



UNIL | Université de Lausanne  
Faculté des géosciences  
et de l'environnement

Master of Science in Geography

## Précipitations extrêmes dans le val de Bagnes: occurrence et prévision

---

Arnaud Rossier  
Sous la direction du Dr. Jean-Michel Fallot  
Expert: Dr. Robert Bolognesi



Maîtrise universitaire ès sciences en géographie | janvier - 2011



Institut de géographie, Université de Lausanne | [www.unil.ch/igul](http://www.unil.ch/igul)



**Photo de couverture :** *Massif des Combins depuis les Ruinettes avec de gauche à droite, depuis le milieu de la photo, le Grand Combin, le Combin de Corbassière et le Petit Combin.*



## **Remerciements :**

A mon directeur de mémoire, le Dr. Jean-Michel Fallot et à mon expert, le Dr. Robert Bolognesi pour leur disponibilité, leurs conseils et les corrections apportées à ce travail.

Au bureau *METEORISK* à Sion et en particulier à Florian Pourraz, prévisionniste, pour ses conseils avisés.

A mes collègues de Master, Giulia, Roxane et Jean-Baptiste, pour les bons moments passés ensemble.

A Céline pour son amour et la relecture attentive de ce travail.

A mes parents, à ma sœur et à mon frère pour leur soutien.



## Résumé

Ce mémoire a pour thème deux disciplines voisines : la climatologie et la météorologie. Actuellement, l'intérêt pour une meilleure connaissance des phénomènes climatiques et météorologiques est fort notamment en raison des problèmes qu'engendre le réchauffement climatique. Ce mémoire propose une approche sur la fréquence, l'intensité (sur le dernier siècle) et les temps de retour des précipitations extrêmes. La prévision au jour le jour des précipitations est aussi abordée. Il s'articule donc en deux parties distinctes. L'une se charge d'analyser à l'aide d'outils statistiques les précipitations extrêmes dans le Val de Bagnes et l'Entremont durant le 20ème siècle. L'autre présente le paramétrage et les tests d'un logiciel informatique permettant de prédire les précipitations à l'échelle de la commune de Bagnes. La première partie concerne le domaine de recherche de la climatologie où la réflexion s'étale sur au minimum un siècle. Elle se focalise sur les épisodes pluvieux et en particulier sur les fortes précipitations de l'ordre de 30 mm en 24 heures en tentant de déterminer de possibles modifications en fréquence et intensité depuis le début des mesures. Les valeurs de précipitations estimées pour un temps de retour de 500 ans seront aussi calculées. La deuxième partie du mémoire dispose d'un fort ancrage dans la pratique puisqu'elle découle d'un stage de six mois dans un bureau de météorologie. C'est donc ici le cadre de recherche de la météorologie qui nous sert de point d'ancrage. Le but est d'arriver à prédire, à l'aide d'un modèle, combien de précipitations déversent les systèmes dépressionnaires qui touchent le val de Bagnes.





## TABLES DES MATIERES

<b>1. Introduction et problématique .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Le val de Bagnes .....</b>	<b>17</b>
2.1. Cadre géographique .....	18
2.2. Cadre climatique .....	19
<b>3. Evolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Entremont durant le 20<sup>ème</sup> siècle .....</b>	<b>23</b>
3.1. Les stations de l'Entremont .....	24
3.2. La station de Martigny et région .....	33
3.3. La station de Sion et région .....	34
3.4. Conclusions .....	35
<b>4. Estimation des précipitations cinquentennales en Entremont .....</b>	<b>37</b>
4.1. La méthode de Gumbel .....	37
4.2. Résultats pour les stations étudiées .....	38
4.3. Résultats pour les stations de l'Entremont .....	39
4.4. Résultats pour la station de Martigny .....	44
4.5. Résultat pour la station de Sion .....	45
4.6. Conclusions .....	46
<b>5. Analyse de trois épisodes pluvieux extrêmes du 20<sup>ème</sup> siècle .....</b>	<b>49</b>
5.1. Intempéries du 24 au 25 août 1987 .....	49
5.1.1. Situation météorologique .....	49
5.1.2. Déroulement des précipitations .....	52
5.1.3. Conséquences des intempéries .....	52
5.2. Intempéries du 22 au 24 septembre 1993 .....	52
5.2.1. Situation météorologique .....	52
5.2.2. Déroulement des précipitations .....	55
5.2.3. Conséquences des intempéries .....	55
5.3. Intempéries d'octobre 2000 .....	56
5.3.1. Situation météorologique .....	56
5.3.2. Déroulement des précipitations .....	58
5.3.3. Conséquences des intempéries .....	58
5.4. Conclusions .....	59

<b>6. Essai de prévision de précipitations pour le val de Bagnes.....</b>	<b>61</b>
<b>7. Modèle de prévision de précipitations <i>HydroLog</i> .....</b>	<b>63</b>
7.1. Principe général .....	63
7.2. Implémentation.....	63
7.3. Variables d'entrée .....	65
7.4. Variables de sorties .....	68
7.5. Paramétrages .....	68
7.5.1. Paramétrage standard <i>METEORISK</i> .....	70
7.5.2. Paramétrages régimes nord-ouest et sud-ouest.....	71
7.5.3. Paramétrage régime de sud .....	75
7.5.4. Paramétrage situation à tendance orageuse .....	77
7.5.5. Tableau récapitulatif des paramétrages.....	79
<b>8. Performances obtenues avec le modèle <i>HydroLog</i> .....</b>	<b>81</b>
8.1. Indicateurs de performances .....	81
8.2. Résultats pour les précipitations faibles ou nulles .....	82
8.3. Conclusions .....	86
8.4. Résultats pour les fortes précipitations .....	87
8.4.1. Précipitations entre 21 et 40 mm .....	87
8.4.2. Précipitations > 40 mm .....	92
8.5. Conclusions .....	96
<b>9. Forces et faiblesses du modèle <i>HydroLog</i> .....</b>	<b>99</b>
9.1. Forces .....	99
9.2. Faiblesses .....	99
<b>10. Autres modèles de prévision de précipitations ou de crues.....</b>	<b>101</b>
10.1. MétéoSuisse .....	101
10.2. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne .....	103
10.3. Meteoliguria .....	105
10.4. Institut National Polytechnique de Grenoble .....	107
<b>11. Perspectives de développement de la prévision météorologique locale.....</b>	<b>109</b>
<b>12. Conclusion.....</b>	<b>111</b>
<b>13. Bibliographie .....</b>	<b>113</b>
<b>14. Annexes .....</b>	<b>119</b>

## TABLES DES ILLUSTRATIONS

### Cartes :

CARTE 1 : L'ENTREMONT ET SES VALLÉES (GOOGLE EARTH, 2010) .....	17
CARTE 2 : LOCALISATION DES STATIONS DE MESURE DE PRÉCIPITATIONS (GOOGLE EARTH, 2010) .....	24
CARTE 3 : POSITION DES FRONTS LE 23 AOÛT À 01H UTC (BULLETIN MÉTÉOSUISSE).....	50
CARTE 4 : POSITION DES FRONTS LE 24 AOÛT À 01H UTC (BULLETIN MÉTÉOSUISSE).....	51
CARTE 5 : POSITION DES FRONTS LE 25 AOÛT À 01H UTC (BULLETIN MÉTÉOSUISSE).....	51
CARTE 6 : POSITION DES FRONTS LE 22 SEPTEMBRE À 01H UTC (BULLETIN MÉTÉOSUISSE) .....	53
CARTE 7 : POSITION DES FRONTS LE 23 SEPTEMBRE À 01H UTC (BULLETIN MÉTÉOSUISSE) .....	54
CARTE 8 : POSITION DES FRONTS LE 24 SEPTEMBRE À 01H UTC (BULLETIN MÉTÉOSUISSE).....	54
CARTE 9 : ISOLIGNES DE PRÉCIPITATIONS MESURÉES DANS LA RÉGION DU SIMPLON ENTRE LE 22 ET LE 25 SEPTEMBRE 1993 (CREALP, 1994) .....	55
CARTE 10 : POSITION DES FRONTS LE 13 OCTOBRE À 12H UTC (BULLETIN MÉTÉOSUISSE).....	56
CARTE 11 : POSITION DES FRONTS LE 14 OCTOBRE À 12H UTC (BULLETIN MÉTÉOSUISSE).....	57
CARTE 12 : POSITION DES FRONTS LE 15 OCTOBRE À 12H UTC (BULLETIN MÉTÉOSUISSE).....	57
CARTE 13 : ISOLIGNES DE PRÉCIPITATIONS MESURÉES ENTRE LE 8 ET LE 17 OCTOBRE 2000 (GREBNER ET AL., 2000) .....	58
CARTE 14 : SITUATION D'OUEST (THILLET ET SCHUELLER, 2009) .....	71
CARTE 15 : SITUATION DE NORD-OUEST (THILLET ET SCHUELLER, 2009).....	73
CARTE 16 : SITUATION DE SUD-OUEST (THILLET ET SCHUELLER, 2009) .....	74
CARTE 17 : SITUATION DE SUD (MÉTÉOSUISSE).....	76
CARTE 18 : SITUATIONS D'ANTICYCLONE ESTIVALE (THILLET ET SCHUELLER, 2009).....	78
CARTE 19 : SITUATIONS DE MARAIS BAROMÉTRIQUE (THILLET ET SCHUELLER, 2009).....	78
CARTE 20 : BÉNÉFICE D'UNE HAUTE RÉOLUTION DANS LE CAS DE TOPOGRAPHIE COMPLEXE. SIMULATION DU VENT À 30 MÈTRES AU-DESSUS DU SOL DANS LE CANTON DE VAUD, AVEC LES MODÈLES <i>COSMO-2</i> ET <i>COSMO-7</i> RESPECTIVEMENT (MÉTÉOSUISSE, 2010) .....	103
CARTE 21 : CARTE CRÉÉE AVEC LE MODÈLE BOLAM (21 KM) POUR LES PRÉCIPITATIONS DANS LES PROCHAINES 24H.....	106
CARTE 22 : CARTE CRÉÉE AVEC LE MODÈLE BOLAM (6,5 KM) POUR LES PRÉCIPITATIONS DANS LES PROCHAINES 24H.....	106

### Figures :

FIGURE 1 : MOYENNE ANNUELLE DES PRÉCIPITATIONS EN SUISSE SUR LA PÉRIODE 1961-1990 (MÉTÉOSUISSE) .....	19
FIGURE 2 : EVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES EN SUISSE : TENDANCES 1900-2009 (FALLOT, 2010) 20	20
FIGURE 3 : EVOLUTION DU NOMBRE MOYEN DE JOURS DE PLUIE PAR AN EN SUISSE : TENDANCES 1900-2009 (FALLOT, 2010) .....	21
FIGURE 4 : EVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE ANNUELLE EN °C PAR DÉCENNIE DEPUIS 1901 (MÉTÉOSUISSE).....	22
FIGURE 5 : PAGE D'ACCUEIL DU SYSTÈME <i>HYDROLOG</i> .....	64
FIGURE 6 : MODULE DE GESTION DES DONNÉES DU SYSTÈME <i>HYDROLOG</i> .....	64
FIGURE 7 : MODULE DE GESTION DES IMAGES DU SYSTÈME <i>HYDROLOG</i> .....	65
FIGURE 8 : MODULE D'ANALYSE DU SYSTÈME <i>HYDROLOG</i> .....	66
FIGURE 9 : MODULE D'ANALYSE DU SYSTÈME <i>HYDROLOG</i> . EXEMPLE D'OUTPUT .....	67
FIGURE 10: LES TROIS MODÈLES NUMÉRIQUES DE PRÉVISION IMBRIQUÉS DU SYSTÈME <i>COSMO</i> . LE CENTRE EUROPÉEN POUR LES PRÉVISIONS À MOYENNE ECHELLE ( <i>ECMWF</i> ) EXPLOITE UN MODÈLE GLOBAL DÉCRIVANT LES ÉCHELLES SYNOPTIQUES. MÉTÉOSUISSE EXPLOITE UN MODÈLE À L'ÉCHELLE RÉGIONALE, <i>COSMO-7</i> ET À L'ÉCHELLE LOCALE, <i>COSMO-2</i> (MÉTÉOSUISSE, 2010).....	102
FIGURE 11 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE <i>MINERVE</i> (SOURCE : F. JORDAN, LCH-EPFL).....	104
FIGURE 12 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA MÉTHODE DES ANALOGUES (THÉVENOT, 2004) .....	108

## Graphiques :

GRAPHIQUE 1 : GRAND-ST-BERNARD : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1900-2009).....	25
GRAPHIQUE 2 : GRAND-ST-BERNARD : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1969-2009) .....	26
GRAPHIQUE 3 : BOURG-ST-PIERRE : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1900-2009) .....	27
GRAPHIQUE 4 : BOURG-ST-PIERRE : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1969-2009) .....	27
GRAPHIQUE 5 : ORSIÈRES : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1969-2009) .....	28
GRAPHIQUE 6 : VALLÉE DU ST-BERNARD : COMPARAISON JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM .....	29
GRAPHIQUE 7 : MAUVOISIN/FIONNAY : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1972-2009) .....	30
GRAPHIQUE 8 : MONTAGNIER : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1969-2009) .....	31
GRAPHIQUE 9 : VAL DE BAGNES: COMPARAISON JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM.....	32
GRAPHIQUE 10 : MARTIGNY : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1969-2009) .....	34
GRAPHIQUE 11 : SION : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1969-2009).....	35
GRAPHIQUE 12 : GRAND-ST-BERNARD : PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR AN CLASSÉES PAR RANG ET MESURÉES DE 1961 À 2009 AVEC ENTOURÉES EN ROUGE LES VALEURS ESTIMÉES POUR T 50 ANS, T 100 ANS, T 250 ANS ET T 500 ANS .....	39
GRAPHIQUE 13 : BOURG-ST-PIERRE : PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR AN CLASSÉES PAR RANG ET MESURÉES DE 1961 À 2009 AVEC ENTOURÉES EN JAUNE LES VALEURS MESURÉES SUR LA PÉRIODE DE 49 ANS ET QUI DÉPASSENT LES VALEURS ESTIMÉES T 50 ET T 100 ANS.....	40
GRAPHIQUE 14 : ORSIÈRES : PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR AN CLASSÉES PAR RANG ET MESURÉES DE 1969 À 2009 ET ESTIMATION À T 50 ANS, T 100 ANS, T 250 ANS ET T 500 ANS.....	41
GRAPHIQUE 15 : MAUVOISIN-FIONNAY : PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR AN CLASSÉES PAR RANG ET MESURÉES DE 1972 À 2009 ET ESTIMATION À T 50 ANS, T 100 ANS, T 250 ANS ET T 500 ANS .....	42
GRAPHIQUE 16 : MONTAGNIER : PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR AN CLASSÉES PAR RANG ET MESURÉES DE 1961 À 2009 ET ESTIMATION À T 50 ANS, T 100 ANS, T 250 ANS ET T 500 ANS .....	43
GRAPHIQUE 17 : MARTIGNY : PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR AN CLASSÉES PAR RANG ET MESURÉES DE 1961 À 2009 ET ESTIMATION À T 50 ANS, T 100 ANS, T 250 ANS ET T 500 ANS.....	44
GRAPHIQUE 18 : SION : PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR AN CLASSÉES PAR RANG ET MESURÉES DE 1961 À 2009 ET ESTIMATION À T 50 ANS, T 100 ANS, T 250 ANS ET T 500 ANS .....	45
GRAPHIQUE 19 : ECARTS ENTRE LES VALEURS MESURÉES ET PRÉDITES POUR LES CAS DE PRÉCIPITATIONS DÈS 21 MM .....	96

## Image :

IMAGE 1 : VUE DU BAS DU VAL DE BAGNES AVEC LA STATION DE VERBIER SUR LA DROITE (TIRÉ DE NDZALPS.CO.UK, 2010) . 18

## Tableaux :

TABLEAU 1 : FRÉQUENCES D'APPARITION EN % DES SITUATIONS CYCLONIQUES D'OUEST, DU SUD-OUEST À SUD-EST (SO-SE), DU NORD-OUEST ET NORD (NO+N) AYANT PROVOQUÉ DE FORTES PRÉCIPITATIONS (> 50 MM/JOUR) EN SUISSE DE 1901 À 1998. (FALLOT, 2000) .....	33
TABLEAU 2 : FRÉQUENCES D'APPARITION EN % DES 6 SITUATIONS MÉTÉOROLOGIQUES DE HESS-BREZOWSKI (HB) AYANT LE PLUS SOUVENT PROVOQUÉ DE FORTES PRÉCIPITATIONS (> 50 MM/JOUR) DANS LES DIFFÉRENTES RÉGIONS DE SUISSE DE 1901 À 1998. LA SIGNIFICATION DES ACRONYMES EST DISPONIBLE DANS LES ANNEXES. (FALLOT, 2000).....	36
TABLEAU 3 : FRÉQUENCES D'APPARITION DES DIFFÉRENTS COEFFICIENTS $R^2$ POUR LES DROITES D'AJUSTEMENT DE LA LOI DE GUMBEL POUR L'ENSEMBLE DE STATIONS SUISSES (FALLOT ET HERTIG, 2009) ET LES STATIONS ÉTUDIÉES DANS L'ENTREMONT ÉLARGI. ....	38

