**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

**Band:** 94 (2002)

**Heft:** 3-4

**Artikel:** Détermination de la crue extrême pour les retenues alpines par une approche PMP-PMF

**Autor:** Boillat, Jean-Louis / Schleiss, Anton

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-939620

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 10.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# Détermination de la crue extrême pour les retenues alpines par une approche PMP-PMF

■ *Jean-Louis Boillat, Anton Schleiss*

**Résumé**

*En raison du danger potentiel qu'ils représentent, la sécurité structurale et fonctionnelle des grands barrages doit être garantie, en particulier leur capacité à résister au passage de la crue extrême. Cette entité conceptuelle, également appelée «déluge» ou encore «crue maximale probable» (en anglais PMF: Probable Maximum Flood), découle du postulat qu'il existe une limite physique aussi bien aux précipitations qu'aux crues qui en résultent. Des modèles à base physique sont de ce fait utilisés pour la recherche de la précipitation maximale probable (PMP) et de la PMF déterminante pour le barrage, définie comme suit: La crue qui peut être attendue de la plus sévère combinaison de conditions météorologiques physiquement possibles dans une région donnée et dont le passage dans la retenue, initialement pleine mais avec tous les évacuateurs ouverts, conduira au niveau maximum du plan d'eau.*

*La démarche utilisée pour calculer cette PMF critique est décrite et illustrée par l'exemple de la retenue de Mattmark dont le bassin versant de 37 km² est situé dans la vallée de Saas, entre 2200 et plus de 4000 m d'altitude sur le versant nord des Alpes suisses.*

**Zusammenfassung**

*Bei Talsperren muss die strukturelle und betriebliche Sicherheit für sämtliche möglichen Bedrohungen gewährleistet sein. Insbesondere müssen sie allen denkbaren, extremen Hochwasserereignissen sicher widerstehen können. Dieses Konzept des maximal möglichen Hochwassers (im Englischen auch PMF: Probable Maximum Flood genannt) basiert auf dem Postulat, dass eine physikalisch obere Grenze sowohl für die Niederschläge wie auch für die daraus resultierenden Hochwasserabflüsse existiert. Demzufolge sind physikalisch begründete Modelle für die Bestimmung der maximal möglichen Niederschläge (PMP: Probable Maximum Precipitation) und des massgebenden, maximal möglichen Hochwassers (PMF) bei Stauanlagen erforderlich. Das Extremhochwasser wird dabei wie folgt definiert: Das Hochwasser, welches für die schlimmsten Kombinationen von meteorologischen, physikalisch möglichen Bedingungen in einer bestimmten Region erwartet werden kann und dessen Zufluss zum voll angenommenen Stausee mit allen Hochwasserentlastungsorganen in Betrieb zum maximalen Seestand führt.*

*Das Berechnungsverfahren für die Bestimmung dieses kritischen Extremhochwassers wurde im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojektes für die speziellen Verhältnisse der alpinen Speicherseen erarbeitet. Das vorgeschlagene Verfahren wird am Beispiel des Stausees Mattmark erläutert und illustriert, dessen Einzugsgebiet von 37 km² sich im Saastal zwischen einer Höhenlage von 2200 und 4000 m ü.M. auf der Alpennordseite im Wallis befindet.*

## 1. Introduction

### 1.1 Le projet CRUEX

Les développements et résultats présentés ci-après sont à mettre au crédit du projet de recherche CRUEX qui, comme son nom l'indique, est orienté vers la détermination des crues extrêmes. Le projet CRUEX, financé par l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), est arrivé à un niveau de développement qui autorise son utilisation pour des cas pratiques. Cette méthodologie est appliquée ici à la retenue de Mattmark par la juxtaposition des modélisations atmosphériques, hydrologiques et hydrauliques.

La présente publication présente ainsi une synthèse des travaux effectués par les trois partenaires académiques du projet:

- Le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH-IHE): pour la modélisation hydraulique et les questions relatives à l'exploitation des aménagements.
- Le Laboratoire de Systèmes Energétiques (LASEN-IHE): pour la modélisation des précipitations et les questions météorologiques.
- L'unité Hydrologie et Aménagements (HYDRAM-IATE): pour la modélisation des fonctions hydrologiques de production et de transfert.

### 1.2 La problématique PMP-PMF

Les territoires situés dans la zone d'influence des cours d'eau ne sont pas seulement assujettis aux caprices de la météo, ils sont également tributaires des interventions d'origine anthropique qui modifient le comportement de leur bassin versant. Ainsi les retenues des grands barrages introduisent un effet de laminage qui permet de réduire l'importance et la fréquence des crues à l'aval. Afin de maîtriser totalement cet effet bénéfique, la sécurité structurale et fonctionnelle de ces ouvrages doit être garantie, en particulier leur capacité à résister au passage de la crue extrême. Cette entité conceptuelle, également appelée «déluge» ou encore «crue maximale probable» (en anglais PMF: Probable Maximum Flood), découle du postulat qu'il existe une limite physique aussi bien aux précipitations qu'aux crues qui en résultent. Des modèles à base physique sont de ce fait utilisés pour la recherche de la précipitation maximale probable (PMP) et de la PMF «critique» qui, pour le cas d'un barrage, peut être définie comme suit (CRUEX 2001):

*La crue qui peut être attendue de la plus sévère combinaison de conditions météorologiques physiquement possibles dans une région donnée et dont le passage dans la retenue, initialement pleine mais avec tous les évacuateurs ouverts, conduira au niveau maximum du plan d'eau.*

Les méthodes de type PMP-PMF sont utilisées depuis plusieurs décennies dans de nombreuses régions du monde, no-

tamment dans les pays anglophones (Angleterre, Australie, USA). Dès 1942, de nombreuses publications ont paru sur la PMP et dès les années soixante sur la PMF. Comme références de base, il convient de citer les «Hydrometeorological Reports» édités par le US National Weather Service (*Schwarz*, 1965i et 1965ii, *Schreiner et Riedel*, 1978, *Hansen et al.*, 1982) ainsi que les documents de l'OMM, «Estimation of Maximum Floods» (OMM 1969) et «Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation» (OMM 1973) et plus récemment, le Bulletin ICOLD 82 (1992) intitulé «Choix de la crue de projet – Méthodes actuelles».

Dans les régions alpines, la mise en œuvre d'une approche PMP-PMF se heurte à des difficultés particulières liées aux effets orographiques, c'est à dire à l'agencement des reliefs montagneux. Ceci explique pourquoi les développements conceptuels et théoriques mentionnés ci-dessus ne sont pas directement applicables dans le contexte alpin.

## 2. La méthodologie CRUEX

### 2.1 Généralités

Le projet CRUEX a été initié dans le but de développer une méthodologie de type PMP-PMF capable d'intégrer les particularités hydrologiques du milieu alpin, où les effets orographiques jouent un rôle déterminant sur la génération et l'abattement des conditions météorologiques. Cette recherche est en relation directe avec la sécurité des barrages implantés dans ce contexte géographique.

La démarche proposée ici repose sur un certain nombre d'hypothèses et de simplifications que les travaux de recherche futurs se doivent encore de valider ou d'améliorer. En l'état actuel des connaissances, la méthodologie et les outils de calcul proposés ont toutefois subi des tests suffisants pour autoriser leur application dans les Alpes suisses.

Le cheminement analytique proposé passe par quatre étapes distinctes schématisées dans le diagramme de flux de la figure 1 et décrites ci-après.

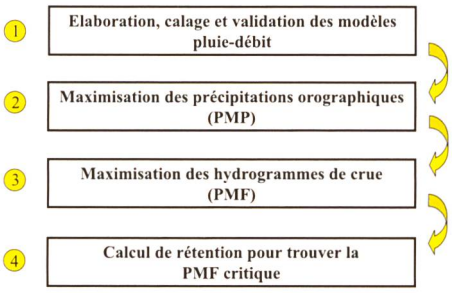


***Fig. 1. Démarche schématique de la méthodologie CRUEX.***

### 2.2 Première étape: Elaboration, calage et validation des modèles

La première étape consiste à définir les modèles de génération de pluie, de transfert hydrologique et de routage hydraulique qui seront utilisés pour la simulation et à procéder à leur calage.

Un premier modèle doit être en mesure de produire sur le bassin versant la précipitation consécutive à une situation météorologique donnée. Dans l'idéal, les paramètres considérés sont la lame précipitée et sa répartition spatio-temporelle. Pour les petits bassins versants des retenues alpines, il suffit généralement de connaître le volume et la durée des précipitations, car l'hypothèse d'une distribution uniforme de la pluie peut être admise et sa répartition temporelle soumise à une étude de sensibilité. Le modèle de simulation développé pour le projet CRUEX est décrit par *Montavon* (1996), il est implémenté dans le code numérique CFX-4 (1997).

