peuvent être réalisés sur les débits maximaux annuels et N estimations des quantiles de débits de pointe de période de retour T ($T \leq 100$ ans) peuvent être effectuées. Il est donc possible de fournir, en plus de la traditionnelle et unique valeur d'un quantile donné *un intervalle de variation plausible du quantile* (on peut prendre par exemple les bornes de l'intervalle comprenant 90% des valeurs de quantiles obtenues). Il est donc aussi possible, pour une période de retour donnée d'extraire des séries de débits générées par l'ensemble des événements dont les débits maximaux seront compris dans cet intervalle de vraisemblance. Ce *catalogue d'événements* permet ensuite, par exemple, d'effectuer une analyse de sensibilité sur les impacts des submersions, en fonction des différents volumes débordés. En produisant un large éventail d'hydrogrammes complets de crue, la méthodologie proposée permet de s'affranchir de l'embaras d'un choix *a priori* d'un débit et d'un hydrogramme de projet unique.

Autres avantages de la simulation continue

L'approche « simulation continue » procure d'autres avantages qui dépassent le cadre de l'étude des crues extraordinaires mais qui sont néanmoins à signaler :

- La simulation continue permet non seulement d'étudier les crues, mais elle permet aussi d'étudier les étiages, les régimes hydrologiques, tout comme les fréquences de défaillance des systèmes à étudier ou leurs fréquences de fonctionnement (HINGRAY et al. 2000, GUÉX et al. 2001).
- Le générateur stochastique de précipitations peut aussi être utilisé pour reproduire des séries de pluies dont les caractéristiques statistiques sont représentatives de celles prévues pour différents scénarios climatiques futurs potentiels. Les paramètres du générateur sont alors adaptés en conséquence. Cette approche a été suivie par l'HYDRAM dans le cadre du PNR31 pour le bassin versant de la Broye (Plateau suisse) (OVERNEY et al. 1997). L'impact d'une modification des précipitations sur le régime hydrologique de la Broye à Payerne (400 km²) et sur le régime hydraulique de son cours d'eau jusqu'à Morat (sur 13 km) a été évaluée sur la base des scénarios de changements climatiques de l'International Panel on Climate Change (scénarios IPCC A pour l'an 2100, BENISTON et al. 1992.) La recherche de crues extraordinaires plausibles pour des conditions climatiques futures est évidemment aussi tout à fait envisageable avec une telle approche.

b) Génération stochastique de séries pluviométriques et simulation événementielle ou approche stochastique multi-événementielle

En milieu de montagne, les apports glaciaires ainsi que les apports dus à la fonte de neige peuvent fortement conditionner la réponse hydrologique des bassins versants. Or, la modélisation de l'évolution temporelle de ces apports, en particulier sur une année complète, est souvent source de difficulté. Bien que le modèle Pluie-Débit disponible pour le contexte du bassin supérieur du Rhône puisse fonctionner en simulation continue, il a été jugé plus judicieux pour cette raison de l'utiliser en mode événementiel. Les inconvénients de l'approche événementielle, liés en majeure partie à la méconnaissance de l'état hydrique initial du bassin, ont été évoqués plus haut. Une approche stochastique a donc été mise en place pour choisir dans des distributions de probabilité appropriées les valeurs de certaines variables nécessaires à la caractérisation de cet état initial qui permettra par la suite d'initialiser le modèle hydrologique. La méthodologie développée est ainsi mixte : dans un premier temps, on utilise le modèle de *génération stochastique de précipitations* qui permet d'obtenir autant de séries chronologiques de pluies que désiré (séries continues). De chacune de ces séries sont extraits, sur la base d'un critère de sélection donné (la lame d'eau de l'événement a été utilisée à cet effet dans cette étude), les événements pluviométriques critiques, i.e., susceptibles de produire des crues importantes. *Pour chacun des événements pluviométriques critiques ainsi sélectionnés, le modèle hydrologique, initialisé pour une configuration initiale plausible du bassin versant et générée de façon stochastique, est finalement utilisé pour produire un scénario de crue correspondant.* On obtient donc pour chaque série chronologique de précipitations une série de scénarios de crues à partir de laquelle il est possible d'effectuer les analyses statistiques usuelles. Des diverses séries de scénarios, on peut enfin extraire les scénarios de crues les plus pénalisants pour le système à étudier, qui pourront être considérés comme des scénarios de crue extraordinaire.

c) Application de la méthodologie au bassin supérieur du Rhône

La méthodologie multi-événementielle évoquée ci-dessus a été utilisée pour le bassin supérieur du Rhône. Elle peut être synthétisée comme suit :

- Construction d'un modèle de transformation Pluie-Débit utilisé pour simuler en mode événementiel et à pas de temps horaire les débits à l'exutoire du bassin d'intérêt.
- Calage du modèle Pluie-Débit sur les événements majeurs observés pour lesquels on dispose de séries

- concomitantes de précipitations et de débits.
- Construction d'un schéma d'abattement spatial des précipitations sur la base des situations pluviométriques critiques pour la région étudiée.
- Construction et calage du modèle de génération temporelle des précipitations sur la base des séries temporelles de précipitations locales observées.
- Génération de 100 séries chronologiques de précipitations d'une durée de 120 ans chacune.
- Production des scénarios de crues correspondants.
- Création d'un catalogue de crues à partir desquelles il est ensuite possible d'effectuer différents traitements statistiques appropriés.

Les aspects spécifiques à ces différentes étapes et les résultats de l'étude sont reproduits de façon synthétique ci-dessous. Ils sont présentés plus en détail dans CONSUEGRA et al. 1998.

Construction et calage du modèle Pluie-Débit

La recherche d'un outil hydrologique adapté aux conditions alpines a conduit au développement d'un modèle baptisé SOCONT (BÉROD 1995). Il s'agit d'un modèle avec un *réservoir linéaire pour la fonction de production* et un *réservoir non linéaire* inspiré des ondes cinématiques pour la fonction de transfert. Le périmètre d'étude couvrant une surface d'environ 3750 km² (Le Rhône à Branson), la modélisation hydrologique n'est envisageable que sur la base d'un découpage en sous-bassins relativement grossier avec des unités de l'ordre de 50 km².

La calibration des paramètres de production et de transfert du modèle SOCONT a été effectuée à l'exu-

toire des principaux affluents contribuant aux crues extraordinaires du Rhône, à savoir le Rhône à Brigue et la Viège à Viège. La calibration n'a pu être effectuée que sur les hydrogrammes observés pendant les événements majeurs d'août 1987 et de septembre 1993. En effet, les aménagements hydro-électriques, construits dans les années 50, ont passablement modifié le régime hydrologique des bassins versants de la région. Or, c'est uniquement pour les événements majeurs d'août 1987 et de septembre 1993 que l'on retrouve un historique détaillé des dérivations et des apports des barrages (BIEDERMANN et al. 1996).

Le générateur stochastique de pluie

Au vu de l'étendue du bassin supérieur du Rhône, la description de la variabilité spatiale des précipitations est nécessaire. Un champ de précipitation particulier a été identifié comme étant particulièrement critique pour la génération des crues importantes comme celles observées en août 1987 et en septembre 1993 : ces dernières sont le résultat de fronts pluvieux débordant du Sud des Alpes, accompagnés de précipitations intenses sur des durées de un à plusieurs jours. Pour des épisodes de ce type, les pluies se concentrent principalement sur les bassins de la rive gauche du Rhône, en particulier sur celui de la Viège. Les précipitations maximales sont localisées autour de l'axe *Binn-Simplon*. Le schéma d'abattement spatial identifié par l'Institut de Géographie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich (GIETHZ) et représentatif des situations «*Binn-Simplon*» a été utilisé par la suite pour tous les événements pluvieux générés.

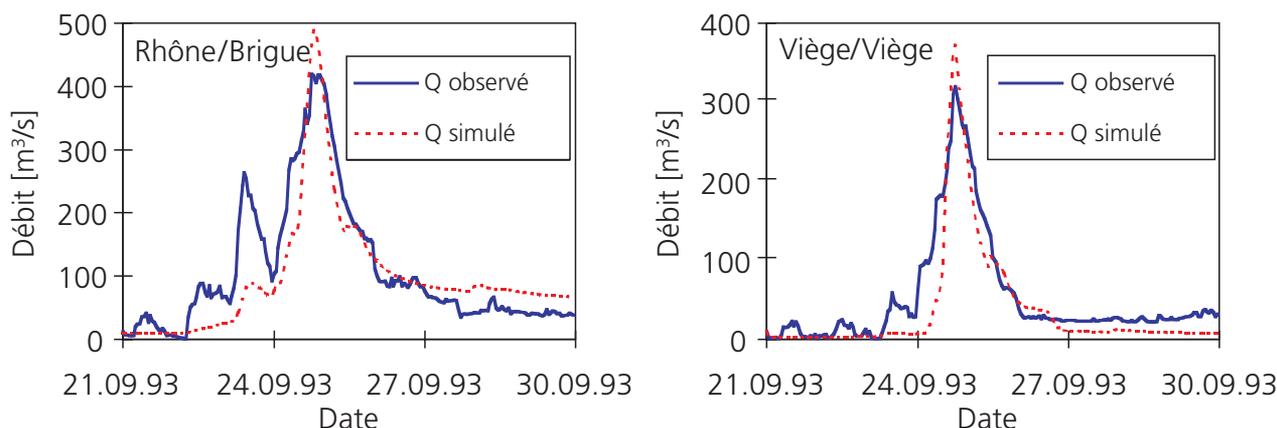


Fig. 4-9 : Hydrogrammes observés et simulés pour le Rhône à Brigue et pour la Viège à Viège. La comparaison se fait sur les hydrogrammes sans composante glaciaire (tiré de CONSUEGRA et al. 1998).

Pour générer les séries temporelles de pluies à la station du Simplon, l'HYDRAM a utilisé le *modèle à pulsations rectangulaires de Neyman-Scott*, dit «NSRPM» (Neyman-Scott Rectangular Pulses Model) (COWPERT-WAIT 1991 et FAVRE, CONSUEGRA, OVERNEY 1997). Le modèle NSRPM est calé de façon à reproduire les moyennes, les variances et les autocorrélations du processus pluviométrique et ceci à différents pas de temps. Le modèle NSRPM s'appuie sur une représentation conceptuelle de la pluie en averses séparées par des intervalles secs. Une averse est constituée de plusieurs cellules rectangulaires définies par une origine temporelle, une durée et une intensité. Les 5 paramètres du modèle, qui s'expriment analytiquement à partir des moments de premier et second ordre et des autocorrélations entre deux pas de temps successifs, sont les suivants: le taux moyen d'occurrence des averses λ , l'intensité moyenne m_x , la durée moyenne η des cellules, la position moyenne β des cellules et le nombre moyen de cellules μ . Il s'agit des espérances mathématiques des variables L, X, E, B et C respectivement. Ces 5 variables, qui suivent des distributions exponentielles, géométriques ou poissonniennes, sont générées aléatoirement et de manière indépendante. Pour éviter les écueils inhérents à l'échantillonnage de type Monte-Carlo, 100 séries de précipitations à pas de temps horaire (de 120 ans chacune) ont été générées avec le modèle NSRPM. Les hyétogrammes de projet extraits de ces séries ont ensuite été abattus spatialement avec le schéma du GIETHZ pour déterminer les lames d'eau représentatives des précipitations tombées sur un bassin donné. Pour distinguer les pluies liquides des pluies solides, on attribue à chaque

épisode pluvieux, un isotherme (ou limite des chutes de neige) tiré aléatoirement d'une distribution empirique dérivée des observations pendant les mois d'août et de septembre.

Production des scénarios de crue – Initialisation du modèle hydrologique

Le modèle de transformation Pluie-Débit est utilisé en mode événementiel de façon à générer un scénario de crue pour chaque événement pluviométrique intéressant, extrait des séries chronologiques de pluies générées dans l'étape précédente. Pour initialiser le modèle hydrologique (initialisation du taux de remplissage du réservoir sol), on associe de manière aléatoire un débit de base initial à chaque hyétogramme généré. Tout comme pour les isothermes, cette attribution se fait selon une distribution empirique déduite des observations pendant la période qui nous occupe. Une approche équivalente est adoptée pour les apports d'origine glaciaire. A l'hydrogramme de crue produit par le modèle hydrologique, on ajoute une valeur aléatoire tirée d'une distribution empirique dérivée des enregistrements du glacier de la Massa à Blatten. L'apport glacier est bien évidemment modulé en fonction du taux de glaciation de chaque sous-bassin versant. L'ensemble de la démarche suivie pour produire les scénarios de crue est synthétisé sur la figure 4-11.

Résultats des générations stochastiques

La méthodologie proposée a été validée sur la base de ses aptitudes à reproduire les statistiques des débits maximaux observés. Les figures 4-8 et 4-12 comparent les statistiques observées et simulées pour le Rhône à Brigue et la Viège à Viège. Les distributions statistiques des maxima observés sont fidèlement reproduites. Il en va de même pour les autres bassins versants testés (Rhône à Reckingen, Sion et Branson).

- L: Temps entre origines
- B: Position de la cellule
- E: Durée de la cellule
- C: Nombre de cellules
- X: Intensité de la cellule

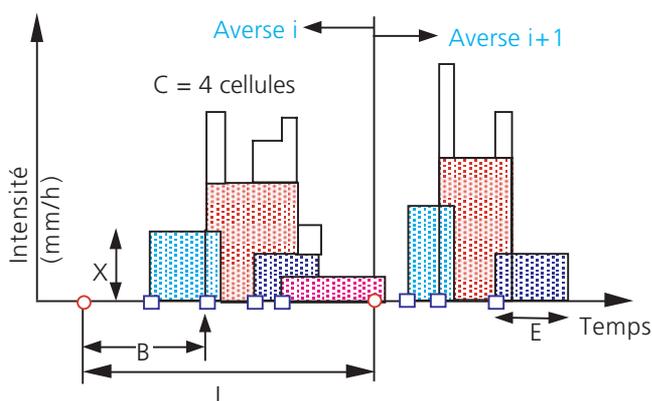


Fig. 4-10 : Représentation du processus pluviométrique par NSRPM (FAVRE et al. 1997).

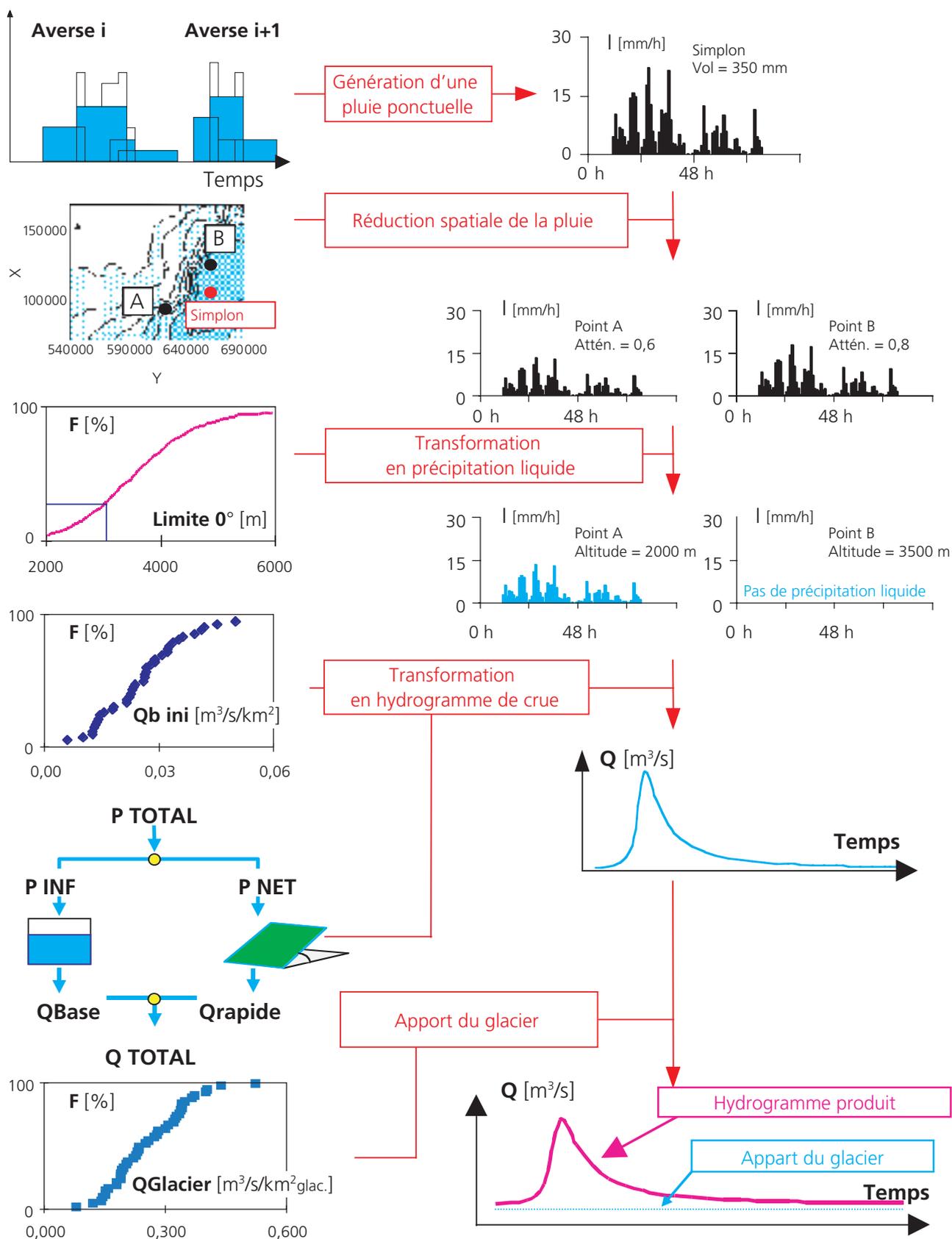


Fig. 4-11 : Démarche adoptée pour la production de scénarios de crue.

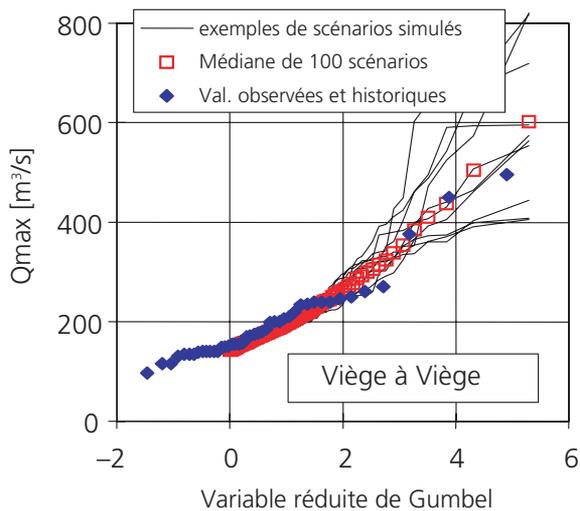


Fig. 4-12: Comparaison des distributions statistiques des débits observés et simulés (tiré de CONSUEGRA et al. 1998).

A partir des 100 séries de débit maximal générées, pour la Viège à Viège dans des conditions naturelles, la médiane des 100 valeurs de débit centennal est d'environ 500 m³/s alors que les quantiles 10 % et 90 % sont de l'ordre de 400 m³/s et 600 m³/s respectivement. Ainsi, pour établir une carte d'inondation dans les environs de Viège, on peut sélectionner parmi les hydrogrammes générés, ceux dont le débit affiche un temps de retour proche de 100 ans (c'est-à-dire entre 400 et 600 m³/s).

L'aptitude de la méthodologie à produire des courbes «volumes - débits seuils» consistantes a également été vérifiée. Ces courbes sont obtenues en intégrant le volume de l'hydrogramme au-dessus d'un débit-seuil continuellement atteint ou dépassé (Fig. 4-13). Ces courbes peuvent être construites pour des hydrogrammes présentant des propriétés spécifiques, comme par exemple un débit maximal centennal. On peut en déduire un volume de débordement au droit de sections de cours d'eau dont la capacité maximale d'écoulement est assimilable à un débit-seuil (situation A). Il peut également s'agir de volumes de rétention d'un barrage nécessaires pour réduire les crues à des valeurs admissibles en aval. En plus du stockage des crues extrêmes, ce barrage aurait pour fonction de maintenir une valeur de débit constante à l'aval du barrage (débit turbiné par exemple) (situation B). Le débit-seuil indiqué précédemment correspond alors à ce débit constant. De telles courbes «volumes - débits-seuils» ont été obtenues pour le Rhône à Brigue (Situation A) et pour la Viège de Saas à Mattmark (Situation B) sur la base de crues historiques et simulées.

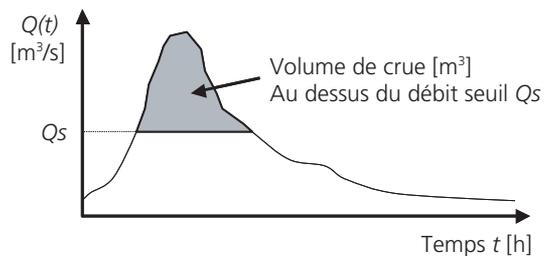


Fig. 4-13: Volume de crue dépassant, pour un événement donné, un débit-seuil Q_s choisi.

Sur l'ensemble des réalisations (100 séries de 120 ans chacune), les relations [volume - débits-seuil] ont été déterminées pour des hydrogrammes dont le débit maximal est analogue à ceux des événements majeurs observés. La figure 4-14 compare les courbes [volume - débit-seuil] des hydrogrammes générés avec celles des crues d'août 1987 et de septembre 1993 pour le Rhône à Brigue. Même si la courbe [volumes - débits-seuil] de la médiane des crues simulées est systématiquement en-dessous des crues d'août 1987 et de septembre 1993, ce qui dénote le caractère exceptionnel de ces deux crues observées, la méthodologie proposée est en mesure de produire des scénarios de crue comparables aux épisodes majeurs observés dans la région, de même que des scénarios de crues beaucoup plus critiques : plusieurs crues simulées ont des volumes débordés supérieurs de 1,5 à 2 fois à ceux estimés pour les événements de 1987 et 1993.

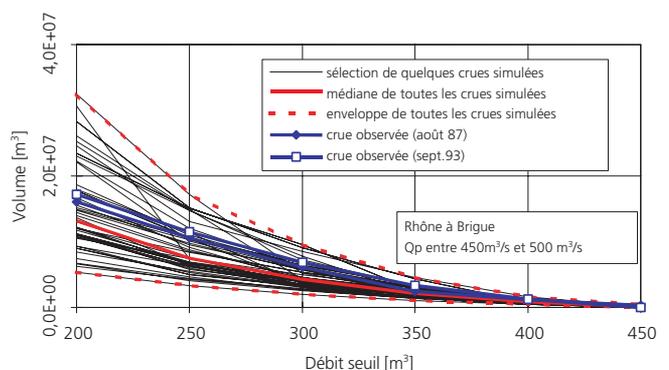


Fig. 4-14 : Volumes de crue au-dessus d'un «débit-seuil» pour le Rhône à Brigue. Comparaison des courbes générées avec celles correspondant aux épisodes majeurs observés (tiré de CONSUEGRA et al. 1998).

d) Conclusions

Pour mieux appréhender les crues de fréquence rare de même que les différentes sources d'incertitudes dans les processus de modélisation et d'estimation de ces crues rares, l'HYDRAM a mis au point une *méthodologie basée sur l'utilisation couplée d'un générateur stochastique de précipitations et d'un modèle Pluie-Débit utilisé en simulation multi-événementielle*. La multitude de configurations pluviométriques et hydrologiques générées par la méthode permet de créer des configurations très critiques, mais toujours plausibles, qui conduisent à la génération de crues exceptionnelles. La méthodologie proposée peut donc être appliquée à l'étude des crues dites extraordinaires. Par rapport aux approches basées sur une modélisation hydrologique à partir d'une pluie de projet, l'utilisation d'un générateur stochastique de précipitations couplé à un schéma d'abattement des pluies ouvre également des perspectives intéressantes en matière de dimensionnement. En effet, en lieu et place d'un seul et unique hydrogramme de projet, on génère de nombreuses situations de crues différentes, à partir desquelles on peut procéder à une *analyse de sensibilité* plus poussée. Ainsi, la cartographie des zones inondables peut utiliser divers hydrogrammes de crues qui ont une (ou plusieurs) caractéristique(s) commune(s), comme par exemple un débit maximal de temps de retour 100 ans, mais qui présentent des volumes en-dessus d'un débit-seuil (capacité limite du cours d'eau) très différents. Il est donc possible de quantifier la sensibilité des étendues et des profondeurs des submersions par rapport aux incertitudes liées à l'estimation de la crue de projet.

Puisqu'elle exploite des caractéristiques propres à une région donnée de la Suisse, la paramétrisation du générateur stochastique de pluie et du modèle hydrologique n'est pas transposable à une autre région. Nous pensons néanmoins que la méthodologie est parfaitement généralisable aussi bien au niveau des principes de modélisation qu'à celui de la démarche à suivre. Le problème principal reste celui de la caractérisation de la pluviométrie, plus particulièrement celui de la définition d'un (ou plusieurs) schéma(s) d'abattement(s) spatio-temporel(s) représentatif(s) des situations météorologiques critiques.

Même si le chemin à parcourir est encore semé d'embûches, gageons que les ingénieurs s'appuieront de plus en plus sur ces nouvelles technologies, au détriment d'approches plus classiques, qui ne fournissent pas tous les éléments nécessaires pour répondre aux exigences actuelles en matière d'aménagement des cours d'eau.

4.2 Statistique des valeurs extrêmes

4.2.1 Introduction

S'il existe *des mesures de débits* pour un bassin versant, elles peuvent être traitées statistiquement. Les plus hautes crues annuelles permettent par exemple de calculer la probabilité de dépassement ou de non-dépassement d'une valeur fixée, à l'aide de fonctions de distribution empiriques et théoriques.

Le débit mesuré est considéré pour la statistique des extrêmes comme *une variable aléatoire*. Les mesures constituent le collectif ou *ensemble de base*. Cet ensemble n'est pas une série infinie de mesures et peut se modifier dans le temps (inhomogénéité de la série). On considère donc un collectif partiel limité dans le temps (échantillon) et représentatif de l'ensemble en partant du principe que ses caractéristiques sont proches de celles de la série infinie.

Ces valeurs doivent être statistiquement indépendantes les unes des autres ; on se limite par conséquent, dans la statistique des crues, à un choix de crues. On choisit par exemple une série de maximums annuels (série annuelle) ou une série de valeurs dépassant un seuil donné. La *répartition empirique des fréquences* peut être déterminée pour cet échantillon. Si l'on veut connaître la probabilité de dépassement ou de non-dépassement d'une certaine valeur, on doit passer de la distribution empirique discrète à une *probabilité de distribution théorique*, c'est-à-dire passer de l'échantillon à l'ensemble. En principe, il existe plusieurs fonctions de distribution remplissant les conditions pour être utilisées en statistique des crues (continues, à une seule pointe, limitées vers le haut et vers le bas). Il n'existe cependant pas de fonction de répartition garantissant les meilleurs résultats pour tous les échantillons (MENDEL 1993).

Mentionnons encore que pour les travaux hydrauliques, la statistique des pointes de crues n'est pas la seule intéressante : la statistique du volume d'eau écoulé lors des crues est par exemple très importante pour le dimensionnement des bassins de retenue.

4.2.2 Préparation de l'échantillon

Pour que la probabilité d'une crue puisse être calculée, une série représentative, homogène et suffisamment longue de valeurs de bonne qualité doit être sélectionnée et analysée.

Grandeur de l'échantillon

Si la série de mesures est *longue* (par ex. plus de 30 ans), une statistique des maximums annuels est adéquate. On ne peut pas définir mathématiquement la

longueur de la série nécessaire pour obtenir une évaluation exacte de la probabilité étant donné que l'ensemble des valeurs (ou tout au moins une série très longue de valeurs homogènes) n'est pas connu. Si la série de mesures est *courte*, on peut à la rigueur utiliser des séries partielles (2 à 4 crues par année, crues d'été et crues d'hiver). Les crues d'hiver appartiennent souvent à un autre ensemble que celles de l'été.

Précision des mesures

Dans les chenaux stables, où les conditions d'écoulement sont optimales et le charriage faible, les mesures sont assez précises (environ $\pm 5\%$). Ces conditions ne sont malheureusement que rarement réunies : les cours d'eau sont souvent en forte pente et le charriage y est important. La construction d'un chenal artificiel (qui permettrait de meilleures mesures) se heurte souvent à des obstacles financiers, hydrauliques et environnementaux. A la plupart des stations de jaugeage, les mesures sont difficiles lors des crues, en raison du fort courant, du charriage important, de l'abondance du matériel en suspension et des modifications du lit du cours d'eau. L'introduction de nouvelles techniques a amélioré la qualité de ces mesures, mais elles restent néanmoins moins précises que celles des niveaux moyens. Il faut aussi remarquer que la relation niveau-débit doit souvent être extrapolée pour les crues, vu que la vitesse de l'eau et le matériel en suspension rendent souvent impossibles les mesures au moulinet hydrométrique à ce moment-là.

Homogénéité des séries de mesures

L'homogénéité des séries de mesures est aussi une condition importante pour une bonne statistique des valeurs extrêmes. Les *inhomogénéités* peuvent être dues à un changement des appareils ou de la méthode de mesure, à un déplacement de la station, à une modification du lit du cours d'eau, etc. Elles doivent être corrigées dans la mesure du possible, sinon il faudra choisir des périodes de mesures partielles favorables.

Dans l'analyse des débits des crues aux stations fédérales, par exemple, trois catégories ont été considérées (SPREAFICO et al. 1986, 1988 et 1991) :

1^{ère} catégorie :

Stations au régime d'écoulement stable ou presque stable

Exemple : la station Hinterrhein – Hinterrhein

Le régime d'écoulement ne s'y est pratiquement pas modifié pendant toute la durée des observations. La statistique utilise toute la série.

2^{ème} catégorie

Stations où le régime a été moyennement modifié

Exemples : Rhein – Domat/Ems, Rhein – Neuhausen

Il s'agit de stations dont le bassin versant a subi des modifications artificielles (construction de retenues, dérivations d'eau, corrections de cours d'eau, barrages régulant les lacs, etc.). Souvent ces modifications interviennent ensemble et peuvent avoir des effets divers sur le régime d'écoulement. A la station de Domat/Ems, par exemple, les débits moyens annuels n'ont pratiquement pas changé au cours de la période d'observation. En revanche, les débits de l'été, ceux de l'hiver et les pointes de crues se sont modifiés de façon relativement importante. A la station de Neuhausen, ces changements sont très amortis par le lac de Constance.

La période utilisée pour l'analyse des crues doit être choisie en fonction de l'importance des changements qui ont eu lieu dans le bassin.

3^{ème} catégorie

Stations où le régime a été fortement modifié

Exemple : Drance de Bagnes – Le Châble

Entrent dans cette catégorie essentiellement des stations dans le bassin versant desquelles des lacs de barrage, accompagnés de dérivations ou d'adductions d'eau, ont été créés. En général, la date de l'intervention est connue. La série de mesures à prendre en compte peut donc être choisie en conséquence.

Estimation de l'homogénéité

Il est recommandé de procéder de la façon suivante pour estimer l'homogénéité d'une série de mesures :

a) Représentation de la série de mesures et premier jugement

Le matériel à disposition est représenté graphiquement sous différentes formes (v. SPREAFICO et al. 1986, 1988 et 1991). On peut ainsi mettre en évidence des modifications de la répartition ou de la grandeur des débits moyens annuels, d'été ou d'hiver. En scindant la période d'observation en *périodes partielles* et en les comparant entre elles, on arrive souvent à visualiser des variations de l'homogénéité.

b) Interventions humaines et catastrophes naturelles

Les interventions humaines peuvent être recensées à l'aide du dossier des stations, des remarques figurant dans les annuaires hydrologiques ainsi que des publications sur l'utilisation des forces hydrauliques, la construction de barrages, la correction de cours d'eau et les améliorations foncières. Les inhomogénéités dues à un changement de la méthode de mesure, à

l'utilisation de nouveaux instruments de mesure ou au déplacement de la station, etc. doivent être analysées. Les catastrophes naturelles de grande envergure telles que ruptures de glaciers, glissements de terrain importants, etc., peuvent induire des valeurs aberrantes, qu'il faut traiter comme telles.

c) Tests d'homogénéité

L'homogénéité des séries des débits de pointe annuelles doit être étudiée à l'aide de différentes méthodes statistiques telles que le *test de Mann-Withney*, celui de *Kruskal-Wallis*, le *coefficient de corrélation des rangs de Spearman* ou le « *rank order correlation test for trend* ».

Une analyse des doubles cumuls en utilisant une station voisine peut aussi être utile.

Ces tests fournissent en général des résultats divergents. Il est par conséquent conseillé de réaliser l'étude de l'homogénéité à l'aide des points a) à c).

Les valeurs douteuses seront contrôlées par l'examen des feuilles limnigraphiques, des enregistrements digitaux, des relations niveau-débit, de la description des stations, etc. Les valeurs suspectes mises en évidence par les tests statistiques ne seront corrigées que si les calculs hydrauliques confirment les résultats statistiques. Les valeurs résultant d'erreurs de mesure seront corrigées.

4.2.3 Calcul des débits de crue pour une fréquence donnée

Pour calculer et représenter les débits de crue d'une certaine période de retour, une *fonction de distribution* adaptée doit être choisie, une méthode pour estimer les paramètres doit être appliquée et les « plotting positions » doivent être définies. Pour représenter une série de débits de crue sous la forme d'une courbe de probabilité, on doit choisir une certaine probabilité ou période de retour. Plusieurs formules peuvent être utilisées (LINSLEY 1982, MENDEL 1993).

MENDEL (1993) donne une bonne vue d'ensemble des fonctions de distribution. En plus de leur description détaillée, on y trouve des indications sur les méthodes d'estimation (méthode d'ajustement) telles que la méthode des moments ou la méthode du maximum de vraisemblance (*maximum-likelihood method*), ainsi que sur les « plotting positions ».

Marche à suivre pour le calcul de la probabilité des crues :

- 1) Préparation de l'échantillon selon 4.2.2.
- 2) Choix d'une ou plusieurs fonctions de distribution.

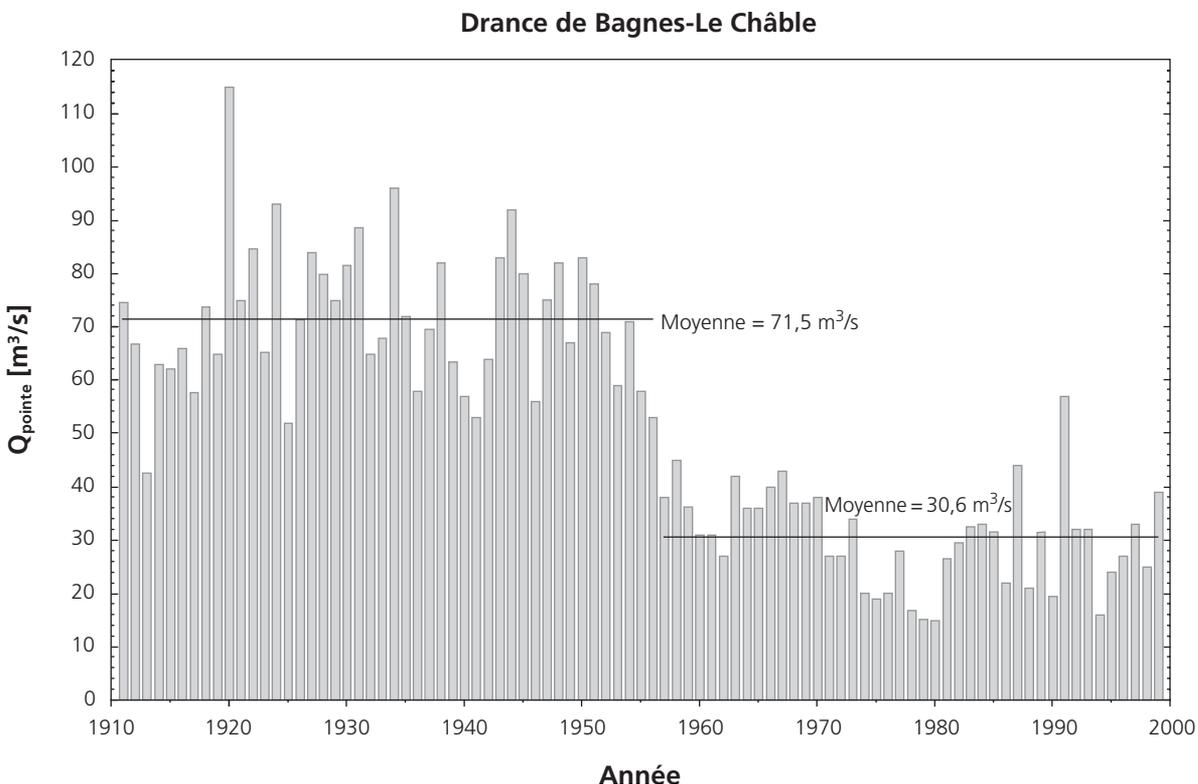


Fig. 4-15 : Débits annuels maximum à la station Drance de Bagnes – Le Châble.

Choix des fonctions de distribution analytiques	Nombre de paramètres
Distribution des extrêmes Type 1 (E1)	2
Distribution générale des extrêmes (AE)	3
Distribution logarithmique normale (LN3)	3
Distribution Pearson Type 3 (P3)	3
Distribution Pearson logarithmique Type 3 (LP3)	3
Distribution Weibull (WB3)	3
Distribution des extrêmes mixte (ME)	4

- 3) Calcul des valeurs des échantillons nécessaires pour l'estimation des paramètres et le calcul des intervalles de confiance.
- 4) Estimation des paramètres de la (ou des) fonction de distribution analytique à l'aide de la méthode des moments (MM), de la méthode du maximum de vraisemblance ou de celle des moments pondérés (WGM), etc.
- 5) Détermination du coefficient d'ajustement des valeurs d'échantillon à la fonction de distribution analytique (CHOW 1964).
- 6) Représentation de la distribution empirique des valeurs de l'échantillon et de la fonction de distribution. Pour la validation, les «plotting positions» doivent être déterminées (LINSLEY et al. 1982).
- 7) Calcul de l'intervalle de confiance pour plusieurs niveaux de signification en admettant que les écarts par rapport aux valeurs calculées à l'aide de la fonction de distribution sont distribués normalement. On peut par exemple choisir pour le domaine de confiance un niveau de signification de 80%.

4.2.4 Exemple

La marche à suivre ci-dessus est décrite pour le cas de la station Chamuerabach – La-Punt-Chamues-ch.

a) Description de la station

Le Chamuerabach est un affluent de la rive droite de l'Inn. Seulement 1,5 % de son bassin versant (73 km² jusqu'à la station) est recouvert de glacier. Le torrent a un régime nivo-glaciaire qui n'a été que peu modifié par l'homme. Ses débits sont donnés dans le Tableau 4-1.

La station est équipée d'un déversoir (Fig. 4-16).



Fig. 4-16 : Station de jaugeage du Chamuerabach à La Punt-Chamues-ch.

b) Choix de l'échantillon

L'échantillon des valeurs de débits doit être choisi en fonction des valeurs disponibles et de l'objectif (débits de pointe annuels, séries partielles, débits d'été ou d'hiver, volumes écoulés, etc.). Le choix de l'échantillon est de la plus grande importance (v. 4.2.2). La série doit être la plus longue possible tout en étant consistante et homogène. Les débits de pointe utilisés doivent avoir été mesurés de façon précise, ce qui doit être vérifié à l'aide de la documentation sur la station. Un contrôle minutieux de l'échantillon est indispensable. Les séries de débits publiées dans l'Annuaire hydrologique de la Suisse pour le Chamuerabach proviennent de deux emplacements. Les mesures ont été effectuées à la station Chamuerabach – Campovasto de 1955 à 1972 et à la station Chamuerabach – La Punt-Chamues-ch de 1973 à 1999. Le Service hydrologique national a combiné ces valeurs en une série unique, en admettant que, malgré le déplacement de la station, la série pouvait être considérée comme consistante.

Une analyse des doubles cumuls avec les stations de l'Ova dal Fuorn ou du Berninabach montre une modification des débits au moment du déplacement de la station.

Un test d'homogénéité des maximums annuels par différentes méthodes permet de mettre en évidence une légère tendance significative, visible d'ailleurs au premier coup d'œil (v. Fig. 4-17).

La pointe de la crue de septembre 1960 atteint 60–75 m³/s. D'autres crues très importantes se sont produites avant 1965. Du point de vue statistique, la pointe de 1966 sort du lot, mais elle est cependant plausible, si on la compare à celles mesurées à d'autres stations du bassin de l'Inn.

Les conditions à l'ancienne station de Campovasto n'étaient de loin pas aussi favorables aux mesures qu'à la nouvelle station. Les valeurs mesurées à celle-ci sont plus précises. Le plus fort débit jaugé y est de

13,4 m³/s. L'extrapolation à 24 m³/s (crue d'août 1987) à l'aide de la relation niveau-débit paraît donc acceptable. Pour l'extrapolation jusqu'à 70 m³/s, il faut compter avec une erreur relativement importante.

Abfluss		Chamuerabach (Ova Chamuera) - La Punt-Chamuesch						LHG 2263						
Débit		Koordinaten						Höhe						
Portata		791 430 / 160 600			A			1720			m ü.M.			
		Coordinate			Altitudine			m s.m.			Fläche			
											73,30			
											km²			
											Vergletscherung			
											Extension glacier			
											Ghiaccio			
											1,50			
											%			
1999	Jan./Janv.	Feb./Févr.	März/Mars	April/Avril	Mai/Mai	Juni/Juin	Juli/Juillet	Aug./Août	Sept./Sept.	Okt./Okt.	Nov./Nov.	Dez./Déc.		
	Genn.	Febr.	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.		
	1	0,71 +	0,63	0,57	0,77	2,06 -	9,93	6,58	2,60	2,72	5,18	2,41 +	1,64	1
	2	0,70	0,64	0,57	0,78	2,24	11,4	6,47	2,42	2,56	4,70	2,33	1,64	2
	3	0,70	0,65 +	0,56	0,76	2,75	12,4	6,39	2,33	2,41	4,44	2,31	1,65	3
	4	0,70	0,65 +	0,57	0,80	3,46	9,23	6,57	2,28	2,42	5,36 +	2,30	1,68	4
	5	0,69	0,64	0,56	0,84	3,44	7,18	7,08	2,29	2,36	4,81	2,19	1,68	5
	6	0,68	0,63	0,55	0,99	3,05	7,20	7,71 +	2,30	2,24	4,07	2,15	1,69	6
	7	0,67	0,63	0,55	0,98	3,73	8,54	5,80	2,65	2,20	3,60	2,12	1,71	7
	8	0,65	0,62	0,54	0,74	3,63	8,75	4,57	2,69	2,11	3,43	2,03	1,72	8
	9	0,64	0,61	0,54	0,67	4,04	7,76	3,89	2,57	2,07	3,25	2,01	1,73	9
	10	0,64	0,60	0,54	0,72	3,95	7,21	3,74	2,76	2,01	3,08	1,98	1,74	10
	11	0,64	0,60	0,54	0,78	4,33	6,84	4,03	2,74	1,95	2,95	1,91	1,76	11
	12	0,65	0,59	0,60	0,70	5,17	6,13	5,78	2,49	1,91	2,81	1,86	1,77	12
	13	0,65	0,58	0,68	0,67	6,15	6,44	5,09	2,44	1,87	2,75	1,83	1,78	13
	14	0,64	0,58	0,67	0,64	7,01	6,58	4,81	2,22	1,84	2,64	1,83	1,79 +	14
	15	0,63	0,57	0,68	0,62	6,29	5,76	4,19	2,15	1,81	2,52	1,79	1,79 +	15
	16	0,62	0,58	0,70	0,58	4,71	6,39	3,86	2,40	1,78	2,40	1,75	1,78	16
	17	0,62	0,58	0,66	0,57	4,10	6,90	3,64	2,44	1,71	2,30	1,74	1,78	17
	18	0,62	0,58	0,61	0,57	4,83	6,77	3,64	2,31	1,72	2,27	1,70	1,78	18
	19	0,62	0,58	0,59	0,57	5,80	5,59	3,56	2,30	1,64	2,17	1,65	1,75	19
	20	0,61	0,57	0,54	0,55	5,03	4,84	3,42	4,37 +	9,66 +	2,13	1,53	1,74	20
	21	0,61	0,57	0,53	0,56	4,01	4,78	3,23	4,16	8,83	2,17	1,70	1,72	21
	22	0,61	0,56	0,53	0,62	3,53	4,14	3,31	3,33	5,77	2,13	1,66	1,71	22
	23	0,61	0,56	0,52	0,76	3,63	3,77	3,05	3,02	4,34	2,30	1,67	1,69	23
	24	0,60	0,57	0,52	0,90	4,15	3,72	2,74	2,94	3,53	2,24	1,68	1,64	24
	25	0,60	0,57	0,56	1,12	4,69	4,22	2,62	2,68	3,18	3,31	1,67	1,59	25
	26	0,61	0,56	0,55	1,30	5,56	5,02	2,58	2,64	3,36	3,99	1,64	1,54	26
	27	0,61	0,56	0,54	1,33	6,45	6,79	2,67	4,22	4,17	3,36	1,63	1,51	27
	28	0,62	0,56	0,53	1,32	7,10	6,70	3,15	3,53	4,30	3,06	1,64	1,47	28
29	0,62	0,54	0,54	1,58	8,11	6,37	2,83	3,32	4,05	2,85	1,64	1,43	29	
30	0,61	0,62	0,62	1,87 +	8,41	6,50	2,63	3,05	4,35	2,67	1,64	1,39	30	
31	0,62	0,72 +	0,72 +	1,87 +	8,45 +	2,51	2,85	2,85	4,35	2,53	1,64	1,36	31	
Monatsmittel	0,64	0,59	0,58	0,86	4,83	6,80 +	4,26	2,79	3,16	3,14	1,87	1,67	m³/s	
Moyenne mensuelle														
Media mensile														
Maximum / Massimo	0,80	0,70	1,40	2,60	9,80	15,5	8,60	6,20	21,0 +	5,90	2,50	1,80	m³/s	
(Spitze / Pointe / Punta)														
Datum / Date / Data	1., 2.	div.	31.	30.	30.	3.	6.	20.	20.	3.	1.	div.		
Jahresmittel / Moyenne annuelle / Media annua	2,61 m³/s													
<p>Hydrogramme des moyennes journalières (atteintes ou dépassées) / Curva di durata delle medie giornaliere (raggiunte o sorpassate)</p>														
<p>Periode / Période / Período 1955 - 1999 (45 Jahre / années / anni)</p>														
Monatsmittel	0,71	0,63	0,64	0,90	2,92	6,33 +	5,44	3,28	2,69	1,93	1,24	0,89	m³/s	
Moyenne mensuelle														
Media mensile														
Maximum / Massimo	1,40	1,40	4,60	19,9	35,0	39,0	20,0	24,0	67,5 +	13,0	5,80	2,10	m³/s	
(Spitze / Pointe / Punta)														
Jahr / Année / Anno	1980	1995	1981	1992	1958	1963	1966	1977, 1987	1960	1979	1968	1965, 1987	Dat.	
Minimum / Minimo	0,34	0,45	0,32	0,46	0,57	1,79	1,99 +	1,38	0,94	0,80	0,58	0,46	m³/s	
(Tagesmittel / Moyenne journ. / Media giorn.)	1974	1973	1998	1962, 1973	1979	1976, 1984	1996	1964	1964	1962, 1989	1989	1989	Dat.	
Grösstes Jahresmittel	3,45 (1965)			m³/s			Mittlerer Abfluss			Kleinstes Jahresmittel				
Moyenne annuelle la plus grande							Débit moyen			Moyenne annuelle la plus petite				
La più grande media annua							Portata media			La più piccola media annua				
<p>Dauer der Abflüsse (erreicht oder überschritten) / Débits classés (atteints ou dépassés) / Durata delle portate (raggiunte o sorpassate)</p>														
Tage / Jours / Giorni	1	3	6	9	18	36	55	73	91	114	137	160		
1999	12,4	9,93	8,83	8,45	7,08	6,15	4,78	4,10	3,60	3,05	2,60	2,30	m³/s	
1955 - 1999	15,2	11,5	9,63	8,58	7,15	5,55	4,33	3,59	3,01	2,46	2,03	1,66	m³/s	
Tage / Jours / Giorni	182	205	228	251	274	292	310	329	347	356	362	365		
1999	2,03	1,76	1,65	1,12	0,68	0,63	0,61	0,58	0,56	0,54	0,53	0,52	m³/s	
1955 - 1999	1,33	1,08	0,91	0,81	0,74	0,69	0,64	0,60	0,56	0,53	0,48	0,36	m³/s	

Für die Jahre 1955-1972 wurden die Abflüsse der aufgehobenen Station Chamuerabach - Campovasto verwendet. Die Abflüsse wurden in Campovasto auch für die Jahre 1912-1913 und 1916-1921 bestimmt. Durchschnittlicher Abfluss der Periode 1916-1921 : 3,17 m³/s .