TABLEAU 4 : COMPARAISON ENTRE LES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES MESURÉES DE 1961 À 2009 ET LES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES ESTIMÉES POUR DIFFÉRENTS TEMPS DE RETOUR. ....	46
TABLEAU 5 : RÉCAPITULATIF DES VALEURS MAXIMALES JOURNALIÈRES (EN MM) SUR LA PÉRIODE D'ÉTUDE 1961-2009 ET LES VALEURS ESTIMÉES POUR T 50 ANS, T 100 ANS, T 250 ANS ET T 500 ANS (EN MM).....	47
TABLEAU 6 : PARAMÉTRAGES 1 ET 2 UTILISÉS LORS DES PREMIERS TESTS.....	69
TABLEAU 7 : PARAMÉTRAGE STANDARD <i>METEORISK</i> .....	70
TABLEAU 8 : PARAMÉTRAGE SITUATION DE NORD-OUEST.....	72
TABLEAU 9 : PARAMÉTRAGE SITUATION DE SUD-OUEST .....	73
TABLEAU 10 : PARAMÉTRAGE SITUATION DE SUD .....	75
TABLEAU 11 : PARAMÉTRAGE SITUATION ANTICYCLONIQUE OU DE MARAIS BAROMÉTRIQUE À TENDANCE ORAGEUSE.....	77
TABLEAU 12 : RÉCAPITULATIF DES DIFFÉRENTS PARAMÉTRAGES .....	79
TABLEAU 13 : MOYENNE DES ÉCARTS ENTRE LES VALEURS OBSERVÉES ET PRÉDITES ET ÉCART-TYPE POUR CHAQUE CLASSE POUR LES JEUX DE PARAMÈTRES JP1 ET JP2 .....	82
TABLEAU 14 : TABLE DE CONTINGENCE PAR CLASSES POUR LE JEU DE PARAMÈTRES 1 (JP1).....	84
TABLEAU 15 : TABLE DE CONTINGENCE PAR CLASSES POUR LE JEU DE PARAMÈTRES 2 (JP2).....	84
TABLEAU 16 : PERFORMANCES DES JEUX DE PARAMÈTRES 1 ET 2 POUR LES FAIBLES PRÉCIPITATIONS .....	85
TABLEAU 17 : MOYENNE DES ÉCARTS ENTRE LES VALEURS OBSERVÉES ET PRÉDITES ET ÉCART-TYPE POUR LES CAS ENTRE 21 ET 40 MM SELON LES PARAMÉTRAGES .....	87
TABLEAU 18 : DIFFÉRENCES ENTRE VALEURS OBSERVÉES ET PRÉDITES POUR LE PARAMÉTRAGE <i>METEORISK</i> ET PERFORMANCES DU PARAMÉTRAGE <i>METEORISK</i> (PRÉCIPITATIONS 21-40 MM).....	89
TABLEAU 19 : DIFFÉRENCES ENTRE VALEURS OBSERVÉES ET PRÉDITES POUR LE PARAMÉTRAGE NORD-OUEST ET PERFORMANCES DU PARAMÉTRAGE NORD-OUEST (PRÉCIPITATIONS 21-40 MM) .....	90
TABLEAU 20 : DIFFÉRENCES ENTRE VALEURS OBSERVÉES ET PRÉDITES POUR LE PARAMÉTRAGE SUD-OUEST ET PERFORMANCES DU PARAMÉTRAGE SUD-OUEST (PRÉCIPITATIONS 21-40 MM) .....	90
TABLEAU 21 DIFFÉRENCES ENTRE VALEURS OBSERVÉES ET PRÉDITES POUR LE PARAMÉTRAGE ORAGES ET PERFORMANCES DU PARAMÉTRAGE ORAGES (PRÉCIPITATIONS 21-40 MM).....	91
TABLEAU 22 : DIFFÉRENCES ENTRE VALEURS OBSERVÉES ET PRÉDITES POUR TOUS LES PARAMÉTRAGES ET PERFORMANCES GLOBALES TOUS PARAMÉTRAGES (PRÉCIPITATIONS 21-40 MM).....	91
TABLEAU 23 : MOYENNE DES ÉCARTS ENTRE LES VALEURS OBSERVÉES ET PRÉDITES ET ÉCART-TYPE POUR LES CAS > 40 MM .	92
TABLEAU 24 : DIFFÉRENCES ENTRE VALEURS OBSERVÉES ET PRÉDITES POUR LE PARAMÉTRAGE SUD-OUEST ET PERFORMANCES DU PARAMÉTRAGE SUD-OUEST (PRÉCIPITATIONS 21-40 MM) .....	94
TABLEAU 25 : DIFFÉRENCES ENTRE VALEURS OBSERVÉES ET PRÉDITES POUR TOUS LES PARAMÉTRAGES ET PERFORMANCES GLOBALES TOUS PARAMÉTRAGES (PRÉCIPITATIONS > 40 MM) .....	95



## 1. Introduction et problématique

Ce mémoire a pour thème deux sujets relativement peu développés à l'Institut de Géographie de l'Université de Lausanne (IGUL) : la climatologie et la météorologie. Actuellement, l'intérêt pour une meilleure connaissance des phénomènes climatiques et météorologiques est fort notamment en raison des problèmes qu'engendre le réchauffement climatique. Les autorités politiques sont particulièrement attentives aux avancées dans ce domaine relativement à une perspective d'aménagement du territoire et de gestion des risques naturels. Par exemple, les crues torrentielles et fluviales complexifient grandement la tâche des administrations cantonales et communales. C'est pourquoi, tout outil permettant une gestion plus efficace des risques climatiques et météorologiques est bienvenu. Dans ce but, ce mémoire propose deux approches : une sur les temps de retour à long terme des précipitations extrêmes et l'autre sur leur prévision au jour le jour. Les instituts nationaux comme MétéoSuisse fournissent déjà des prestations de qualité en terme de prévision tant au niveau national que régional (plateau suisse et Alpes). MétéoSuisse ne s'intéresse que peu à l'échelon local, de l'ordre d'une vallée. Partant de ce constat, ce travail est consacré aux particularités météorologiques locales du Val de Bagnes. Il s'articule en deux parties distinctes. L'une se charge d'analyser à l'aide d'outils statistiques les précipitations extrêmes dans le Val de Bagnes et l'Entremont durant le 20<sup>ème</sup> siècle. L'autre présente le paramétrage et les tests d'un logiciel informatique permettant de prédire les précipitations à l'échelle de la commune de Bagnes. Le cadre de recherche est donc double.

La première partie concerne le domaine de recherche de la climatologie où la réflexion s'étale sur un siècle au minimum. Elle se focalisera sur les épisodes pluvieux et en particulier sur les fortes précipitations de l'ordre de 30 mm en 24 heures en tentant de déterminer de possibles modifications en fréquence et intensité depuis le début des mesures. Les valeurs estimées pour un temps de retour jusqu'à 500 ans seront aussi calculées. Il s'agit donc d'une étude rétrospective. La deuxième partie du mémoire dispose d'un fort ancrage dans la pratique puisqu'elle découle d'un stage de six mois dans un bureau de météorologie. C'est donc ici le cadre de recherche de la météorologie qui nous sert de référence. Le but est d'arriver à prédire, à l'aide d'un modèle mathématique, combien de précipitations apportent les systèmes dépressionnaires qui touchent le val de Bagnes. L'idéal serait de réussir à repérer les épisodes de fortes pluies 24 heures à l'avance. A l'inverse du premier axe de recherche, le deuxième est essentiellement prospectif. Ces deux champs de recherche, bien que différents, sont parents. Nul doute qu'au fil du travail de mémoire des ponts pourront être jetés entre ces deux disciplines.

Pour mener une étude de ce type, le val de Bagnes est intéressant à plus d'un titre. Tout d'abord, la vallée possède des stations de mesures MétéoSuisse à Montagnier depuis 1961, à Mauvoisin de 1972 à 2001 et à Fionnay depuis 1996. D'autres données pluviométriques sont aussi recueillies à la station agronomique de Bruson et aux Forces Motrices de Mauvoisin à Fionnay pour les vingt dernières années. Pour les données couvrant l'ensemble du 20<sup>ème</sup> siècle, les stations de Bourg-St-Pierre, du Grand-St-Bernard ainsi que celles de Martigny et de Sion seront mises à contribution. Afin de mieux connaître une région en termes climatique et météorologique, de telles données sont d'une valeur inestimable. La longévité du recueil est aussi extrêmement importante afin de dégager une tendance climatique à long terme. Ensuite, il existe au sein de la commune de Bagnes une vraie volonté de développer les prévisions météorologiques locales et plus particulièrement de connaître les quantités de précipitations futures. C'est d'ailleurs le responsable communal qui a mandaté la société *METEORISK* à ce sujet afin de réaliser un logiciel de prévision de précipitations.

Tous les prérequis à la réalisation d'une telle étude semblent réunis. Pour la première partie du mémoire, plus centrée sur la climatologie, les séries de données de précipitations existent. Pour la seconde partie qui concerne la prévision météorologique, les données sont aussi disponibles et l'administration communale soutient le projet.

Ces conditions initiales amènent à poser les deux questions suivantes. Le mémoire essaiera d'y répondre au travers de chacune de ses parties.

- *Y-a-t-il eu une évolution dans la fréquence et la quantité des précipitations extrêmes en Entremont durant le 20<sup>ème</sup> siècle et qu'en est-il de la tendance future?*
  
- *Est-ce que le modèle HydroLog est capable de prédire les situations de précipitations pour le val de Bagnes et également les précipitations extrêmes ?*

La première question utilisera les outils de recherche de la climatologie. Pour la partie initiale, ce sont les données de Bourg-St-Pierre et du Grand-St-Bernard qui seront utilisées car elles couvrent l'entier du siècle. Les séries de relevés plus courtes de Montagnier et Orsières notamment seront aussi mises à contribution. La deuxième partie de cette question appellera les données des stations météorologiques de l'Entremont qui seront traitées statistiquement afin de déterminer les précipitations



avec un temps de retour de 500 ans. Les réponses qu'amènera cette première interrogation seront intéressantes du point de vue climatique, mais aussi du point de vue de l'aménagement du territoire et du dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues. En effet, connaître la tendance à moyen voire long terme de l'évolution des précipitations permet de mieux anticiper les défis que posent les risques naturels aux autorités politiques.

La deuxième interrogation découle d'une demande de la commune de Bagnes. Le service de la sécurité désire connaître par avance la quantité de précipitations que la vallée pourrait recevoir. Le logiciel *HydroLog* tentera donc une prévision à 24 heures pour le territoire de la commune.

Ces deux questions de recherche sont volontairement précises pour ne pas se perdre dans un travail à la problématique trop large. Elles permettent au mémoire de garder un cap précis et de fournir des résultats qui pourront être exploités par des entités engagées sur le terrain.



## 2. Le val de Bagnes

Le territoire de la commune de Bagnes constitue le terrain d'étude de ce travail. La volonté d'étudier la climatologie et météorologie locale nécessite néanmoins l'élargissement du périmètre à l'Entremont pour des raisons de disponibilité des données météorologiques. Le fond du val de Bagnes n'est pas compris dans le périmètre de recherche. Les causes de ce choix sont les suivantes :

- Pas de station météorologique en amont du barrage
- Pas ou peu d'infrastructures vulnérables en amont du barrage
- Rôle tampon du barrage en cas de crue difficile à évaluer dans une perspective de prévision des débits

Les données météorologiques nécessaires à l'étude ont donc été recueillies dans tout l'Entremont. Les stations du Grand-St-Bernard et de Bourg-St-Pierre ont été mises à contribution pour la longévité du recueil des données (depuis 1901). La commune de Bagnes ne dispose pas sur son territoire de suffisamment de stations météorologiques en place depuis plus de cinquante ans afin de mener à bien la présente étude. L'Entremont est le district qui regroupe les communes de Bagnes, Vollèges, Sembrancher, Orsières, Liddes et Bourg-St-Pierre. Il se compose des vallées de Bagnes, du St-Bernard et de Ferret.



Carte 1 : L'Entremont et ses vallées (Google Earth, 2010)

## 2.1. Cadre géographique

Le val de Bagnes est situé en rive gauche du Rhône dans le canton du Valais. La vallée débouche à Sembrancher où elle rejoint la vallée du St-Bernard qui a rencontré celle de Ferret à Orsières. Ensuite, la vallée continue jusqu'à Martigny. La commune de Bagnes englobe l'entier de la vallée depuis le torrent du Merdenson non loin de Sembrancher jusqu'au sommet du glacier d'Otemma (34 kilomètres). La zone étudiée s'arrête au barrage de Mauvoisin (16 kilomètres). Le point culminant s'élève à 4'314 m d'altitude : Le Grand-Combin. Le point le plus bas se situe à l'embouchure du torrent du Merdenson à 780 m d'altitude. La vallée de Bagnes est arrosée par la Dranse qui prend naissance au portail du glacier d'Otemma et qui se jette dans le Rhône à Martigny. De nombreux torrents dévalent les versants de la vallée. Certains sont très actifs en cas d'orages et sont potentiellement dangereux pour les infrastructures. C'est une vallée typiquement glaciaire en forme de U dans sa partie aval et plus en forme de V à l'amont dès le village de Fionnay situé à 1'500 m. La surface de la commune est majoritairement composée de surfaces improductives telles des glaciers et des pierriers. Les terres arables se situent dans le bas de la vallée où l'agriculture et l'habitat se partagent le territoire. Plus haut, la forêt recouvre les versants jusqu'à environ 2'000 m. A noter que des alpages (exploitations bovines et ovines) occupent les prairies alpines situées entre l'étage forestier et glaciaire.

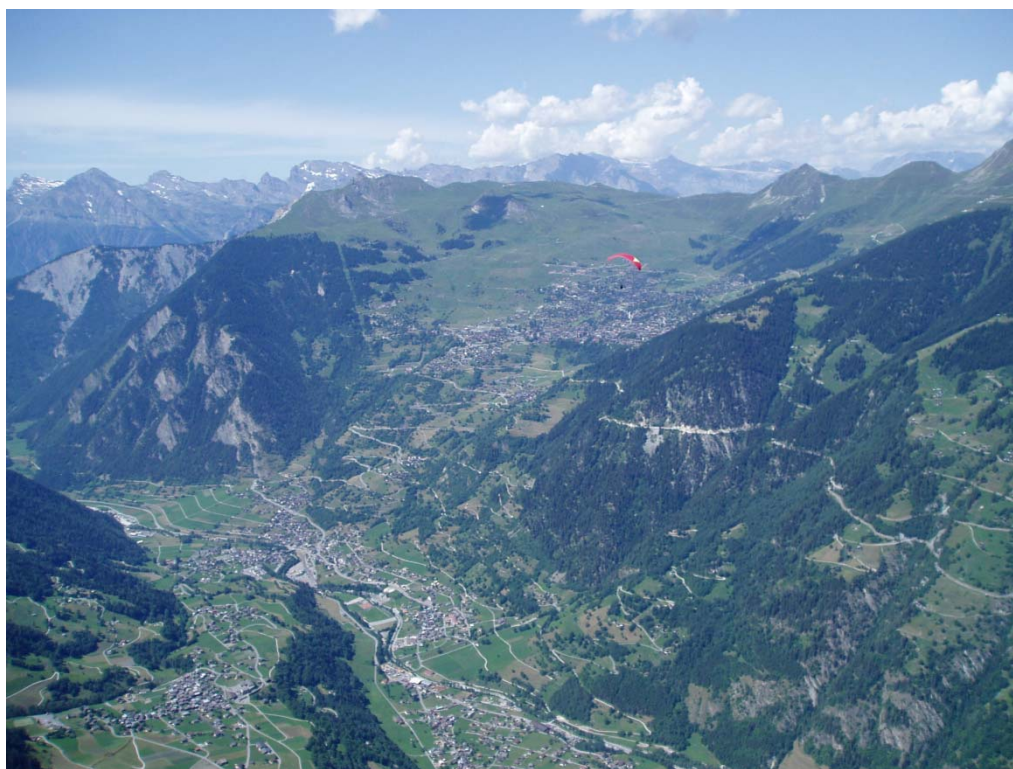


Image 1 : Vue du bas du val de Bagnes avec la station de Verbier sur la droite (tiré de ndzalps.co.uk, 2010)

## 2.2. Cadre climatique

Le climat du val de Bagnes, à l'image de celui de la Suisse dans son ensemble, est fortement influencé par la proximité de l'Atlantique dont l'air tempéré et humide est transporté vers les Alpes par les courants d'ouest dominants. Cette situation a pour effet, d'une part, de radoucir considérablement les conditions hivernales et de rafraîchir les étés, et d'autre part, de fournir fréquemment pour la plupart des régions de Suisse des précipitations en suffisance. Dans ce contexte, la chaîne des Alpes agit comme une barrière climatique majeure entre le nord et le sud de la Suisse.

