



Hertig & Lador SA

Grand Rue 38

CH-1176 St Livres

Tel. +41 21 312 70 77

Fax +41 21 312 70 07

hertig@hetl.ch

www.hetl.ch

TVA 490 604

Projet Cruex
Directives crues de l'OFEN
Cartes de précipitations extrêmes PMP pour la Suisse

**Validation et utilisation des cartes de PMP pour
l'obtention de la PMF**

J.-A. Hertig

J.-M. Fallot

Version revue et augmentée, août 2009

Rapport à l'attention de

M. Georges Darbre
Bundesamt für Energie
Oberaufsicht Talsperren

St Livres, 25 août 2009

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	3
2. METHODES DE DETERMINATION DES PRECIPITATIONS EXTREMES A L'AIDE D'ANALYSES STATISTIQUES	4
2.1 DÉTERMINATION DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES PAR LE WSL À PARTIR DES MESURES IN SITU DE 1901 À 1970 (OU 1987).....	4
2.2 DÉTERMINATION DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES PAR LE WSL À PARTIR DES MESURES IN SITU DE 1961 À 2008.....	5
3. NOTIONS DE BASE SUR LES PRECIPITATIONS EXTREMES.....	11
3.1 TYPES DE PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES	11
3.2 PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES ET ÉVÉNEMENTS	12
3.3 INTENSITE ET DUREE DES PRECIPITATIONS EXTREMES	13
4. MODELISATION DES PMP POUR LA SUISSE.....	15
4.1 MODELISATION DES PHENOMENES A L'ORIGINE DES PRECIPITATIONS.....	16
4.1.1 <i>Résolution et domaine de calcul pour les PMP en Suisse.....</i>	<i>16</i>
4.1.2 <i>Détermination des PMP d'origine orographique et convective en Suisse.....</i>	<i>17</i>
4.1.3 <i>Durée des PMP calculées</i>	<i>19</i>
4.2 CARTE DES PRECIPITATIONS EXTREMES (PMP) POUR LA SUISSE	20
4.3 VALIDATION DES CARTES DES PMP.....	24
4.3.1 <i>Validation des cartes PMP pour une durée 24 heures.....</i>	<i>24</i>
4.3.2 <i>Validation des cartes PMP pour une durée de 3 heures.....</i>	<i>26</i>
4.4 LIMITES D'UTILISATION DES CARTES PMP DE LA SUISSE	29
5. DETERMINATION DES CRUES EXTREMES PMF	32
5.1 DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS MAXIMALES	32
5.2 MODELISATION DE L'ECOULEMENT SUR LE TERRAIN (ROUTAGE).....	35
5.3 MODELISATION DE FONTE DE LA NEIGE	37
5.4 RESULTATS ET DISCUSSION	38
6. CONCLUSIONS.....	41
7. REFERENCES	42
APPENDICE A : EQUATIONS DES MODELES DE VENT ET DE PLUIE.....	45

1. Introduction

La protection contre les crues est un objectif vital pour un pays de fleuves, rivières et lacs tel que la Suisse. Cette préoccupation est très ancienne. En 1874 déjà, la Constitution fédérale prévoit dans l'article 24 l'obligation de légiférer en matière de protection contre les crues (endiguement) et de protection de la forêt. Cette protection fût une préoccupation constante tout au long du 20^{ème} siècle et elle a atteint aujourd'hui un très haut niveau. On a ainsi assisté à la mise en valeur du patrimoine énergétique que constituent les ressources en eau des pays montagneux. Il a été montré qu'une protection efficace passe aussi bien par la connaissance du phénomène que par la création d'ouvrages d'endiguement et de laminage des crues, ainsi que par la gestion de ces ouvrages.

Le problème du dimensionnement des ouvrages de contrôle des débits de crues, évacuateurs, bassin de rétention, etc, repose sur la connaissance fiable des crues extrêmes. Une première difficulté provient du fait que la crue est la manifestation finale d'une chaîne d'éléments constituées par :

- les précipitations, caractérisées par leur intensité, leur durée et leur localisation,
- le transfert sur le bassin versant concerné,
- le comportement hydraulique des ruisseaux et des rivières du bassin versant,
- le laminage par le lac d'accumulation ou la retenue,
- la manipulation de l'ouvrage hydraulique de contrôle et d'évacuation des crues.

Les précipitations jouent donc un rôle essentiel. Jusqu'à aujourd'hui, les précipitations extrêmes ont et sont encore déduites d'analyses statistiques de mesures. Malgré une très forte densité de pluviomètres et les très longues séries à disposition, ces données statistiques sont encore insuffisantes pour obtenir les informations indispensables au dimensionnement des ouvrages ; car il s'agit d'une part d'un phénomène naturel relativement rare souvent localisé et d'autre part de phénomènes très complexes, sensibles à l'évolution du climat.

Dans le cadre d'un grand projet de recherche soutenu pendant 10 ans par l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG), de nouvelles méthodes ont été développées à l'EPFL afin de mieux comprendre et prévoir les débits de crues extrêmes. En partant des précipitations maximales probables (PMP), ce projet a permis ainsi de développer une méthodologie de prévision des crues maximales probables (PMF). Nous avons adapté aux conditions des Alpes la méthode dite PMP-PMF recommandée par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) tout en généralisant l'utilisation de modèles numériques pour les calculs de la PMP puis de la PMF. La modélisation numérique que nous avons développée permet d'enfin obtenir une distribution spatiale des précipitations extrêmes avec la précision, la densité d'information et la représentation du détail qui manquait pour définir la complexité de la topographie de la Suisse.

Les résultats de cette recherche ont été utilisés pour fournir des cartes de précipitations extrêmes (PMP) sur la Suisse, utilisables dans le cadre de la « directive crue » de l'OFEN. Pour le calcul des crues concernant les ouvrages les plus courants, une méthodologie simplifiée est proposée. Elle repose sur une opération dite de routage, où les PMP sont transférées sur le terrain puis dans le lit des ruisseaux et des rivières jusqu'à l'ouvrage de retenue. Un modèle compatible avec la grande qualité des cartes a été développé dans le but d'assurer la précision et la fiabilité de la détermination de la crue

2. Méthodes de détermination des précipitations extrêmes à l'aide d'analyses statistiques

Traditionnellement, les valeurs des précipitations extrêmes susceptibles de se produire dans une région particulière sont estimées à partir d'analyses statistiques effectuées sur des séries de mesures pluviométriques d'une certaine durée. Ces analyses permettent d'ajuster une courbe de régression en fonction de la fréquence d'apparition des événements dans le passé et de prévoir la probabilité d'apparition d'un événement de plus grande ampleur avec une période de retour plus longue (par exemple 500 ans) que la série de mesures disponibles. Cet ajustement peut se faire à partir de différentes lois exponentielles ou logarithmique. La loi double exponentielle de Gumbel (1958) est une des plus souvent utilisée pour un tel ajustement. Pour une série de mesures de précipitations donnée, on retient la hauteur d'eau journalière maximale mesurée en 24 heures durant chaque année ou chaque mois. Ces valeurs maximales sont ensuite classées par rang pour lequel on calcule la fréquence d'apparition en fonction de la loi double exponentielle de Gumbel u :

$$u = -\ln(-\ln(1-1/T)), \text{ avec } T = \text{période de retour exprimée en années ou en mois}$$

On peut ensuite ajuster une droite de régression linéaire en fonction des valeurs u obtenues et des valeurs maximales annuelles ou mensuelles mesurées. La Figure 2 présente à titre les droites de régression de Gumbel pour les précipitations journalières maximales annuelles mesurées durant 48 ans (1961-2008) à 2 endroits représentatifs de la Suisse (cf. chap. 2.2).

2.1 Détermination des précipitations extrêmes par le WSL à partir des mesures *in situ* de 1901 à 1970 (ou 1987)

Dans l'atlas hydrologique de la Suisse, les analyses statistiques ont été entreprises pour les séries de mesures pluviométriques d'environ 300 stations ayant fonctionné de 1901 à 1970 ou 1987. L'Office fédéral de l'étude des forêts, de la neige et du paysage (WSL) avait expérimenté plusieurs méthodes statistiques pour déterminer les valeurs des précipitations journalières extrêmes pour une durée plus longue (100, 500 ans) que les séries de mesures disponibles. Les analyses de Gumbel ont abouti aux meilleurs résultats pour l'estimation des précipitations journalières (sur 24 heures) extrêmes en Suisse, sauf dans un quart Nord-Est et quelques autres endroits isolés. Dans ces régions-là, la loi log normale a fourni de meilleures estimations, mais elle se traduit par des valeurs de 27 à 43% plus élevées que les précipitations journalières cinquantennales déterminées par la loi de Gumbel.

La Figure 1 présente les précipitations journalières extrêmes avec un temps de retour de 500 ans pour l'ensemble de la Suisse estimées par le WSL à partir des méthodes statistiques de Gumbel ou de la loi log normale. On constate notamment que le Sud des Alpes est le plus exposé à ces précipitations avec des valeurs proches de 500 mm en 24 heures, notamment dans la région du Centovalli. Ces valeurs atteignent jusqu'à 300 mm au Nord des Alpes dans les Préalpes centrales et orientales. Elles varient entre 100 et 150 mm sur le Plateau et le Jura. Elles tombent au-dessous de 100 mm dans les régions les moins exposées du Nord de la Suisse, du Plateau et du Valais central.

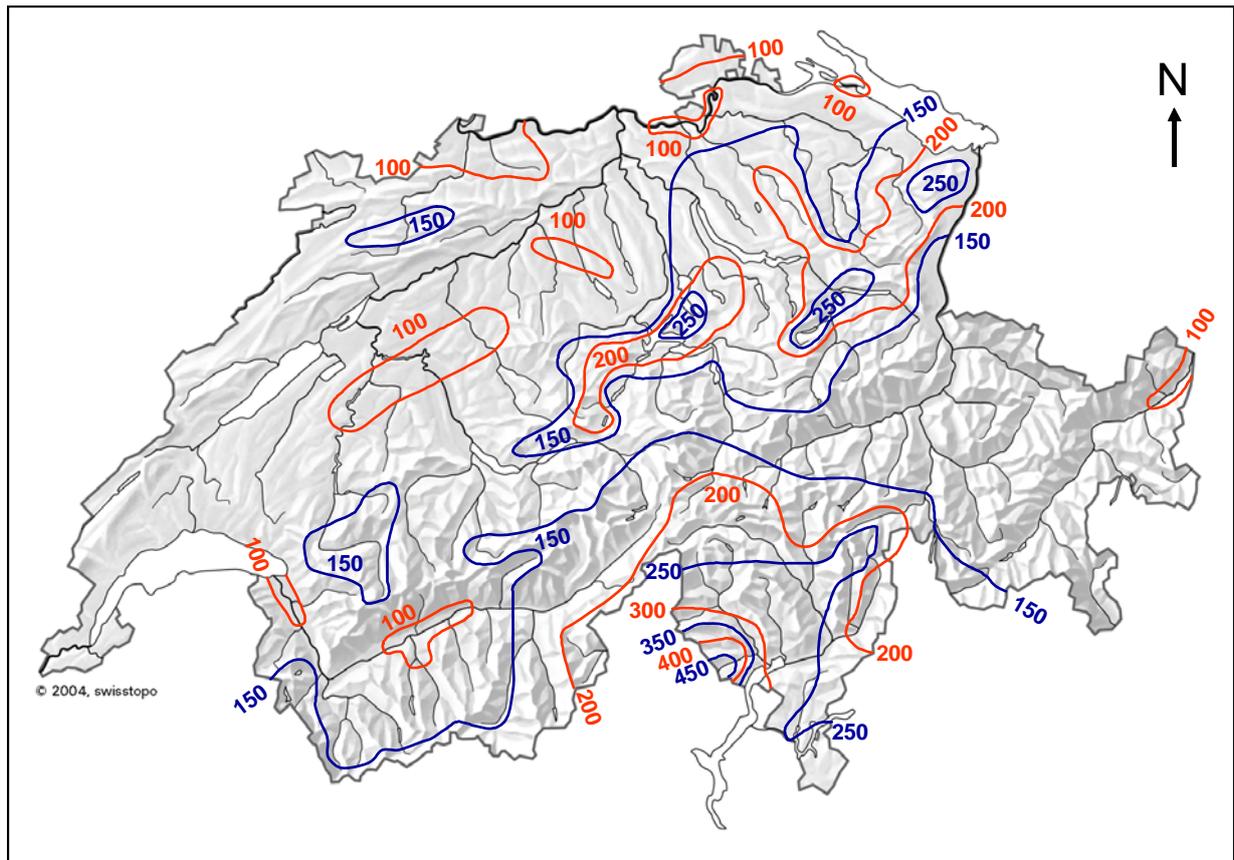


Figure 1 : Précipitations journalières (24 heures) maximales extrapolées pour une période de retour de 500 ans à partir des mesures in situ faites sur une période de 70 ans (1901-70). Carte élaborée à partir de données fournies par l'Atlas hydrologique de Suisse

2.2 Détermination des précipitations extrêmes par le WSL à partir des mesures in situ de 1961 à 2008

Plusieurs études ont montré que le réchauffement global du climat s'accompagne d'une augmentation de la fréquence des fortes précipitations dans de nombreuses régions du globe (Frei et al., 2000 ; Trömel et Schönwiese, 2007 ; IPCC, 2007). Une telle augmentation est aussi perceptible en Suisse de 1975 à 2000, notamment au Nord et dans les Alpes (Fallot, 2000). Les modèles climatiques globaux et régionaux prévoient que la fréquence des fortes précipitations devrait continuer de croître durant le 21^{ème} siècle en Suisse et dans le monde (Frei et al., 2006 ; Beniston et al., 2007 ; IPCC, 2007).

D'autre part, le WSL a considéré 2 méthodes statistiques différentes (Gumbel et loi log normale) pour estimer les précipitations journalières centennales pour l'ensemble de la Suisse, ce qui peut créer des inhomogénéités spatiales. Pour ces raisons, les précipitations journalières centennales pour une durée de 24 heures ont été recalculées à partir d'analyses statistiques effectuées sur des séries de mesures pluviométriques pour la période 1961-2008 à 429 endroits du pays, afin d'examiner si ces valeurs centennales n'ont pas augmenté par rapport à celles obtenues par le WSL sur la période 1901-1970.

Ces nouvelles estimations ont été faites avec la loi de Gumbel décrite plus haut, car elle donne globalement les meilleurs résultats en Suisse. Ces mesures provenaient du réseau de

MétéoSuisse avec des stations automatiques mesurant en continu plusieurs paramètres météorologiques et des stations pluviométriques relevant les hauteurs d'eau une fois par jour vers 7 heures du matin. Une bonne partie de ces stations ont commencé leurs mesures en 1961 et celles-ci couvrent l'intégralité de la période 1961-2008 à 303 endroits. Comme les précipitations varient fortement à l'échelle locale dans une topographie accidentée comme celle de la Suisse, nous avons également retenu des séries de mesures plus courtes durant cette période, mais couvrant au minimum 35 ans, à 123 autres endroits, afin d'obtenir une couverture spatiale aussi dense que possible, surtout dans les Alpes où les stations de mesures sont plus espacées. Cela représente un total de 429 stations pour lesquelles les précipitations journalières extrêmes ont été déterminées avec un temps de retour de 500 ans. Ces nouvelles analyses ont été présentées lors d'un colloque international de climatologie en septembre 2009 (Fallot et Hertig, 2009) et les principaux résultats sont repris ici.

La Figure 2 présente à titre d'exemple les droites de régression de Gumbel pour les précipitations journalières maximales annuelles mesurées durant 48 ans (1961-2008) à 2 endroits représentatifs de la Suisse avec les hauteurs d'eau extrapolées pour une période de retour de 100 et 500 ans (= valeurs centennales et cincennales). On constate que la droite de régression de Gumbel obtenue à partir des valeurs maximales annuelles pour une période de 48 ans explique bien les variations de ces valeurs d'une année à l'autre à Andeer ($R^2 > 0.99$, soit plus de 99% des variations expliquées). Elle permet par conséquent une bonne estimation des précipitations centennales et cincennales à cet endroit. On peut faire les mêmes constatations pour la plupart des séries de mesures en Suisse, sauf en quelques lieux comme Wilchingen.

Cet endroit se caractérise par le coefficient R^2 le plus bas des 429 stations étudiées. Il atteint encore 0.82, mais on remarque que les 2 valeurs journalières maximales annuelles les plus élevées se situent largement au-dessus de la tendance logarithmique dessinée par les autres valeurs journalières maximales. La loi double exponentielle de Gumbel n'ajuste pas très bien la tendance mesurée pour les précipitations journalières maximales mesurées à cet endroit durant la période 1961-2008. La valeur cincennale extrapolée à cet endroit par la loi de Gumbel est à peine plus élevée que les précipitations journalières maximales mesurées sur une période de 48 ans. Par conséquent, les précipitations journalières centennales et cincennales estimées par la loi de Gumbel sont sous-estimées pour cette distribution des valeurs journalières annuelles maximales. Des cas semblables se sont rencontrés en d'autres endroits de la Suisse et ils se caractérisent par des coefficients R^2 inférieurs à 0.9. D'une manière générale, plus ces coefficients sont bas, plus les écarts entre la valeur journalière maximale mesurée et la droite de régression ajustée par la loi de Gumbel sont grands et plus les précipitations journalières centennales et cincennales obtenues sont sous-estimées.

Le Tableau 1 montre que les coefficients R^2 dépassent 0.95 pour 78% des stations et la droite de régression de Gumbel ajuste bien la distribution des précipitations journalières maximales par an mesurées de 1961 à 2008. Dans ce cas, les précipitations journalières centennales et cincennales sont bien estimées pour ces stations à partir de la loi de Gumbel. Cette méthode donne des résultats un peu moins bons pour 15.2% de stations en Suisse avec des coefficients R^2 compris entre 0.9 et 0.95. Les estimations sont encore moins bonnes pour 6.7% des stations avec des coefficients R^2 inférieurs à 0.9. La majorité de ces dernières stations se localise dans un quart Nord-Est de la Suisse, ce qui rejoint les résultats trouvés précédemment par le WSL. Toutefois, ces stations ne représentent qu'une minorité parmi les autres stations de cette région de la Suisse où la loi de Gumbel aboutit à de bons résultats.