Tableau 4-1 : Les débits du Chamuerabach publiés dans l'Annuaire hydrologique de la Suisse.

Le contrôle de valeurs aussi élevées est très aléatoire, voire impossible, les conditions régnant à l'époque à la station étant difficilement vérifiables (modifications du lit, transport solide, etc.).

Les autres stations du bassin de l'Inn montrent une image assez semblable : la période précédant 1970 est plus riche en fortes crues que celle qui suit. Ceci semble indiquer que les pointes de Campovasto ne sont pas dues à des erreurs importantes.

Cet exemple montre les incertitudes liées au choix des échantillons, et avec quelle sensibilité la statistique des crues peut réagir à ce choix. On obtient un HQ_{100} de $29,7 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la station de La Punt-Chamuesch pour la période 1973-1999 en appliquant la distribution Log-Pearson Type III et la méthode des moments. Pour la série de 1955 à 1999, on obtient un HQ_{100} de $56,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Ceci montre qu'avant d'utiliser des mesures de débit, des recherches complémentaires doivent être réalisées (hydrauliques, MPD, étude de la formation des écoulements, etc.).

L'échantillon que nous utiliserons ci-dessous sera la série de crues de 1955 à 1999.

c) Choix de la fonction de distribution analytique

Il n'existe en général pas de fonction de distribution donnant la description et l'extrapolation idéales pour tous les échantillons. Il est donc recommandé d'utiliser

différentes fonctions, d'effectuer les calculs et de les représenter sous forme graphique. La meilleure fonction peut alors être déterminée visuellement ou à l'aide des coefficients d'ajustement. Le meilleur ajustement ne donne pas forcément la meilleure extrapolation. La figure 4-18 montre la distribution des valeurs extrêmes Type 1, la distribution générale des extrêmes et la distribution log-Pearson Type 3. Les paramètres ont été estimés par la méthode du maximum de vraisemblance (Maximum-likelihood-method). La distribution des valeurs extrêmes Type 1 montre un comportement différent des deux autres fonctions de distribution.

d) Choix de la méthode pour l'estimation des paramètres

Le choix de la méthode influe sur la forme de la fonction de distribution analytique. Il est recommandé d'en utiliser plusieurs.

Le choix de la méthode pour l'estimation des paramètres a une grande influence sur les résultats de l'extrapolation (v. Fig. 4-19). Remarquons que les résultats des calculs compris dans l'intervalle de confiance ont la même valeur statistique.

e) Représentation de l'intervalle de confiance

La représentation de l'intervalle de confiance est de la plus grande importance pour l'estimation des risques. Un degré de signification de 80% paraît approprié.

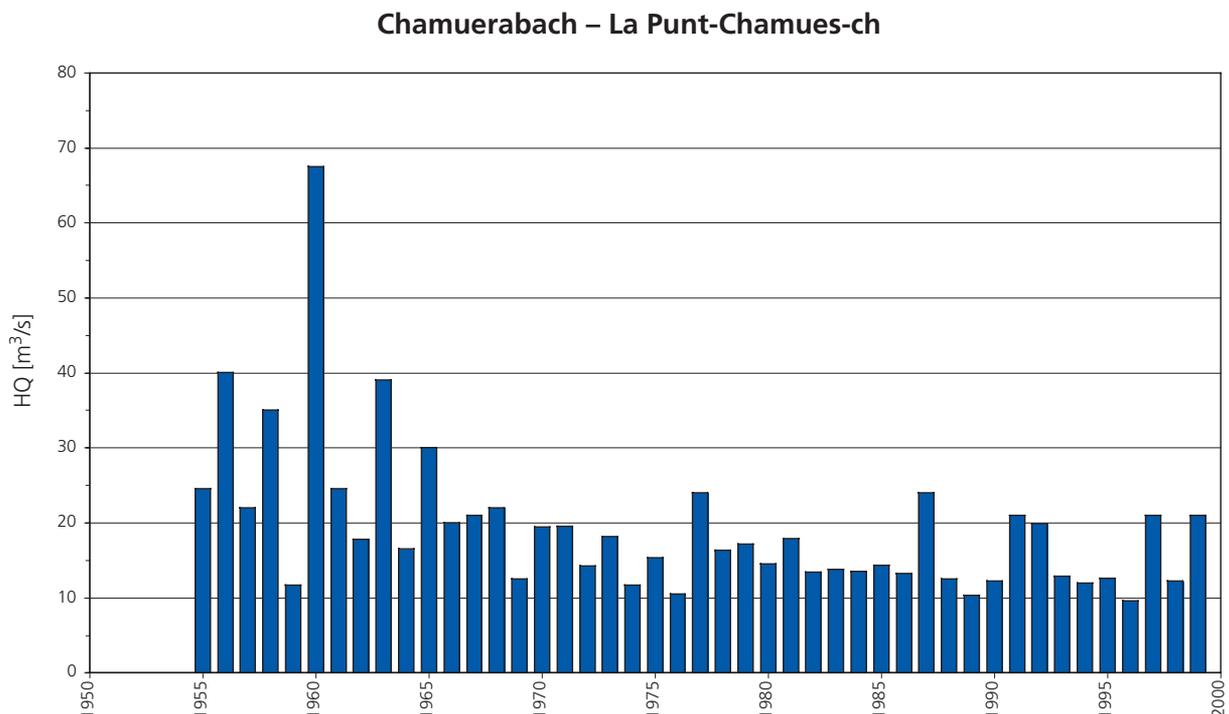


Fig. 4-17 : Les plus fortes crues annuelles du Chamuerabach.

La figure 2-20 donne un exemple de l'intervalle de confiance avec un niveau de signification de 80% et de l'extrapolation des valeurs extrêmes, obtenu par la méthode du maximum de vraisemblance (MLM: Maximum likelihood method).

f) Domaine d'extrapolation

Le domaine d'extrapolation acceptable dépend de la longueur de l'échantillon, des caractéristiques du bassin, de l'intervalle de confiance, etc. Il ne peut pas être défini de façon générale. Une extrapolation jusqu'au double de la grandeur de l'échantillon peut souvent être considérée comme acceptable. Cependant, les séries de mesure sont fréquemment trop courtes pour contenir des événements rares. C'est par exemple souvent le cas dans les régions karstiques. Le traitement des événements de périodes de retour très longues est abordé au chapitre 4.3 (crues extraordinaires et extrêmes).

4.2.5 Méthodes recommandées à l'étranger et programmes informatiques

a) Recommandations du DVWK pour le calcul de la probabilité des crues (DVWK 1979)

La recommandation de 1979 permet le choix entre les trois fonctions de distribution Pearson Type 3, Pearson

logarithmique Type 3 et Gamma. La meilleure fonction est déterminée selon la pente et de la position de la distribution empirique.

L'avantage de ce procédé réside dans l'objectivité des critères pour le choix de la fonction et dans la possibilité de comparer les résultats. En revanche, il est possible que d'autres fonctions de distribution permettent de mieux déterminer la grandeur cherchée. La méthode s'applique aux séries des pointes des crues annuelles. Lorsque les séries de mesures sont courtes (< 15 ans), il est recommandé d'utiliser des séries partielles.

b) Nouvelles recommandations du DVWK pour le calcul de la probabilité des crues (DVWK 1999)

La nouvelle notice du DVWK (DVWK-Merkblatt 251) propose toute une palette de fonctions de distribution. L'utilisateur peut choisir la plus appropriée, entre autre en se fondant sur les coefficients d'ajustement. La société WASY a développé un logiciel en se basant sur la notice DVWK 251 : WASY HQ-EX (1997).

c) HYFRAN

Le logiciel HYFRAN sert à adapter des fonctions de distribution et contient une série d'outils flexibles, puissants et faciles à utiliser. Il convient à l'analyse sta-

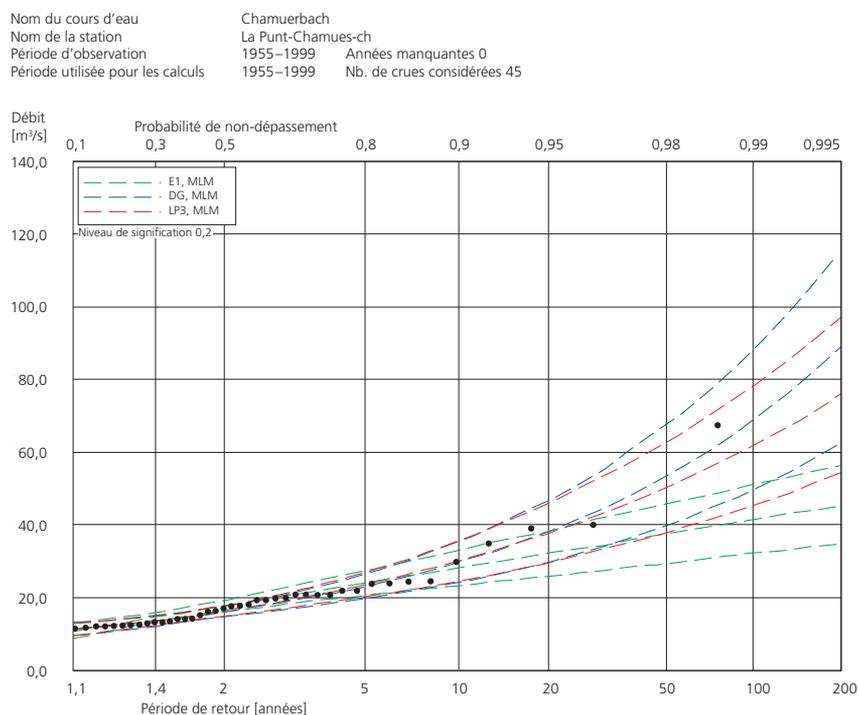


Fig. 4-18 : Extrapolation des débits des crues annuelles à la station de Chamuerbach – La Punt-Chamues-ch : distribution des valeurs extrêmes Type 1 (E1), distribution générale des extrêmes (DG) et Log Pearson-Type III (LP3) ; intervalles de confiance de 80%.

Nom du cours d'eau	Chamuerbach
Nom de la station	La Punt-Chamues-ch
Période d'observation	1955-1999 Années manquantes 0
Période utilisée pour les calculs	1955-1999 Nb. de crues considérées 45

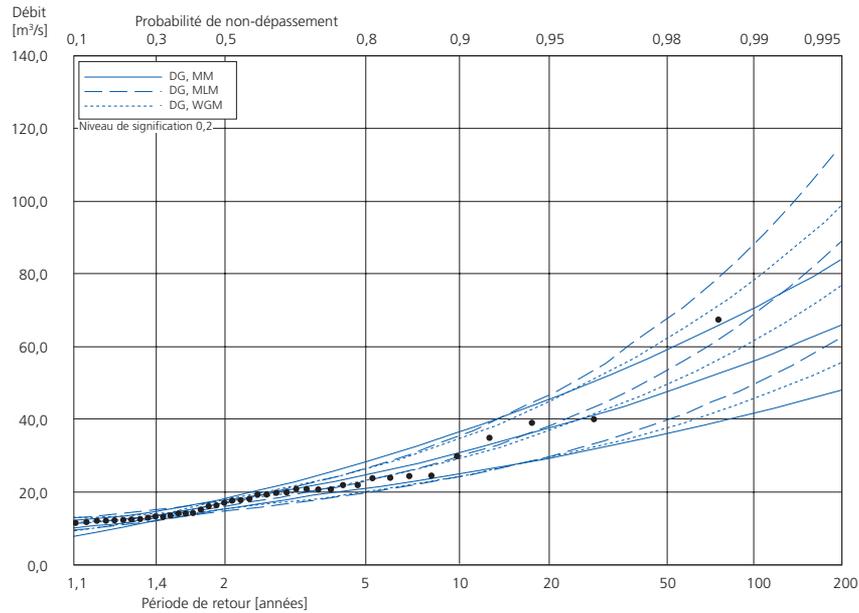


Fig. 4-19 : Extrapolation des débits des crues annuelles à la station du Chamuerbach : distribution générale des extrêmes (DG) avec la méthode des moments (MM), la méthode du maximum de vraisemblance (MLM) et la méthode des moments pondérés (WGM); intervalles de confiance avec un coefficient de 80%.

Nom du cours d'eau	Chamuerbach
Nom de la station	La Punt-Chamues-ch
Période d'observation	1955-1999 Années manquantes 0
Période utilisée pour les calculs	1955-1999 Nb. de crues considérées 45

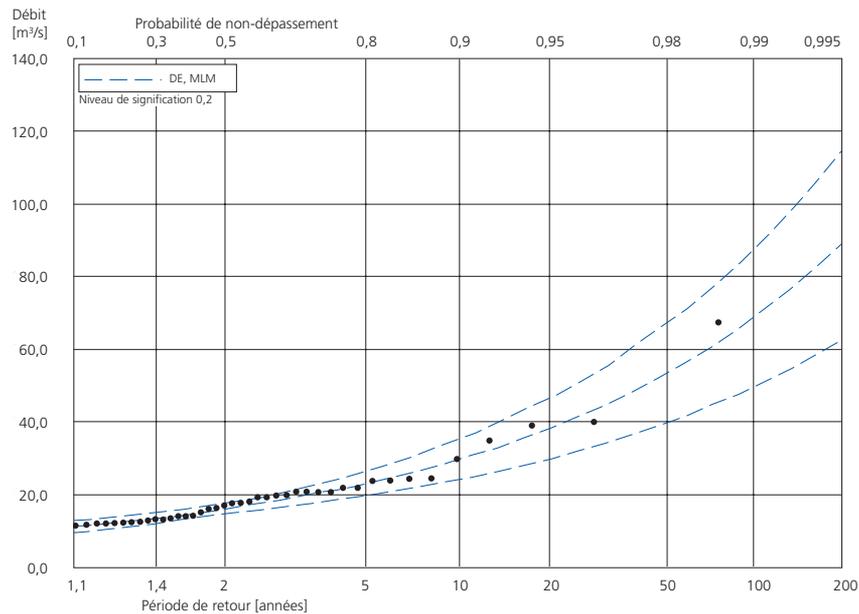


Fig. 4-20 : Extrapolation des débits des crues annuelles à la station du Chamuerbach : distribution générale des extrêmes (DE) avec la méthode d'estimation des paramètres «maximum likelihood method» (MLM) ; intervalle de confiance avec un coefficient de 80%.

tistique de séries de mesures, en particulier d'événements extrêmes.

HYFRAN a été développé par l'Institut de recherche scientifique – Eau (INRS) de l'Université de Québec en collaboration avec Hydro-Québec et le Conseil de la recherche pour les sciences naturelles et les sciences de l'ingénieur du Canada.

Configuration requise

Compatible PC, 80386 ou plus, 8 MB RAM, place sur disque dur 5 MB ; Windows 95/98/2000/NT.

Résumé

Critères	HYFRAN
Fonctions de distribution statistiques	16
Tests de validation	5
Test d'ajustement	2 pour 5 fonctions de distribution
Sorties graphiques standard	
Systèmes d'exploitation assistés	Windows 95/98/2000/NT
Support	e-mail et fax

www.inrs-eau.quebec.ca/activites/groupe/chaire_hydrol/chaire9.html

4.3 Evaluation des crues extraordinaires et extrêmes

4.3.1 Méthodes pour l'évaluation des crues extraordinaires et extrêmes

L'estimation des crues rares (temps de retour de l'ordre de 100 ans), des crues extraordinaires (temps de retour supérieurs), ou des crues extrêmes (crues maximum probables), fait la majeure partie du temps appelé à des méthodes empiriques ou statistiques fournissant une simple estimation d'un débit maximal. C'est le cas des méthodes multipliant par un coefficient plus ou moins arbitraire le débit maximal de période de retour 100 ans déterminé à l'aide de formules empiriques telles que la formule rationnelle ou à l'aide d'un modèle d'ajustement fréquentiel approprié: le facteur multiplicatif utilisé est en général compris entre 1.3 et 1.5. Il peut s'élever jusqu'à 2 pour les petits bassins versants. C'est le cas aussi des méthodes basées sur une extrapolation des ajustements obtenus par analyse fréquentielle sur les séries observées des débits maximaux annuels ou des débits supérieurs à un certain seuil. C'est encore le cas de la méthode du GRADEX ou des méthodes dérivées ; la méthode du GRADEX, développée par EDF (GUILLLOT & DUBAND 1967) a la particularité de supposer qu'à partir d'une

certaine hauteur de pluie, correspondant à un état de saturation en eau du bassin, tout excédent de pluie provoque le même excédent de débit et que, par suite, les pluies maximales et les débits correspondants suivent une même loi de distribution statistique, dite extrême en raison de la nature du phénomène. Ces méthodes sont cependant dans la plupart des cas inadaptées aux besoins des études à réaliser. Tout d'abord, la construction d'aménagements hydro-électriques sur le cours des rivières à étudier crée des discontinuités dans le comportement hydrologique des bassins versants ; les séries de débits observés sont souvent difficilement exploitables pour la détermination de crues extraordinaires pertinentes pour la situation future à étudier (homogénéité, représentativité) (BÉROD ET CONSUEGRA 1995). De plus, la connaissance de l'hydrogramme complet de crue est souvent indispensable. C'est le cas par exemple pour les projets visant à dimensionner les grands barrages à écrêter les crues ; c'est aussi le cas pour les projets liés à la cartographie des dangers d'inondation. Le volume et la forme d'une crue sont d'autres caractéristiques des crues qui peuvent être pour certaines applications des variables bien plus critiques que le simple et traditionnel débit maximal.

Certaines méthodes, telles que la méthode QDF (Débits – Durée – Fréquences) peuvent fournir des hydrogrammes synthétiques de projet (NERC 1975, BALOCKI & BRUGES 1994, OBERLIN 1992). Cependant, elles ont été peu testées dans le cadre des crues extraordinaires ; par ailleurs, elles fournissent des hydrogrammes de crues synthétiques dont la période de retour est difficile à estimer. Enfin de nombreux praticiens préfèrent utiliser des hydrogrammes de crues plus réalistes, toute la difficulté étant cependant d'identifier des formes réalistes et de leur affecter des périodes de retour. Par ailleurs, il est peu aisé de déterminer a priori quelle est la forme critique et plausible à affecter à l'hydrogramme de projet pour un système donné. Pour pallier cette difficulté, BERTOLI et MOISELLO (1994) utilisent un hydrogramme de projet défini par quatre paramètres (le débit maximal, le débit de base, le volume provenant du ruissellement direct et le temps de montée de la crue). Ces paramètres sont considérés comme des variables aléatoires dépendant de caractéristiques locales auxquelles on peut affecter une distribution de probabilité. Il est possible ensuite de générer différentes formes de crues de projet. Cependant, ces distributions de probabilité (dont les trois dernières sont conditionnelles à la première) semblent délicates à déterminer.

La modélisation Pluie-Débit est une approche couramment utilisée pour l'étude des crues extraordinaires. Elle consiste à calibrer, sur un bassin donné, un modèle

Pluie-Débit pour des événements observés et à l'utiliser en extrapolation pour des précipitations importantes. L'approche qui a prévalu jusqu'à aujourd'hui pour étudier les crues extraordinaires consiste à définir une pluie de projet extraordinaire et à la transformer en hydrogramme de projet à l'aide du modèle hydrologique approprié. La crue extrême peut en principe aussi être obtenue en simulant la réponse du bassin versant à une pluie de projet extrême. C'est l'approche utilisée dans le cas du modèle Pluie-Débit CRUEX développé par le Laboratoire Hydrologie et Aménagements (HYDRAM) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) (ZELLWEGER ET MUSY 2000) : la pluie de projet (Pluie Maximum Probable, PMP) et l'utilisation du modèle CRUEX permettent de déterminer une crue extrême aussi nommée crue maximale probable (en anglais Probable Maximum Flood, PMF). Le modèle CRUEX est présenté au chapitre 4.3.3.

L'intérêt de la modélisation est qu'elle permet en particulier de représenter le comportement de bassins naturellement complexes (bassins composés de plusieurs sous-bassins aux comportements distincts impliquant des combinaisons non triviales de réponses hydrologiques) ou profondément modifiés par la présence de divers aménagements hydrauliques (barrages en particulier). Lorsque l'on souhaite l'utiliser pour les crues extraordinaires, cette approche événementielle, basée sur l'utilisation d'une pluie de projet, a cependant aussi ses limites :

- Elles concernent tout d'abord la détermination des intensités à attribuer aux pluies extraordinaires, voire extrêmes. La méthode la plus fréquemment utilisée, l'extrapolation pour des périodes de retour rares des intensités maximales observées, conduit aux mêmes incertitudes que celles évoquées plus haut pour l'extrapolation des débits maximaux.
- Les limites de l'approche concernent ensuite le choix des différentes variables ou paramétrisations nécessaires à la caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle de cette pluie de projet et nécessaires ensuite à la détermination de l'hydrogramme de crue résultant de cette pluie extraordinaire. La structure spatiale et temporelle des pluies est naturellement très variable et il est par exemple difficile, à lame d'eau précipitée fixée, d'identifier *a priori* les structures de pluies critiques et plausibles pour un système donné.
- De même, l'état hydrique initial du système (taux de saturation du bassin, taux de remplissage des réservoirs naturels ou artificiels) a une importance capitale dans la réponse hydrologique et hydraulique du système à une sollicitation pluviométrique donnée. Or cet état hydrique initial est naturelle-

ment extrêmement variable ; il dépend en particulier des précipitations antécédentes à un événement donné et de la gestion antérieure des réservoirs artificiels situés dans le bassin. Il est évident qu'une pluie extraordinaire n'aura pas le même impact sur un barrage si elle se produit après une période sèche et à un moment où le barrage est quasiment vide que si elle se produit juste après une autre pluie importante et pendant une période de l'année où le barrage est plein : dans cette deuxième configuration, le gestionnaire du barrage aura probablement déjà utilisé le volume de sécurité destiné au laminage des crues pour gérer la première crue apparue et cette réserve de stockage ne sera plus disponible pour gérer la sur-crue provenant du second événement pluvieux. Dans cette optique, le « Bureau of Meteorology, Australia » a publié différentes recommandations pour élaborer des pluies de projet réalistes intégrant une pré-pluie de projet (MINTY & MEIGHEN 1999). Les auteurs soulignent évidemment la difficulté à identifier une pré-pluie de projet typique du fait de la grande variabilité spatiale et temporelle des pré-pluies observées. Ils suggèrent d'adopter plutôt une approche stochastique pour déterminer une pré-pluie de façon aléatoire, en utilisant des distributions de probabilités conditionnelles appropriées.

Plus généralement, l'approche basée sur l'utilisation d'une Pluie Extraordinaire de Projet, nécessite de fixer un certain nombre de paramètres. Ces paramètres sont importants pour la description de la sollicitation pluviométrique et de l'état initial du système, et sont nécessaires ensuite à la mise en œuvre de la démarche. Pour produire ces événements extraordinaires, on peut imaginer fixer ces différentes variables et paramètres de façon à maximiser l'hydrogramme de crue résultant. Il faut cependant attirer l'attention sur le fait que le choix simultané des configurations les plus critiques pour toutes les variables déterminantes peut conduire à des résultats hydrologiquement irréalistes. La notion de temps de retour des événements n'a certes guère d'intérêt ni de sens dès lors que l'on s'intéresse aux événements extraordinaires, *a fortiori* aux événements extrêmes. Si l'on souhaite toutefois attribuer une période de retour à l'une des variables de l'hydrogramme de crue produit avec cette approche événementielle (que ce soit pour l'hydrogramme résultant d'une pluie extraordinaire ou résultant d'une pluie de projet courante), l'exercice conduirait sans doute à une estimation malheureuse de cette période de retour : du fait de la grande variabilité naturelle des variables critiques et notamment des conditions initiales, la correspondance stricte (et trop souvent opé-

rée pourtant) entre la période de retour d'une des variables de l'hydrogramme de crue et celle de la sollicitation pluviométrique qui en est à l'origine est en effet illusoire.

Enfin, de la même façon que pour l'approche basée sur l'élaboration d'hydrogrammes synthétiques, il est peu probable qu'une approche basée sur une simulation pluie-débit événementielle permette d'identifier *a priori* la forme ou l'une des formes de crue critique(s) pour le système à étudier. L'approche développée par l'HYDRAM dans le cadre du projet CONSECRU (CONSUEGRA et al. 1998) est une approche originale basée sur la génération stochastique de différents événements pluviométriques et sur la simulation consécutive de la réaction du bassin versant étudié à ces sollicitations pluviométriques par le biais d'un modèle Pluie-Débit approprié. Cette approche multi-événementielle permettant de résoudre une partie des problèmes répertoriés ci-dessus est parfaitement adaptée à l'étude des crues extraordinaires. Elle est présentée ci-dessous.

4.3.2 La méthode CONSECRU (crues extraordinaires)

La méthodologie présentée dans ce chapitre a été développée dans le cadre du projet CONSECRU par l'HYDRAM pour étudier les crues du bassin supérieur du Rhône (CONSUEGRA et al. 1998). La méthodologie, stochastique et multi-événementielle, permet de résoudre une partie des limites des méthodes événementielles (v. paragraphe précédent). Elle a été détaillée au chapitre 4.1.2. La méthode développée pour étudier les crues rares (temps de retour de l'ordre de 100 ans) peut être aussi appliquée à l'analyse des crues extraordinaires (périodes de retour supérieures). Dans les paragraphes suivants, seuls seront donc présentés les aspects de cette méthode qui concernent spécifiquement les crues extraordinaires.

La méthodologie développée est la suivante : dans un premier temps, on utilise un modèle de génération stochastique de précipitations qui permet d'obtenir autant de séries chronologiques de pluies que désiré (séries continues). De chacune de ces séries sont extraits, sur la base d'un critère de sélection donné (la lame d'eau de l'événement a été utilisée à cet effet dans cette étude), les événements pluviométriques critiques, i.e. susceptibles de produire des crues importantes. Pour chacun des événements pluviométriques critiques ainsi sélectionnés, on applique un schéma d'abattement spatial approprié. Le modèle hydrologique, initialisé pour une configuration de départ plausible du bassin versant (générée de façon stochastique), est finalement utilisé pour produire un scénario

de crue correspondant. On obtient donc, pour chaque série chronologique de précipitations, une série de scénarios de crues à partir desquels il est possible d'effectuer les analyses statistiques usuelles. Pour appréhender les crues extraordinaires, on peut simplement multiplier les séries chronologiques de pluie pour produire autant de séries de débit fictives. En multipliant ainsi les scénarios pluviométriques, on multiplie les configurations hydrologiques possibles, ce qui permet inévitablement de générer une ou plusieurs configurations très défavorables (succession rapprochée de deux ou plusieurs pluies critiques et saturation complète du bassin), mais néanmoins plausibles, qui conduiront à des événements critiques majeurs pour une variable hydrologique donnée (volume de crue ou débit maximal). Différentes crues extraordinaires peuvent ainsi être extraites de cette génération stochastique.

Dans l'étude CONSECRU, la génération des séries temporelles de pluies a été réalisée à l'aide du modèle à pulsations rectangulaires de Neyman-Scott, dit "NSRPM" (v. Chap. 4.1.2 c). Le schéma d'abattement spatial dit « Binn-Simplon » a été ensuite appliqué à tous les événements de précipitations sélectionnés dans les séries temporelles précédentes. Pour séparer les précipitations solides des précipitations liquides, l'altitude de l'isotherme 0°C est déterminée pour chaque événement en tirant dans une distribution de probabilité empirique (déduite des observations effectuées pendant la période Août-Septembre). Pour chacun des événements pluviométriques critiques extrait des séries chronologiques de pluies générées dans l'étape précédente, le modèle de transformation Pluie-Débit est ensuite utilisé en mode événementiel de façon à générer un scénario de crue. Pour initialiser le modèle hydrologique (initialisation du taux de remplissage du réservoir sol), on associe de manière aléatoire un débit de base initial à chaque hydrogramme. A l'hydrogramme de crue produit par le modèle hydrologique, on ajoute enfin un débit de fonte glaciaire tirée aléatoirement dans une distribution empirique, elle-même dérivée des enregistrements disponibles. Pour le Rhône à Sion, on obtient ainsi avec les 10 séries de pluies simulées plusieurs crues importantes dont le débit maximal est supérieur à 750 m³/s (v. Fig. 4-21). Cette valeur correspond approximativement à 1,25 fois le débit maximum centennal obtenu sous conditions naturelles (c'est-à-dire sans influence des aménagements hydroélectriques) (NIGGLI et al. 1997). Ces événements peuvent donc être considérés comme des crues extraordinaires, même s'il est difficile de leur attribuer une période de retour.

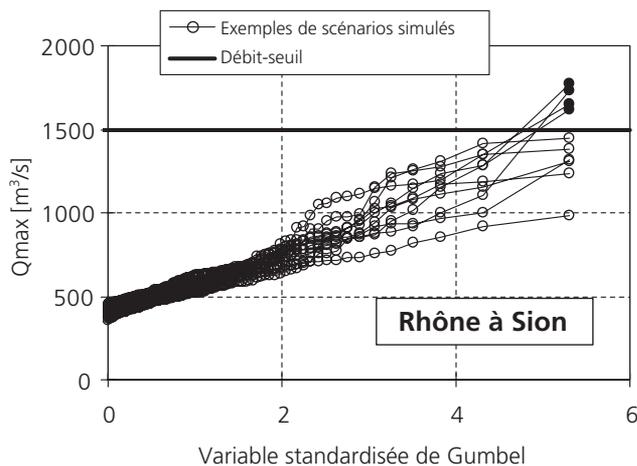


Fig. 4-21 : Distribution statistique des débits simulés pour chacune des 10 séries de précipitations simulées avec NSRPM. Les points en gras correspondent à des crues dont le débit maximal est supérieur à un débit-seuil fixé à 1,25 fois le débit maximal centennal.

Il faut préciser que les crues les plus importantes produites par la méthode ne correspondent pas nécessairement à des crues extraordinaires. La méthode pourrait même ne produire aucune crue extraordinaire si, par exemple, les générations stochastiques effectuées étaient trop peu nombreuses et/ou si elles ne produisaient pas, par hasard, les combinaisons de conditions hydro-météorologiques défavorables attendues. La vérification du caractère extraordinaire des crues produites et/ou la façon de sélectionner les crues pouvant être considérées comme extraordinaires peut se baser, par exemple, sur l'utilisation d'un débit maximal de crue-seuil (ou de toute autre caractéristique critique de l'hydrogramme de crue) correspondant à la période de retour jugée représentative des événements extraordinaires. Ce quantile-seuil peut être obtenu par une analyse fréquentielle effectuée sur les séries de débits générées par la méthode. Un ajustement de Gumbel, si ce type d'ajustement est approprié, peut par exemple être effectué pour chacune des N séries de débits. L'ajustement de Gumbel médian, extrait des N ajustements précédents, peut être alors utilisé pour évaluer les quantiles correspondant à différentes périodes de retour extraordinaires (500, 1000 ans...). Une autre méthode possible pour sélectionner les crues extraordinaires générées par cette méthode est de fixer un débit-seuil correspondant à un quantile donné (débit centennal par exemple) auquel on aura appliqué un facteur multiplicatif choisi. Parmi les différentes crues générées, celles qui ont un débit maximal supérieur à ce quantile-seuil peuvent être ainsi considérées comme crues extraordinaires. La figure 4-22 présente deux exemples de crues extraordinaires obtenues par cette méthode. Si le nombre de

crues ainsi sélectionnées s'avérait trop peu important au regard des exigences du projet, il suffirait simplement de générer plusieurs séries d'hydrogrammes supplémentaires. Le nombre de ces scénarios plausibles de crues extraordinaires peut être augmenté à volonté par la simple multiplication des générations stochastiques (précipitations, conditions initiales, altitude de l'isotherme 0° , etc.) et des simulations numériques consécutives. La méthode peut donc fournir une multitude d'hydrogrammes de crue, ce qui est bien plus intéressant que la seule estimation d'un débit maximum. Il en résulte en effet la possibilité d'étudier des problématiques faisant intervenir directement la notion de volume, fort utile à la cartographie des zones inondables ou au dimensionnement d'ouvrages de rétention tels que des barrages.

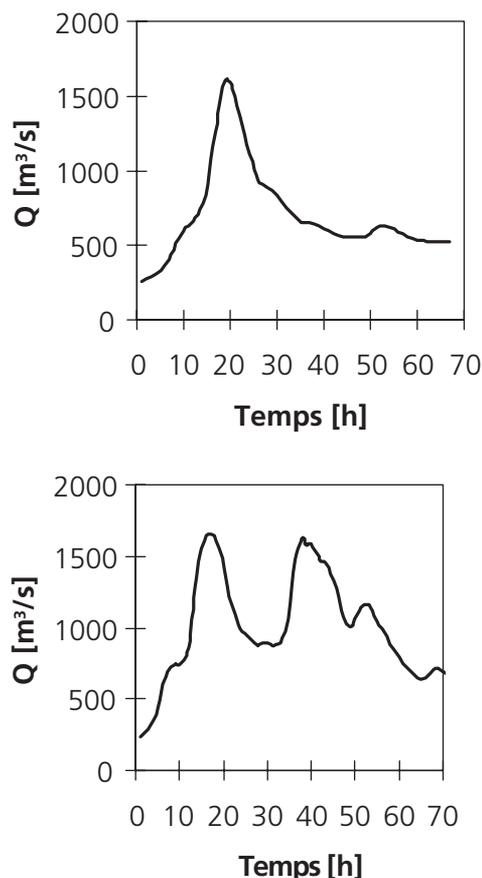


Fig. 4-22 : Exemple de crues extraordinaires pour le Rhône à Sion.

Il est nécessaire de préciser que la méthodologie proposée ne permet pas a priori - et n'a pas pour but - de produire pour un bassin versant donné la crue maximale probable (PMF). Un exemple de méthode développée par l'HYDRAM pour déterminer une PMF est présenté dans le chapitre (4.2.3) (approche

CRUEX). Pour la méthodologie présentée dans le présent chapitre, les crues produites résultent de combinaisons aléatoires de différentes variables ou phénomènes hydrologiques. Or, ces derniers sont générés par des modèles stochastiques qui ont été calés sur les processus ou variables hydro-météorologiques observés. Les pluies générées par le modèle NSRPM auront, par exemple, des caractéristiques statistiques similaires à celles des pluies observées. De ce fait, les séries de pluies générées ne contiennent pas nécessairement 'la' pluie maximum probable (PMP) stricto sensu... Cependant, même si de tels générateurs ne produisent pas forcément ce type d'événement, la seule combinaison aléatoire de conditions hydro-météorologiques défavorables obtenues sur la base d'observations permet de produire différents scénarios de crues extraordinaires, ceux-ci pouvant par ailleurs se rapprocher de la PMF.

4.3.3 Le modèle CRUEX (crues extrêmes)

a) Description

Le modèle CRUEX est un modèle Pluie-Débit de type événementiel, spécialement conçu pour modéliser la crue maximale probable (en anglais Probable Maximum Flood, PMF) des bassins versants alpins en amont des grands barrages suisses. Il a été développé, dans le cadre du projet CRUEX, par le laboratoire Hydrologie et Aménagements (HYDRAM) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Selon que le modèle est appliqué à des bassins versants jaugés ou non jaugés, la procédure d'estimation de son paramètre principal diffère. Ce modèle, qui s'inspire des développements de BÉROD (1995) ainsi que de ceux de CONSUEGRA et al. (1998), est présenté plus en détail dans ZELLWEGGER & MUSY (2000 a b et c).

Le modèle CRUEX associe la fonction de production de Philip (transformation de la pluie brute en pluie nette) à une fonction de transfert de type réservoir non-linéaire (transformation de la pluie nette en hydrogramme de crue). Il nécessite comme variable d'entrée, une pluie maximale probable (en anglais Probable Maximum Precipitation, PMP) au pas de temps horaire. Ceci implique la détermination d'une valeur du volume de la PMP pour une certaine durée et l'attribution à cette PMP d'une structure temporelle au pas de temps horaire. Le choix de la durée et de la structure temporelle doit être fait de telle sorte que ces deux caractéristiques constituent la combinaison qui maximise la PMF. Des suggestions pour le calcul de la PMP et pour la détermination de la structure temporelle sont données notamment dans CHOW et al. (1988) et dans BÉROD et al. (1992).

La fonction de production de Philip permet d'exprimer la capacité d'infiltration au temps t , soit $f(t)$, comme suit :

$$f(t) = \frac{s}{2\sqrt{t}} + a$$

où s est la sorptivité [$\text{mm/h}^{0.5}$] et a un paramètre assimilable à la conductivité hydraulique à saturation [mm/h]. La valeur du paramètre a peut être fixée à $7,8 \cdot 10^{-9} \text{mm/h}$ (BÉROD 1995). Il s'agit d'une valeur tirée d'expériences conduites en milieu alpin. Le paramètre s est ajusté de telle sorte à reproduire un coefficient de ruissellement « cible » (rapport entre le volume de la pluie brute et de l'hydrogramme de crue). Ce dernier, représentatif de conditions extrêmes, a été estimé à 0,9. Il s'agit, là encore, d'une valeur provenant d'expériences faites avec un simulateur de pluie.

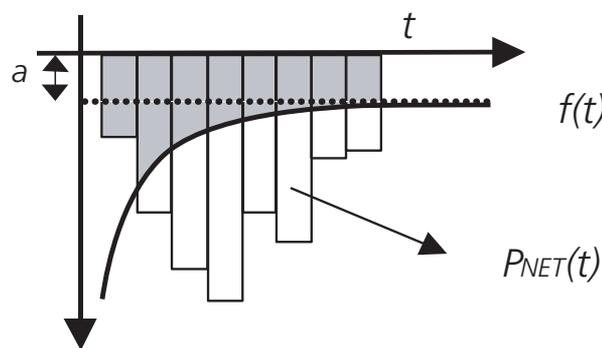


Fig. 4-23 : Fonction de production utilisée dans le modèle CRUEX.

La pluie nette au temps t , soit $P_{NET}(t)$, est alors obtenue en soustrayant de la pluie brute de projet ($P_{BRUT}(t)$), la valeur de $f(t)$ (v. Fig. 4-23). A noter que, conformément à la logique de maximisation proposée ici, toute la pluie brute est supposée tomber sous forme liquide. La fonction de transfert, qui permet le calcul du débit de ruissellement au temps t ($Q_{RUISS}(t)$), schématise le bassin versant par un plan et peut se traduire mathématiquement par une combinaison d'une équation de continuité et d'une loi de vidange :

$$\frac{dV(t)}{dt} = A \frac{dH(t)}{2dt} = A \cdot P_{NET}(t) - A \cdot Q_{RUISS}(t)$$

$$Q_{RUISS}(t) = H(t)^{5/3} \cdot \beta \cdot p^{1/2}$$

où $V(t)$ est le volume d'eau dans le réservoir et $H(t)$ est la hauteur d'eau en limite aval du plan au temps t . Il est ici supposé que la hauteur d'eau en limite amont est égale à 0, quel que soit t , et que la variation du niveau d'eau de l'amont vers l'aval est linéaire (v. Fig. 4-24). p et A sont respectivement la pente moyenne [-] et la surface du bassin versant [km²]. b est un paramètre intégrant les caractéristiques physiques non prises en compte dans la modélisation.

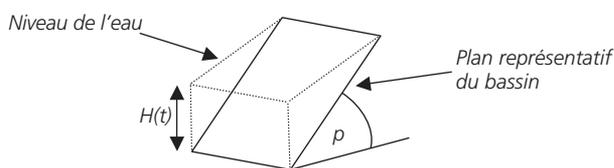


Fig. 4-24 : Schématisation de l'écoulement sur un plan, tel que considéré par la fonction de transfert.

Si des données de débit existent pour le bassin versant considéré, β est obtenu par calibration sur la base de crues observées. Sinon, une relation puissance permet de l'exprimer en fonction de la longueur du réseau hydrographique L [km] mesuré sur une carte au 1 :25'000 :

$$\beta = 670 \cdot L^{0,62}$$

Enfin, un débit de base Q_{BASE} constant peut être ajouté à l'hydrogramme de crue Q_{RUISS} obtenu avec les fonctions de production et de transfert ci-dessus. Q_{BASE} peut se calculer à partir de la superficie A [km²] et la proportion de couverture glaciaire p_{GLAC} [-] du bassin versant. La formule a été établie pour la période estivale dans les Alpes, soit lorsque la contribution de la fonte des neiges et des glaciers au débit de base est la plus importante.

$$Q_{BASE} = A \cdot (0,42 \cdot p_{GLAC} + 0,037)$$

On remarquera cependant que l'élément-clé du modèle Pluie-Débit est la fonction de transfert. Pour un coefficient de ruissellement proche de 1 (comme c'est le cas dans l'approche présentée ici), le fait de considérer ou non l'infiltration (fonction de production) ne change en général que peu les résultats. Il en va de même pour le débit de base, qui est pratiquement toujours inférieur de plusieurs ordres de grandeur au débit de ruissellement.

b) Domaine de validité

Temps de retour

De par sa nature événementielle, et au vu des hypothèses formulées ci-dessus, le modèle CRUEX ne doit être appliqué tel quel que dans des conditions hydro-météorologiques qui maximisent la crue de projet. De ce fait, le temps de retour de la crue générée n'a pas lieu d'être estimée. Cette approche n'est en revanche pas souhaitable pour modéliser des crues ayant une certaine probabilité d'occurrence (typiquement pour un temps de retour 100 ans). Elle impliquerait l'hypothèse trop contraignante de l'équivalence entre le temps retour de la pluie de projet et celui de la crue de projet. On peut cependant garder certains éléments du modèle (comme la fonction de transfert et sa paramétrisation) et travailler en mode continu ou en mode multi-événementiel, ce qui permettrait d'attribuer aux crues un certain temps de retour. L'approche multi-événementielle avait été utilisée par CONSUEGRA et al. (1998) pour estimer les crues du Rhône en Valais. Elle est décrite au chapitre 4.1.2 b) du présent guide.

Surface du bassin versant

Le modèle CRUEX a été conçu et paramétrisé de manière à simuler des PMF pour des bassins versants alpins dont la surface est comprise entre 20 et 200 km². Cette gamme de surface correspond assez bien aux bassins alpins situés en amont des principaux barrages de Suisse. Il n'est pas recommandé de l'utiliser en dehors de cette gamme de surface.

Région géographique

La zone d'application du modèle est la région alpine de Suisse. Les régimes hydrologiques des bassins versants doivent être de type « alpin » selon la Planche 5.2 de l'Atlas Hydrologique de la Suisse (WEINGARTNER et ASCHWANDEN 1992). Ceci correspond approximativement aux bassins versants qui ont une altitude moyenne de 1550 mètres et plus. La méthode n'est pas applicable aux bassins dont l'écoulement naturel est fortement modifié par des aménagements hydro-électriques en amont du point de calcul.