Outre leur rôle de frontière climatique entre le nord et le sud du pays, les Alpes regorgent également de micro-climats comme celui qui prévaut dans le val de Bagnes. Une des particularités majeures du climat des vallées intra-alpines réside dans sa relative sécheresse. Le val de Bagnes n'y fait pas exception. Cette vallée est plutôt abritée des précipitations originaires du nord comme du sud, excepté en amont du barrage de Mauvoisin où les perturbations peuvent déborder depuis le sud. Alors que les Préalpes, le versant nord des Alpes et le sud ont une moyenne de précipitations de 2000 mm/an, le Valais se contente de 500 à 600 mm/an. La carte ci-dessous représente la moyenne annuelle de précipitation sur les années 1961 à 1990. Le val de Bagnes reçoit en moyenne entre 700 et 1'100 mm/an de précipitation. Le fond de la vallée est plus fortement arrosé avec 1'500 à 1'900 mm/an.

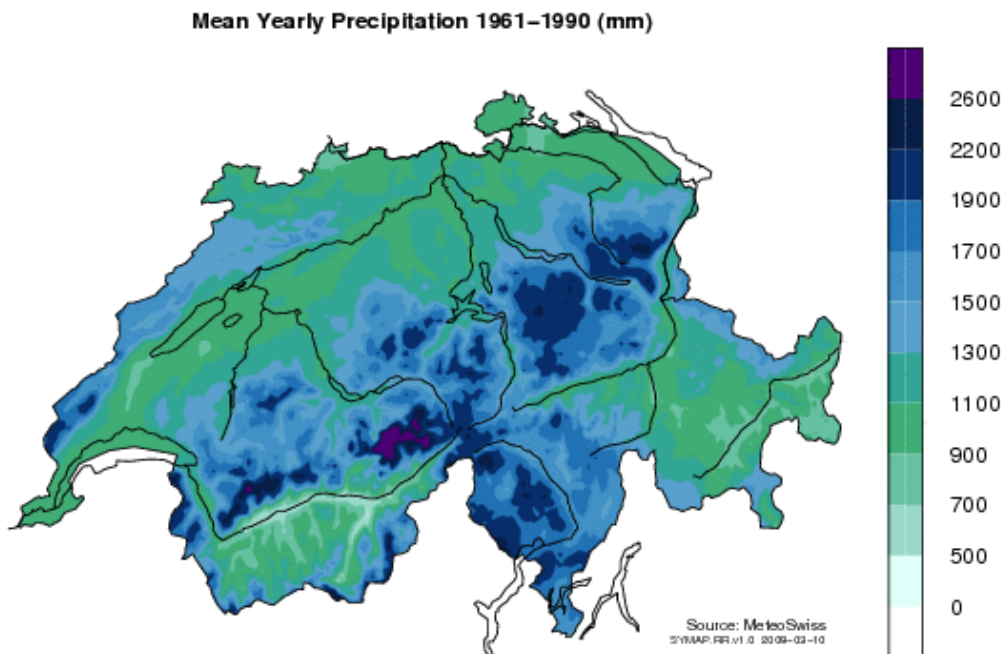


Figure 1 : Moyenne annuelle des précipitations en Suisse sur la période 1961-1990 (MétéoSuisse)

A l'instar de la vallée du Rhône, le val de Bagnes jouit d'un climat plutôt sec à l'échelle nationale. Il n'y a guère que l'Engadine qui peut se targuer de recevoir aussi peu de précipitations. C'est une des particularités climatiques propre aux vallées intra-alpines principales et latérales. Pour ces dernières, il n'y a que leur extrémité en bordure des crêtes sud ou nord des Alpes qui reçoit plus de précipitations comme indiqué sur la carte. A noter, qu'au-dessus de 1'500 m environ, les précipitations hivernales tombent essentiellement sous forme de neige.

La figure ci-dessous représente la tendance des précipitations moyennes pour 151 stations de Suisse de 1900 à 2009. A Martigny et Bourg-St-Pierre, la quantité de précipitations moyennes a augmenté de 1 à 2% par décennie. Au Grand-St-Bernard, la hausse est de 3 à 4%. En consultant les annexes 1, 3, 5 et 7, il est notable que les précipitations moyennes en Suisse durant le 20<sup>ème</sup> siècle ont le plus fortement augmenté en hiver (+ 16%) et le plus faiblement en été (+ 0-1%). A l'échelle de la Suisse, les précipitations moyennes annuelles ont augmenté de 0.8% par décennie, soit 8% durant le 20<sup>ème</sup> siècle. Le Valais se distingue par une hausse plus marquée (+ 12%) des précipitations moyennes annuelles durant cette période (Fallot, 2010).

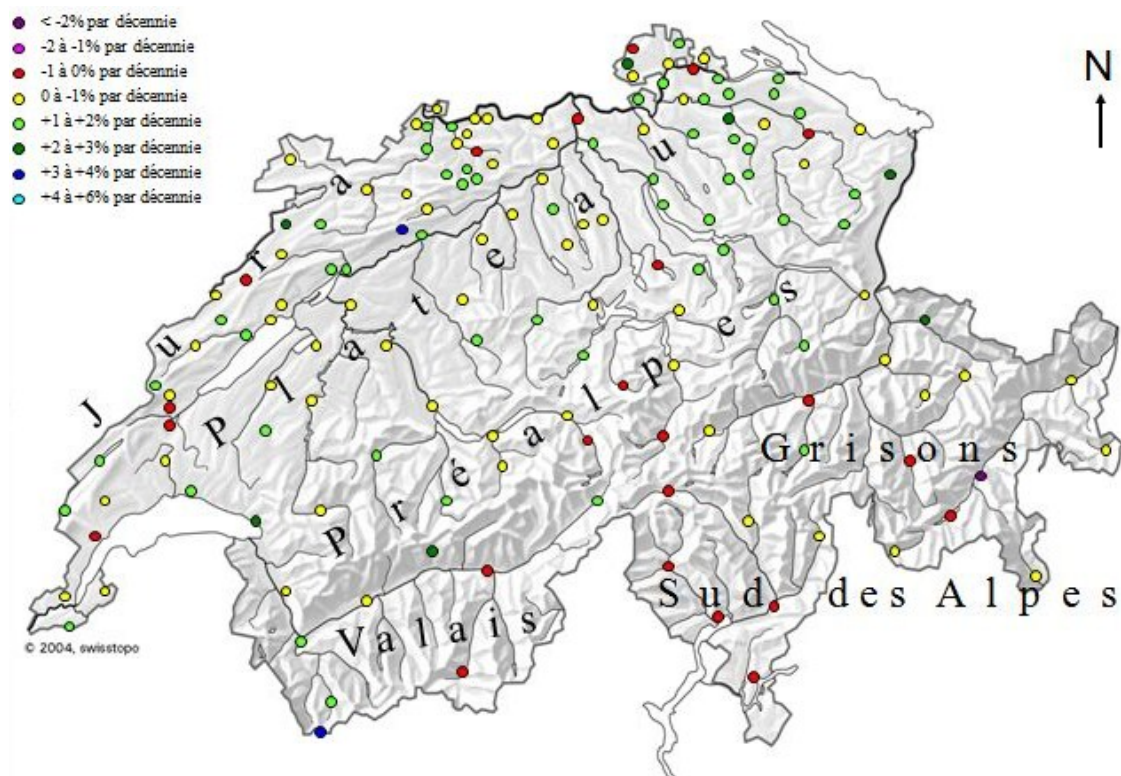


Figure 2 : Evolution des précipitations moyennes annuelles en Suisse : tendances 1900-2009 (Fallot, 2010)

Ci-dessous, la figure illustre que les précipitations moyennes ont davantage augmenté que les nombres de jour de pluie pour toutes les saisons. Les nombres de jours de pluie ont aussi augmenté en hiver, mais moins fortement que les précipitations. Par contre, ces nombres de jours ont très légèrement diminué dans la plupart des régions au printemps, en été, en automne ainsi qu'à l'échelle annuelle, sauf en Valais (annexe 1 à 8). Cela signifie que l'intensité moyenne des précipitations a augmenté durant le 20<sup>ème</sup> siècle en Suisse et ceci pour toutes les saisons.

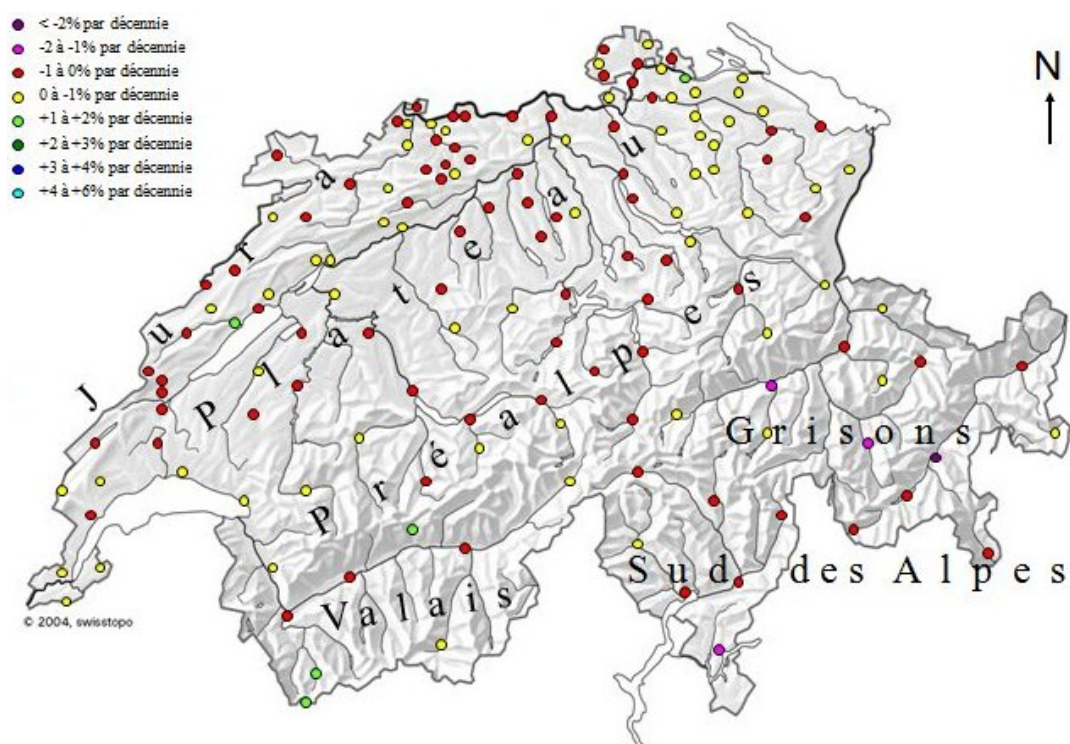
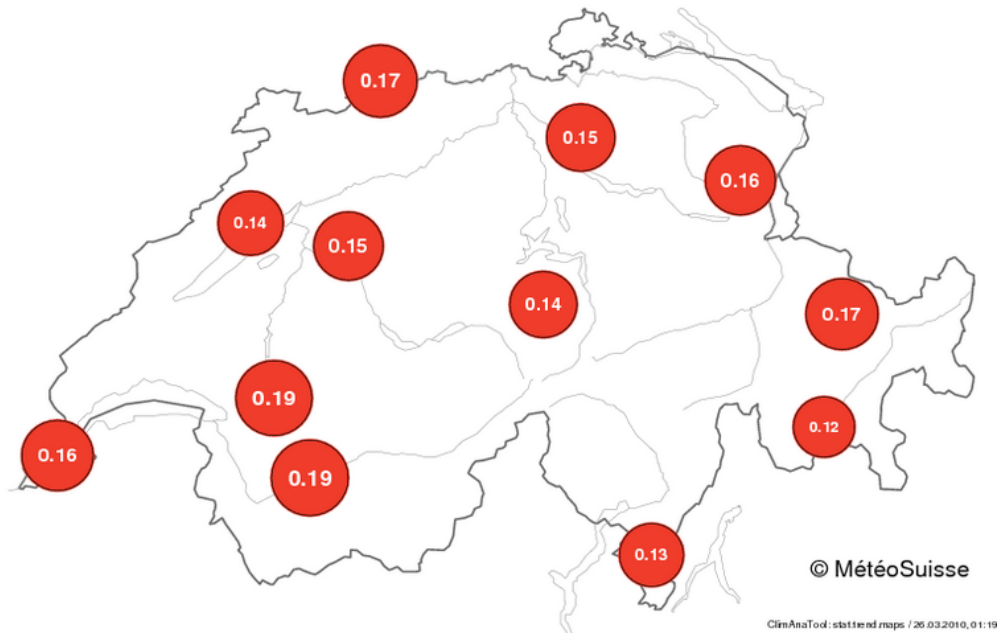


Figure 3 : Evolution du nombre moyen de jours de pluie par an en Suisse : tendances 1900-2009 (Fallot, 2010)

Tout comme dans le reste de la Suisse, les températures dans le val de Bagnes dépendent principalement de l'altitude. A 1'500 m, selon MétéoSuisse, les températures moyennes sont d'environ -5°C en hiver et de 11°C en été. L'illustration ci-dessous montre une augmentation des températures moyennes par décennie notamment en Valais.

**Tendances de la température annuelle [°C/décennie]  
1901–2009** sign.: p<0.05



**Figure 4 : Evolution de la température annuelle en °C par décennie depuis 1901 (MétéoSuisse)**

Depuis 1901, les températures moyennes annuelles ont augmenté de 0.12°C à 0.19°C par décennie en Suisse. Le réchauffement le plus fort se situe en Valais (Sion) et dans les Préalpes romandes (Château d'Oex). Ce constat est extensible au val de Bagnes. D'une manière générale, les températures dans la vallée sont influencées par les masses d'air en provenance de l'océan Atlantique. Les masses d'air du sud réchauffent parfois la vallée sans pour autant que le foehn souffle. Bagnes est à l'abri car le fond de la vallée n'est pas directement connecté (relief) avec le versant sud des Alpes. Ce vent alimenté par une dépression au sud des Alpes touche principalement les vallées voisines du St-Bernard et de Ferret. En hiver, des masses d'air froid en provenance du nord contribuent à l'installation de périodes froides. Le régime thermique du val de Bagnes ne diffère pas significativement des autres vallées de la rive gauche du Rhône.