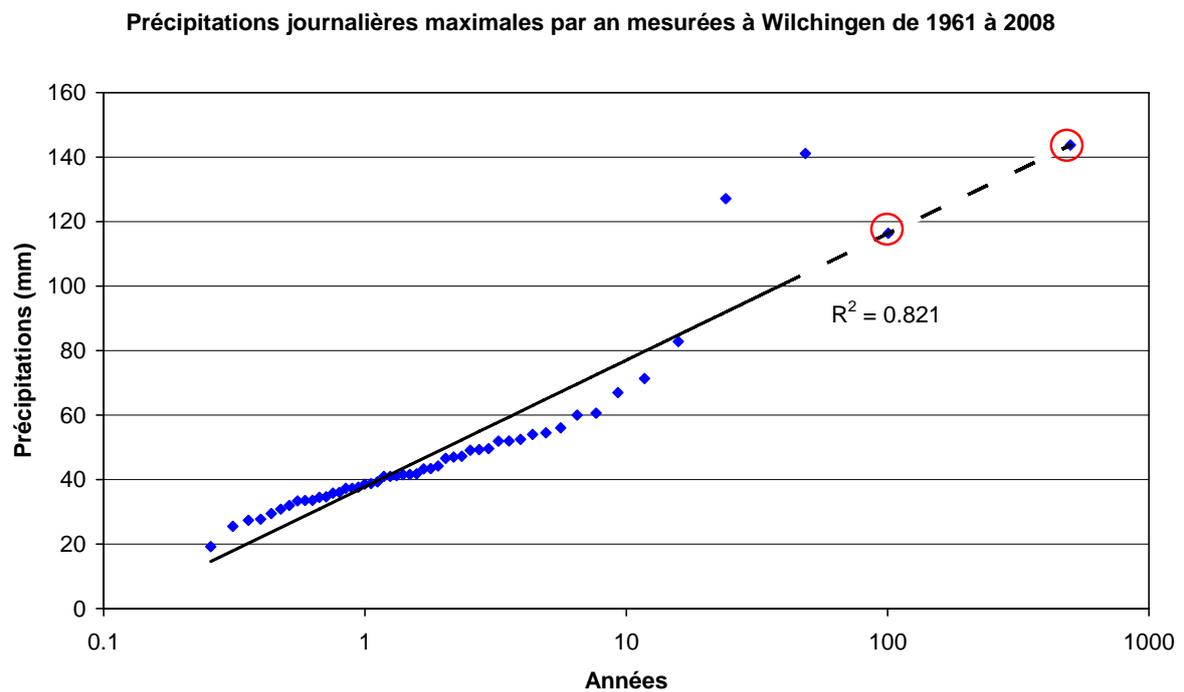
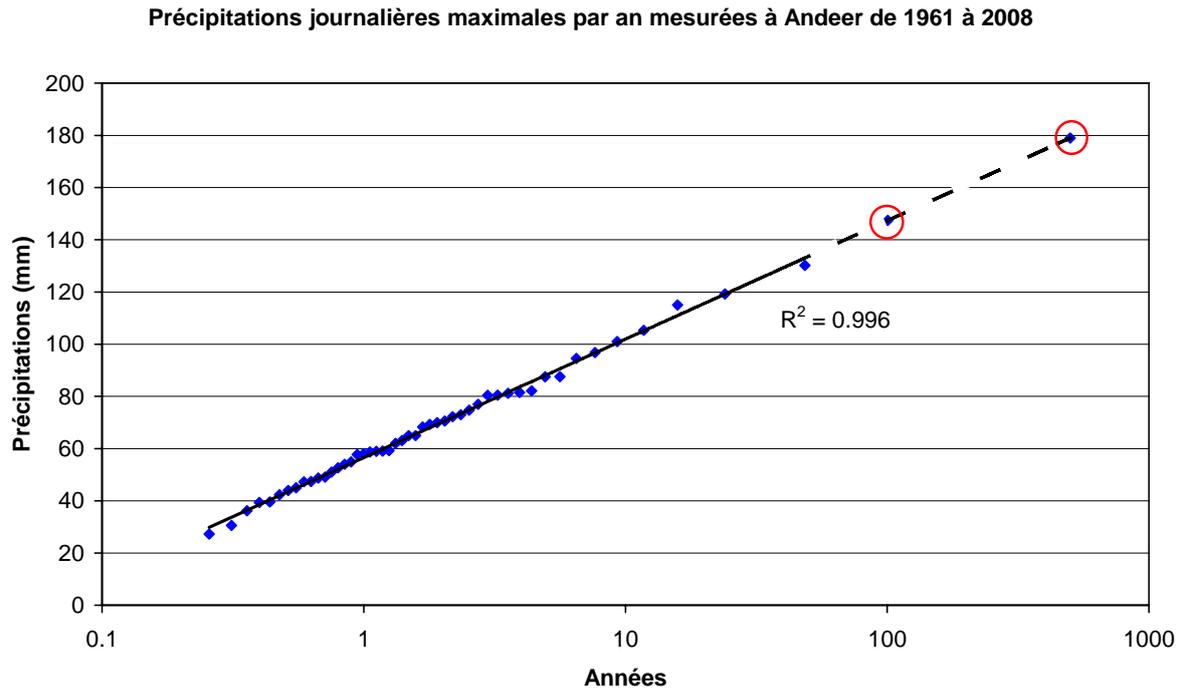


Figure 2 : Précipitations journalières maximales mesurées de 1961 à 2008 à 2 endroits de la Suisse (Andeer et Wilchingen) et droites d'ajustement de la loi de Gumbel. Les symboles entourés d'un cercle correspondent aux précipitations journalières centennales et cincennales (tout à droite) estimées en prolongeant la droite d'ajustement

Coefficients R^2	Fréquence d'apparition	Fréquence cumulée
0.95 - 1	78.1%	78.1%
0.9 - 0.95	15.2%	93.3%
0.85 - 0.9	5.8 %	99.1%
0.8 - 0.85	0.9 %	100 %

Tableau 1 : Fréquences d'apparition des différents coefficients R^2 pour les droites d'ajustement de la loi de Gumbel.

Dans près de la moitié des cas (42.6%), comme la station d'Andeer, les précipitations journalières maximales mesurées de 1961 à 2008 restent inférieures aux valeurs estimées par les analyses de Gumbel pour un temps de retour de 50 ans (cf. Tableau 2). Les précipitations journalières maximales mesurées durant cette période de 48 ans dépassent par contre les valeurs estimées par ces analyses pour un temps de retour de 250 et 500 ans dans respectivement 6.9% et 2.3% des stations en Suisse (comme celle de Wilchingen). Elles coïncident généralement avec les stations où les coefficients R^2 sont inférieurs à 0.9. Pour ces stations, les précipitations journalières cinquantennales (et centennales) obtenues à partir de la loi de Gumbel sont plus ou moins fortement sous-estimées comparativement aux valeurs maximales mesurées sur le terrain. Ces stations se rencontrent un peu partout en Suisse tout en étant un peu plus nombreuses dans le quart Nord-Est du pays. Par contre, les analyses de Gumbel permettent d'estimer efficacement les précipitations journalières cinquantennales pour 75% des stations où les précipitations maximales mesurées sur le terrain restent inférieures aux valeurs centennales estimées. Ces estimations sont encore assez bonnes pour 15.5% des stations où les précipitations maximales mesurées se situent entre les précipitations avec un temps de retour de 100 et 250 ans.

	Fréquence d'apparition	Fréquence cumulée
Prec max mes < Prec T 50 ans	42.6 %	42.6 %
Prec T 50 ans > Prec max mes > Prec T 100 ans	32.6%	75.2 %
Prec T 100 ans > Prec max mes > Prec T 250 ans	15.5 %	90.7 %
Prec T 250 ans > Prec max mes > Prec T 500 ans	6.9 %	97.7 %
Prec T 500 ans > Prec max mes > Prec T 1000 ans	2.3 %	100 %

Prec max mes = précipitations journalières maximales mesurées de 1961 à 2008

Prec T 50 ans = précipitations journalières maximales estimées pour un temps de retour T de 50 ans

Tableau 2 : Comparaison entre les précipitations journalières maximales mesurées sur le terrain de 1961 à 2008 et les précipitations journalières estimées pour différents temps de retour.

Les valeurs journalières très élevées observées dans certaines séries pluviométriques en Suisse ne résultent pas d'erreurs de mesures. Elles coïncident avec des épisodes très pluvieux qui ont également provoqué de fortes précipitations dans les stations environnantes, mais avec des valeurs moins extrêmes. De tels épisodes se rencontrent surtout en saison chaude et ils peuvent être renforcés par un effet convectif local susceptible de conduire à des valeurs journalières extrêmes en quelques endroits. De telles valeurs pourraient alors correspondre à un événement extrême avec un temps de retour de 500 ans ou plus qu'on aurait mesuré en quelques endroits du pays à l'intérieur de la série de mesures de 48 ans (1961-2008). Dans ce cas-là, les analyses de Gumbel ne sous-estimeraient pas les précipitations journalières

cincentennales à ces endroits-là, ce qui accroîtrait encore la validité de cette méthode pour leur estimation en Suisse.

Les précipitations journalières cincentennales estimées à partir des mesures in situ pour les périodes 1961-2008 et 1901-1970 ont été comparées entre elles (Tableau 3). Cette comparaison porte uniquement sur 242 stations où les valeurs cincentennales ont été estimées avec la même méthode statistique pour ces 2 périodes, en l'occurrence la loi double exponentielle de Gumbel. Les valeurs cincentennales estimées à partir des mesures pour la période 1961-2008 sont globalement plus élevées de 14% que celles obtenues à partir de la période 1901-1970 pour l'ensemble des 242 stations considérées. Les écarts entre les valeurs cincentennales estimées à partir de ces 2 périodes de mesures varient entre 0 et 30% pour la majorité de ces stations (74%) ; ces écarts dépassent 30% pour 10.3% des stations. Par contre, les valeurs cincentennales estimées à partir des mesures de la période 1961-2008 sont inférieures (de 0 à 20%) à celles obtenues à partir des mesures de la période 1901-1970 pour 15.7% des stations (cf. Tableau 3).

Prec T 500 ans 1961-2008 / 1901-1970	Fréquence d'apparition	Fréquence cumulée
-20 à -10 %	3.3 %	3.3 %
-10 à 0 %	12.4%	15.7 %
0 à 10 %	24.0 %	39.7 %
10 à 20 %	29.3 %	69.0 %
20 à 30 %	20.7 %	89.7 %
30 à 40 %	8.3 %	98.0 %
40 à 50%	1.2 %	99.2 %
50 à 62%	0.8 %	100 %

Tableau 3 : Comparaison entre les précipitations journalières cincentennales estimées à partir des mesures pour la période 1901-1970 et celles pour la période 1961-2008 (= Prec T 500 ans 1961-2008 / 1901-1970).

Pour 31% des stations, les valeurs journalières cincentennales extrapolées à partir des mesures pour la période 1901-1970 se réduisent à des valeurs centennales (ou à un temps de retour encore plus bas) pour les séries de mesures 1961-2008. Ceci confirme que les valeurs extrêmes des précipitations tendent à augmenter durant le 20^{ème} siècle et qu'elles pourraient remettre en cause le dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues dans certaines régions de Suisse.

La Figure 3 présente la carte des précipitations journalières cincentennales extrapolées à partir de la loi de Gumbel et des mesures effectuées de 1961 à 2008. Elles atteignent dans la plupart des régions de Suisse des valeurs un peu plus élevées que celles obtenues à partir des mesures faites de 1901 à 1970 (cf. Figure 1), sauf dans un quart Nord-Est où les précipitations journalières cincentennales avaient été extrapolées par le WSL à partir de la loi log normale. Comme mentionné plus haut, les estimations à partir de cette loi aboutissent à des valeurs cincentennales plus élevées (de 27 à 43%) que celle de Gumbel.

La Figure 3 montre que les précipitations extrêmes atteignent des valeurs sensiblement plus élevées au Sud des Alpes (jusqu'à 560 mm au Centovalli), car ce versant est très exposé aux afflux d'air doux et humide de la Méditerranée qui peuvent provoquer des précipitations abondantes en été et en automne par effet de barrage. Le versant Nord des Alpes peut également subir des effets de barrage très prononcés en cas d'afflux d'air humide d'Ouest à

Nord-Est, mais les précipitations restent moins abondantes (jusqu'à 240 mm dans les Préalpes centrales et orientales) sur ce versant qu'au Sud des Alpes, car les masses d'air venant alors de l'Atlantique ou de la Mer du Nord sont moins chaudes que l'air méditerranéen et elles contiennent par conséquent moins de vapeur d'eau. En outre, elles parcourent une plus grande distance sur les terres avant d'arriver en Suisse. Pour les 2 versants des Alpes, les précipitations journalières les plus extrêmes se rencontrent avec une situation de barrage active et la présence d'une dépression (goutte froide) ou d'un front froid stationnant près ou sur les Alpes qui favorise une forte convection en saison chaude et renforce encore l'effet de barrage.

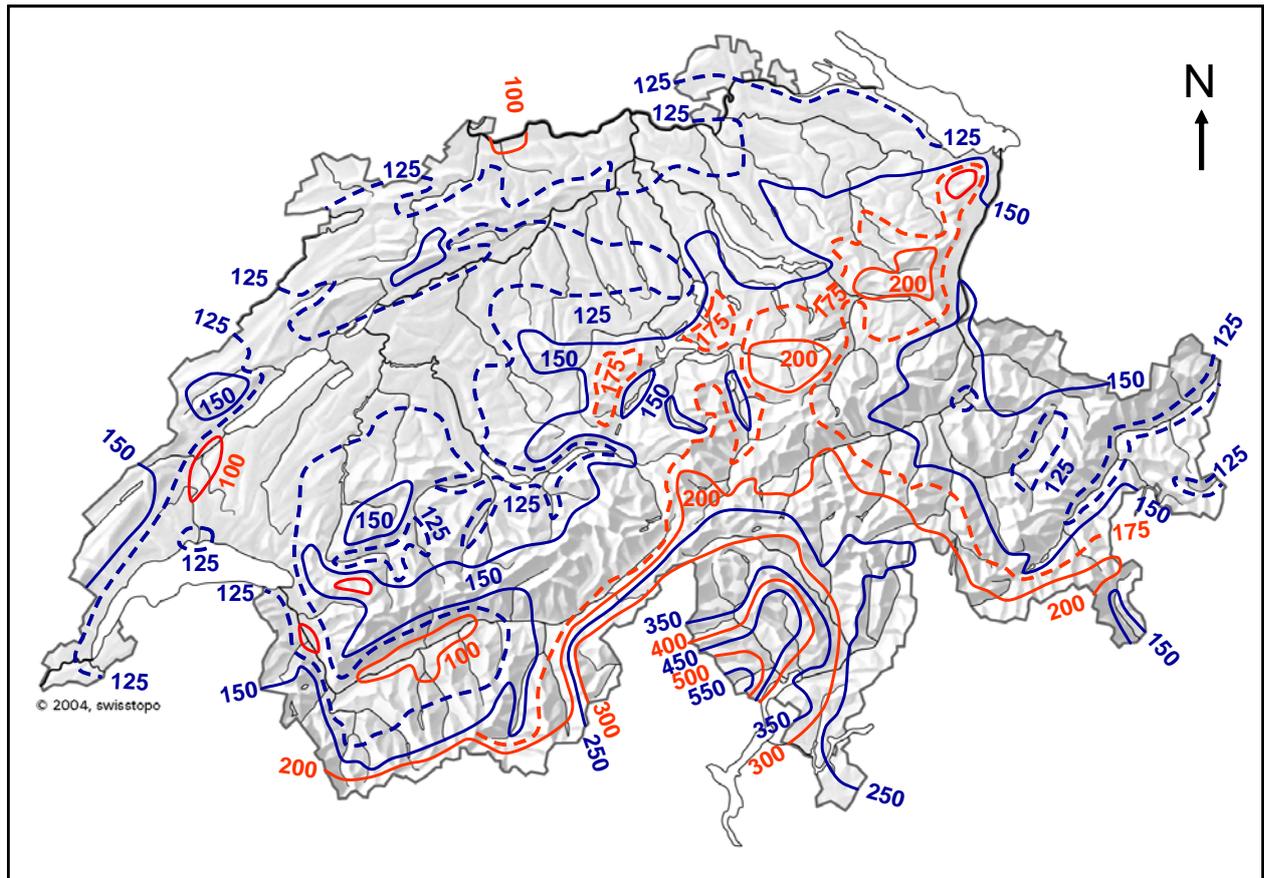


Figure 3 : Précipitations journalières (24 heures) maximales extrapolées pour une période de retour de 500 ans à partir des mesures in situ faites sur une période de 48 ans (1961-2008).

Les analyses de Gumbel sur des séries de mesures pluviométriques d'une cinquantaine d'années permettent d'estimer efficacement les précipitations journalières extrêmes avec un temps de retour de 500 ans pour la plupart des stations en Suisse. Mais ces analyses ne donnent une information précise de ce paramètre que sur le lieu de la mesure, même si on peut ensuite interpoler les valeurs d'un point de mesure à l'autre. Or, les précipitations varient fortement à l'échelle régionale et locale pour un épisode donné à l'intérieur d'un bassin-versant. Il est nécessaire de bien connaître ces variations spatiales pour calculer avec précision les crues et les risques d'inondations d'un cours d'eau pour un épisode critique. Le réseau pluviométrique en service en Suisse est encore trop lâche pour bien prendre en compte ces variations spatiales dans une topographie accidentée. Il convient pour cela de recourir à des modélisations tridimensionnelles des écoulements et des précipitations à une échelle aussi fine que possible pour reproduire ces variations spatiales de la pluviométrie extrême.

D'autre part, avec l'augmentation des fortes précipitations liées au réchauffement du climat, la prise en compte des valeurs de précipitations pour un temps de retour de 500 ans n'est peut-être plus suffisante pour dimensionner un ouvrage de protection contre les crues. Par exemple, les intempéries qui avaient dévasté la ville de Brig en septembre 1993 avaient été considérées comme un événement tout à fait exceptionnel d'un temps de retour estimé à 500 ans sur la base des mesures pluviométriques disponibles de 1901 à 1993. Or, les intempéries survenues 7 ans après en octobre 2000 en Valais avaient généré des précipitations environ 1 fois et demie plus importantes dans le Haut-Valais qu'en septembre 1993. Le temps de retour d'un tel événement a été estimé à au moins 1000 ans en certains endroits du Haut-Valais comme Binn sur la base des mesures disponibles de 1901 à 2000.

Dans ces conditions, il convient d'estimer les précipitations extrêmes pour un temps de retour plus long que 500 ou 1000 ans, afin de calculer ensuite une crue extrême pour un bassin-versant. Un des moyens consiste alors à rechercher les précipitations maximales probables (PMP) comme recommandé par l'OMM (1986) avec une durée de retour de près de 10'000 ans. Cette recherche a été effectuée pour l'ensemble de la Suisse à l'aide de modélisations.

3. Notions de base sur les précipitations extrêmes

3.1 Types de précipitations extrêmes

Il existe 4 types de précipitations susceptibles de générer des hauteurs d'eau importantes, à savoir les précipitations convectives, cycloniques, frontales et orographiques. Les premières résultent de la convection c'est-à-dire d'ascendances d'air chaud au-dessus de surfaces bien chauffées par le soleil qu'on rencontre notamment en saison chaude dans nos régions par vent faible. En s'élevant, l'air chaud se refroidit et devient saturé à un certain niveau, ce qui favorise la condensation de la vapeur d'eau et la formation de nuages. Si l'air est chaud et humide au départ, on observe alors le développement de gros nuages de convection et d'orages qui déclenchent des précipitations très intenses, mais sur une durée relativement courte et sur une surface assez restreinte.

Les précipitations d'origine cyclonique se rencontrent à l'intérieur d'une dépression lorsque les masses d'air humides convergent à l'intérieur d'une dépression et qu'elles doivent s'élever. On peut alors observer des précipitations torrentielles à l'intérieur des cyclones tropicaux dans les régions tropicales. Les précipitations frontales sont associées à un front lorsque la rencontre de 2 masses d'air avec des températures différentes aboutit au soulèvement de l'air chaud plus léger. Ce soulèvement est plus faible dans un front chaud et il aboutit à la formation de nuages en couches (strates) qui vont générer des précipitations durables, mais pas très intenses. Le soulèvement de l'air chaud est plus important à l'avant d'un front froid et il entraîne la formation de gros nuages de convection (cumulonimbus) qui vont déclencher des précipitations intenses, mais tombant sous forme d'averses.

Les précipitations d'origine orographique se déclenchent lorsqu'un air humide doit escalader une chaîne de montagne et que cette dernière provoque une situation de barrage active sur le versant au vent et un effet de foehn sur le versant sous le vent. L'intensité de ces précipitations augmente avec la hauteur des reliefs et la vitesse du vent.

D'une manière générale, les précipitations sont plus abondantes dans un air chaud, car il peut emmagasiner plus de vapeur d'eau avant de devenir saturé et de former des nuages. Elles sont également plus fortes dans un air instable, car il favorise des ascendances plus importantes et un grossissement plus gros des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace dans les nuages.

Selon certains auteurs (Haiden, 1991), la distribution spatiale des précipitations maximales probables est essentiellement déterminée par la composante d'origine orographique pour une topographie accidentée comme les Alpes. Mais la composition convective des précipitations n'est pas négligeable en Suisse, notamment dans les régions moins accidentées.

3.2 Précipitations extrêmes et événements

Les observations faites en Suisse permettent de distinguer 3 grands types d'épisodes pluvieux extrêmes avec des durées bien différentes suivant leurs mécanismes de formation :

- l'orage convectif avec une durée de 10 à 20 minutes,
- une succession d'orages dans un front froid mobile d'une durée de 3 heures à 6 heures,
- les épisodes pluvieux de 36 à 72 heures formés d'une succession de pluies de 3 à 6 heures.

La Figure 4 illustre la forte variabilité dans le temps et dans l'espace de l'intensité de précipitations lors d'un événement pluvieux de 12 heures. On distingue 3 averses successives d'environ 4 heures durant cet événement.