Données de base nécessaires

Outre la PMF, qui constitue la variable d'entrée, la majorité des données de base nécessaires à l'application du modèle CRUEX sont disponibles auprès de l'Office fédéral de la topographie (OFT). Par exemple, l'altitude et la pente moyenne peuvent être calculées avec le modèle numérique d'altitude MNA25. L'OFT peut également fournir le réseau hydrographique mesuré et digitalisé au 1:25'000 (VECTOR25), à partir duquel on

peut estimer β . Enfin, les cartes topographiques de l'OFT peuvent être utilisées pour délimiter les bassins versants et en déduire la surface.

Une autre source d'information qui peut être exploitée est l'Atlas hydrologique de la Suisse (SPREAFICO et al. 1992). Il permet d'identifier le régime hydrologique approprié et la proportion de la surface du bassin versant couverte par les glaciers.

Performance du modèle CRUEX

Bien évidemment, il n'est pas possible de chiffrer la performance du modèle CRUEX à reproduire les PMF. On peut cependant évaluer son aptitude à reproduire des événements observés des bassins versants alpins qui ont servi à la validation de la formule régionale de β et de la fonction de transfert. Les événements considérés se sont tous produits en été (pas de précipitations sous forme de neige) et les coefficients de ruissellement ont été déterminés à partir des enregistrements débitométriques et pluviométriques. L'erreur moyenne absolue sur le débit de pointe des événements observés est de 30% environ.

5 Estimation des crues sans mesures de débit

Les expériences faites en Suisse montrent que, pour l'estimation des crues, il convient de distinguer entre les bassins de *petite* (<10 km²) et de *moyenne surface* (10–500 km²). Les méthodes utilisées pour les bassins moyens ne peuvent pas être transposées telles quelles dans les bassins plus petits, la formation des écoulements et leur concentration n'étant pas dominés par les mêmes processus dans les deux cas. Les conditions qui caractérisent les écoulements dans les petits bassins, variant sur de petites distances, nécessitent des investigations sur le terrain (cartographie) avant la modélisation. Pour les bassins de surface plus grande, en revanche, les paramètres peuvent être déduits de données numériques surfaciques (carte des pentes, cartes pédologiques, etc.). Ceci est souvent risqué pour les très petits bassins, ces données n'étant pas assez détaillées. Par ailleurs, les séries de mesures à disposition pour ces bassins ne sont souvent pas assez longues pour permettre le calage des modèles.

5.1 Bassins de surface moyenne (10 à 500 km²)

5.1.1 Démarche

Les hydrologues savent *qu'il n'existe pas de méthode universelle* pour estimer les crues et qu'il n'en existera pas dans un avenir proche. Grâce aux grands progrès réalisés ces dernières années dans le domaine du traitement des données par ordinateur, on n'est plus limité aujourd'hui à une seule méthode. On peut en utiliser plusieurs et analyser les résultats, ce qui n'était pas possible il y a vingt ans pour des raisons de temps et de coûts. L'estimation des crues est actuellement beaucoup mieux fondée et par conséquent plus plausible. On profite du fait que chaque méthode a ses avantages et ses défauts, différents suivant le type de bassin étudié.

Grâce aux efforts des instituts de recherche et des services de l'administration fédérale, nous disposons actuellement de nombreux moyens et outils pour estimer les crues de façon efficiente. Le problème n'est malgré tout pas simple : il faut disposer de bonnes connaissances en hydrologie pour utiliser les instruments existants de façon optimale et pour interpréter correctement les résultats. Autrefois, le plus gros du travail était le calcul et il ne restait en général que peu de temps pour interpréter ou valider les résultats. Aujourd'hui, grâce aux ordinateurs, le temps consacré aux calculs est raccourci.

Une autre différence entre les méthodes utilisées autrefois et celles d'aujourd'hui est la grandeur recher-

chée. Avec les méthodes anciennes, basées sur la courbe enveloppe, c'était le Q_{max} . Aujourd'hui, c'est plus souvent le HQ_{100} . Cela signifie qu'avec les anciennes méthodes (par ex. Kürsteiner ou Müller-Zeller), les crues rares étaient en général surestimées et que le dimensionnement des ouvrages revenait plus cher, mais que la sécurité était plus élevée. Les nouvelles méthodes donnent en général des résultats plus exacts, même si une surestimation est tout aussi probable qu'une sous-estimation. Comme la stratégie proposée ici combine toujours plusieurs méthodes, le risque d'une sous-estimation est fortement réduit et l'évaluation est dans l'ensemble meilleure.

Selon la stratégie proposée ci-dessous, l'évaluation des crues peut être faite en 4 étapes (v. Fig. 5-1) :

1. Utilisation de plusieurs méthodes appropriées.
2. Analyse de la dispersion des résultats.
3. Correction ou élimination des résultats non plausibles.
4. Evaluation de la valeur de HQ_x , et de son domaine de variation, validation des résultats.

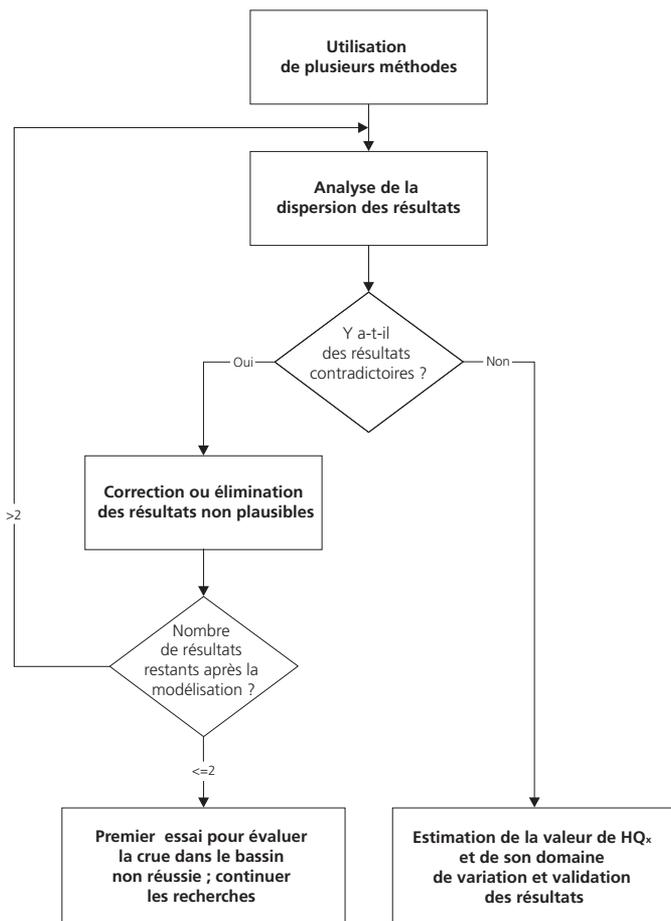


Fig. 5-1 : Evaluation des crues dans les bassins de surface moyenne.

Par cette démarche on obtient non seulement une évaluation de la crue mais aussi un domaine de variation. Cet intervalle peut être considéré comme une sorte de substitut de l'intervalle de confiance (v. Chap. 4.2, Statistique des valeurs extrêmes), si important dans les problèmes de constructions hydrauliques. Dans les chapitres suivants (5.1.2 à 5.1.6), plusieurs méthodes d'évaluation des crues sont présentées et les difficultés que l'on rencontre dans leur application expliquées.

5.1.2 Méthodes

Plusieurs méthodes servant à l'évaluation des crues dans les bassins de moyenne grandeur de Suisse sont présentées dans ce chapitre. Des objectifs différents peuvent être atteints selon la méthode employée :

- Q_{\max} : Les méthodes basées sur la courbe-enveloppe englobant l'ensemble des plus fortes crues observées (HHQ) (Kürsteiner, Müller-Zeller et GIUB'96). Les valeurs HQ_{\max} obtenues par différentes méthodes peuvent difficilement être comparées entre elles, vu que ces méthodes ne reposent pas sur les mêmes données de base. Les valeurs HQ_{\max} sont souvent utilisées pour estimer les crues extrêmes (EHQ) (v. Chap. 4.3).
- HQ_{20} , HQ_{100} : Méthodes de calcul des pointes de crue pour différentes périodes de retour (Kölla, GIUB'96).

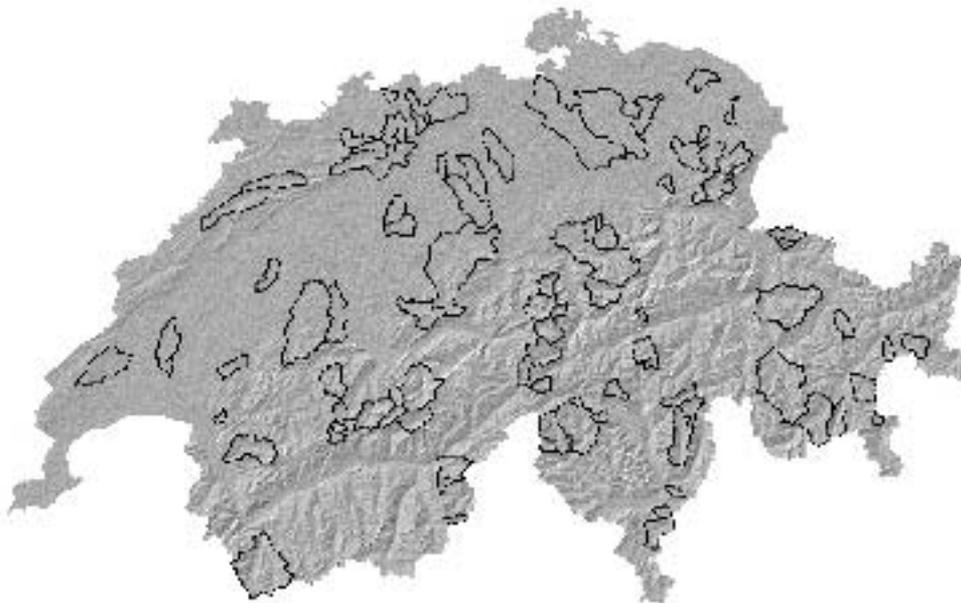


Fig. 5-2 : Carte des bassins-tests de Suisse.

- HQ_x : Méthodes permettant de choisir librement la période de retour (Moments, BaD7).

La plupart des méthodes présentées ici ont été comparées entre elles (BARBEN 2001) et intégrées dans un paquet de programmes portant le nom de HQ_{x_meso_CH} (v. Chap. 5.1.3). Les résultats des calculs ont été comparés à des valeurs de référence déterminées par analyse statistique des séries de débits mesurées dans les 95 bassins-tests de Suisse (extrapolation de HQ₁₀₀, v. aussi Chap. 4.2, Statistique des valeurs extrêmes).

Suite à la description des modèles, la comparaison des résultats obtenus avec les valeurs de référence est présentée dans le chapitre «Qualité des résultats» (Graphiques et coefficients de corrélation). La répartition spatiale des écarts est aussi étudiée :

- Les écarts relatifs [%] par rapport aux valeurs de référence ont été reportés sur une carte de la Suisse en pseudo-3D (maillage de 10 km). Les écarts relevés dans les 95 bassins de référence ont été utilisés comme base pour l'interpolation spatiale. Le plan x-y est basé sur les coordonnées nationales de la Suisse.
- Les chiffres fournis par l'interpolation ont été utilisés pour calculer les écarts relatifs moyens par rapport aux bassins tests. Ces bassins sont ceux de l'Atlas hydrologique de la Suisse » (HADES). Les écarts relatifs ont été classés : d'un rouge sombre pour une sous-estimation par rapport à la valeur de référence de plus de 50% à un vert sombre pour une surestimation de plus de 500%.

Légende des figures du chapitre « Qualité des résultats »

Ecart par rapport aux valeurs de référence [%]

Sous-estimation	Ecart faible	Surestimation
 <-50	 -25 à 25	 25 à 50
 -50 à -25		 50 à 100
		 100 à 500
		 > 500

La description des méthodes se base sur les travaux des différents auteurs. La méthode HQ_{x_meso_CH} détermine automatiquement les paramètres des modèles. On peut cependant en modifier quelques-uns selon sa propre expérience et ses connaissances. Pour les méthodes récentes, le choix des paramètres ne pose en principe pas de problème étant donné qu'elles sont basées sur des données digitales. Les plus anciennes peuvent mener à des écarts peu importants par rapport aux méthodes classiques

La méthode de Kölla est présentée au chapitre 5.1 (bassins de surface moyenne) ainsi que dans le chapitre 5.2 (petits bassins versants). Pour éviter des confusions, elle est appelée « Kölla meso » dans la partie consacrée aux bassins de surface moyenne.

Le choix des paramètres des modèles dépend de l'expérience des utilisateurs et de leur connaissance du bassin. Dans la présente publication, les paramètres sont calculés par le programme HQ_{x_meso_CH}. Les utilisateurs du programme peuvent toutefois en modifier quelques-uns sur la base de leurs connaissances.

a) Kürsteiner

Description du modèle

Kürsteiner (1917) utilise pour l'estimation des débits de pointe une courbe-enveloppe de la forme $Q_{\max} = a \cdot F^b$, où a n'est pas constant mais varie en fonction de la pente (v. Tab. 5-1). En Suisse, on utilise la lettre c plutôt que le a pour ce même facteur: par la suite nous l'appellerons c *selon Kürsteiner*.

$$Q_{\max} = c \cdot F^{2/3}$$

Q_{max} Débit de pointe [m³/s]

c Coefficient caractérisant le bassin versant [-]

F Surface de bassin [km²]

	c
Terrain relativement plat, bordé de collines peu élevées ; fonds drainés	2,5 à 4
Terrain en partie plat, en partie vallonné	4 à 6
Terrain principalement vallonné des Préalpes	6 à 9
Bassin montagneux, avec des versants en forte pente	9 à 12
Bassin comprenant des glaciers	3 à 5

Tableau 5-1 : Valeurs de c selon Kürsteiner et Heusser¹.

Le programme HQ_{x_meso_CH} comprend une détermination des valeurs de c basée sur les pentes et la surface de glacier des bassins (v. Tab. 5-1). A chaque point de la grille du modèle des altitudes (RIMINI, intervalle 100 m) est associée une pente. Une valeur moyenne de c en est déduite, selon la figure 5-3. La limite entre « plat » et « vallonné » a été fixée à 5°,

¹La méthode est connue sous le nom de Kürsteiner. Heusser (1947) a déterminé les valeurs du coefficient c avec précision, Kürsteiner (1917) ne s'étant exprimé que très vaguement à ce sujet : «Les débits spécifiques ont été calculés à l'aide de la formule déduite de façon empirique sur la base d'un grand nombre de débits de crues observés $Q = (9 \text{ à } 12)/F^{1/3}$ »

celle entre « vallonné » et « en forte pente » à 25°. La surface de glacier vient de la « Statistique de la superficie » (OFS 1985). On a attribué à c une valeur de 4 pour les glaciers.

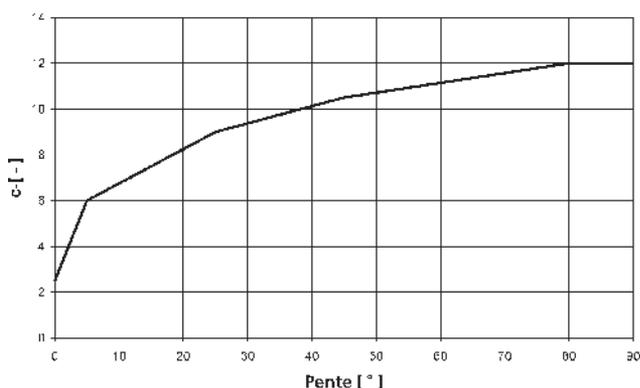


Fig. 5-3 : Valeur de c dans le programme HQx_meso_CH, d'après Heusser (1947).

Différentes méthodes sont utilisées en Suisse sous le nom de Kürsteiner. Elles n'ont en réalité repris de Kürsteiner que l'exposant b, le coefficient c y étant déterminé sur la base de crues mesurées et non pas des caractéristiques du bassin².

Domaine d'application et expériences

Période de retour de l'événement

Heusser (1947) signale que Q_{\max} est à peu près égal à Q_{100} . Mais une comparaison entre les valeurs selon Kürsteiner et les valeurs de référence montre une légère surestimation (environ 40%).

Surface des bassins

Kürsteiner (1917) ne précise malheureusement pas la surface des bassins auxquels sa formule peut s'appliquer et quels bassins il a utilisés pour l'étalonner. Heusser (1947), en revanche, a publié une figure d'où il ressort que la plupart des bassins versants utilisés ont une surface comprise entre 5 et 500 km².

Types de bassins

Ni Kürsteiner ni Heusser n'expriment de réserves quant à l'utilisation de leur méthode. On peut en conclure que le modèle peut être appliqué dans toute la Suisse sans restrictions.

Données nécessaires

La surface du bassin versant et le coefficient c doivent être introduits dans le modèle. Le programme HQx_meso_CH calcule sa valeur c à partir des données disponibles.

Exemple de la Langete

c selon HQx_meso_CH = 5,81

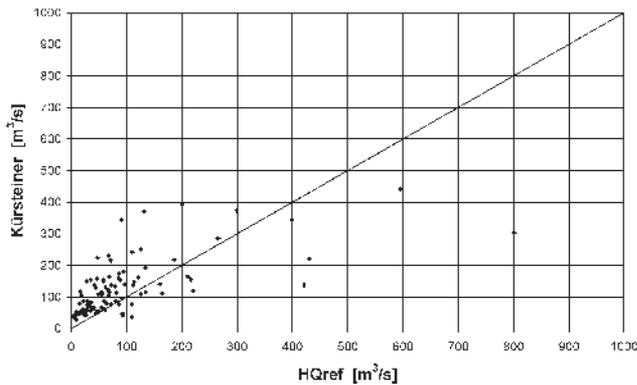
$$Q_{\max} = 5,81 \cdot 58,7^{2/3} = 88 \text{ m}^3/\text{s}$$

Qualité des résultats

La comparaison entre les résultats selon Kürsteiner et les valeurs de référence (HQ_{100}) montre une dispersion importante. La plus grande partie des résultats se situe au-dessus de la droite 1:1. Le Q_{\max} selon Kürsteiner est donc de façon générale nettement plus grand que HQ_{100} de référence. On constate des différences importantes pour deux régions : Bâle-Campagne et la Basse-Engadine. Entre les deux, donc pour une large bande s'étendant du sud au nord-est de la Suisse, le modèle livre des résultats relativement satisfaisants.

La structure de la méthode de Kürsteiner est très simple. On peut y apporter des améliorations en distinguant des régions homogènes auxquelles une valeur de c peut être attribuée.

² Le chapitre « Qualité des résultats » est basé uniquement sur les méthodes de Kürsteiner et Heusser.



Coefficients de corrélation Kärsteiner / Référence

Pour tous les bassins (95)	0,648
Bassins avec Fn < 200 km2 (87)	0,575
Bassins avec Fn < 100 km2 (70)	0,475

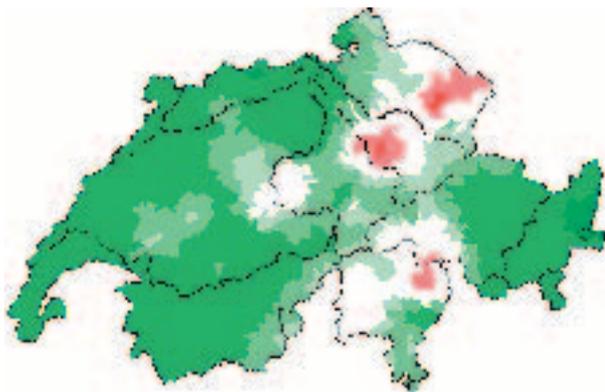
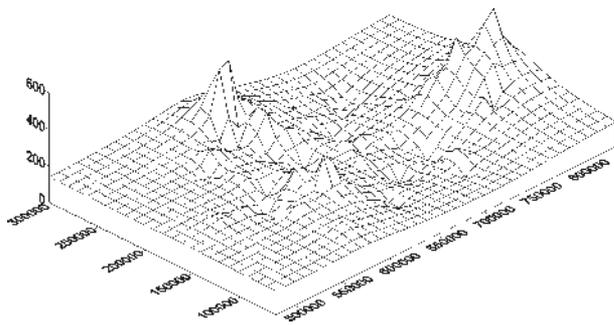


Fig. 5-4 : Résultats de l'évaluation des crues selon Kärsteiner.
 En haut : évaluation selon Kärsteiner et valeurs de référence (HQ₁₀₀).
 Tableau : coefficients de corrélation Evaluation / Valeurs de référence (HQ₁₀₀).
 En bas : écart relatif par rapport aux valeurs de référence en %.
 (Légende de la carte : voir page 55)

b) Müller-Zeller

Description du modèle

La méthode de MÜLLER (1943) ressemble à celle de KÜRSTEINER (1917). Müller a aussi utilisé une courbe-enveloppe de la forme $Q_{\max} = c \cdot F^b$, où l'exposant est aussi de 2/3. Le coefficient d'écoulement est appelé Ψ chez Müller. Il dépend de la végétation et de la pente (v. Tableau 5-5). ZELLER (1975) a affiné la méthode et y a ajouté une carte des fortes précipitations (v. Fig. 5-5).

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

- Q_{\max} Point de crue [m³/s]
- α Coefficient de zone [-]
- Ψ Coefficient d'écoulement [-]
- F Surface du bassin versant [km²]

Altitude	Caractère	Ψ De plat à abrupt
Au-dessus de la limite des forêts	Sols de pâturages imperméables, rocher Pentes d'éboulis (Zeller)	0,4 à 0,8 0,05 à 0,4
Proche de la limite des forêts	Pâturages avec buissons, arbres isolés Forêts clairsemées	0,3 à 0,7 0,2 à 0,6
Altitudes plus basses	Forêts jeunes, prairies et terres labourées Zones marécageuses (Zeller)	0,1 à 0,5 0,3 à 0,6

Tableau 5-2 : Coefficient d'écoulement Ψ selon Müller et Zeller.

Le coefficient d'écoulement Ψ est une fonction de la pente et de l'occupation du sol. Le programme HQx_meso_CH détermine l'occupation des sols à l'aide de la « Statistique de la superficie » (OFS 1985) et leur attribue une valeur de Ψ en tenant compte de la pente (Tableau 5-2). La limite entre terrain plat et moyennement abrupt est fixée à 5°, celle entre moyennement abrupt et abrupt à 25°. Pour utiliser les informations sur l'occupation des sols, les classes de la « Statistique de la superficie » doivent être adaptées de façon pragmatique aux classes de Müller. Les surfaces de glacier relativement importantes correspondent généralement à un Ψ de 0,1, les agglomérations à 0,5 (quelle que soit la pente). La statistique de la superficie ne tient pas compte de l'âge des forêts. L'utilisateur peut modifier la valeur de Ψ déterminée par HQx_meso_CH selon sa connaissance du bassin et son expérience. ZELLER (1975) distingue trois zones pour les valeurs de α ($\alpha = 20, 35$ ou 50 , v. Fig. 5-5). Ces zones reflètent indirectement les zones de fortes précipitations de la Suisse.



α: 20 35 50

Fig. 5-5 : Carte des zones α (selon Zeller).

Qualité des résultats

Les coefficients de corrélation sont nettement plus élevés qu'avec le modèle de Kürsteiner. Cela signifie que l'estimation des crues selon Müller-Zeller est nettement meilleure qu'avec Kürsteiner, ce qui s'explique par le fait que le modèle tient compte de la répartition des précipitations et des caractéristiques régionales. Les régions posant problème, soit Bâle-Campagne et la Basse-Engadine, sont les mêmes que celles mentionnées à propos de Kürsteiner (v. Fig. 5-6)

Domaine d'application et expériences

Période de retour de l'événement

Müller ne donne pas d'indication sur la période de retour. La comparaison avec les valeurs de référence (HQ₁₀₀) montre une surestimation d'environ 80%.

Surface des bassins

Müller estime que sa première méthode (ne tenant pas compte des précipitations) est valable pour des bassins de 2 à 1000 km². Zeller limite l'application de sa carte des zones de précipitations à des bassins d'une surface comprise entre 0,5 et 100 km². Pour l'utilisation de la méthode de Müller avec celle de Zeller, le domaine de validité est donc de 2 à 100 km².

Types de bassins

Müller ne fixe aucune limite à sa méthode selon le type de bassin. L'utilisation du programme HQx_meso_CH peut créer des problèmes importants pour des bassins de haute altitude ou à forte densité de constructions. Dans ces cas, il est recommandé d'adapter le coefficient Ψ .

Données nécessaires

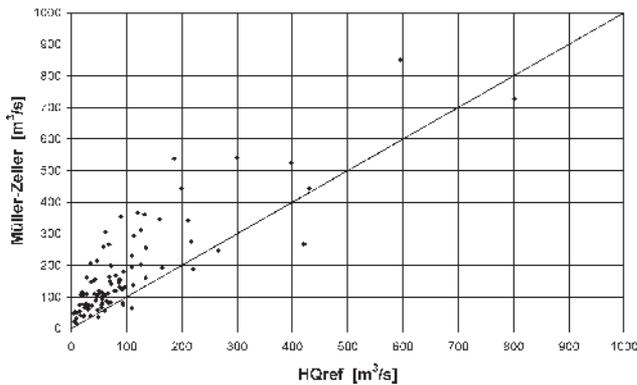
Le modèle requiert l'introduction des valeurs α et Ψ . Le programme HQx_meso_CH calcule ces paramètres automatiquement à l'aide des données disponibles.

Exemple de la Langete

α selon HQx_meso_CH = 34,7

Ψ selon HQx_meso_CH = 0,20

$Q_{\max} = 34,7 \cdot 0,2 \cdot 58,7^{2/3} = 105 \text{ m}^3/\text{s}$



Coefficients de corrélation Müller-Zeller / Référence

Pour tous les bassins (95)	0,840
Bassins avec Fn < 200 km² (87)	0,798
Bassins avec Fn < 100 km² (70)	0,649

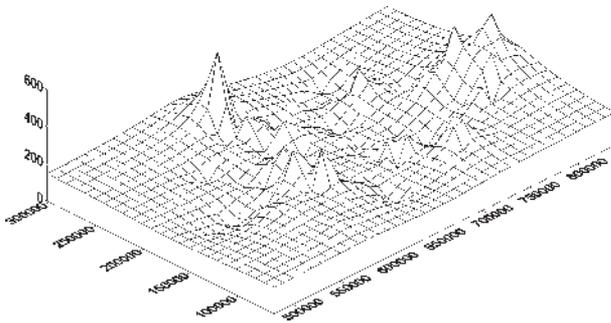


Fig. 5-6 : Résultats de l'évaluation des crues selon Müller-Zeller.
 En haut : évaluation selon Müller-Zeller et valeurs de référence (HQ₁₀₀).
 Tableau : coefficients de corrélation Evaluation / Valeurs de référence (HQ₁₀₀).
 En bas : écart relatif par rapport aux valeurs de référence en %.
 (Légende de la carte : voir page 55).

c) Kölla meso

Description du modèle

La méthode de KÖLLA (1986) appartient à la famille des méthodes du *temps de propagation*. Elle part du principe que les crues ont lieu lorsque l'ensemble du bassin versant participe aux écoulements, c'est-à-dire quand les précipitations tombées sur le point le plus éloigné de la section de mesure atteignent celles-ci. Le temps écoulé entre le début des pluies et la pointe de crue est appelé *temps de concentration*.

La formule rationnelle (rational formula) est la plus simple pour évaluer la crue à l'aide de la méthode du temps de propagation :

$$HQ_x = r_x(t_c) \cdot \Psi_s \cdot F_n$$

- HQ_x pointe de crue d'une périodicité de x années [m³/s]
- r_x intensité des précipitations d'une périodicité de x [mm/h]
- t_c temps de concentration du bassin [h]
- Ψ_s coefficient du débit de pointe [-]
- F_n surface du bassin [km²]

La méthode de Kölla est un perfectionnement de la formule rationnelle ; le coefficient du débit de pointe y est remplacé par la surface productive, qui augmente avec la période de retour.

$$HQ_x = (r_x(t_{cc(x)}) + r_s - f_x) \cdot (FL_{eff(x)} + FL_b) \cdot 0,278 + Q_{vgl(x)}$$

- r_x intensité des précipitations [mm/h] d'une pluie continue d'une durée t
- t_c temps de concentration [h] avec t_c = t₁ + t₂
- t₁ durée de la pluie [h]
- t₂ temps de propagation dans le cours d'eau [h]
- r_s quantité d'eau provenant de la fonte de la couche de neige [mm/h]
- f_x pertes [mm/h]
- FL_{eff} surfaces productives [km²]
- FL_b surfaces compactées [km²]
- Q_{vgl} écoulement provenant des glaciers [m³/s]
- 0,278 facteur de conversion [mm/h] >> [m³/s]

KÖLLA (1986) décrit sa méthode de la façon suivante :
 « Une crue se produit après une pluie d'une certaine intensité tombant sur une surface reliée hydrauliquement à un chenal et s'écoulant par ce chenal pour arriver à la section de mesure, sans la part qui se perd dans le sol ou qui contribue à augmenter le volume de la zone saturée proche du cours d'eau. La pointe de crue, la surface productive et les pertes éventuelles sont fonction de la période de retour x choisie ».

Domaine d'application et expériences

Période de retour de l'événement

La méthode KÖLLA fournit une estimation des crues HQ₂₀, HQ₁₀₀ et HQ_{2,33}. Dans le programme HQx_meso_CH, on se limite cependant au calcul de HQ₂₀ et HQ₁₀₀.

Surface des bassins

KÖLLA (1986) limite l'application de sa méthode aux bassins de 1 à 100 km². Dans le programme HQx_meso_CH, les précipitations régionales peuvent être réduites, ce qui n'était pas possible avec la méthode originelle de Kölla. Le programme Kölla meso peut par conséquent être appliqué à des bassins de plus de 100 km² (jusqu'à environ 500 km²). Dans ce cas, il faudrait toujours faire intervenir une réduction des précipitations, les précipitations ponctuelles habituellement utilisées n'étant valables que pour des bassins très petits. La limite inférieure de la surface admise par KÖLLA (1 km²) est trop petite pour HQx_meso_CH, ce programme déterminant la longueur des cours d'eau à l'aide du réseau hydrographique au 1:25'000 (L+T 1999), qui ne tient compte que des cours d'eau pérennes (en bleu sur les cartes nationales). Selon KÖLLA (1986), les cours d'eau temporaires devraient aussi être pris en compte (lignes noires pointillées sur les cartes nationales). Pour les très petits bassins, le fait de laisser de côté les cours d'eau temporaires peut avoir une forte influence sur les résultats obtenus, c'est pourquoi l'utilisation de Kölla meso avec HQx_meso_CH n'est pas recommandée pour les bassins plus petits que 10 km². Si la proportion de cours d'eau temporaires est importante, ceux qui figurent dans la carte nationale au 1:25'000 peuvent être introduits manuellement dans le programme.

Types de bassins

La détermination des caractéristiques du terrain ainsi que le choix du volume de pluie et des pertes est fait, dans HQx_meso_CH, comme dans Kölla meso, à l'aide de la carte des aptitudes des sols (OFS 1980), qui est axée sur leur utilisation en agriculture. Les régions d'altitude élevée, qui ne sont pas propices à l'agriculture, ne sont pas cartographiées de façon très précise. L'utilisation du programme dans ces zones requiert un examen critique des paramètres déterminés automatiquement.

Données nécessaires

Différents paramètres concernant la morphologie du bassin et les précipitations doivent être introduits dans le modèle. Le programme HQx_meso_CH les calcule

automatiquement à partir des données disponibles. Les valeurs des fortes précipitations sont tirées de l'Atlas hydrologique de la Suisse (Planche 2.4, GEIGER et al.). Les données relatives aux précipitations peuvent être modifiées manuellement (par ex. pour introduire les fortes pluies de la Planche 2.4²). HQx_meso_CH détermine l'intensité des pluies par itération.

Exemple de la Langete

Valeurs de HQx_meso_CH :

$$r_x = 13,59 \text{ mm/h}$$

$$t_c = 4,98 \text{ h}$$

$$r_s = 1,66 \text{ mm/h}$$

$$f_x = 4,37 \text{ mm/h}$$

$$F_{Leff} = 22,00 \text{ km}^2$$

$$F_{Lb} = 1,49 \text{ km}^2$$

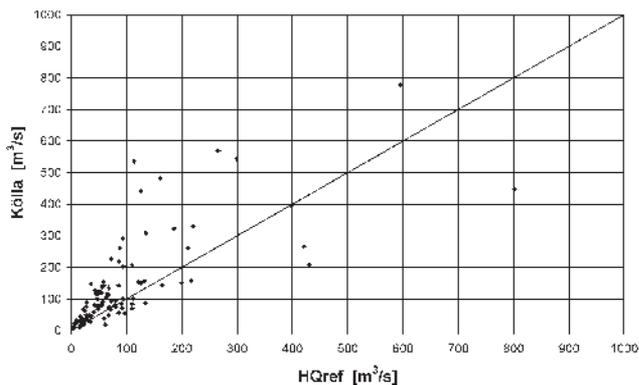
$$Q_{vgl} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$HQ_{100} = 71 \text{ m}^3/\text{s}$$

Qualité des résultats

La dispersion des résultats est assez forte (v. Fig. 5-7, en haut). La comparaison entre les résultats selon Kölla meso et les valeurs de référence (HQ₁₀₀) montre que les points ne sont pas répartis également de chaque côté de la droite 1:1. Il faut compter en moyenne avec une surestimation des résultats de quelque 25% avec la méthode Kölla. Les valeurs les plus fortement surestimées se répartissent de façon plus homogène dans toute la Suisse qu'avec les méthodes de Kürsteiner et de Müller-Zeller.

L'analyse montre que les résultats selon Kölla meso sont fortement influencés par r_x (gradient des précipitations). Les différences avec les valeurs de référence sont les plus importantes dans les régions où il est extrême (par ex. près du Rigi, v. Tableau 5-7). Il convient alors d'avoir recours à d'autres méthodes pour pouvoir comparer les résultats.



Coefficients de corrélation Kölla meso / Référence

Pour tous les bassins (95)	0,728
Bassins avec $F_n < 200 \text{ km}^2$ (87)	0,631
Bassins avec $F_n < 100 \text{ km}^2$ (70)	0,627

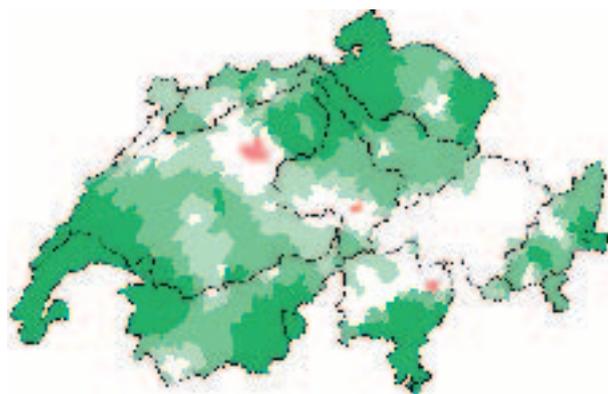
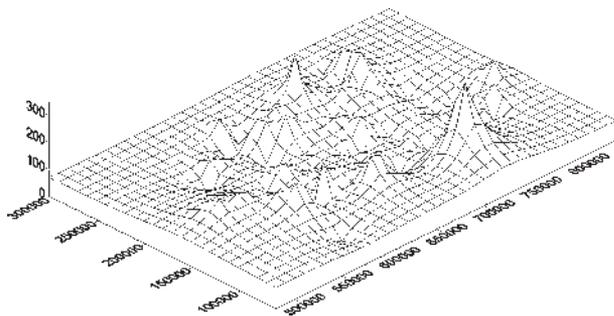


Fig. 5-7 : Résultats de l'évaluation des crues selon Kölla meso.
En haut : évaluation selon Kölla meso et valeurs de référence (HQ_{100}).
Tableau : coefficients de corrélation Evaluation / Valeurs de référence (HQ_{100}).
En bas : écart relatif par rapport aux valeurs de référence en %.
(Légende de la carte : voir page 55)

d) GIUB'96

Description du modèle

Pour ce modèle, KAN (1995) et WEINGARTNER (1999) ont analysé plus de 700 points de crues répertoriées par l'ancien Office fédéral des routes et des digues (ORD 1974) et par le SHGN (SPREAFICO & STADLER 1986 et 1988 et SPREAFICO & ASCHWANDEN 1991) (v. Fig. 5-8). Les mesures utilisées datent de 1869 à 1991.

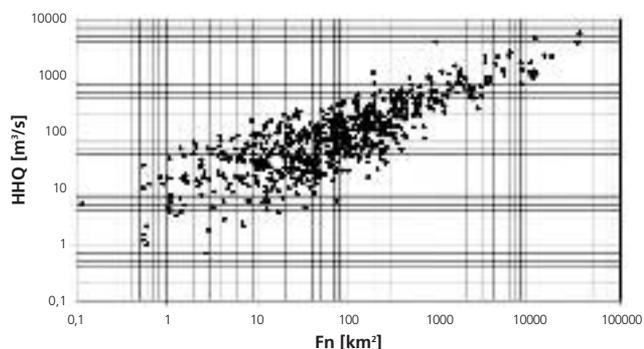


Fig. 5-8 : Données utilisées pour le modèle GIUB'96 (Tiré de WEINGARTNER 1999)

Des régions ayant les mêmes types de crue ont été délimitées à partir de cet ensemble de données couvrant toute la Suisse (v. Fig. 5-10). La méthode est décrite en détail dans KAN (1995) et WEINGARTNER (1999). Pour chacune de ces provinces, des paramètres permettant l'évaluation des crues centennales et de Q_{\max} ont été définis (v. Fig. 5-9).

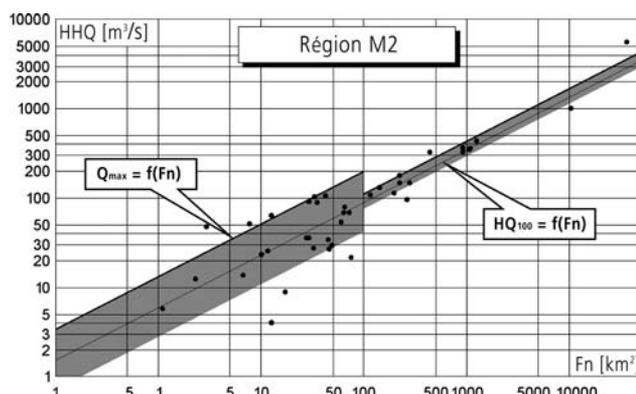


Fig. 5-9 : Courbe enveloppe régionale pour la région M2 ($Q_{\max} = f(F_n)$ et $HQ_{100} = f(F_n)$) (Tiré de WEINGARTNER 1999).

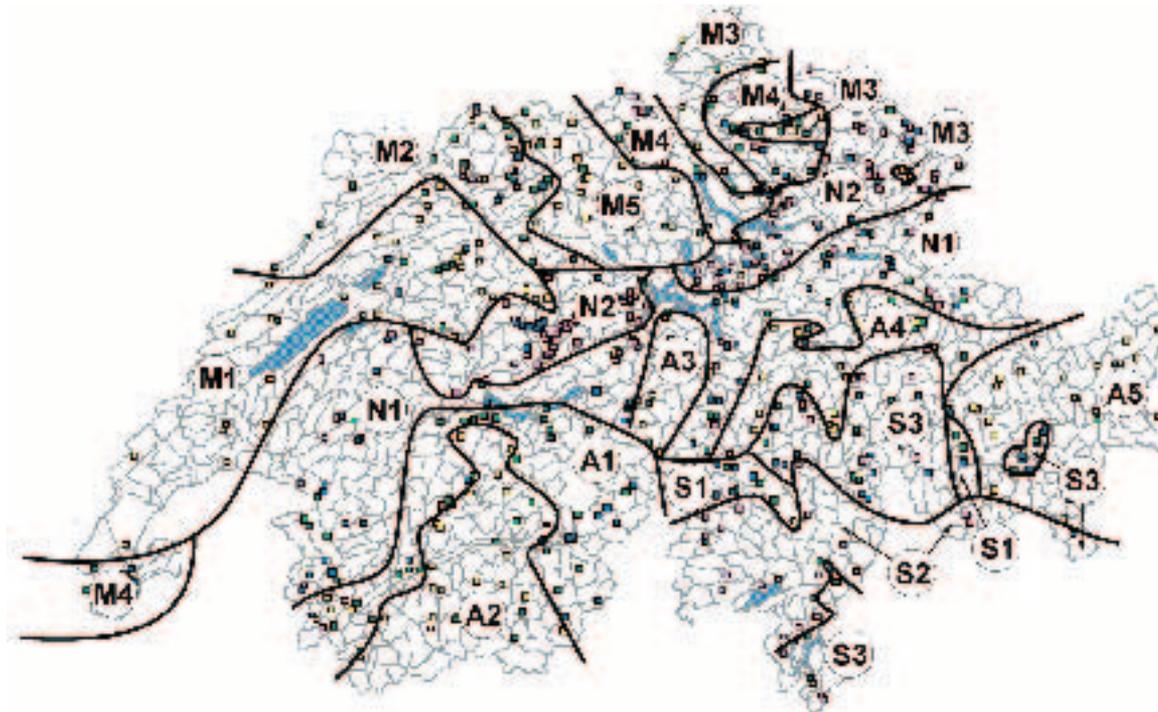


Fig. 5-10 : Régions de crues du même type en Suisse (selon KAN 1995).

WEINGARTNER (1999) présente en fait deux modèles dans GIUB'96. Le premier, appelé plus bas *GIUB'96 (Fn)*, considère le débit de pointe comme une fonction de la surface du bassin. Le second, que nous appellerons *GIUB'96 (MQ)*, modélise le débit de pointe comme une fonction du débit moyen annuel. Les deux modèles utilisent des paramètres permettant la détermination de HQ_{100} et de Q_{max} :

$$\begin{aligned} \text{Modèle 1: } HQ_{100} &= a \cdot Fn^b & Q_{max} &= a \cdot Fn^b \\ \text{Modèle 2: } HQ_{100} &= a \cdot MQ^b & Q_{max} &= a \cdot MQ^b \end{aligned}$$

- HQ_{100} Débit de pointe de la crue centennale [m^3/s]
- Q_{max} Débit de pointe maximum [m^3/s]
- a,b Paramètres spécifiques de la région
- MQ Débit annuel moyen [m^3/s]
- Fn Surface du bassin [km^2]

Ces fonctions ont une structure semblable à celles de KÜRSTEINER (1917). Pour KÜRSTEINER, elles s'appliquaient à l'ensemble de la Suisse alors que pour la méthode GIUB'96, le pays a été divisé en régions le plus homogènes possible, caractérisées par des paramètres spécifiques. Par ailleurs, le modèle GIUB'96 a pu intégrer un ensemble de données beaucoup plus vaste que les méthodes plus anciennes.

Région	n	b	a		HQ100	r ²
			Q _{max} (Fn ≤ 100 km ²)	Q _{max} (Fn > 100 km ²)		
M1	46	0,73	2,37	2,82	1,44	0,90
M2	41	0,59	13,18	7,59	5,98	0,81
M3	24	0,61	4,79	3,63	2,65	0,84
M4	54	0,58	11,89	12,30	7,86	0,92
M5	24	0,79	1,51	1,02	0,68	0,94
N1	108	0,60	13,18	12,02	7,18	0,88
N2	138	0,54	33,11	23,99	17,66	0,83
A1	55	0,64	7,08	6,03	4,36	0,91
A2	34	0,74	2,0	1,88	1,30	0,86
A3	15	0,78	2,40	(1,78)	1,40	0,85
A4	28	0,91	1,51	(1,68)	0,94	0,87
A5	27	0,83	1,26	1,20	0,90	0,95
S1	27	0,58	11,22	(11,48)	0,83	0,72
S2	27	0,69	19,95	19,50	12,41	0,79
S3	68	0,74	7,08	7,50	4,41	0,87
Suisse	717	0,566	–	–	7,20	0,67

(1,78) : grandeur de l'échantillon trop petite pour déterminer a.

Tableau 5-3 : Paramètres régionaux a et b pour la détermination de la courbe enveloppe $Q_{max} = a \cdot Fn^b$ et des droites de régression $HQ_{100} = a \cdot Fn^b$ en fonction de la surface du bassin versant Fn (Modèle GIUB'96 (Fn)) ; n = nombre d'événements de l'échantillon, r² = mesure de la précision du modèle de régression. Unités : Q_{max} et HQ₁₀₀ [m^3/s], Fn [km^2].

Région	n	b	a			r ²
			Q _{max} (MQ ≤ 3 m ³ /s)	Q _{max} (MQ > 3 m ³ /s)	HQ ₁₀₀	
M1	28	0,71	33,11	31,62	22,29	0,94
M2	21	0,71	–	57,54	37,27	0,91
M3	10	0,64	–	–	23,76	0,87
M4	27	0,59	–	81,28	53,98	0,96
M5	22	0,75	15,85	–	14,81	0,94
N1	62	0,62	56,23	75,86	41,14	0,86
N2	34	0,65	141,25	109,65	75,10	0,87
A1	46	0,70	41,69	37,58	26,74	0,87
A2	32	0,81	20,41	19,95	12,80	0,86
A3	12	0,66	–	–	17,13	0,89
A4	23	0,87	24,55	–	14,67	0,83
A5	26	0,89	23,99	22,39	15,34	0,92
S1	23	0,69	50,12	–	33,46	0,82
S2	24	0,68	–	141,25	94,79	0,67
S3	62	0,75	118,85	63,10	47,20	0,79
Suisse	453	0,714	–	–	31,06	0,79

–: grandeur de l'échantillon trop petite.