### **3. Evolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Entremont durant le 20<sup>ème</sup> siècle**

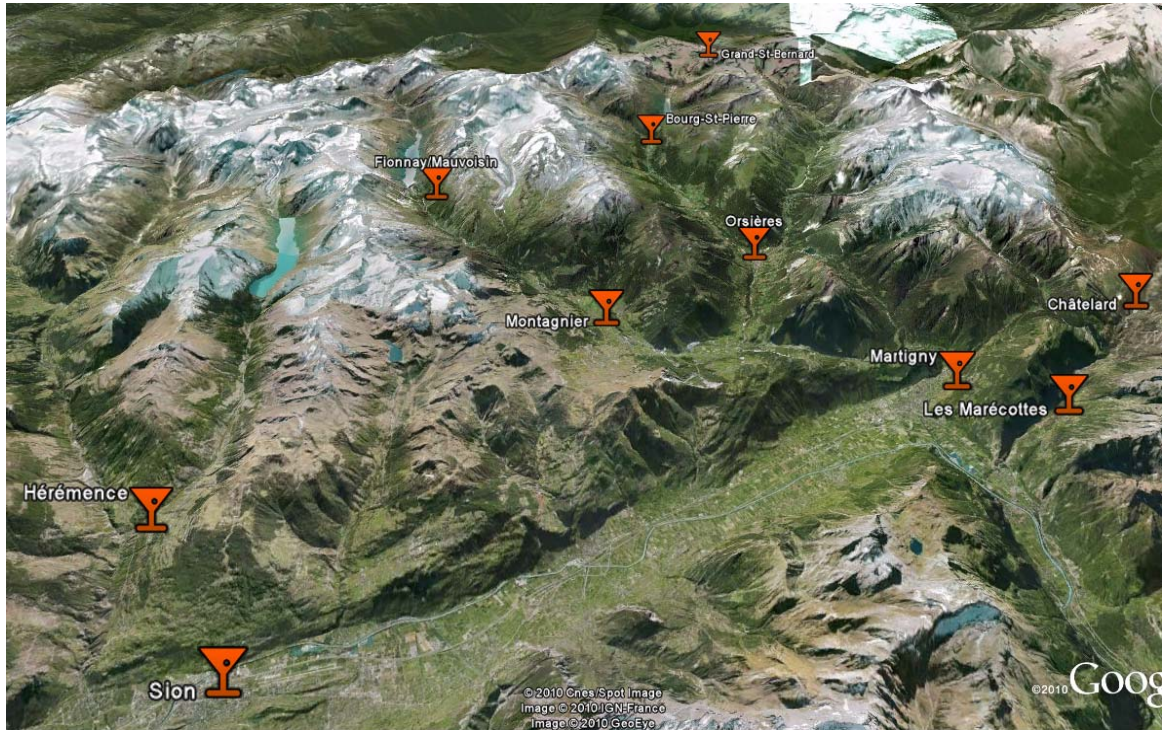
De nombreux climatologues pensent que les précipitations abondantes et les évènements extrêmes seront plus nombreux dans le futur. Le réchauffement climatique en serait la cause. Beniston et al. (2007) ont montré une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes en Europe pendant la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Bader et Kunz (1998) ont démontré que la Suisse n'est pas épargnée par cette tendance et ont constaté une augmentation des épisodes de précipitations extrêmes depuis 1980. Une autre étude (Fallot, 2000) montre aussi l'augmentation des jours avec des précipitations > 50 mm en Suisse depuis 1973. L'étude du présent chapitre se limite à l'aire géographique entre le Grand-St-Bernard et Sion en se concentrant tout particulièrement sur l'Entremont. Les stations sont comparées sur la période 1969-2009.

Dans leur article sur l'évolution des précipitations extrêmes en Suisse, Fallot a pris la valeur de 50 mm de pluie pour définir un jour avec des précipitations abondantes. Le Valais et le val de Bagnes en particulier sont des régions particulièrement sèches en raison des reliefs qui les entourent. Cette valeur de 50 mm a donc été ramenée à 30 mm afin de dénombrer suffisamment de jours pour dégager une tendance significative quant à l'évolution des fortes précipitations. Le cumul de pluie entre 00h00 et 23h59 doit donc être au moins de 30 mm pour qu'une journée soit considérée comme « à précipitations abondantes ».

Les jours avec des précipitations supérieures ou égales à 30 mm ont été isolés pour toutes les stations étudiées. Ensuite, ces jours ont été additionnés pour chaque année. La présentation sous forme de graphique illustre les variations absolues d'année en année et les tendances à la baisse, stables ou à la hausse des jours avec des précipitations abondantes. En outre, une courbe de tendance permet une visualisation plus aisée de l'évolution sur l'ensemble des années de mesure. Afin de mieux pouvoir comparer les stations entre elle, l'évolution des courbes de tendance a été traduite en pourcentage pour chaque station. C'est la différence en % entre la valeur de la courbe de tendance au début de la période de mesures et la valeur à la fin. L'augmentation ou la diminution des jours avec précipitations > 30 mm par an est ainsi exprimée en termes relatifs.

Afin d'obtenir une vue d'ensemble la plus complète possible, toutes les stations de MétéoSuisse encore en service recueillant des données depuis au moins 25 ans et se situant entre Sion et l'Entremont ont été retenues. Les stations des réseaux privés ne sont pas en place depuis suffisamment de temps pour fournir des données significatives par rapport à l'évolution des jours à fortes précipitations. Comme le

montre l'illustration ci-dessous la couverture de l'Entremont par les stations de MétéoSuisse est suffisamment homogène pour permettre une analyse valable.



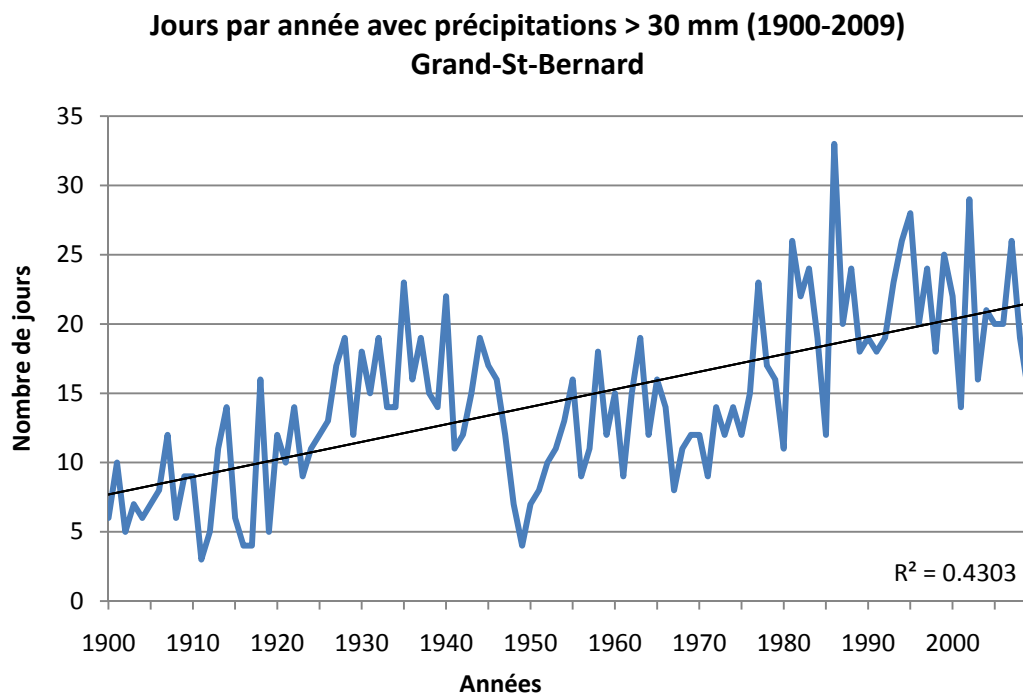
Carte 2 : Localisation des stations de mesure de précipitations (Google Earth, 2010)

### 3.1. Les stations de l'Entremont

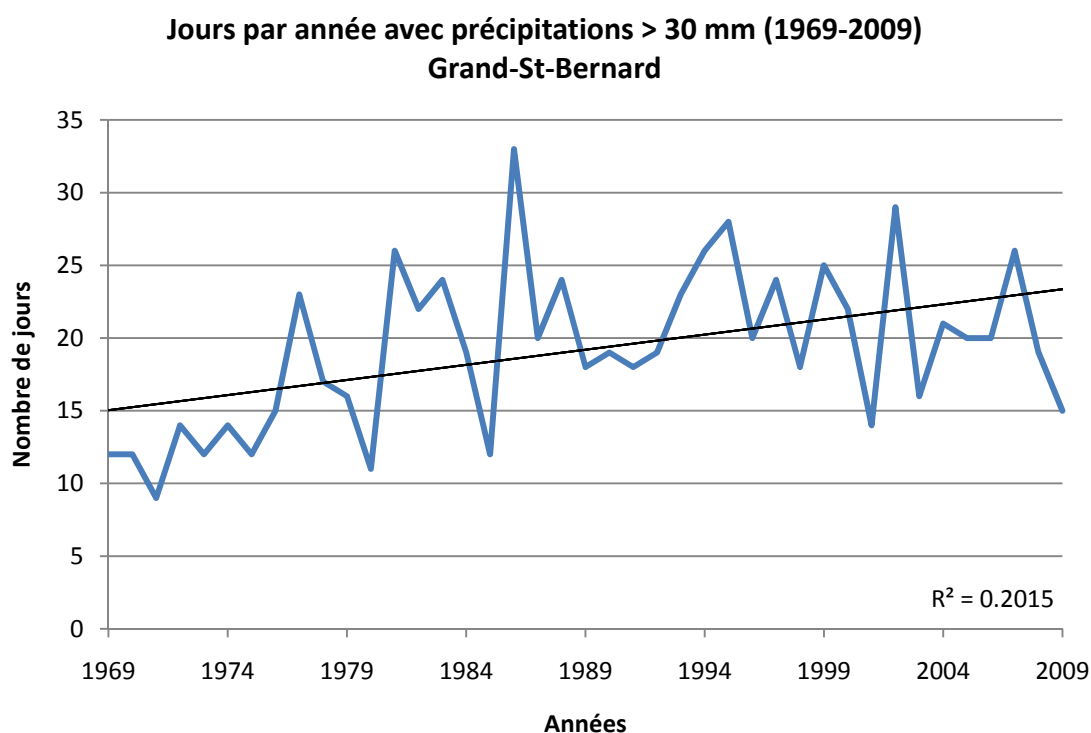
La station du Grand-St-Bernard est la station qui affiche la plus forte évolution à la hausse des jours avec des précipitations > 30 mm. De 1900 à 1945, la tendance est à l'augmentation. Entre 1945 et 1955, les jours de précipitations > 30 mm sont plus rares tout comme au début des années 70. Entre ces périodes, la hausse est continue. Cela se traduit par un pic à 23 jours/an avant 1950 et 33 jours/an après les années 1950. Malgré quelques baisses passagères, la tendance est donc clairement à un plus grand nombre de jours avec des précipitations > 30 mm.

Il est toutefois nécessaire de relativiser quelque peu ces résultats. En effet, la station du Grand-St-Bernard est particulière à plus d'un titre. Premièrement, elle se situe au passage d'un col nord-sud très exposé aux divers courants météorologiques. Les vents y sont forts. Ils transportent les précipitations, notamment neigeuses, et provoquent de possibles accumulations sur le lieu de mesure. De plus, les précipitations proviennent tant du côté suisse qu'italien. Deuxièmement, le lieu de mesure a été déplacé durant le 20<sup>ème</sup> siècle. Ces déplacements quoique minimes peuvent influencer

la quantité de précipitations reçues par la station de mesures. Les bâtiments de l'Hospice peuvent aussi jouer un rôle d'ombre météorologique ou l'inverse selon le positionnement du lieu de mesure des précipitations. Actuellement, la station se trouve contre la façade est du bâtiment de l'Hospice au bout d'un bras d'environ 2.5 m de long. Néanmoins, la tendance à la hausse des jours avec précipitations > 30 mm est confirmée par les calculs effectués en d'autres points sur la crête principale des Alpes bien qu'aucune station n'est située pareillement à la frontière météorologique nord-sud. Il serait peut-être judicieux de comparer les données du Grand-St-Bernard avec celles relevées dans la vallée d'Aoste pour constater s'il y a aussi une augmentation du nombre de jours avec des fortes précipitations.



**Graphique 1 : Grand-St-Bernard : jours par année avec précipitations > 30 mm (1900-2009)**

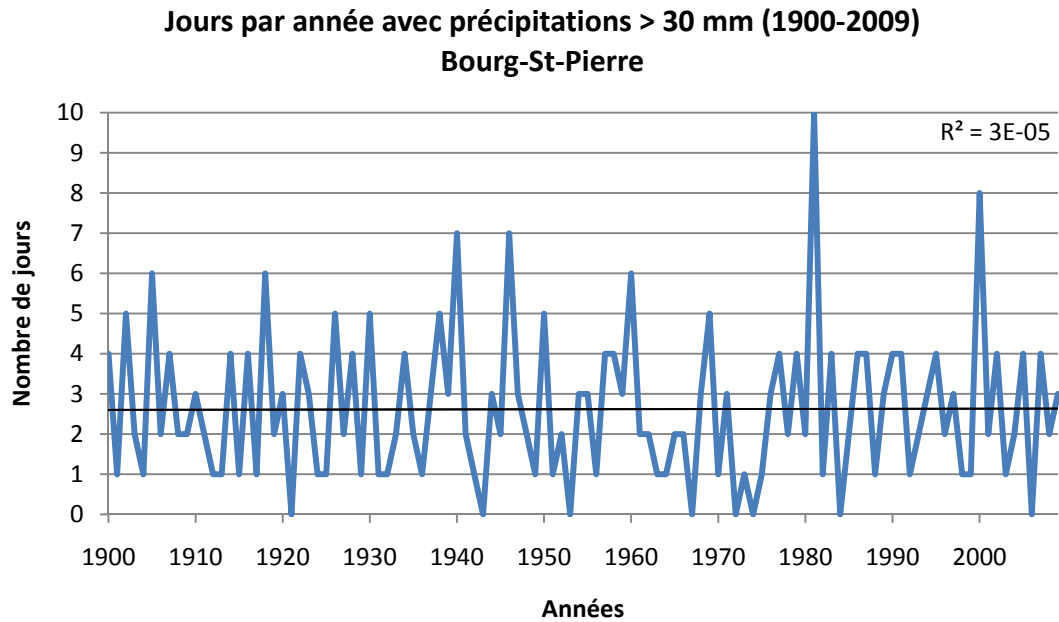


**Graphique 2 : Grand-St-Bernard : jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)**

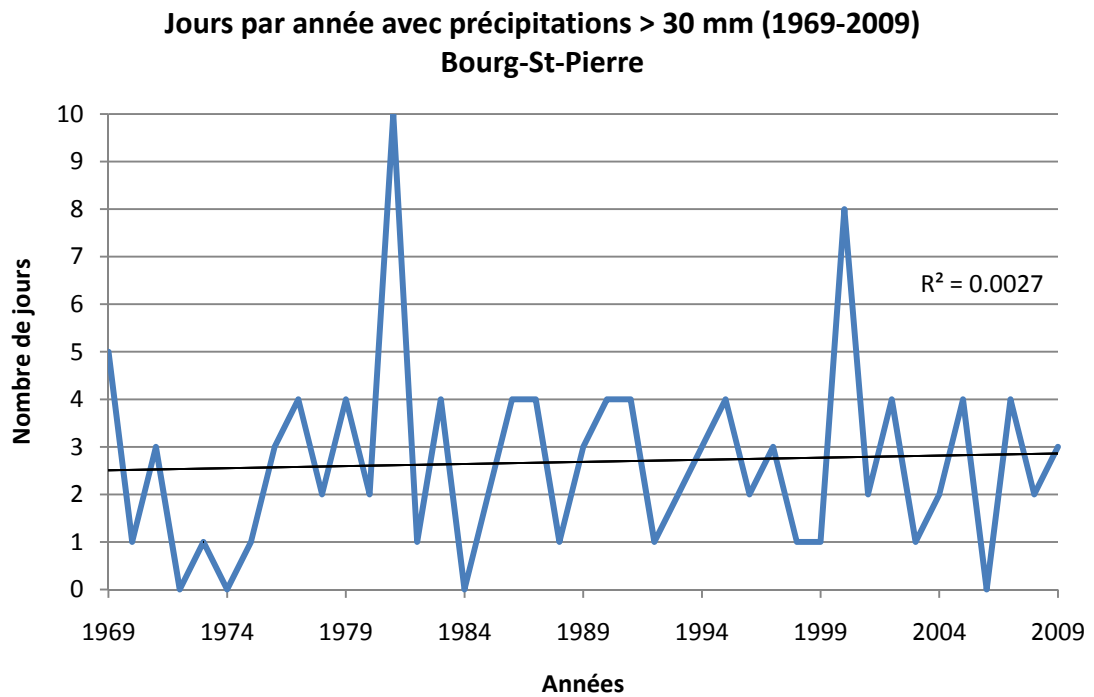
Située plus bas dans la vallée du St-Bernard, la station du village de Bourg-St-Pierre affiche une tendance quasi stable de 1900 à 2009. Les jours avec précipitations > 30 mm varie de 0 à 7 par année avec une pointe à 10 dans les années 1980. Jusqu'en 1950, entre 0 et 7 jours reçoivent plus de 30 mm de précipitations par année. Entre 1950 et 1975, la même diminution des jours > 30 mm que constatée au Grand-St-Bernard est observée. Dans cette période, 4 années comptent 0 jour parmi les 7 années à 0 jour > 30 mm que compte le siècle. Dès 1975, la tendance est à une variation entre 0 et 4 jours > 30 mm. Des pointes à 8 et 10 jours par année maintiennent la tendance stable voire légèrement croissante depuis 1969.