Un deuxième modèle est destiné à simuler les fonctions de production et de transfert qui permettent de passer de la précipitation sur le bassin versant à la crue entrant dans la retenue. Sur les bassins versants alpins, caractérisés par une géologie rocheuse peu perméable et pour des événements extrêmes il peut être admis que la totalité de la pluie est transformée en débit. Cette hypothèse conservatrice permet de compenser les débits éventuels résultant d'une fonte de neige en altitude. Il est important que le modèle permette une simulation continue et un découpage à base physique du bassin versant. Plusieurs modèles ont été utilisés dans CRUEX parmi lesquels il convient de citer ORAGE (*Bérod,* 1994), SOCONT (*Bérod,* 1997), Routing System (*Dubois, Boillat,* 2000) et Faitou (*Dubois,* 1998).

Un troisième modèle est nécessaire pour reproduire l'effet de laminage de la retenue lors du passage de la crue. Il s'agit simplement de résoudre l'équation de rétention qui, outre la crue entrante, fait intervenir les relations «niveau-volume» et «niveau-débit sortant» du réservoir ainsi que la condition initiale de remplissage. Lors du passage de la crue extrême, la retenue est considérée comme initialement pleine et les consignes de sécurité concernant l'opération des organes de vidange sont appliquées, conformément aux directives relatives à la sécurité en cas de crue. Le calcul de laminage peut être programmé sur un tableur standard ou à l'aide d'un programme ad hoc, par exemple KALAMIN (*Essyad,* 1995) ou Routing System (*Dubois, Boillat,* 2000).

Les modèles à base physique précités doivent être soumis à une phase de calage et de validation en s'appuyant sur la documentation d'événements historiques majeurs qui se sont produits sur le site considéré.

### 2.3 Deuxième étape: Maximisation des précipitations orographiques (PMP)

La PMP est définie comme la hauteur d'eau maximale qui peut tomber pendant une certaine durée, sur une surface donnée, à un endroit particulier et à une certaine période de l'année.

Sur une topographie très accidentée comme c'est le cas dans les Alpes, la distribution spatiale des précipitations maximales probables est essentiellement déterminée par la composante d'origine orographique, pour laquelle le relief joue un rôle déterminant. Les mécanismes de type non-orographique, comme ceux associés aux orages estivaux ne sont toutefois pas négligés pour l'établissement des cartes de précipitations extrêmes.

L'approche choisie pour l'estimation de la précipitation orographique maximale probable sépare ainsi la contribution de type convectif de la contribution de type stable. La première est due au mouvement ascensionnel de l'air chaud remontant les pentes. Elle est déclenchée par des différences locales de température en présence de relief. La seconde apparaît lorsqu'une masse d'air en mouvement subit un soulèvement de type stable lors de son passage au-dessus du relief. L'estimation des précipitations orographiques stables repose sur la résolution numérique des équations régissant un écoulement atmosphérique stratifié au-dessus d'une topographie (*Kessler,* 1969, *Haiden,* 1991 et *Montavon,* 1996).

L'estimation de la contribution orographique maximale possible associée à une durée particulière se fait en variant les conditions physiques de l'atmosphère (profil de température, direction du vent, vitesse et profil du vent, conditions d'humidité,…) de manière à maximiser l'intensité de précipitation pour la région d'intérêt, tout en gardant les valeurs des paramètres dans une gamme plausible sur la durée choisie. La difficulté principale réside dans l'estimation des valeurs limites que peuvent prendre les paramètres physiques pendant la durée considérée.

En chaque point du domaine, la précipitation maximale probable correspond finalement au maximum de la contribution orographique stable ou de la contribution convective.

## 2.4 Troisième étape: Maximisation des hydrogrammes de crue (PMF)

De manière tout à fait générale, un hydrogramme est caractérisé par son volume d'eau, sa pointe maximale de débit et sa structure temporelle. La PMF peut donc prendre des formes diverses relatives à la caractéristique ou à l'effet considéré. Pour une retenue, la «PMF critique» est celle qui provoquera la surélévation maximale du plan d'eau, compte tenu du fonctionnement des évacuateurs de crue.

Pour une direction de vent et une durée données, la PMP peut être définie comme la précipitation pour laquelle les autres paramètres déterminants peuvent demeurer stationnaires à une valeur maximisée. Cette approche débouche sur une intensité maximale possible pour une durée donnée.

L'obtention de la PMP associée à une durée différente peut se faire en acceptant le postulat selon lequel la relation «intensité-durée» de la PMP est parallèle aux courbes «intensité-durée-fréquence» (IDF) d'une station pluviométrique représentative du bassin versant. Connaissant, par la modélisation numérique, une valeur de PMP moyenne pour une certaine durée, il est alors possible de tracer la relation «intensité-durée» de la PMP qui passe par ce point.

## 2.5 Quatrième étape: Calcul de rétention pour trouver la PMF critique

En dernière étape, il s'agit de donner une structure temporelle à la PMP pour différentes durées de précipitation. La durée minimale à considérer correspond généralement à celle qui permet à tout le bassin versant de contribuer à la formation du débit à l'exutoire.

Différentes approches peuvent être adoptées pour définir le hyétogramme de la précipitation, par exemple par pondération homothétique d'épisodes historiques, par l'utilisation de modèles stochastiques (*Favre,* 2001) ou encore par la définition d'une pluie de projet pour le bassin versant (*Sinniger et al.,* 1995). Cette dernière méthode, bien que fortement simplificatrice, conduit à des résultats très comparables à ceux issus de modélisations plus complexes sur les bassins versants alpins.

Les PMP générées pour différentes durées de précipitation doivent finalement être soumises au calcul de laminage par la retenue pour obtenir le débit maximum sortant. C'est pour cette condition que le niveau de rétention sera le plus élevé et que la condition de sécurité requise devra être satisfaite.

# 3. Application à la retenue de Mattmark

## 3.1 Contexte hydraulique et géographique

### 3.1.1 Caractéristiques de l'aménagement hydroélectrique (*Verrey,* 1961)

La digue en terre et en enrochements de Mattmark est l'élément principal de l'aménagement hydroélectrique dont la situation générale est présentée sur la figure 2. Cet ouvrage, d'une hauteur maximum de 120 m et d'un volume total de 10,5 mio de m$^3$, ferme la vallée au pied du glacier de l'Allalin et crée une retenue d'un volume utile de 100 mio de m$^3$ (figure 3). Le niveau maximum du plan d'eau est fixé à 2197 m s.m. et le couronnement de la digue se situe à 2204 m s.m.

La digue est équipée d'une vidange de fond capable d'évacuer un débit de 50 m$^3$/s, d'une vidange intermédiaire à la cote 2174 m s.m. dont la capacité maximale est de 20 m$^3$/s et d'un évacuateur de surface à 2197 m s.m. Ce dernier est constitué d'un déversoir libre de 75 m de largeur suivi d'une auge à adduction latérale et d'une galerie d'évacuation de 4 m de diamètre, à 2% de pente sur une longueur de 480 m (figure 4). Ces caractéristiques correspondent à celles de l'ouvrage avant sa transformation en 2001, soit une surélévation de 2 m destinée à créer un volume de rétention supplémentaire pour la protection contre les crues (*Boillat et al.*, 2000).

La retenue de Mattmark reçoit les eaux de son bassin versant naturel et de 2 adductions latérales dont la capacité totale ne dépasse pas 10 m$^3$/s. L'adduction rive gauche capte le Hohlaubach et l'Allalinbach. L'adduction rive droite va chercher les eaux du Triftbach, de l'Almagellerbach et du Furgbach.

Les eaux de Mattmark sont turbinées sur un premier palier à la centrale de Zermeiggern qui est équipée de 2 turbines Francis d'une capacité totale de 19 m$^3$/s, correspondant à une puissance de 74 MW. Durant les heures creuses, cette centrale pompe les eaux du bassin versant compris entre la digue

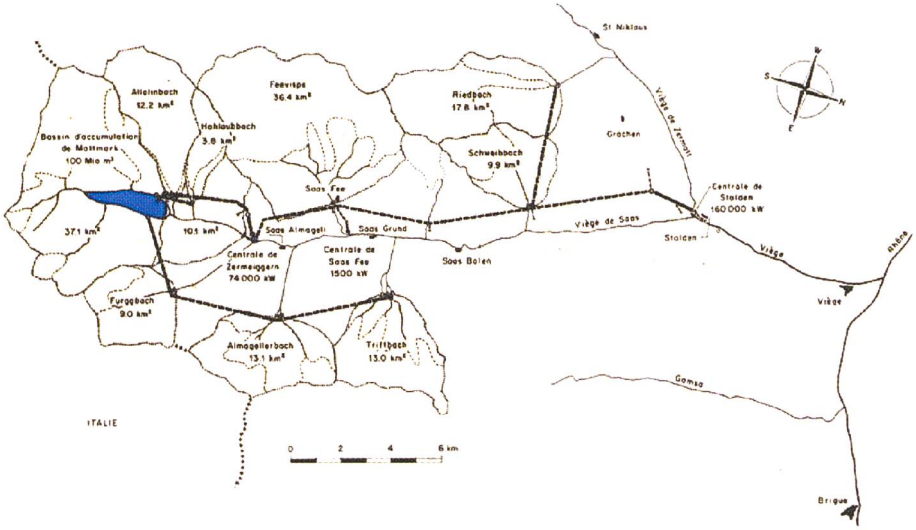


*Fig. 2. Situation de l'aménagement des Forces Motrices de Mattmark SA (source: «Forces Motrices de Mattmark SA», Zürich, août 1983).*

*Fig. 3. Digue et retenue de Mattmark.*

de Mattmark et Zermeiggern, y compris les eaux du Hohlauchbach et de l'Allalinbach lorsque l'adduction rive gauche ne fonctionne pas. Le débit pompé est de 9 $m^3/s$ au maximum.