Tableau 5-4 : Paramètres régionaux a et b pour la détermination de la courbe enveloppe $Q_{max} = a \cdot MQ^b$ et des droites de régression $HQ_{100} = a \cdot MQ^b$ en fonction du débit annuel moyen MQ (Modèle GIUB'96 (MQ)) ; n = nombre d'événements de l'échantillon, r² = mesure de la précision du modèle de régression ; MQ, Q_{max} et HQ₁₀₀ [m³/s].

Domaine d'application et expériences

Période de retour de l'événement

GIUB'96 se prête à l'estimation des pointes de crues centennales (HQ₁₀₀) et des crues maximales (Q_{max}).

Surface des bassins

On trouvera dans Weingartner (1999) les indications nécessaires pour déterminer graphiquement le domaine d'application de la méthode. Les mesures utilisées pour le calcul des droites de régression y sont représentées par régions (v. Fig. 5-9). La distribution des points dans les graphiques donne une indication sur le domaine d'application. Le modèle est valable sans restrictions pour des bassins de moyenne grandeur.

Types de bassins

Des provinces de crues ont été définies pour toute la Suisse. La prudence est recommandée pour les régions situées près de leurs limites, les résultats pouvant varier fortement de l'une à l'autre.

Données nécessaires

Différents paramètres relatifs à la surface du bassin, à l'emplacement de son exutoire (pour déterminer à quelle région il appartient) ainsi qu'au débit annuel

moyen (MQ) doivent être introduits dans le modèle. Les autres paramètres sont calculés ou choisis automatiquement à partir des données disponibles. Un modèle tiré de WEINGARTNER & ASCHWANDEN (1992) évaluant le débit annuel moyen MQ est intégré dans HQx_meso_CH. Cette valeur peut être modifiée manuellement si des données de meilleure qualité sont disponibles.

Exemple de la Langete

Valeurs HQx_meso_CH:

HQ-Region M2

MQ = 1,49 m³/s

$$HQ_{100} = a \cdot Fn^b \quad a = 5,98 \quad b = 0,59$$

$$HQ_{100} = 66,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$HQ_{100} = a \cdot MQ^b \quad a = 37,27 \quad b = 0,71$$

$$HQ_{100} = 49,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{max} = a \cdot Fn^b \quad a = 13,18 \quad b = 0,59$$

$$Q_{max} = 145,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{max} = a \cdot MQ^b \quad a = \text{---} \quad b = 0,71$$

(Nombre d'événements dans la région insuffisant)

$$Q_{max} = \text{---} \text{ m}^3/\text{s}$$

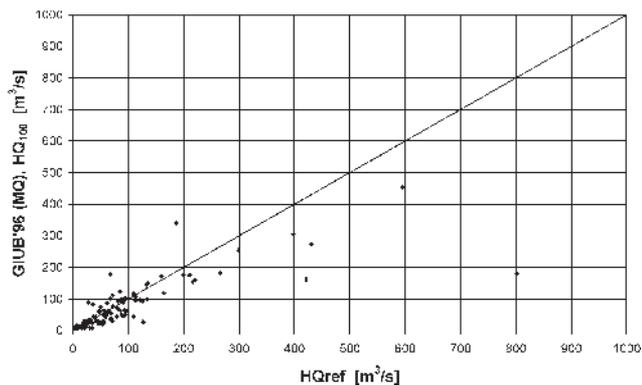
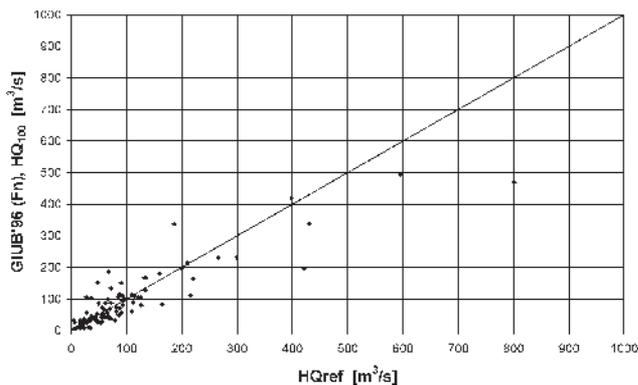
Qualité des résultats

Les deux modèles GIUB'96 ($HQ_{100} = f(Fn)$ et $HQ_{100} = f(MQ)$) donnent des résultats satisfaisants pour des bassins de surface moyenne. La dispersion est très faible (v. Fig. 5-11 et 5-12, en haut). Le niveau général sur l'axe des z est voisin de zéro dans le graphique en pseudo 3D, ce qui signifie que les valeurs calculées correspondent très bien à la pointe de crue centennale.

Il n'y a ni surestimation ni sous-estimation par rapport aux valeurs de référence pour la plus grande partie de la Suisse (v. Fig. 5-11 et 5-12, en bas). Il convient cependant de remarquer que la méthode $HQ_{100} = f(MQ)$ donne pour une partie du Plateau des valeurs trop faibles de 25 à 50 %.

Les modèles GIUB'96 ($HQ_{100} = f(Fn)$ et $HQ_{100} = f(MQ)$) produisent une faible dispersion. Q_{max} produit par GIUB'96 (Fn) est en moyenne environ 45% plus élevé que HQ₁₀₀ et 10% pour GIUB'96 (MQ).

Le modèle GIUB'96 (Fn) est encore plus simple que celui de KÜRSTEINER. La création de provinces de crues a permis d'améliorer fortement la qualité des résultats obtenus.



Coefficients de corrélation GIUB'96 (Fn), HQ100/Référence

Toutes les régions (95)	0,897
Régions avec Fn < 200 km² (87)	0,858
Régions avec Fn < 100 km² (70)	0,766

Coefficients de corrélation GIUB'96 (MQ), HQ100/Référence

Toutes les régions (95)	0,784
Régions avec Fn < 200 km² (87)	0,670
Régions avec Fn < 100 km² (70)	0,784

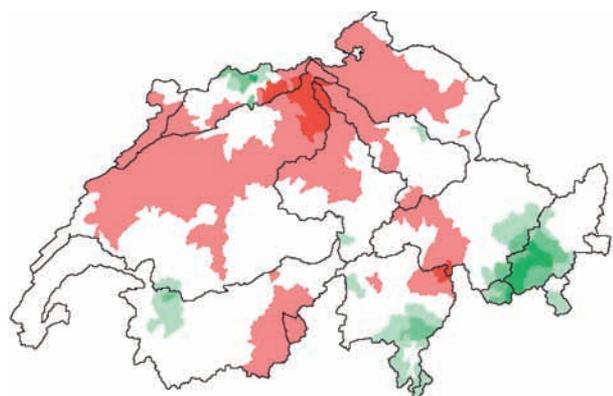
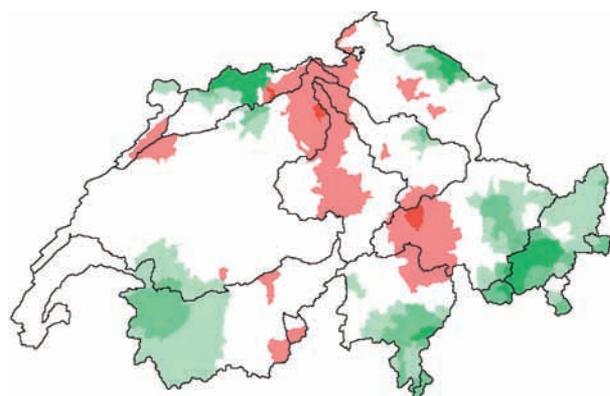
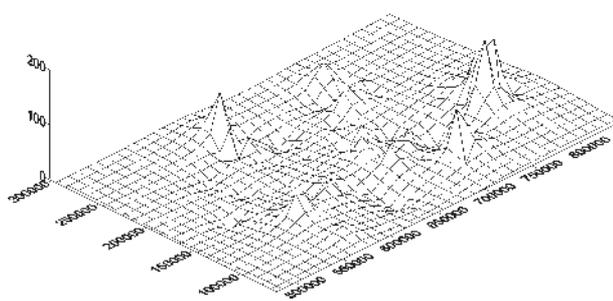
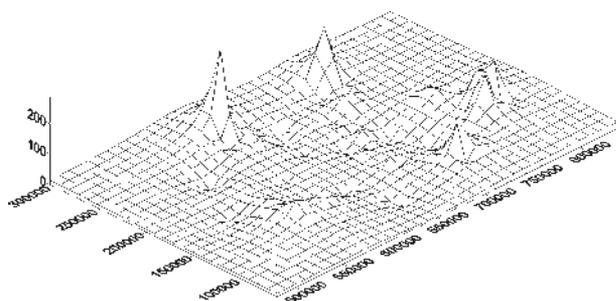
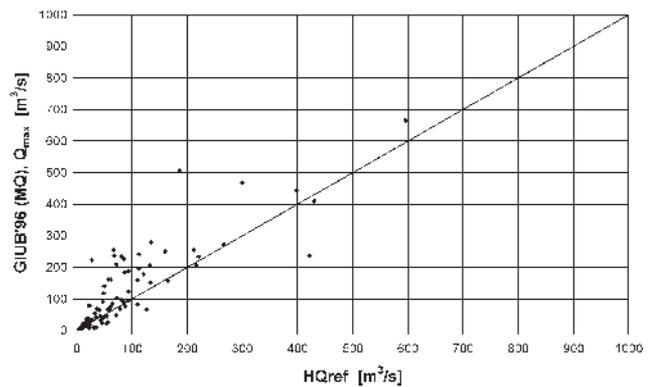
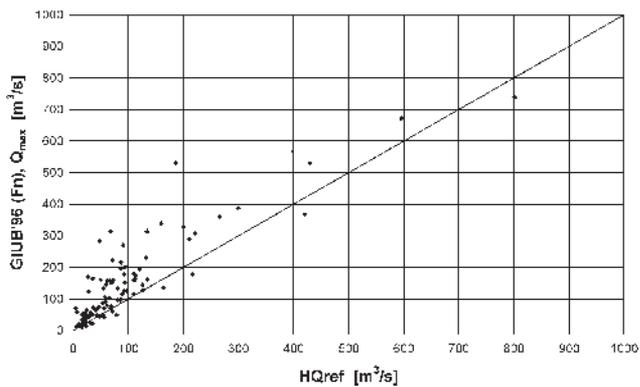


Fig. 5-11 : Résultats de l'évaluation des crues selon GIUB'96 (Fn), HQ100.
 En haut : évaluation selon GIUB'96 (Fn), HQ100 et valeurs de référence (HQ100).
 Tableau : coefficients de corrélation Evaluation/Valeurs de référence (HQ100).
 En bas : écarts relatifs par rapport aux valeurs de référence en %.
 (Légende de la carte, voir page 55).

Fig. 5-12 : Résultats de l'évaluation des crues selon GIUB'96 (MQ), HQ100.
 En haut : évaluation selon GIUB'96 (MQ), HQ100 et valeurs de référence (HQ100).
 Tableau : coefficients de corrélation Evaluation / Valeurs de référence (HQ100).
 En bas : écarts relatifs par rapport aux valeurs de référence en %.
 (Légende de la carte, voir page 55).



Coefficients de corrélation GIUB'96 (Fn), Q_{max}/Référence

Toutes les régions (95)	0,887
Régions avec Fn < 200 km ² (87)	0,845
Régions avec Fn < 100 km ² (70)	0,758

Coefficients de corrélation GIUB'96 (MQ), Q_{max}/Référence

Toutes les régions (95)	0,838
Régions avec Fn < 200 km ² (87)	0,712
Régions avec Fn < 100 km ² (70)	0,660

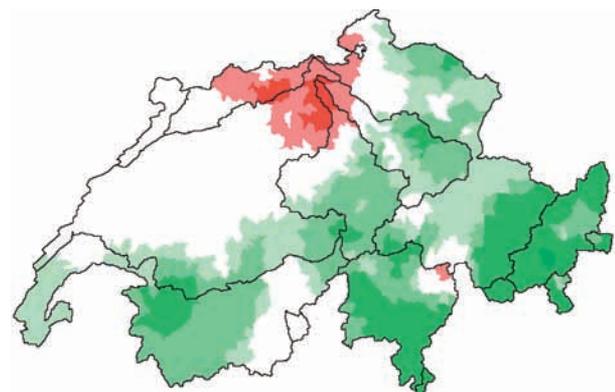
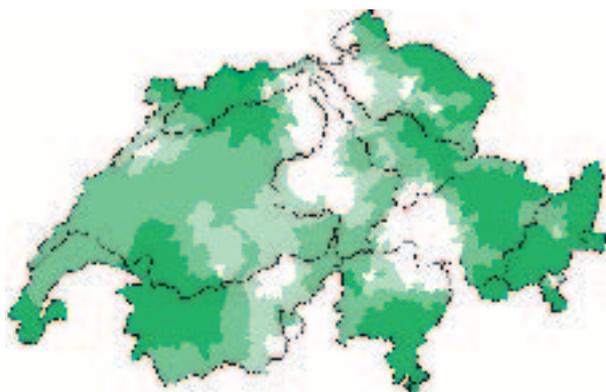
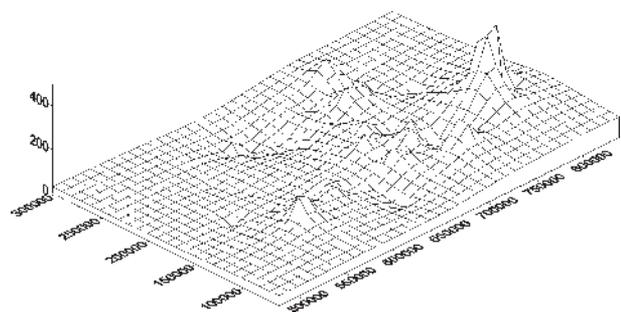
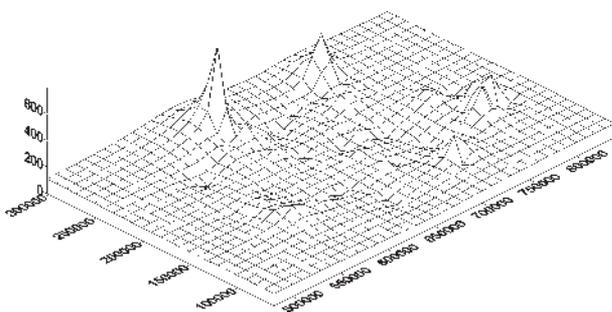


Fig. 5-13 : Résultats de l'évaluation des crues selon GIUB'96 (Fn), Q_{max}.

En haut : évaluation selon GIUB'96 (Fn), Q_{max} et valeurs de référence (HQ₁₀₀).

Tableau : coefficients de corrélation Evaluation/Valeurs de référence (HQ₁₀₀).

En bas : écarts relatifs par rapport aux valeurs de référence en %.
(Légende de la carte, voir page 55).

Fig. 5-14 : Résultats de l'évaluation des crues selon GIUB'96 (MQ), Q_{max}.

En haut : évaluation selon GIUB'96 (MQ), Q₁₀₀ et valeurs de référence (HQ₁₀₀).

Tableau : coefficients de corrélation Evaluation/Valeurs de référence (HQ₁₀₀).

En bas : écarts relatifs par rapport aux valeurs de référence en %.
(Légende de la carte, voir page 55).

e) Méthode des moments

Description du modèle

La méthode des moments de DÜSTER (1994) détermine le débit de pointe des crues sur la base du *débit de pointe des crues annuelles moyennes* mHQ et de l'écart-type *des pointes de crues annuelles* $s(HQ)$. Les deux facteurs de base sont estimés à l'aide de paramètres du bassin.

$$HQ_x = mHQ + K_x \cdot s(HQ)$$

mHQ Moyenne des pointes de crue annuelles [m^3/s]
 $s(HQ)$ Ecart-type des pointes de crue annuelles [m^3/s]
 K_x f (période de retour, fonction de distribution) [-]

Une méthode basée sur cette équation a été développée pour la première fois en Suisse par SYDLER et al. (1982). Ils utilisaient pour évaluer les deux moments -moyenne et écart-type des pointes des crues annuelles- la surface et le périmètre du bassin, la distance du centre de gravité, la longueur de la vallée ainsi que la densité du réseau hydrographique. DÜSTER a remodelé la méthode 12 ans plus tard, en faisant une meilleure utilisation des données de base :

$$mHQ = f(F_n, V_{gl}, N, l_m, O_{ed}, W_{SV})$$

$$s(HQ) = f(F_n, N, W_{SV})$$

F_n surface utile [km^2], rFb
 V_{gl} Taux de glaciation [%]
 N Précipitations, lame d'eau annuelle [mm]
 l_m Pente moyenne [°], rFb
 O_{ed} Surfaces non cultivées [%], rFb
 W_{SV} Capacité de rétention moyenne [mm], rFb.

La qualité des données disponibles s'étant encore améliorée, les paramètres du modèle ont été réévalués pour le programme HQ_x _meso_CH, si bien qu'il existe quelques différences par rapport à DÜSTER (1994). Le paramètre l_m n'est plus utilisé.

Les paramètres relatifs au bassin sont pondérés par rFb, appelé *surfaces contributives relatives*. On admet que toutes les parties du bassin versant contribuent à la crue, mais avec un poids différent. Plus les pentes sont fortes et plus la distance au réseau hydrographique est petite, plus la contribution relative à la génération des crues est importante.

Domaine d'application et expériences

Période de retour de l'événement

La méthode des moments permet d'évaluer les crues de différentes périodes de retour. mHQ et $s(HQ)$ sont constants, alors que le coefficient K dépend de la période de retour x et de la fonction de distribution. Il peut être déterminé pour différentes périodes de retour. DÜSTER (1994) a utilisé pour ses calculs la distribution de Gumbel.

Surface des bassins

Le modèle a été calibré à l'aide de 95 bassins versants de Suisse d'une surface comprise entre 10 et 500 km^2 . Il est par conséquent recommandé de ne l'utiliser que pour des bassins de cet ordre de grandeur.

Types de bassins

Le modèle ne convient pas pour des bassins présentant des caractéristiques extrêmes (par ex. bassin très urbanisés ou recouverts par des surfaces importantes de glacier). La distribution des paramètres caractérisant les bassins ayant servi au calage indique les limites pour son utilisation (v. Tableau 5-6b).

Données nécessaires

Différents paramètres relatifs aux précipitations et au bassin lui-même doivent être fournis au modèle. Le programme HQ_x _meso_CH les calcule sur la base des séries de données disponibles.

Exemple de la Langete

Valeurs de HQ_x _meso_CH :

$$mHQ = 23,58 \text{ m}^3/\text{s}$$

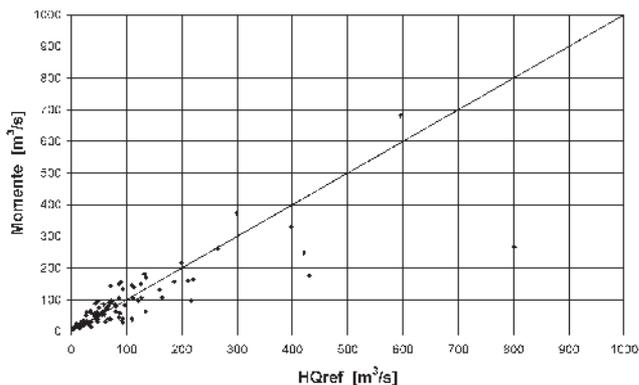
$$s(HQ) = 10,16 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$k_x = 3,137$$

$$HQ_{100} = 55 \text{ m}^3/\text{s}$$

Qualité des résultats

La dispersion des valeurs obtenues par rapport aux valeurs de référence est faible (v. Fig. 5-15, en haut). Les points sont répartis symétriquement de chaque côté de la droite. Cela signifie que les valeurs ne sont ni surestimées ni sous-estimées. Cela ressort aussi de l'examen du graphique en pseudo 3D de la figure 5-15. Les écarts relatifs classés de la figure 5-15 montrent la même image : une partie importante du territoire de la Suisse se trouve dans la classe neutre (voisine de 0) et les régions pour lesquelles on obtient une sur ou une sous-estimation sont rares.



Coefficients de corrélation Moments/Référence

Toutes les régions (95)	0,814
Régions avec Fn < 200 km ² (87)	0,797
Régions avec Fn < 100 km ² (70)	0,833

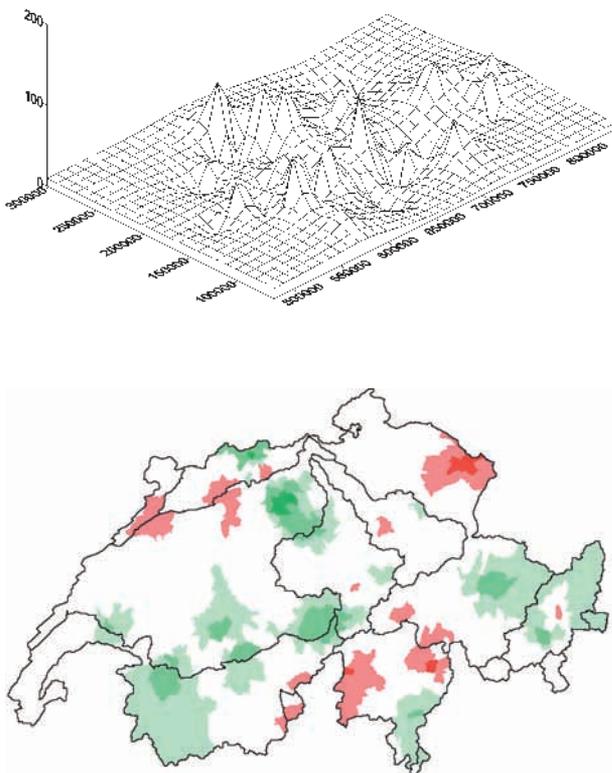


Fig. 5-15 : Résultats de l'évaluation des crues selon la méthode des moments.

En haut : évaluation selon la méthode des moments et valeurs de référence (HQ₁₀₀).

Tableau : coefficients de corrélation Evaluation/Valeurs de référence (HQ₁₀₀).

En bas : écarts relatifs par rapport aux valeurs de référence en %. (Légende de la carte, voir page 55).

Les paramètres pondérés à l'aide de la contribution relative ne peuvent pas être déterminés manuellement : ils sont calculés par HQx_meso_CH, ce qui a l'avantage d'empêcher des composants subjectifs de s'introduire dans le programme, mais rend difficile l'estimation de la plausibilité des valeurs utilisées.

Comme il n'y a en Suisse que peu de bassins se prêtant à des études hydrologiques, les mêmes bassins ont été utilisés pour le calage et le contrôle du modèle. Le contrôle n'est par conséquent pas indépendant. Il s'agit en fait d'un contrôle « insample ». Ceci est aussi valable dans une moindre mesure pour d'autres modèles présentés ici.

f) BaD7

Description du modèle

BARBEN (2001) a amélioré les méthodes de DÜSTER (1994) avec des idées nouvelles pour en faire un modèle nouveau basé sur les débits *spécifiques moyens des pointes des crues annuelles mHq* et l'écart type des débits spécifiques des pointes des crue annuelles *sx* de 95 bassins de référence répartis dans toute la Suisse. Avec ces deux paramètres, le débit de pointe spécifique de n'importe quelle période de retour peut être calculé à l'aide de l'équation hydrologique de base (voir paragraphe e).

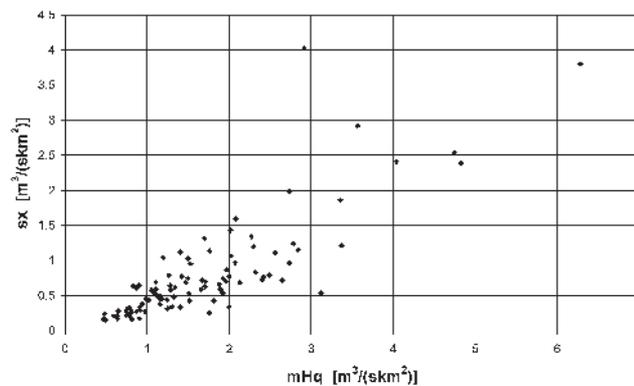


Fig. 5-16 : Les moments des débits spécifiques de pointe des 95 bassins de référence.

BaD7 détermine les deux moments du bassin étudié en calculant la moyenne des moments des 6 bassins de référence les plus ressemblants. La façon de procéder est la suivante :

Avec les paramètres de bassin standardisés³, un espace à 7 dimensions est créé (d'où le nom de BaD7) :

Facteur d'élongation	[-]
Surfaces de glacier	[% de la surface du bassin]
Hauteur annuelle des précipitations	[mm]
Pente	[°], rFb
Surfaces incultes	[% de la surface du bassin]
Surfaces imperméables	[% de la surface du bassin]
Surface de pâturages	[% de la surface du bassin]

Le bassin versant étudié constitue la base de cet espace à 7 dimensions. Sur cette base, la distance euclidienne à chacun des 95 bassins de référence est calculée. Ensuite, les débits de pointe annuels moyens mHq et l'écart-type des pointes de crues annuelles sx (v. Fig. 5-16) des six bassins de référence ayant la plus petite distance euclidienne au bassin étudié sont déterminés et la pointe spécifique d'une période de retour donnée calculée.

Un des principaux avantages de cette méthode est sa souplesse. La liste des bassins de référence peut être complétée sans qu'il soit nécessaire de modifier quoi que ce soit au modèle. Celui-ci ne doit pas être calé et il détermine les crues de n'importe quelle période de retour.

Domaine d'application et expériences

Période de retour de l'événement

Le modèle BaD7 permet de choisir la période de retour voulue. Les moments de l'équation hydrologique de base sont constants alors que le coefficient K_x dépend de la période de retour et de la fonction de distribution. Il peut être déterminé pour n'importe quelle période de retour.

Surface des bassins

Le modèle a été développé à l'aide de 95 bassins versants de Suisse ayant des surfaces comprises entre 10 et 500 km². Il est recommandé de ne l'utiliser que pour des bassins ayant des surfaces comprises entre ces deux extrêmes.

Types de bassins

Le modèle recherche les six bassins de référence présentant le plus d'analogies avec le bassin étudié. Il ne fournit donc des valeurs judicieuses que si la combinaison des paramètres du bassin étudié se retrouve

plus ou moins dans quelques bassins de référence. Il ne peut donc pas être utilisé pour des bassins présentant des caractéristiques extrêmes (par ex. des bassins très urbanisés ou en grande partie couverts de glaciers).

Données nécessaires

Le modèle requiert différents paramètres relatifs au bassin lui-même et aux précipitations. Le programme HQx_meso_CH calcule ces paramètres à partir des séries de données mémorisées.

Exemple de la Langete

Valeurs de HQx_meso_CH :

Facteur d'élongation	=	0,0853
Surfaces de glacier	=	0,0%
Hauteur annuelle des précipitations	=	1374 mm
Pente	=	6,7°, rFb
Surface incultes	=	0,1%, rFb
Surfaces imperméables	=	2,5%
Surfaces de pâturages	=	0,0%, rFb

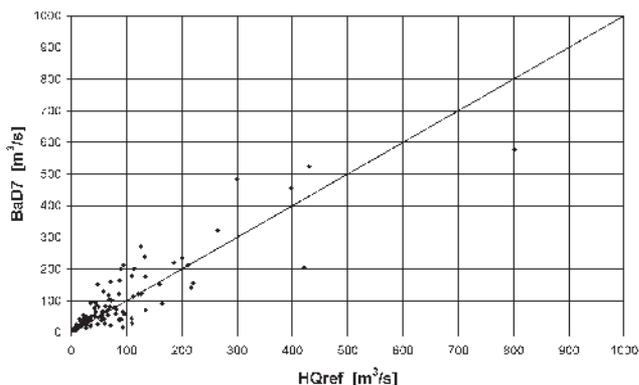
HQ₁₀₀ = 58 m³/s

Qualité des résultats

La dispersion est relativement faible et la relation linéaire assez forte (v. Fig. 5-17, en haut). Les points sont plus ou moins répartis de façon symétrique autour de la droite, ce qui signifie que les valeurs calculées ne sont pas systématiquement trop élevées ou trop faibles.

La qualité du modèle pourrait être améliorée si l'on pouvait augmenter le nombre de bassins de référence avec des bassins présentant des combinaisons de paramètres peu courants. L'éventail deviendrait ainsi plus ouvert et le choix des six bassins aux caractéristiques voisines plus vaste.

³ Paramètres utilisés par Düster pour le modèle Fuzzy.



Coefficients de corrélation BaD7/Référence

Toutes les régions (95)	0,859
Régions avec Fn < 200 km² (87)	0,868
Régions avec Fn < 100 km² (70)	0,715

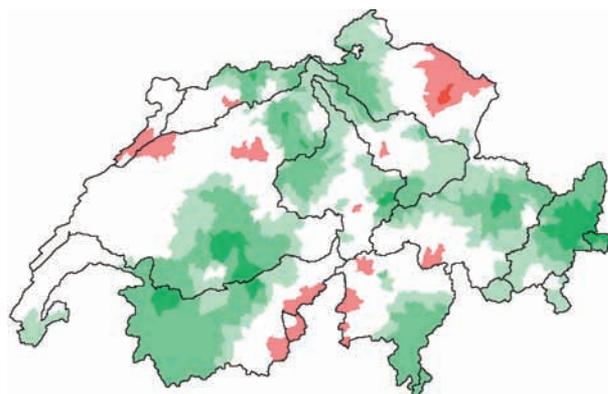
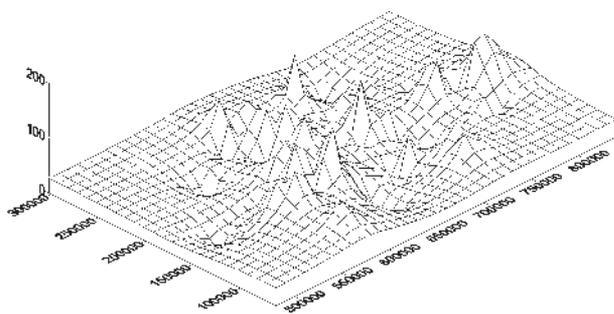


Fig. 5-17 : Résultats de l'évaluation des crues selon BaD7.
 En haut : évaluation selon BaD7 et valeurs de référence (HQ100).
 Tableau : coefficients de corrélation Evaluation/Valeurs de référence (HQ100).
 En bas : écarts relatifs par rapport aux valeurs de référence en %.
 (Légende de la carte, voir page 55).

5.1.3 Le logiciel HQx_meso_CH

Les méthodes décrites au chapitre 5.1.2 ont été intégrées au programme HQx_meso_CH (HQx : crue d'une période de retour quelconque ; meso : bassins versants de surface moyenne ; CH : bassins versants de Suisse). Ce programme permet l'évaluation des crues dans des bassins de 10 à environ 500 km². HQx_meso_CH est conçu de telle façon qu'il n'est pas nécessaire d'avoir recours à d'autres programmes. Tous les paramètres d'entrée et le programme exécutable se trouvent sur un CD Rom. Les données mémorisées couvrent l'ensemble du territoire suisse avec un maillage de 100 m de côté.

Le programme comprend trois modules (v. Fig. 5-18) :

1. Définition : détermination du bassin versant étudié (colonne de gauche).
2. Calcul : utilisation des différents modèles d'évaluation des crues (colonne du milieu)
3. Résultats : établissement du protocole de présentation des résultats (colonne de droite).

Les résultats de l'évaluation des crues à l'aide des différents modèles sont présentés sous forme graphique (diagrammes en barres) et stockés dans un fichier texte. Par ailleurs, les principaux paramètres du modèle et l'erreur à prévoir sur les résultats peuvent être présentés sous la forme d'une carte à petite échelle. Ce sont des outils qui facilitent l'interprétation des résultats.

HQx_meso_CH a été programmé en Borland Delphi, Professional, version 3.0 et fonctionne sous Window 95, 98, 2000, NT et XP. L'utilisation du logiciel Delphi n'est pas nécessaire pour l'utilisation du programme.



Fig. 5-18 : Formulaire principal de HQx_meso_CH

Les utilisateurs sont guidés dans le programme par des fonctions d'assistance intégrées, si bien qu'ils s'y sentent rapidement à l'aise.

Le modèle sélectionne lui-même les séries de données nécessaires pour le bassin choisi et effectue les calculs; l'utilisateur n'a pas à s'en préoccuper.

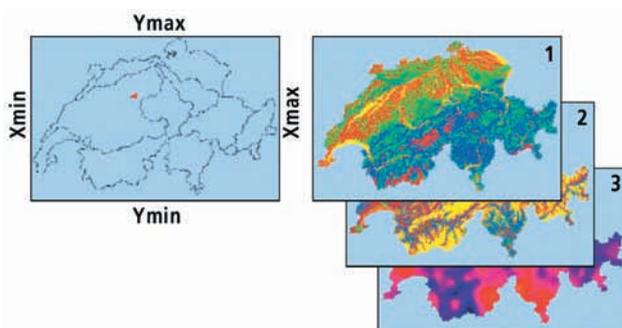


Fig. 5-19 : Séries de données de HQx_meso_CH.
A gauche : définition du bassin versant.
A droite : paramètres utilisés par le programme.

Toutes les séries de données de HQx_meso_CH sont constituées de la même façon (Xmin, Xmax, Ymin, Ymax, en coordonnées nationales) et ont la même résolution (maillage de 100 m). Dans de nombreux cas, les paramètres calculés par HQx_meso_CH sont la moyenne des valeurs au mailles du bassin (par ex. la valeur de c selon Kürsteiner). Quelques valeurs sont déterminées à partir d'informations ponctuelles (par ex. les fortes précipitations dans les modèles Kölla meso). A titre d'exemple, trois séries de données utilisées pour un ou plusieurs modèles d'évaluation ont été représentées dans la figure 5-19 (à droite). HQx_meso_CH totalise 30 séries de données que l'on peut classer en trois catégories :

1. Paramètres obtenus à partir de caractéristiques du bassin (par ex. c selon Kürsteiner).
2. Caractéristiques du bassin à partir desquelles des moyennes sont calculées pour l'ensemble du bassin, moyennes utilisées directement pour le calcul de régressions (par ex. l'utilisation du sol).
3. Données devant être élaborées avant d'être utilisées par un modèle (par ex. les fortes précipitations selon l'Atlas hydrologique de la Suisse, Planche 2.4).

L'exemple du modèle GIUB'96 fait ressortir la philosophie de base de HQx_meso_CH (v. Fig. 5-20). GIUB'96 comprend deux volets (v. Chap. 5.1.2, d) : d'une part $HQ_{100} = f(Fn)$ et d'autre part $HQ_{100} = f(MQ)$.

La première méthode est d'une application facile. La surface du bassin est calculée par le programme puis utilisée dans la fonction régionale qui lui correspond. Pour la seconde méthode, qui fait intervenir le débit moyen annuel (MQ), les difficultés surgissent lorsqu'il n'existe pas de mesures de débit dans le bassin. C'est pour cette raison qu'un modèle dû à WEINGARTNER et ASCHWANDEN (1992), qui évalue le débit moyen pour n'importe quel bassin de Suisse, a été intégré à HQx_meso_CH. Ce modèle fait intervenir les précipitations du semestre d'été, le rapport entre les précipitations d'été et celles de l'hiver, la température moyenne annuelle ainsi que le taux de glaciation. HQx_meso_CH utilise systématiquement les débits annuels moyens ainsi obtenus. Si d'autres informations sur le débit moyen annuel existent, elles peuvent être introduites dans l'éditeur de données.

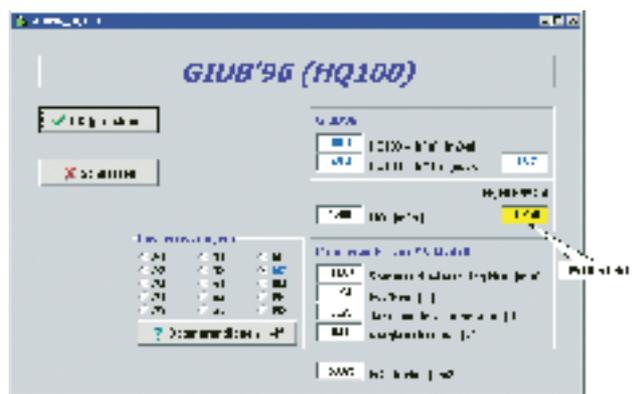


Fig. 5-20 : Evaluation des crues à l'aide du modèle GIUB'96.

Les paramètres déterminés automatiquement par HQx_meso_CH sont toujours à considérer comme des propositions ; si d'autres informations fiables sont disponibles, elles peuvent (et doivent !) être introduites manuellement. Après avoir obtenu les résultats attendus, il faut les interpréter. HQx_meso_CH ne dispense pas les utilisateurs de ce travail mais les assiste au cours des différentes opérations.

5.1.4 Déroulement du calcul et interprétation des résultats

Le but de l'évaluation des crues par l'hydrologie est de préciser le mieux possible les débits des crues du type voulu. A l'aide des valeurs obtenues, les ingénieurs hydrauliciens peuvent choisir la crue de projet en tenant compte du risque encouru. Une vue d'ensemble des stratégies pour évaluer les crues a été présentée au chapitre 5.1.1 (v. Fig. 5-1). Cette stratégie en quatre étapes est décrite plus en détail ci-dessous.

1^{ère} étape : Utilisation de plusieurs méthodes

La figure 5-21 illustre le premier pas de cette stratégie. Grâce à l'utilisation de plusieurs méthodes appropriées, on obtient un vaste choix de valeurs de crues. En principe, cela ne joue aucun rôle si les résultats sont obtenus par l'application d'un programme informatique ou par calcul manuel.

2^{ème} étape : Analyse de la dispersion des résultats

Il faut distinguer deux cas (v. Fig. 5-21) :

1. Les valeurs obtenues pour Q_{max} (en bleu dans la Fig. 5.21) et HQ_x (en rouge) sont du même ordre de grandeur (exemples 1 et 3). La moyenne des Q_{max} est plus grande que celle des HQ_{100} . Dans ce cas, le débit de crue recherché peut assez facilement être estimé (v. 4^{ème} étape).

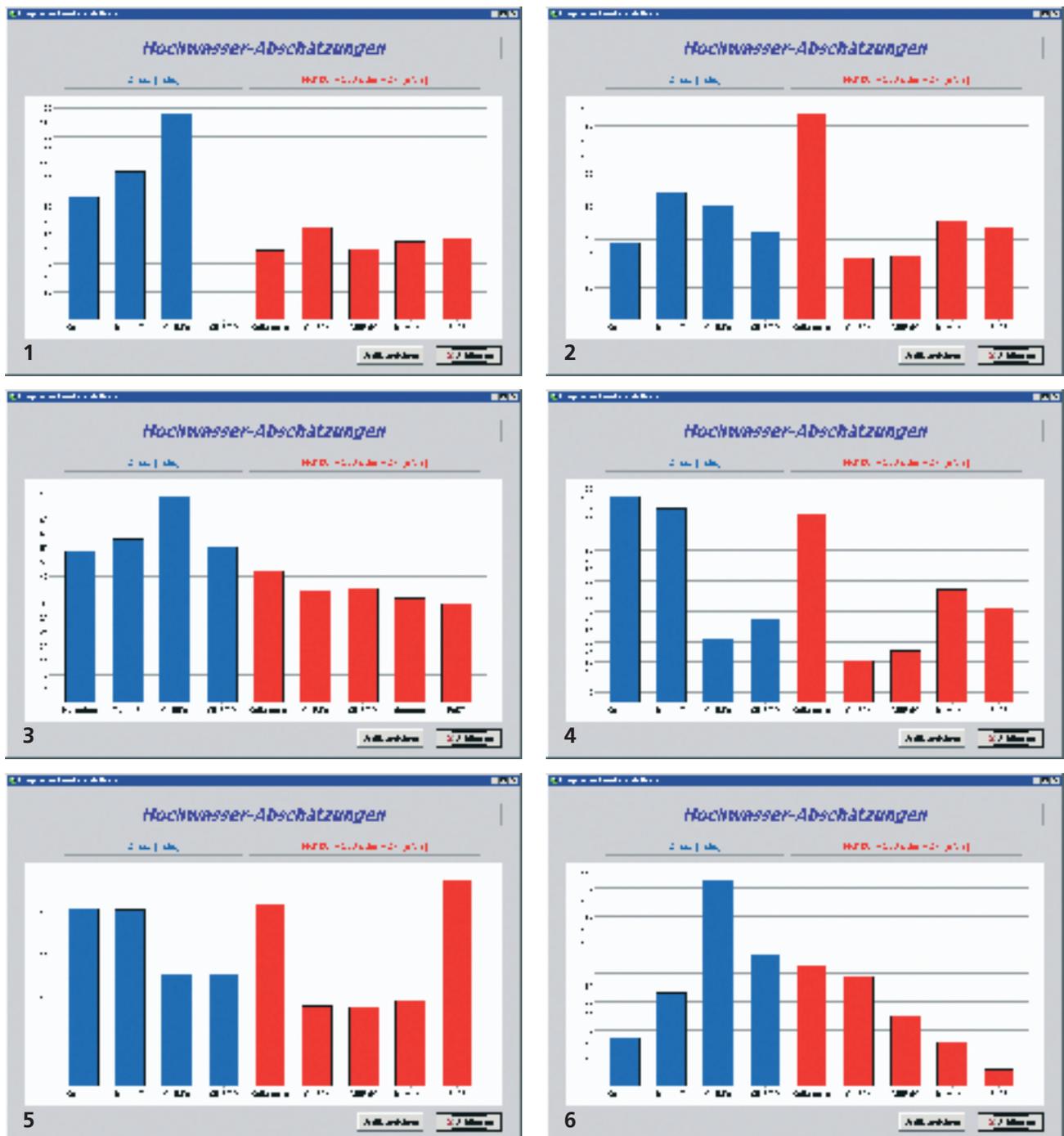


Fig. 5-21 : Evaluation des crues dans quelques bassins versants (calcul et présentation à l'aide de HQx_meso_CH).

2. Les valeurs obtenues présentent une dispersion importante (exemples 2, 4, 5 et 6) dans chacun des groupes HQx et/ou Q_{max}. Quelques valeurs de HQx peuvent même dépasser les valeurs de Q_{max}. L'évaluation de la crue est alors plus délicate. L'origine de ces résultats contradictoires doit être recherchée (3^{ème} étape).

3^{ème} étape : Corrections, suppression des résultats non plausibles

Les résultats qui ne paraissent pas plausibles sont analysés en détail. Il s'agit de savoir pourquoi quelques-uns d'entre eux sortent complètement du lot. Si les causes de cette défaillance du modèle ayant fourni cette valeur peuvent être éclaircies, celle-ci est abandonnée. On obtient ainsi une série de résultats plus satisfaisants, que l'on examine comme décrit dans la

Modèle	Limites d'utilisation Fn [km ²]
Kürsteiner	5 < Fn < 500
Müller-Zeller	10 < Fn < 100
Kölla meso	10 < Fn < 500
GIUB'96	10 < Fn < 500
Momente	10 < Fn < 200
BaD7	10 < Fn < 200

Tableau 5-5 : Limites d'utilisation des différents modèles (surfaces).

Remarque : certaines de ces limites ne sont pas certaines. L'évaluation des crues peut en général être faite pour des surfaces comprises entre 10 et 200 km². On ne devrait pas la faire pour des surfaces plus petites. Pour des surfaces plus grandes, une vérification rigoureuse des paramètres devrait être faite.

Modèle	Caractéristiques du bassin
Kürsteiner	Pas de restrictions, ce qui ne signifie cependant pas que le modèle fournit toujours des résultats satisfaisants : l'auteur n'a tout simplement pas explicitement cité les régions où les résultats sont mauvais (par ex. en raison du manque de données).
Müller-Zeller	La détermination du coefficient d'écoulement est difficile dans les régions alpines ou fortement urbanisées en raison de données de mauvaises qualité (carte des aptitudes des sols et statistique de la superficie). Les paramètres du modèle peuvent toutefois être modifiés de façon interactive dans HQx_meso_CH.
Kölla meso	La détermination des paramètres dépend en grande partie de la carte des aptitudes des sols. Dans les régions alpines ou fortement urbanisées, les paramètres déterminés automatiquement doivent être examinés de façon critique. Le modèle ne devrait pas être utilisé pour des situations extrêmes (par ex. surface importante de glacier ou altitude moyenne du bassin très élevée). HQx_meso_CH permet de corriger manuellement les quantités de précipitations (Vo).
GIUB'96	Pas de restrictions, ce qui ne signifie cependant pas que le modèle fournit toujours des résultats satisfaisants: les auteurs n'ont tout simplement pas explicitement cité les régions où les résultats sont mauvais (par ex. en raison du manque de données).
Moments	Le modèle donne de bons résultats pour les bassins ne présentant pas une combinaison extrême de paramètres (par ex. forte surface de glaciers ou de surfaces imperméables), c'est-à-dire lorsque le bassin est relativement semblable aux bassins utilisés pour le calibrage (v. Tableau 5-6b)
BaD7	Le modèle donne de bons résultats pour les bassins ne présentant pas une combinaison extrême de paramètres (par ex. forte surface de glaciers ou de surfaces imperméables), c'est-à-dire lorsque le bassin est relativement semblable aux bassins utilisés pour le calibrage (v. Tableau 5-6c).

Tableau 5-6a : Limites d'utilisation des différents modèles (types de bassins).

2^{ème} étape, pour autant qu'il reste assez de valeurs. Si ce n'est pas le cas, l'estimation, selon notre stratégie, doit être considérée comme ayant échoué : des études complémentaires plus approfondies sont nécessaires.

Les raisons pour lesquelles un modèle donne de mauvais résultats sont nombreuses. Il faut les rechercher dans la structure elle-même du modèle ou dans les données utilisées. Les tableaux suivants peuvent aider à les trouver.