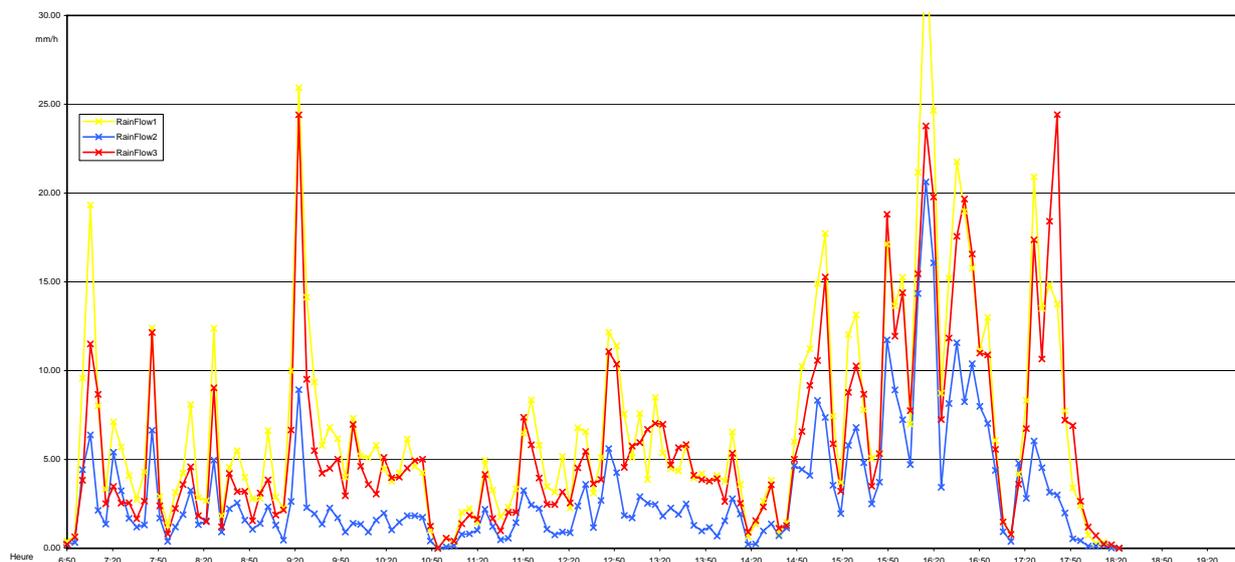


Figure 4 : Mesures des précipitations en continu (moyennes toutes les 5 minutes) lors d'un événement pluvieux par 3 pluviomètres acoustiques situés à 200 m de distance dans le bassin du Matmark (Valais)

Les précipitations maximales probables (PMP) correspondent la hauteur d'eau maximale qui peut tomber pour une certaine durée, sur une surface donnée, à un endroit particulier et pour une certaine période de l'année (Hansen et al., 1982). Lorsque les valeurs de PMP sont utilisées pour le dimensionnement d'un ouvrage hydraulique, la notion de durée associée à la valeur de PMP prend une importance particulière. Les études menées dans le cadre du projet CRUEX ont démontré que les précipitations extrêmes déterminantes pour la crue critique

dépendent du type d'ouvrage et sont associées à une durée critique (CRUEX, 1994). D'où la nécessité de déterminer des PMP pour plusieurs durées comme 1h, 3h, 6h, 9h, 12h et 24h.

3.3 Intensité et durée des précipitations extrêmes

Pour représenter la relation existante entre l'intensité, la durée et la fréquence d'apparition (ou temps de retour) d'une pluie, on a recours aux courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence). On observe que pour un même temps de retour, l'intensité d'une pluie diminue avec la durée. En d'autres termes, l'intensité d'une pluie sera d'autant plus forte que sa durée est courte. En outre, pour une même durée de pluie, une précipitation sera plus intense si son temps de retour est plus grand.

La Figure 5 montre que les courbes IDF sont parallèles entre elles pour différents temps de retour (Zeller et al., 1980). Cette figure correspond au regroupement des analyses statistiques effectuées pour une série de mesures pluviométrique de 70 ans (1901-1970) à la station de Zurich pour des durées moyennes de 10, 20 et 60 minutes puis de 4, 24, 48, et 120 heures et enfin de 1, 3 et 12 mois. Les courbes IDF ont été représentées ici pour des temps de retour (Jährlichkeit) de 2.33, 10, 50 et 100 ans.

Une PMP se caractérise par un temps de retour supérieur à 1'000 ans et on peut admettre que la courbe PMP sera également parallèle aux autres courbes IDF. On peut ainsi se contenter de calculer des PMP pour quelques durées types (par exemple 3 et 24 heures) et extrapoler ensuite les PMP pour d'autres durées à partir de ces courbes IDF (cf. Figure 6).

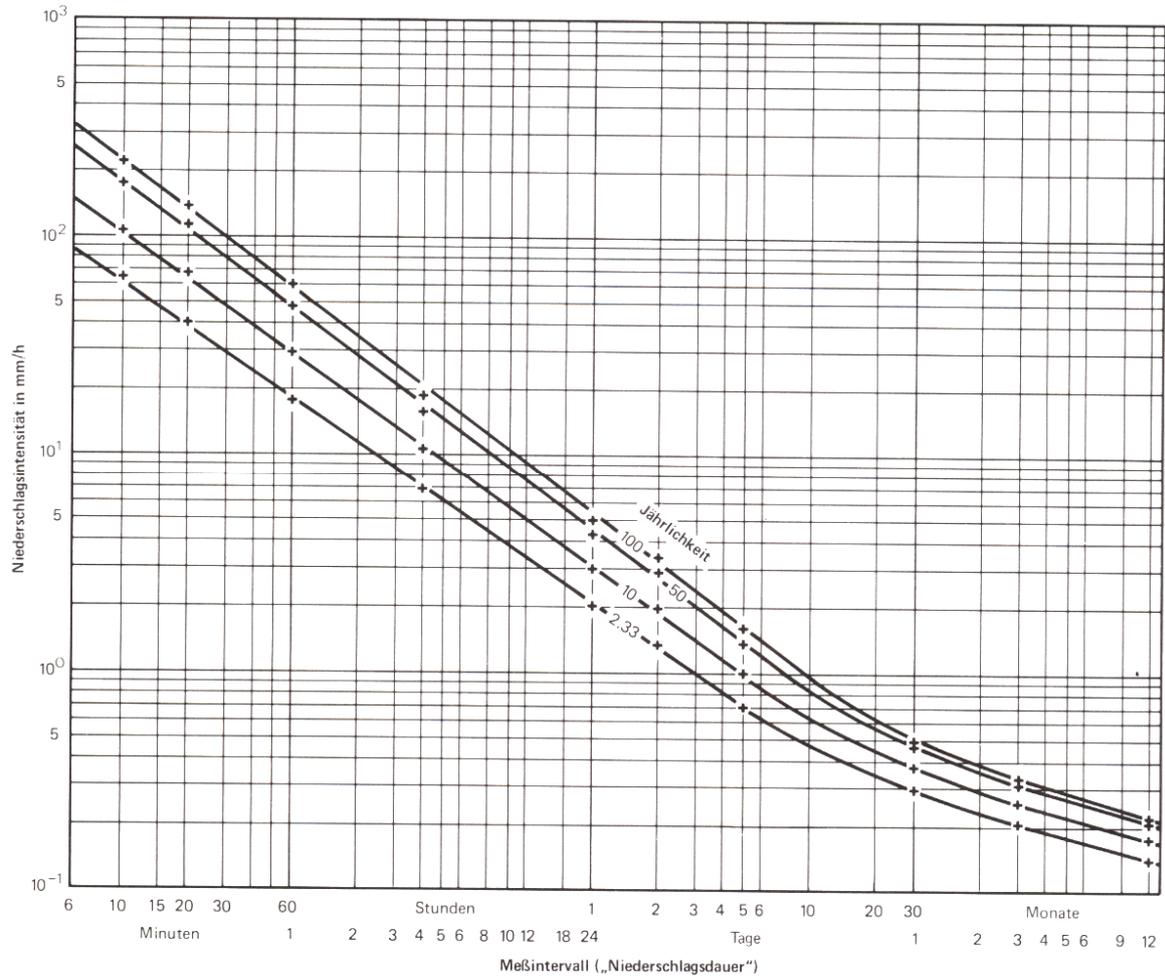


Figure 5 : Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) pour différents temps de retour obtenues à partir des mesures in situ de précipitations effectuées pour une période de 70 ans (1901-70) à la station de Zurich

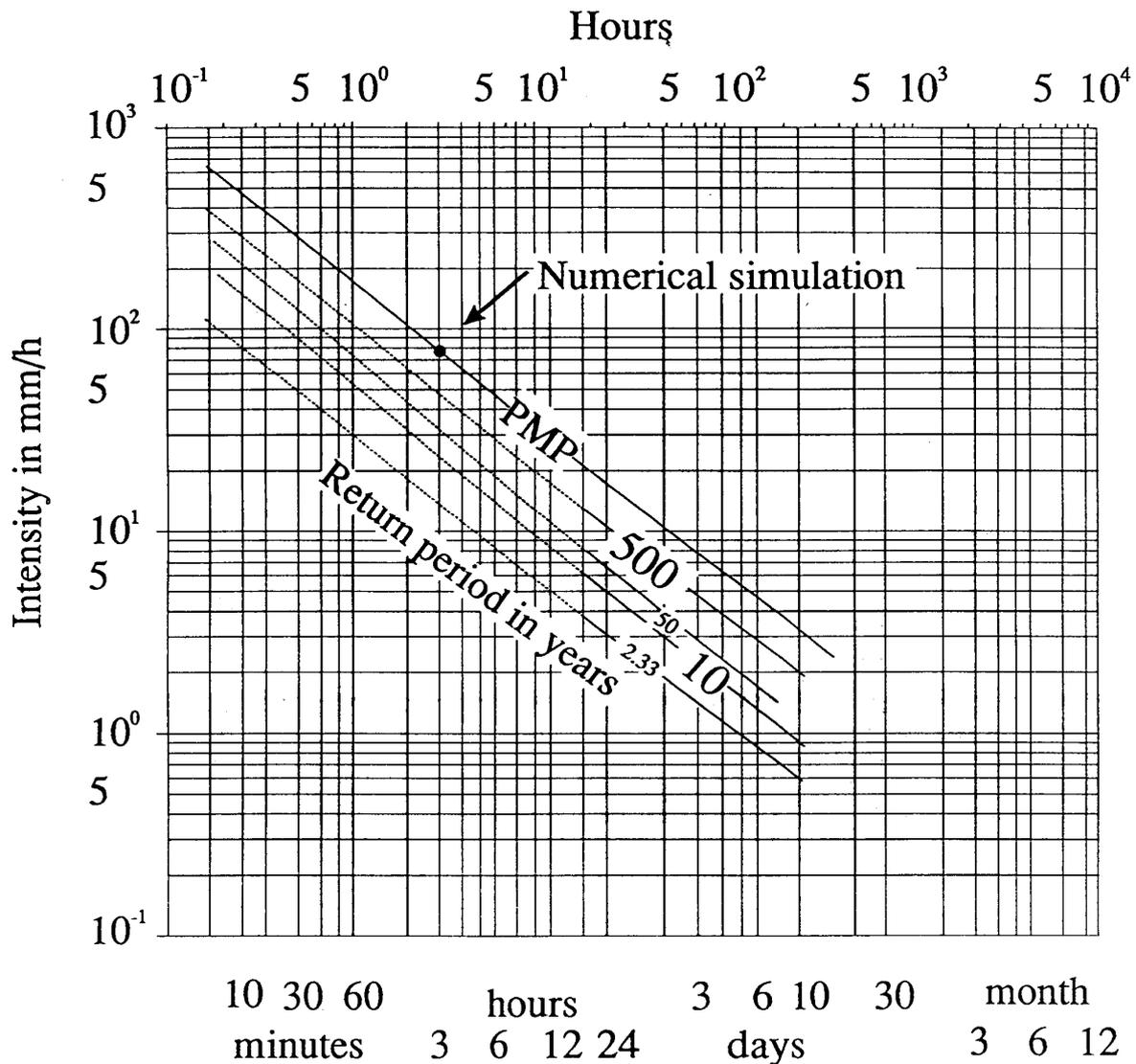


Figure 6 : Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) pour différents temps de retour pour les précipitations

4. Modélisation des PMP pour la Suisse

Un modèle numérique atmosphérique et hydrodynamique en 3 dimensions (3D) a été développé pour la simulation des précipitations orographiques et convectives en terrain accidenté. Le modèle a été réalisé dans la perspective d'estimer les précipitations maximales probables dans le domaine alpin suisse. Les résultats des calculs de précipitations extrêmes orographiques semblent en bonne concordance avec les distributions de précipitations observées. La complexité de flux créés par l'influence des vallées montagneuses sur les vents en particulier la canalisation par les vallées illustre clairement l'avantage des simulations en 3D sur celles en 2D.

4.1 Modélisation des phénomènes à l'origine des précipitations

Pour l'établissement des cartes de précipitations extrêmes en Suisse, les mécanismes de type orographique, convectif et frontal sont pris en compte. La modélisation des précipitations orographiques se base sur la résolution numérique des équations régissant un écoulement atmosphérique stable au-dessus d'une topographie. Pour une situation météorologique donnée, le modèle numérique calcule un champ de vent au-dessus de la topographie à partir des conditions initiales et des conditions de bords, de vent et de température. Ce champ de vent est ensuite utilisé pour résoudre les équations du modèle de pluie (modèle de Kessler, 1969), afin d'obtenir une distribution spatiale d'intensité de précipitations pour une certaine durée. L'appendice A décrit en détail les modèles de vent et de pluie (Kessler) utilisés pour les précipitations orographiques. Les précipitations convectives sont également déterminées à l'aide du modèle numérique des vents avec lequel on calcule des courants ascendants faibles le long des pentes et des vallées qui vont générer des nuages et des pluies de convection au-dessus des reliefs. Ces pluies sont calculées à partir d'une formulation proposée par Haiden (cf. appendice A).

Pour que les simulations soient suffisamment détaillées et réalistes, le modèle météorologique doit avoir la capacité de simuler des flux atmosphériques à l'échelle climatologique méso. Ainsi le modèle sera suffisamment souple pour être appliqué aussi bien à l'échelle régionale méso- β (comme le territoire suisse) qu'à l'échelle locale méso- γ (les échelles des phénomènes météorologiques ont été définies par Orlanski et l'échelle méso- γ correspond à celle des grandes vallées alpines). Les processus atmosphériques sont finalement implémentés avec suffisamment de détails afin de pouvoir non seulement estimer les PMP, mais aussi de simuler des événements particuliers. Le modèle permet donc de répondre à deux exigences à échelles différentes.

4.1.1 Résolution et domaine de calcul pour les PMP en Suisse

Le modèle résout les équations par la méthode des éléments finis sur un domaine de calcul de 320 x 210 km et de hauteur de 25 km couvrant pratiquement la totalité de la Suisse. Le maillage est régulier dans les directions horizontales, avec tout d'abord une résolution horizontale de 5 km. Dans la dimension verticale, la taille des mailles varie avec la hauteur. Les 15 premiers kilomètres de l'atmosphère sont modélisés par 15 niveaux avec des hauteurs de mailles variant de 370 à 500 m pour le premier niveau et des mailles d'environ 2000 m au sommet du domaine.

Les modèles ont tout d'abord calculé les champs de vent et les précipitations extrêmes mesurées sur le terrain pour certains épisodes particuliers, afin de vérifier leur capacité à reproduire ces paramètres dans une topographie aussi accidentée que celle de la Suisse pour ce genre d'événements. Les intempéries de septembre 1993 avec les inondations de Brig ont notamment servi de base pour caler ces modèles (Cruex, 1994).

Une fois calés, les PMP ont été calculées pour une résolution horizontale de 5 km et confrontées avec les mesures disponibles sur le terrain. Cette confrontation a montré qu'une résolution horizontale de 5 km ne suffisait pas pour prendre en compte tous les effets de la topographie de la Suisse sur les précipitations extrêmes (Hertig et al., 2005).

Avec l'augmentation de la puissance de calculs des ordinateurs, les calculs des PMP ont pu être entrepris avec des modèles semblables ayant une résolution horizontale de 2 km et une surface de 350 x 240 km de manière à recouvrir l'ensemble de la Suisse.

Les précipitations extrêmes dépendent de plusieurs paramètres météorologiques, comme la direction et la vitesse du vent, la température et l'humidité de la masse d'air, ainsi que la stabilité de l'air. Les études précédentes ont montré que l'intensité des précipitations d'origine orographique augmente avec la vitesse du vent en altitude et la stabilité de l'air qui renforcent l'effet de barrage sur le versant exposé au vent. Par contre, l'intensité des précipitations convectives s'accroît lorsque la vitesse du vent en altitude et la stabilité de l'air diminuent. Ces conditions favorisent un développement plus important de nuages de convection qui vont ensuite arroser copieusement plus longuement une région donnée avec des vents faibles. Il faut donc dédoubler les modélisations pour les précipitations orographiques et convectives, c'est-à-dire rechercher les précipitations maximales probables pour les précipitations d'origine orographique et les PMP pour les précipitations d'origine convective.

4.1.2 Détermination des PMP d'origine orographique et convective en Suisse

Pour la détermination des PMP d'origine orographique, le modèle a calculé les vents et les précipitations extrêmes pour chaque secteur de vent de 30° de manière à prendre en compte les différences d'exposition des reliefs face aux afflux d'air humide. Pour chaque secteur, les différents paramètres influençant les fortes pluies (vitesse du vent, température, humidité et stabilité de l'air) ont été maximisés pour une durée donnée. Nous avons ainsi retenu une vitesse de vents en altitude élevée, en l'occurrence la vitesse extrême avec une durée de retour de 50 ans pour chaque secteur de 30°, comme recommandé par l'OMM pour le calcul des PMP. Cette vitesse a été obtenue à partir d'une analyse de Gumbel réalisée pour les vents mesurés en altitude par des stations automatiques au Chasseral, à La Dôle et au Moléson. La Figure 7 présente les vitesses cinquantennales ainsi déterminées pour les 12 secteurs de vent en altitude retenus pour la détermination des PMP d'origine orographique. Ces vitesses varient entre 23 m/s pour un vent du Nord et 54 m/s pour un vent d'Ouest.

Nous avons considéré un profil vertical de vent de type Deaves & Harris (profil logarithmique) dans la basse couche se raccordant de manière continue au-dessus de la couche limite à une vitesse constante en altitude. Les études de sensibilité ont démontré qu'un profil de ce type est approprié dans la perspective de maximisation.

Les études menées par MétéoSuisse ont montré que les précipitations abondantes d'origine essentiellement orographique en Suisse se produisent avec un refroidissement moyen de l'air de 0.55°C par 100 m, soit une atmosphère assez stable, ainsi qu'avec un air saturé sur l'ensemble de la troposphère. Nous avons retenu ces caractéristiques de la troposphère pour la détermination des PMP, ainsi qu'une température au sol de 20°C, car les précipitations les plus abondantes se produisent en saison chaude dans nos régions.

Pour chaque pixel du modèle, la PMP d'origine orographique correspond à la valeur des précipitations la plus élevée obtenue pour les 12 secteurs de vent étudiés. Cela signifie que cette PMP peut se rencontrer pour des secteurs de vent très différents suivant l'endroit et qu'elle ne peut pas se produire simultanément sur l'ensemble de la Suisse pour une même

situation météorologique critique. Il convient d'en tenir compte pour le calcul des crues extrêmes dans un bassin-versant.

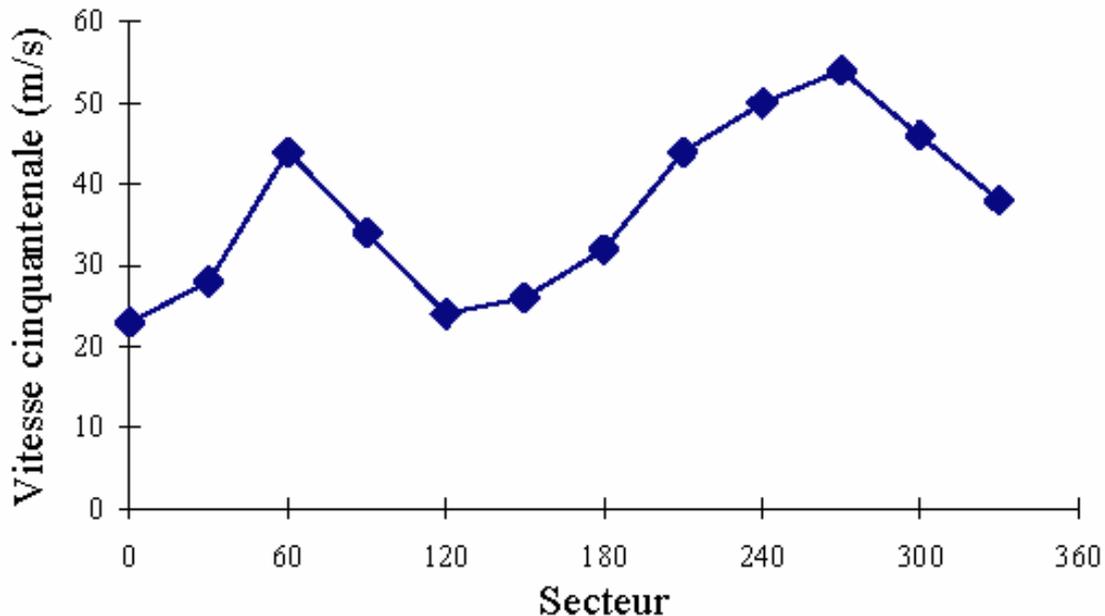


Figure 7 : Vitesse des vents cinquantennales extrapolées à partir des vitesses du vent mesurées au Chasseral, à La Dôle et au Moléson sur une période de 20 ans (1981-2001)

Dans un 2^{ème} temps, les PMP d'origine convective ont été déterminées pour des ascendances d'air chaud et des courants remontant les pentes et les vallées avec des vents en altitude faibles (cf. Figure 8). Ces pluies ont été calculées à l'aide d'une paramétrisation de la convection basée sur les formules de Haiden (cf. appendice A).