La différence par rapport à la station du Grand-St-Bernard est importante si l'on tient compte de la proximité des deux stations qui se trouvent à 10 km l'une de l'autre. Leur situation géographique respective est cependant bien différente. La station du Grand-St-Bernard est située sur un col tandis que celle de Bourg-St-Pierre se trouve dans une vallée du versant nord des Alpes. Les flux de sud très présents au col n'atteignent pas avec la même vigueur voire pas du tout la station plus en aval. Si l'augmentation des jours avec précipitations > 30 mm au col est due aux régimes du sud alors la stagnation des jours > 30 mm dans la vallée située au nord est compréhensible. Il faut relever que la fréquence des fortes précipitations ne dépend pas seulement de la direction des afflux d'air mais aussi de l'activité des fronts ou de la dépression pour une situation

donnée. Cette activité s'est peut-être renforcée avec le réchauffement climatique (Attinger, 2002). L'analyse de la station d'Orsières encore plus bas dans la vallée permettra de mieux comprendre ce phénomène.



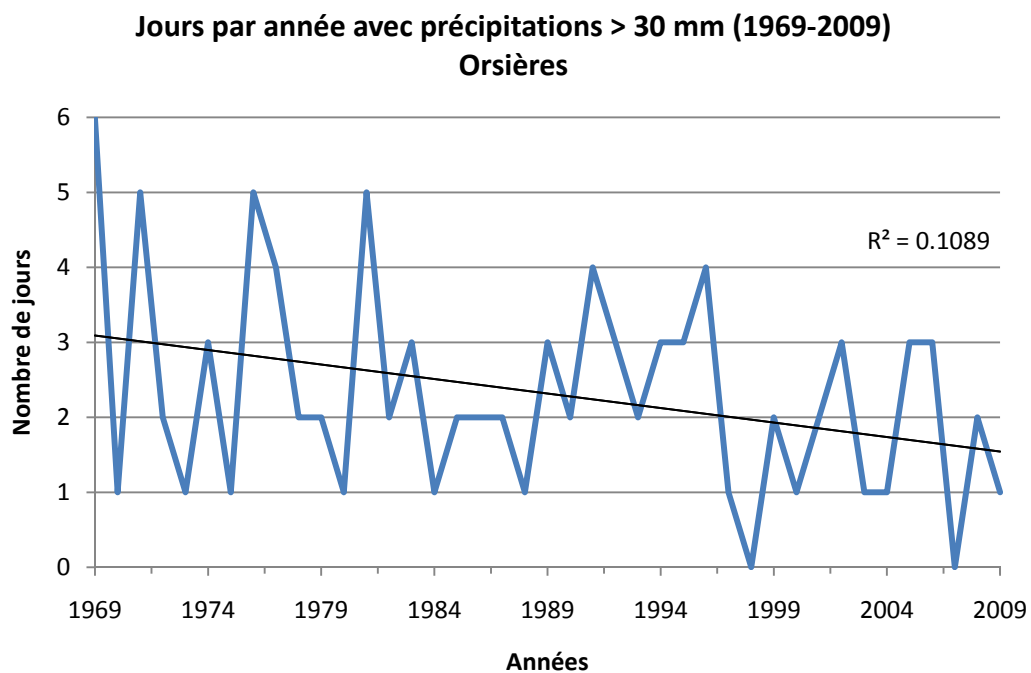
Graphique 3 : Bourg-St-Pierre : jours par année avec précipitations > 30 mm (1900-2009)



Graphique 4 : Bourg-St-Pierre : jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)

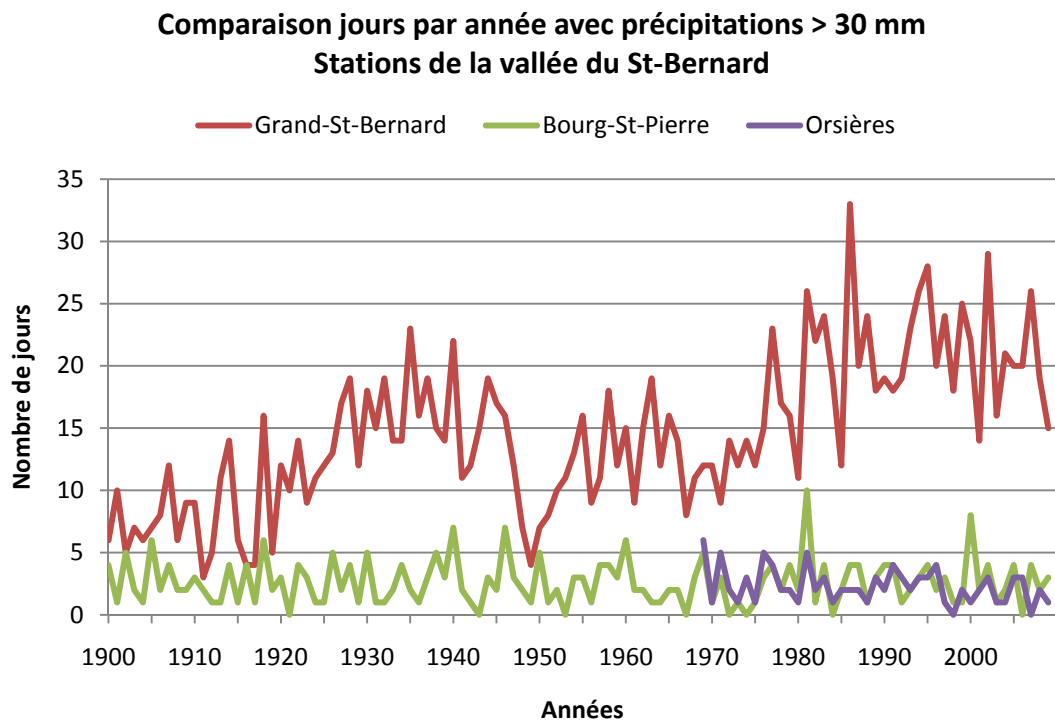
La station d'Orsières est active depuis 1969. Elle se situe à 20 km en aval du col du Grand-St-Bernard à la confluence des vallées du St-Bernard et de Ferret. La tendance sur les 40 dernières années est nettement à une baisse des jours par année avec précipitations > 30 mm. Cette baisse est particulièrement marquée dans les années 1980 et depuis la fin des années 1990 où aucune année ne dépasse 3 jours > 30 mm. Depuis 1997, deux années comptent même aucun jour avec précipitations > 30 mm.

Ces observations rejoignent celles déjà effectuées pour la station de Bourg-St-Pierre. Elles permettent également de poser de nouvelles hypothèses afin d'expliquer cette baisse. Les perturbations en provenance du sud n'atteignent pas Orsières. Par contre, les épisodes de foehn, un vent chaud et sec qui descend la vallée, semblent avoir augmenté selon les anciens. La tendance à la baisse des jours avec précipitations > 30 mm à Orsières peut être expliquée de la manière suivante. Le Grand-St-Bernard voit ses jours à fortes précipitations augmenter à cause des perturbations en provenance du sud. Dans la vallée, les jours de foehn sont par extension plus nombreux. Le foehn, qui souffle plus souvent, empêche d'autant plus les masses d'air humide du secteur ouest de se décharger sur Orsières. Elles sont soit stoppées dans la région des Préalpes soit dirigées vers les autres vallées latérales comme le val de Bagnes. Selon Fallot (2000), la fréquence des fortes précipitations a augmenté le plus faiblement au sud des Alpes durant la 2<sup>ème</sup> moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Par contre, elle a sensiblement augmenté dans le Haut-Valais (depuis 1975) qui est très exposé aux afflux d'air humide du sud-ouest à sud-est.



**Graphique 5 : Orsières : jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)**

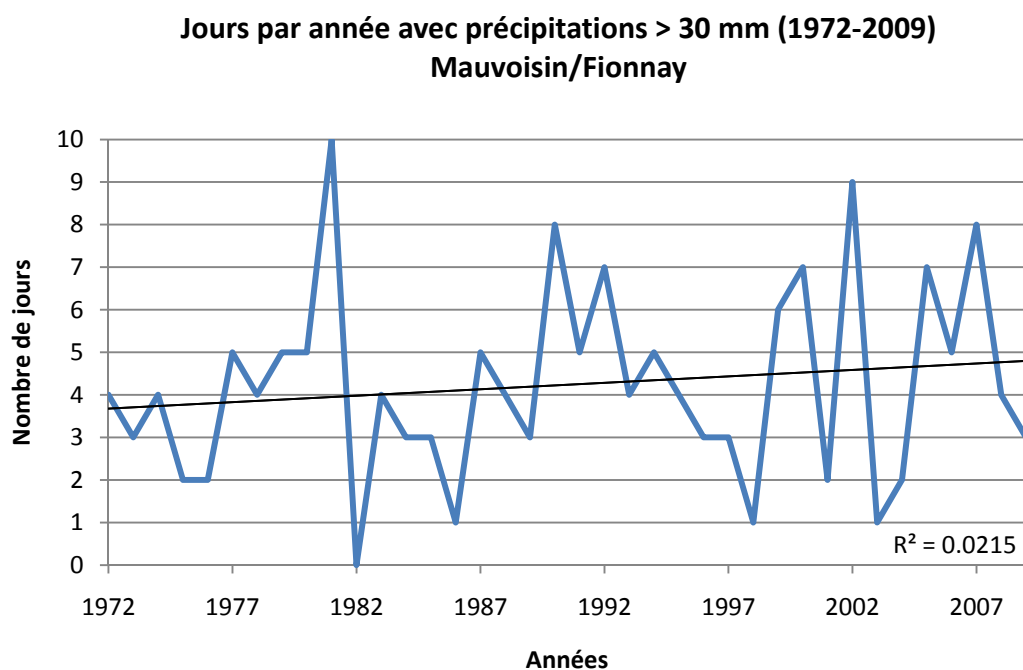
Ce graphique comparatif illustre les différences absolues de jours avec précipitations > 30 mm par année et par station. En termes relatifs, la station du Grand-St-Bernard voit une augmentation, de 1900 à 2009, de 182.9% (à 7.6 jours/an) de ses jours avec précipitations > 30 mm par année. L'augmentation est de 56.7% à 15 jours/an depuis 1969. La station de Bourg-St-Pierre voit ses jours à fortes précipitations quasi stagner de 1900 à 2009. Dès 1969, la tendance est très légèrement à la hausse de l'ordre de 16% à 2.5 jours/an. Enfin, la station d'Orsières accuse une baisse plus importante de ce genre de journées de l'ordre de 48.4% à 3.1 jours/an. Comme ces chiffres l'indiquent, l'écart du nombre de jours avec des fortes précipitations (> 30 mm) est en train de s'accroître entre le haut, le milieu et le bas de la vallée du St-Bernard.



**Graphique 6 : Vallée du St-Bernard : comparaison jours par année avec précipitations > 30 mm**

La station de Mauvoisin/Fionnay regroupe les relevés de précipitations au barrage de Mauvoisin de 1972 à 1995 et ceux de Fionnay de 1996 à 2009. La station de Fionnay est en fonction depuis 1996 tandis que celle de Mauvoisin l'a été jusqu'en 2001. Distantes de 4.6 km, les relevés de ces deux stations ont donc été mis en commun. La tendance des jours avec précipitations > 30 mm est légèrement à la hausse pour le fond du val de Bagnes. Le graphique montre de grandes variations année après année notamment entre 1979 (10 jours > 30 mm) et 1982 (0 jours > 30 mm). De 1989 à 1998, on remarque une tendance à la baisse tandis que de grandes variations sont visibles dans les années 2000.

Les stations de Mauvoisin et de Fionnay sont situées respectivement à 11 km respectivement 15.6 km de la crête principale des Alpes. Cela en fait des stations comparables à celle de Bourg-St-Pierre. A la différence de la vallée du St-Bernard, le val de Bagnes n'est pas un axe de transit pour le foehn puisqu'il n'y a pas de col similaire à celui du Grand-St-Bernard au fond de la vallée. Par fort foehn, le vent remonte même la vallée jusqu'au Châble depuis Sembrancher avec une orientation ouest, mais cela reste rare. Si le foehn est moins présent dans le val de Bagnes, les dépressions du secteur ouest ont plus de facilité à y pénétrer. D'où la tendance à la hausse des précipitations comme dans le reste de la Suisse (Fallot, 2000). En raison de l'absence de station de mesure de précipitations proche de la crête principale nord-sud, on ne peut quantifier les éventuels débordements depuis le sud. Une autre explication possible est la tendance à la hausse des orages orographiques lors des anticyclones estivaux. Cependant, aucune donnée n'existe pour vérifier ce paramètre.

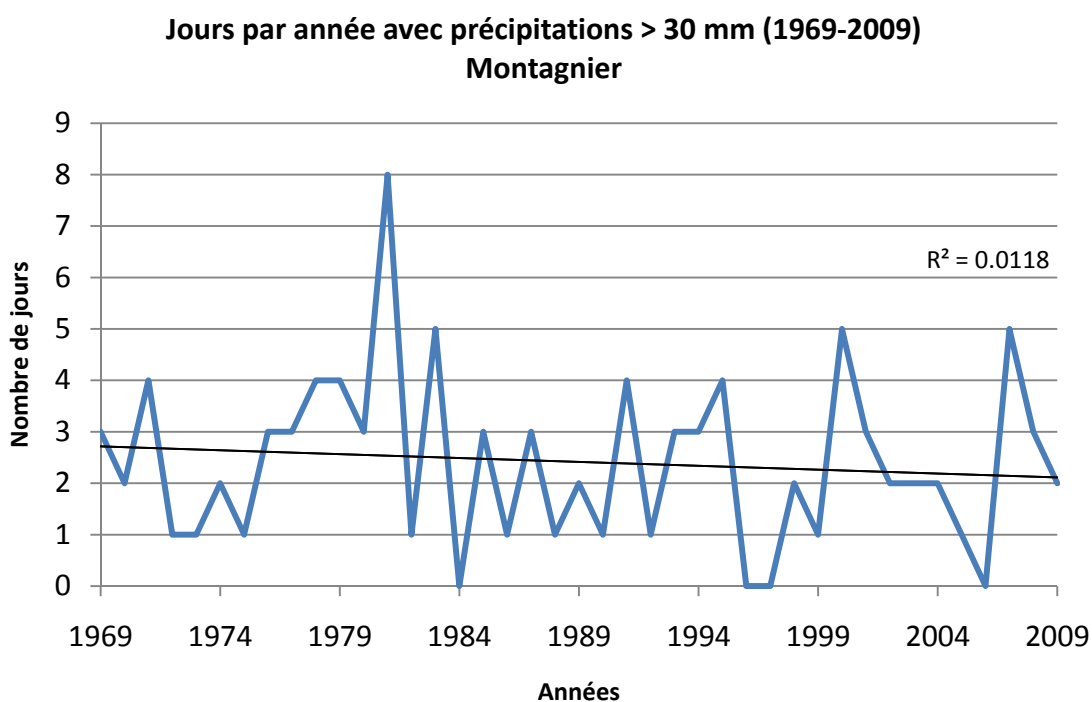


**Graphique 7 : Mauvoisin/Fionnay : jours par année avec précipitations > 30 mm (1972-2009)**



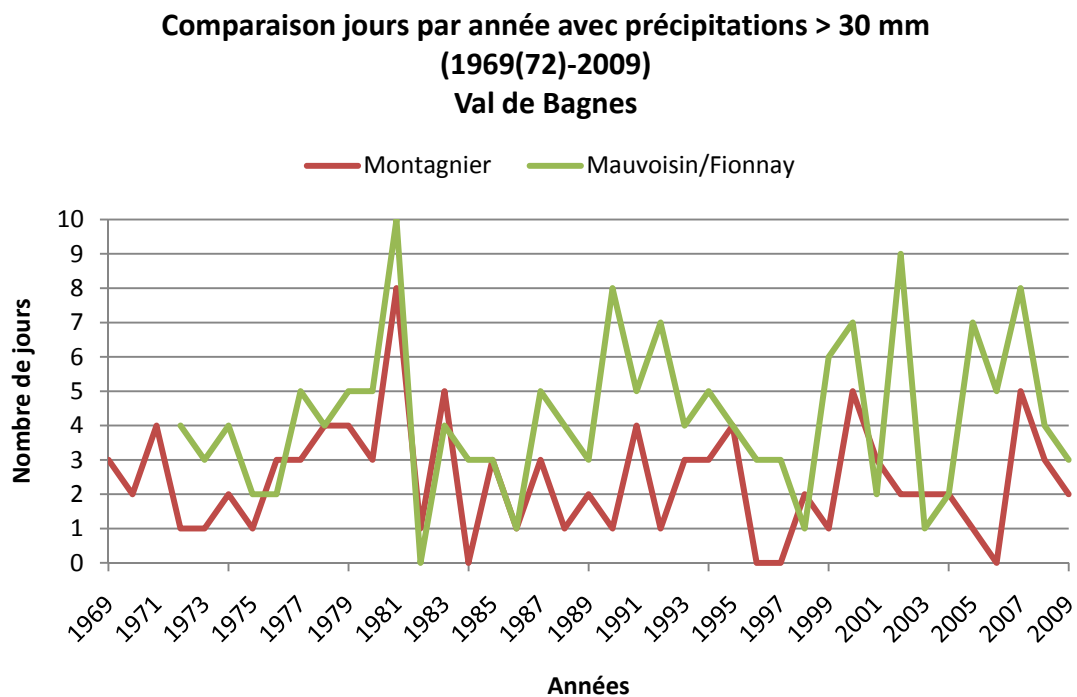
La station de mesure de Montagnier est située dans le bas val de Bagnes à 830 m d'altitude. Elle est active depuis 1961 et présente une légère tendance à la baisse des jours avec précipitations > 30 mm depuis 1969. Elle est comparable à la station d'Orsières en termes d'altitude et de distance par rapport à la crête principale des Alpes bien que deux paramètres importants diffèrent : à Orsières, confluence de deux vallées et exposition au foehn. Depuis 1969, le nombre de jours > 30 mm est en dent de scie. L'explication de la tendance à la baisse résulte peut-être de la non réapparition jusqu'à maintenant du pic à 8 jours > 30 mm en 1982.