4^{ème} étape : Détermination de la valeur de HQx, dispersion et validation des résultats

On peut passer à la 4^{ème} étape que s'il reste au moins 3 résultats plausibles (v. Fig. 5-1). La crue peut alors être estimée de la façon suivante :

1. On prend pour HQx la valeur moyenne (pondérée) des événements restants.
2. L'étendue de la dispersion (qui n'est pas égale à l'intervalle de confiance de l'analyse des valeurs extrêmes) est déterminée par la plus grande et la plus petite des valeurs restantes. Cette dispersion est par exemple influencée par les incertitudes liées au choix des paramètres du modèle. Il est cependant préférable d'utiliser cette dispersion comme un intervalle de confiance plutôt que de ne considérer qu'une valeur fixe estimée.
3. Validation des résultats.

Remarque à propos de 1 : on peut utiliser comme valeur estimée de HQx aussi bien la moyenne arithmétique qu'une moyenne pondérée. La pondération est

	Fn	Glacier	N_J	Inculte	SPK
Min.	2,4	0,0	1042	0,0	11,0
Median.	17,8	0,0	1999	8,3	36,1
Max.	243,7	48,1	3156	79,0	90,3

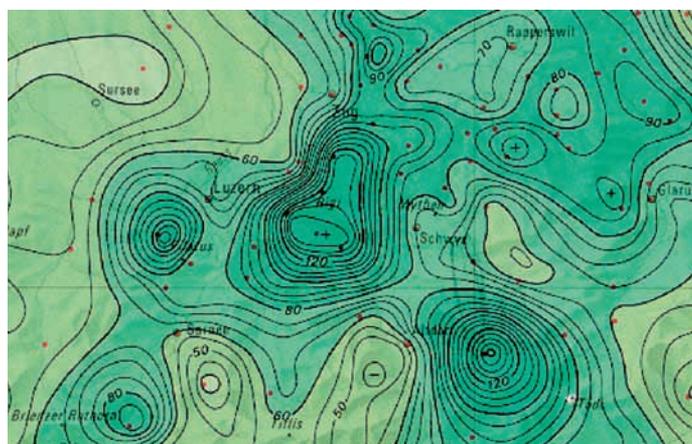
Tableau 5-6b : Valeurs statistiques des paramètres régionaux pour la méthode des moments.

	Elong.	Glacier	N_J	Pente	Inculte	Inperm.	Pâtur.
Min.	0,016	0,0	1042	1,7	0,0	0,0	0,0
Median.	0,097	0,0	1999	17,8	8,3	0,0	27,2
Max.	0,386	48,1	3156	32,4	79,0	31,9	86,6

Tableau 5-6c : Valeurs statistiques des paramètres régionaux pour le modèle BaD7.

Fn	Surface bassin [km ²], rFb	SPK	Capacité de rétention, rFb	Min	La plus petite valeur
Glacier	% de la surface [%]	Elong.	Facteur d'élongation [-]	Médian.	Médiane
N_J	Lame d'eau annuelle [mm]	Inperm.	% surf. imperméable [%]	Max.	La plus grande valeur
Pente	Pente [°], rFb	Pâtur.	% de pâturage [%]	rFb	Surface pondérée
Inculte	Surfaces incultes [%], rFb				

Modèle	Difficultés pouvant se présenter
Kürsteiner	Des erreurs d'estimation importantes de la pointe de crue peuvent se produire pour les bassins présentant de fortes pentes dans leur partie supérieure et des zones plates dans leur partie basse. En effet, la pente moyenne qui est à la base de ce modèle n'a pas grande signification dans ce cas. Ce genre de bassin peut aussi poser des problèmes avec les autres modèles.
Müller-Zeller	Voir « Caractéristiques locales » (Tableau 5-6a)
Kölla meso	Si le gradient des précipitations est fort (v. carte), la détermination de l'intensité des précipitations pose un problème. Des écarts peuvent influencer fortement l'évaluation.



Précipitations ponctuelles extrêmes centennales ; extrait de la Planche 2.4 de l'Atlas hydrologique de la Suisse (Geiger et al. 1992)

Pour les bassins très petits et ayant un réseau hydrographique très dense, la longueur du chenal de HQx_meso_CH peut s'écarter très fortement de la valeur estimée de façon classique (v. Chap. 5.1.2).

HQx_meso_CH permet une correction manuelle des deux paramètres *Fortes précipitations* et *Longueur du chenal*.

GIUB'96	Le passage d'une province de crue à une autre peut influencer fortement le résultat. Si le bassin étudié est proche de la limite d'une région (on peut tirer cette information de HQx_meso_CH), il convient d'analyser l'influence du changement de province région sur le résultat.
Moments	Voir « Caractéristiques du bassin » (Tableau 5-6a et 5-6b)
BaD7	Voir « Caractéristiques du bassin » (Tableau 5-6a et 5-6c)

Tableau 5-7: Autres causes d'éventuels mauvais résultats.

laissée au choix de l'utilisateur du modèle. On peut accorder plus de poids aux modèles qualifiés de « très bons ». On peut aussi utiliser comme critère les écarts relatifs attendus [%] tels qu'ils sont produits par HQx_meso_CH (v. les figures illustrant la description des modèles).

Remarque à propos de 2 : la limite supérieure du domaine de dispersion de HQx ne devrait pas être supérieure à la moyenne de Qmax, ce qui provoquerait des contradictions.

Remarque à propos de 3 : on peut valider les résultats de plusieurs façons :

- en tenant compte des crues historiques
- en comparant les résultats avec la capacité du chenal
- en faisant intervenir les processus de formation des crues se déroulant dans le bassin (v. Chap. 3).

5.1.5 Exemples généraux d'application

Le déroulement des calculs en relation avec les différentes étapes de la figure 5.1 est décrit ci-dessous à l'aide d'exemples généraux (sans la validation des résultats de la 4^{ème} étape). Les exemples 1, 4 et 6 de la figure 5-21 seront traités, avec l'utilisation de HQx_meso_CH.

Exemple N° 1

1^{ère} étape : utilisation de plusieurs méthodes



S = 59 km², province HQ : M2

2^{ème} étape : analyse de la dispersion des résultats

La dispersion est, dans ce cas, très faible, les résultats étant compris entre 49 et 66 m³/s. Il n'y a pas de raison de laisser de côté l'un ou l'autre de ces résultats ou de modifier les paramètres dans l'un des modèles. Le nombre d'échantillons étant trop faible dans la région M2 (v. Tableau 5-4) où se trouve le bassin étudié, le modèle GIUB'96 (MQ) n'a pas pu être calé et n'a donc pas fourni de résultats.

3^{ème} étape : corrections ou suppression de résultats non plausibles

Pas nécessaire dans ce cas.

4^{ème} étape : estimation de HQx et du domaine de fluctuation.

On a pris pour valeur de HQx la moyenne arithmétique des cinq résultats obtenus : HQ₁₀₀ = 56 m³/s. Le domaine de fluctuation va de 49 à 66 m³/s. La limite supérieure (66 m³/s) est inférieure à la moyenne des HQ_{max} obtenus (113 m³/s).

Exemple N° 4

1^{ère} étape : utilisation de plusieurs méthodes



S = 42 km², Province HQ : A2

2^{ème} étape : analyse de la dispersion des résultats

La dispersion est très forte aussi bien pour HQ_{max} que pour HQ₁₀₀. Il n'est donc pas indiqué de prendre leur moyenne pour estimation de la valeur définitive.

3^{ème} étape : corrections ou suppression de résultats non plausibles

Le bassin No 4, ayant 42 km², il est dans les limites fixées. Le résultat fourni par la méthode Kölla meso dépasse nettement les autres. Une grande partie du bassin se trouve dans des zones où la statistique de la superficie et la carte des aptitudes des sols fournissent des données de mauvaise qualité. En plus, le gradient des fortes précipitations est élevé. Il est difficile de déterminer des précipitations fiables pour l'ensemble du bassin versant. Le résultat fourni par Kölla meso est par conséquent abandonné.

Les valeurs fournies par GIUB'96 sont faibles par rapport aux autres. Ceci pourrait être dû à l'emplacement de la station de jaugeage (v. Tableau 5-7) : la limite avec la province de crues voisine est très proche. Dans ce cas, il est indiqué de faire aussi les calculs en attribuant le bassin à la province voisine. L'illustration suivante montre que l'on obtient ainsi des résultats plus plausibles.



S = 42 km², Province HQ : A1

4^{ème} étape : estimation de HQ_x et du domaine de fluctuation.

La valeur estimée de HQ₁₀₀ a été calculée comme moyenne arithmétique des quatre valeurs données par les méthodes GIUB'96 (Fn et MQ), des moments et BaD7 : HQ₁₀₀ = 50 m³/s. Le domaine de dispersion va de 46 à 56 m³/s. La limite supérieure (56 m³/s) est inférieure à la moyenne des HQ_{max} obtenus (88 m³/s).

Exemple N° 6

1^{ère} étape : utilisation de plusieurs méthodes



S = 15 km², Province HQ : N2

2^{ème} étape : analyse de la dispersion des résultats

Les résultats obtenus montrent qu'il s'agit là d'un bassin difficile. Les valeurs de Q_{max} produites par Kürsteiner et Müller-Zeller sont faibles et l'éventail des valeurs de HQ₁₀₀ (en rouge) est très large.

3^{ème} étape : corrections ou suppression de résultats non plausibles

Le bassin versant présente de fortes pentes dans sa partie supérieure et est très plat dans sa partie inférieure. Dans un bassin à la topographie aussi contrastée, l'estimation des pointes de crues peut être entachée d'erreurs importantes (v. Tableau 5-7).

L'évaluation des crues devrait se limiter à la partie supérieure, très escarpée, du bassin. Sa partie inférieure, plate, est occupée par un réseau dense de canaux et de routes, trop complexe pour être représenté par les modèles utilisés. Il est par conséquent indiqué de renoncer à les employer.

4^{ème} étape : estimation de HQ_x et du domaine de fluctuation.

L'évaluation des crues n'est pas possible dans ce cas, d'autres approches doivent être envisagées. Il conviendrait par exemple d'utiliser des mesures sur une courte période, d'étudier les crues historiques ou d'utiliser un modèle Pluie-Débit.

5.1.6 Exemples pratiques d'application

On décrit dans les exemples suivants l'utilisation du programme informatique et l'analyse des résultats. On y trouvera aussi des considérations sur les limites des modèles utilisés, sur les bassins de référence, sur les crues historiques et sur la capacité des chenaux.

1^{er} exemple : l'Aabach

Bassin versant :	Plateau suisse, 12,5 km ²
Surface imperméabilisée :	0,03 km ²
Glaciers :	0,00 km ²
Altitude :	de 412 à 752 m
Longueur cumulée des chenaux :	21,6 km
Résultat recherché :	débit de pointe HQ_{100}

1^{ère} étape : utilisation de plusieurs méthodes



Aabach : résultats des premiers calculs (HQ_x _meso_CH)

2^{ème} étape : analyse de la dispersion des résultats

La dispersion des valeurs de HQ_{100} (en rouge) est grande. Kölla meso donne une valeur de 68 m³/s, qui dépasse nettement toutes les valeurs obtenues pour HQ_{max} . Les raisons de cette dispersion sont analysées dans la troisième étape.

3^{ème} étape : corrections ou suppression de résultats non plausibles

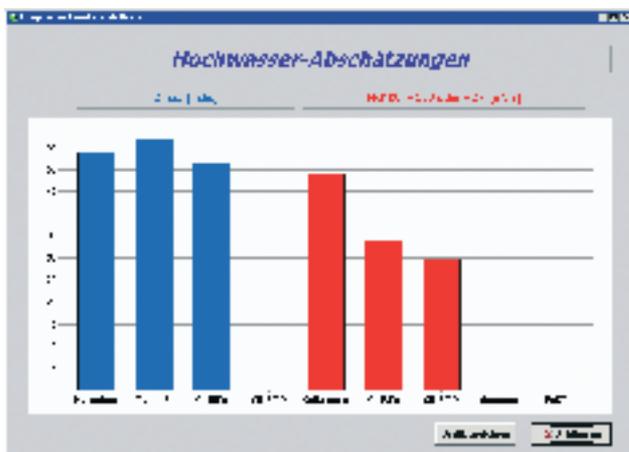
a) Remarques sur le bassin

- Le bassin est allongé et étroit (longueur, environ 9 km ; largeur, environ 1,5 km). Sa surface (12,5 km²) est dans les limites d'utilisation des méthodes considérées ici (10 à 200 km²).
- Il y a plusieurs retenues dans le bassin. Les modèles utilisés ignorent leurs effets, ce qui n'a cependant pas grande importance vu que lors de fortes précipitations ces bassins se remplissent rapidement et ne peuvent pas arrêter les crues.
- Le rôle des drainages et des zones marécageuses ne peut pas être estimé ici.

b) Commentaires sur les résultats obtenus

- Kürsteiner : la valeur de c proposée par le programme ($c = 5,54$) est nettement inférieure à celle donnée par les services de l'administration cantonale. En raison de la forte intensité des précipitations et des crues observées dans les bassins voisins, nous avons attribué à c une valeur de 10. On obtient ainsi $Q_{max} = 54$ m³/s au lieu de 30 m³/s.
- Müller-Zeller : le programme donne $\Psi = 0,2$. On a augmenté cette valeur à 0,3 pour tenir compte des expériences faites et de la connaissance du bassin. On obtient ainsi $Q_{max} = 57$ m³/s, au lieu de 39 m³/s.

- GIUB'96 : l'ensemble du bassin se trouve dans la province de crue M4, loin des limites avec les régions voisines. Son appartenance à la province M4 ne fait pas de doute. Par ailleurs, il y a plusieurs bassins ayant une surface du même ordre de grandeur parmi les bassins de référence.
- Kölla meso : vu la petite surface du bassin (12,5 km²), l'atténuation des précipitations proposée par le modèle ne semble pas adéquate. Par conséquent, l'option « sans atténuation des précipitations » est choisie. Le gradient des fortes précipitations est élevé dans ce bassin (Atlas hydrologique de la Suisse, Planche 2.41). L'utilisateur interprète les intensités de précipitations tirées de la Planche 2.41 comme une limite supérieure. Il utilise par conséquent, dans ce cas, les intensités plus basses que celles de la Planche 2.4². Le calcul effectué avec ces intensités plus faibles donne pour HQ₁₀₀ une valeur de 49 m³/s au lieu de 68 m³/s.
Planche 2.4¹: A = 84 mm, B' = 173 mm, C = 22 mm, D' = 65 mm
Planche 2.4²: A = 65 mm, B' = 160 mm, C = 22 mm, D' = 62 mm
- Moments et BaD7 : vu que le bassin présente un ensemble de paramètres moyens (pas de zones imperméables ni de glaciers), les deux modèles peuvent théoriquement être utilisés. Ils donnent pour HQ₁₀₀ respectivement 18 et 11 m³/s, valeurs très faibles. Quelques-unes des séries de mesures utilisées pour BaD7, sont très courtes et deux des stations de jaugeage sont connues pour être peu fiables dans le domaine des hautes eaux. Par prudence, les résultats fournis par les deux modèles sont écartés.



Aabach : résultats révisés (HQx_meso_CH)

Etape 4a : estimation de HQ₁₀₀ et du domaine de fluctuation

La moyenne arithmétique des résultats obtenus pour HQ₁₀₀ grâce aux trois méthodes Kölla meso, GIUB'96 (Fn) et GIUB'96 (MQ) est de 38 m³/s. Elle sera retenue comme valeur estimée. La dispersion va de 30 à 49 m³/s. Sa limite supérieure est inférieure à la moyenne des Q_{max} (54 m³/s).

Etape 4b : validation des résultats obtenus

Transfert de mesures de débits de bassins voisins

Dans deux bassins A et B voisins, de longues séries de mesures ont été réalisées. Si l'on transfère le HQ₁₀₀ de ces deux bassins à celui de l'Aabach à l'aide de la formule $Q_x = Q_a \cdot (E_x/E_a)^{0,85}$, on obtient pour l'Aabach un HQ₁₀₀ de 32 et 36 m³/s :

Bassin A : 23,70 km², HQ₁₀₀ 60 m³/s :
 $HQ_{100} \text{ Aabach} = 55 \cdot (12,5/23,70)^{0,85} = 32 \text{ m}^3/\text{s}$
 Bassin B : 9,60 km², HQ₁₀₀ 29 m³/s :
 $HQ_{100} \text{ Aabach} = 29 \cdot (12,5/9,60)^{0,85} = 36 \text{ m}^3/\text{s}$

Estimation de la capacité du chenal et des crues historiques

La capacité du Aabach est, selon le calcul des courbes de remous, d'environ 15 à 20 m³/s. Selon les habitants et les autorités communales, le torrent n'est jamais sorti de son lit depuis 30 ans. Une fois cependant, le chenal s'est rempli à ras bord. Selon ces informations, on peut estimer pragmatiquement HQ₃₀ à environ 15-20 m³/s. Si le rapport entre (selon estimation par la méthode des moments) HQ₃₀ et HQ₁₀₀ est de 0,5, alors HQ₁₀₀ devrait se situer entre 30 et 40 m³/s.

Synthèse et débit de crue

Le transfert des débits des bassins voisins au Aabach a donné un HQ₁₀₀ compris entre 15 et 20 m³/s. L'historique des crues et la capacité du chenal indiquent aussi une valeur de HQ₁₀₀ de l'ordre de 30 à 40 m³/s. La valeur estimée à l'aide de HQx_meso_CH (38 m³/s) peut ainsi être validée. Il faut toutefois se souvenir que le domaine de fluctuation (selon les calculs de HQx_meso_CH) va de 30 à 50 m³/s et que l'incertitude est de cet ordre de grandeur.

2 ^{ème} exemple :	le Wildbach
Bassin versant :	Alpes, 62,5 km ²
Surface imperméabilisée :	0,00 km ²
Glaciers :	7,50 km ²
Altitude :	de 1698 à 3316 m
Longueur cumulée des chenaux :	76,3 km
Résultat recherché :	débit de pointe HQ ₁₀₀

1^{ère} étape : utilisation de plusieurs méthodes



Wildbach : résultats des premiers calculs (HQx_meso_CH)

2^{ème} étape : analyse de la dispersion des résultats

La dispersion des valeurs de HQ₁₀₀ (en rouge) est relativement grande. Kölla meso et la méthode des moments donnent des résultats nettement inférieurs aux autres. La dispersion dans le groupe des Q_{max} (en bleu) est faible et tous les résultats de ce groupe sont supérieurs à ceux du groupe HQ₁₀₀.

3^{ème} étape : corrections ou suppression de résultats non plausibles

a) Remarques sur le bassin

- La surface du bassin est de 62,4 km², donc dans les limites admises par les méthodes utilisées (10 à 200 km²), mais il se trouve dans une région dans laquelle, selon HQx_meso_CH (dispersion relative), les débits de crues sont en principe surestimés. Il est donc important de considérer les résultats obtenus de manière critique.
- Des glaciers recouvrent 12% du bassin, ce qui ne devrait poser aucun problème pour les méthodes des moments et BaD7, étant donné que plusieurs bassins de référence sont dans le même cas (le plus fort pourcentage de glacier est d'environ 48% selon le tableau 5-6 b/c).
- A part quelques zones, le bassin est montagneux et ne se prête pas à l'exploitation agricole. Pour cette raison, un contrôle critique des paramètres s'impose pour les méthodes utilisant la carte des aptitudes des sols (Müller-Zeller et Kölla meso).

b) Commentaires sur les résultats obtenus

- Kürsteiner et Müller-Zeller : d'après notre expérience et notre connaissance du bassin, la valeur de c proposée par le programme (8,23) est plausible, de même que celle de Ψ (0,4) chez Müller-Zeller.

- Kölla meso : les intensités de précipitations déterminées par le programme, la longueur du chenal et le volume mouillé aussi paraissent plausibles, d'après notre expérience et notre connaissance du bassin.
- GIUB'96 : la province de crue S3 est enclavée dans A5. Le bassin étudié est cependant complètement dans S3. Par ailleurs, le calcul avec les paramètres de A5 donne des débits de crue extrêmement bas, qui ne semblent pas plausibles.
- Le programme utilise un débit annuel moyen de 3,06 m³/s. Si l'on transfère les débits annuels moyens de trois bassins voisins, en tenant compte de la différence de surface, on obtient des valeurs comprises entre 2,0 et 2,8 m³/s. Les calculs ont été refaits pour le Wildbach avec une valeur de 2,4 m³/s. HQ₁₀₀ (MQ) passe alors de 109 à 91 m³/s.
- Moments et BaD7 : des glaciers recouvrant 12% du bassin, la combinaison des paramètres du Wildbach est favorable pour ces deux modèles. On n'a pas trouvé la raison pour laquelle la méthode des moments fournit pour le débit de pointe une valeur nettement plus faible que les autres modèles.



Wildbach : résultats révisés (HQx_meso_CH)

Etape 4a : estimation de HQ₁₀₀ et du domaine de fluctuation.

La moyenne arithmétique des cinq résultats (94 m³/s) est considérée comme valeur estimée de HQ₁₀₀. Le domaine de dispersion s'étend de 41 à 94 m³/s. Sa limite supérieure est inférieure à la moyenne du groupe Q_{max} (138 m³/s).

Etape 4b : validation des résultats obtenus

Transfert de mesures de débits de bassins voisins

Le transfert au Wildbach des débits de pointe de deux bassins comparables permet un contrôle supplémentaire de la plausibilité des résultats obtenus. Les deux

bassins choisis sont analogues à celui du Wildbach du point de vue de leurs pentes, de l'aptitude et de l'occupation des sols ainsi que du régime des précipitations, il n'y a pas non plus de lac de barrage. Les débits y ont été mesurés respectivement pendant 44 et 46 ans. La valeur de HQ_{100} calculée statistiquement pour ces deux bassins A et B, transposée au Wildbach à l'aide de la formule $Q_x = Q_a \cdot (E_x/E_a)^{0,85}$ donne 56 et 106 m^3/s .

Bassin A : 73,3 km^2 , HQ_{100} 65 m^3/s
 HQ_{100} Wildbach = $65 \cdot (62,4/73,3)^{0,85} = 56 \text{ m}^3/s$
Bassin B : 66,5 km^2 , HQ_{100} 112 m^3/s
 HQ_{100} Wildbach = $112 \cdot (62,4/66,5)^{0,85} = 106 \text{ m}^3/s$

Projets d'ouvrages de protection

En 1957, un projet visant à endiguer le Wildbach a été mis sur pied. La crue de projet retenue était de 88 m^3/s . La fréquence de cette crue n'est pas précisée dans le projet mais, vu que le torrent traverse des agglomérations, on peut supposer qu'il s'agissait de la crue centennale. Ce projet n'a pas été complètement réalisé.

Considérations sur la capacité du chenal et les crues historiques

La capacité près des ponts est, selon le calcul de la courbe de remous, de 60 m^3/s . D'après les services de l'administration cantonale, le Wildbach n'est plus sorti de son lit après les travaux réalisés en 1960. Les crues ayant eu lieu entre 1960 et 2001 ne doivent donc pas avoir dépassé 60 m^3/s . Entre 1868 et 1956, il y a eu plusieurs crues importantes. Le Wildbach a débordé en inondant ses environs à plusieurs reprises. Il n'y a malheureusement pas d'informations sur l'ampleur de ces crues et sur la capacité du chenal à l'époque.

Synthèse et débits de crues

Le transfert au Wildbach des débits des bassins de comparaison donne pour HQ_{100} des valeurs de 56 et 106 m^3/s . Le projet de 1957 prévoyait 88 m^3/s . La valeur estimée pour HQ_{100} par HQx_meso_CH peut par conséquent être validée. Il faut cependant se souvenir que le domaine de fluctuation va de 41 à 94 m^3/s et que ce résultat reste donc assez incertain.

5.2 Petits bassins versants (< 10 km^2)

Les crues survenant dans les petits bassins occasionnent chaque année en Suisse des dommages pour un montant de 50 à 100 millions de francs. Malgré ce potentiel de dégâts, les bassins pour lesquels de longues séries de mesures des débits existent sont très peu nombreux. Pour les praticiens, des méthodes d'évaluation sont par conséquent des outils indispensables.

La principale différence par rapport à l'évaluation des crues dans les bassins de grandeur moyenne est le manque de données et, lorsqu'il y en a, leur résolution spatiale. Pour les petits bassins, elles ne sont en général pas assez détaillées pour être utilisables directement, bien qu'elles fournissent des points de repère utiles. Des informations suffisamment détaillées n'existent que pour de rares régions. Des études sur le terrain sont donc absolument indispensables pour l'évaluation des crues dans les petits bassins.

L'application des méthodes d'évaluation à ces bassins n'avait pas été systématiquement étudiée jusqu'il y a peu. Dans le cadre du projet de la Commission pour l'hydrologie du bassin du Rhin (CHR) « Beurteilung von Hochwasserschätzverfahren », FORSTER & HEGG (2002) ont examiné différentes méthodes et ont proposé en conclusion de leur étude un procédé pour l'évaluation des crues dans ces bassins, sur lequel nous nous appuyons dans le chapitre 5.2.

5.2.1 Démarche

L'hydrologie des petits bassins est marquée par la variabilité de leurs caractéristiques à une échelle très locale. Certaines de ces caractéristiques peuvent avoir une influence dominante sur les crues, si elles se retrouvent dans une grande partie du bassin. Cette variabilité existe naturellement aussi dans les bassins plus grands, mais son influence sur le régime hydraulique est atténuée. La grande variabilité des caractéristiques des bassins n'est en général pas reflétée par les cartes, leur échelle étant trop grande et la généralisation trop grossière. La carte des aptitudes des sols, publiée à l'échelle 1:200'000 en sont un exemple : à cette échelle seules les grandes unités peuvent être représentées. Pour rendre compte de la diversité des sols, il faudrait une échelle de l'ordre de 1:5'000 (DFJP 1980), ce qui fournirait des informations pouvant être utilisées dans le cadre de l'évaluation des crues dans les petits bassins.

En résumé, il ressort (v. Fig. 5-22) que :

- même si les informations existantes couvrent l'ensemble du territoire de la Suisse, leur résolution n'est pas assez fine
- ces informations constituent cependant une base qui permet de se faire une première idée de l'ordre de grandeur des différents paramètres et d'en déduire des valeurs provisoires. Celles-ci sont rassemblées pour formuler une *hypothèse de travail* concernant le territoire étudié
- une visite du bassin est absolument indispensable avant d'assigner une valeur définitive aux paramètres dans les différentes parties du bassin et de préciser l'hypothèse mentionnée ci-dessus.

Une fois les paramètres définis sur la base des cartes existantes et de l'étude sur le terrain, les débits de crues peuvent être estimés par *différentes méthodes*. Aucune de ces méthodes ne devrait être utilisée seule : les caractéristiques des bassins sont trop variables pour qu'une seule d'entre elles donne satisfaction dans tous les cas. Chacune a ses forces et ses points faibles, qui se manifestent différemment selon le type de bassin. On propose au chapitre 5.2.3 d'utiliser un ensemble de cinq méthodes.

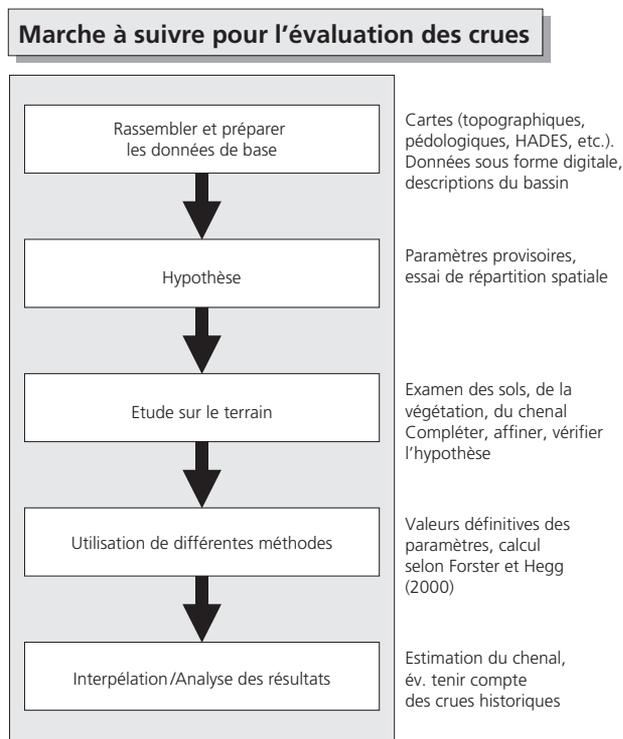


Fig. 5-22 : Marche à suivre pour l'évaluation des crues dans les petits bassins.

La marche à suivre décrite ici a fait ses preuves. Elle est présentée schématiquement dans la figure 5-22. Nous en décrivons plus bas les différentes étapes.

a) Rassembler et préparer les données de base

Il faut commencer par réunir des informations sur le bassin. Après une appréciation générale du bassin, il convient de rechercher la documentation permettant d'attribuer provisoirement une valeur aux paramètres nécessaires et d'esquisser leur répartition spatiale. Ces paramètres provisoires constituent une hypothèse de travail et sont vérifiés lors de la visite sur le terrain. Quelques paramètres (par ex. les intensités de précipitations de HADES) seront déjà définitifs à ce stade.

On peut distinguer trois types de sources d'informations :

- *Les informations sous forme de cartes*
Les cartes sont les principales sources d'informations. Les cartes nationales, les cartes des aptitudes des sols et les planches de l'Atlas hydrologique de la Suisse (HADES) couvrent tout le territoire du pays et existent donc pour tous les bassins. Leur échelle est souvent trop petite. Des cartes spéciales locales (par ex. pour la végétation) sont souvent plus détaillées. Les données sous forme digitale (par ex. le modèle numérique des altitudes, MNA) deviennent de plus en plus courantes.

Monographies

Lorsque des études sur la végétation, les sols ou la géologie d'une région sont effectuées, elles sont souvent accompagnées de cartes qui fournissent des renseignements utiles.

Informations par les habitants

Des contacts avec la population locale peuvent avoir lieu lors de la visite sur le terrain. Les personnes travaillant dans l'agriculture ou la sylviculture connaissent souvent les particularités de la région et peuvent fournir des renseignements qui devraient être vérifiés.

Les principales sources d'informations sont présentées ci-dessous.

Les informations sous forme de cartes

Les cartes constituent la *principale source d'informations* pour la mise sur pied de l'hypothèse de travail. Elles sont généralement peu détaillées mais ont l'avantage de couvrir tout le territoire du pays. Elles peuvent servir à mettre en évidence des tendances et des structures générales qui permettent de fixer des *limites* entre lesquelles les paramètres doivent être compris. Pour connaître une région, il faut avoir des informa-

tions sur sa topographie, sur le sol, sur la géologie et sur la surface couverte de forêt ou de cultures. Ces renseignements se trouvent dans les cartes suivantes :

- La carte nationale de la Suisse au 1:25'000
- La carte des aptitudes des sols au 1:200'000
- La carte de l'utilisation des sols de la Suisse au 1:300'000
- Les feuilles de l'Atlas géologique de la Suisse au 1:25'000 (ne couvrent pas toute la Suisse)

Dans bien des cas, ces cartes constituent les seuls documents permettant la mise sur pied de l'hypothèse de travail. Pour les petits bassins, des informations plus détaillées sont cependant souhaitables. Les services communaux ou cantonaux du cadastre ou les instituts de recherches travaillant éventuellement dans la région peuvent renseigner quant à l'existence d'autres sources d'informations. Pour le canton de Zurich, par exemple, il existe une carte des sols au 1:5'000.

On peut parfois aussi trouver auprès de ces mêmes organismes des *cartes géomorphologiques, de la végétation ou autres*. Les cartes établies pour les courses d'orientation sont aussi très détaillées, mais n'existent que pour peu de régions. L'interprétation de ces documents peut donner de précieuses indications pour l'établissement de hypothèse de travail.

Pour la détermination des intensités de précipitations, on utilisera les planches 2.4 et 2.4² « Pluies ponctuelles extrêmes de différentes durées et périodes de récurrence 1901-1970 » de l'Atlas hydrologique de la Suisse. Les données de la planche 2.4 sont disponibles sous la forme d'un fichier Excel. On peut aussi utiliser, lorsqu'il y en a pour la région, les mesures de stations météorologiques.

De plus en plus souvent, les informations sont disponibles sous forme digitale et donc propres à être utilisées dans des systèmes d'informations géographiques. L'hypothèse de travail peut être affinée par recouplement entre plusieurs niveaux d'informations. On trouve sous <http://www.kogis.ch/sik-gis/> une vue d'ensemble des données digitales mises à disposition par la Confédération et les cantons.

Les cartes suivantes couvrent l'ensemble du territoire suisse :

- Carte-pixel 1:25'000
- Modèle numérique d'altitude MNA25
- Carte géotechnique simplifiée de la Suisse
- Carte numérique des aptitudes des sols de la Suisse

- Statistique suisse de la superficie
- Planche 2.4 « Pluies ponctuelles extrêmes de différentes durées et périodes de récurrence 1901–1970 », HADES.

Pour la carte-pixel PK25, la Carte nationale Suisse au 1:25'000 a été scannée. Elle est utile pour établir l'hypothèse de travail mais aussi pour la digitalisation des différentes zones du bassin. Le MNA25 a été établi sur la base de cette carte. Le maillage étant de 25 m, il s'agit là du modèle digital le plus détaillé pour les altitudes existant pour la Suisse entière. Il existe d'autres modèles d'altitude couvrant quelques cantons avec une maille plus petite (par ex. 10 m dans le canton de Berne). La Statistique suisse de la superficie de l'Office fédéral de la statistique (OFS) donne des indications sur l'utilisation du sol. Basée sur des photos aériennes, elle indique l'utilisation dominante de chaque surface de 100 m de côté. En dépit de sa résolution assez grossière, elle est très utile : elle permet par exemple, en la superposant à la carte nationale, de repérer les surfaces utilisées pour l'agriculture intensive et de les considérer comme des zones à sols imperméables.

Monographies

Les études locales comprennent souvent des cartes spéciales pouvant fournir des indications complémentaires sur *l'utilisation du territoire* (par ex. compactage), sur la végétation (zones humides) ou autres. Pour valider le résultat des estimations, il est toujours utile d'étudier les crues historiques. Tous les cantons ont un cadastre des crues couvrant des périodes plus ou moins longues, et plus ou moins détaillé. On trouve souvent aussi des descriptions de crues dans d'anciennes chroniques, dans les vieux journaux ou autres (dommages causés par les événements, marques indiquant le niveau atteint par l'eau, zones inondées), qui permettent une estimation hydraulique grossière.

Informations par les habitants

Statistiquement, la probabilité qu'une crue centennale se produise au cours d'une période de 50 ans est de 40%. Pour une crue d'une période de retour de 30 ans, cette probabilité est de 80%. Les personnes résidant depuis longtemps dans le bassin peuvent souvent donner une description des fortes intempéries. Des observations sur le déroulement des événements ou des relevés de pluviomètres privés peuvent aussi contribuer à estimer leur importance. De même, des indications sur les zones inondées et sur le niveau atteint par les eaux peuvent aussi servir à reconstruire de *façon approximative les débits maximums*. Bien que ces informations soient très utiles, elles doivent toujours être considérées d'un œil critique.

Temps nécessaire pour obtenir les informations

Les temps nécessaires pour obtenir les informations est très variable. On peut admettre que les cartes et les données digitales existent et peuvent être obtenues en peu de temps (<http://www.swistopo.ch>, <http://www.statistik.admin.ch>). On peut ainsi gagner du temps pour les recherches complémentaires.

Le temps à consacrer à la recherche de cartes spéciales ou des monographies locales peut être nettement plus long. Il faut en premier lieu chercher dans le réseau des bibliothèques (<http://www.nebis.ch>). Pour trouver des informations détaillées auprès d'autres institutions (monographies, cartes spéciales) il faut compter encore plus de temps et tenir compte du temps qu'il faudra au détenteur de ces informations pour les mettre à disposition.

b) Etablissement de l'hypothèse pour la description du bassin

Dans la pratique, le temps à disposition pour l'évaluation des crues est compté. La visite sur le terrain doit être préparée soigneusement. On gagnera ainsi beaucoup de temps dans cette phase du travail. La formulation de l'hypothèse de travail au sujet du bassin est un des éléments importants de cette préparation. Où doit-on s'attendre à trouver des zones humides, des zones compactées ? Où un certain type de sol est-il improbable ? Si les cartes à disposition ne permettent pas la détermination des paramètres en raison de leur échelle non appropriée, elles constituent cependant une base (et souvent la seule) pour la formulation de l'hypothèse. Si les informations à disposition sont suffisantes et le bassin pas trop compliqué, l'hypothèse peut être assez bonne pour que la visite sur le terrain ne serve qu'à préciser et à affiner quelques points. Signalons que nous ne pouvons donner ici que des indications générales quant à l'établissement de l'hypothèse de travail. Le contrôle sur le terrain doit avoir lieu dans tous les cas. L'utilisation de l'hypothèse telle quelle pour l'évaluation des crues ne donnera pas de bons résultats, les cartes ne reflétant pas la diversité des caractéristiques des bassins dans le détail. La documentation décrite plus haut sert de base pour l'établissement de l'hypothèse de travail. Toutes les méthodes décrites ici, à part celle de Kölla, sont basées sur une description différenciée du bassin qui, elle-même, repose sur une division du bassin en zones ayant les mêmes caractéristiques hydrologiques. Le schéma de décision de RICKLI & FORSTER (1997, v. Fig. 5-23) facilite la mise sur pied d'une hypothèse de travail objective et est utile pour la visite sur le terrain. Des restrictions quant à l'utilisation de ce schéma sont décrites au chapitre 5.2.3. L'hypothèse consistant à diviser provisoirement le bassin en différentes zones

est en général esquissée sur la copie d'une carte topographique au 1:25'000.

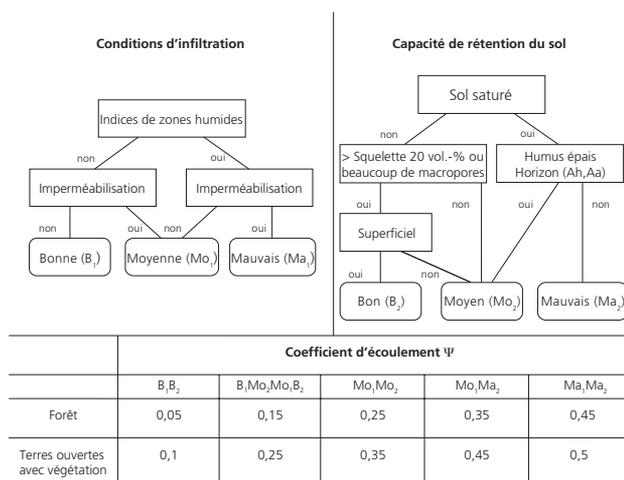


Fig. 5-23 : Schéma de décision pour la détermination du coefficient d'écoulement (d'après RICKLI & FORSTER 1997).

On considère que l'apparition de l'écoulement de surface est déterminée, d'une part par les conditions d'infiltration à la surface, d'autre part par la capacité de stockage du sol. Le comportement hydrologique du sol est déterminé à l'aide des critères ci-dessous :

Indices d'humidité/Saturation

Les zones humides indiquent une saturation en eau et un sol peu perméable. On peut par conséquent les considérer comme propices aux écoulements de surface. On y trouve une végétation caractéristique (par ex. le grand taconnet). L'emplacement de ces zones est difficilement prévisible au moment de mettre sur pied l'hypothèse de travail. La géologie, la carte d'aptitude des sols et la densité du réseau hydrographique servent d'indicateurs. Souvent, elles sont en relation avec de faibles variations topographiques. Ainsi les crêtes ont une tendance moindre à rester humides que les cuvettes ou les surfaces proches des cours d'eau. Ces zones peuvent être repérées à l'aide des cartes topographiques au 1:25'000 ou du MNA25.

Les sols argileux favorisent la formation de zones humides. Leurs roches mères sont souvent des flyschs ou des «Bündnerschiefer». Les cartes des aptitudes des sols, les cartes géotechniques et les feuilles de l'Atlas géologique de la Suisse (pour autant que celle qui couvre le bassin étudié ait été publiée) sont les documents à consulter.

Un réseau hydrographique dense indique aussi une zone favorable aux écoulements de surface. Si l'on utilise les cartes nationales au 1:25'000, on tiendra

compte du fait que précisément dans ces zones riches en cours d'eau, elles sont souvent peu détaillées. Pour les zones plates avec des sols relativement secs, la représentation cartographique est en général fidèle à la réalité. Pour la méthode Clark-WSL (v. Chap. 5.2.2 f), l'état du bassin au moment des hautes eaux est très important. Il faudra par conséquent, pour cette méthode, ajouter au réseau hydrographique les ruisseaux souvent à sec et les dépressions, indiquées par les lignes de niveau, susceptibles de se transformer en petits rus lors de fortes pluies. Les cours d'eau secs figurant sur les cartes au 1:25'000 seront systématiquement ajoutés au réseau hydrographique. Il va de soi que l'on tiendra aussi compte des zones marécageuses indiquées sur les cartes nationales au 1:25'000 par un figuré particulier.

Imperméabilisation

Une compaction du sol (pâturage intensif, utilisation de machines agricoles lourdes, pistes de ski) réduit la capacité d'infiltration. Les sols humides à granulométrie fine se compactent plus facilement que les sols secs à grain grossier (par ex. les sols à fort pourcentage de squelette). La carte des aptitudes des sols donne aussi de précieuses indications. On peut supposer l'existence de sols imperméabilisés aux endroits où les cartes nationales indiquent une exploitation intensive (vergers, remonte-pentes, etc.) et là où la statistique de la superficie indique des surfaces agricoles.

Pourcentage de squelette

Un sol doit avoir un fort pourcentage de squelette (> 20%) pour que sa perméabilité soit bonne. Sa teneur en squelette est en grande partie déterminée par la roche mère. Là où la carte des aptitudes des sols indique la présence de sols tels que rendzines, rankers, lithosols ou encore de formations telles que moraines ou cônes de déjection, on peut admettre un fort pourcentage de squelette. Les formations morphologiques sont plus faciles à identifier sur la carte géologique que sur celle des aptitudes des sols.

Macropores

Les macropores créés par bioturbation ou par des fissures de retrait favorisent l'infiltration et la percolation vers les couches plus profondes. La présence de macropores est difficile à déceler. Parfois ils sont signalés dans les monographies locales. Sinon, seule l'observation attentive du sol permet de les mettre en évidence.

Profondeur du sol

Si les horizons du sol qui stockent l'eau sont peu épais (< 40 cm), celui-ci ne pourra en retenir que très peu.

La carte des aptitudes des sols et éventuellement des études locales peuvent donner des informations à ce sujet. Toutes les surfaces où les sols y sont qualifiés de peu épais seront considérés comme telles dans l'hypothèse de travail.

Couche d'humus

Une couche épaisse d'humus (> 20 cm) surmontant un horizon de sol saturé agit favorablement sur la capacité de rétention. Comme dans le cas des macropores, la mise sur pied d'une hypothèse est difficile, mais dans ce cas aussi, des monographies sur la région peuvent donner des indications.

Temps nécessaire

Il faut compter environ une demi-journée de travail pour l'examen des informations à disposition et l'établissement de l'hypothèse de travail.

c) Etude sur le terrain

Le but de la visite sur le terrain est de *contrôler la valeur de la division du bassin en zones prise comme hypothèse, de la compléter et de l'adapter*. La limite exacte entre les forêts et les champs sera dessinée avec précision et le réseau hydrographique complété. L'examen des profils du sol permet de juger de la qualité de la répartition des zones adoptée dans l'hypothèse.

Les observations faites sur le terrain doivent toujours être documentées par un protocole de terrain. Quelques photographies sont utiles pour l'interprétation des données au bureau.

Pour valider les résultats, on étudiera le chenal. On s'efforcera aussi d'obtenir de la part des habitants des informations sur les crues et les intempéries dont ils ont connaissance (v. Chap. 5.2.1 a).

Ce qui a été dit au chapitre précédent à propos de la division du bassin en zones est aussi valable pour l'étude sur le terrain, c'est pourquoi nous nous contenterons ici de préciser quelques points.

On excavera quelques tranchées pour dégager des profils du sol après avoir réalisé quelques sondages de reconnaissance à l'aide d'une tarière. Ces sondages ne remplacent pas les tranchées car ils ne donnent qu'un aperçu ponctuel du sol et ne mettent pas en évidence les grandes structures du squelette. La tarière est en revanche parfaite pour donner rapidement un aperçu du sol sur une surface importante.

Il va de soi que les tranchées ne seront pas creusées n'importe où si le terrain est exploité pour l'agriculture. Dans tous les cas, elles seront comblées après avoir été étudiées, pour en effacer toute trace. On demandera préalablement une autorisation au propriétaire

du terrain, ce qui sera l'occasion d'obtenir éventuellement quelques informations sur le bassin versant et sur des événements s'y étant produits.

L'examen du chenal permet de déterminer les paramètres requis par la méthode Clark-WSL (v. Chap. 5.2.1 e, Chap. 5.2.2 f ou VOGT 2001), mais aussi de faire les observations nécessaires pour valider les résultats obtenus (voir aussi à ce sujet le Chap. 5.2.1 e « Interprétation et validation des résultats »).

Temps nécessaire pour l'étude sur le terrain

Il faut compter environ une journée de travail sur le terrain. Si le bassin est grand et si les zones qui le composent sont très différenciées, deux jours peuvent être nécessaires.

d) Application des méthodes

Les connaissances acquises sur le terrain permettent de corriger et de compléter les paramètres admis pour l'hypothèse de travail. Dans un premier temps, la division définitive du bassin en zones sera dessinée. Puis la surface de ces zones sera planimétrée. L'utilisation d'un système d'information géographique facilite ce travail. Ensuite, les paramètres dont on aura besoin seront calculés (par ex. les vitesses d'écoulement pour Clark-WSL).