***Fig. 4. Evacuateur de surface de la retenue de Mattmark (avant transformation).***

### 3.1.2 Le bassin versant naturel de la retenue

Le bassin versant naturel de Mattmark occupe 37 $km^2$ au fond de la vallée de la Viège de Saas. Il a des caractéristiques alpines typiques: altitudes variant de 2200 m s.m. au barrage à près de 3900 m s.m., pour une pente moyenne de 21% environ. La majeure partie du bassin est composée de rochers et de sols incultes. Les glaciers concentrés dans la région sud-ouest occupent environ 22% de la surface. La capacité moyenne de rétention hydrique du sol est d'environ 20 mm (*Spreafico et al.,* 1992), ce qui est faible en comparaison des précipitations attendues lors d'événements majeurs. Le réseau hydrologique est relativement bien développé dans ce bassin versant en éventail (figure 5).

### 3.1.3 Historique des crues à Mattmark

Durant les siècles passés, la langue du glacier de l'Allalin et sa moraine sud créaient un lac naturel sur la plaine de Mattmark dont la vidange subite pouvait être catastrophique. La chronique de la vallée de Saas rapporte que, le 4 août 1680, un tel événement a emporté 18 maisons et 6000 arbres à Viège seulement. Des crues extrêmes sont encore signalées en 1680, le 4 octobre 1740 et le 17 octobre 1772.

En 1883, le gouvernement valaisan octroie une subvention de 200 Fr. pour creuser un chenal dans le glacier. Le 23 septembre 1920 consécutivement à une précipitation de 240 mm en 24 h, la section de sortie du lac est brusquement élargie et le débit augmente très rapidement jusqu'à 140 $m^3/s$, par abaissement du niveau du lac, dévastant la région de Zermeiggern et de Saas-Almagell.

Il convient de relever que les débits de crue de la Viège ont été considérablement modifiés à partir de 1926. Au cours de cette année-là, une galerie de dérivation de 500 m de longueur a été percée en rocher sur la rive droite pour vidanger de façon continue le lac naturel de Mattmark. La capacité de cette galerie, limitée à 8–10 $m^3/s$, ne suffisait cependant pas à évacuer les fortes crues. En 1960, le projet de construction d'une digue à Mattmark a été adopté.

Depuis sa mise en service en 1965, la retenue de Mattmark a exercé un rôle protecteur absolu pour les territoires situés à l'aval. Il a fallu attendre la crue de septembre 1993 pour assister au premier fonctionnement de l'évacuateur de crues (figure 6).

### 3.1.4 Bases de dimensionnement de l'évacuateur de crues

Les bases hydrologiques utilisées pour le dimensionnement des organes de décharge reposent sur l'application de diverses formules empiriques (EWE 1960) ainsi que sur l'analyse statistique d'une série de 34 ans de mesures de débit à Zermeiggern.

Sur la base des informations historiques et des différentes analyses précitées un débit de 150 $m^3/s$, correspondant à une surélévation du niveau du lac de 1 m, a été choisi pour le dimensionnement de l'évacuateur de crues. La revanche disponible jusqu'au couronnement du barrage est de 7 m.

## 3.2 Simulation de la crue de septembre 1993. Calage des modèles (Etape 1)

### 3.2.1 Reconstitution de l'hydrogramme de crue

Le calage de modèles hydrologiques nécessite de disposer de mesures conjointes de pluie et de débit. Plusieurs stations pluviométriques sont en activité dans la région de Mattmark, mais aucune station limnimétrique n'existe à l'amont de la retenue.

Pour pallier ce manque d'informations, les enregistrements du niveau d'eau dans la retenue et les données d'exploitation à Mattmark-Zermeiggern ont été utilisés pour reconstituer des hydrogrammes de crues à l'entrée du lac.

Analytiquement, le débit entrant dans la retenue est décrit par l'équation de continuité:

$$Q_e = \frac{\Delta \forall}{\Delta t} + Q_s \qquad (1)$$

où $\Delta\forall$: volume d'eau stocké sur l'intervalle de temps $\Delta t$

$Q_e(t)$: débit entrant dans la retenue en fonction du temps

$Q_s(t)$: débit sortant de la retenue en fonction du temps

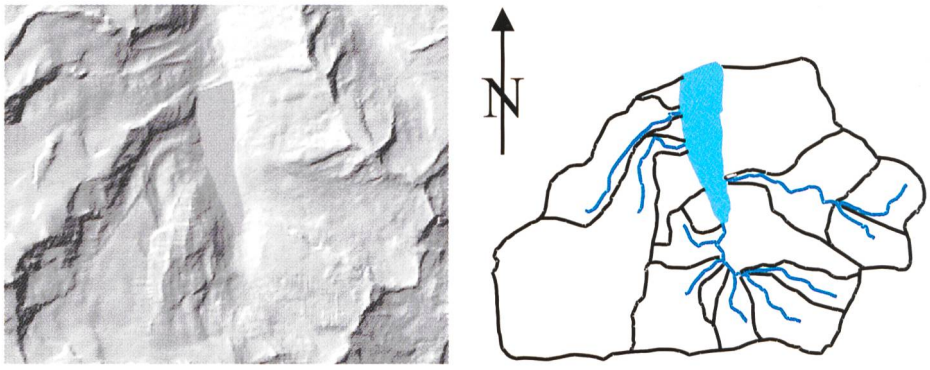


***Fig. 5. Bassin versant naturel de Mattmark. A gauche: Modèle numérique de terrain MNT25 © 1994 Office fédéral de topographie. A droite: Réseau hydrologique.***

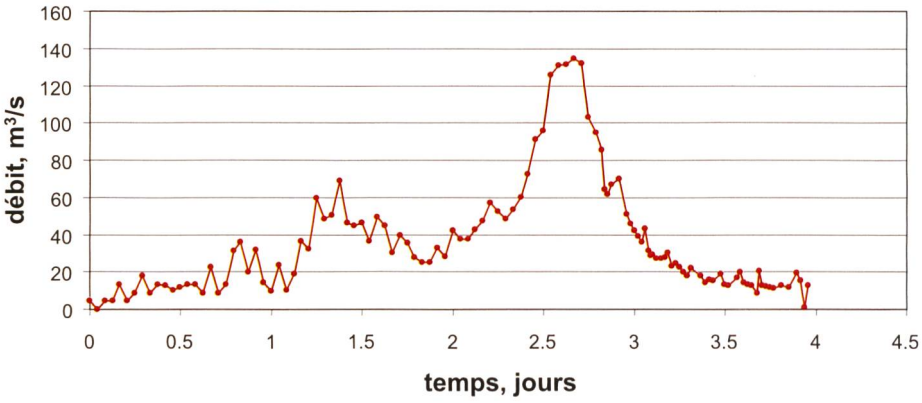


***Fig. 6. Reconstitution de l'hydrogramme de crue à Mattmark pour les 23, 24 et 25 septembre 1993.***

Pour la détermination de la fonction $Q_s(t)$ les éléments suivants doivent être considérés:

- le turbinage à Zermeiggern,
- le pompage depuis Zermeiggern,
- la vidange intermédiaire,
- l'évacuateur de surface.

La résolution de cette équation nécessite en outre la connaissance du niveau initial de remplissage de la retenue. A partir de ces données, l'hydrogramme de la crue de septembre 1993 a pu être reconstitué, comme représenté à la figure 6. Le débit de pointe atteint le 24 septembre s'établit aux environs de 135 $m^3/s$. Il faut encore relever que le début de la surverse du déversoir coïncide avec le temps de pointe de la crue et que le débit maximum évacué par le déversoir est de 74 $m^3/s$.

### 3.2.2 Simulation des précipitations du 24 septembre 1993

La simulation des précipitations du 24 septembre 1993 a été effectuée par modélisation numérique en résolvant les équations de *Kessler* (1969) qui expriment la continuité de l'eau de nuage et de l'eau précipitante. L'approche méthodologique de cette modélisation et l'analyse de sensibilité des différents paramètres considérés sont décrits par *Montavon* (1996). Le domaine de calcul considéré couvre toute la Suisse avec une maille de 5 km.