Pour chaque pixel du modèle, on retient ensuite la valeur la plus élevée obtenue entre les PMP d'origine orographique et la PMP d'origine convective comme étant la PMP finale. Celle-ci peut donc avoir une origine convective ou une origine orographique selon les régions de la Suisse.

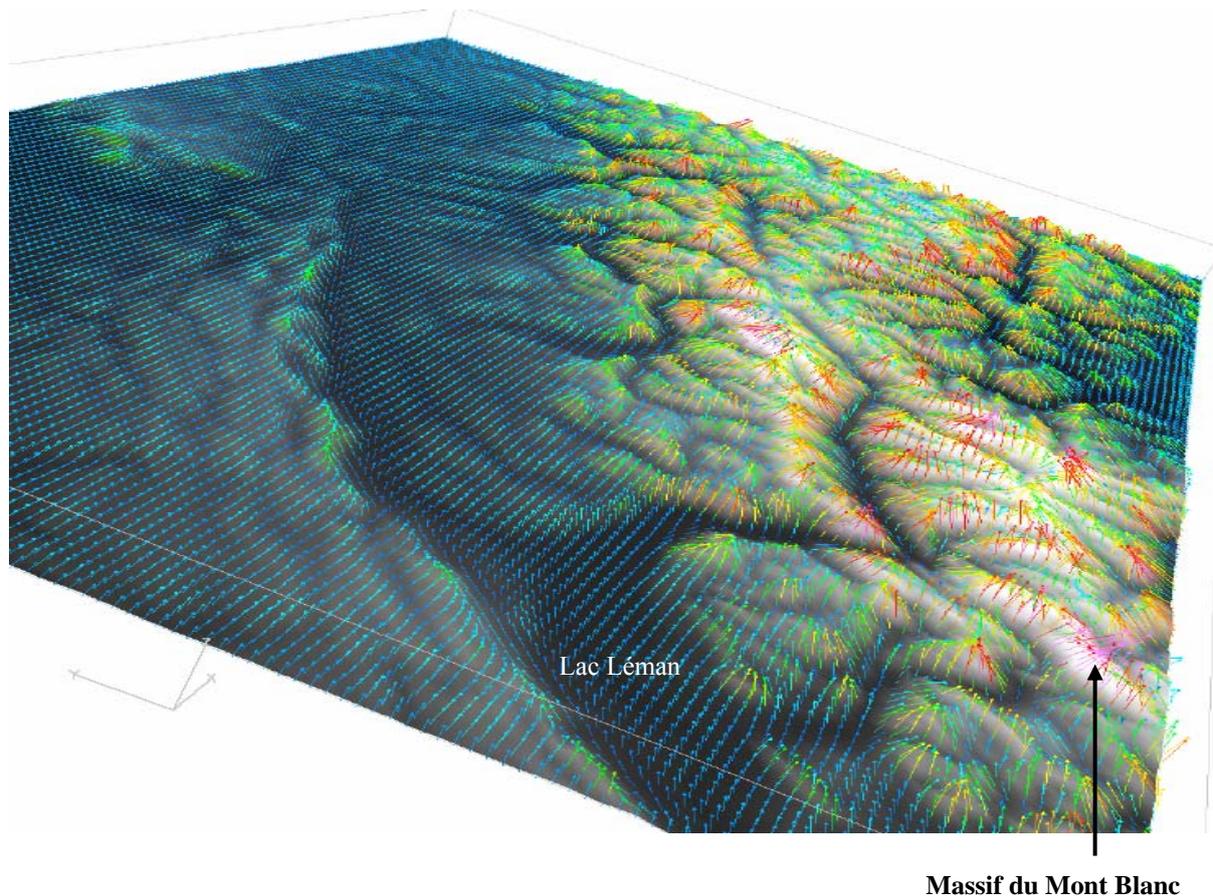


Figure 8 : Courants ascendants calculés par le modèle météorologique à une échelle horizontale de 2 km.

4.1.3 Durée des PMP calculées

Les PMP ont été calculées pour des durées de 3 heures et de 24 heures : cette dernière période est celle pour laquelle on dispose le plus de mesures in situ sur le terrain. Le réseau climatique de MétéoSuisse comprend 72 stations automatiques mesurant en continu depuis la fin des années 1970 plusieurs paramètres météorologiques avec une valeur moyennée toutes les 10 minutes. A cela s'ajoutent environ 500 stations pluviométriques qui relèvent les hauteurs d'eau une fois par jour à 6 UTC. Plus de 100 stations pluviométriques sont en service depuis plus de 100 ans et environ 300 stations ont fonctionné de 1901 à 1970 et de 1961 jusqu'à nos jours.

Nous avons considéré que pour une durée de 3h, le scénario maximisant consistait pour la contribution orographique en un front arrivant à une vitesse très élevée (vitesse cinquantennale : cf. Figure 7) et pour la partie convective à trois orages convectifs orographiques d'une durée de 20 minutes chacun.

Pour l'établissement des PMP d'une durée de 24 heures, un air très humide sur l'ensemble de la troposphère durant cet intervalle de temps nécessite la présence d'une dépression ou d'un front \pm stationnaire sur les Alpes ou encore un afflux d'air très humide depuis une mer chaude, en l'occurrence la Méditerranée. Un autre scénario maximisant possible pour les PMP de 24 heures consiste, pour la contribution orographique, en un front de 2'000 km de long qui

traverse la Suisse dans le sens de la longueur. Pour que l'intégralité du front traverse les 350 km du pays en 24h, sa vitesse devra être de 30m/s.

Des cartes PMP ont été ensuite extrapolées pour des durées de 1h, 6h, 9h et 12h à partir de celles calculées pour des durées de 3h et 24h sur la base des courbes IDF.

4.2 Carte des précipitations extrêmes (PMP) pour la Suisse

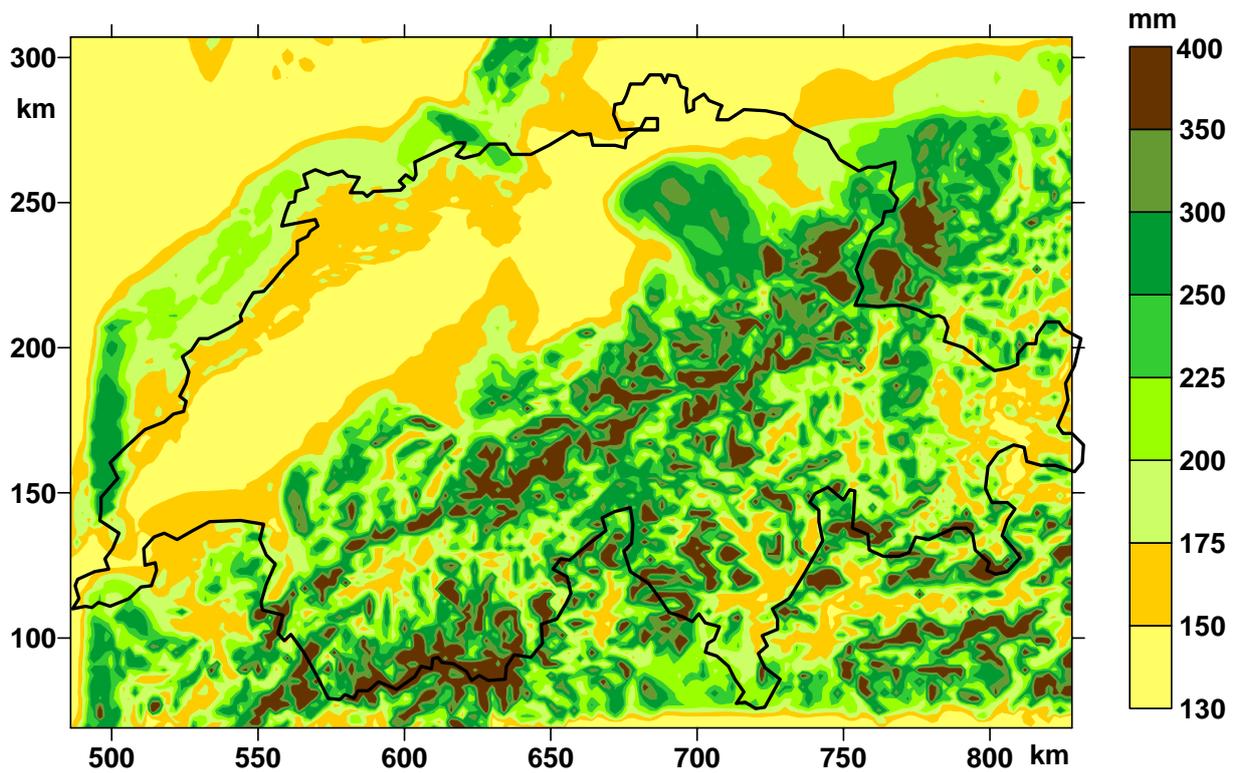
Dans ce rapport, seules les cartes des PMP pour des durées de 3 et 24 heures sont présentées (Figure 9). En plus des cartes des PMP finales pour tous les secteurs de vent confondus, des cartes sectorielles ont été établies pour les durées de 3 et 24 heures. Les calculs des crues extrêmes (PMF) pour un bassin-versant ne peuvent pas se baser sur les cartes des PMP finales tous secteurs confondus. En effet, les précipitations les plus extrêmes (PMP) peuvent se rencontrer pour des secteurs de vent très différents à l'intérieur d'un même bassin-versant, notamment pour ceux situés près de la ligne de faite principale des Alpes. Or, une situation météorologique ne peut pas produire des précipitations extrêmes simultanément pour un vent du Nord et un vent du Sud. Un calcul réaliste des crues extrêmes nécessite de connaître les précipitations extrêmes tombant simultanément pour une situation météorologique critique durant 3 ou 24 heures. Pour une telle situation, la direction générale des vents peut fluctuer de quelques dizaines de degrés, mais pas de 180°.

Pour les précipitations d'origine orographique, les situations les plus critiques au Nord des Alpes se rencontrent avec un afflux d'air humide d'Ouest à Nord-Est provoquant un effet de barrage actif sur le versant nordalpin. Vu le large éventail de directions entre l'Ouest et le Nord-Est, il convient de distinguer 2 grandes situations de barrage : celles avec un vent d'Ouest à Nord-Ouest et celles avec un vent du Nord à Nord-Est. Les Préalpes romandes et le Valais sont en principe davantage exposés aux situations de barrage d'Ouest à Nord-Ouest que celles du Nord à Nord-Est. Au Sud des Alpes, les situations les plus critiques se rencontrent avec un afflux d'air humide du Sud-Est à Sud-Ouest générant un effet de barrage actif sur le versant sudalpin. Les régions alpines proches du Sud des Alpes (Haut Valais, moitié Sud des Grisons) sont également très exposées à ces situations-là. Sur la base de ces constatations, trois cartes sectorielles de précipitations (en plus de la carte finale tous secteurs de vent confondus) seront suffisantes pour reproduire les situations météorologiques les plus critiques pour les crues :

- Une carte pour les secteurs Ouest à Nord-Ouest avec une situation de barrage active au Nord des Alpes,
- Une carte pour les secteurs Nord à Nord-Est avec une situation de barrage active au Nord des Alpes,
- Une carte pour les secteurs Sud-Est à Sud-Ouest avec une situation de barrage active au Sud des Alpes.

La Figure 10 et la Figure 11 présentent les PMP calculées pour ces 3 grands secteurs de vents pour une durée de 24 heures. Les cartes des PMP pour une durée de 3 heures pour ces 3 secteurs de vent ne sont donc pas montrées ici, car elles sont assez semblables à celles de 24 heures.

Carte des précipitations maximales probables (PMP) calculées pour une durée de 3 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km



Carte des précipitations maximales probables (PMP) calculées pour une durée de 24 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km

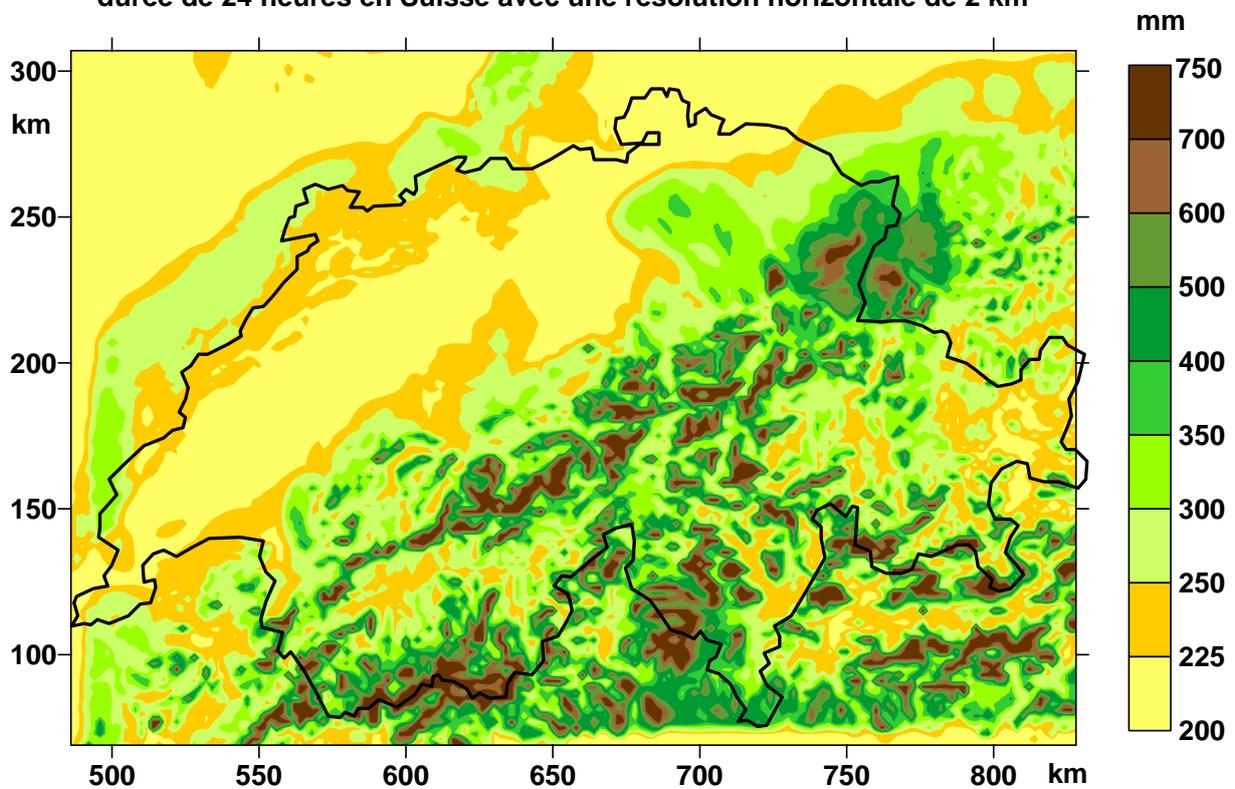


Figure 9 : Carte des précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 3 heures (en haut) et 24 heures (en bas) en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour tous secteurs de vent confondus

La carte des PMP tous secteurs de vent confondus montre que les précipitations peuvent atteindre jusqu'à 400 mm en 3 heures et 750 mm en 24 heures sur les reliefs alpins les plus exposés, soit des valeurs sensiblement plus élevées que celles extrapolées à partir des mesures in situ pour un temps de retour de 500 ans (jusqu'à 560 mm en 24 heures dans le Centovalli). A l'opposé, les PMP tous secteurs de vent confondus ne dépassent pas 150 mm en 3 heures et 200 mm en 24 heures sur le Plateau suisse et dans certaines vallées alpines abritées (Valais, Engadine). Ces valeurs restent néanmoins supérieures à celles extrapolées pour ces régions-là à partir des mesures in situ pour un temps de retour de 500 ans

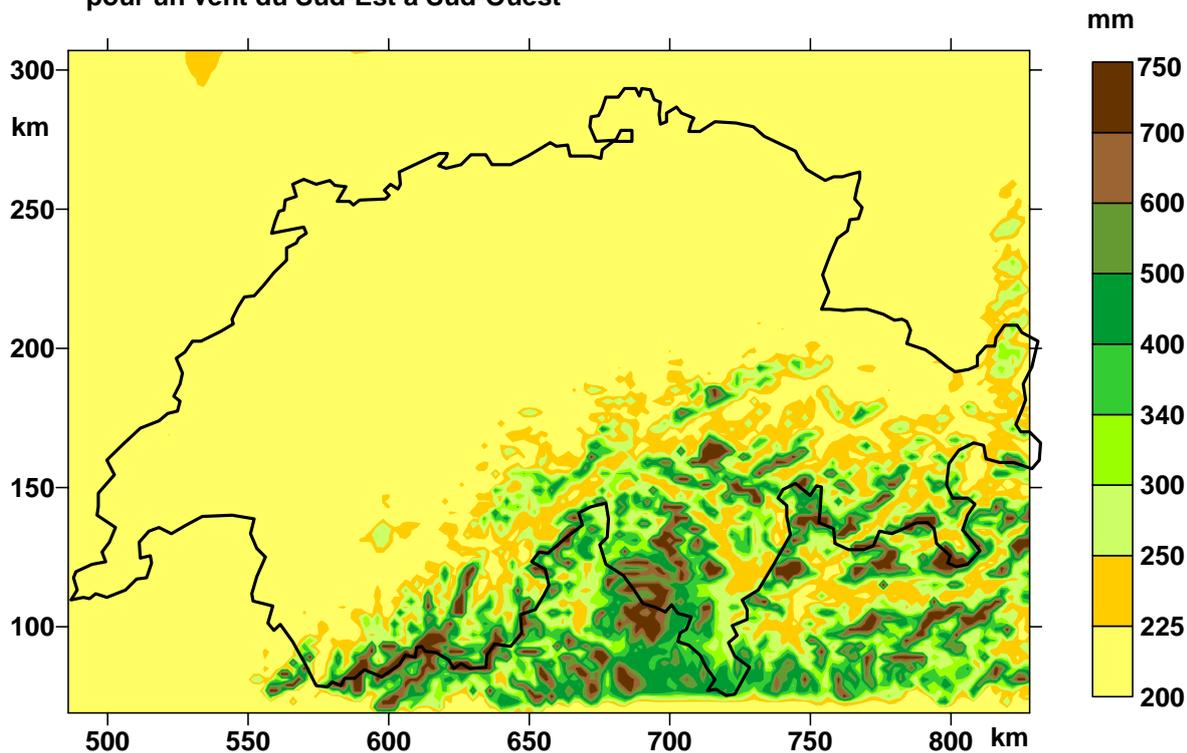
Les valeurs de précipitations très élevées obtenues sur les reliefs alpins peuvent résulter d'approximations dans les modèles. Le modèle de vent semble favoriser le développement d'ondes de reliefs manifestement trop importantes pour certaines situations météorologiques, en particulier celles du Sud-Est à Sud et du Nord-Ouest à Nord avec du foehn du Sud ou du Nord dans les Alpes. Il en résulte des ascendances d'air très puissantes en certains endroits du modèle qu'on ne retrouve en principe pas dans la nature pour ces situations-là. Mais ces endroits sont souvent dépourvus de mesures sur le terrain. De tels effets résultent de la stabilité de l'air qui est un paramètre souvent difficile à reproduire sur les modèles. Le modèle de pluie calcule alors des précipitations d'origine orographique manifestement trop abondantes pour certains reliefs alpins exposés à de telles ascendances. Il a fallu fixer une limite supérieure admissible pour ces précipitations dans ces endroits-là : des seuils de 400 mm et 700 mm ont été retenus comme valeur maximale admissible pour les PMP de 3 heures et de 24 heures calculées par le modèle de pluie en Suisse.