Lorsque tous les paramètres sont connus, le calcul des débits de crue peut être effectué. Les différentes méthodes proposées pour l'évaluation des crues sont décrites dans le chapitre 5.2.2. Il s'agit de cinq modèles : *Müller, Taubmann, Kölla, modèle modifié du temps d'écoulement et Clark-WSL*. Des indications au sujet du poids à attribuer à ces différents modèles sont données au chapitre 5.2.3. Les descriptions du chapitre 5.2.2 et les références bibliographiques suffisent pour utiliser ces modèles de façon autonome. Leur but est la détermination des débits de pointe et du domaine de fluctuation correspondant (valeurs limites supérieures et inférieures).

Le WSL a mis au point un paquet de programmes appelé HAKESCH (**H**ochwasser **A**bschätzung in kleinen **E**inzugsgebieten der **S**chweiz, soit « Evaluation des crues dans les petits bassins versants de Suisse »). Ce paquet permet une estimation efficace des crues. Il détermine les paramètres du terrain. Après le calcul de la crue avec les méthodes décrites ici, il propose un débit de crue sous forme numérique et graphique, après avoir effectué une pondération des différents résultats. Toutes les données peuvent être mémorisées et exportées. Le paquet de programmes HAKESCH est complété par un manuel et des instructions pour l'étude du bassin.

Temps nécessaire pour l'application des méthodes

S'il n'y a pas de programme pour l'utilisation des méthodes, il faut compter plusieurs jours pour réaliser les calculs. Le paquet HAKESCH ou des programmes « maison » permettent de réduire ce temps à quelques heures.

e) Interprétation et validation des résultats

On peut augmenter la qualité des résultats en les validant à l'aide de caractéristiques observées sur le terrain, comme par exemple la capacité du chenal.

Dans les cours d'eau naturels, le chenal est modelé par les forts débits d'une période de retour longue. Les débits de pointe peuvent par conséquent être estimés à l'aide de calculs hydrauliques faisant intervenir la *section du cours d'eau correspondant aux crues*.

Cette section est celle où le passage de l'eau a laissé des traces visibles sur la végétation. Des débris charriés par l'eau restent souvent accrochés aux buissons de la berge pendant des mois. Sur les talus du chenal, on observe souvent plusieurs étages de végétation : les grands arbres ne se développent qu'au-dessus d'un niveau rarement atteint par l'eau (période de retour > 100 à 200 ans). Il faut toutefois tenir compte du fait que le chenal des torrents de montagne est affecté par différents processus de transport solide. Le lit du cours d'eau peut aussi être un couloir d'avalanches en hiver. La couche de neige peut alors y être très épaisse, empêchant la végétation de se développer au-dessus du niveau atteint par les crues. Des glissements peuvent aussi entraîner les berges, y compris la végétation vers le chenal, ce qui peut donner l'impression que la section du cours d'eau est plus petite qu'elle n'est en réalité. Les laves torrentielles ont aussi un effet sur la végétation. Il faut tenir compte de tous ces phénomènes au moment de définir la section du cours d'eau. Comme déjà dit, il peut exister des témoins oculaires pouvant indiquer le niveau atteint par les eaux lors des crues.

Temps nécessaire pour l'interprétation et la validation des résultats

Le temps qu'il faut pour arriver au résultat était déjà compris dans les temps indiqués au chapitre 5.2.1 a et c.

5.2.2 Méthodes

Les méthodes présentées dans le présent chapitre font partie du procédé proposé par FORSTER & HEGG (2002) pour évaluer les crues dans les petits bassins. Douze méthodes ont été testées, six d'entre elles ont été éliminées pour différentes raisons.

Certaines de ces méthodes ont été développées à l'étranger et ne peuvent pas être transposées sans d'importantes adaptations aux conditions régnant en Suisse (SACKL, TM61). D'autres aboutissent à une grande dispersion des résultats pour les petits bassins (Hager, IfK-ETH) ou ne tiennent pas assez compte de l'inhomogénéité des petits bassins (Hydrogramme unitaire) ou encore sont trop compliqués à mettre en œuvre et ne sont pas objectives pour évaluer correctement les crues (méthode du temps de propagation de Zeller). Les cinq méthodes présentées ci-dessous ont donné, pour les bassins étudiés, des résultats relativement satisfaisants par rapport à ceux qui ont été obtenus statistiquement. On montre au chapitre 5.2.3 comment on détermine le débit et le domaine de dispersion correspondant à l'aide de ces méthodes.

a) Détermination de l'intensité des pluies

A part celle de Müller, les méthodes présentées ici utilisent les intensités ou les quantités de précipitations. Les cartes des fortes précipitations de l'Atlas hydrologique de la Suisse (1992) constituent une bonne base pour estimer les intensités de pluie.

Le fait qu'il existe deux versions différentes de ces cartes embarrasse toujours les praticiens. FORSTER & BAUMGARTNER (1999) recommandent de toujours choisir la valeur la plus élevée pour le bassin étudié. La limite supérieure est donnée par la courbe des plus fortes intensités de pluies mesurées en Suisse (Fig. 5-24).

On peut aussi utiliser les analyses statistiques des mesures de pluie réalisées dans le bassin, s'il en existe.

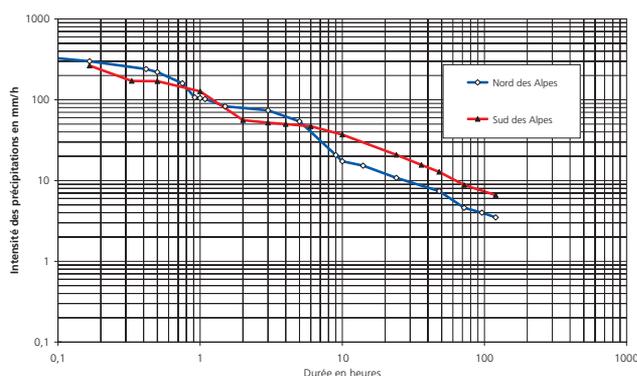


Fig. 5-24 : Courbe-enveloppe de l'intensité des pluies maximales mesurées au nord et au sud des Alpes (FORSTER & BAUMGARTNER 1999).

b) Müller modifié

Description du modèle

La méthode de Müller modifiée est une méthode de courbe-enveloppe qui établit une relation entre le dé-

bit de pointe Q et la surface E du bassin. Le coefficient d'écoulement Ψ introduit les caractéristiques du bassin dans la formule. MÜLLER (1943) a formulé la relation de la façon suivante :

$$HQ_{\max} = 43 \cdot \Psi \cdot E^{2/3}$$

HQ_{\max} : crue maximale possible dans le bassin [m^3/s]

Ψ : coefficient d'écoulement, déterminé selon RICKLI & FORSTER (1997)

E : surface du bassin [km^2]

Période de retour

Müller a développé sa méthode au début des années 40 en utilisant les données sur les débits disponibles à l'époque. Cette méthode détermine la « plus forte crue possible » dans un bassin. Dans la plupart des cas, elle donne des résultats dépassant largement le HQ_{100} calculé statistiquement. Les petits bassins où les écoulements sont très abondants constituent une exception : il arrive que HQ_{100} soit plus petit que HQ_{\max} calculé.

Surface des bassins

La méthode de Müller peut être utilisée pour des bassins de plus d'un km^2 . Entre 0,5 et 1 km^2 , on obtient des résultats nettement moins bons étant donné que $E^{2/3}$ est dans ce cas plus grand que la surface E du bassin. Pour les bassins de moins de 0,5 km^2 , la méthode donne des débits beaucoup trop élevés.

Types de bassins

Les caractéristiques du bassin sont introduites dans le modèle par le biais du coefficient d'écoulement.

Données nécessaires

Pour la méthode de Müller, il faut connaître la surface E et le coefficient d'écoulement de pointe Ψ , qui est déterminé sur le terrain au moyen du schéma de décision de RICKLI & FORSTER (1997) (Fig. 5-23).

Références

Le modèle est expliqué dans MÜLLER (1943) ainsi que dans FORSTER & RICKLI (1997).

c) Taubmann/Thiess/Chow

Description du modèle

La méthode se base sur celle que CHOW (1962, 1964) a développé aux Etats-Unis, en s'appuyant sur la méthode SCS et postulant que le débit maximum est atteint lorsque la durée des précipitations déterminantes est égale au temps de concentration (méthode du temps d'écoulement). Les précipitations déterminantes et les principales caractéristiques du bassin doivent être connues.

La méthode permet le calcul des débits des crues mais aussi du volume d'eau écoulé (hydrogramme de crue). La méthode a été adaptée pour les conditions prévalant dans le Bade-Wurtemberg par THIESS (1975) et testée sur différents bassins de Suisse par TAUBMANN (1986).

L'équation de Taubmann/Thiess est :

$$HQ(t,T) = A \cdot X(t,T,\alpha) \cdot Y(t,T) \cdot Z(t)$$

HQ(T) : Crue d'une période de retour de T années [m³/s]

A : Surface du bassin [km²]

X : Facteur d'écoulement [sans dimension]

Y : Facteur climatique [sans dimension]

Z : Facteur de réduction d'amplitude [sans dimension]

t : Durée de pluie déterminante (temps de concentration)

T : Période de retour [années]

α : Coefficient complexe d'écoulement

Le facteur d'écoulement X est l'intensité de pluie provoquant un écoulement. Il a été établi pour les conditions hydrologiques d'Urbana (Illinois, USA) et dépend du coefficient α , que l'on détermine sur le terrain. Le facteur climatique Y est déterminé par le rapport entre l'intensité de la pluie déterminante du bassin étudié et celle d'Urbana. Cette intensité de pluie dépend du temps de concentration t, que l'on détermine au moyen des lois de l'écoulement de Chézy et Strickler. Le facteur de réduction d'amplitude Z est un coefficient de la méthode du temps d'écoulement qui tient compte de l'effet de rétention du bassin.

Période de retour

Des nomogrammes (TAUBMANN & THIESS 1984) permettent de déterminer les valeurs de X pour des périodes de retour de 5, 10, 25, 50 et 100 ans. Comme pour d'autres méthodes, la période de retour des crues dépend de la période de retour des précipitations.

Surface des bassins

CHOW (1962) a développé sa méthode pour des petits bassins naturels de moins de 30 km². TAUBMANN (1986) a étendu son domaine d'application de 1 km² à 300 km². Pour des bassins d'une surface de 0,5 à 1,0 km², il semble que les débits de pointe qu'il fournit soient aussi valables.

Types de bassins

Le type de bassin est déterminé à l'aide des « curve numbers » de la méthode SCS (CHOW 1964).

Données nécessaires

Pour utiliser cette méthode, on doit connaître l'utilisation des sols du bassin. On peut la déterminer lors de la reconnaissance sur le terrain. Elle permet de fixer la valeur du coefficient α .

Autres données nécessaires :

i_E et i_U : Intensité réelle des précipitations dans le bassin et à Urbana (Illinois, USA) [mm/h]

L : Longueur du chenal principal [km]

J : Pente moyenne du chenal principal [m/m]

H : Lamé d'eau moyenne estimée [m]

Ces paramètres permettent de déterminer le temps de concentration et, selon la période de retour, l'intensité déterminante des précipitations. Le paramètre le plus sensible est le coefficient α . S'il varie de 5%, le débit de pointe résultant pourra varier, lui, de 30%. Le tableau permettant sa détermination est adapté aux bassins à vocation agricole du Plateau. Il ne convient pas pour les bassins des Préalpes ou des Alpes, dans lesquels de grandes surfaces ne sont pas exploitées par l'agriculture (forêts, marécages, éboulis, etc.).

Références

La méthode est expliquée en détail dans TAUBMANN & THIESS (1984).

d) Méthode modifiée du temps d'écoulement

Cette méthode est très semblable à celle du temps d'écoulement (formule rationnelle) (CHOW 1964). La formule suivante est proposée :

$$HQ(x) = 0,278 \cdot i(T_{c,x}) \cdot \psi_s \cdot E \text{ [m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2\text{]}$$

HQ(x) : Débit de pointe d'une période de retour x [m³/s]

i : Intensité de la pluie déterminante [mm/h]

ψ_s : Débit de pointe d'après Rickli [sans dimension]

E : Surface du bassin [km²]

T_c : Temps de concentration [min]

X : Période de retour [années]

Le facteur de conversion de 0,278 est dû aux unités choisies.

La méthode modifiée du temps d'écoulement est basée sur les hypothèses suivantes :

- Les débits les plus élevés se produisent lorsque la durée des précipitations est égale au temps de concentration.
- L'intensité des précipitations reste constante pendant toute la durée de l'épisode pluvieux

On appelle temps de concentration le temps qu'il faut à une goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin pour atteindre l'exutoire. Dans la méthode modifiée du temps d'écoulement, le temps de concentration est la somme du temps nécessaire pour que le sol arrive à saturation T_B et du temps d'écoulement T_{FI} :

$$T_c = T_B + T_{FI}$$

Le temps d'écoulement est déterminé par la méthode de Kirpich (CHOW 1964). Il est en relation avec la plus grande distance à parcourir par l'eau et la pente moyenne :

$$T_{FI} = 0,0195 \cdot L^{0,77} \cdot J^{-0,385} \text{ [min]}$$

- L : Distance d'écoulement (distance entre l'exutoire et le point du bassin qui en est le plus éloigné)
 J : Pente moyenne entre l'exutoire et le point du bassin le plus éloigné

T_B est le temps nécessaire pour que la pluie arrive à déclencher le processus d'écoulement. Ce temps est déterminé selon Kölla (1986) et dépend essentiellement des caractéristiques du sol et du sous-sol. L'intensité de la pluie de projet est déterminée de façon itérative de façon que le terrain arrive à saturation pendant la durée de la pluie et que le débit de pointe se produise pendant le temps T_{FI} .

La surface contributive pour l'écoulement est, dans cette méthode, le produit de la surface du bassin par le coefficient du débit de pointe Ψ_s . Ce coefficient est déterminé à l'aide du schéma de décision de la figure 5-23 pour toutes les zones du bassin. Il est ensuite calculé pour l'ensemble du bassin par pondération.

Période de retour

Comme dans d'autres méthodes, la période de retour des crues dépend de la période de retour des pluies.

Surface des bassins

Jusqu'à présent, la méthode n'a été testée par Forster et Hegg que pour des bassins de moins de 5 km².

Types de bassins

Un coefficient d'écoulement Ψ_s différent pour chacune des zones du bassin selon RICKLI & FOSTER (1997) (Fig. 5-23) et le volume de pluie nécessaire pour saturer le sol V_{020} (selon Kölla (1986), déterminés sur la carte des aptitudes des sols et grâce à une bonne connaissance du bassin, permettent de caractériser le bassin.

Données nécessaires

Les données nécessaires sont énumérées dans la description du modèle. Le coefficient d'écoulement Ψ_s ainsi que le temps de concentration T_c sont les deux paramètres les plus sensibles.

Suivant la forme du bassin, on peut obtenir un débit de crue plus élevé si l'on ne tient pas compte d'une partie du bassin. Ceci est dû au fait que le temps de concentration peut ainsi être raccourci et qu'il en résulte une intensité de précipitations plus grande. Ce cas peut se produire par exemple dans les bassins dont la partie supérieure est constituée par un haut-plateau.

Références

On trouvera dans BAUMANN et al. (1992), RICKLI & FORSTER (1997) et KÖLLA (1986) toutes les indications nécessaires pour la mise en œuvre de la méthode.

e) Kölla

Description du modèle

Cette méthode pour évaluer les crues est basée sur le temps d'écoulement. Les connaissances acquises sur la formation des écoulements ont permis de modifier la formule d'origine (Kölla 1986, 1987).

Kölla part du principe que seules les zones proches des cours d'eau contribuent aux crues, alors que les surfaces plus éloignées n'y participent que de façon marginale. La méthode ne fait par conséquent intervenir que les surfaces voisines des chenaux, contribuant effectivement aux crues. Ces surfaces s'étendent des deux côtés des cours d'eau, jusqu'à la ligne de partage des eaux la plus proche, mais au maximum jusqu'à 100 m des berges.

La durée déterminante de la pluie (= temps de concentration) dépend principalement de la quantité d'eau nécessaire pour que des écoulements se produisent à partir des surfaces proches des cours d'eau. La formule connue du temps d'écoulement devient :

$$HQ(x) = [i(T_c, x) - f(T_c, x)] \cdot F_{Leff} \cdot k_G + Q_{GI},$$

avec $T_c = T_B + T_{FI}$

HQ(x) : Débit d'une crue de période de retour de x [m³/s]

$i(T_c, x)$: Intensité de précipitations d'une période de retour de x et d'une durée T_c [mm/h]
 $f(T_c, x)$: Pertes dans le sous-sol [mm/h]
 F_{Leff} : Surface du bassin contribuant aux crues [km²]
 k_G : Facteur tenant compte de l'effet d'amplification des crues en raison des conditions d'humidité préalables
 Q_{Gi} : Débit en provenance de glaciers [m³/s]
 T_c : Temps de concentration [h]
 T_B : Temps nécessaire pour saturer le sol [h]
 T_{Fi} : Temps total d'écoulement [h]

La méthode a été conçue pour des crues d'une période de retour de 20 ans, puis de 100 ans grâce à de petites modifications.

Les paramètres les plus importants sont : la surface contribuant aux crues –déterminée sur les cartes au 1:25'000- et la hauteur de pluie déterminante, qui est déterminée à l'aide des cartes des aptitudes des sols

Période de retour

Dans la méthode de Kölla, la période de retour ne dépend pas uniquement de la période de retour des précipitations comme dans les autres méthodes présentées ici, mais tient compte des surfaces qui contribuent aux crues et de la pluie déterminante. Par ailleurs, le facteur k_G doit être adapté, étant donné qu'il dépend du temps de concentration T_c . La méthode admet cependant aussi que le débit de crue recherché a la même période de retour que la pluie déterminante.

Surface des bassins

La méthode a été mise au point à l'aide de 120 stations de jaugeage de bassins versants suisses, d'une surface comprise entre 0,5 et 100 km².

Types de bassins

La quantité de pluie nécessaire pour que des écoulements aient lieu dépend des caractéristiques du bassin versant, de même que le facteur de surface, qui modifie la surface contributive en fonction de la période de retour.

Données nécessaires

Ces données sont énumérées dans la description du modèle.

Références

On trouvera dans KÖLLA (1986) toutes les indications nécessaires pour la mise en œuvre de la méthode.

f) Clark-WSL

Cette méthode est la plus récente des cinq méthodes présentées ici. Elle est le résultat d'un travail de diplôme réalisé au WSL (VOGT 2001). Ce travail était soumis aux conditions suivantes :

- Mettre sur pied une méthode d'évaluation des crues des torrents de montagne (de < 1 à 5 km²) de différentes périodes de retour.
- Générer l'hydrogramme de crue.
- Le temps nécessaire pour appliquer la méthode ne doit pas dépasser deux jours.
- La méthode doit être objective, c'est-à-dire que le résultat obtenu ne doit dépendre de l'utilisateur que dans une faible mesure.

La méthode combine le stockage linéaire et la translation linéaire. Une partie des paramètres est obtenue à l'aide d'un SIG.

Description du modèle

Cette méthode est basée sur le modèle de Clark, un modèle Pluie-Débit qui décrit les écoulements par une combinaison de stockage linéaire et une translation linéaire (KOEHLER 1976). Le réservoir linéaire est décrit par une constante K et se trouve à la sortie du bassin ; cette constante a la dimension du temps et est une mesure de la capacité de rétention du bassin. Elle a un effet important sur la répartition des débits dans le temps et par conséquent sur la grandeur du débit de pointe.

La translation linéaire est prise en compte par un diagramme Temps-Surface, qui définit la fonction d'entrée dans le réservoir linéaire et détermine le pourcentage de la pluie qui contribue effectivement aux écoulements et sa distribution dans le temps au réservoir linéaire de l'exutoire. La formation des écoulements est basée sur la division du bassin en zones ayant les mêmes réactions du point de vue hydrologique (RICKLI & FOSTER 1997). La concentration des débits de pointe est prise en compte par le diagramme Temps-Surface. Pour le calcul numérique du débit de crue $Q(t)$ sortant du réservoir linéaire, Clark a choisi le passage à des pas de temps discrets, en utilisant la méthode de Muskingum (KOEHLER 1976).

Période de retour

La période de retour dépend, comme dans d'autres méthodes, de celle des pluies. La méthode peut donc être appliquée à n'importe quelle période de retour.

Surface des bassins

La méthode a été testée sur quatre petits bassins, dont deux dépassaient 2 km² (3,2 et 4,6 km²).

Types de bassins

La capacité de rétention est estimée pour chaque zone du bassin. Les vitesses d'écoulement, qui sont à la base du diagramme Temps-Surface, sont déterminées à partir de la pente du chenal et de la surface du bassin.

Données nécessaires

Les paramètres du bassin, en particulier ceux relatifs aux sols et à leur utilisation, sont à relever sur le terrain.

Temps de concentration t_c

L'arrivée à l'exutoire de l'eau tombée dans le bassin est déterminée à l'aide du diagramme Temps-Surface. On attribue à la surface du terrain et au chenal des vitesses d'écoulement en fonction des conditions topographiques et hydrologiques pour en déduire le temps de concentration et ensuite la précipitation déterminante.

Capacité de rétention

La capacité de rétention est déterminée par le réservoir du sol pouvant être mobilisé rapidement au cours d'une précipitation. Elle dépend des conditions d'infiltration et de la capacité du sol à retenir l'eau. Les informations nécessaires, relatives à l'humidité, la compaction, la structure du sol, sa teneur en squelette et son épaisseur résultent de l'étude du sol et de la végétation (RICKLI & FORSTER 1997).

Coefficient du volume d'écoulement Ψ_v

La pluie efficace est déterminée par une méthode SCS modifiée qui fait intervenir le stockage d'eau dans le bassin par sa capacité de rétention :

$$N_{\text{eff}} = \frac{(N - 0,2 \cdot WSV)^2}{N + 0,8 \cdot WSV} \rightarrow \Psi_v = N_{\text{eff}} / N$$

Constante de stockage K

La constante de stockage est normalement calculée sur la base des crues observées dans le bassin. Dans la méthode de Clark-WSL, elle est déterminée à partir de la capacité de rétention.

Références

On trouvera dans VOGT & FORSTER (1999) et VOGT (2001) toutes les indications nécessaires pour la mise en œuvre de la méthode.

5.2.3 Appréciation

FORSTER & HEGG (2002) ont testé les différentes méthodes présentées ici sur sept petits bassins versants. Il s'est avéré qu'aucune d'entre elles ne tient suffisamment compte du vaste éventail des caractéristiques des bassins pour fournir dans tous les cas de bons résultats. Des tendances systématiques à la sous-évaluation ou à la surévaluation des débits de crues peuvent être mises en évidence.

Il est donc recommandé d'utiliser les cinq méthodes simultanément, ce qui permet de se rendre compte de la dispersion des résultats et de déterminer la crue pouvant être considérée comme crue de projet. On peut mettre en évidence la dispersion de chaque modèle en faisant varier ses paramètres dans des limites plausibles (valeurs extrêmes supérieure et inférieure, valeur la plus probable).

Dans un second temps, les résultats obtenus grâce aux différents modèles sont comparés entre eux. La façon de faire décrite ci-dessous a donné de bons résultats :

- La *méthode de Müller* a dans la plupart des cas donné le résultat le plus élevé et celle de *Taubmann* le plus faible. Ces deux méthodes peuvent ainsi être considérées comme donnant les limites de la dispersion.
- Les *méthodes de Kölla, de Clark-WSL et la méthode modifiée du temps d'écoulement* sont utilisées pour estimer la crue déterminante.
- Le débit de pointe déterminant est obtenu en faisant la moyenne des deux valeurs les plus élevées fournies par ces trois méthodes
- Si le résultat fourni par l'une de ces trois méthodes (Kölla, Clark-WSL et méthode modifiées du temps d'écoulement) tombent hors des limites du domaine de dispersion défini plus haut, il n'est pas utilisé pour évaluer la crue déterminante. On peut dans ce cas considérer que l'on a affaire à un bassin particulièrement difficile.

Les résultats obtenus par ce procédé peuvent être considérés comme relativement sûrs. On constate toutefois une tendance à une sous-estimation par rapport aux valeurs calculées statistiquement pour les bassins aux écoulements abondants.

Les exemples suivants illustrent la façon de procéder décrite plus haut. Les colonnes en gris représentent les résultats donnés par les différentes méthodes, le plus élevé étant celui de la méthode de Müller, le plus faible celui de Taubmann. Les méthodes de Kölla, de Clark-WSL et la méthode modifiée du temps d'écoulement sont représentées par les colonnes 2, 3 et 4. La ligne rouge indique le débit de crue déterminant calculé.

En général, on obtient des résultats du type de ceux représentés dans la figure 5-25.

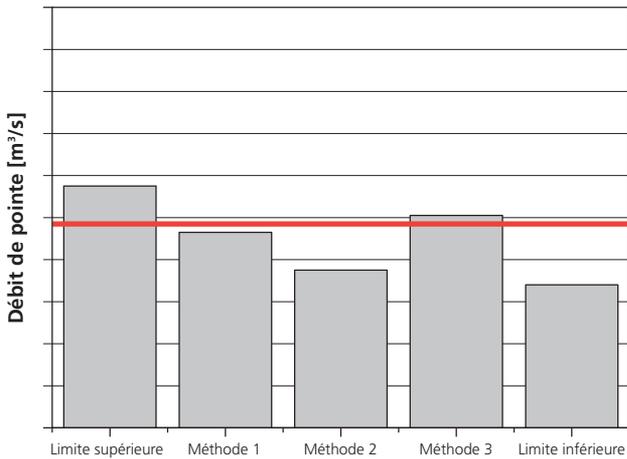


Fig. 5-25 : Cas usuel, les méthodes 1 à 3 donnent des valeurs comprises entre les limites supérieure et inférieure.

Le débit de pointe déterminant sera dans ce cas la moyenne entre les deux valeurs les plus élevées fournies par les méthodes 1 à 3 (donc ici entre 1 et 3).

Lorsqu'on obtient des résultats n'entrant pas dans ce schéma normal, c'est que l'on a affaire à un bassin posant des problèmes. Des recherches supplémentaires sont alors nécessaires.

Si les résultats ne s'écartent que peu de ce schéma, il est recommandé de procéder de la façon décrite dans les trois exemples ci-dessous. Les remarques que nous ferons au sujet de la surestimation des crues sont aussi valables lorsqu'il y a sous-estimation.

La figure 5-26 montre un exemple où l'une des méthodes donne des résultats légèrement plus élevé que

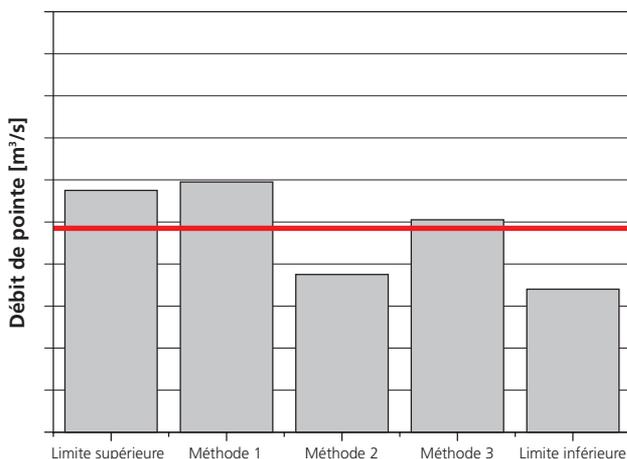


Fig. 5-26 : Le résultat donné par l'une des méthodes dépasse de peu la limite supérieure.

la limite supérieure (Müller). Comme la surestimation est faible, la méthode 1 est prise en compte et le débit déterminant sera la moyenne entre les résultats 1 et 3.

La figure 5-27 montre un cas dans lequel une des méthodes donne un résultat dépassant nettement la limite supérieure. Le débit de pointe déterminant sera la moyenne entre les résultats de 2 et 3.

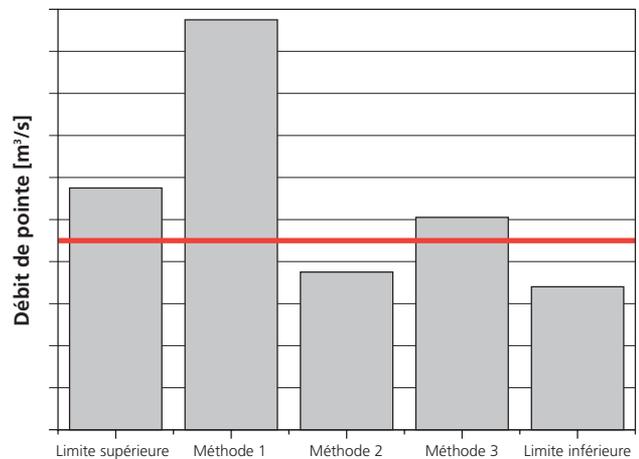


Fig. 5-27 : Le résultat donné par l'une des méthodes dépasse nettement la limite supérieure.

Dans le quatrième exemple (Fig. 5-28), deux des résultats dépassent légèrement la limite supérieure. Le résultat de la troisième méthode peut confirmer cette tendance à des valeurs trop fortes. Le débit de pointe déterminant sera fixé au voisinage de la limite supérieure.

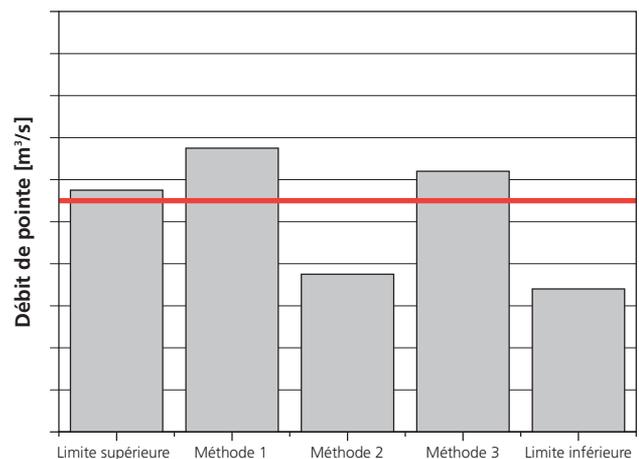


Fig. 5-28 : Le résultat donné par deux des méthodes dépasse la limite supérieure.

Les méthodes ont été testées systématiquement dans des bassins des Préalpes où la molasse et le flysch do-

minent. Elles conviennent donc avant tout à ces régions. Deux d'entre elles (Temps d'écoulement mod., Clark-WSL) ont aussi été appliquées à des bassins du Plateau et du Jura argovien et bâlois où elles ont donné de bons résultats. Signalons qu'elles n'ont pas été testées sur des bassins karstiques, de haute altitude (graviers, éboulis, roche affleurante) ou à sols très perméables. Il convient d'être très prudent au moment de déterminer les paramètres de bassins de ce type.

5.2.4 Exemple d'application : le Vogelbach (1,55 km²)

Il s'agit d'évaluer la crue centennale du bassin du Vogelbach, dans le canton de Schwytz.

a) Préparation des données de base

La vallée de l'Alp est un bassin étudié par le WSL, et donc particulièrement bien documenté. Cependant, pour que cet exemple reste proche de la pratique, nous n'avons tenu compte que des informations habituellement disponibles, qui ne permettent qu'une hypothèse grossière. Nous avons utilisé une étude régionale de BURCH (1994), qui traite de l'Alptal de façon très générale. Pour notre hypothèse, nous disposions des cartes suivantes :

- Carte-pixel 1:25'000 (PK25)
- Carte géotechnique simplifiée de la Suisse (numérique)
- Carte numérique des aptitudes des sols de Suisse.

b) Etablissement de l'hypothèse pour la description du bassin

Informations fournies par la carte pixel au 1:25'000 (PK25)

Le bassin versant du Vogelbach se trouve sur la rive gauche de l'Alptal, dans le canton de Schwytz. La région fait partie des Préalpes. La dénivelée entre le point le plus haut et le plus bas est de 485 m. L'exutoire du bassin se trouve à l'altitude de 1060 m et le point le plus haut à 1545 m (v. Fig. 5-29). Les courbes de niveau sont nettement plus serrées au bas du bassin que dans ses parties hautes. Les pentes sont donc plus fortes dans la partie inférieure du bassin. Celui-ci est couvert de forêts à 63%. Les zones proches des crêtes en sont dépourvues (Chli Tändli, Usser Chessiloch) ainsi qu'une partie du versant gauche du bassin. Le réseau hydrographique est dense dans sa partie supérieure, ce qui indique des surfaces aux écoulements abondants.

Informations fournies par la carte géotechnique simplifiée de la Suisse

L'ensemble du bassin du Vogelbach se trouve dans

la classe 17 de la carte, c'est-à-dire dans des « schistes marneux à calcophyllites avec intercalations de grès parfois dominants ».

BURCH (1994) précise que les formations du flysch du Wäggital (Tertiaire inférieur) dominant. Ce flysch est caractérisé par une alternance irrégulière de couches épaisses de schistes marneux à argileux et de calcaires plus ou moins gréseux. Sur ce genre de roche, on peut s'attendre à trouver des sols très argileux (gleys).

Informations fournies par la carte numérique des aptitudes des sols

D'après cette carte, on trouve deux unités (S6 et S7) dans le bassin du Vogelbach. L'unité S7 est présente dans la partie inférieure du bassin, sur les versants nord d'une pente >35%. Il est vraisemblable qu'il s'agisse de gleys et de sol bruns eutriques. Les caractéristiques de ces sol sont un peu meilleures que celles de l'unité S6 : sols peu profonds, riches en squelette, à faible capacité de rétention et mauvaise perméabilité, fréquemment humides.

L'unité S6 se situe dans la partie supérieure du bassin. Les versants nord, au-dessus de 1600 m ont une pente de moins de 35%. Au vu de la géologie, on peut s'attendre à y trouver les types de sols suivants : gley humique, gley mollique et éventuellement sol brun gleyeux, caractérisés par une faible épaisseur, un faible pourcentage de squelette, une capacité de rétention moyenne, une mauvaise perméabilité ainsi qu'une forte humidité. Ces caractéristiques s'accordent avec le réseau hydrographique dense figuré sur la carte topographique.

Pour l'essentiel, BURCH (1994) confirme ce diagnostic. D'après lui, la plus grande partie des sols sont très argileux, peu perméables, parfois des gleys. Leur épaisseur est de 30 à 40 cm, ce que l'on peut observer d'ailleurs dans les racines des arbres déracinés. BURCH signale aussi la présence de terres brunes lourdes et très argileuses (→ Cambisol), parfois épaisses et bien perméables.

Sur la base de ces informations et en utilisant le schéma de décision de Rickli et Forster (v. Fig. 5-23), on arrive à mettre l'hypothèse sur pied, en tenant compte des remarques suivantes :

- Faire une distinction entre zones boisées et non boisées.
- Une distinction entre la partie supérieure du bassin et la partie plus basse, où les pentes sont plus fortes, s'impose. La limite entre les deux sera précisée sur le terrain.
- La présence de terres brunes (BURCH 1994) doit être confirmée sur le terrain.

La carte ci-dessous a été dessinée avant la visite sur le terrain :

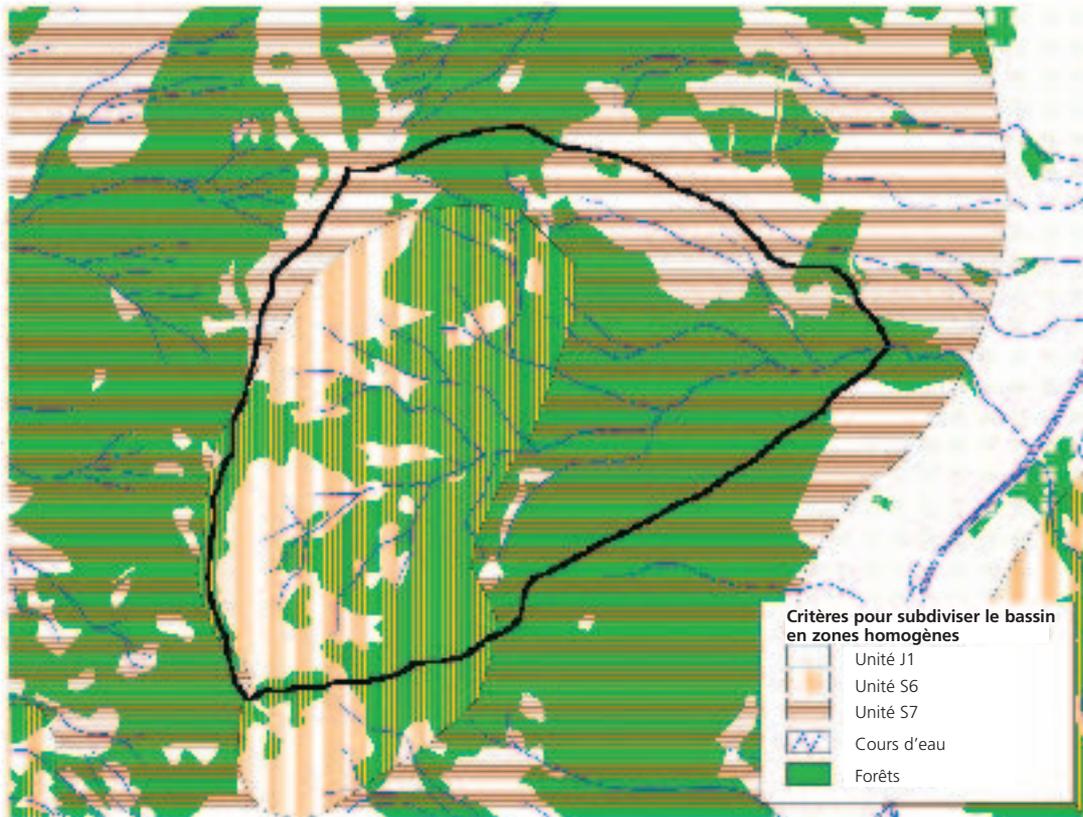


Fig. 5-31 : Division provisoire du bassin en zones (Hypothèse de travail).

- La largeur de la zone mouillée autour du chenal aussi sera précisée sur le terrain.

c) Etude sur le terrain

La visite sur le terrain a pour but de vérifier l'hypothèse. A l'aide d'une tarière, la structure du sol peut-



Fig. 5-32 : Coupe du terrain dans le Vogelwald.

être rapidement évaluée de façon grossière pour de grandes surfaces. La résistance à la pénétration permet dans une certaine mesure de se rendre compte de la présence de composants grossiers. Pour chaque zone, au moins une tranchée est creusée pour dégager une coupe du sol. Cette coupe est analysée à l'aide du schéma de décision de RICKLI & FORSTER (1997). Les glissements de terrain et les cratères formés par les arbres déracinés, où le terrain est dégagé naturellement, sont aussi examinés.

La limite entre les différentes zones hydrologiques est souvent tracée le long de modifications naturelles de la géomorphologie ou de la végétation (lisières de forêts, cours d'eau). Dans le cas du Vogelbach, l'hypothèse de départ a de façon générale pu être confirmée. Les surfaces sans forêts étaient toutes des zones humides. Des traces de pâture ou d'autres utilisations agricoles n'ont que rarement été observées et la couche d'humus est peu épaisse. Chose étonnante, dans les forêts, seules de rares zones étaient humides, si bien que les conditions d'infiltration ont pu en grande partie être qualifiées de bonnes. A la limite supérieure de la forêt et sur la rive droite de la vallée, ex-

posée au nord, les sols peu profonds dominent, ce qui a permis de considérer la capacité de rétention comme « moyenne ». Plus bas et dans les forêts exposées au sud, le sol est plus profond. La capacité de rétention a pu être qualifiée de bonne. On a par ailleurs mesuré la section déterminante du chenal, la granulométrie d_{50} et la pente au voisinage de la station de jaugeage.

d) Application des méthodes

La division du bassin en zones est faite à l'aide d'un SIG, en utilisant les données recueillies sur le terrain.

Les paramètres requis par les différentes méthodes sont ensuite déterminés. Ceux qui correspondent à la valeur la plus plausible sont choisis, mais les résultats obtenus en les faisant varier sont aussi calculés.

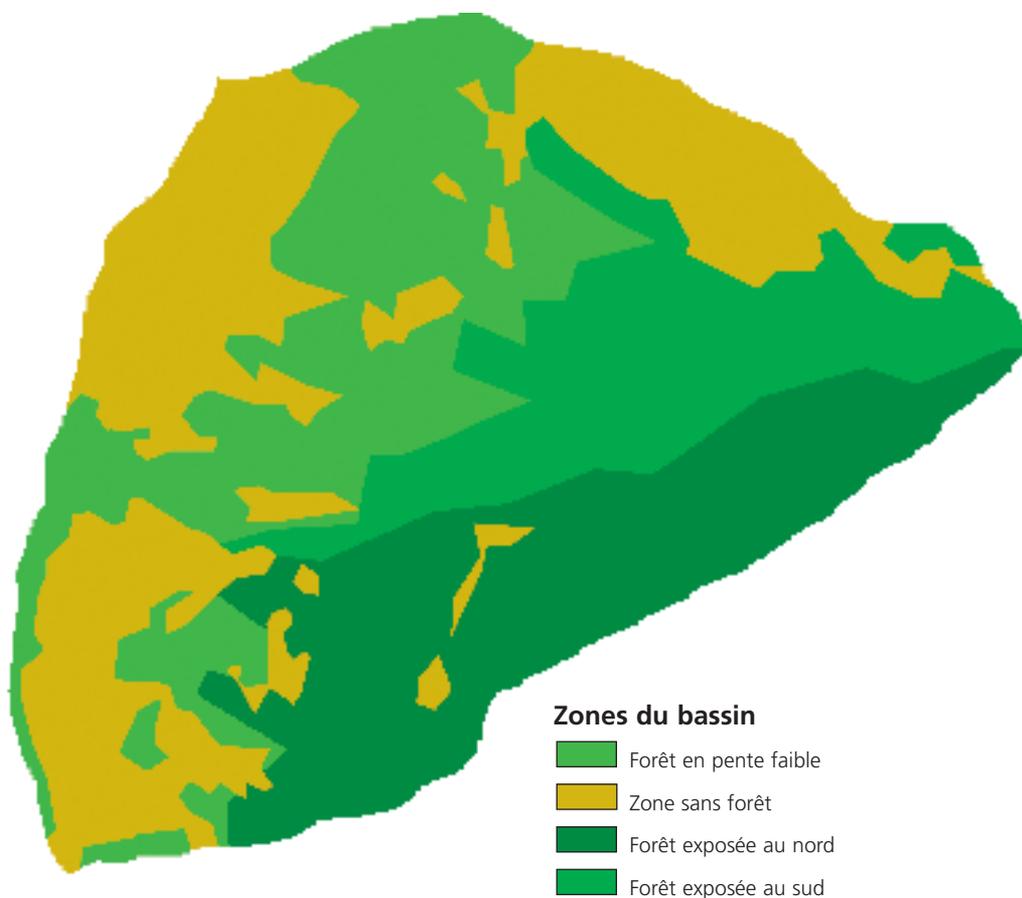


Fig. 5-33 : Division de bassin en zones après l'étude sur le terrain.

Détermination des précipitations

Dans un premier temps, les hauteurs de précipitations données dans l'Atlas hydrologique sont comparées aux mesures d'un pluviomètre à auget basculeur:

On utilise la distribution des valeurs extrêmes du type II pour les données sous forme de carte et celle du type I pour les mesures du pluviomètre, selon les indications de HADES. Les intensités de pluies mesurées sont

Durée des pluies	Période de retour	HADES Carte 2.4	HADES Carte 2.4 ²	Mesures au pluviomètre
1 heure	2,33 ans	25 mm	23 mm	28 mm
1 heure	100 ans	83 mm	70 mm	69 mm
24 heures	2,33 ans	72 mm	68 mm	82 mm
24 heures	100 ans	173 mm	163 mm	156 mm

relativement fortes mais tout de même plus faibles que les records enregistrés en Suisse (v. Chap. 5.2.2 a, Fig. 5-24).

L'interpolation des fortes précipitations de HADES pour l'Alptal et le Vogelbach est basée sur des séries de mesures très courtes, donc relativement peu sûres. La série de mesures de 30 ans est donc choisie plutôt que les valeurs données dans HADES.

Müller modifié

La surface du bassin (1,55 km²) est déterminée à l'aide d'un SIG. Le schéma de Rickli & Forster (Chap. 5.2.1 a, Fig. 5-23) appliqué à ses différentes zones (Fig. 5-33) donne un coefficient du débit de pointe ψ moyen de 0,23.

En utilisant cet ensemble de valeurs, on obtient pour « la plus forte crue à attendre » la valeur de 13,2 m³/s.

Si l'on fait varier le coefficient d'écoulement entre des limites physiquement plausibles, on obtient les valeurs extrêmes de 11,5 et 17 m³/s.

Taubmann/Thiess/Chow

En utilisant le tableau original d'utilisation des sols de TAUBMANN & THIESS (1984), on obtient, en tenant compte des zones du bassin définies plus haut, un coefficient complexe d'écoulement α de 68,5. La longueur du chenal principal (1850 m) et la différence d'altitude entre son point le plus haut et son point le plus bas (400 m), mesurées sur la carte au 1:25'000 permettent ensuite de calculer le retard t_v (0,25 h). La hauteur d'eau moyenne du chenal correspondant au débit moyen doit aussi être déterminée : elle est estimée à 0,1 m. A l'aide de la pente du chenal principal (0,216 m/m), on détermine la vitesse de concentration (2,33 m/s), le temps de concentration (0,222 h) ainsi que l'intensité des précipitations (211 mm/h). Cette dernière valeur permet de calculer le facteur climatique Y (3,19) à l'aide des intensités d'Urbana (168 mm/h). Le facteur de réduction d'amplitude est déterminé séparément pour chaque pas de temps. Il varie en fonction du temps t , de la surface (1,55 km²) et du retard t_v (0,25 h).