Les conditions initiales et aux limites du modèle ont été extraites des cartes météo et de sondages à Payerne, à Milan et à Lyon qui permettent de cerner la région modélisée. Pour la journée du 24 septembre, les vents au sud des Alpes soufflaient du secteur sud-ouest alors que sur le plateau suisse, les vents au sol étaient du secteur nord-est.

Pour la simulation des vents une direction générale du sud-est (secteur 150) a été considérée. Les profils de température et de vitesse retenus pour les conditions initiales sont présentés à la figure 7.

Aux bords d'entrée du domaine, le profil de vitesse est maintenu constant durant toute la simulation alors que la température est recalculée par le modèle. Concernant l'humidité, une atmosphère initiale saturée et sans précipitation a été admise. Ceci correspond aux conditions d'humidité mesurées par la station aérologique de Milan. La simulation a été effectuée sans seeding en altitude.

Afin de valider les résultats du calcul, une comparaison avec les mesures pluviométriques des stations existantes a été entreprise. Pour uniformiser la comparaison avec les valeurs mesurées, les intensités de précipitation calculées ont été transformées en valeurs 24 heures à tous les emplacements de pluviomètres. Cette transformation a été réalisée en référence à la station du Simplon qui se trouve dans la zone du maximum de précipitations.

Il ressort de la comparaison que les résultats du modèle présentés à la figure 8 coïncident bien avec les mesures. Les intensités de précipitation ont ensuite servi à la simulation de la crue du 24 septembre 1993.

### 3.2.3 Simulation hydrologique du bassin versant direct et des bassins versants captés

*3.2.3.1 Précipitation de septembre 1993*

Le phénomène météorologique subi par le Haut Valais entre le 22 et le 25 septembre 1993 est bien documenté grâce à différentes études, en particulier celle de *Grebner* (1994). Une structure temporelle à pas de temps de soixante minutes est ainsi disponible aux stations pluviométriques du Simplon et de Saas Almagell. Au vu des relevés effectués sur l'ensemble du Valais, la structure du Simplon (figure 9 gauche) a pu être admise comme représentative de l'épisode pluviométrique sur le bassin versant de Mattmark. Le volume de l'averse a été calculé en pondérant celui mesuré au Simplon par le facteur 1,68 résultant de la modélisation des précipitations. Le volume total atteint ainsi 626 mm. L'isotherme 0 °C situé au-dessus de 3000 m pour la pé-

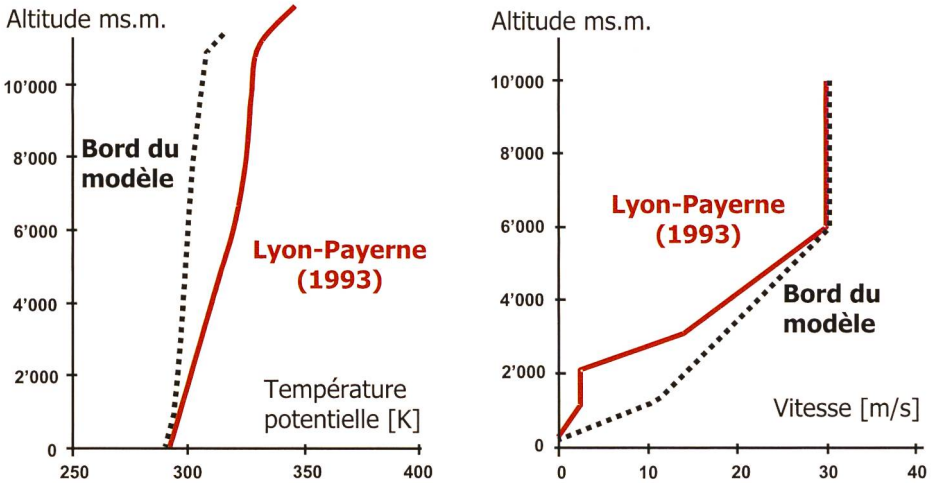


***Fig. 7. Profils de température (à gauche) et de vitesse (à droite) utilisés comme conditions initiales et de bord pour la simulation de l'événement du 24 septembre 1993.***

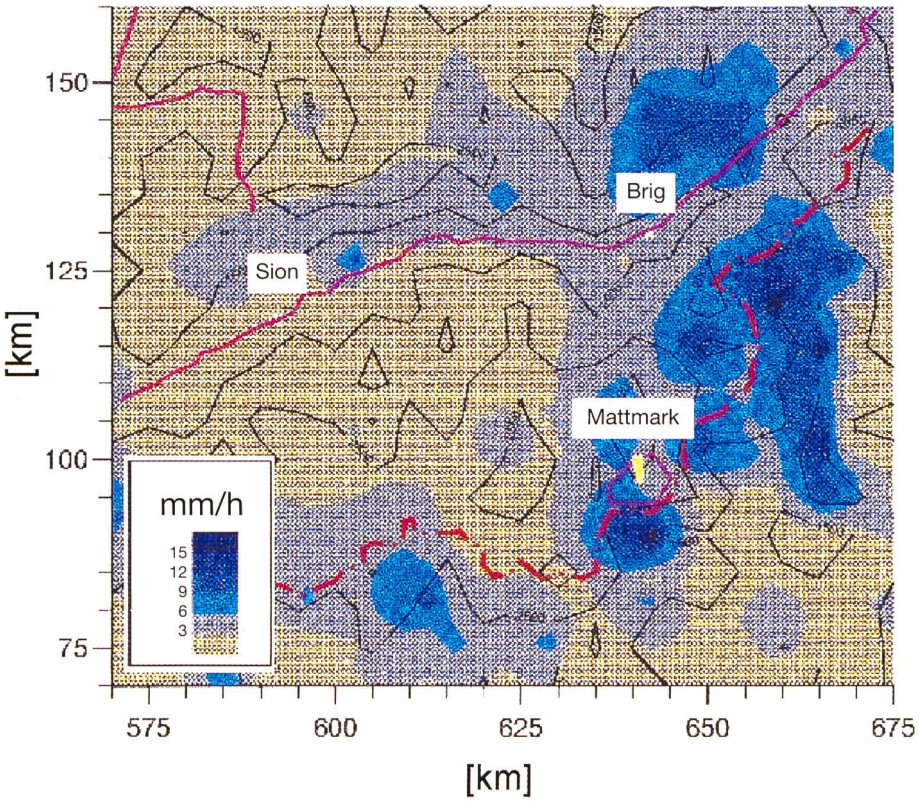


***Fig. 8. Répartition spatiale de la précipitation au sol obtenue par interpolation des résultats du calcul.***

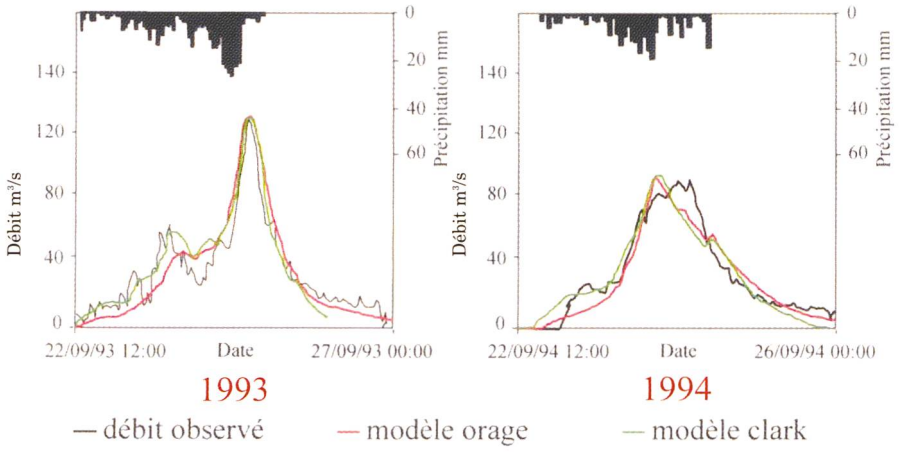


***Fig. 9. Simulation par les modèles ORAGE et CLARK des crues de 1993 (gauche) et 1994 (droite) à Mattmark.***

riode du 22 au 24 septembre 1993 permet de considérer que toute la précipitation est tombée sous forme liquide et non sous forme de neige.

*3.2.3.2 Simulation de la crue de septembre 1993*

• Apport des bassins de la rive droite

La crue à l'entrée du lac d'accumulation de Mattmark, reconstituée sous 3.2.1, a une pointe de 135 $m^3/s$ pour un volume de ruissellement de 14,6 mios $m^3$. L'apport de l'adduction, en rive droite est conditionné par la limite de capacité des prises d'eau fixée à 10 $m^3/s$. Une simulation grossière à l'aide du modèle hydrologique ORAGE a permis de constater que l'apport des trois bassins latéraux de la rive droite correspond tout au plus à un débit de base. Cette valeur se situe dans la marge d'erreur attendue des calculs et peut par conséquent être négligée.