La détermination des PMP se base sur une maximisation de tous les paramètres météorologiques, afin de rechercher le cas le plus critique. Or, les précipitations d'origine orographique sur les reliefs augmentent avec la vitesse du vent, alors que les précipitations d'origine convective seront les plus abondantes avec des courants faibles et des orages ± stationnaires arrosant plus longtemps une région. Il n'est pas possible de prendre simultanément en compte ces 2 effets opposés entre les vents et les précipitations. La contribution orographique des PMP calculée par le modèle est peut-être un peu trop élevée, notamment sur les reliefs, car les calculs ont considéré des vitesses de vent cinquantennales pour chaque secteur. A l'inverse, la contribution convective est probablement un peu faible à cause de vitesses de vents trop élevées retenues dans les calculs. Ceci explique aussi les grandes différences entre les sommets et les vallées ou les dépressions pour les PMP calculées par le modèle qu'on ne retrouve pas de manière aussi marquée dans les mesures in situ (cf. chap. 4.3).

Les cartes pour les secteurs Sud-Est à Sud-Ouest sont à l'origine des PMP les plus élevées au Sud des Alpes par effet de barrage (Figure 10, en haut). Elles débordent dans le Haut Valais et dans le Sud des Grisons, ainsi que sur les crêtes des Alpes bernoises et glaronnaises. Le reste du Nord des Alpes est davantage abrité grâce à un effet de foehn.

Les cartes pour les secteurs Ouest à Nord-Ouest sont à l'origine des PMP les plus élevées au Nord des Alpes par effet de barrage (Figure 10, en bas). Le versant Nord des Alpes et les sommets des Alpes valaisannes sont les plus exposés, alors que le Sud des Alpes est davantage abrité grâce à un effet de foehn. Les vallées du Valais et des Grisons, ainsi que le Plateau suisse sont également moins touchés dans ce genre de situation que les reliefs du versant Nord des Alpes.

Carte des précipitations maximales probables (PMP) calculées pour une durée de 24 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour un vent du Sud-Est à Sud-Ouest



Carte des précipitations maximales probables (PMP) calculées pour une durée de 24 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour un vent d'Ouest à Nord-Ouest

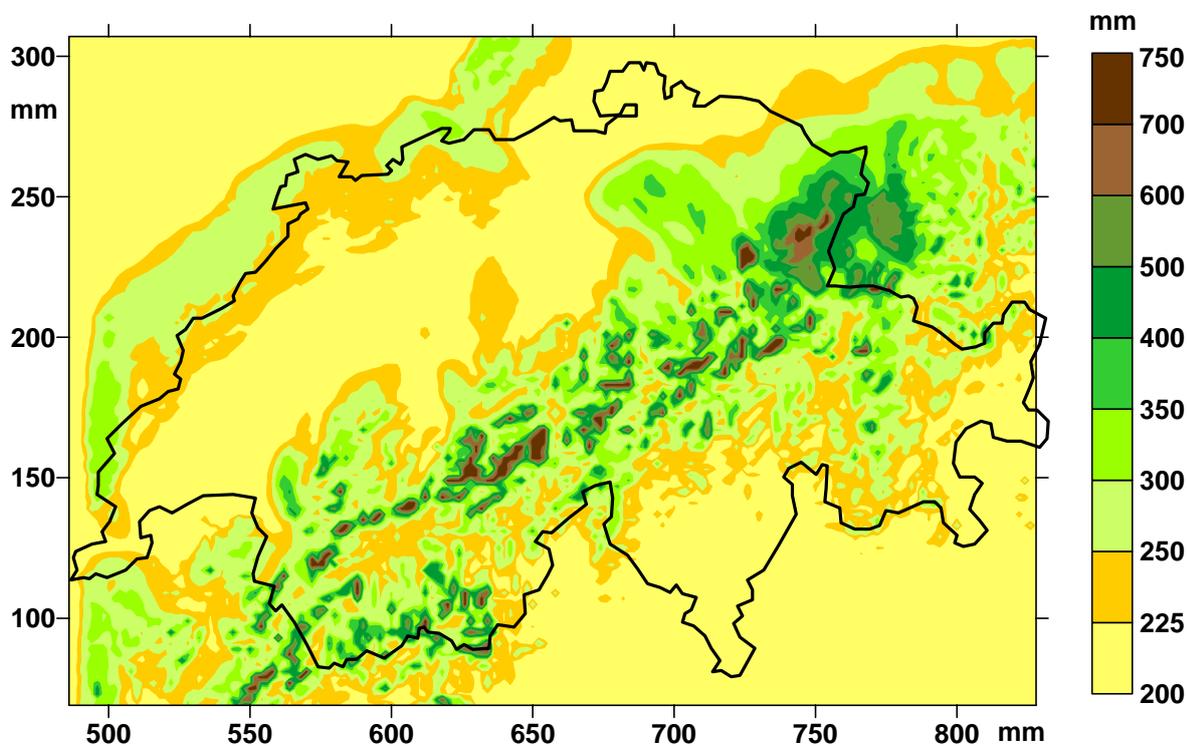


Figure 10 : Carte des précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 24 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour un vent du Sud-Ouest à Sud-Est (en haut) et pour un vent d'Ouest à Nord-Ouest (en bas)

Carte des précipitations maximales probables (PMP) calculées pour une durée de 24 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour un vent du Nord à Nord-Est

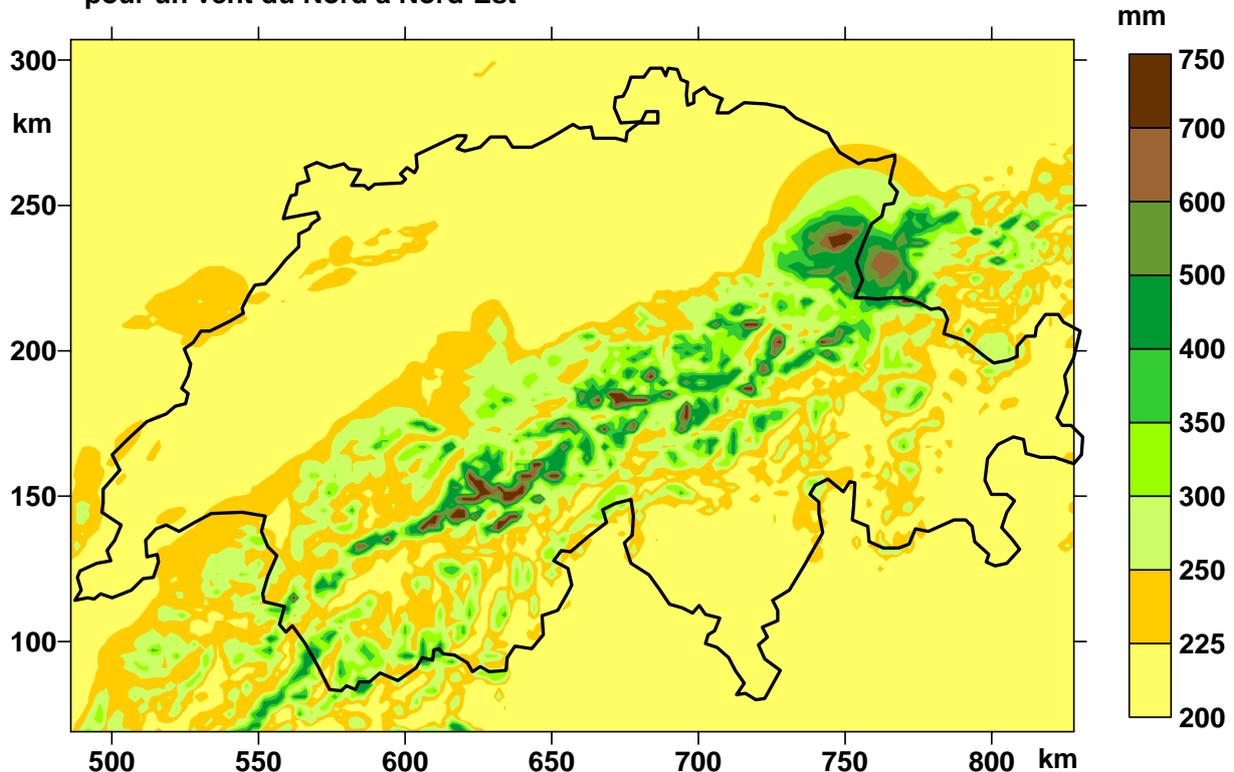


Figure 11 : Carte des précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 24 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour un vent du Sud-Ouest à Sud-Est (en haut) et pour un vent d'Ouest à Nord-Ouest (en bas)

Globalement, les cartes pour les secteurs Nord à Nord-Est (Figure 11) aboutissent à des PMP plus basses que celles pour les secteurs Ouest à Nord-Ouest. Elles sont néanmoins très élevées sur les reliefs du versant Nord des Alpes, alors qu'elles restent plus basses dans les autres régions alpines (Valais, Grisons), sur le Plateau, le Jura et naturellement le Sud des Alpes qui bénéficie à nouveau d'un effet de foehn.

4.3 Validation des cartes des PMP

4.3.1 Validation des cartes PMP pour une durée 24 heures

Les cartes obtenues par la modélisation numérique ont été validées sur la base des précipitations journalières extrapolées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures in situ effectuées par 429 stations pluviométriques et météorologiques de 1961 à 2008 (cf. chap. 2). Les valeurs des PMP calculées par le modèle ont été extraites aux points de ces stations, de manière à pouvoir les comparer avec les hauteurs d'eau extrapolées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures in situ (cf. Figure 12). La Figure 13 présente le rapport entre les PMP calculées par le modèle et les valeurs centennales extrapolées à partir des mesures in situ.

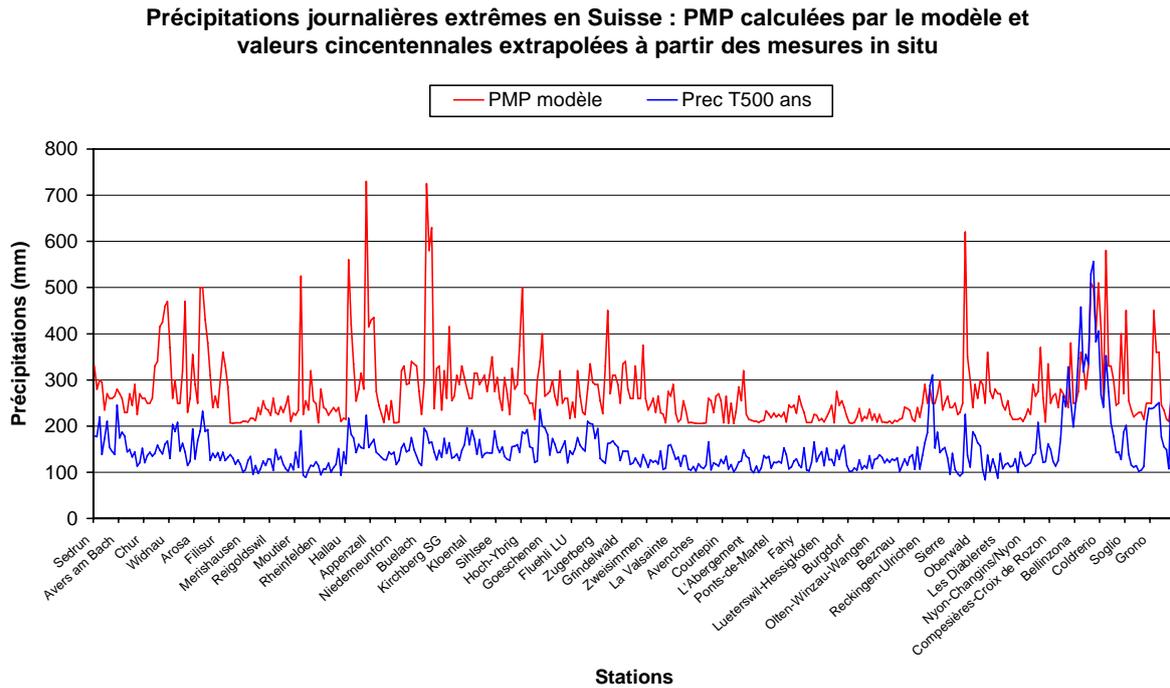


Figure 12 : Précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 24 heures et valeurs maximales journalières (24 heures) extrapolées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures in situ en Suisse de 1961 à 2008

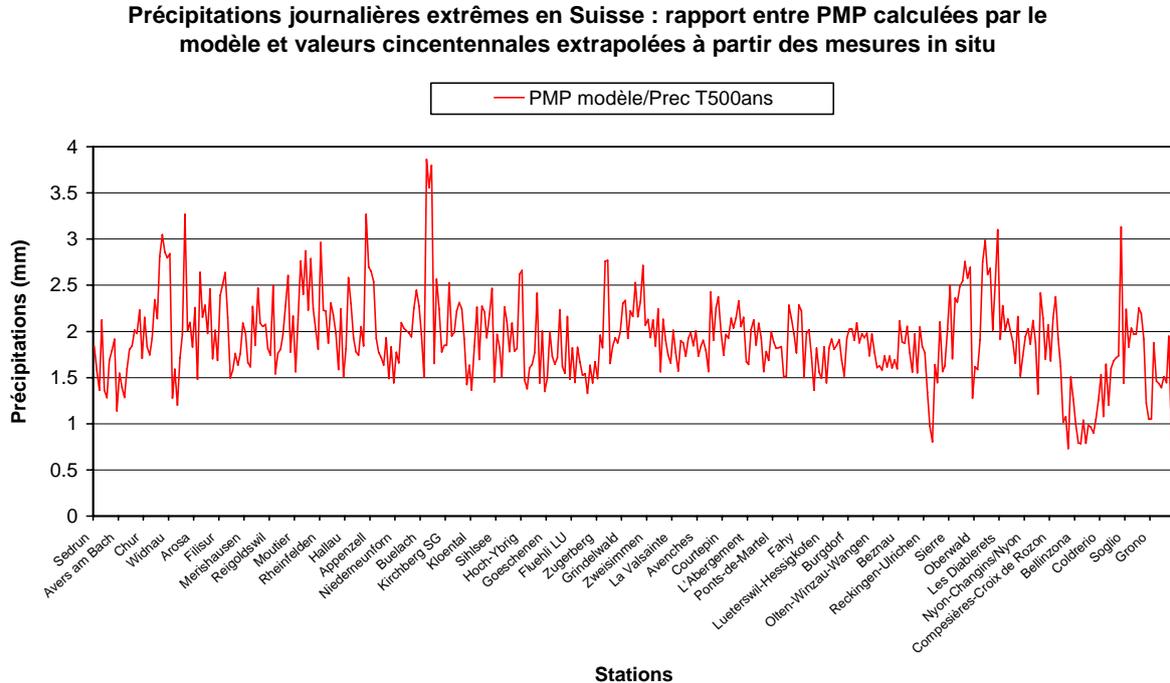


Figure 13 : Rapport entre les précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 24 heures et les valeurs maximales journalières (24 heures) extrapolées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures in situ en Suisse de 1961 à 2008

On constate sur la Figure 12 et la Figure 13 que les PMP sont presque partout plus élevées que les précipitations extrapolées pour une période de retour de 500 ans d'un rapport variant le plus souvent entre 1.1 et 3. On obtient un rapport moyen de 1.9 pour toutes les stations, soit un rapport un peu plus élevé que celui normalement observé (1.5) entre des précipitations avec une période de retour supérieure à 10'000 ans (PMP) et des précipitations cinquentennales. Cela signifie que les PMP calculées par le modèle pour une durée de 24 heures sont globalement un peu trop élevées par rapport aux valeurs cinquentennales extrapolées à partir des mesures in situ. Le modèle exagère les précipitations extrêmes en quelques endroits du pays, notamment là où les PMP calculées sont au moins 3 fois plus élevées que les valeurs cinquentennales extrapolées. Ces endroits apparaissent de manière isolée au Nord et dans les Alpes, notamment sur les reliefs d'Appenzell (Saentis), ainsi que dans les régions de Vaduz et de Bâle.

Le modèle tend également à sous-estimer les précipitations extrêmes en d'autres endroits du pays, là où le rapport entre les PMP calculées et les valeurs cinquentennales extrapolées est inférieur à 1.2. Ces endroits apparaissent au Sud des Alpes (Tessin) et dans la région du Simplon qui sont les plus exposés à de fortes précipitations en Suisse d'après les mesures in situ.

Ces approximations peuvent provenir du fait qu'une résolution horizontale de 2 km par le modèle est encore trop élevée pour reproduire certains effets de la topographie locale sur la pluviométrie extrême, notamment dans des vallées encaissées. Des effets de bord peuvent également fausser les résultats sur le modèle, en particulier sur les Alpes Valaisannes et dans l'Est des Grisons. Le modèle sous-estime peut-être aussi les précipitations d'origine convective, notamment au Sud des Alpes. Par contre, il tend à surestimer les précipitations d'origine orographique stable sur les reliefs alpins, comme mentionné plus haut.

4.3.2 Validation des cartes PMP pour une durée de 3 heures

Comme pour les PMP 24 heures, les valeurs de précipitations calculées par le modèle pour une durée de 3 heures ont été extraites aux points des stations pluviométriques (ou météorologiques), de manière à pouvoir les comparer avec les hauteurs d'eau trihoraires extrapolées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures in situ (cf. Figure 14). Ces extrapolations ont été faites par le WSL sur la base des mesures in situ de 1901 à 1970 ou 1987. Elles n'ont pas été réactualisées pour les mesures in situ de 1961 à 2008 comme pour les précipitations journalières, faute de données suffisantes pour les pluies trihoraires. La Figure 15 présente les rapports entre les PMP calculées par le modèle pour une durée de 3 heures et les valeurs trihoraires cinquentennales extrapolées à partir des mesures in situ.

Ces rapports pour les précipitations extrêmes trihoraires fluctuent davantage d'une station à l'autre que ceux observés pour les précipitations extrêmes journalières (24 heures). On obtient un rapport moyen de 2.2 pour toutes les stations entre les PMP 3 heures du modèle et les valeurs maximales trihoraires extrapolées pour un temps de retour de 500 ans. Ce rapport est un peu plus élevé que celui obtenu pour les précipitations extrêmes journalières.