HQ₁₀₀ calculé par cette méthode et avec ces paramètres, est de 7,7 m³/s.

La méthode réagit très fortement aux variations du coefficient complexe d'écoulement, qui doit par conséquent être soigneusement déterminé. Les paramètres relatifs à la morphologie ont une influence sur le temps de concentration et sur l'intensité des précipitations. En faisant varier ces paramètres, on obtient des débits compris entre 5,5 et 11,2 m³/s.

Méthode du temps d'écoulement modifiée

La surface et le coefficient d'écoulement sont repris de la méthode de Müller. Le volume mouillé selon Kölla est estimé à 30 mm et le temps de saturation, qui dépend des valeurs des précipitations est de 0,24 h. La longueur du chenal principal (1850 m) est connue (Taubmann), la dénivelée du bassin est de 500 m et la distance entre le haut du chenal et la limite du bassin est d'environ 250 m. A l'aide de ces valeurs, on obtient un temps d'écoulement de 0,21 h et un temps de concentration de 0,45 h (temps de saturation + temps d'écoulement). L'intensité de la pluie centennale correspondant à ces deux valeurs est de 126 mm/h. Ces chiffres permettent de calculer HQ₁₀₀, qui est, dans ce cas, de 12 m³/s.

La méthode est très sensible aux paramètres relatifs à la morphologie, qui ont une forte influence sur le temps de concentration et par conséquent sur l'intensité de la pluie. Si l'on fait aussi varier le coefficient d'écoulement et le volume mouillé, on obtient des valeurs de HQ₁₀₀ allant de 8,9 à 18,4 m³/s.

Kölla

Il n'y a ni glacier ni surface imperméabilisée dans le bassin. La longueur totale des chenaux du bassin est d'environ 10 km, ce qui donne une surface utile de 1,41 km², augmentée à 1,69 km² pour HQ₁₀₀. Le temps d'écoulement est de 1,11 heure et le volume mouillé, déjà calculé pour la méthode du temps d'écoulement modifiée, est de 30 mm. Pour la crue centennale, il est augmenté à 39 mm. Cette valeur donne une perte de 3,9 mm et une durée de pluie de 0,98 h. Le temps de concentration est de 2,09 h (temps d'écoulement + durée de pluie) et l'intensité de la pluie correspondante de 39,8 mm/h. Etant donné que la surface du bassin est inférieure à 10 km² et la durée de la pluie plus courte que 3 h, un facteur de correction de 1,085 intervient dans le calcul de l'hydrogramme.

Ces paramètres permettent de calculer HQ₁₀₀, qui est, dans ce cas de 18,3 m³/s.

En faisant varier la longueur des chenaux et le volume mouillé, on obtient des débits de pointe compris entre 14,1 et 28,1 m³/s.

Clark-WSL

Le modèle digital des altitudes permet d'estimer la pente du bassin à 22 %. La couverture du sol est du type «Forêt clairsemée». La vitesse de l'écoulement de surface est ainsi de 0,4 m/s. Pour déterminer la vitesse d'écoulement dans le chenal (1,4 m/s), il faut connaître la pente à l'exutoire (14%), la granulométrie

d_{90} (0,35 m) et une valeur estimée du débit (environ $10 \text{ m}^3/\text{s}$). Ces valeurs permettent de construire un graphique Temps-Surface dans ARC/INFO, qui donne quatre zones de temps pour des intervalles de 10 minutes. Avec ce temps de concentration, l'intensité de pluie déterminante est de 93 mm/h . Les différentes zones du bassin sont aussi examinées à l'aide du schéma de Rickli & Forster, mais cette fois pour estimer la capacité de rétention et non plus le coefficient du débit de pointe. On obtient $27,1 \text{ mm}$, et $22,6 \text{ mm}$ après avoir effectué la correction pour un temps de concentration de 40 minutes. La constante de rétention, qui dépend de la capacité de rétention, est ainsi de 42,4 minutes.

Avec ces paramètres, la méthode de Clark-WSL donne une valeur de HQ_{100} de $15,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

La méthode réagit de façon robuste aux variations des paramètres utilisés pour le graphique Temps-Surface. En faisant varier le seul paramètre qui peut être choisi librement, on obtient des valeurs de HQ_{100} allant de $12,8$ à $17 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les résultats les plus plausibles obtenus grâce aux cinq méthodes utilisées sont représentés ci-dessous.

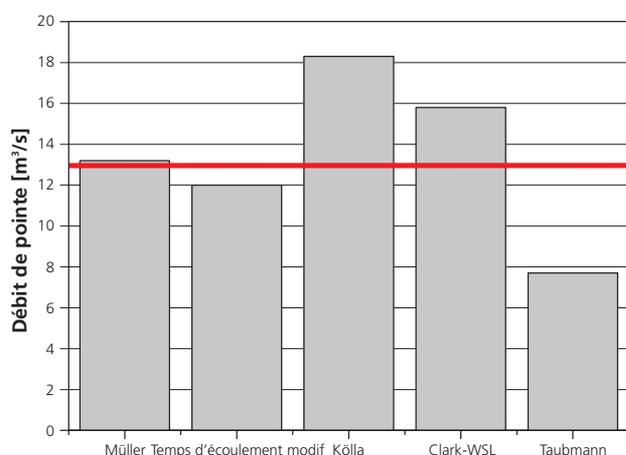


Fig. 5-34 : Résultats de l'évaluation des crues du Vogelbach. Les méthodes de Müller et de Taubmann donnent la limite supérieure et la limite inférieure.

La méthode de Kölla et celle de Clark-WSL donnent des valeurs supérieures à celle de Müller ($13,2 \text{ m}^3/\text{s}$). Comme le résultat fourni par la méthode du temps d'écoulement modifiée est voisin du résultat de Müller, qui constitue en principe la limite supérieure, une valeur de $13 \text{ m}^3/\text{s}$ est proposée.

e) Interprétation et validation des résultats

Le fait que deux des méthodes donnent des résultats dépassant la limite supérieure indique que l'évaluation des crues du Vogelbach est délicate. Une station de jaugeage existe dans ce bassin. La crue centennale calculée par la statistique des valeurs extrêmes (série de mesures de 30 ans) est de $7 \text{ m}^3/\text{s}$ environ.

L'examen du chenal a permis d'estimer la section à 5 m^2 et la vitesse de l'eau lors des crues à environ 2 m/s , ce qui donne une capacité de $10 \text{ m}^3/\text{s}$. La statistique indique un débit relativement faible : il est probable que pendant les 30 ans couverts par les mesures, aucune forte crue ne s'est produite.

Les résultats fournis par les méthodes d'évaluation sont en revanche élevés par rapport à la capacité du chenal. Deux de ces résultats dépassent la limite supérieure. Il y a donc une tendance à la surestimation. Compte tenu de la capacité du chenal, on a admis pour HQ_{100} une valeur de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$, avec un domaine de variation allant de 10 à $18 \text{ m}^3/\text{s}$. La valeur inférieure ($10 \text{ m}^3/\text{s}$) est celle découlant de la capacité du chenal.

5.3 Méthodes multi-échelles (1–500 km^2)

5.3.1 5.3.1 Contexte

Chaque méthode d'estimation des crues possède son propre domaine de validité et n'est en principe applicable qu'aux bassins versants similaires, au sens hydrologique du terme, ayant servi à l'élaboration du modèle (c'est-à-dire des bassins qui ont des caractéristiques physiographiques et hydro-climatiques comparables). Ce domaine de validité est souvent conditionné par la surface du bassin versant. L'approche présentée au chapitre ci-dessous est un exemple d'un modèle multi-échelles: la méthodologie HYDREG fournit une approche pour l'estimation des crues et est applicable à des bassins versants de Suisse occidentale non jaugés, dont la surface se situe entre 1 et 500 km^2 . Elle a été développée au laboratoire « Hydrologie et Aménagements » (HYDRAM) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) dans le cadre du projet GESREAU (GESstion des Ressources en EAU). Le mandant était le Service Eaux, Sols et Assainissement du canton de Vaud (SESA).

L'intérêt de la méthode est multiple :

- La méthode HYDREG a été intégrée au système GESREAU élaboré conjointement par l'HYDRAM et le SESA (CRAUSAZ & MUSY 1997). Ce Système d'Information Géographique (SIG), bien documenté, contient toutes les informations physiogra-

phiques et hydrologiques (caractéristiques des bassins versants, courbes IDF) nécessaires à la mise en œuvre de la méthode HYDREG pour l'ensemble des bassins versants identifiés sur le canton de Vaud.

- La méthode permet d'estimer les débits de pointe de différentes périodes de retour (2, 5, 10, ... 100 ans) pour tout bassin versant jaugé ou non jaugé contenu dans le SIG mentionné ci-dessus. Elle fournit de plus un intervalle de vraisemblance, obtenu à partir de l'ensemble de l'information hydrologique disponible sur la région, ce qui permet de comparer les quantiles de crues avec ceux des autres bassins de la région.
- La méthode HYDREG est multi-échelles. Elle met en œuvre en les combinant deux méthodes d'estimation dont les performances respectives diffèrent suivant les gammes de surfaces considérées. La première est une version de la méthode rationnelle, qui a prouvé sa capacité à estimer correctement les débits de pointe pour les petits bassins versants (moins de 10 km²) (modèle HYDRAT). La seconde est une approche de type « index-flood », qui s'est révélée adaptée à l'estimation de débits de pointe de bassins versants dont la surface est supérieure à 30 km² (modèle HYDRIF). L'intérêt principal et l'originalité de la méthodologie résident dans ce modèle combiné qui permet d'obtenir au final et sur toute la gamme de surface considérée (de 0.5 à 500 km²) une estimation plausible du quantile cherché. La combinaison dépend à la fois des caractéristiques des bassins versants (surface, couverture du sol) et de la performance relative des deux modèles ci-dessus.

Dans les trois sections suivantes sont successivement présentés le modèle HYDRAT, le modèle HYDRIF et la méthode combinée HYDREG.

5.3.2 Modèle HYDRAT

a) Description

Le modèle de détermination des débits maximum HYDRAT est une adaptation de la méthode rationnelle à la Suisse occidentale, effectuée par le laboratoire HYDRAM de l'EPFL. Elle est présentée plus en détail dans NIGGLI et al. (2001).

Le débit maximum HQ_x [m³/s] pour un temps de retour x est estimé selon la relation suivante:

$$HQ_x = u \cdot C_r \cdot \beta_R^{\epsilon_2(x)} \cdot p^{-0,5 \cdot \epsilon_2(x)} \cdot \epsilon_1(x) \cdot A^{1+0,5 \cdot \epsilon_2(x)}$$

où A est la surface du bassin versant [km²] et p est sa pente moyenne [m/m]. $\epsilon_1(x)$ et $\epsilon_2(x)$ sont les paramètres de la courbe IDF (Intensité-Durée-Fréquence)

représentative du bassin versant. Pour la région d'application de la méthode, les courbes IDF sont supposées suivre une loi de MONTANA:

$$i(x, d) = \epsilon_1(x) \cdot d^{\epsilon_2(x)}$$

Autrement dit, pour un temps de retour x donné, la relation entre les logarithmes de l'intensité i [mm/h] et de la durée de la pluie d [min] est linéaire (v. Fig. 5-35). β_R est un paramètre censé intégrer les caractéristiques non prises en compte (mesurables ou non), participant à la réponse hydrologique d'un bassin versant. La variabilité de β_R peut être expliquée en grande partie par l'appartenance des bassins versants à l'une des régions *Jura*, *Plateau* ou *Préalpes* de la Suisse occidentale. Le tableau 5-8 propose un jeu de valeur de β_R qui permet une bonne reproduction du débit de pointe, quel que soit le temps de retour considéré. Pour la détermination du coefficient de ruissellement Cr [-], les normes suisses SNV ont été retenues. Celles-ci proposent une valeur du coefficient de ruissellement uniquement en fonction de l'occupation du sol. Compte tenu des unités des paramètres de l'équation ci-dessus, la constante u vaut 0.28.

Région	Valeur de β_R
Préalpes	20
Plateau	30
Jura	75

Tableau 5-8 : Valeur de β_R optimale par région (indépendante du temps de retour considéré).

La clé de répartition des bassins versants proposée tient compte des informations de la carte géologique présentée dans l'Atlas géographique de la Suisse (*Atlas de la Suisse, 1965–1978*), ainsi que l'altitude. Les bassins classés dans la région *Jura* correspondent dans notre cas aux bassins dont la surface est majoritairement située dans le « Jura plissé » ou le « Jura tabulaire » de la carte géologique. Les bassins du *Plateau* sont dans les zones de molasse ou les zones de dépôts alluviaux ou glaciaires. Leur altitude moyenne est inférieure à 850 mètres. Enfin la région hydrologique *Préalpes* regroupe les bassins situés essentiellement dans les zones de sédiments « Préalpins », au sens géologique du terme, ainsi que dans les zones molassiques dont l'altitude moyenne excède 850 mètres. Cette valeur correspond approximativement à la limite au-dessus laquelle on observe une fréquence plus importante de crues annuelles estivales que de crues annuelles hivernales. L'altitude moyenne des bassins versants est une sorte d'intégrateur de caractéristiques physiographiques (pente) et climatiques

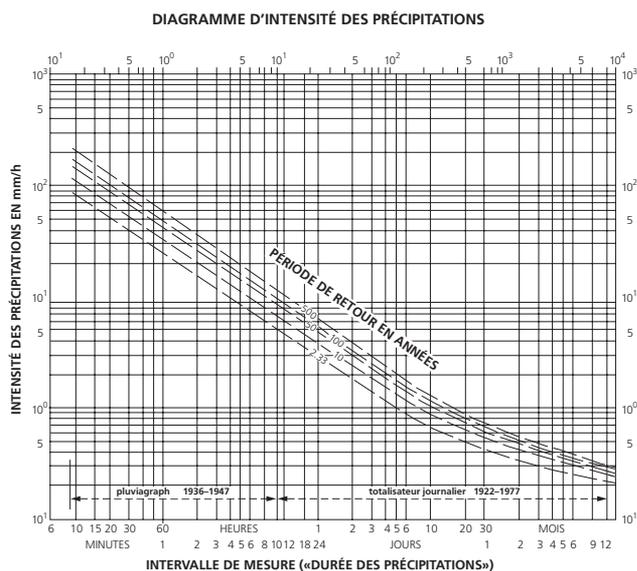


Figure 5-35 : Exemple de courbes IDF provenant des catalogues des précipitations extrêmes de la Suisse (RÖTHLISBERGER et al. 1979-1981-1992). La partie linéaire entre la durée et l'intensité des précipitations peut être modélisée par une loi de Montana. Les paramètres $\varepsilon_1(x)$ et $\varepsilon_2(x)$ peuvent être déduits de cette droite.

b) Domaine de validité

Temps de retour

En principe le modèle HYDRAT peut être appliqué pour n'importe quel temps de retour. Il faut cependant être conscient que pour des temps de retour 100 ans et plus, le modèle ne peut être validé pour l'instant, en raison du manque de données de débits observés disponibles.

Surface des bassins

Le modèle est en principe adapté aux bassins versants de petite taille, soit jusqu'à environ 30 km². Au delà de 10 km², il est préférable d'utiliser ce modèle en combinaison avec d'autres modèles plus adaptés aux plus grands bassins versants (v. Chap. 5.3.4). Les résultats sont à interpréter cependant avec une grande prudence pour les très petits bassins (de l'ordre du km²), ces derniers ayant souvent des réactions hydrologiques particulières.

Région géographique

La zone d'application du modèle est la région de Suisse occidentale (v. Fig. 5-36). Du point de vue hydrologique, la région d'étude comprend le bassin de l'Aar jusqu'à la jonction avec la Reuss, la partie suisse du Rhône et du Doubs, et enfin la partie suisse du Rhin en aval de la jonction avec l'Aar. La méthode n'est pas applicable aux bassins d'altitude moyenne supérieure

à 1500 mètres (Alpes bernoises et valaisannes, où le régime hydrologique est influencé par la neige de manière prépondérante) ou aux bassins fortement anthropisés. Enfin, les résultats obtenus avec la méthode sont à interpréter avec prudence pour les bassins versants influencés par le karst (Jura). En effet, du fait des phénomènes de mises en charge ou de stockage observables en milieu karstique, les quantiles peuvent être bien supérieurs ou inférieurs à ceux que l'on obtiendrait par l'application de la méthode proposée. A noter encore qu'une condition d'application du modèle implique que la courbe IDF puisse être modélisée par une loi de MONTANA. Sur la base des informations données dans JENSEN et al. (1992) et dans RÖTHLISBERGER et al (1979–1981–1992), cette condition est cependant vérifiée pour l'ensemble des bassins versants de la Suisse occidentale de surface comprise entre 0.5 km² et 30 km².

Données de base

Une partie des données de base nécessaires au modèle sont disponibles auprès de l'Office fédéral de la topographie (OFT). Par exemple, l'altitude et la pente moyenne du bassin versant peuvent être calculées avec le modèle numérique d'altitude MNA25. Par ailleurs, les cartes topographiques de l'OFT peuvent être utilisées pour délimiter les bassins versants et en déduire la surface.

Les données de couverture du sol sont nécessaires à l'évaluation du coefficient de ruissellement C_r . Une des sources d'information possibles pour estimer ce paramètre est la base de données de l'Office fédéral des statistiques GEOSTAT. Les données relatives aux courbes IDF peuvent être obtenues à partir de la feuille 2.4² de l'Atlas hydrologique de la Suisse (JENSEN et al. 1992) ou des catalogues des précipitations extrêmes de la Suisse (RÖTHLISBERGER et al. 1979–1981–1992).

L'Atlas géographique Suisse (ATLAS DE LA SUISSE 1965–1978) donne les indications générales relatives à la géologie, ce qui permet (en combinaison avec l'altitude) de classer le bassin dans l'une des trois régions mentionnées ci-dessus.

Toutes les données de base sont en fait contenues dans le SIG GESREAU. L'ensemble du canton de Vaud est découpé en 1200 unités hydrologiques de surface moyenne 2.5 km². Pour chacune de ces unités le SIG peut fournir toutes les données physiographiques et hydrologiques nécessaires au calcul des débits de ruissellement produit par cette unité de même que les données nécessaires au calcul des débits d'écoulement dans le réseau drainant l'ensemble du bassin à l'amont de l'unité hydrologique sélectionnée (unité hydrologique sélectionnée incluse).

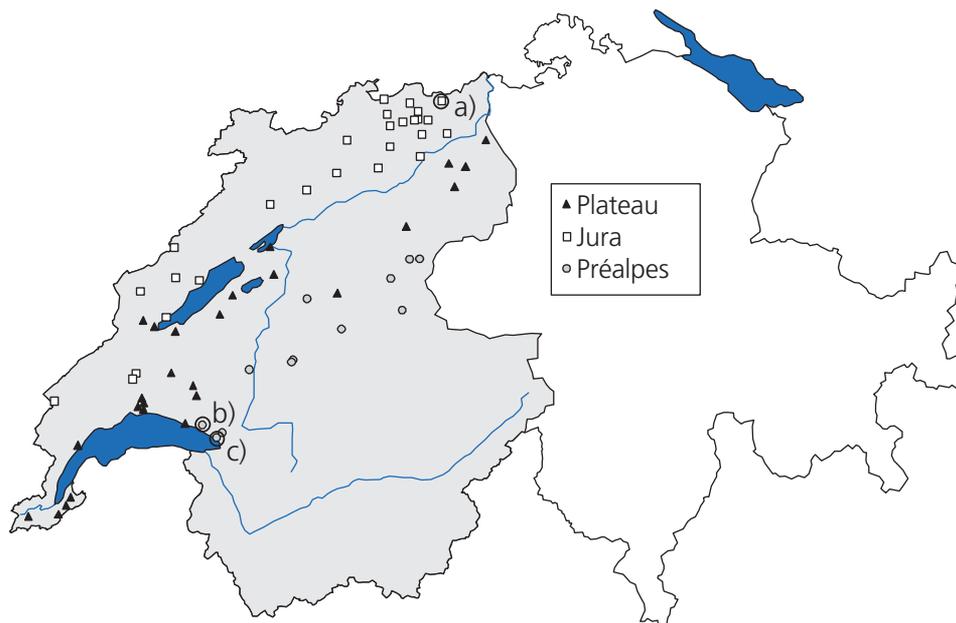


Fig. 5-36 : Périmètre d'étude et position des bassins versants utilisés pour le développement de la méthode HYDRAT. L'affectation des bassins versants à l'une des trois régions *Préalpes*, *Plateau* et *Jura* est aussi représentée. a) localisation du bassin versant du Buuserbach à Maisprach; b) localisation du bassin versant de la Veveysse à Vevey; c) localisation du bassin versant de la Baye de Montreux à Montreux. Ces bassins versants ont été utilisés comme exemples d'application des méthodes HYDRAT, HYDRIF et HYDREG (v. paragraphes suivants).

Evaluation des résultats pour tous les bassins versants

Selon les critères NAEF (1983) une estimation peut être considérée comme « exacte » ou « suffisante » si le rapport entre le débit calculé et le débit observé est situé entre 0,7 et 1,5, autrement dit, si la valeur donnée par le modèle surestime ou sous-estime le débit d'un facteur maximum de 1,5. Bien entendu, cette comparaison n'a de sens que si les débits observés ne sont pas entachés d'une erreur d'échantillonnage importante et qu'ils constituent une bonne indication de la valeur « vraie ». Ces conditions ne sont réunies que si les longueurs des séries sont suffisamment longues et/ou si le temps de retour du débit à évaluer est suffisamment petit. Compte tenu des données à disposition, nous avons effectué cet exercice pour les temps de retour 5, 20, 50 et 100 ans pour 42 bassins versants jaugés de la région d'application du modèle (v. Tableau 5.9) Pour chaque bassin le quantile de référence ou quantile « observé », a été obtenu à l'aide de l'ajustement d'une loi de GUMBEL (MEYLAN et MUSY 1998) effectué sur la série des débits annuels maximum observés.

Surface A [km ²]	A<20	A>20
Nombre de bassins versants	21	21
Surestimations [%]	52	14
Sous-estimations [%]	48	86
Estimations « exactes » / « suffisantes » [%]	71	52

Surface A [km ²]	A>20	A<20
Nombre de bassins versants	15	14
Surestimations [%]	47	29
Sous-estimations [%]	53	71
Estimations « exactes » / « suffisantes » [%]	73	43

Tableau 5-9 : Surestimations et sous-estimations du quantile de référence avec le modèle HYDRAT (tableau du haut: temps de retour 5 ans et table du bas: temps de retour 100 ans). La proportion d'estimation « exactes ou suffisantes » en % (selon Naef, 1983) est également indiquée. La comparaison a été effectuée avec 42 bassins versants jaugés pour le temps de retour 5 ans. En revanche, pour le temps de retour 100 ans (tableau du bas), seuls les 29 bassins versants, disposant d'une série de mesures de 15 ans au minimum, ont été considérés.

Pour la période de retour 5 ans, les résultats montrent que l'estimation du quantile de référence pour les 21 petits bassins est bonne (70% d'estimations « exacte » ou « satisfaisante »). Pour les 21 bassins plus grands, l'estimation se dégrade sensiblement puisque la formule conduit à environ 50% d'estimations

« exactes » ou « suffisantes » et surtout à une tendance nette à la sous-estimation (dans environ 85% des cas). Cette comparaison donne des résultats similaires pour des temps de retour 20 ans, 50 ans et 100 ans (avec un nombre de bassins utilisés pour l'évaluation toutefois réduit : pour le temps de retour 100 ans, par exemple, seuls les 29 bassins avec des séries de durée supérieure à 15 ans ont été conservés pour l'évaluation). Il faut cependant noter que plus la période de retour est importante, moins l'évaluation de performance est pertinente puisque le quantile de référence provient lui aussi d'un modèle qui, même s'il est issu d'un ajustement sur les observations, est lui-même imparfait en particulier lorsque les séries observées sont de courte durée.

Exemple d'application

A titre d'exemple, le modèle a été utilisé pour estimer le quantile de période de retour HQ_{100} du bassin versant du Buuserbach à Maisprach (Situation, v. Fig. 5-36):

β_R : $\beta_R = 75$ (v. Tableau 5-8)
 Surface du bassin versant: $A = 11,5 \text{ km}^2$
 Paramètre $\epsilon_1(100)$: $\epsilon_1(100) = 630$ (Station de Wintersingen)
 Paramètre ϵ_2 : $\epsilon_2 = -0,70$ (Station de Wintersingen)
 Coefficient de ruissellement: $C_r = 0,22$
 Pente: $\rho = 0,26$

Résultat HYDRAT: $HQ_{100} = 5,8 \text{ m}^3/\text{s}$

5.3.3 Modèle HYDRIF

a) Description

Le modèle de détermination des débits maximum HYDRIF est une approche de type « index-flood », laquelle avait été proposée pour la première fois par DALRYMPLE (1960). Une application de cette approche à la Suisse occidentale a été effectuée par le laboratoire HYDRAM de l'EPFL. Elle est présentée plus en détail dans NIGGLI et al. (2001).

Le débit maximum HQ_x [m^3/s] pour un temps de retour x est estimé selon la relation suivante:

$$HQ_x = 0,0056 \cdot f_{(x,R)} \cdot EL^{-0,56} \cdot ALT^{0,63} \cdot A^{0,66}$$

avec

$$EL = 2 \cdot \sqrt{A} / \pi$$

L

A , ALT et EL sont respectivement la surface [km^2], l'altitude moyenne [m] et l'indice d'élongation du bassin versant. Ce dernier paramètre est exprimé en fonction de la longueur totale du réseau hydrographique L (somme des longueurs de cours d'eau permanents et temporaires) mesuré sur une carte à l'échelle du 1:25'000. Il constitue une sorte de mesure de la densité du réseau hydrographique. Enfin, $f_{(x,R)}$ est un facteur multiplicatif dépendant du temps de retour x de la région R dans laquelle se trouve le bassin (facteur de croissance). Sa valeur est déterminée à partir des courbes données dans la figure 5.37.

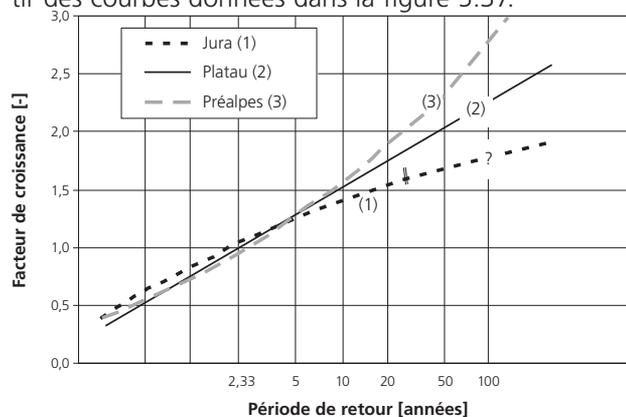


Fig. 5-37 : Comparaison des courbes de croissance des régions *Jura*, *Plateau* et *Préalpes*. Le facteur de croissance est le rapport entre le débit à un temps de retour donné HQ_x et le débit de pointe annuel moyen. Les courbes de croissance dans les régions karstiques ne peuvent être estimées avec beaucoup de précision, en raison des processus particuliers qui les caractérisent.

Les courbes de croissance présentées dans la figure 3 sont obtenues par ajustement statistique d'une loi des extrêmes généralisés (GEV, MEYLAN et MUSY 1998) aux données observées d'une région par la méthode des moments pondérés. Trois régions de la partie occidentale de la Suisse ont été distinguées: le *Jura*, le *Plateau* et les *Préalpes*. Le recours à une seule courbe de croissance pour tous les bassins versants d'une région implique l'invariance spatiale des coefficients de variation et d'asymétrie des débits maximaux annuels. La clé de répartition des bassins versants proposée tient compte des informations de la carte géologique présentée dans l'Atlas géographique de la Suisse (*Atlas de la Suisse, 1965-1978*), ainsi que de l'altitude. Les bassins classés dans la région *Jura* correspondent dans notre cas aux bassins dont la surface est majoritairement située dans le « Jura plissé » ou le « Jura tabulaire » de la carte géologique. Les bassins du *Plateau* sont dans les zones de molasse ou les zones de dépôts alluviaux ou glaciaires. Leur altitude moyenne

est inférieure à 850 mètres. Enfin la région hydrologique *Préalpes* regroupe les bassins situés essentiellement dans les zones de sédiments « Préalpins », au sens géologique du terme, ainsi que dans les zones molassiques dont l'altitude moyenne excède 850 mètres. Cette valeur correspond approximativement à la limite au-dessus de laquelle on observe une fréquence plus importante de crues annuelles estivales que de crues annuelles hivernales. L'altitude moyenne des bassins versants est une sorte d'intégrateur de caractéristiques physiographiques (pente) et climatiques (précipitations, températures).

b) Domaine de validité

Temps de retour

En principe le modèle HYDRIF peut être appliqué pour n'importe quel temps de retour. Il faut cependant être conscient que pour des temps de retour 100 ans et plus, le modèle ne peut être validé pour l'instant, en raison du manque de données de débits observés disponibles.

Surface des bassins

Le modèle est en principe applicable aux bassins versants de taille moyenne ; les limites inférieure et supérieure sont respectivement de 10 et 500 km². Pour les bassins dont la surface est inférieure à 30 km², il est souhaitable de combiner ce modèle avec d'autres plus adaptés à des petits bassins versants, comme le modèle HYDRAT (cf. chapitre 5.3.2).

Région géographique

La zone d'application du modèle est la région de Suisse occidentale (v. Fig. 5-36). Du point de vue hydrologique, la région d'étude comprend le bassin de l'Aar jusqu'à la jonction avec la Reuss, la partie suisse du Rhône et du Doubs, et enfin la partie suisse du Rhin en aval de la jonction avec l'Aar. La méthode n'est pas applicable aux bassins d'altitude moyenne supérieure à 1500 mètres (Alpes bernoises et valaisannes, où le régime hydrologique est influencé par la neige de manière prépondérante), ou aux bassins fortement anthropisés. Enfin les résultats obtenus avec la méthode sont à interpréter avec prudence pour les bassins versants influencés par le karst (Jura) pour les mêmes raisons que celles mentionnées dans le paragraphe relatif au modèle HYDRAT.

Données de base

L'essentiel des données de base nécessaires au modèle sont disponibles auprès de l'Office fédéral de la topographie (OFT). Par exemple, l'altitude moyenne du bassin versant, peut être calculée avec le modèle numérique d'altitude MNA25. L'OFT peut également

fournir le réseau hydrographique mesuré et digitalisé au 1 :25'000 (VECTOR25), à partir duquel on peut calculer le paramètre *EL*. Enfin, les cartes topographiques de l'OFT peuvent être utilisées pour délimiter les bassins versants et en déduire la surface.

L'Atlas Géographique de la Suisse (ATLAS DE LA SUISSE 1965–1978) donne les indications générales relatives à la géologie, ce qui permet (en combinaison avec l'altitude) de classer le bassin dans l'une des trois régions mentionnées ci-dessus (v. Fig. 5-36).

Evaluation des résultats pour tous les bassins versants

La performance du modèle HYDRIF a aussi été évaluée selon les critères NAEF (1983) (v. évaluation du modèle HYDRAT au chapitre 5.3.2 b). Le tableau 5-10 donne les performances du modèle pour les temps de retour 5 et 100 ans. Pour les bassins de moins de 20 km² et un temps de retour de 5 ans, 43% des estimations sont considérées comme « exactes » ou « suffisantes ». Pour les bassins plus grands, l'estimation est nettement meilleure puisque la formule conduit à environ 90% d'estimations « exactes » ou « suffisantes ». Cette comparaison donne toujours des résultats similaires pour des temps de retour 20, 50 et 100 ans.

Surface A [km ²]	A<20	A>20
Nombre de bassins versants	21	21
Surestimations [%]	43	43
Sous-estimations [%]	57	57
Estimations « exactes » / « suffisantes » [%]	43	86

Surface A [km ²]	A>20	A<20
Nombre de bassins versants	15	14
Surestimations [%]	40	35
Sous-estimations [%]	60	64
Estimations « exactes » / « suffisantes » [%]	53	85

Tableau 5-10: Surestimations et sous-estimations du quantile de référence avec le modèle HYDRIF (Tableau du haut: temps de retour 5 ans et table du bas: temps de retour 100 ans). La proportion d'estimation « exactes ou suffisantes » en % (selon Naef, 1983) est également indiquée. La comparaison a été effectuée avec 42 bassins versants jaugés pour le temps de retour 5 ans. En revanche, pour le temps de retour 100 ans (en bas), seuls les 29 bassins versants, disposant d'une série de mesures de 15 ans au minimum, ont été considérés.

Exemple d'application

A titre d'exemple, le modèle a été utilisé pour estimer le quantile de période de retour 100 ans (Q_{100}) du bassin versant de la Veveyse à Vevey (région Préalpes, v. Fig. 5-36) :

Facteur de croissance $f(100, R)$: $f(100, \text{Préalpes}) = 2.75$
(v. Fig. 5-37),
Surface du bassin versant: $A = 62.2 \text{ km}^2$
Altitude moyenne: $ALT = 1108 \text{ mètres}$
Longueur du réseau hydrographique: $L = 200 \text{ km}$

Résultat selon le modèle HYDRIF:
 $HQ_{100} = 110 \text{ m}^3/\text{s}$

5.3.4 La méthode HYDREG : méthode combinée et multi-échelles

a) Description

Contexte général

La méthode HYDREG est une méthodologie de combinaison de modèles d'estimation des débits maximaux. Elle a été élaborée par le laboratoire HYDRologie et AMénagement (HYDRAM) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Elle est présentée plus en détail dans NIGGLI et al. (2001).

La méthode de combinaison est recommandée lorsqu'il convient de pondérer les estimations de deux modèles complémentaires. Il s'agit d'une combinaison linéaire (autrement dit, une moyenne pondérée). La condition de complémentarité est respectée avec les modèles HYDRIF et HYDRAT (v. chapitres 5.3.2 et 5.3.3), qui se caractérisent par un domaine de validité différent au niveau de la surface, disons « optimale », du bassin versant. En général, le modèle HYDRAT est préférable au modèle HYDRIF pour les bassins versants ne dépassant pas 10 km^2 . La tendance s'inverse pour les surfaces au-delà de 30 km^2 . Un coefficient de pondération plus important dans la combinaison linéaire doit donc être donné au modèle HYDRAT, pour les plus petits bassins versants, et au modèle HYDRIF, pour les plus grands bassins. Il se peut néanmoins que ces deux modèles, même lorsqu'ils sont appliqués dans la gamme de surface correspondant à leur domaine de validité, fournissent des estimations relativement distantes de la réalité. Il est donc souhaitable de mettre en place un signal permettant d'avertir l'utilisateur d'un modèle, lorsque celui-ci conduit à une estimation peu vraisemblable du quantile HQ_x recherché. Ce signal revêt en fait la forme d'un troisième modèle, dénommé « modèle cadre régional », qui a pour but de caractériser d'un point de vue hydrologique chacune des 3 régions géographiques identifiées (*Jura, Pla-*

teau, Préalpes) aux chapitres 5.3.2 et 5.3.3. Ce dernier modèle résulte de la synthèse de l'ensemble des débits observés à disposition sur la région d'étude, regroupés selon leur appartenance à une région géographique et à une classe de surface de bassins versants. Il fournit une plage de variation du quantile de temps de retour x , constituant ainsi une sorte d'intervalle de vraisemblance. Par ailleurs, il a pour but de compléter l'expertise (ou, à défaut, d'en constituer la base) de l'utilisateur, qui peut ainsi valoriser son expérience et sa perception des phénomènes pour valider, infirmer ou affiner l'estimation du quantile recherché. La technique de construction de ces intervalles de confiance est décrite dans TALAMBA et al. (2000).

En principe, la méthodologie conduisant au modèle combiné HYDREG présenté dans le cas d'application ci-dessous n'est pas limitée à l'utilisation des seuls modèles HYDRIF et HYDRAT. D'autres modèles présentés dans ce chapitre peuvent être utilisés. De même le nombre de modèles utilisés peut être supérieur à deux. L'expert qui aura à estimer un débit maximum pour la région est libre de suivre ou non tout ou partie de cette procédure ou encore d'utiliser à sa convenance tout ou partie des informations dérivant de l'application de cette procédure.

b) Application à la Suisse occidentale

Pour estimer les débits de pointe d'un bassin versant situé dans la partie occidentale de la Suisse, une méthodologie de combinaison des modèles HYDRIF et HYDRAT est donc proposée. Elle prend en compte à la fois les caractéristiques des bassins versants et la performance relative des modèles individuels par rapport aux observations disponibles dans la région d'étude. Elle renvoie à un système d'aide à la décision, élaboré en fonction du domaine de validité des deux modèles et des informations fournies par le « modèle cadre régional ».

Les étapes à parcourir pour la détermination du débit maximum de temps de retour x , soit HQ_x , sont les suivantes :

1. Identification du « modèle cadre régional » approprié en fonction de l'appartenance géographique et la surface du bassin versant (v. Fig. 5-36). Détermination des valeurs HQ_{x-} et HQ_{x+} correspondantes. Il s'agit des valeurs de débit spécifique Hq_{x-} et Hq_{x+} du tableau 5-11 (par exemple Hq_{5-} et Hq_{5+} , pour un temps de retour 5 ans) multipliées par la surface du bassin versant.
2. Calcul des quantiles HQ_x obtenus avec la méthode HYDRIF ($HQ_{x\text{HYDRIF}}$) et avec la méthode HYDRAT ($HQ_{x\text{HYDRAT}}$)

3. Calcul du quantile $HQ_{X_{comb}}$ de la manière suivante:

$$HQ_{X_{comb}} = p \cdot HQ_{X_{HYDRAT}} + (1-p) \cdot HQ_{X_{HYDRIF}}$$

où p est le facteur de pondération du modèle HYDRAT

$$p = 1 \quad \text{si } A < 10 \text{ km}^2$$

$$p = \frac{\ln(A) - \ln(30)}{\ln(10) - \ln(30)} \quad \text{si } 10 \text{ km}^2 < A < 30 \text{ km}^2$$

$$p = 0 \quad \text{si } A > 30 \text{ km}^2$$

A est la surface du bassin versant.

4. Comparaison de la valeur $HQ_{X_{comb}}$ avec l'intervalle de vraisemblance donné par le « modèle cadre régional » et estimation de la valeur de HQ_x . Pour l'expert, les trois valeurs ci-dessous sont alors disponibles pour l'estimation finale:
 $[HQ_x^- ; HQ_{X_{comb}} ; HQ_x^+]$

où HQ_x^- et HQ_x^+ sont les bornes de l'intervalle de vraisemblance régional pour la région et la classe de surface où se situe le bassin concerné. $HQ_{X_{comb}}$ est l'estimation du quantile issue de l'application du modèle HYDREG.

Région	Flächenklasse	Hq ₅₋	Hq ₅₊	Hq ₂₀₋	Hq ₂₀₊	Hq ₅₀₋	Hq ₅₀₊	Hq ₁₀₀₋	Hq ₁₀₀₊
Préalpes	A<10 km ²	1,20	5,60	1,60	8,30	1,90	10,0	2,00	12,0
Préalpes	10<A50 km ²	0,50	3,30	0,70	5,60	0,80	7,10	0,80	7,90
Préalpes	50 km ² <A	0,20	1,40	0,30	2,10	0,30	2,60	0,40	3,10
Plateau	A<10 km ²	0,22	2,00	0,25	2,75	0,30	3,23	0,40	3,52
Plateau	10<A<50 km ²	0,18	1,65	0,20	2,60	0,25	3,23	0,30	3,50
Plateau	50 km ² <A	0,18	0,70	0,20	1,00	0,25	1,20	0,30	1,52
Jura	A<10 km ²	0,16	0,91	0,20	1,47	0,23	1,82	0,25	2,37
Jura	10<A<50 km ²	0,16	0,75	0,20	1,10	0,23	1,30	0,23	1,45
Jura	50 km ² <A	0,16	0,34	0,18	0,46	0,19	0,55	0,20	0,64

Tableau 5-11 : « Modèle cadre régional » : plages de variation des débits spécifiques Hq_x (en m³/s/km²) pour une région, une classe de surface et un temps de retour X . Hq_x^- et Hq_x^+ sont respectivement les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de vraisemblance des débits spécifiques.

Différents cas de figure se présentent suivant la situation des deux estimations par rapport aux bornes $[HQ_x^- ; HQ_x^+]$ de l'intervalle de vraisemblance régional [m³/s]. Il convient cependant de préciser qu'une estimation de $HQ_{X_{comb}}$ en dehors de l'intervalle $[HQ_x^- ; HQ_x^+]$ n'est pas forcément fautive. Il tout à fait possible que l'intervalle de vraisemblance proposé pour une classe de bassin versant donnée (région, surface) ne couvre pas tout le domaine de variation du quantile HQ_x . En effet, l'estimation de cet intervalle de vraisemblance ne se base pour l'instant que sur les

données de débits observés qui étaient disponibles au moment de l'analyse. Certains types de données également d'une grande utilité pour le dimensionnement des constructions, sont plus difficilement intégrables dans la méthodologie de détermination des intervalles de vraisemblance. Ceci est le cas, par exemple, des données ponctuelles (comme les crues historiques), reconstituées à partir de délaissées de crues. Il en va de même pour les très courtes séries de mesure.

En résumé de ce qui a été mentionné ci-dessus, l'expert a donc, pour choisir le débit de dimensionnement qui lui semble adéquat, la possibilité de comparer la valeur de $HQ_{X_{comb}}$ avec les informations données par le modèle cadre régional. Il est cependant essentiel qu'il complète cette information par sa propre expérience et ses connaissances du terrain.

La méthode présentée ici a comme objectif de proposer une valeur centrale ainsi qu'un intervalle de vraisemblance pour un quantile de débit de crue donné. Il s'agit d'une méthode parmi d'autres, qui a la propriété d'être modulable. L'expert qui aura à estimer un débit de pointe pour la région est libre de suivre ou non tout ou partie de cette procédure ou encore d'utiliser à sa convenance tout ou partie des informations dérivant de l'application de cette procédure. Il va de soi que si par exemple une série de débits observés existe au site d'intérêt, il convient d'intégrer ces informations supplémentaires dans l'estimation.

Les valeurs du tableau 5-11 (« modèle cadre régional ») peuvent faire l'objet d'une adaptation suivant les caractéristiques particulières du bassin à analyser. Ceci est en particulier le cas pour les bassins qui ne peuvent pas être attribués clairement à l'une des 3 régions ou à une des classes de surface ci-dessus. Sur la base de ses connaissances et de sa perception des phénomènes, l'utilisateur pourra pondérer de manière appropriée les estimations données pour les différentes régions ou classes de surfaces. Lorsque la surface d'un bassin versant est proche de l'une des limites des classes de surfaces données dans le tableau 5-11 (par exemple un bassin versant de l'ordre de 10 km²), il est recommandé de construire l'intervalle de vraisemblance en utilisant les valeurs données pour les classes de surfaces [5–20 km²] et [20–200 km²] (indiquées dans TALAMBA et al. 2000). De même, pour les bassins versants dont la surface est proche de la limite inférieure de la plus petite classe de surface (1 km²), il est recommandé de considérer les intervalles de vraisemblance du tableau 5-11 avec une extrême précaution.

Enfin, il est utile de rappeler que l'estimation des débits pour des petits bassins versants reste une tâche

difficile et qu'une intégration d'informations supplémentaires (expérience, mesures in situ, jaugeages de petits bassins versants comparables au bassin analysé) est une nécessité. Ce « modèle cadre régional » est donc à prendre comme un modèle d'expert et pourra, de la même façon qu'un expert affine son expertise avec les nouvelles informations qu'il engrange continûment, être amélioré au fur et à mesure que de nouvelles données de débits seront disponibles (nouveaux bassins jaugés ou années de mesure supplémentaires).

c) Temps de retour

En principe le modèle combiné peut être appliqué pour n'importe quel temps de retour. Il faut cependant être conscient que pour des temps de retour 100 ans et plus, le modèle ne peut être validé pour l'instant, en raison du manque de données de débits observés disponibles.

d) Surface des bassins

Le modèle est en principe applicable aux bassins versants de taille comprise entre 0.5 et 500 km². Il est cependant nécessaire de considérer les résultats obtenus pour des petits bassins versants (dans le domaine du km²) avec précaution, sachant que ces derniers présentent des comportements hydrologiques particuliers.

e) Région géographique

La zone d'application du modèle est la région de Suisse occidentale (v. Fig. 5-36). Du point de vue hydrologique, la région d'étude comprend le bassin de l'Aar jusqu'à la jonction avec la Reuss, la partie suisse du Rhône et du Doubs, et enfin la partie suisse du Rhin en aval de la jonction avec l'Aar. La méthode n'est pas applicable aux bassins d'altitude moyenne supérieure à 1500 mètres (Alpes bernoises et valaisannes, où le régime hydrologique est influencé par la neige de manière prépondérante), ou aux bassins fortement anthropisés. Enfin les résultats obtenus avec la méthode sont à interpréter avec prudence pour les bassins versants influencés par le karst (Jura) pour les mêmes raisons que celles mentionnées dans le paragraphe relatif au modèle HYDRAT.

f) Données de base

Les données de base nécessaires sont identiques à celles indiquées dans les sections 5.3.2 b et 5.3.3 b relatives respectivement aux modèles HYDRAT et HYDRIF utilisés par la méthode combinée.

g) Exemples numériques d'application

Application 1 : Le bassin versant de la Baye de Montreux à Montreux.