• Estimation de la pluie nette

L'équivalent en lame d'eau de la crue de 1993, répartie sur le bassin de Mattmark, atteint 396 mm. La pluie brute ayant un volume de 626 mm, le coefficient de ruissellement pour cet événement vaut 0,63. Différentes méthodes d'infiltration ont été testées. L'analyse du couple pluie-débit de l'événement de 1993 semble indiquer que l'averse contribue à l'écoulement sur toute sa durée, la méthode proportionnelle a ainsi été retenue.

• Application du modèle ORAGE

Le modèle ORAGE requiert une description détaillée du bassin versant. Chaque élément de simulation est caractérisé par ses dimensions géométriques, sa pente et sa rugosité, qui est le paramètre de calage du modèle. A défaut de pouvoir déterminer la rugosité en fonction des caractéristiques des surfaces d'écoulement, une valeur unique du coefficient de Strickler $K_{plan}$ est considérée pour les plans et une autre valeur unique $K_{canal}$ pour les cours d'eau. Cette simplification est acceptable compte tenu de la relative homogénéité du bassin, abstraction faite des surfaces de glacier. Le calage de la rugosité sur l'événement de 1993 donne les valeurs suivantes:

$$K_{plan} = 0{,}12\ m^{1/3}\ s^{-1};\ K_{canal} = 10\ m^{1/3}\ s^{-1}.$$

La très faible valeur du coefficient $K_{plan}$ tombe largement en dehors du domaine d'application de la formule de Strickler, raison pour laquelle une analyse de sensibilité de l'hydrogramme simulé a été menée en faisant varier $K_{plan}$ selon une loi normale d'écart-type 0,06. La génération de 100 valeurs de rugosité suivant cette loi a montré que les pointes simulées s'étalent entre 130 et 141 $m^3/s$ avec un coefficient de variation de 0,02, inférieur à celui de la rugosité, ce qui indique une bonne stabilité du modèle ORAGE. D'autre part, les hydrogrammes simulés se sont avérés peu sensibles à la rugosité estimée des cours d'eau $K_{canal}$.

Toutefois, ce biais de modélisation imputable à l'utilisation abusive de la formule de Strickler peut désormais être évité par l'application de la formule de *Dubois* (1998), développée spécifiquement pour les écoulements de surface. Les résultats de calage de l'événement de 1993 par le modèle ORAGE est présenté sur la figure 9 (gauche).

• Validation avec la crue de septembre 1994

Une année jour pour jour après la crue de septembre 1993, un événement d'importance comparable s'est produit sur le bassin versant de Mattmark. La crue de septembre 1994, reconstituée à l'entrée du lac est caractérisée par un débit de pointe de 100 $m^3/s$ pour un volume total de 10,2 mios $m^3$, soit 276 mm.

La première étape de validation des modèles a consisté à rechercher une station pluviographique dont les mesures de septembre 1994 soient représentatives du phénomène subi par la région de Mattmark. Pour ce faire, l'ensemble des stations valaisannes du réseau ANETZ de l'Institut Suisse de Météorologie ont été étudiées.

Comme toutes présentent une forme similaire, la structure relevée au Grand Saint-Bernard a été adoptée car cette station se trouve à une altitude proche de celle du bassin de Mattmark (2472 m) et son orientation est comparable. Le volume précipité a été corrigé par le facteur permettant d'obtenir celui ruisselé à Mattmark.

La validation du modèle ORAGE a consisté à simuler la crue de 1994 avec les paramètres obtenus par calage de la crue de 1993. Le résultat présenté sur la figure 9 (droite) peut être considéré comme tout à fait satisfaisant.

## 3.3 Maximisation de la pluie orographique sur la région (Etape 2)

### 3.3.1 Procédure de maximisation

Une étude de sensibilité restreinte (CRUEX 1994) a permis de démontrer que les paramètres tels que la vitesse en altitude, le gradient de température et la direction du vent ont une influence importante sur les précipitations au sol d'un site donné. A ces trois paramètres, il faut encore ajouter la température au sol, le taux d'humidité entrant dans le domaine, une hauteur caractéristique du relief et le temps de stationnarité des paramètres dans une situation donnée.

Ainsi, le problème qui se pose pour la maximisation de la précipitation en un point donné peut être formulé comme suit: étant donné la non-linéarité des phénomènes atmosphériques, il doit exister une valeur de chaque paramètre qui produira un maximum si tous les autres paramètres sont maintenus constants. Dès lors, la recherche du maximum maximorum de la précipitation implique un très grand nombre de simulations dans un espace multidimensionnel. L'analyse dimensionnelle permet de réduire le domaine d'exploration en regroupant les paramètres variables dans des nombres sans dimension utilisés ensuite dans l'étude de sensibilité.

Les paramètres variables peuvent être rangés dans trois catégories:

(1) les paramètres liés aux phénomènes à grande échelle
- la vitesse du vent géostrophique: $\overline{V}_g$
- la direction du vent géostrophique: $\Phi_g$
- l'humidité relative

(2) les paramètres liés à la topographie
- la température au sol: $\Theta_0$
- le gradient de température au sol: $\frac{d\Theta}{dz}$
- le profil de vitesse: $\overline{V}(z)$
- la hauteur du relief: h

(3) les paramètres liés à l'évolution temporelle des phénomènes
- le temps de stationnarité : $T_s$, durant lequel les conditions de bord des différents paramètres peuvent être maintenues.

Il apparaît a priori que la direction du vent synoptique et le temps de stationnarité ne peuvent pas être adimensionnalisés. Ils constituent donc des paramètres indépendants.

Le profil de vitesse peut être mis sous forme adimensionnelle par rapport à la vitesse géostrophique:

$$p(z) = \frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}_g} \qquad (2)$$

Les autres variables, combinées avec l'accélération gravitationnelle, peuvent être regroupées dans le nombre de Froude:

$$Fr^2 = \frac{\bar{V}_g^2}{\frac{1}{\Theta_0}\frac{d\Theta}{dz} gh^2} \qquad (3)$$

Ce nombre exprime le rapport entre les forces inertielles et les forces dues à la flottabilité (effet thermique de l'atmosphère). Finalement, à l'aide de la viscosité cinématique $\nu$ on peut former le nombre de Reynolds:

$$Re = \frac{\bar{V}_g h}{\nu} \qquad (4)$$

Ce nombre exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Pour les écoulements atmosphériques, ce nombre est très grand (de l'ordre de $10^8$) et de petites variations dues à la modification de la vitesse $\bar{V}_g$ ou de la hauteur h n'ont pas d'influence sur l'écoulement.

Finalement, l'humidité relative a été maintenue comme un paramètre indépendant. Ainsi les paramètres déterminants sont:
- la direction du vent,
- le temps de stationnarité,
- le profil de vitesse adimensionnel,
- le nombre de Froude,
- l'humidité relative initiale.

Le profil de vitesse est uniquement fonction de la rugosité du sol qui a été considérée unique et constante sur le relief alpin.

Pour une direction donnée, le temps de stationnarité est déterminé par la capacité des autres paramètres déterminants à demeurer stationnaires. Ces paramètres sont l'humidité et le nombre de Froude. Pour chaque valeur du temps de stationnarité existe un couple de valeurs de Froude et d'humidité qui maximise la pluie en un point donné.

Pour vérifier que le temps de stationnarité soit physiquement possible, il est nécessaire de recourir à une analyse de mesures météorologiques. Pour simplifier cette analyse, l'option retenue a été de découpler l'humidité et le nombre de Froude en admettant que, pour une situation maximisante, le taux d'humidité est de 100%, indépendamment des valeurs prises par les autres paramètres. Ce taux d'humidité correspond aux valeurs observées le 24 septembre 1993 à Milan. Avec cette hypothèse, le temps de stationnarité est associé uniquement au nombre de Froude. Lors d'événements à grande vitesse géostrophique, le terme prépondérant dans le nombre de Froude est la vitesse. Par conséquent, le temps de stationnarité de la vitesse géostrophique est la valeur recherchée en première approximation. La procédure simplifiée utilisée pour définir la PMP de Mattmark peut se résumer comme suit:

(1) Partant de conditions météorologiques proches de celles du 24 septembre 1993, étudier la variation de l'intensité des précipitations en fonction de la direction du vent géostrophique et du nombre de Froude.
(2) Associer les temps de stationnarité aux valeurs possibles de la vitesse du vent géostrophique.
(3) Associer un temps de stationnarité possible au taux d'humidité de 100% en tenant compte de la durée de la pluie critique pour le bassin versant.
(4) Pour ce temps de stationnarité, rechercher la valeur du nombre de Froude maximisant l'intensité de précipitation. Cette dernière est la PMP associée au temps de stationnarité retenu.