Le bas du val de Bagnes est principalement arrosé par les perturbations du secteur ouest. Le foehn n'est quasi jamais ressenti en tant que vent dans la vallée. Par contre, indirectement, la masse d'un air est chaude et sèche lors d'épisodes de foehn dans les deux autres vallées de l'Entremont. La véritable raison météorologique de cette tendance à une légère baisse reste à confirmer lors des prochaines décennies.



**Graphique 8 : Montagnier : jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)**

Le graphique ci-dessous représente les différences de jours avec précipitations > 30 mm par an entre les deux stations du val de Bagnes. On remarque que les pics et les creux se retrouvent plus ou moins à la même période. En termes relatifs, la station de Mauvoisin/Fionnay voit une augmentation de 28.95% à 3.8 jours/an de ses jours avec précipitations > 30 mm par année entre 1972 et 2009. La station de Montagnier accuse, elle, une baisse de 27.6% à 2.8 jours/an de 1969 à 2009. Dans ce val aussi, la station située dans la bas de la vallée voit ses jours > 30 mm par an diminuer tandis que l'inverse est valable pour la station du fond de la vallée. Une station entre Montagnier et Fionnay pourrait nous renseigner si une tendance à la stagnation est aussi identifiable comme à Bourg-St-Pierre.



**Graphique 9 : Val de Bagnes: comparaison jours par année avec précipitations > 30 mm**

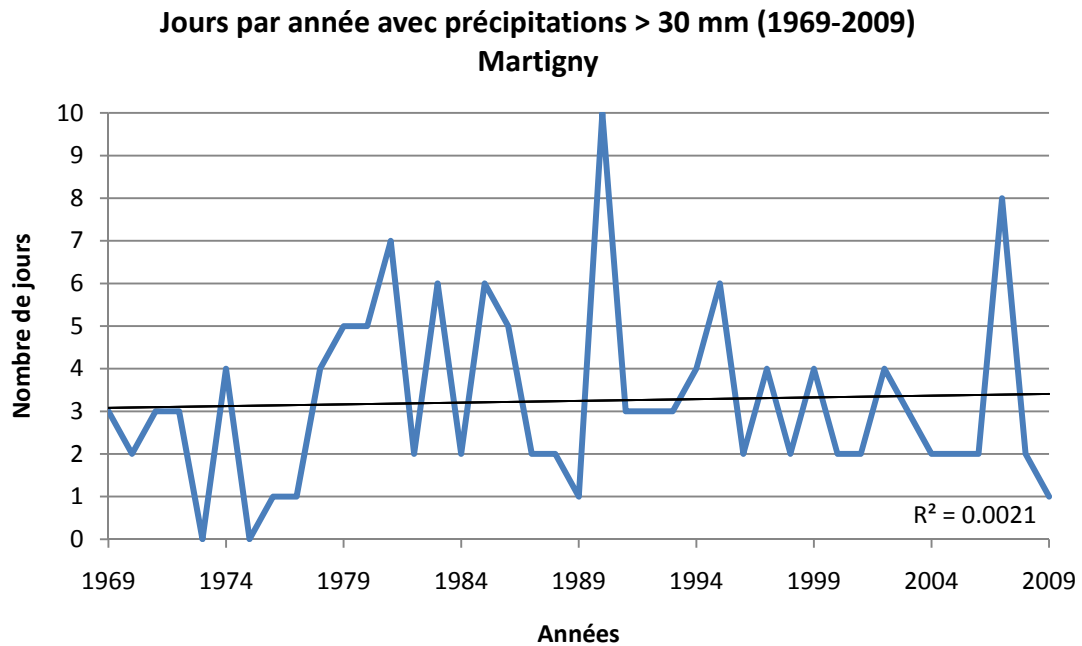
### 3.2. La station de Martigny et région

La station de Martigny est située à environ 400 mètres d'altitude dans la plaine du Rhône. Elle connaît sur le 20<sup>ème</sup> siècle une augmentation des jours avec précipitations > 30 mm et ce en particulier depuis les années 1970. Des pics à 7, 8 et même 10 jours par année ont été enregistrés depuis 1980. Aucune valeur aussi haute n'avait été mesurée depuis 1900 (annexe 9). Météorologiquement, Martigny est favorablement situé pour recevoir des précipitations en provenance du secteur ouest. Elle est moins sensible aux flux de sud-ouest et nord-ouest en raison des reliefs des versants de la plaine du Rhône. En Valais ce sont les situations cycloniques d'ouest qui provoquent le plus de précipitations Environ 37% des précipitations > 50 mm proviennent du secteur ouest (Fallot et Hertig, 2000). Une recrudescence de ces situations d'ouest pourrait être à l'origine de l'augmentation des jours > 30 mm pour la station de Martigny.

Situat. météo	Sud des Alpes	Grisons	Valais	Préalpes Est	Préalpes Ouest	Plateau Est	Plateau Ouest	Jura	Suisse
Ouest	22.3	22.0	37.0	29.7	40.8	22.1	31.3	32.8	27.1
SO-SE	36.0	36.5	27.5	14.4	9.8	11.5	16.3	15.1	21.5
NO+N	14.5	20.6	16.4	25.9	19.6	15.6	17.0	12.6	17.2
Total	72.8	79.0	80.9	70.0	70.2	49.2	64.5	60.4	66.2

**Tableau 1 : Fréquences d'apparition en % des situations cycloniques d'Ouest, du Sud-Ouest à Sud-Est (SO-SE), du Nord-Ouest et Nord (NO+N) ayant provoqué de fortes précipitations (> 50 mm/jour) en Suisse de 1901 à 1998. (Fallot, 2000)**

Deux autres stations (cf. annexes 10 et 11) se trouvent à proximité de Martigny. Pour les Marécottes, la tendance des jours > 30 mm est stable depuis 1969 avec une moyenne à 8 jours/an. Par contre, pour la station de Châtelard, une légère augmentation est constatée due à trois pics à 11, 12 et 16 jours/an. En termes relatifs, la station de Martigny voit une augmentation de 118.75% à 1.6 jours/an de jours avec précipitations > 30 mm par an sur la période 1900-2009. Dès 1969, la tendance est + 13.3% à 3 jours/an. Les Marécottes et Châtelard voient une augmentation plus modérée de leurs journées à fortes précipitations avec respectivement 44.9% à 4.9 jours/an et 5.19% à 7.7 jours/an depuis 1969.



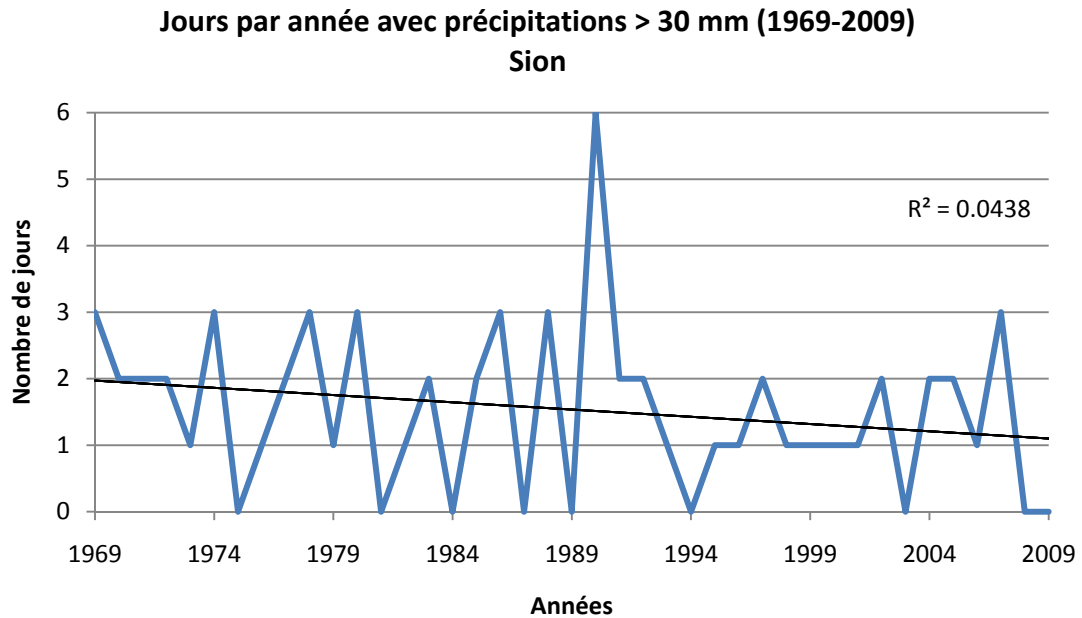
**Graphique 10 : Martigny : jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)**

### 3.3. La station de Sion et région

Sion est situé plus en amont dans la vallée du Rhône à une altitude de 500 m. La tendance sur le 20<sup>ème</sup> siècle est très légèrement croissante pour les jours avec précipitations > 30 mm. La région de Sion est plus sèche que l'Entremont car localisée plus profondément dans les Alpes. La continentalité y est plus marquée. Elle est protégée par les crêtes nord et sud des Alpes qui empêchent aux perturbations de rentrer dans la vallée jusqu'à Sion. Sur l'ensemble du 20<sup>ème</sup> siècle, on compte en effet plus de 26 années sans précipitations > 30 mm en un jour. Les variations annuelles sont marquées avec notamment une petite dizaine d'années entre 4, 5 ou 6 jours avec précipitations > 30 mm. La moyenne sur le siècle se situe entre 1 et 2 jours avec précipitations > 30 mm.

La valeur des relevés de la station d'Hérémence (annexe 14) est assez stable. Une légère tendance à la diminution des jours avec précipitations > 30 mm est visible. Quelques pics au-dessus de 4 jours par années ont été enregistrés dans les années 1980. Autrement, entre 1 à 4 jours par années > 30 mm sont relevés chaque année. En termes relatifs, la station de Sion présente une augmentation contenue par rapport à certaines stations de l'Entremont. La tendance est pour Sion de + 14.3% à 1.4 jours/an sur le 20<sup>ème</sup> siècle jusqu'en 2009 avec cependant une baisse de presque 90% à 2 jours/an dès 1969. A Hérémence, la baisse est de 14.3% à 3.5 jours/an depuis 1969. A

noter que Hérémece progresse de + 4.6% 2.19 jours/an si la tendance est calculée sur l'ensemble de la période de mesure (1961-2009). Les valeurs qui s'écartent beaucoup de la courbe de tendance possèdent une grande influence.



Graphique 11 : Sion : jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)

### 3.4. Conclusions

L'analyse des séries pluviométriques de ces stations montrent non seulement des variations annuelles de grande amplitude pour chacune d'elle mais également des tendances à la hausse ou la baisse plus ou moins bien marquées selon les stations. La comparaison en termes relatifs est aussi intéressante afin de gommer les écarts de jours avec précipitations > 30 mm entre les stations. Fallot et Hertig (2009) avaient relevé une tendance à la hausse depuis le début des années 1970 sur l'ensemble de la Suisse. En Entremont, cette tendance n'est pas aussi claire. A l'exception du Grand-St-Bernard, les tendances à la hausse ou à la baisse des jours avec précipitations > 30 mm sont peu marquées et probablement statistiquement non significatives à la vue des coefficients  $R^2$  qui sont faibles. Les tendances à la baisse depuis 1969 apparaissent à Orsières, Montagnier, Sion et Hérémece. Ailleurs, le nombre de jours tend à augmenter surtout au Grand-St-Bernard où cette tendance est la plus marquée.

Le tableau suivant permet de connaître la provenance des situations météorologiques ayant provoqué de fortes précipitations en Suisse et pour le Valais en particulier. Il est issu de la classification de Hess-Brezowski (Gerstengabe et Werner, 1993) qui classe les perturbations selon leur provenance. Cela permet de calculer l'occurrence de chaque situation pour une région donnée. Cette classification se révèle fiable pour la Suisse (Fallot, 2000).

HB	Sud des Alpes	HB	Grisons	HB	Valais	HB	Jura	HB	Suisse
TRW	15.1	WZ	17.1	WZ	25.4	WZ	21.8	WZ	18.6
WZ	14.7	TRW	17.1	TRW	12.0	WS	9.6	TRW	9.0
TB	10.4	TB	10.3	WS	8.0	HM	5.9	NWZ	6.6
TRM	6.7	TRM	9.8	TRM	6.3	TRW	5.7	WS	5.8
WS	5.2	NWZ	6.5	NWZ	5.9	NEZ	4.9	TRM	5.7
TM	4.7	TM	5.6	TB	5.9	TRM	4.9	TB	5.2
Total	51.3	Total	66.4	Total	63.5	Total	52.8	Total	50.9

HB	Préalpes Est	HB	Préalpes Ouest	HB	Plateau Est	HB	Plateau Ouest
WZ	22.2	WZ	29.4	WZ	14.0	WZ	19.5
NWZ	12.6	NWZ	8.7	BM	6.1	WS	9.1
TRM	7.0	WS	7.2	TRW	5.4	TRW	8.4
TRW	6.9	TRM	6.0	WS	5.4	TRM	5.9
NZ	4.6	WA	4.9	TRM	5.2	NWZ	5.2
WS	4.2	TRW	4.5	NWZ	5.0	TB	4.7
Total	56.6	Total	60.8	Total	41.1	Total	52.7

**Tableau 2 : Fréquences d'apparition en % des 6 situations météorologiques de Hess-Brezowski (HB) ayant le plus souvent provoqué de fortes précipitations (> 50 mm/jour) dans les différentes régions de Suisse de 1901 à 1998. La signification des acronymes est disponible dans les annexes. (Fallot, 2000)**

Fallot (2000) n'a pas déterminé de causes météorologiques à la recrudescence des jours à fortes précipitations depuis le début des années 1970. Il n'a pas remarqué une hausse ou baisse significative de l'occurrence de la provenance des différentes situations météorologiques. La classification de Hess-Brezowsky n'a pas non plus permis de percevoir un changement à ce niveau. Des études plus poussées pourraient éventuellement fournir des éléments de réponses quant aux raisons de l'augmentation remarquée à certains endroits. Cette augmentation des jours à fortes précipitations peut amener à une reconsidération des temps de retour des épisodes extrêmes telle que proposée dans le chapitre suivant.