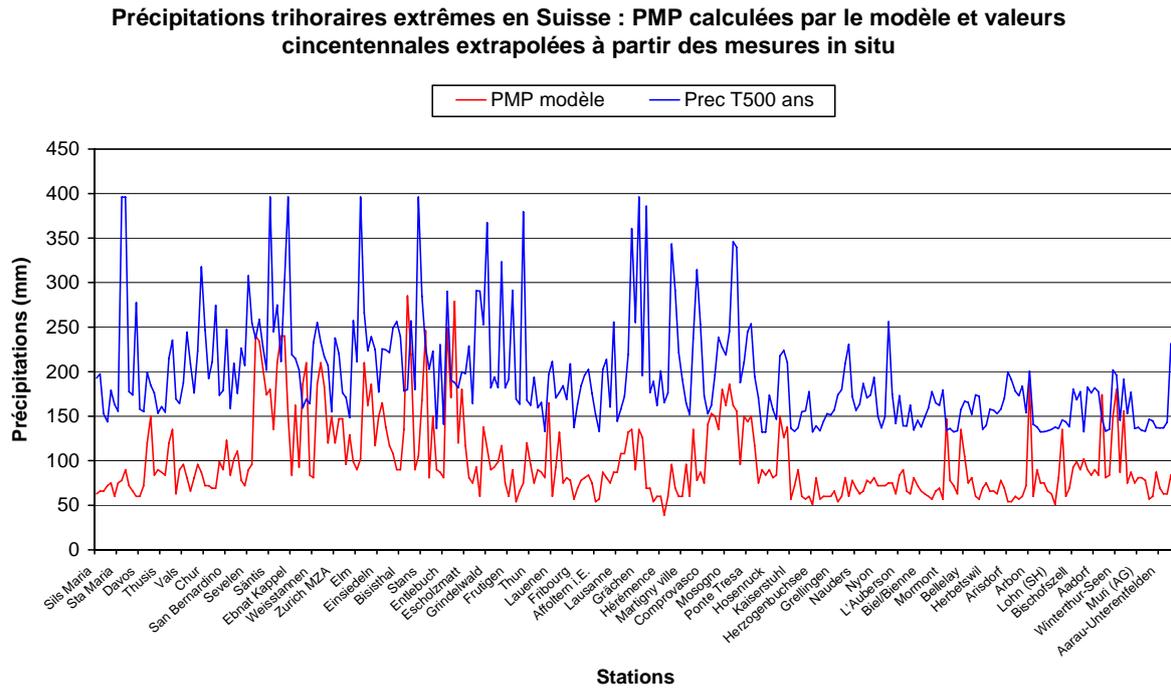


Figure 14 : Précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 3 heures et valeurs maximales trihoraires extrapolées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures in situ en Suisse de 1901 à 1970

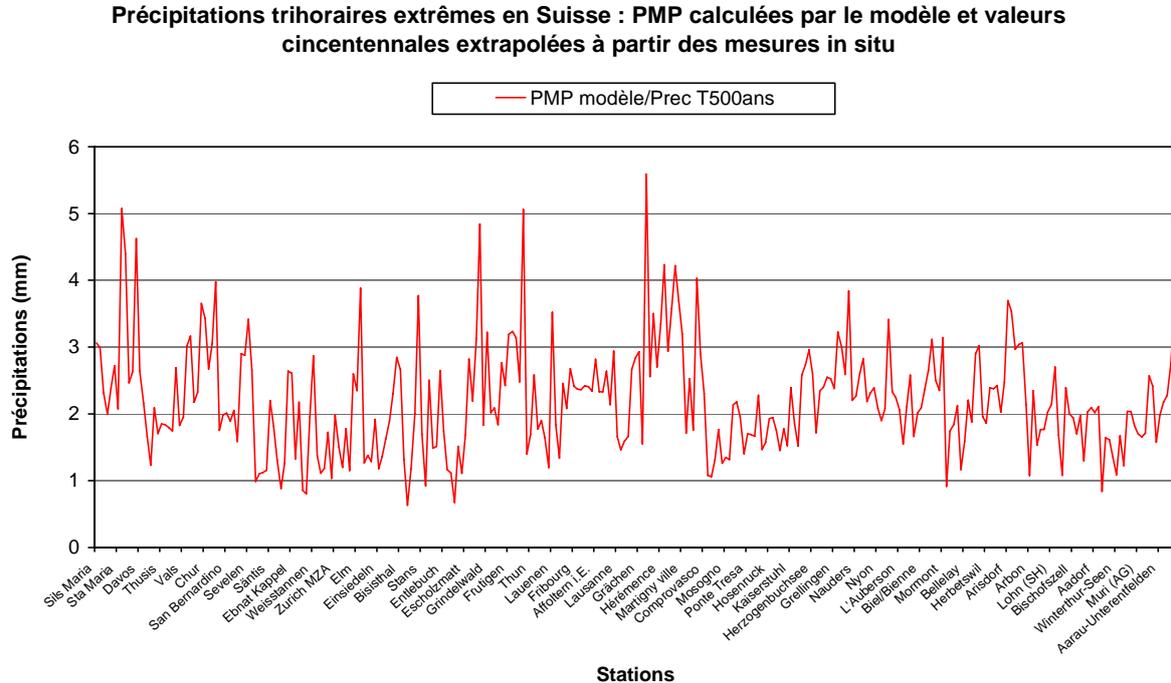


Figure 15 : Rapport entre les précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 3 heures et les valeurs maximales trihoraires extrapolées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures in situ en Suisse de 1901 à 1970

Le modèle tend également à exagérer les précipitations trihoraires extrêmes en quelques endroits du pays. Ils sont généralement identiques à ceux observés pour les PMP 24 heures (excepté la région du Saentis), mais une telle exagération apparaît aussi en d'autres endroits isolés dans le Jura, l'Oberland bernois, le Valais et les Grisons : à ces endroits-là, les PMP 3 heures calculées sont également au moins 3 fois plus élevées que les valeurs trihoraires cincentennales extrapolées.

Le modèle tend aussi à sous-estimer les précipitations trihoraires extrêmes en d'autres endroits du pays, là où le rapport entre les PMP calculées et les valeurs cincentennales extrapolées est inférieur à 1.2. Ces cas se rencontrent au Sud des Alpes comme pour les PMP 24 heures, mais également dans les régions du Rigi, du Saentis et du Pilate, ainsi que dans quelques endroits isolés du Jura et du Plateau.

Globalement, les résultats sont moins bons pour les PMP 3 heures que pour les PMP 24 heures, mais on dispose aussi de moins de mesures in situ précises pour les précipitations trihoraires. Le modèle tend à surestimer et sous-estimer les précipitations extrêmes trihoraires à davantage d'endroits que les précipitations extrêmes journalières (24 heures). Les causes de ces approximations sont identiques à celles énoncées plus haut pour les PMP 24 heures.

Malgré ces approximations, ces cartes de PMP calculées pour un degré de résolution horizontale de 2 km peuvent être utilisées pour déterminer les crues extrêmes dans la plupart des bassins-versants en Suisse, mais avec certaines précautions (cf. chap. 4.4). Ces cartes permettent également d'apprécier d'autres dangers naturels influencés par de fortes précipitations comme les glissements de terrain ou les laves torrentielles. Pour cela, un logiciel permet de faire des zooms et d'extraire les valeurs des PMP pour un endroit ou un domaine particulier, comme le montre la Figure 16 dans le Sud-Ouest du Valais. On remarque un certain décalage entre la position des reliefs et les valeurs des précipitations les plus élevées qui résulte de la résolution horizontale de 2 km pour ces cartes à l'échelle suisse. Il faut tenir compte de ce décalage pour l'utilisation des PMP à l'échelle d'un bassin-versant.

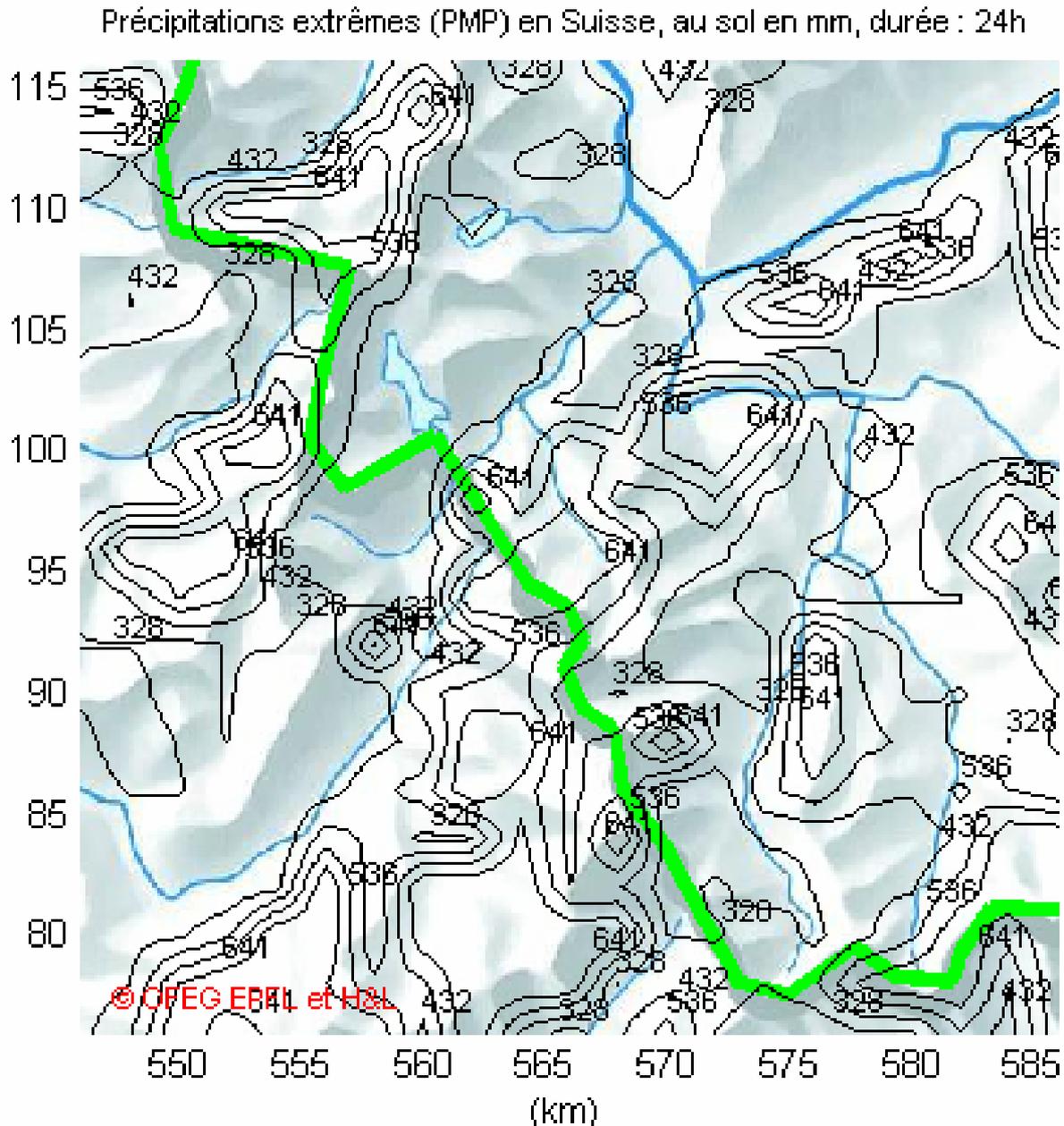


Figure 16 : Zoom de la carte des PMP 24 heures (en mm) dans le Sud-Ouest du Valais

4.4 Limites d'utilisation des cartes PMP de la Suisse

Les cartes des PMP tous secteurs confondus d'une durée de 3 et 24 heures ont été validées (cf. chap. 4.3) et elles peuvent être utilisées pour le calcul des crues extrêmes en Suisse. Il en va de même pour les cartes des PMP tous secteurs confondus d'une durée de 1, 6, 9 et 12 heures extrapolées à partir des cartes de 3 et 24 heures validées.

Les cartes sectorielles (Ouest à Nord-Ouest, Nord-Ouest à Nord, Sud-Ouest à Sud-Est) n'ont pas été validées et comparées avec des mesures in situ. En outre, elles ne couvrent que 3 grands secteurs de vents et des précipitations extrêmes se produisent également pour d'autres

directions de vent dans certaines régions du pays. De telles cartes ne peuvent être transmises actuellement pour le calcul des crues. Il est indispensable de les valider, car comme mentionné plus haut, les cartes des PMP tous secteurs confondus ne peuvent être utilisées sans un certain nombre de précautions pour le calcul des crues. Ces cartes nécessitent une interpolation spatio-temporelle, car elles n'indiquent que les valeurs maximales des PMP pour la situation météorologique la plus critique. Or, ces valeurs maximales ne surviennent pas partout au même moment pour un bassin-versant donné. Ces différences spatio-temporelles des PMP seront d'autant plus importantes que le bassin-versant sera grand et situé près de la ligne de faîte principale des Alpes où les précipitations extrêmes se rencontrent pour des situations météorologiques bien distinctes de part et d'autres de cette ligne de faîte.

Les cartes des PMP tous secteurs confondus peuvent être utilisés pour de petits bassins-versants où les précipitations extrêmes se produisent pratiquement au même moment. Dans ce cas, le décalage dans le temps de la PMP reste faible et n'altère pas trop le calcul de la crue extrêmes. Il n'en va pas de même pour les grands bassins-versants où ce décalage peut être important pour un épisode donné et où la PMP peut se produire pour des situations météo bien différentes. Dans ce cas, une sous-estimation des variations spatio-temporelles des PMP peut conduire à un calcul des crues extrêmes nettement trop élevé. En outre, le calcul des PMP cherche à maximiser les précipitations, notamment sur les sommets, afin d'être certain d'obtenir partout la valeur la plus élevée avec un temps de retour d'au moins 10'000 ans. Il est donc nécessaire de faire appel à un spécialiste qui sache interpréter les PMP calculées pour la Suisse et interpoler les variations spatio-temporelles de ces précipitations extrêmes pour réaliser un calcul réaliste des crues extrêmes, notamment dans les grands versants. Pour cela, il convient d'utiliser plusieurs modèles de routage.

Facteurs conduisant à une surestimation d'une PMF

L'usage des cartes de PMP a montré que plusieurs paramètres peuvent entraîner une surévaluation, voire une sous-estimation du débit de crue. Comme la méthode utilisée est destinée à une analyse PMP-PMF, les cartes fournissent le maximum physiquement possible (probable) des précipitations et le maximum physiquement possible de la crue en est déduit. De ce fait, les grandeurs physiques à l'origine des cartes de PMP ainsi que les méthodes de modélisation (nuages, routage, etc.) ont été développées de manière à fournir des résultats maximisés donc légèrement conservatifs, Il n'est donc plus nécessaire de faire des hypothèses supplémentaires tendant à maximiser encore plus le calcul de débit de crue. Il faut plutôt chercher à trouver les valeurs les plus proches de la réalité qui sont déjà exceptionnellement élevées. Les facteurs suivant interviennent :

a) Les plus grandes erreurs sont obtenues lorsque la durée de la précipitation n'est pas en accord avec la durée critique de bassin et du lac d'accumulation. Ici il y a tendance à choisir une carte de durée très courte (donc de majorer les pluies) et de réaliser les simulations sur une durée des précipitations trop faible. Ce deuxième facteur peut entraîner un débit trop faible.

b) Il est fréquent de prendre, sur la carte des précipitations extrêmes, la valeur maximale de la PMP sur le domaine considéré. Par exemple la valeur 350 sur un point situé sur une crête. Ceci peut majorer le volume de la précipitation, et il est bien sûr favorable de retenir la valeur moyenne ou la valeur moyenne pondérée de précipitation sur la surface. Ici le choix d'un modèle distribué au lieu d'une méthode globale peut être déterminant. Nous avons observé une différence de 30% de débit de pointe par ce paramètre de la répartition spatiale.

c) Un facteur très important est celui de la vitesse et direction du vent qui peut modifier la crue dans une proportion importante. Ces paramètres deviennent de plus en plus sensibles avec l'augmentation de la taille du bassin.

d) La répartition spatiale des précipitations sur une surface est aussi très importante. On peut admettre que la PMP est représentée par les valeurs de la carte considérées comme simultanées, pendant le même orage, sur l'ensemble d'un petit bassin (25 km²). Pour les bassins plus grands, il est aussi clair, que pour un orage donné, seule une partie du bassin subira la PMP. Cette répartition des précipitations dans le bassin dépendra de la direction du vent et de la situation météo. Seule une simulation détaillée de la PMP en fonction de la direction du vent, type de masse d'air, conforme à la méthode CRUEX générale, est capable de tenir compte valablement de ces paramètres. Pour des bassins de plus de 100 km², la crue calculée avec la carte peut être surestimé avec un facteur 2.

e) Pour les très grands bassins l'infiltration et l'écoulement subsurface jouent un rôle important. C'est pourquoi il faut en tenir compte dans la modélisation de sol qui n'est pas saturé à 100%. Pour ce paramètre, il est indispensable de faire des nombreuses simulations avec des pluies de longue durée sur les périodes précédant l'arrivée des précipitations abondantes afin de trouver une configuration des terrains avec la saturation partielle de terrain la plus défavorable. L'arrivée de l'orage PMP se fait alors sur un terrain dont la saturation n'est pas totale et uniforme.

f) Il a été montré dans le présent rapport la nécessité de prendre en compte l'ensemble de débit entrant dans le périmètre de lac est de ne pas considérer seulement le débit de la rivière principale. Là aussi, la sous-estimation de débit de crue peut atteindre 50% du débit réel.

g) Une pluie d'intensité faible peut provoquer la fonte de la neige, qui peut entraîner une crue exceptionnelle.

h) Il convient de relever enfin que les grandes inondations apparaissent souvent après une longue période de pluie qui a créé les hautes eaux. De ce fait, il est important, comme mentionné sous e) de reproduire aussi des situations d'intensité de pluies plus faible que la PMP, mais avec des débits initiaux dans les rivières déjà maximaux. C'est lors de l'analyse de la durée critique d'un bassin et d'un lac que cette considération doit intervenir.

5. Détermination des crues extrêmes PMF

Parmi les facteurs impliquant une surestimation des précipitations relevées dans la section précédente, deux aspects nous sont apparus particulièrement importants pour la détermination des crues extrêmes (PMF) avec les cartes de PMP. Il s'agit de la nécessité de réaliser une structuration spatio-temporelle des précipitations et de recourir à une modélisation spatialisée du routage. Les simulations importantes effectuées lors du développement de la méthode PMP – PMF dans le cadre du projet CRUEX, ont toutes été faites avec des modèles de routage spatialisés. Ce concept a conduit au développement du modèle Faitout ou à l'utilisation du modèle WOLF. La structuration spatio-temporelle a aussi été effectuée à l'aide de plusieurs méthodes hydrologiques.

Ces étapes de structuration de la pluie et de routage se sont avérées longues et ont nécessité l'intervention de spécialistes. Ceci reste évidemment nécessaire pour les grands bassins et dans le cas des grands projets. Par contre, pour les bassins de petite taille, il est indispensable de disposer d'outils efficaces, cohérents avec les cartes de PMP, assez versatiles (souples) pour pouvoir effectuer des analyses de sensibilité très rapidement.

Deux modules ont été développés dans le cadre de deux travaux de maîtrise à l'EPFL par M. A. Brena qui a modélisé la structuration spatiotemporelle de la pluie et un premier module de routage et par madame R. Receanu qui a validé le modèle de pluie et perfectionné le modèle de routage.

Le présent chapitre présente le développement de ces modules. Il est structuré en trois grandes parties, la première est destinée à la structure de la pluie spatio-temporelle, la deuxième au routage sur la surface, l'écoulement souterrain, l'infiltration et la résurgence, et la troisième est le cas le plus retrouvé dans la nature quand s'ajoute encore la fonte des neiges dans le cas de la PMP. Ce modèle a été testé sur les bassins de l'Arnensee et du List, résultats qui sont présentés dans la dernière section de ce chapitre.

5.1 Distribution spatio-temporelle des précipitations maximales

Au cœur du modèle se trouve l'équation d'advection-diffusion, qui spécifie le processus d'advection, essentiel pour la formation de nuages de type orographique et leurs précipitations. La solution non-linéaire de cette équation est donnée par Brutsaert (1974), par l'équation 1:

$$P(x, y, t) = \frac{I}{4\pi(D_x D_y)^{1/2}(t-t_o)} \exp\left\{ -\frac{[x-x_o - v_x(t-t_o)]^2}{4D_x(t-t_o)} - \frac{(y-y_o)^2}{4D_y(t-t_o)} - \lambda(t-t_o) \right\} \quad (1)$$

où I est la PMP, x , y et t sont les coordonnées en espace et temps, D_x et D_y sont les coefficients de diffusion, v est la vitesse, et λ est le coefficient de développement/dissipation de l'intensité. L'évolution temporelle des nuages suit une distribution gaussienne avec une phase de dissipation influencée par v , D_x , D_y et λ .

Comme entrée du modèle, nous avons utilisé la carte des valeurs PMP établie pour la Suisse avec une résolution horizontale de 2 km. Pour le calage du modèle, nous avons choisi une durée de pluie correspondant à 1 heure. Il s'agit d'une pluie utilisée pour la vérification et le calage du modèle. Il convient de relever que dans le cas d'une application visant à obtenir la PMF, le calcul des hydrogrammes doit être effectuée avec une durée des pluies correspondant la durée critique du bassin, du lac ou de l'ouvrage de retenue.

Etant donné que le domaine topographique a une résolution plus fine de 25 m, la méthode consiste à effectuer une interpolation spatiale pour obtenir les valeurs de la PMP sur tous les points du terrain. Ensuite, le volume des précipitations obtenu est réparti entre plusieurs nuages (dans notre cas 6 nuages), qui se déplacent sur la surface du terrain et distribuent les précipitations dans l'espace et le temps.

Ce modèle de répartition spatio-temporelle de la PMP inclut ainsi le déplacement des nuages en toutes directions, contrairement aux modèles antérieurs, où les directions sont limitées, comme dans Berndtsson *et al.* (1994) et Jinno *et al.* (1993). Pour les simulations, 8 directions de mouvement des nuages ont été utilisées: N, NE, E, SE, S, SW, W et NW.

L'évolution spatio-temporelle de la pluie sur le bassin-versant test de l'Arnensee est illustrée dans la Figure 17.

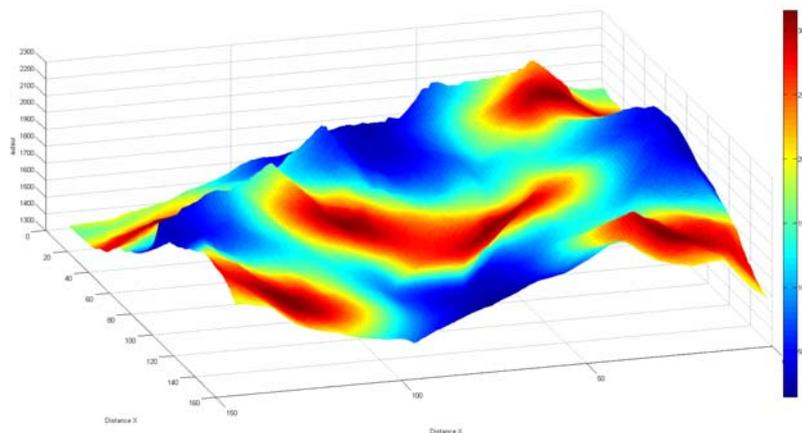


Figure 17. Distribution spatiale de la PMP sur le terrain.