A titre d'exemple, la procédure d'estimation précédente a été utilisée pour estimer le quantile de période de retour 20 ans (HQ₂₀) du bassin versant de la Baye de Montreux à Montreux :

1. Calcul des bornes de l'intervalle de vraisemblance: L'altitude du bassin versant est de 1200 mètres et sa géologie est de type préalpin. En vertu des critères d'attribution définis aux points 5.3.2 a, ce bassin peut donc être affecté à la région Préalpes. Sachant que le bassin versant a une surface de 14.6 km², l'intervalle de vraisemblance du débit de temps de retour 20 ans peut être donné par le « modèle cadre régional » (valeurs Hq_{20min} et Hq_{20max} du tableau 5-11 multipliées par la surface):

$$[HQ_{20-} = 10 \text{ m}^3/\text{s} ; HQ_{20+} = 82 \text{ m}^3/\text{s}]$$

2. Estimation du quantile HQ₂₀ avec les deux modèles :

En fonction des caractéristiques du bassin versant, on obtient:

$$\begin{aligned} \text{Méthode HYDRIF:} & \quad HQ_{20\text{HYDRIF}} = 20 \text{ m}^3/\text{s} , \\ \text{Méthode HYDRAT:} & \quad HQ_{20\text{HYDRAT}} = 22 \text{ m}^3/\text{s}. \end{aligned}$$

3. Calcul du quantile HQ_{Xcomb} de la manière suivante: $HQ_{20\text{comb}} = 0.7 \cdot 22 + 0.3 \cdot 20 = 21.5 \text{ m}^3/\text{s}$
4. Estimation finale du quantile: On se trouve dans la situation où: $HQ_{20-} < HQ_{20\text{comb}} < HQ_{20+}$

Comme aucune autre information locale susceptible de modifier l'estimation du quantile n'est à disposition, le résultat final, pour HQ₂₀ et son intervalle de vraisemblance, est le suivant:

$$[HQ_{20-} = 10 \text{ m}^3/\text{s} ; HQ_{20} = 21,5 \text{ m}^3/\text{s} ; HQ_{20+} = 82 \text{ m}^3/\text{s}]$$

L'environnement GESREAU permet d'avoir ces différentes informations automatiquement pour tout bassin versant ou toute unité hydrologique du canton de Vaud répertoriée dans le SIG GESREAU. L'interface et les boîtes de dialogues GESREAU de même que les résultats de l'application des différentes méthodes HYDRAT, HYDRIF et HYDREG obtenus par le biais de cet environnement pour la Baye de Montreux à Montreux sont présentés ci-dessous (v. Fig. 5-38 et 5-39).

Application 2 : Evolution des débits de temps HQ₁₀₀ le long de la Mentue entre la Corbassière et Yvonand

Grâce aux informations contenues dans le SIG GES-REAU, les quantiles HQ_x ont été calculés avec les méthodes HYDRAT, HYDRIF et HYDREG pour les sous-bassins correspondant aux différents points de calcul positionnés par le SESA le long du cours d'eau de la Mentue. 16 sous-bassins ont ainsi été caractérisés entre le bassin de la Corbassière correspondant à la tête du bassin (1,95 km²) et le bassin complet de la Mentue à Yvonand (105 km²). L'évolution le long du cours d'eau des quantiles HQ₁₀₀ est présentée sur la figure 5-40.

Les quantiles de période de retour 100 ans ont été aussi calculés pour les bassins de la Mentue à Yvonand et de la Mentue à Dommartin (12,5 km²) à partir des séries d'observations disponibles à ces stations de mesures (ajustement de Gumbel sur les 18 et 19 années d'observations pour respectivement Yvonand et Dommartin). Le quantile HQ₁₀₀ n'a pas été déterminé pour la Mentue à Corbassière, cette station ne disposant pas pour le moment d'un nombre suffisant d'années d'observations.

La figure 5-40 illustre l'évolution des quantiles classiquement obtenue avec la méthode HYDREG : pour les

bassins de superficie comprise entre 10 et 30 km² (dont l'exutoire est ici compris entre les points kilométriques P53 et P60), l'estimation du quantile HQ₁₀₀ est une combinaison des estimations données par les modèles HYDRAT et HYDRIF. Dans cet exemple, l'estimation du quantile HQ₁₀₀ fournie par le modèle HYDRIF est toujours comprise entre les bornes HQ₁₀₀₋ et HQ₁₀₀₊ de l'intervalle de vraisemblance ce qui n'est pas le cas de l'estimation fournie par le modèle HYDRAT qui sous-estime fortement le quantile HQ₁₀₀ pour les bassins dont l'exutoire précède le point kilométrique P40. Par ailleurs, la discontinuité hydrologiquement aberrante obtenue au point kilométrique P48 pour la borne supérieure de l'intervalle de vraisemblance correspond à un changement de classe de surface observé entre les deux bassins successifs incriminés. Elle est due à une diminution importante de la borne supérieure de l'intervalle de vraisemblance (exprimée en débit spécifique) entre les classes de surfaces (lorsque l'on passe des petites surfaces aux grandes) alors que les surfaces des deux bassins sont très proches. Ceci met en évidence une des limites du modèle cadre régional et plus généralement de tout modèle de combinaison basé sur une classification des bassins versants soit en fonction de la surface soit en fonction de la région hydrologique d'appartenance. La mise au point

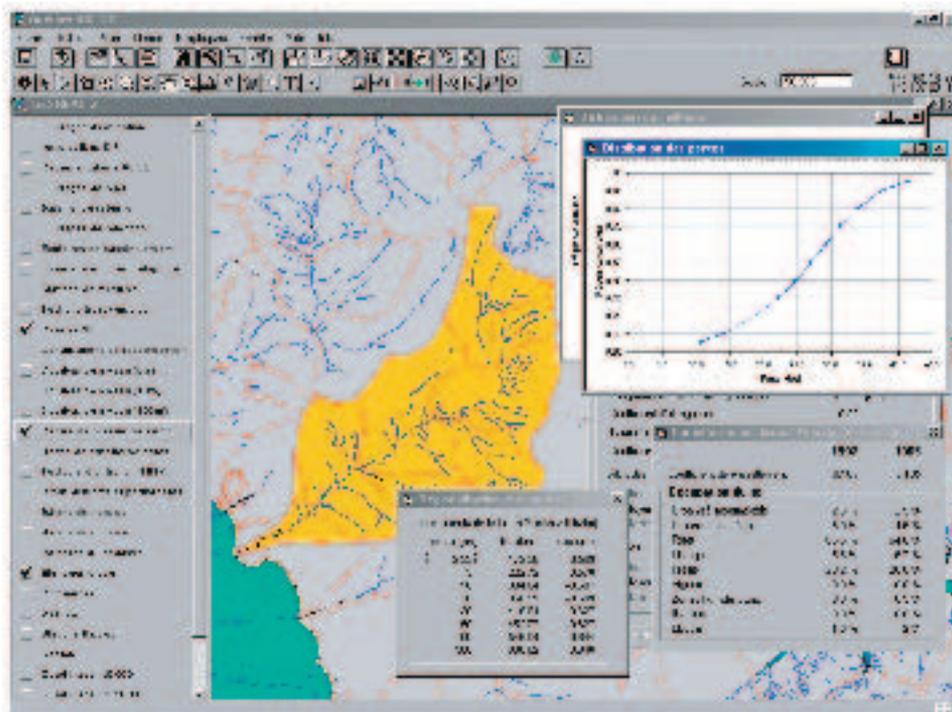


Figure 5-38 : Environnement du SIG GESREAU : caractéristiques du bassin versant de la Baye de Montreux à Montreux (14,6 km²) ; occupation du sol et coefficient de ruissellement, coefficients du modèle IDF de Montana pour différentes périodes de retour, courbe hypsométrique, distribution des pentes.

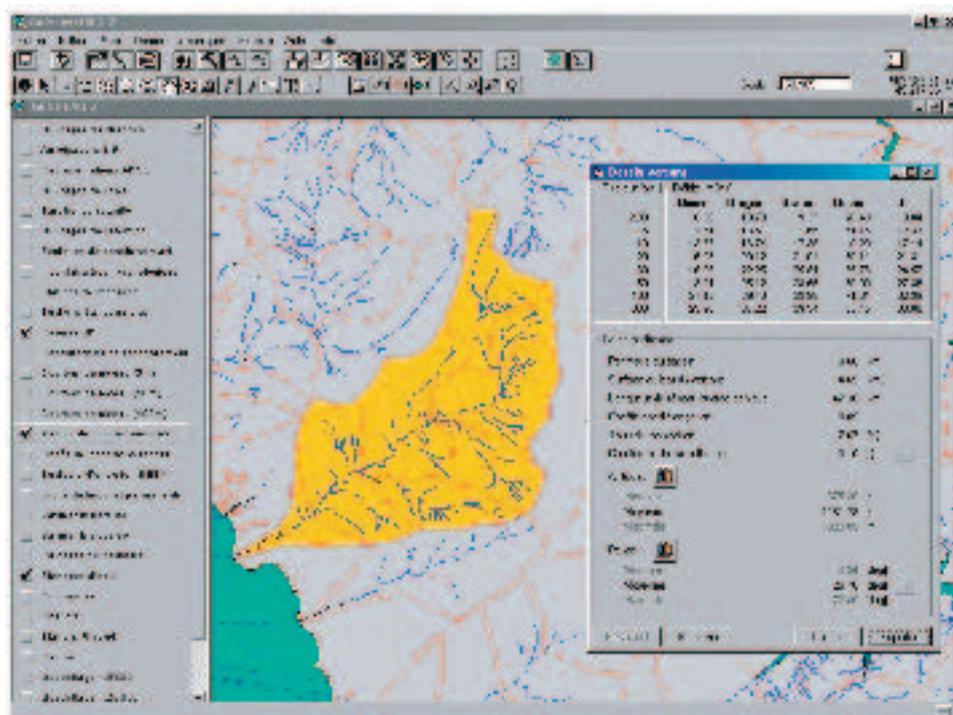


Figure 5-39 : Environnement du SIG GESREAU : caractéristiques du bassin versant de la Baye de Montreux à Montreux (14,6 km²) ; réseau hydrographique, sous-bassins versants, caractéristiques physiographiques générales, quantiles obtenus par les méthodes HYDRIF, HYDRAT, HYDREG et quantiles bornes de l'intervalle de vraisemblance du modèle-cadre obtenus pour différentes périodes de retour. Les résultats présentés ici résultent de l'application de la méthode HYDREG récemment améliorée par différents développements supplémentaires; ils feront prochainement l'objet d'une publication. Ils peuvent de fait légèrement différer de ceux résultant de l'application stricte de la méthode HYDREG présentée dans cette section.

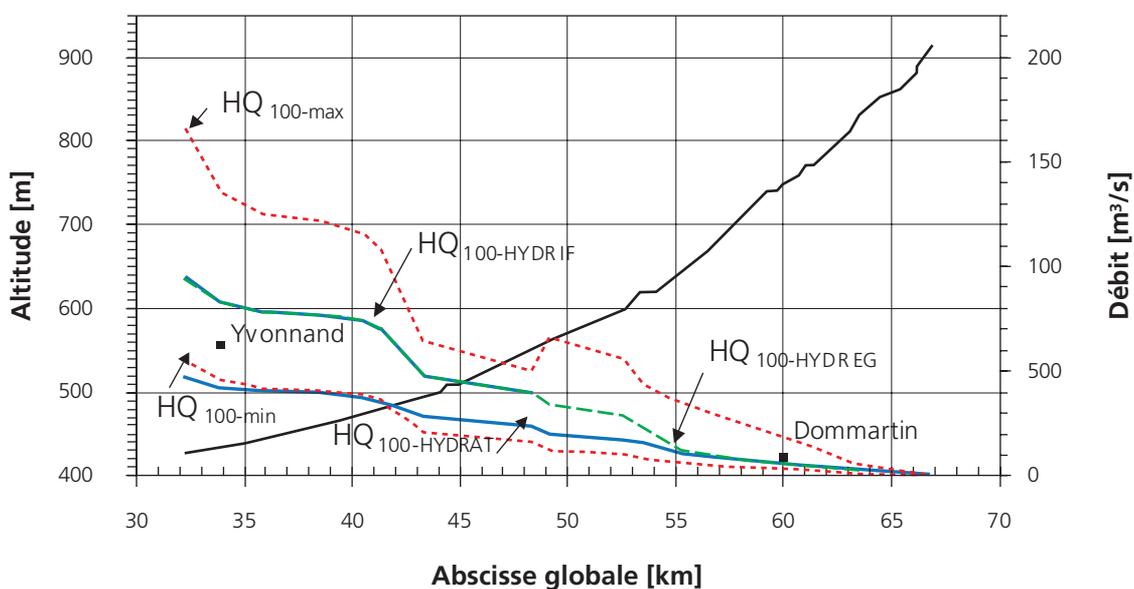


Figure 5-40 : Profil en long de la Mentue, de la Corbassière (1,95 km²) à Yvonnand (105 km²) (Cours d'eau No 6000). Evolution des quantiles de débit HQ₁₀₀ (ligne en trait-tillé vert) et des bornes de l'intervalle de vraisemblance obtenus par la méthode HYDREG (lignes en pointillé rouge) pour les sous bassins correspondant aux différents points de calcul positionnés le long du cours d'eau. Les quantiles correspondant aux modèles HYDRIF et HYDRAT sont aussi représentés (traits bleus pleins). Les quantiles de référence obtenus à partir des séries de débits observés sont donnés pour les stations d'Yvonnand et de Dommartin (points noirs).

d'une méthodologie supprimant ces classes, source de discontinuités inévitables entre classes, et basée sur une utilisation de l'évolution continue des caractéristiques des bassins constitue une des perspectives de recherche intéressante pour l'amélioration de la méthode.

h) Performance du modèle HYDREG

La performance du modèle HYDREG a aussi été évaluée selon les critères NAEF (1983) (v. Evaluation des modèles HYDRAT et HYDRIF aux chapitres 5.3.2 b et 5.3.3 b). Le tableau 5-12 donne les performances du modèle pour un temps de retour 5 ans (v. tableau 5-12). La performance du modèle combiné est nettement meilleure sur toute la gamme de surface que la performance des deux modèles HYDRAT et HYDRIF pris individuellement. Environ 70% des estimations sont considérées comme « exactes » ou « suffisantes » pour les bassins de moins de 20 km². Pour les bassins plus grands, l'estimation est meilleure puisque la formule conduit à environ 90% d'estimations « exactes » ou « suffisantes ». Cette comparaison donne toujours des résultats similaires pour des temps de retour 20, 50 et 100ans.

Surface A [km²]	A<20	A>20
Nombre de bassins versants	21	21
Surestimations [%]	52	43
Sous-estimations [%]	48	57
Estimations « exactes » / « suffisantes » [%]	71	90

Surface A [km²]	A>20	A<20
Nombre de bassins versants	15	14
Surestimations [%]	47	36
Sous-estimations [%]	53	64
Estimations « exactes » / « suffisantes » [%]	73	86

Tableau 5-12 : Surestimations et sous-estimations du quantile de référence avec le modèle HYDREG (tableau du haut: temps de retour 5 ans et table du bas: temps de retour 100 ans). La proportion d'estimation « exactes ou suffisantes » en % (selon NAEF 1983) est également indiquée. La comparaison a été effectuée avec 42 bassins versants jaugés pour le temps de retour 5 ans. En revanche, pour le temps de retour 100 ans (en bas), seuls les 29 bassins versants, disposant d'une série de mesures de 15 ans au minimum, ont été considérés.

Bibliographie

- ASCHWANDEN, H., SPREAFICO, M. (1995) : Débits de crues – Analyse de longues séries de mesures. In: Atlas hydrologique de la Suisse, Planche 5.6. Berne.
- ATLAS DE LA SUISSE (1965–1978) : Office fédéral de topographie. Berne.
- BALOCKI, J.B., BRUGES, S.J (1994) : Relationships between n-day flood volumes for frequent large floods. *J. of Water Resources Planning and Manag.*, 120(6), pp. 794-818.
- BARBEN, M. (2001) : Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern. Bern.
- BAUMANN, P., FORSTER, F., GERBER, W., KIENHOLZ, H., LEHMANN, CH., RICKENMANN, D., RICKLI, CH. (1992): Naturgefahren: Gefahrenbeurteilung, Landschaftsveränderung. Kursunterlagen des Weiterbildungs-Kurses 1992 im Berner Oberland. Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren (FAN).
- BECKER, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Mitteilung der Senatskommission für Wasserforschung der DFG Nr. 11: 16–32. Weinheim.
- BENISTON, M. & al. (1992): Establishment of climatological scenarios for the alpine regions (EPOCH/FUTURALP EUROPROJECT). Final scientific report.
- BÉROD, D., DEVRED, D., LAGLAINE, V., CHAIX, O., ALTINAKAR, M., DELLEY, P. (1992): Calcul des crues extrêmes par des méthodes déterministes de type pluie maximale probable/crue maximale probable. Rapport HYDRAM, EPFL. Lausanne.
- BÉROD, D. (1994): Contribution à l'estimation des crues à l'aide de méthodes déterministes. Thèse EPFL N°1319. Lausanne.
- BÉROD, D., CONSUEGRA, D. (1995): Etude Consecru, Traitements statistiques des séries de débits. Rapport IATE/HYDRAM, EPFL. Lausanne.
- BERTOLI, L., MOISELLO, U. (1994): A regional model for estimating the probability distribution of routed peak discharges. *J. of Hydrology*, 153, pp. 103–138.
- BIEDERMANN, R. & al. (1996): Protection contre les crues dans le canton du Valais. Eau, Energie, Air, tiré à part 10. Baden.
- BURCH, H. (1994): Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung im Alptal. In: Hydrologie kleiner Einzugsgebiete. Gedenkschrift Hans M. Keller. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 35, pp. 18–33. Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie SGHL, Bern und Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Birmensdorf.
- CHOW, V.T. (1962): Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins. Bulletin No 462 University of Illinois USA.
- CHOW, V.T. (1964): Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, ISBN 07-010724-2.
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W. (1998): Applied hydrology. McGraw-Hill International editions. New-York.
- CONSUEGRA, D., VEZ, E. (1996): AMIE: Analyse et Modélisation Intégrées du cheminement des Eaux en zones habitées, modélisation hydrologique, Application au bassin versant de la Haute-Broye. IATE/HYDRAM, EPFL. Lausanne.
- CONSUEGRA, D., NIGGLI, M., MUSY, A. (1998): Concepts méthodologiques pour le calcul des crues. Application au bassin versant supérieur du Rhône. Wasser, Energie und Luft. Vol. 9/10, pp. 223–231.
- COWPERTWAIT, P.S. (1991): Further Developments of the Neymann-Scott Clustered Point Process for Modelling Rainfall, *Water Resources Research*, 27(7), pp. 1431–1438.
- CRAUSAZ, P.A., MUSY, A. (1997): GESREAU: un outil d'aide à la gestion des eaux par une modélisation du territoire. *Revue internationale de Géomatique*, 7(2): 127–139.
- DALRYMPLE, T. (1960): Flood Frequency analysis, Manual of Hydrology, Pt 3, US Geological Survey.
- DFJP (1980): Carte des aptitudes des sols de la Suisse, échelle 1:200'000. Département fédéral de justice et police, Office fédéral de l'aménagement du territoire. Berne
- DÜSTER, H. (1994): Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. *Geographica Bernensia* G44. Bern
- DVWK (1979): Empfehlungen zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Nr. 101. Hamburg.
- DVWK (1989): Wahl des Bemessungshochwassers. Entscheidungswege zur Festlegung des Schutz- und Sicherheitsgrades. DVWK-Merkblatt, Nr. 209. Hamburg.
- DVWK (1999): Merkblatt 251, Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser. ISBN 3-89554-110-9.
- ELSASSER, A. (1996): Möglichkeiten und Grenzen des Modells AGREGEE in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern.
- FAVRE, A.C., CONSUEGRA, D., OVERNEY, O. (1997): A theoretical Framework to Assess Impacts of Precipitation Scenarios. In Popsicle: Production Of Precipitation Scenarios for Impact assessment of Climate change in Europe, EC Framework III, Project RTD EV5V-CT94-0510.
- FORSTER, F., BAUMGARTNER, W. (1999): Bestimmung seltener Starkniederschläge kurzer Dauer – Fallbei-

- spiele im Vergleich mit den schweizerischen Starkniederschlagskarten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 150, 6: 209–218.
- FORSTER, F., HEGG, CH. (2002): A suggestion for the estimation of flood peak discharge in small torrential catchments. Proc. ICFE 2002. Bern.
- GEES, H. (1996): Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz – Bedeutung für das Bemessungshochwasser. Geographica Bernensia G53. Bern.
- GEIGER, H., RÖTHLISBERGER, G., STEHLI, A., ZELLER, J. (1992): Pluies ponctuelles extrêmes de différentes durées et périodes de récurrence 1901–1970. In: Atlas hydrologique de la Suisse, Planche 2.4 et 2.42, Berne.
- GUEx, F., GUEx, D., PUGIN, S., HINGRAY, B., MUSY, A. (2001): Ability of a regionalised lumped conceptual model to reproduce time evolution and statistical characteristics of observed discharge series: application on the Alzette catchment – Luxembourg. – In Flood Risk and hydrological Mapping. IRMA-SPONGE. EU research project. HYDRAM Final Report.
- GUILLOT ET DUBAND (1967): La méthode du GRADEX pour le calcul des probabilités de crue à partir des pluies. Journal des Sciences Hydrologiques, 84: 560–569.
- HEUSSER, H. (1947): Die Voraussage der maximalen Hochwassermenge. In: Schweizerische Technische Zeitschrift, 31: 524–526.
- HINGRAY, B., MONBARON, E., JARRAR, I., FAVRE, A.C., CONSUEGRA, D., MUSY, A. (2000): Stochastic generation and disaggregation of hourly rainfall series for continuous hydrological modelling and flood control reservoir design. Proc. Fifth International Workshop On Precipitation In Urban Areas Dec. 10-13, 2000, Pontresina, Switzerland, 8 p.
- HIRSCH, R.M. (1987): Probability plotting position formulas for flood records with historical information, Journal of Hydrology, 96, pp. 185-199.
- HORAT & SCHERRER AG (2001): Hochwasserabflüsse am Eibach und seiner Seitenbäche. Auftraggeber: Tiefbauamt des Kt. BL, Hauptabteilung Wasserbau.
- JENSEN, H., LANG, H., RINDERKNECHT, J. (1992): Pluies ponctuelles extrêmes de différentes durées et périodes de récurrence 1901–1970. Atlas hydrologique de la Suisse, Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne.
- KANN, C. (1995): Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 169. Bern.
- KOEHLER, G. (1976): Niederschlag-Abfluss-Modelle für kleine Einzugsgebiete. Schriftenreihe des Kuratoriums für Wasser- und Kulturbauwesen, Heft. 25: 41–48. Hamburg – Berlin. Verlag Paul Parey.
- KÖLLA, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilung Nr. 87 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich.
- KÖLLA, E. (1987): Abschätzung von Spitzenabflüssen in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 33-34: 965-972.
- KÜRSTEINER, L. (1917): Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur. In: Schweiz. Bauzeitung, 1: 4-8, Zürich.
- LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A., PAULHUS, J.L. (1982): Hydrology for Engineers, McGraw-Hill Book Company, ISBN 0-07-037956-4.
- MANIAK, U. (1999): Flussgebietsmodelle. In: Mathematische Modelle in der Gewässerkunde. Stand und Perspektiven. BfG-Mitteilungen Nr. 19. Koblenz.
- MARGOUM, M., OBERLIN, G., LANG, M., WEINGARTNER, R. (1994): Estimation des crues rares et extrêmes: principes du modèle AGREGEE. In: Hydrologie Continentale, vol. 9 (1): 85-100. Paris.
- MENDEL, H.G. (1993): Verteilungsfunktionen in der Hydrologie, Rapport II-8 de la Commission internationale pour l'Hydrologie du bassin du Rhin, ISBN 90-70980-19-3.
- MEYLAN, P., MUSY, A. (1998): Hydrologie fréquentielle, Polycopié HYDRAM, EPFL. Lausanne.
- MINTY, L.J., MEIGHEN, J. (1999): Rainfall antecedent to large and extreme bursts over southeast Australia. Bureau of Meteorology, Australia, HRS Report N° 6. Melbourne.
- MÜLLER, R. (1943): Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauung. Mitteilung Nr. 4 der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH. Zürich.
- MUSY, A., HIGY, C. (2000): Hydrologie appliquée. Polycopié HYDRAM, EPFL. Lausanne
- NAEF, F. (1983): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen, Zwischenbericht NF-Projekt «Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen». Zürich.
- NAEF, F., SCHERRER, S., FAEH, A. (1998): Die Auswirkungen des Rückhaltenvermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Niederschlagsereignissen auf die Grösse extremer Hochwasser. Schlussbericht Nationalfonds Projekt 3.1, VDF-Verlag. Zürich.
- NAEF, F., SCHERRER, S., ZURBRÜGG, C. (1999): Fortes crues – réactions différenciées de certains bassins aux fortes crues. Atlas hydrologique de la Suisse (HADES), Planche 5.7.
- NEMEC, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the

- dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. KHR-Bericht II-7. Lelystad.
- NERC, NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL (1975): Flood studies Report (Estimation of flood volumes over different durations), pp. 243–264.
- NIGGLI, M., CONSUEGRA, D., BÉROD, D. (1997): Etude Consecru, Bases hydrologiques de dimensionnement, Modélisation des crues du Rhône en Valais, Rapport IATE/HYDRAM, EPFL. Lausanne.
- NIGGLI, M., CONSUEGRA, D. (1997): Etude CONSECRO, Bases hydrologiques de dimensionnement, Influence du barrage de Mattmark sur les crues de la Viège à Viège, Rapport IATE/HYDRAM, EPFL. Lausanne.
- NIGGLI, M., CONSUEGRA, D., CRAUSAZ, P.A., VEZ, E. (1998): Régionalisation des débits de pointe du canton de Vaud, Projet GESREAU, Rapport HYDRAM, EPFL. Lausanne.
- NIGGLI, M., TALAMBA, D., HINGRAY, B., MUSY, A. (2001): Estimation des débits de pointe pour des bassins versants non jaugés: Application à la Suisse occidentale, Wasser, Energie, Luft, 9–10.
- OBERLIN, G. (1992): Normalisation des variables dans les modèles hydrologiques descriptifs. Informations techniques du CEMAGREF, mars 1992, n°85, note n°4.
- OFEG (2000): Hochwasser 1999. Analyse der Ereignisse, Studienbericht Nr. 10/2000. Bern.
- OFEG (2001): Protection contre les crues des cours d'eau. Directives. Berne.
- OFEG, DEZA (2001): Protection contre les crues en Suisse – Stratégie 2001. Berne.
- OFEH (1995): Exigences posées à la protection contre les crues '95. Berne.
- OFS (1980): Carte des aptitudes des sols de Suisse In: GEOSTAT. Berne.
- OFS (1985): Statistique suisse de la superficie (AS85R) 1979/85. In GEOSTAT, Bern.
- ORD (OFFICE FÉDÉRAL DES ROUTES ET DES DIGUES (1974): Les débits maximaux des cours d'eau suisses observés jusqu'en 1969. Bern.
- OVERNEY, O., CONSUEGRA, D., MUSY, A., LAZARO, P., BOILLAT, J.L., SINNIGER, R.O. (1997): Influence des changements climatiques sur le régime hydrologique des cours d'eau. Rapport final du Programme National de Recherche «Changements climatiques et catastrophes naturelles en Suisse», PNR31. Hochsch. Verlag an ETH-Zürich.
- RICKLI, C., FORSTER, F. (1997): Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schweiz. Zeitschr. Forstwesen, 148 Jg., Nr.5: 367–385.
- RÖTHLISBERGER, G., GEIGER, H., ZELLER, J. (1979): Starkniederschläge in der Schweiz, Band 4–9, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL. Birmensdorf.
- SCHERRER, S. (1996): Abflussbildung bei Starkniederschlägen – Identifikation von Abflussprozessen bei Starkniederschlägen. Diss. Nr. 11793, ETH. Zürich.
- SCHERRER, S. (2001): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation hochwasserrelevanten Flächen. Auftraggeber: Landesamt für Wasserwirtschaft, Rheinland-Pfalz. Mainz.
- SCHERRER, S., NAEF, F. (2002): A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland, Hydrological Processes (sous presse).
- SCHERRER, S., DEMUTH, N., MEUSER, A. (2002): A procedure for the identification of dominant runoff processes by field investigations to delineate the relevant contributing areas for flood modelling. Proceedings of Int. Conference on Flood Estimation, 6–8 March 2002. Berne (sous presse).
- SCHWENTKER, F., STREIT, U. (1983): Regionale Übertragung hydrologischer Parameter – ein Überblick. Manuskript zum Vortrag anlässlich der Jahresversammlung des Arbeitskreises Hydrologie in Göttingen. Göttingen.
- SERVICE HYDROLOGIQUE ET GÉOLOGIQUE NATIONAL (SHGN) (1922-1994): Annuaire hydrologique de la Suisse, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Berne.
- SPREAFICO, M., STADLER, K. (1986): Débits de crue dans les cours d'eau suisses. Communication du Service hydrologique et géologique national N°7. Berne.
- SPREAFICO, M., STADLER, K. (1988): Débits de crue dans les cours d'eau suisses. Communication du Service hydrologique et géologique national N°8. Berne.
- SPREAFICO, M., ASCHWANDEN, H. (1991a)): Débits de crue dans les cours d'eau suisses. Communication du Service hydrologique et géologique national N°16. Berne.
- SPREAFICO, M., ASCHWANDEN, H. (1991b)): Débits de crue dans les cours d'eau suisses. Communication du Service hydrologique et géologique national N°17. Berne.
- SPREAFICO, M., WEINGARTNER, R., LEIBUNDGUT, C. (1992): Atlas hydrologique de la Suisse, SHGN (Service hydrologique et géologique national). Berne.
- S+T (1999): Réseau hydrographique digital 1:25'000 (VECTOR25).
- SYDLER, P.-A., WIDMOSER, P., ZOLLINGER, F. (1982): Statistische Untersuchungen von Extremabflüssen in

- kleinen Einzugsgebieten. Institut für Kulturtechnik, ETH. Zürich.
- TALAMBA, D., NIGGLI., HINGRAY, B., MUSY, A. (2000): Projet GESREAU. Méthode de régionalisation des débits de pointe pour les bassins versants du canton de Vaud, Rapport HYDRAM, EPFL. Lausanne.
- TAUBMANN, K.-C., THIESS, N. (1984): ingenieurmässige Anwendung verschiedener Hochwasser-Abschätzmethoden auf kleine und zusammengesetzte Einzugsgebiete am Testbeispiel der Ergloz. Ingenieurschule beider Basel. Muttenz.
- TAUBMANN, K.-C. (1986): Ingenieurhydrologische Hochwasserabschätzung. Wasser, Energie, Luft, Jahrg. 78, Nr. 10: 277–281.
- THIESS, N. (1975): Ermittlung von Bemessungsganglinien für kleine Einzugsgebiete nach Ven Te Chow, Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.
- VOGT, S., FORSTER, F. (1999): Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten. Ein Abschätzverfahren nach Clark zur Bestimmung einer Hochwasser – Bemessungsganglinie. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Unveröffentlichter Praktikumsbericht. Birmendorf.
- VOGT, S. (2001): Zur Abschätzung von Hochwasser in kleinen Wildbacheinzugsgebieten, Diplomarbeit, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft/Institut für Klimaforschung der ETH. Zürich.
- WASY (1997): HQ-EX, Version 2.0 (<http://www.wasy.de>)
- WEINGARTNER, R., ASCHWANDEN, H. (1992): Régimes d'écoulement comme base pour l'estimation des valeurs moyennes des débits. In: Atlas hydrologique de la Suisse, Planche 5.2. Berne.
- WEINGARTNER, R. (1998): Analyse räumlichen und zeitlichen Variabilität der Hochwasser in der Schweiz. Ein Beitrag zur Hochwasserabschätzung. Schlussbericht NFP 31, Hochschulverlag. Zürich.
- WEINGARTNER, R. (1999): Regionalhydrologische Analyse – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 37. Bern.
- ZELLER, J. (1975): Berechnung der Abflusswassermenge. Beilage zur Vorlesung «Wildbach- und Hangverbau», Abteilung VI, ETH. Zürich.
- ZELLWEGER, F., MUSY, A. (2000a): Mise au point du modèle hydrologique, régionalisation du paramètre de transfert, Projet CRUEX: Rapport d'avancement pour l'année 1999, HYDRAM, EPFL. Lausanne.
- ZELLWEGER, F., MUSY, A. (2000b): Mode d'emploi pour le modèle hydrologique CRUEX, Projet CRUEX, HYDRAM, EPFL. Lausanne.
- ZELLWEGER, F., MUSY, A. (2000c): CRUEX, rapport de synthèse. Rapport IATE/HYDRAM, EPFL. Lausanne.

Liste des figures

Fig. 1-1 : Place de l'hydrologie et du génie hydraulique dans l'évaluation des crues	8	Fig. 4-7 : Plausibilité du MPD à l'aide de deux crues de l'Eibach	31
Fig. 2-1 : Classification des méthodes d'évaluation des crues.....	9	Fig. 4-8 : Comparaison des distributions statistiques des débits observés et simulés (tiré de CONSUEGRA et al. 1998)	32
Fig. 2-2 : Principe du modèle GRADEX (Tiré de Elsasser 1996).....	10	Fig. 4-9 : Hydrogrammes observés et simulés pour le Rhône à Brigue et pour la Viège à Viège. La comparaison se fait sur les hydrogrammes sans composante glaciaire (tiré de CONSUEGRA et al. 1998).....	34
Fig. 2-3 : Bases hydrologiques de la 3ème correction du Rhône et crue du 15 octobre 2000 pour la station de Sion	14	Fig. 4-10 : Représentation du processus pluviométrique par NSRPM (FAVRE et al. 1997).....	35
Fig. 3-1 : Processus d'écoulement et réaction lors de fortes crues	15	Fig. 4-11 : Démarche adoptée pour la production de scénarios de crue	36
Fig. 3-2 : Evolution des coefficients d'écoulement $\Psi = (\sum Q / \sum N)$ des 18 emplacements situés dans des pentes	16	Fig. 4-12 : Comparaison des distributions statistiques des débits observés et simulés (tiré de CONSUEGRA et al. 1998)	37
Fig. 3-3 : Coupe montrant les caractéristiques agissant sur l'infiltration de l'eau dans le sol et déterminant le type de processus d'écoulement pour un sol non saturé.....	17	Fig. 4-13 : Volume de crue dépassant, pour un événement donné, le débit-seuil Q_s choisi.....	37
Fig. 3-4 : Schéma de la marche à suivre pour déterminer le type de processus d'écoulement dominant en fonction des caractéristiques déterminantes (selon Scherrer 2001)	18	Fig. 4-14 : Volumes de crue au-dessus d'un débit-seuil pour le Rhône à Brigue. Comparaison des courbes générées avec celles correspondant aux épisodes majeurs observés (tiré de CONSUEGRA et al. 1998)	37
Fig. 3-5 : Principaux processus d'écoulement dans une pente du Hundsrück (Rhénanie-Palatinat) sur la base d'une étude de terrain.	19	Fig. 4-15 : Débits annuels maximum à la station Drance de Bagnes – Le Châble.....	40
Fig. 3-6 : a) Surfaces contribuant de la même façon aux écoulements dans le bassin versant de l'Allenbach (Atlas hydrologique de la Suisse, HADES) b) La plus forte crue mesurée (à Adelboden)	20	Fig. 4-16 : Station de jaugeage du Chamuerabach à La Punt-Chamuesch-ch	41
Fig. 3-7 : a) Surfaces contribuant de la même façon aux écoulements dans le bassin versant de la Saltina (Atlas hydrologique de la Suisse, HADES) b) La plus forte crue mesurée (à Brigue)	21	Fig. 4-17 : Les plus fortes crues annuelles du Chamuerabach.....	43
Fig. 3-8 : a) Surfaces contribuant de la même façon aux écoulements dans le bassin versant de la Suze (Atlas hydrologique de la Suisse, HADES) b) La plus forte crue mesurée (à Sonceboz)	22	Fig. 4-18 : Extrapolation des débits des crues annuelles à la station de Chamuerabach – La Punt-Chamuesch-ch : distribution des valeurs extrêmes Type 1 (E1), distribution générale des extrêmes (DG) et Log Pearson-Type III (LP3) ; intervalles de confiance de 80%.....	44
Fig. 4-1 : Prise en compte des processus déterminant les écoulements à différentes échelles pour quelques modèles Pluie-Débit	24	Fig. 4-19 : Extrapolation des débits des crues annuelles à la station du Chamuerabach : distribution générale des extrêmes (DG) avec la méthode des moments (MM), la méthode du maximum de vraisemblance (MLM) et la méthode des moments pondérés (WGM); intervalles de confiance avec un coefficient de 80%.	45
Fig. 4-2 : En haut : Deux bassins versants de 5 km ² avec des proportions différentes de surfaces réagissant rapidement aux précipitations (respectivement 8% et 66%). En bas : Réaction des deux bassins à un orage (en violet) et à une pluie généralisée (en rouge)	25	Fig. 4-20 : Extrapolation des débits des crues annuelles à la station du Chamuerabach : distribution générale des extrêmes (DE) avec la méthode d'estimation des paramètres « maximum likelihood method » (MLM) ; intervalle de confiance avec un coefficient de 80%	45
Fig. 4-3 : Manière de procéder pour utiliser un modèle d'évaluation des crues en tenant compte des processus de formation des écoulements	27	Fig. 4-21 : Distribution statistique des débits simulés pour chacune des 10 séries de précipitations simulées avec NSRPM. Les points en gras correspondent à des crues dont le débit maximal est supérieur à un débit-seuil fixé à 1,25 fois le débit maximal	
Fig. 4-4 : Le bassin versant de l'Eibach (BL) : les différents types d'écoulements décrivent la réaction à prévoir dans les différentes zones du bassin	28		
Fig. 4-5 : Structure du modèle QArea.....	29		
Fig. 4-6 : Bases du modèle QArea	30		

centennal.....	49	maximales mesurées au nord et au sud des Alpes (FORSTER & BAUMGARTNER 1999).....	85
Fig. 4-22 : Exemple de crues extraordinaires pour le Rhône à Sion.....	49	Fig. 5-25 : Cas usuel, les méthodes 1 à 3 donnent des valeurs comprises entre les limites supérieure et inférieure	90
Fig. 4-23 : Fonction de production utilisée dans le modèle CRUEX.....	50	Fig. 5-26 : Le résultat donné par l'une des méthodes dépasse la limite supérieure.....	90
Fig. 4-24 : Schématisation de l'écoulement sur un plan, tel que considéré par la fonction de transfert	51	Fig. 5-27 : Le résultat donné par l'une des méthodes dépasse nettement la limite supérieure	90
Fig. 5-1 : Evaluation des crues dans les bassins de surface moyenne.....	54	Fig. 5-28 : Le résultat donné par deux des méthodes dépasse la limite supérieure.....	90
Fig. 5-2 : Carte des bassins-tests de Suisse	54	Fig. 5-29 : Carte du bassin versant du Vogelbach... ..	92
Fig. 5-3 : Valeurs de c dans le programme HQx_meso_CH, d'après Heusser (1947)	56	Fig. 5-30 : Extrait de la carte numérique des aptitudes des sols	92
Fig. 5-4 : Résultats de l'évaluation des crues selon Kürsteiner	57	Fig. 5-31 : Division provisoire du bassin en zones (Hypothèse de travail).....	93
Fig. 5-5 : Carte des zones α (selon Zeller).....	58	Fig. 5-32 : Coupe du terrain dans le Vogelwald.....	93
Fig. 5-6 : Résultats de l'évaluation des crues selon Müller-Zeller	59	Fig. 5-33 : Division du bassin en zones après l'étude sur le terrain.....	94
Fig. 5-7 : Résultats de l'évaluation des crues selon Kölla meso	61	Fig. 5-34 : Résultats de l'évaluation des crues du Vogelbach. Les méthodes de Müller et de Taubmann donnent la limite supérieure et la limite inférieure	96
Fig. 5-8 : Données utilisées pour le modèle GIUB'96 (Tiré de Weingartner 1999)	61	Fig. 5-35 : Exemple de courbes IDF provenant des catalogues des précipitations extrêmes de la Suisse (RÖTHLISBERGER et al. 1979–1981–1992).....	98
Fig. 5-9 : Courbe enveloppe régionale pour le région M2 ($Q_{max} = f(Fn)$ et $HQ_{100} = f(Fn)$) (Tiré de Weingartner 1999).....	61	Fig. 5-36 : Périmètre de l'étude et position des bassins versants utilisés pour le développement de la méthode HYDRAT. L'affectation des bassins versants à l'une des trois régions Préalpes, Plateau et Jura est aussi représentée.....	99
Fig. 5-10 : Régions de crues du même type en Suisse (selon KAN 1995).....	62	Fig. 5-37 : Comparaison des courbes de croissance des régions Jura, Plateau et Préalpes	100
Fig. 5-11 : Résultats de l'évaluation des crues selon GIUB'96 (Fn), HQ_{100}	64	Fig. 5-38 : Environnement du SIG GESREAU : caractéristiques du bassin versant de la Baye de Montreux à Montreux (14,6 km ²) ; occupation du sol et coefficient de ruissellement, coefficients du modèle IDF de Montana pour différentes périodes de retour, courbe hypsométrique, distribution des pentes	105
Fig. 5-12 : Résultats de l'évaluation des crues selon GIUB'96 (MQ), HQ_{100}	64	Fig. 5-39 : Environnement du SIG GESREAU : caractéristiques du bassin versant de la Baye de Montreux (14,6 km ²) ; réseau hydrographique, sous-bassins versants, caractéristiques physiographiques générales, quantiles obtenus par les méthodes HYDRIF, HYDRAT, HYDREG et quantiles bornes de l'intervalle de vraisemblance du modèle-cadre obtenus pour différentes périodes de retour	106
Fig. 5-13 : Résultats de l'évaluation des crues selon GIUB'96 (Fn), Q_{max}	65	Fig. 5-40 : Profil en long de la Mentue, de la Corbasnière (1,95 km ²) à Yvonand (105 km ²). Evolution des quantiles de débit HQ_{100} (ligne en trait-tillé vert) et des bornes de l'intervalle de vraisemblance obtenus par la méthode HYDREG (lignes en pointillé rouge).....	106
Fig. 5-14 : Résultats de l'évaluation des crues selon GIUB'96 (MQ), Q_{max}	65		
Fig. 5-15 : Résultats de l'évaluation des crues selon la méthode des moments	67		
Fig. 5-16 : Les moments des débits spécifiques de pointe des 95 bassins de référence.....	67		
Fig. 5-17 : Résultats de l'évaluation des crues selon BaD7	69		
Fig. 5-18 : Formulaire principal de HQx_meso_CH..	69		
Fig. 5-19 : Séries de données de HQx_meso_CH	70		
Fig. 5-20 : Evaluation des crues à l'aide du modèle GIUB'96	70		
Fig. 5-21 : Evaluation des crues dans quelques bassins versants (calcul et présentation à l'aide de HQx_meso_CH).....	71		
Fig. 5-22 : Marche à suivre pour l'évaluation des crues dans les petits bassins	80		
Fig. 5-23 : Schéma de décision pour la détermination du coefficient d'écoulement (d'après RICKLI & FORSTER 1997)	82		
Fig. 5-24 : Courbe-enveloppe de l'intensité des pluies			

Liste des tableaux

Tab. 2-1: Evaluation de la crue centennale de la Sitter à Appenzell à l'aide de différentes séries de données; le QH100 de référence est de 210 m ³ /s (Tiré de WEINGARTNER 1998).....	10
Tab. 4-1: Les débits du Chamuerabach publiés dans l'Annuaire hydrologique de la Suisse	42
Tab. 5-1: Valeurs de c selon Kürsteiner et Heusser..	55
Tab. 5-2: Coefficient d'écoulement Ψ selon Müller et Zeller.....	57
Tab. 5-3: Paramètres régionaux a et b pour la détermination de la courbe-enveloppe $Q_{\max} = a \cdot Fn^b$ et des droites de régression $HQ_{100} = a \cdot Fn^b$ en fonction de la surface du bassin versant Fn (Modèle GIUB'96 (Fn))	62
Tab. 5-4: Paramètres régionaux a et b pour la détermination de la courbe-enveloppe $Q_{\max} = a \cdot MQ^b$ et des droites de régression $HQ_{100} = a \cdot MQ^b$ en fonction du débit annuel moyen MQ (Modèle GIUB'96 (MQ))	63
Tab. 5-5: Limites d'utilisation des différents modèles (surfaces).....	72
Tab. 5-6 a: Limites d'utilisation des différents modèles (types de bassins)	72
Tab. 5-6 b: Valeurs statistiques des paramètres régionaux pour la méthode des moments	73
Tab. 5-6 c: Valeurs statistiques des paramètres régionaux pour le modèle BaD7	73
Tab. 5-7: Autres causes d'éventuels mauvais résultats	73
Tab. 5-8: Valeur de β_R optimale par région (indépendante du temps de retour considéré).....	97
Tab. 5-9: Surestimations et sous-estimations du quantile de référence avec le modèle HYDRAT (En haut : temps de retour 5 ans. En bas : temps de retour 100 ans).....	99
Tab. 5-10: Surestimations et sous-estimations du quantile de référence avec le modèle HYDRIF (En haut : temps de retour 5 ans. En bas : temps de retour 100 ans)	101
Tab. 5-11: « Modèle cadre régional » : plages de variation des débits spécifiques H_{qx} (en m ³ /s/km ²) pour une région, une classe de surface et un temps de retour X	103
Tab. 5-12: Surestimations et sous-estimations du quantile de référence avec le modèle HYDREG (En haut : temps de retour 5 ans. En bas : temps de retour 100 ans)	107