## 4. Estimation des précipitations cinquentennales en Entremont

Ce chapitre s'appuie sur l'article de Fallot et Hertig publié en 2009 dans le cadre du colloque AIC de Cluj : *Détermination des précipitations extrêmes en Suisse à l'aide d'analyse statistique*. Grâce à la méthode d'analyse statistique de Gumbel, les précipitations journalières maximum ont pu être calculées pour un temps de retour de 500 ans. La période analysée court de 1961 à 2007. Une précédente étude de ce type avait été réalisée sur la période 1901-1970 par Zeller et al. (1980) du WSL (office fédéral de l'étude des forêts, de la neige et du paysage). Dans le présent travail, les temps de retour des précipitations journalières extrêmes ont été calculés pour les stations de l'Entremont et du Valais central pour la période 1961-2009.

### 4.1. La méthode de Gumbel

La méthode de Gumbel (Gumbel, 1958) est une méthode statistique largement utilisée en météorologie lorsqu'il s'agit de calculer les temps de retour d'évènements extrêmes (vents, précipitations, etc.). « *Cette méthode permet d'ajuster une courbe de régression en fonction de la fréquence d'apparition d'évènements dans le passé et de prévoir la probabilité d'apparition d'un événement de plus grande ampleur avec une période de retour plus longue (dans notre cas 500 ans) que la série de mesures disponibles.* » (Fallot et Hertig, 2009). Cette double loi exponentielle est décrite dans l'ouvrage de Gumbel de 1958 et présentée ci-après. Pour une série de mesures de précipitations donnée, on retient la lame d'eau journalière maximale en mm mesurée en 24 heures pour chaque année. Ces valeurs maximales sont ensuite classées par rang pour lequel on calcule la fréquence d'apparition en fonction de la double loi exponentielle de Gumbel  $u$  :

$u = -\ln(-\ln(1-1/T))$ , avec  $T$  = temps de retour exprimé en années ou en mois

On peut ensuite ajuster une droite de régression linéaire (tendance) en fonction des valeurs  $u$  obtenues et des valeurs maximales annuelles mesurées (Fallot et Hertig, 2009).

Selon l'office fédéral de l'étude des forêts, de la neige et du paysage (Zeller et al., 1980), les analyses de Gumbel ont démontré leur justesse pour l'estimation des précipitations extrêmes futures sur le territoire suisse. Dans le quart nord-est et à quelques autres endroits, l'estimation souffre de quelques irrégularités. Les autres lois telles la loi log normale ou la loi de Jenkinson ont fourni de moins bons résultats pour la Suisse.

Grâce à la loi de Gumbel, les précipitations cinquentennales pour l'Entremont ont pu être estimées. La série de mesures à disposition couvre les années 1961 à 2009. La majorité des stations de mesures et les pluviomètres de MétéoSuisse de l'Entremont et du Valais central actifs depuis au moins 1961 ont été retenus pour l'estimation. Les relevés de deux stations débutent en 1969 (Orsières) et 1972 (Mauvoisin-Fionnay). Les précipitations cinquentennales ont été estimées pour 9 stations : Grand-St-Bernard, Bourg-St-Pierre, Orsières, Montagnier, Mauvoisin/Fionnay, Martigny, Sion, Hérémence et Fey/Nendaz.

#### 4.2. Résultats pour les stations étudiées

Le tableau ci-dessous résume les résultats globaux obtenus avec la méthode de Gumbel pour les stations étudiées. Au niveau suisse, 78.1% des 425 stations retenues ont un coefficient  $R^2$  supérieur à 0.95. Dans ce cas, la droite de régression ajuste correctement la distribution et l'estimation des précipitations maximales journalières cinquentennales est bonne. Sur les 9 stations étudiées dans l'Entremont élargi, 7 stations (77.8%) atteignent ce résultat. Une station se situe entre 0.9 et 0.95 (11.1%) et une entre 0.85 et 0.9 (11.1%). D'une manière générale, si les coefficients sont bas ( $> 0.9$ ), les écarts entre les valeurs journalières maximales relevées et la droite de régression sont grands. Les valeurs centennales et cinquentennales sont alors sous-estimées.

Coefficients $R^2$	Fréquence d'apparition (Suisse)	Fréquence d'apparition (stations étudiées en Entremont)	Fréquence cumulée (stations étudiées en Entremont)
0.95 - 1	78.1%	77.8%	77.8%
0.9 – 0.95	15.3%	11.1%	88.9%
0.85 – 0.9	4.9%	11.1%	100%
0.79 – 0.85	1.7%	0%	100%

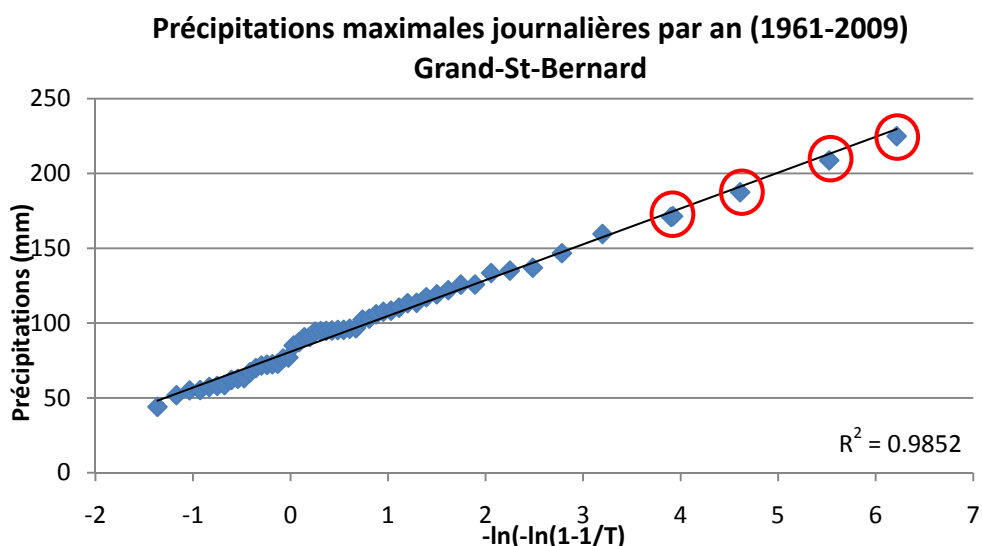
**Tableau 3 : Fréquences d'apparition des différents coefficients  $R^2$  pour les droites d'ajustement de la loi de Gumbel pour l'ensemble de stations suisses (Fallot et Hertig, 2009) et les stations étudiées dans l'Entremont élargi.**



### 4.3. Résultats pour les stations de l'Entremont

Les deux graphiques ci-dessous présentent les droites de régression obtenues avec les valeurs maximales de précipitations de 49 années entre 1961 et 2009 au Grand-St-Bernard et à Bourg-St-Pierre.

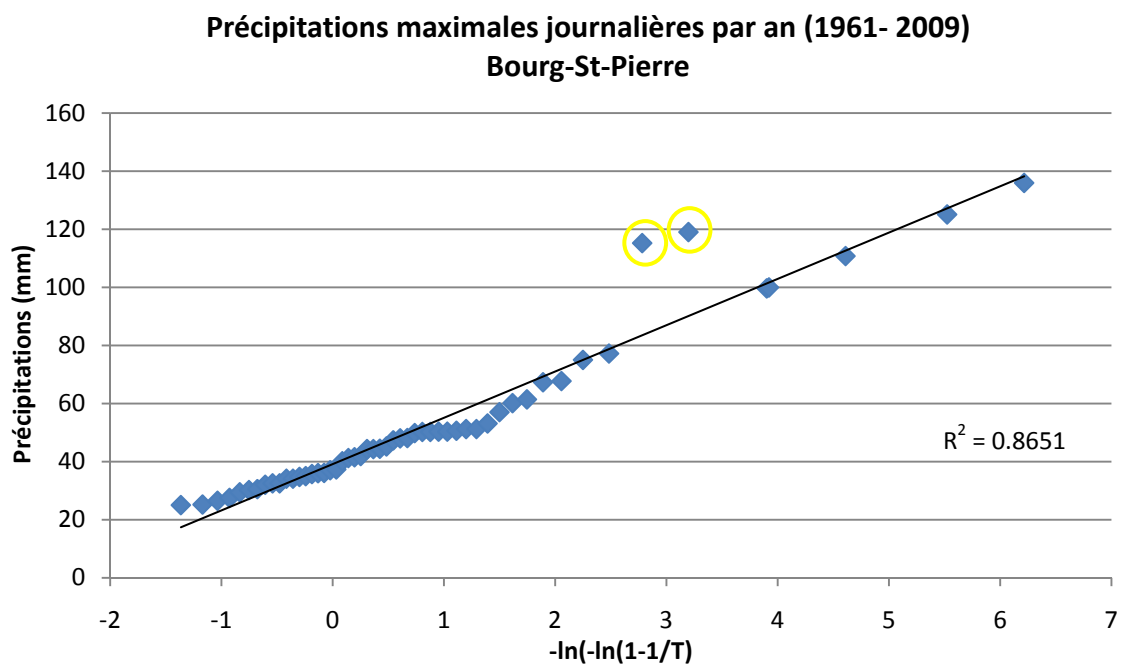
Le coefficient  $R^2$  obtenu au Grand-St-Bernard est de 0.985, soit plus de 98% des variations d'une année à l'autre sont expliquées par la méthode de Gumbel. Il est le plus élevé des stations analysées. Les précipitations centennales et cinquentennales sont donc bien estimées. Aucune valeur mesurée sur les 49 années ne dépassent les valeurs estimées (entourées en rouge) à T 50 ans<sup>1</sup>, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans. Les plus grosses précipitations en un jour depuis 1961 ne se sont pas produites lors de l'épisode d'octobre 2000 (même valeur que Bourg-St-Pierre 119 mm pour le 14.10.2000) mais le 12.11.1996 avec 159.6 mm. Les précipitations les plus fortes relevées dans l'ordre croissant sont : 137 mm le 5.11.1994, 146.7 mm le 28.01.1999 (neige) et 159.6 mm le 12.11.1996. Le rapport de l'OFEG (2002) donne, tout de même, pour les précipitations d'octobre 2000, un temps de retour de 1'000 ans pour le cumul de pluie de l'ensemble de l'épisode au Grand-St-Bernard (13-16.10.2000). A noter aussi que les analyses de Gumbel pourraient surestimer les temps de retour pour la station du Grand-St-Bernard car les précipitations journalières maximales par an tendent à augmenter de 1961 à 2009 à cet endroit (annexe 19). Une telle augmentation peut entraîner une surestimation des temps de retour par la loi de Gumbel (Fallot et Hertig, 2009).



**Graphique 12 : Grand-St-Bernard : précipitations journalières maximales par an classées par rang et mesurées de 1961 à 2009 avec entourées en rouge les valeurs estimées pour T 50 ans, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans**

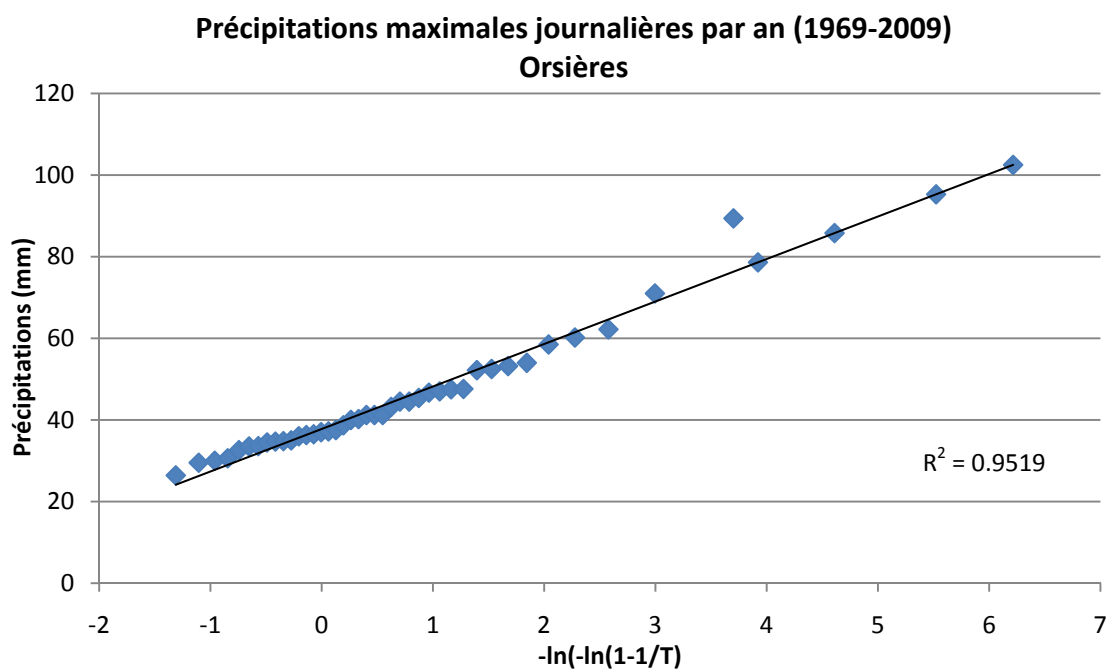
<sup>1</sup> T 50 ans = temps de retour de 50 ans pour un événement donné. Idem pour T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans avec un temps de retour de respectivement 100 ans, 250 ans et 500 ans.

Pour la station de Bourg-St-Pierre, les variations d'années en années ne sont expliquées qu'à 86.5%. C'est le coefficient  $R^2$  le plus faible des stations étudiées (0.8651). A la vue du graphique, deux valeurs (entourées en jaune) de précipitations maximales journalières mesurées pendant la période de 49 ans excèdent les estimations cinquantennales et centennales. Ce sont les précipitations tombées dans les journées du 14 octobre 2000 (119 mm) et du 5 novembre 1994 (115 mm). La station de Bourg-St-Pierre est située proche de la crête sud des Alpes et donc possiblement touchée, par débordement, par les précipitations en provenance du sud dans ces deux cas. Les précipitations T 50 ans et T 100 ans estimées par la loi de Gumbel peuvent paraître ainsi sous-estimées. D'ailleurs la valeur mesurée la plus haute est proche de la valeur estimée pour les précipitations T 250 ans. La sous-estimation est donc tout à fait possible. Cependant, une autre explication peut être valable. Il est probable que, dans la série de mesures s'étalant sur 49 ans, des évènements avec des temps de retour de 50, 100, 250 ou 500 ans aient pu se produire. Par exemple, un orage d'été particulièrement violent et localisé peut produire une lame d'eau exceptionnelle sur une station en particulier. Les évènements d'octobre 2000 ont aussi été exceptionnels et peuvent s'inscrire comme des précipitations centennales. Si tel est le cas, la méthode de Gumbel ne sous-estimerait pas les valeurs T 50 ans, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans pour la station de Bourg-St-Pierre. Ainsi, la loi de Gumbel gagnerait d'autant plus en validité.