Les 6 nuages sont initialement placés comme suit: Quatre nuages sont placés dans les angles du domaine de calcul du terrain et les deux autres au milieu (Figure 17). Le vent déplace ces nuages sur le terrain, et ils peuvent même sortir du terrain. En ce cas, l'hypothèse est qu'il y a un nuage identique qui entre sur le terrain sur le côté opposé et qui remplace le nuage disparu (condition de bord cyclique).

L'équation d'advection-diffusion modélise le comportement temporel de chaque nuage, c'est-à-dire la variation temporelle de la forme du nuage ainsi que l'évolution temporelle des précipitations. Au début de la pluie, chaque nuage a une taille relativement réduite et l'intensité locale de la pluie est élevée, mais concentrée sur une surface réduite autour du centre du nuage. Pendant que le nuage avance, poussé par le vent, il s'agrandit en même temps et l'intensité locale de la pluie diminue, mais elle se distribue sur une surface plus large. Les figures suivantes montrent le comportement temporel des nuages, donné par l'équation d'advection-diffusion.

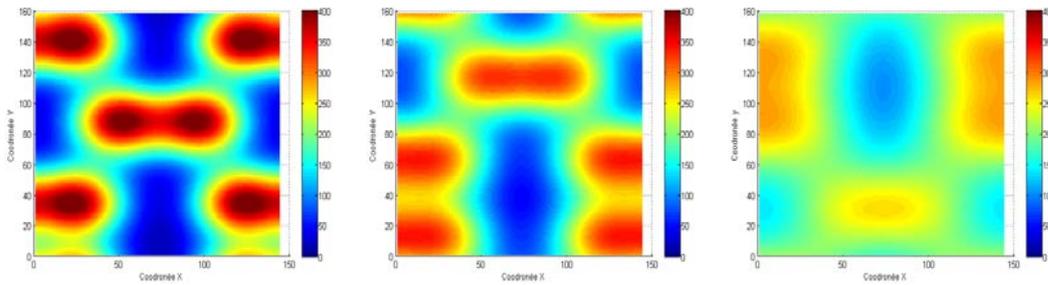


Figure 18. Distribution spatiale de la PMP sur le terrain. (temps 3, 15 et 30 minutes)

Sur ces images nous pouvons observer la réduction de l'amplitude maximum de la précipitation sous les nuages de 350 mm/h à 310 mm/h et finalement à 280 mm/h, causé par la diffusion.

La pluie pour chaque point du terrain est structurée de manière à garantir la cohérence physique du volume donné par la PMP dans le temps et dans l'espace durant la durée du calcul. Donc nous avons un modèle de routage bien spatialisé. Les figures suivantes présentent la distribution de la pluie dans plusieurs points du terrain pour deux situations différentes.

Dans la première situation, les points pour lesquels nous montrons l'hydrogramme sont éloignés afin d'illustrer la variation spatiale de la pluie sur le terrain entier.

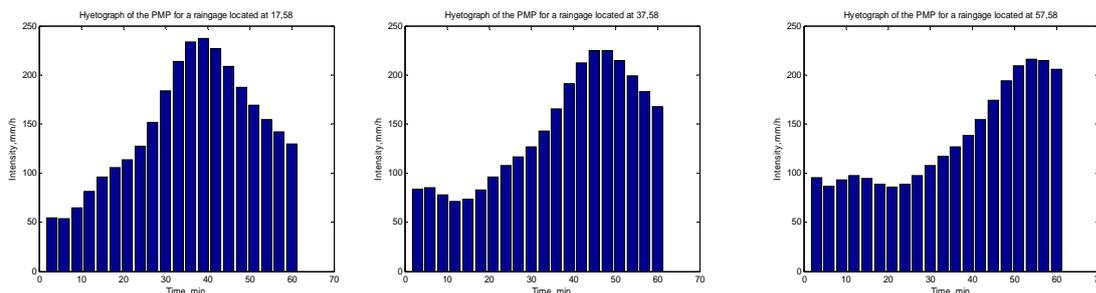


Figure 19. Hydrogramme de la PMP autour d'un point du terrain (distance de 1 km)

Dans la Figure 19, nous avons trois points avec une résolution du MNT de 25m x 25m et avec une distance entre les points de 1 km, ce qui montre la distribution spatio-temporelle de la PMP. Sur ces hydrogrammes, nous pouvons suivre le déplacement des nuages du nord au sud. Les centres des nuages sont représentés par les pics des hydrogrammes. Il est possible de suivre l'évolution d'un nuage d'une image à l'autre. Le pic arrive avec un retard temporel dans la dernière image, ce qui montre que le nuage qui entrait au nord du terrain arrive plus tard au centre et encore plus tard au sud du terrain. L'intensité maximale se réduit de 240 mm/h à 230 mm/h et finalement à 220 mm/h en 15 minutes.

En ce qui concerne la deuxième situation les points sont proches pour montrer des variations locales entre des points voisins, comme illustré dans les figures suivantes:

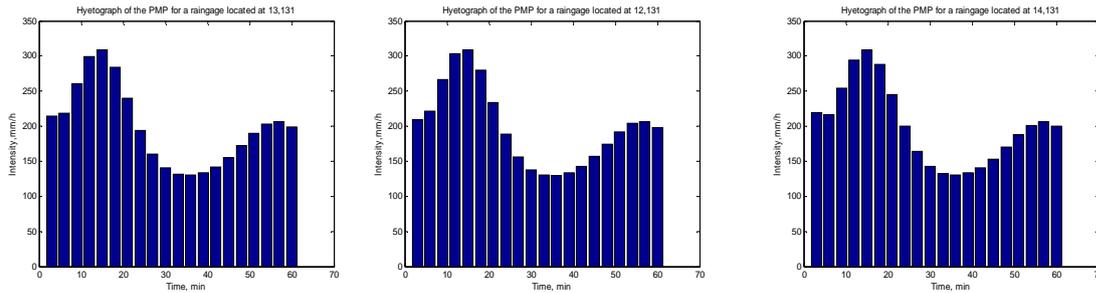


Figure 20. Hydrogramme de la PMP autour d'un point du terrain (distance de 25 m)

La Figure 20 montre le déplacement de trois points qui sont voisins. La distance ici est de 25 m. Cette figure prouve que les variations locales sont très faibles.

La distribution spatio-temporelle de la PMP est ensuite introduite dans un modèle d'écoulement calculant la PMF.

5.2 Modélisation de l'écoulement sur le terrain (routage)

Cette section est consacrée à la modélisation de l'écoulement sur la surface et l'écoulement souterrain. Dans la première partie, on va déterminer la PMF sans l'influence de l'infiltration et de la résurgence. La deuxième partie est consacrée à l'influence de l'écoulement souterrain sur la PMF.

L'écoulement de surface

La partie de la modélisation hydrologique de l'écoulement suit la pente de l'eau sur la surface et dans le sous-sol (écoulement souterrain) jusqu'à l'exutoire du bassin. Ce modèle prend comme entrée la distribution spatio-temporelle de la pluie, le régime d'écoulement (laminaire, transitoire et en rivière), la pente entre les points du terrain et leur distance, une simulation temporelle est effectuée pour déterminer les débits d'écoulement en chaque point du terrain avec une résolution temporelle variable, généralement de 10s. Cette simulation calcule la propagation des volumes d'eau du voisin au voisin, jusqu'au moment de l'arrivée de l'eau à l'exutoire du bassin.

Dans l'exemple de la Figure 21, l'application de cette méthode donne un chemin vers l'exutoire.

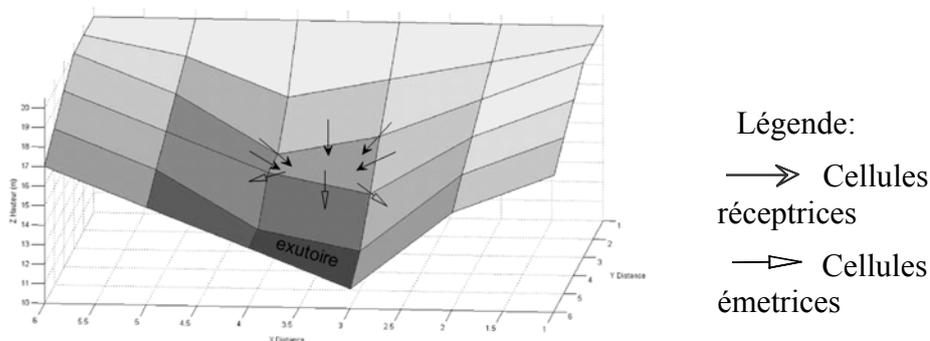


Figure 21. Distribution d'eau pour une cellule de terrain

Chaque cellule du terrain fournit un certain volume d'eau aux cellules voisines en aval, et en même temps reçoit un volume de ses voisins en amont, additionné par le volume de la pluie. Le volume donné par une cellule du terrain à un moment t est donné par l'équation 2:

$$V_{donné}(x, y, t) = [V_{accumulé}(x, y, t) + V_{pluie}(x, y, t)] \cdot \frac{v \cdot \Delta t}{d} \quad (2)$$

où $V_{accumulé}$ est le volume d'eau présent sur la cellule, V_{pluie} est le volume de la pluie sur la cellule calculé avec la distribution de la PMP, v la vitesse pour l'un des trois types d'écoulement, Δt le pas de temps, et d la distance entre cellules. Ce volume est distribué aux cellules voisines d'aval en fonction de la pente, selon l'équation 3:

$$V_{reçu}(x \pm 1, y \pm 1, t) = V_{donné}(x, y, t) \cdot \frac{pente}{\sum pentes} \quad (3)$$

où la pente est normalisée par la somme des pentes entre la cellule et ses voisines en aval. Finalement, le débit dans tous les points du terrain, y compris l'exutoire, est obtenu à chaque pas de temps. Le débit de surface sera additionné à la résurgence venue de l'écoulement souterrain, et cette distribution temporelle à l'exutoire, qui représente la PMF, sera montrée dans la section des résultats.

L'écoulement souterrain

Cette section met en évidence l'importance de l'infiltration, de la résurgence et de l'écoulement souterrain sur l'hydrogramme de la PMF. Contrairement à l'hypothèse faite pour la première partie section où le sol a été supposé saturé, ici est pris en compte le cas plus réaliste où une partie de l'eau s'infiltrate dans le sol qui n'est pas saturé au début. De plus, pour les très grands bassins, l'hypothèse de la saturation du sol uniformément est beaucoup trop conservatrice et conduit à des débits de crues trop importants.

Sub-module d'infiltration

Le calcul de l'infiltration a été fait avec l'équation Horton (Horton, 1933), une des méthodes les plus utilisées pour estimer l'évolution temporelle de la capacité d'infiltration du sol en fonction de ses valeurs initiale et finale pour chaque type de terrain. La capacité d'infiltration d'un sol décroît d'abord très rapidement puis tend progressivement et asymptotiquement vers un régime constant appelé infiltration finale. Cette évolution pour deux types de sol est montrée dans les figures suivantes :

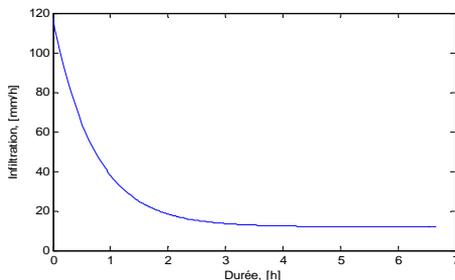


Figure 22. Capacité de infiltration pour un sol de type 7

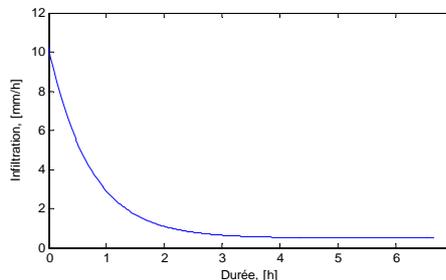


Figure 23. Capacité de infiltration pour un sol de type 17

La Figure 22 montre la capacité d'infiltration pour un type de terrain assez perméable et la Figure 23 pour un sol moins perméable. Dans le cas de la PMP, l'influence de l'infiltration est réduite, mais visible, comme nous allons montrer dans la section de résultats.

La géologie du sol a été interprétée à partir d'une carte géotechnique simplifiée à 30 types de terrain (Receanu R., 2009). Elle se base sur la carte géotechnique de la Suisse (échelle 1:200'000) publié par la Commission géotechnique Suisse.

Dans ce qui suit, l'infiltration sera incluse dans un modèle d'écoulement souterrain. L'eau infiltrée se déplace sous le terrain jusqu'au moment où elle rencontre un terrain saturé et elle ressort à la surface par résurgence. En fait, il y a une circulation d'eau souterraine parallèle à celle de la surface, qui influence le débit à l'exutoire. Le modèle peut tenir compte de la géométrie des couches souterraines lorsque cette donnée est disponible.

Sub-module de la modélisation d'écoulement souterrain

L'écoulement souterrain a été calculé avec la loi de Darcy (1856), en supposant que l'épaisseur du sol est uniforme pour tout le bassin versant et la pente identique avec le cas d'écoulement surface. Comme en surface, chaque cellule reçoit un volume d'eau dans le sol provenant des voisins en amont qui s'ajoute à l'eau déjà existante. En plus, à ce volume on ajoute aussi l'infiltration locale, qui joue le même rôle dans le sol que les précipitations pour l'écoulement de surface. Finalement, une partie de ce volume total d'eau sera redistribué dans les cellules en aval en fonction des pentes et des différences entre les hauteurs d'eau dans chaque cellule.

Dans la section des résultats nous présentons l'influence de l'infiltration et de l'écoulement souterrain sur l'écoulement de surface, et en particulier le débit dans l'exutoire. Il faut naturellement connaître la géométrie des couches souterraines et la composition fine du sous sol. Comme ces données sont insuffisantes, nous avons admis que la zone non saturée avait une topographie parallèle à celle de la surface.

Cette hypothèse est en fait valable pour l'écoulement se produisant dans la zone de la surface du sol avec une profondeur atteignant 20 à 30 cm.

Pour la modélisation, le sol est simulé par une perméabilité, un volume souterrain alloué à la cellule de 25 x 25 m² et un taux de remplissage de ce volume. La loi de Darcy gère le transfert d'une cellule à l'autre.

5.3 Modélisation de fonte de la neige

Les précipitations sous forme de neige s'accumulent au sol pour des périodes variant de quelques heures à plusieurs mois. Dans plusieurs endroits, l'eau de fonte est la principale source d'eau de surface et contribue significativement à la recharge des aquifères aussi qu'aux crues printanières. Dans cette section, nous voulons montrer l'importance de la fonte de neige dans le cas d'une PMP. La modélisation de la fonte de la neige est fondée sur l'équation de calorimétrie, la hauteur de précipitation qui est la quantité d'eau représentée par la PMP 1 heure, la hauteur de neige, la température de la neige (Tneige) et la température de la pluie (Tpluie).

La quantité d'eau de fonte ($Q_{\text{eau-neige}}$) est calculée avec l'équation suivante:

$$Q_{\text{fonte}} = \frac{E_{\text{cal_eau}}}{\rho \cdot C_{\text{lat_neige}} + (C_p * T_{\text{neige}})} \quad (4)$$

où:

Q_{fonte} est la quantité d'eau de fonte exprimée en m^3 ;

$C_{\text{lat_neige}}$ est la chaleur latente de la neige exprimée en kJ/kg ;

$E_{\text{cal_eau}}$ est l'énergie calorifique d'eau exprimée en kJ ;

ρ est la densité de l'eau exprimée en kg/m^3 ;

T_{neige} est la température de la neige exprimée en $^{\circ}\text{C}$.

La quantité de chaleur donnée par un volume d'eau est:

$$E_{\text{cal_eau}} = \rho * V_{\text{pluie}} * C_p * (T_{\text{pluie}} - T_{\text{neige}}) \quad (5)$$

où:

C_p est la chaleur spécifique exprimée en $\text{kJ}/(\text{kg} * \text{K})$;

T_{pluie} est la température de la pluie exprimée en $^{\circ}\text{C}$.

Ces deux équations décrivent le processus calorimétrique pour la fonte de neige.

Dans la section suivante nous présenterons nos résultats en comparons avec une PMF obtenu dans le cas d'un écoulement de surface et le cas d'écoulement souterrain.

5.4 Résultats et discussion

Ce modèle a été appliqué à deux bassins-versants de la Suisse. Le premier, situé dans le canton de Berne, correspond au barrage d'Arnensee avec une surface de $7,563 \text{ km}^2$. Le deuxième bassin correspond au barrage du List, situé dans le canton d'Appenzell, avec une surface de $7,44 \text{ km}^2$. Pour ces bassins versants, nous avons choisi comme exutoire le point où le débit est maximal à l'entrée du lac.

L'estimation de la PMP pour chaque bassin a été calculée à l'aide de la carte des précipitations extrêmes pour la Suisse (Hertig et Audouard, 2005), avec une période de retour supérieure à 10000 ans. La hauteur moyenne estimée de la PMP pendant 1 heure est de 203 mm/h pour l'Arnensee (Figure 24) et de 188 mm/h pour le List (Figure 25).

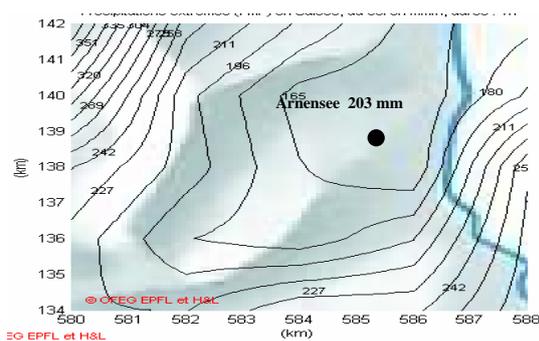
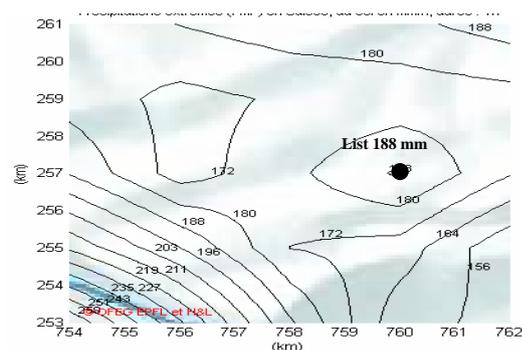


Figure 24. Précipitations extrêmes Arnensee, au sol en mm/h , durée 1h.



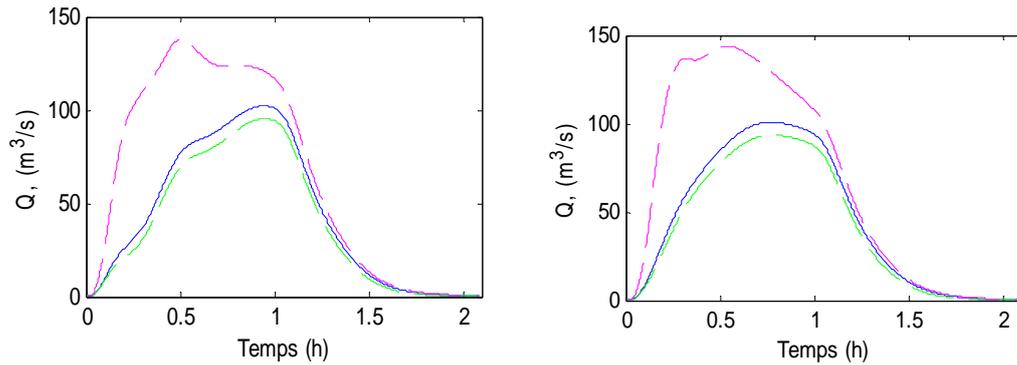


Figure 26 . Hydrogramme de crue par vent du Nord (à gauche) et par vent du Sud (à droite) pour le bassin de l'Arnensee. Trait continu: hydrogramme l'écoulement surface; tireté en bas: cas avec l'écoulement souterrain, tireté en haut: cas avec la fonte de neige

Comme on peut le voir, la direction du vent a une grande influence sur la forme des deux hydrogrammes, ainsi que sur le débit maximal.