Ces différentes étapes sont développées ci-après.

*3.3.1.1 Sensibilité à la direction du vent et au nombre de Froude*

Il est connu aujourd'hui que les précipitations abondantes au sud des Alpes sont associées à des vents venant du sud. Par conséquent, la maximisation est effectuée en étudiant la sensibilité à la direction du vent géostrophique, puis au nombre de Froude. Par souci d'efficacité la direction du vent géostrophique qui maximise la précipitation à Mattmark a été recherchée dans un premier temps.

La figure 10 montre la variation de la moyenne de précipitation sur les points de calcul appartenant au bassin versant de Mattmark ainsi que sur deux points extérieurs [coordonnées (640,90) et (645,90)]. A Mattmark, les valeurs d'intensité les plus élevées se rencontrent pour les vents des secteurs N90 à N150.

Le secteur N90 n'est pas déterminant car, pour cette direction, les vents approchent la Suisse par la terre et, par conséquent, l'humidité relative pour ces situations est certainement inférieure à 100%.

Les deux secteurs N120 et N150 ont été retenus pour effectuer l'analyse de sensibilité au nombre de Froude. La variation de ce nombre a été obtenue en faisant varier la vitesse géostrophique et le gradient de température. La hauteur caractéristique du relief a été fixée à 2000 m s.m., ce qui correspond à l'altitude moyenne du massif alpin.

Les résultats sont présentés dans la figure 11. L'intensité de précipitation pour le bassin versant de Mattmark a été moyennée sur les nœuds correspondants du domaine de calcul. Il apparaît que pour une valeur du nombre de Froude plus petite que 6, la précipitation est plus forte pour N120 alors que pour des nombres de Froude plus élevés c'est la précipitation du secteur N150 qui devient plus importante. Il en résulte que le secteur maximisant est N150 et non pas N120 comme la figure 10 pourrait le laisser supposer.

*3.3.1.2 Analyse des vents forts*

La vitesse du vent géostrophique est définie comme la vitesse du vent à une altitude suffisamment élevée pour que l'influence du relief soit négligeable. Pour la Suisse, cette altitude est d'environ 5000 m s.m. Les mesures mé-

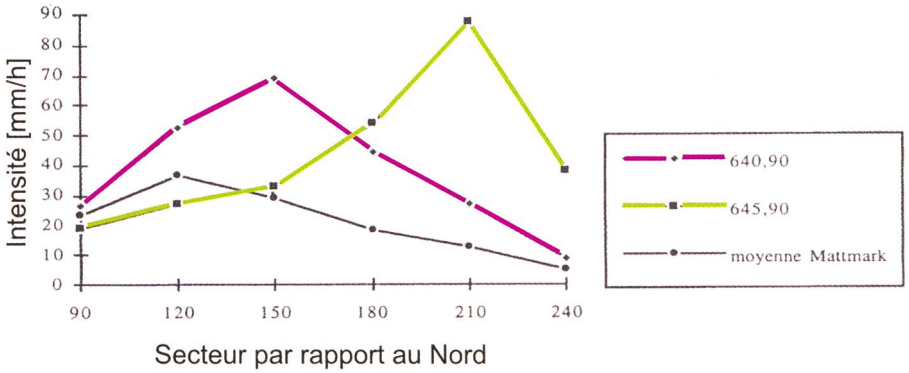


***Fig. 10. Sensibilité de la précipitation à Mattmark par rapport à la direction du vent.***

téorologiques de routine à cette altitude sont effectuées à la station aérologique de Payerne deux fois par jour, avec un appareillage ne permettant d'obtenir que des valeurs ponctuelles. Pour effectuer une analyse fiable des forts vents géostrophiques, il est nécessaire de disposer de vitesses moyennes et extrêmes sur une longue durée, obtenues avec une cadence d'échantillonnage de l'ordre de la seconde. Il n'est, par conséquent, pas possible d'utiliser les sondages de Payerne à cet effet. L'alternative consiste à utiliser les vitesses de vent mesurées au sol à une station du réseau ANETZ, dont la rose des vents soit représentative de celle en altitude. Des études antérieures *(Ehinger et al.,* 1990) ont montré que la station de Chasseral est, parmi toutes les stations de montagne, la plus représentative des vents géostrophiques. Les mesures automatiques au Chasseral sont effectuées depuis 1982. Elles ont été analysées en vue d'obtenir les valeurs maximales de la vitesse en fonction de différents temps de stationnarité.

Le résultat de cette approche est une courbe de type I-D-F pour la vitesse du vent géostrophique. La figure 12 montre la courbe obtenue pour le secteur N150. Les durées varient de 10 minutes à 24 heures. La courbe présente trois régions distinctes, chacune avec une pente constante (1) entre 10 minutes et 2 heures, (2) entre 2 heures et 3 à 4 heures et (3) entre 4 et 24 heures.

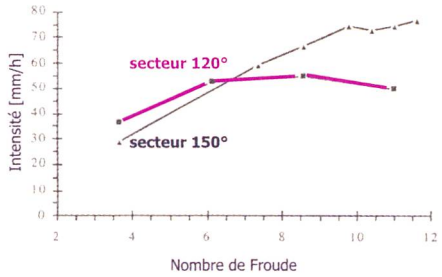


***Fig. 11. Variation de la précipitation à Mattmark en fonction de la vitesse géostrophique pour les secteurs N120 et N150.***

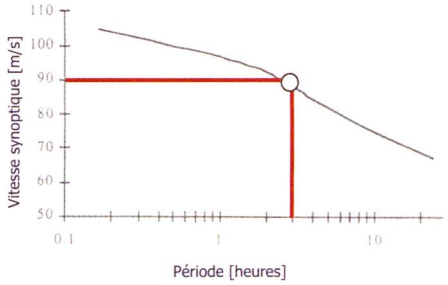


***Fig. 12. Courbe de type IDF pour les vents extrêmes du Secteur N150 (sud-est) obtenue à partir des données de Chasseral.***

### 3.3.2 Estimation de la PMP à Mattmark

L'étude de l'intensité de précipitation en fonction de la direction du vent géostrophique et du nombre de Froude indique que, à Mattmark, la valeur de la PMP est obtenue pour une direction de secteur N150 et un nombre de Froude correspondant à une vitesse géostrophique d'environ 90 m/s. Pour ces conditions, l'intensité de la précipitation est de 78 mm/heure.

La durée associée à cette intensité est de 3 heures environ, soit celle sur laquelle des conditions de vent de 90 m/s produisant cette précipitation, peuvent être maintenues.

De manière générale, la durée de la pluie critique est supérieure à celle de cette condition de vent. Une durée plus grande doit donc être considérée pour le calcul de la pluie critique, ce qui reviendrait à admettre que des masses d'air saturées à 100% puissent être advectées dans le domaine pendant cette durée. Cela étant peu probable, une méthode a été proposée pour établir la PMP critique, elle est décrite ci-après sous 3.4.

## 3.4 Maximisation de l'hydrogramme de crue du bassin naturel (Etape 3)

### 3.4.1 Estimation de la durée de pluie et de l'hydrogramme critique

Afin d'orienter la maximisation de l'ensemble du processus pluie-ruissellement-rétention vers la situation déterminante, c'est-à-dire vers la durée de pluie maximisante pour le barrage, la méthode de l'hydrogramme critique *(Sinniger et al.,* 1995) a été appliquée à la retenue de Mattmark.

La durée de pluie introduite permet le calcul de l'hydrogramme d'entrée. Une fonction personnalisée recherche ensuite la hauteur d'eau maximum atteinte dans le lac durant le passage de la crue. La durée de la pluie est ensuite modifiée pour rechercher celle qui entraîne la surélévation maximale du plan d'eau. Cette durée de pluie critique $T_{p,c}$ est à l'origine de l'hydrogramme critique recherché.

Les résultats obtenus ont montré que le débit sortant maximum se produit pour une pluie de 10 h. Cette durée n'est que légèrement supérieure à celle correspondant au maximum du débit entrant qui est de 9 h.

Toutefois, afin de s'assurer que tout le bassin versant contribue pour ces durées, une évaluation du temps de concentration du bassin versant a été entreprise. Les résultats obtenus par différentes approches, allant des formules empiriques à la simulation mathématique, montrent que le temps de concentration ne devrait pas être inférieur à 6 heures ni excéder 24 heures.

Cette large fourchette accompagnée de ses incertitudes a conduit à étendre le champ d'investigation et à considérer des pluies de différentes durées, comprises entre 1 heure et 24 heures, pour la modélisation.

### 3.4.2 Volumes et structures temporelles des PMP

La modélisation météorologique présentée sous 3.3.2 a permis d'établir une intensité maximale pour Mattmark d'environ 80 mm/h pendant 3 heures. La solution proposée pour déterminer des intensités maximales sur d'autres durées consiste à utiliser l'information donnée par les courbes intensité-durée-fréquence (IDF), afin d'établir les intensités moyennes des PMP en fonction de leur durée. *Bérod* (1994) a montré que la variation des intensités de PMP en fonction de la durée était parallèle aux variations des intensités pour différents temps de retour. Cette constatation permet d'utiliser les courbes IDF calculées par *Zeller et al.* (1980) à la station de Saas-Fee pour déterminer la variation des PMP. Comme montré à la figure 13, l'intensité de 70 mm/h sur 3 heures permet de fixer un point de la droite des PMP dans un graphique log-log, puis de tracer cette droite en admettant que sa pente soit la même que celle correspondant au temps de retour 500 ans. Ces valeurs de PMP peuvent ensuite être utilisées pour la construction de pluies de projet de toutes durées.

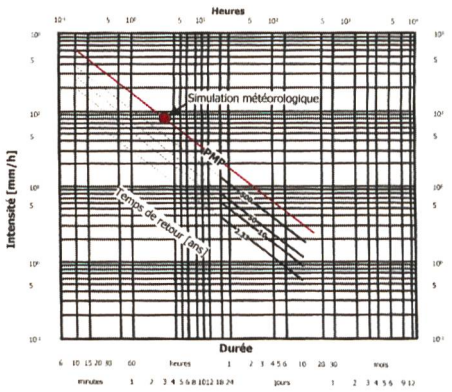


***Fig. 13. Construction d'une courbe PMP-durée sur la base des courbes IDF de la station de Saas-Fee (d'après Zeller et al., 1980).***

La structuration des précipitations «mpm», développée dans CRUEX (1992) a ensuite été utilisée pour définir les averses.

La méthode «mpm» repose sur une construction critique des averses, en utilisant le volume total des précipitations et leur durée pour calculer l'intensité maximale et sa position, ainsi que les volumes avant et après la pointe par des régressions linéaires. Une génération aléatoire d'intensités selon une loi exponentielle permet de construire l'en-

semble de l'averse. Les calculs de régression ont été effectués sur les données de la station de Davos située au centre des Alpes. Les pas de temps retenus sont de 10 minutes pour les pluies inférieures à 12 heures et de 1 heure pour les autres.

Dans une recherche de maximisation, les pertes par infiltration ont été négligées pour le calcul d'une PMF sur Mattmark. En effet, les caractéristiques du bassin versant indiquent un fort potentiel de ruissellement (capacité de stockage de 20 mm), les deux seules incertitudes étant liées à la proportion de précipitation sous forme de neige et à l'apport du glacier. Dans le cadre d'une PMP, il est raisonnable d'admettre que toute la précipitation est liquide, ce qui a d'ailleurs été observé pour l'événement de 1993. L'apport du glacier ne peut être estimé sans investigation sérieuse, mais sa morphologie laisse augurer d'une contribution immédiate en situation de crue et d'une capacité de stockage faible. En conséquence, il paraît raisonnable d'admettre que le coefficient de ruissellement global du bassin versant soit proche de l'unité pour les crues extrêmes.

### 3.4.3 Calcul d'hydrogrammes de crue

Le modèle ORAGE a été utilisé pour calculer la PMF critique du bassin versant de Mattmark, qui correspond à une durée de pluie de dix heures, comme montré à la figure 14. Cette PMF a ainsi un débit de pointe de 252 $m^3/s$ environ, soit près du double de la crue de 1993 et 1,7 fois la crue de dimensionnement de l'évacuateur du barrage, avant laminage dans le lac. Son volume atteint 11,9 mios $m^3/s$, équivalent à une lame ruisselée de 321 mm. Il est à relever que le débit de pointe change relativement peu à partir de la durée de 10 heures.

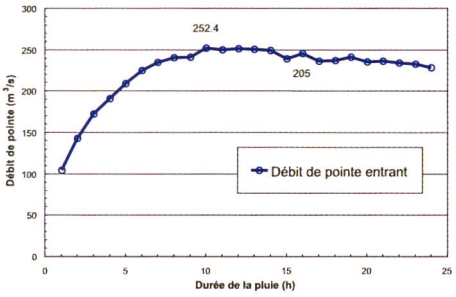


***Fig. 14. Débit de pointe entrant dans la retenue de Mattmark en fonction de la durée de la PMP.***

## 3.5 Calcul de rétention pour trouver la PMF critique

Les 24 crues extrêmes calculées par ORAGE pour différentes durées de pluie, ont finalement été soumises au calcul de rétention dans la retenue de Mattmark. D'après l'estimation obtenue par la méthode de l'hydrogramme critique présentée sous 3.4.1, la pluie de 10 h devrait conduire à la crue sortante maximale.

Pour le calcul exact de la rétention, la relation hauteur-débit de l'évacuateur de crues a été établie pour tous les types de fonctionnement de cet ouvrage, constitué d'un déversoir suivi d'une auge et d'une galerie.

Trois types de fonctionnement peuvent se produire successivement:

- le déversement libre,
- le déversement noyé par l'auge,
- la mise en charge de la galerie aval.

Pour les faibles débits, seul le déversoir contrôle l'évacuation. La géométrie de sa crête permet de déterminer son coefficient de débit pour la charge de dimensionnement de 1 m: $C_{dD} = 0{,}451$. Pour des débits plus importants, le niveau d'eau dans l'auge commence à influencer le déversement. Un calcul couplé entre l'auge et le déversoir s'avère alors nécessaire. Le niveau d'eau dans l'auge se calcule avec les équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement en tenant compte de la variation spatiale des phénomènes (*Sinniger et Hager,* 1989).

Le débit peut également être contrôlé par la capacité de la galerie d'évacuation. En choisissant un K de Strickler de 75 $m^{1/3}/s$ (galerie revêtue de béton coffré), le débit de mise en charge de la partie basse de la galerie vaut $Q_{plein} = 188$ $m^3/s$. Pour des débits supérieurs, l'endroit de la mise en charge de l'écoulement remonte le long du puits incliné et atteint l'auge pour un débit de 227 $m^3/s$. A partir de cette valeur, la galerie contrôle le débit, le déversoir et l'auge étant entièrement noyés. La mise bout à bout de ces trois comportements permet d'établir la relation hauteur-débit complète de l'évacuateur, avant sa transformation, présentée à la figure 15.

Le calcul de rétention a été effectué à l'aide du logiciel Routing System (*Dubois, Boillat,* 2000). Le calcul demande trois informations principales pour sa résolution: la relation hauteur-volume de la retenue, la loi de sortie et l'hydrogramme de crue.

La loi de sortie présentée à la figure 15 a été introduite point par point, tout comme les différentes crues extrêmes calculées sous 3.4.3. Les conditions initiales du calcul supposent la retenue pleine (2197 m s.m.). Le pas de temps du calcul est fixé à 5 min, ce qui correspond au pas de temps des résultats du modèle ORAGE.

Le maximum des hydrogrammes entrant $Q_{e,max}$ et des hydrogrammes sortant $Q_{s,max}$ sont représentés en fonction de la durée de la pluie à la figure 16. Le maximum absolu du débit sortant (205 $m^3/s$) est atteint pour une pluie de 16 h, alors que le maximum du débit entrant se produit pour une pluie de 10 h. Il parait toutefois nécessaire de relativiser les valeurs absolues calculées, car le «bruit» numérique, provenant des modèles ORAGE et Routing System, suffit à produire une valeur de pointe légèrement supérieure aux valeurs voisines. Il est plus judicieux d'observer la tendance générale des deux courbes de la figure 16:

- le débit de pointe maximum entrant s'établit à environ 250 $m^3/s$ pour des durées de pluie comprises entre 10 et 14 h;
- le débit de pointe maximum sortant, légèrement supérieur à 200 $m^3/s$, se produit pour des durées de pluies comprises entre 10 et 24 h.

Il est intéressant de remarquer que la courbe des $Q_{s,max}$ augmente rapidement pour les pluies de courtes durées, mais que son «maximum» est très plat. Il faut des durées de pluie supérieures à 1 jour pour qu'elle amorce une décroissance.