Le calcul réalisé sur le bassin de List est différent de celui de l'Arnensee parce que dans la partie amont de lac se trouve la ville de Heiden. La topographie est assez plate, en comparaison avec le bassin de l'Arnensee, les vitesses sont plus faibles et nous avons observé une accumulation d'eau sur la partie de la ville en amont du lac. La figure suivante présente l'hydrogramme de crue en amont du lac du List où le débit est maximal.

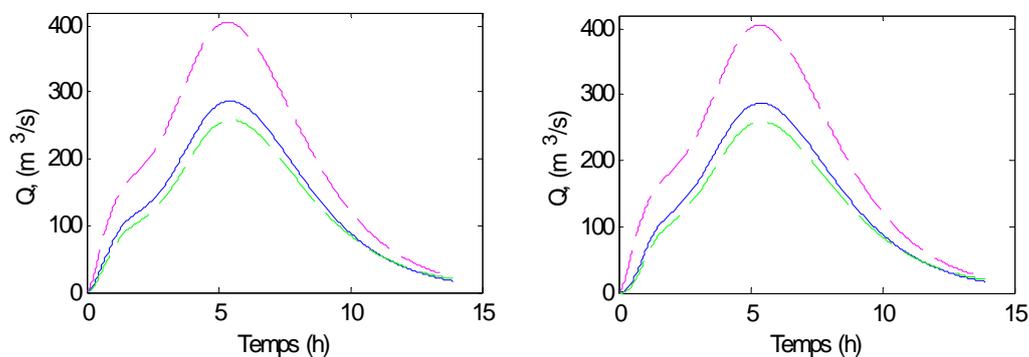


Figure 27 . Hydrogramme de crue par vent du Nord (à gauche) et par vent du Sud (à droite) pour le bassin List. Trait continu: hydrogramme l'écoulement surface; tireté en bas: cas avec l'écoulement souterrain, tireté en haut: cas avec la fonte de neige

L'analyse faite sur le bassin du List est similaire et confirme les conclusions obtenues sur l'Arnensee.

L'influence de l'écoulement souterrain est de réduire les valeurs extrêmes. Cette influence reste toutefois assez faible, en comparaison avec le volume de la PMP. La différence introduite par le calcul de l'écoulement souterrain avoisine 10% sur la valeur maximale et cette différence sera retrouvée vers la fin de la période, après quelque temps, car la vitesse d'écoulement souterrain est très petite. Finalement, ce calcul est justifié par le fait que sa prise en compte rend l'évolution du débit de l'eau plus réaliste.

Dans le cas de la fonte de la neige, on peut observer sur la Figure 26 une augmentation du débit dans la première partie, puis il commence à diminuer après trente minutes par rapport au débit

donné par l'écoulement surface. La fonte de la neige a une influence très importante sur le débit maximal, mais aussi sur le volume total de l'eau qui arrive à l'exutoire. La direction du vent joue aussi un rôle très important sur la forme de l'hydrogramme. En ce qui concerne la Figure 27, le débit augmente parallèlement avec la courbe obtenue dans le cas de l'écoulement de surface. Le parcours de l'eau est très lent à cause des faibles pentes et les vitesses obtenues sont donc aussi très petites sur le bassin de List. Dans ce cas, l'eau commence à déborder dans la ville de Heiden et inonde une grande partie de cette ville.

6. Conclusions

Nos cartes de précipitations maximales probables pour la Suisse (PMP) ont été réalisées dans le but de faciliter la détermination des crues maximales probables (PMF) pour les bassins versant de Suisse et particulièrement pour les bassins alpins. Ces cartes constituent une application simplifiée de la méthode générale PMP-PMF adapté à la Suisse dans le cadre du projet CRUEX de l'OFEG, aujourd'hui à l'OFEN. La dernière version de ces cartes a été établie en 2005 sur la base d'une topographie dont la résolution spatiale est de 2 km. Elles sont disponibles pour les durées de 1h, 3h, 6h, 9h, 12h et 24h. Elles permettent même au néophyte une lecture détaillée et précise de l'influence de la topographie.

Nous avons examiné et comparé ces cartes aux mesures de précipitations extrêmes faites par un réseau de 300 stations en Suisse sur une période de 70 ans (1901-70) et extrapolées pour un temps de retour de 500 ans¹. La représentativité est excellente. L'ensemble des caractéristiques des précipitations en Suisse est reproduit. Ceci est d'autant plus remarquable que les seuls paramètres d'ajustement du modèle sont les conditions de bord. En effet, le modèle numérique à mésoéchelle utilisé est basé sur une résolution des équations physiques, de ce fait il n'existe pas de paramètres permettant d'ajuster les précipitations calculées pour correspondre aux mesures ou « à la demande ». Il est uniquement possible de rechercher la situation météorologique qui maximise les précipitations, dans une région donnée et d'ajuster les conditions au bord du domaine et les conditions initiales. Les cartes calculées correspondent donc à des conditions physiques rigoureuses.

Les enseignements tirés des simulations sont alors nombreux et importants. D'une part, les paramètres maximisant et leurs importances relatives sont mis en évidence. Parmi les 8 paramètres² étudiés, les simulations ont montré que la stabilité de l'atmosphère est le paramètre le plus sensible pour un secteur de vent donné. En effet, les résultats obtenus en variant chaque paramètre indépendamment les uns des autres fournissent des familles de cartes d'allures semblables, mais d'intensités différentes. Par contre, en variant la stabilité de l'air, l'allure des cartes change fortement.

D'autre part, nous avons déterminé le rôle des différents modèles de physique des nuages qui peuvent aujourd'hui être utilisés de manière complémentaire lors de nos simulations.

Les cartes 2 km offrent une précision nettement meilleure que les cartes 5 km que nous avons calculées précédemment (1996). Un maillage encore plus fin (< 1 km) et l'introduction d'un nouvel algorithme de précipitations convectives permettront de réduire encore certains écarts observés entre les valeurs obtenues aux sommets et dans les vallées des Alpes.

Pour la détermination des crues extrêmes à l'aide des cartes, il est indispensable de tenir comptes de propriétés de la PMP d'adapter la méthode de calcul hydrologique afin de ne pas entraîner une sur estimation des crues. Le fait d'avoir maximisé les précipitations implique de ne pas ajouter de coefficient de sécurité et de ne pas choisir des méthodes et des hypothèses trop conservatives dans le calcul hydrologique. Il faut aussi tenir comptes de propriétés physiques de la crue. La modélisation devrait aussi tirer parti de la plus grande précision de la répartition spatiale de la PMP en effectuant le routage avec des modèles spatialisés.

¹ Cette comparaison a également été faite pour les précipitations extrêmes journalières (24 heures) avec les valeurs mesurées à 429 endroits durant une période de 48 ans, de 1961 à 2008.

² Profil vertical de vitesse de vent, vitesse de vent géostrophique, direction de vent, humidité, couche nuageuse, gradient de température, température au sol, seeding.

C'est pourquoi le projet a été associé au développement d'un nouveau modèle de répartition spatiotemporelle des précipitations, associé à un modèle d'infiltration et de routage afin que le calcul de la PMF soit compatible avec les résultats présentés dans les cartes de PMP. Une application de ce modèle est montrée dans le chapitre 5 du présent document. Ce modèle a atteint son niveau opérationnel et est à disposition chez H&L de tous les utilisateurs des cartes de PMP.

7. Références

- Anctil F., Rousselle J., Lauzon N., 2005 : *Hydrologie. Cheminement de l'eau*. Ecole Polytechnique, Montréal.
- Audouard A., Hertig J.-A., Fallot J.-M., 2006 : Modélisation des précipitations extrêmes en Suisse. *Actes du 19ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Epernay, 6-9.09.2006, p. 83-88.
- Beniston M., Goyette S., Stephenson D.B., Christensen O.B., Frei C., Schöll R., Halsnaes K., Holt T., Palutikof J., Jylhä K., Koffi B., Semmler T., Woth K., 2007 : Future extreme events in Europe climate : an exploration of regional climate model projection. *Climatic Change*, **81** (s.1), p. 71-95.
- Brena A., 2007 : *On the sensitivity analysis of the PMF to the space-time distribution of a PMP. Analysis of the hydrological response of a catchment. Analyse de la sensibilité de la PMF à la distribution spatiale et temporelle d'une PMP*. Master of Advanced Studies Thesis, EPFL.
- Berndtsson R., Jinno K., Kawamura A., Larson M. and Niemczynowicz J., 1994 : Some Eulerian and Lagrangian statistical properties of rainfall at small space-time scales. *Journal of Hydrology*, **153**, 339-355.
- Brutsaert W., 1974 : More on an approximate solution for nonlinear diffusion. *Water Resources Research*, **10**, 1251-1252.
- CRSFA, 1993 : *Intempéries du Haut-Valais: les précipitations des 22-25 septembre 1993 sur le massif du Simplon*. CRSFA, CH-1950 Sion.
- Darcy M., 1856 : *Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*. Editeur Victor Dalmont, Paris, 647 p.
- Duynkerke P.G., 1988 : An application of the k-ε turbulence closure model to the neutral and stable atmospheric boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2527-2543.
- Fallot J.-M., 2000 : Evolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Suisse durant le 20ème siècle. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **13**, p. 100-109.
- Fallot J.-M., Hertig J.-A., 2009 (à paraître) : Détermination des précipitations en Suisse à partir d'analyses statistiques. *Actes du 22ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Cluj, 1-5.09.2009.
- Frei C., Davies H.C., Gurtz J., Schär C., 2000 : Climate dynamics and extreme precipitation and flood events in Central Europe. *Integrated Assessment*, **1**, p. 281-299.

- Frei C., Schöll R., Futukome S., Schmidli J., Vidale P.L., 2006 : Future change of precipitation extremes in Europe. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
- Goulpié P., Hertig J.-A., Reinhardt F., Hug Ch., Fallot J.-M., Stirnimann O.F., 2002 : *Numerical Modelling of Probable Maximum Flood for the Watershed of the Krasnodar Dam in Russia*. Commission for the Hydrology of the Rhine basin, CHR Report II-17 International conference on flood estimation, 101-111.
- Goulpié P., Hertig J.-A., 2000 : *Extreme precipitation over complex topography with a modified Navier Stokes solver. Implementation of a 3 phases microphysics parameterization 'River flood defence'*. Kassel Report of Hydraulic Engineering No. 9/2000, pp.C79-C88.
- Grebner D., 1994 : Meteorologische Analyse des Unwetters von Brig und Saas Almagell vom 24. September 1993. *Wasser, energie, luft-eau, energie air*, 86. Jahrgang, Heft1/2, CH-5401 Baden., 1994, 1/ 2, 41-44.
- Gumbel E.J., 1958 : *Statistics of extremes*. Columbia University press, 375 p.
- Haiden T., Kerschbaum M., Kahlig P., Nobilis F., 1992 : A refined model of the influence of orography on the mesoscale distribution of extreme precipitation. *Hydrol. Sci. J.*, **37** (5), 417-427.
- Hansen E.M., Schreiner L.C., Miller J.F., 1982 : *Application of Probable Maximum Precipitation Estimates- Unites States East of the 105th Meridian*. Hydrometeorological Report No.52, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Dept of Commerce, Washington, D.C., 168 pp.
- Hertig J.-A., Clappier A., Lebessis V., 1993 : *Simulation du transport et de la dispersion de polluants à travers les Alpes, Méthode des éléments finis et méthode des volumes finis*. Rapport n° 541.109, LASSEN, EPFL, CH-1015 Lausanne.
- Hertig J.-A., Audouard A., 2005 : *Carte des précipitations extrêmes pour la Suisse (PMP 2005)*. Rapport EFLUM-EPFL destiné à l'Office des Eaux et de la Géologie (OFEG), Lausanne, décembre 2005, 43p. + annexes.
- Horton R.E., 1933 : The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transaction. American Geophysical Union*, **Vol.14**, pp 446-460.
- IPCC, 2007 : *Climate Change 2007. The physical science basis. Working Group I Contribution to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 p.
- Jinno K., Kawamura A., Berndtsson R., Larson M. and Niemczynowicz J., 1993 : Real-time rainfall prediction at small space-time scales using a two-dimensional stochastic advection-diffusion model. *Water Resources Research*, **29** (5), 1489-1504.
- Kessler E., 1969 : *On the precipitation distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations*. Meteor. Monogr., 10 (32), Am. Meteor. Soc, 84 pp.
- Montavon C., 1998 : Validation of a non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind field over complex topography. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* **74-76** (1998), 273-282.
- Launder B.E., Spalding D.B., 1972 : *Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press WMO, 1986. *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*. WMO- No. 332, WMO, Geneva, Switzerland, 269 p

- Mermoud A. et Soutter M, 1991 : *Physique du sol*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 213-220.
- Nunes J.P., de Lima J.L.M.P., Singh V.P., de Lima M.I.P. and Vieira G.N., 2006 : Numerical modeling of surface runoff and erosion due to moving rainstorms at the drainage basin scale. *Journal of Hydrology*, **330**, 709-720.
- Receanu R., 2009 : *Méthodologie pour l'adaptation de la PMP à la détermination d'une PMF*. MAS Projet, LCH-EPFL, Hertig&Lador SA, Suisse.
- Receanu R. Hertig J.-A., Fallot J.-M., 2009 (à paraître) : Modélisation spatiale et temporelle des précipitations pour l'estimation des crues extrêmes dans les Alpes. *Actes du 22^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Cluj, 1-5.09.2009.
- Richard E., Chaumerliac N., Mahfouf J.-F., Nickerson E.C., 1987 : Numerical simulation of Orographic Enhancement of Rain with a Mesoscale Model. *J. Climate Appl. Meteor.*, **26**, 661-669.
- Smith J.A., Bradley A.A. and Baeck M.L., 1994 : The space-time structure of extreme rainfall patterns in the Southern Plains. *Journal of Applied Meteorology*, **33**, 1402-1417.
- Trömel S., Schönwiese C.-D., 2007 : Probability change of extreme precipitation observed from 1901 to 2000 in Germany. *Theoretical and Applied Climatology*, **87**, p. 29-39.
- WMO, 1986 : *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*. WMO- No. 332, WMO, Geneva, Switzerland, 269 p
- Zeller J., Geiger H., Roethlisberger G., 1980 : *Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrand-Gebiet*. Office fédéral de l'étude des forêts, de la neige et du paysage (WSL), anciennement Institut Fédéral de Recherche Forestière (FNP), Birmensdorf.
- Zhang Y., Smith J. A. and Baeck M.L., 2001 : The hydrology and hydrometeorology of extreme floods in the Great Plains of Eastern Nebraska. *Advances in Water Resources*, **24**, 1037-1049.

Appendice A : Equations des modèles de vent et de pluie

Equations du modèle de vent

Pour une situation météorologique particulière, les champs de vent et de température sont obtenus par résolution des équations de continuité, de Navier-Stokes pour les trois composantes de la vitesse (modèle non-hydrostatique) et de conservation de l'énergie (1^{er} principe de la thermodynamique). Ces équations sont résolues en faisant l'approximation de Boussinesq, approximation qui consiste à négliger les effets de variation locale de densité avec la température, sauf dans le terme de force qui représente la poussée d'Archimède (flottabilité) dans l'équation de la vitesse verticale. On admet que la densité du fluide est constante dans le temps, et qu'elle varie avec la vitesse verticale selon un profil qui correspond à une atmosphère en équilibre. On a donc :

$$\rho = \rho_h(z)$$

L'équation de continuité est résolue dans l'hypothèse anélastique

$$\frac{\partial(\rho_h u_i)}{\partial x_i} = 0$$

Les équations de conservation de la quantité de mouvement deviennent:

$$\frac{\partial(\rho_h u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_h u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p'}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + (\rho_h - \rho) g \cdot \delta_{i3} + f(u_i - u_{i,geo}) \cdot \delta_{i1} - f(u_i - u_{i,geo}) \cdot \delta_{i2}$$

Remarque : p' représente l'écart par rapport à la pression hydrostatique

L'équation de conservation de l'énergie est formulée en température potentielle (Richard et al., 1987) comme suit :

$$\frac{\partial(\rho_h \theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_h \theta u_i)}{\partial x_i} = \frac{1}{C_p} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_e}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right]$$

Le couplage entre l'équation pour la température potentielle et le champ de vent est donné par l'approximation

$$(\rho_h - \rho) = \frac{\rho_h}{\theta_h} (\theta - \theta_h)$$

En plus des équations de mouvement, le modèle résout les deux équations du modèle de turbulence k-ε (Launder-Spalding, 1972). Ce modèle a été adapté à l'atmosphère par Duynkerke (1988). Cette version a été implémentée avec une modification du terme de génération de la turbulence convective.

Ce modèle a été développé et testé dans plusieurs type de formulations, une formulation basée sur la méthode des éléments finis (Hertig et al., 1993). Puis, une fois la faisabilité de

l'utilisation d'un noyau de mécanique des fluides démontrée, ce modèle a été implémenté dans le modèle Astec. L'ultime développement a consisté à recourir au noyau de CFX 4 pour y ajouter les équations de la température potentielle et de la microphysique des nuages.

Equations du modèle de pluie

Pour le calcul de la précipitation, deux équations de conservation sont résolues pour la vapeur et le contenu en eau de nuage (m) ainsi que pour le contenu en eau précipitante (M). Les équations du modèle de pluie, présentées ci-après, sont essentiellement les équations du modèle de Kessler (1969), avec une modification pour la paramétrisation du terme représentant la conversion de la vapeur en eau de nuage dans un mouvement vertical de l'atmosphère (fonction $G(T,p)$ dans l'équation de m).

$$\begin{aligned} \frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial (m u_i)}{\partial x_i} &= u_3 G(T,p) && \text{(génération)} \\ &- S \{ m - m^* \} C_a (m - m^*) && \text{(autoconversion)} \\ &- S \{ m \} S \{ M \} K_2 m M && \text{(accrétion)} \\ &- S \{ -m \} S \{ M \} K_3 m M^{13/20} && \text{(évaporation)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (M u_i)}{\partial x_i} - V_c \frac{\partial M}{\partial x_3} &= S \{ m - m^* \} C_a (m - m^*) \\ &+ S \{ m \} S \{ M \} K_2 m M \\ &+ S \{ -m \} S \{ M \} K_3 m M^{13/20} \end{aligned}$$

où m^* est le seuil d'autoconversion et S une fonction définie par:

$$\begin{aligned} S \{ i \} &= 1 \quad \text{si } i \geq 0 \\ S \{ i \} &= 0 \quad \text{si } i < 0 \end{aligned}$$

Les constantes du modèle prennent les valeurs suivantes:

$$C_a = 1 \cdot 10^{-3}, \quad K_2 = 9.0, \quad K_3 = 4.85 \cdot 10^{-2}, \quad m^* = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$$

La fonction paramétrisant la condensation de la vapeur en eau de nuage dans un mouvement ascendant de la masse d'air est donnée par:

$$G(T,p) = \frac{\xi}{RT} \left[\alpha(p,T) - \frac{g \cdot e_s(T)}{RT} \right]$$

$$\text{avec } \alpha(p,T) = \Gamma_{dry} \cdot \frac{1 + \frac{L\xi e_s(T)}{RT p}}{\left(\frac{\partial e_s}{\partial T} \right)^{-1} + \frac{L\xi}{c_p p}}$$

Modèle de Haiden pour les précipitations convectives

Haiden a modélisé les précipitations convectives orographiques en tenant compte des phénomènes de brises montantes entraînées par le réchauffement des surfaces du relief. A partir des équations de brises de pentes, Haiden détermine la convergence de flux d'humidité dans la couche limite ce qui l'amène à définir un indice orographique convectif ($F_{OKV}(x,y)$: Orographish-Konvektiver Verstärkungsindex). L'indice orographique convectif va déterminer avec la distribution spatiale d'humidité $q(x,y)$, le volume de précipitation orographique convective en chaque point du domaine de calcul.

Le volume de précipitation d'origine orographique convective pour une durée de 24 heures et une période de retour de 100 ans est selon Haiden :

$$P(x,y) = C_1 \cdot q(x,y) \cdot H_q \cdot (1 + F_{OKV}(x,y) \cdot C_2)$$

où : $P(x,y)$: volume de précipitations orographiques convectives en mm

C_1 : constante de calage

$q(x,y)$: fonction de distribution de la vapeur d'eau au sol (g/m^3) définie de la façon suivante :

$$q(x,y) = \frac{e_o}{p_h(z)} 0.622 \cdot e^{-z/H} ,$$

où : $p_h(z)$: profil de pression hydrostatique pour une atmosphère avec profil de température donné par $\frac{dT}{dz} = -5.5 \text{ K/Km}$

H_q : hauteur caractéristique de 2.2 km.

$F_{OKV}(x,y)$: indice orographique convectif

C_1 et C_2 : constantes de calage qui dépendent de la durée et de la période de retour.