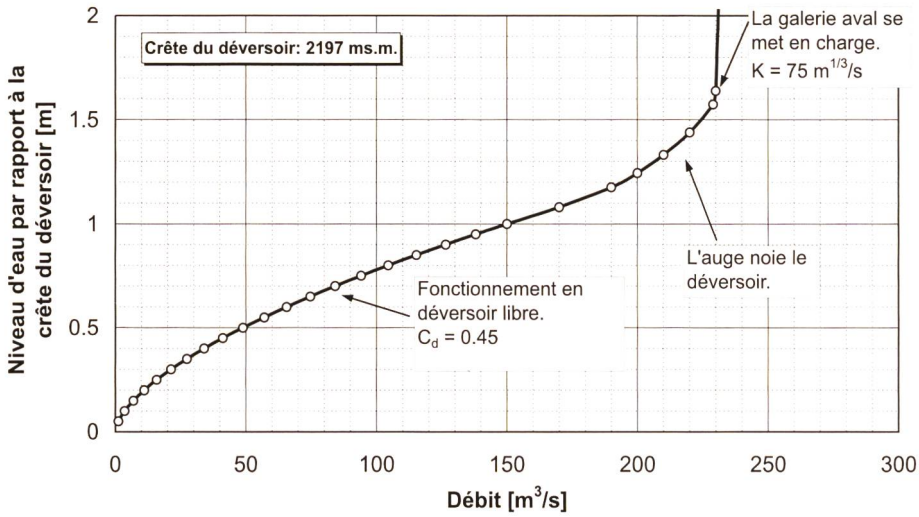


***Fig. 15. Relation hauteur – débit de l'évacuateur de surface de Mattmark (avant transformation).***

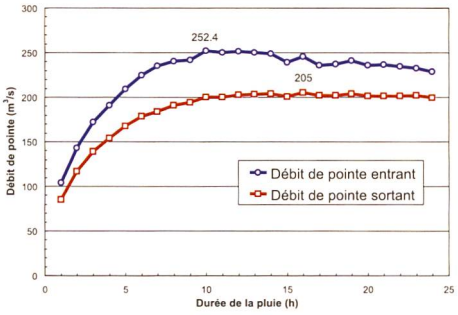


***Fig. 16. Relation entre la durée de la pluie et les débits de pointe d'entrée $Q_{e,max}$ et de sortie $Q_{s,max}$. Les débits d'entrée sont le résultat du modèle ORAGE. Les débits de sortie sont obtenus à l'aide de Routing System.***

## 4. Conclusions

L'application de la méthodologie PMP-PMF a été vérifiée sur l'exemple de la retenue de Mattmark. Dans une première approche, les modèles de précipitation et de formation des crues ont été calés sur l'évènement de septembre 1993, puis validés sur celui, également exceptionnel, de septembre 1994. Sur cette base, la PMF critique de la retenue a été déterminée par maximisation de la pluie orographique et de l'hydrogramme de crue. La maximisation de la précipitation a été effectuée en jouant sur la direction du vent et sur les conditions de vitesse et de stabilité de l'écoulement atmosphérique. Un grand nombre d'averses de différentes durées et structures ont ensuite été générées puis introduites dans le modèle hydrologique du bassin versant. La réponse de la retenue a finalement été obtenue par un calcul de laminage des hydrogrammes simulés. Parmi tous ces hydrogrammes, celui qui conduit au débit de sortie maximal correspond à la PMF «critique».

L'originalité et l'intérêt de la méthode reposent essentiellement sur:

- le couplage entre les phénomènes météorologiques, hydrologiques et hydrauliques,
- la prise en compte de la variation spatiale et de la structure temporelle de ces phénomènes,
- la détermination de la durée de pluie qui conduit à la PMF «critique» pour la retenue.

Les résultats obtenus montrent que la modélisation proposée est en mesure de reproduire une situation observée et que la procédure de maximisation conduit à des valeurs réalistes. Celles-ci doivent toutefois être considérées comme le résultat intermédiaire d'un développement qui appartient encore au domaine de la recherche.

Références bibliographiques

*Bérod, D. D.*, 1994, «Contribution à l'estimation des crues rares à l'aide de méthodes déterministes – apport de la description géomorphologique pour la simulation des processus d'écoulement», Rapport de thèse 1319, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 194 pp.

*Bérod, D. D.*, 1997, «Etude Consecru», Rapport IATE/HYDRAM, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

*Boillat, J-L., Dubois, J., Schleiss, A.*, «Utilisation possible dela retenue de Mattmark pour la protection contre les crues et la production d'énergie», Actes du XX Congrès des Grands Barrages, CIGB/ICOLD, Beijing 2000, Q.77-R.23, pp. 339–355.

CFX-4, 1997, «CFX-4 Manuals», AEA Technology, CFX International, Harwell (UK).

CRUEX, 1992. «Deuxième rapport intermédiaire CRUEX. LCH, LASEN, HYDRAM», Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

CRUEX, 1994. «Quatrième rapport intermédiaire CRUEX. LCH, LASEN, HYDRAM», Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

CRUEX, 2001, «Rapport de synthèse CRUEX. LCH», Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

*Dubois, J.*, 1998, «Comportement hydraulique et modélisation des écoulements de surface», Communication n° 8 du Laboratoire de Constructions hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

*Dubois, J., Boillat, J-L.*, 2000, «Routing System. Modélisation du routage des crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre», Communication n° 9 du Laboratoire de Constructions hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

*Ehinger J., Hertig J.-A., Alexandrou C., Berney M., Christinat M.-O.*, 1990, «Analyse de l'influence de la topographie sur les conditions d'exposition des bâtiments, Klimadatentransfer – Transfert de données météorologiques», Rapport FN, subside n° 20-5189.86, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

*Essyad, K.*, 1995. «KALAMIN, Calcul de laminage de crues», Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

EWE, 1960, «Staudamm Mattmark, Beschreibung der Hochwasserverhältnisse und der Entlastungsorgane, Kraftwerke Mattmark SA.», Projekt Januar 1960, Beilage 6, Elektro-Watt Engineering, Zürich, Schweiz.

*Favre, A.C.*, 2001, «Single and multi-site modelling of rainfall based on the Neyman-Scott Process», Thèse n° 2320, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

*Grebner, D.*, 1994, «Meteorologische Analyse des Unwetters von Brig und Saas Almagell vom 24. September 1993», eau, énergie, air, 1994, 1/2,41 – 44.

*Haiden, T.*, 1991, «A deterministic approach to the estimation of orographic PMP», Institute of Meteorology and Geophysics, University of Vienna, Austria.

*Hansen et al.*, 1982, «Probable Maximal Precipitation Estimates, United States East of the 105th Meridian», Hydrometeorological Report n° 52, NWS, Silverspring.

ICOLD, 1992, «Choix de la crue de projet – Méthodes actuelles», Comité International des Grands Barrages, Bulletin n° 82.

*Kessler, E.*, 1969, «On the precipitation distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations», Meteorological Monography 10 (32), American Meteorological Society, 84 pp.

*Montavon, C.*, 1996, «Estimation des précipitations orographiques maximales probables par modélisation numérique», Communication n° 5 du Laboratoire de Constructions hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

OMM, 1969, «Estimation of Maximum Floods», n° 233, Secrétariat de l'Organisation Mondiale de Météorologie, Genève, Suisse.

OMM, 1973, «Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation», n° 332, Secrétariat de l'Organisation Mondiale de Météorologie, Genève, Suisse.

*Schwarz, F. K.*, 1965i, «Probable Maximum and TVA precipitation over the Tennessee basin above Chattanooga», Hydrometeorological Report n° 45, US Weather Bureau.

*Schwarz, F. K.*, 1965ii, «Probable Maximum and TVA precipitation for Tennessee river basins up to 3000 square miles in area and duration to 72 hours», Hydrometeorological Report n° 45, US Weather Bureau.

*Schreiner, L.C., Riedel, J.T.*, 1978, «Probable Maximal Precipitation Estimates, United States East of the 105th Meridian», Hydrometeorological Report n° 51, NWS-NOAA, Washington DC.

*Sinniger, R. O., Boillat, J.-L., et Dubois, J.*, 1995, «L'hydrogramme de crue critique d'une retenue avec évacuateur de surface», Symposium CNSGB, Recherche et développements dans le domaine des barrages, Crans-Montana, Suisse.

*Sinniger, R. O., Hager, W. H.*, 1989, «Constructions hydrauliques. Ecoulements stationnaires», Traité de génie civil, vol. 15, Presses polytechniques romandes, Lausanne, Suisse.

*Spreafico, M. et al.*, 1992, «Atlas hydrologique de la Suisse», Service hydrologique et géologique national, Berne, Suisse.

*Verrey, A.*, 1961. «L'aménagement hydro-électrique de Mattmark», Bulletin technique de la suisse romande, n° 26, Lausanne, Suisse.

*Zeller, J., Geiger, H., Roethlisberger, G.*, 1980. «Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebiets», vol. 5, Valais – Tessin. Institut fédéral de recherche forestière (FNP), Birmensdorf.

Adresse des auteurs

*Jean-Louis Boillat*, Dr ès sciences techniques EPFL, Laboratoire de constructions hydrauliques, LCH-EPFL, CH-1015 Lausanne, e-mail: jean-louis.boillat@epfl.ch

*Anton Schleiss*, Prof. Dr Dipl. Bauing. ETH, Directeur du Laboratoire de constructions hydrauliques, LCH-EPFL, CH-1015 Lausanne, e-mail: anton.schleiss@epfl.ch