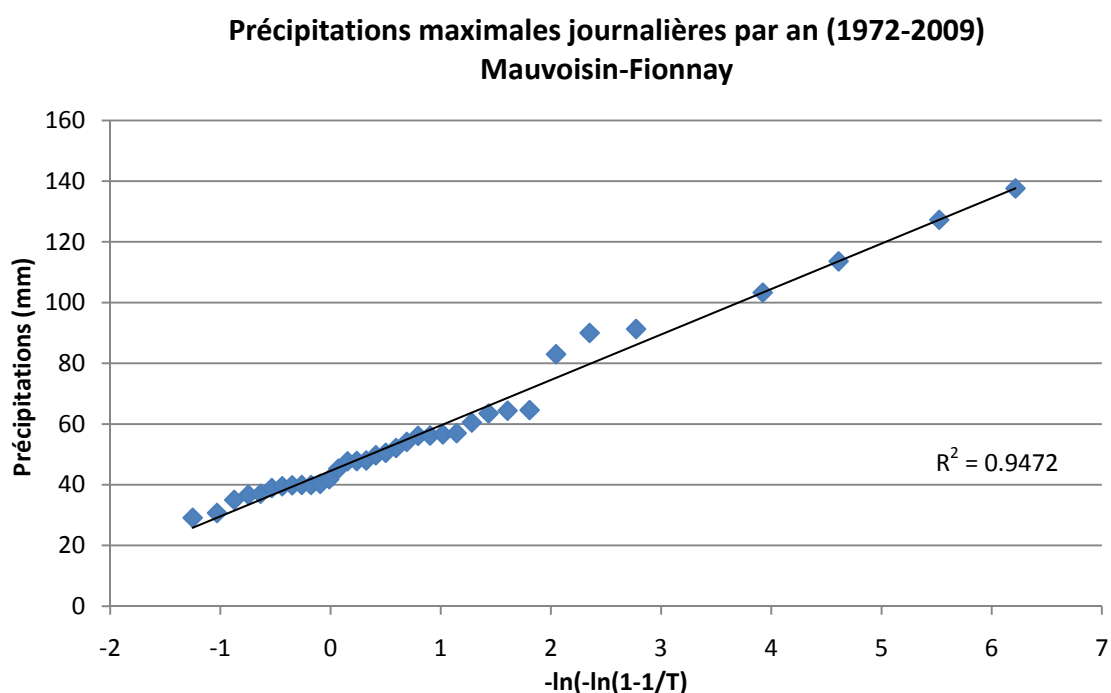
**Graphique 13 : Bourg-St-Pierre : précipitations journalières maximales par an classées par rang et mesurées de 1961 à 2009 avec entourées en jaune les valeurs mesurées sur la période de 49 ans et qui dépassent les valeurs estimées T 50 et T 100 ans**

Les estimations pour la station d'Orsières sont bonnes puisque le coefficient  $R^2$  culmine à 0.98. Les variations sont en général bien expliquées sauf une. Une valeur mesurée se situe en effet au-dessus des valeurs estimées pour un temps de retour de 100 ans. Cette valeur correspond aux précipitations tombées le 14 octobre 2000 (89.4 mm). Selon les estimations (OFEG, 2002), les intempéries d'octobre 2000 ont un temps de retour d'environ 1'000 ans pour l'ensemble de l'épisode à la station du Grand-St-Bernard située en première ligne lors de situations pluvieuses en provenance du sud. D'ailleurs, pour Orsières, la loi de Gumbel calcule un temps de retour entre 100 et 150 ans pour la seule journée du 14 octobre. L'analyse précédente de la station de Bourg-St-Pierre montre un temps de retour quasi similaire pour octobre 2000. Cela apparaît comme réaliste en regard de l'augmentation des précipitations extrêmes depuis la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle notifiées par plusieurs auteurs.



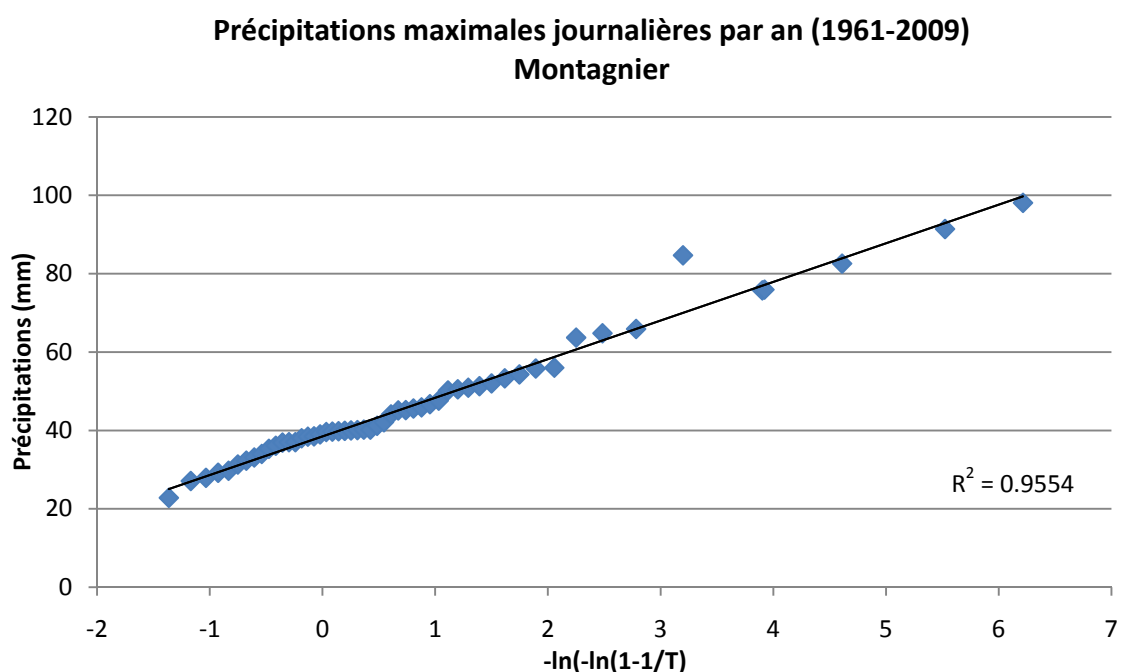
**Graphique 14 : Orsières : précipitations journalières maximales par an classées par rang et mesurées de 1969 à 2009 et estimation à T 50 ans, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans**

Le coefficient  $R^2$  pour la station de Mauvoisin-Fionnay est de 0.9472. L'estimation des précipitations centennale est donc légèrement moins bonne et cela peut résulter du déplacement de la station de Mauvoisin à Fionnay en 1996. Les trois jours avec les plus fortes précipitations se situent cependant au dessus de la droite de régression mais au-dessous de la valeur estimées T 50 ans. Ces trois jours de fortes précipitations concernent dans l'ordre croissant de quantité : le 21.12.1991, neige fondue = 83 mm ; le 14.10.2000, 90 mm et le 5.11.1994, 91.3 mm. Le 14 octobre se retrouve ici comme à Orsières mais n'atteint même pas un temps de retour de 50 ans. La variabilité géographique des quantités de précipitations est fréquente en montagne. Par contre, on retrouve la date du 5.11.1994 comme à Bourg-St-Pierre et au Grand-St-Bernard. Ici, comme au Grand-St-Bernard, la distribution des quantités de fortes précipitations sur la période de mesure est en légère augmentation (annexe 22). Les précipitations prévues pour chaque temps de retour sont peut-être quelque peu surestimées.



**Graphique 15 : Mauvoisin-Fionnay : précipitations journalières maximales par an classées par rang et mesurées de 1972 à 2009 et estimation à T 50 ans, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans**

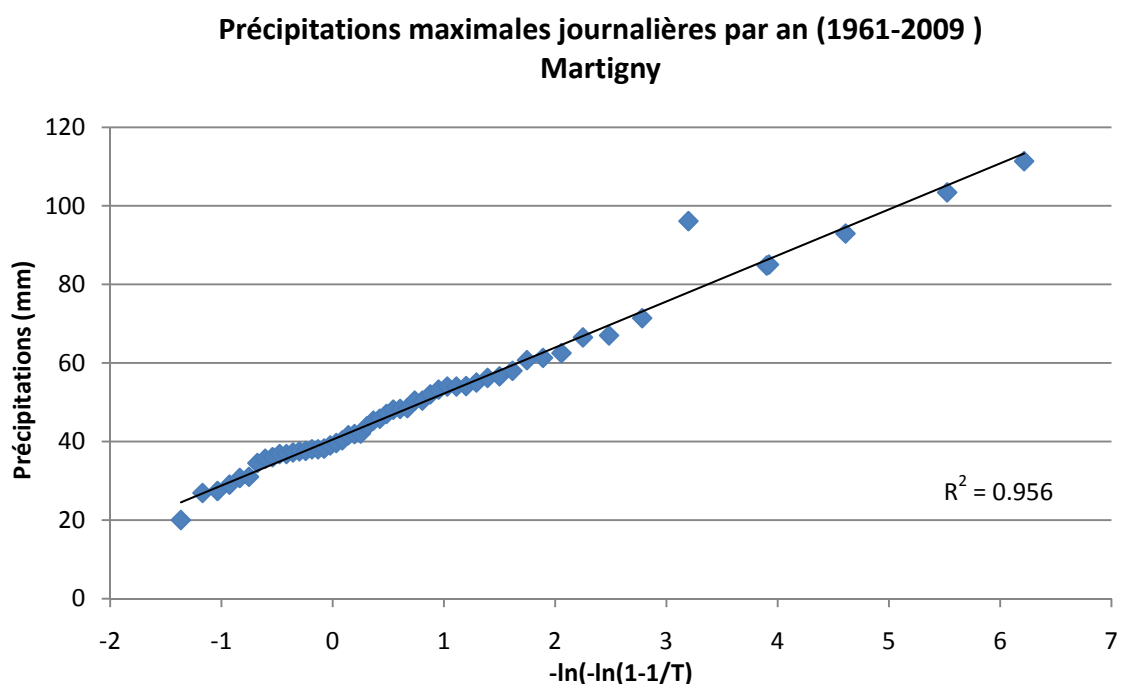
La station de Montagnier compte également une valeur mesurée qui dépasse les valeurs estimées T 50 ans et T 100 ans. Ce sont les précipitations du 17.10.1980 (84.7 mm) qui ont dépassé la valeur de précipitations centennales. Sinon, le coefficient  $R^2$  (0.9554) explique tout de même bien les variations annuelles. Les analyses de Gumbel fournissent donc des estimations fiables pour les temps de retour donnés. Il est ici intéressant de constater que ni le 5.11.1994 ou le 14.10.2000 ne ressortent comme fortes précipitations. Le 14.10.2000 est en 6<sup>ème</sup> position des journées les plus pluvieuses et le 5.11.1994 encore plus loin. Cela démontre une nouvelle fois la variabilité géographique des précipitations.



**Graphique 16 : Montagnier : précipitations journalières maximales par an classées par rang et mesurées de 1961 à 2009 et estimation à T 50 ans, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans**

#### 4.4. Résultats pour la station de Martigny

Avec un coefficient  $R^2$  à 0.956, la station de Martigny dispose de bonnes estimations de précipitations pour les temps de retour jusqu'à T 500 ans. Le coefficient aurait pu être encore meilleur si une valeur mesurée ne dépassait pas les valeurs estimées T 50 ans et T 100 ans. En effet, le 14.2.1990 des précipitations de l'ordre de 96.1 mm en 24 heures se sont abattues sur Martigny. Vu la date, il est possible que ces précipitations soit tombées sous forme de neige en tout ou partie. Cette valeur est la plus haute relevée sur plus d'un siècle (1901-2009) à la station de Martigny. Comme elle est à peine plus élevée que la valeur centennale calculée, la loi de Gumbel semble donner, dans ce cas, une estimation tout à fait correcte. Il en va certainement de même pour les valeurs estimées pour les autres temps de retour. A noter que le 14.10.2000 se situe bien en dessous de la valeur T 50 ans.

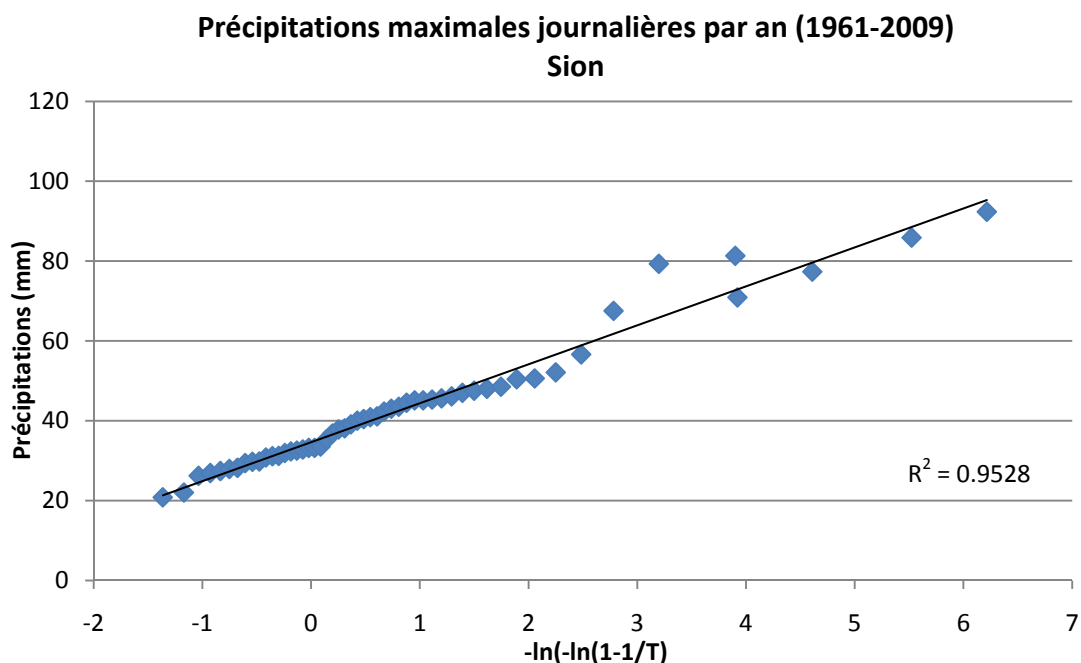


Graphique 17 : Martigny : précipitations journalières maximales par an classées par rang et mesurées de 1961 à 2009 et estimation à T 50 ans, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans

#### 4.5. Résultat pour la station de Sion

Avec un coefficient  $R^2$  de 0.9528, Sion est également dans le peloton des stations où les estimations prévues par la loi de Gumbel sont bonnes. Les variations sont bien expliquées sauf pour les deux valeurs mesurées les plus élevées. Elles dépassent la valeur estimée pour le temps de retour T 100 ans. Comme ces événements se sont produits deux fois dans la période de mesure 1961-2009 (21.11.1971 et 14.2.1990), les valeurs tirées des analyses de Gumbel peuvent être considérées comme légèrement sous-estimées. Cela peut aussi démontrer une augmentation des précipitations extrêmes à Sion dans la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Cette hypothèse n'est pas corroborée par la tendance de la quantité de précipitations journalières maximales sur une année qui est à la baisse. Cela pourrait dénoter une sous-estimation des valeurs estimées pour chaque temps de retour. A noter que le 14.2.1990, les précipitations avaient atteint une valeur centennale à Martigny également.

Les stations d'Hérémece (annexe 17) et de Fey/Basse-Nendaz (annexe 18) affichent un coefficient  $R^2$  de respectivement 0.9822 et 0.9771. Ces coefficients prouvent la qualité de l'explication des variations autour de la droite de régression pour ces deux stations ainsi que la justesse des estimations.



Graphique 18 : Sion : précipitations journalières maximales par an classées par rang et mesurées de 1961 à 2009 et estimation à T 50 ans, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans

#### 4.6. Conclusions

Les analyses de Gumbel effectuées sur les stations de la région de l'Entremont et du Bas-Valais permettent une estimation correcte des précipitations maximales journalières jusqu'à un temps de retour de 500 ans. Toutes les stations, mis à part Bourg-St-Pierre et Mauvoisin-Fionnay, ont un coefficient  $R^2$  supérieur à 0.95. Cela démontre la qualité des estimations pour la région de l'Entremont mis à part pour le Grand-St-Bernard où les précipitations pour chaque temps de retour semblent surestimées du fait de la tendance à la hausse des précipitations journalières maximales sur une année. Les précipitations de Martigny et Sion semblent aussi bien estimées. Cependant, le manque de stations à proximité ne permet pas d'élargir le constat positif à la région autour de ces villes. L'étude (Fallot et Hertig, 2009) sur l'ensemble des stations de Suisse sur la période 1961-2007 a observé une augmentation moyenne de 14% des précipitations journalières comparativement à l'étude du WSL portant sur la période 1901-1970. Pour 31% des stations de Suisse, les précipitations calculées comme cincentennales (T 500 ans) par l'étude du WSL (période : 1900-1970) ne sont estimées plus que centennales (T 100 ans) par Fallot et Hertig (période : 1961-2007). C'est la confirmation de l'augmentation des valeurs de précipitations extrêmes depuis les années 1970.

	Fréquence d'apparition (Suisse)	Fréquence d'apparition (stations étudiées Entremont)	Fréquence cumulée
Prec max mes < Prec T 50 ans	46.7%	33.3%	33.3%
Prec T 50 ans < Prec max mes < Prec T 100 ans	29.1%	0%	33.3%
Prec T 100 ans < Prec max mes < Prec T 250 ans	15.7%	66.7%	100%
Prec T 250 ans < Prec max mes < Prec T 500 ans	6.8%	0%	100%
Prec T 500 ans < Prec max mes < Prec T 1000 ans	1.6%	0%	100%

**Tableau 4 : Comparaison entre les précipitations journalières maximales mesurées de 1961 à 2009 et les précipitations journalières estimées pour différents temps de retour.**

*Prec max mes : précipitations journalières maximales mesurées sur une période 1961-2009*

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



Le tableau ci-dessous représente les différences de précipitations maximales journalières selon les stations sur la période 1961-2009 et les dépassements en certains lieux des valeurs estimées pour les temps de retour T 50 ans et T 100 ans. Les estimations en quantité varient également beaucoup selon la station. Cela démontre la variabilité spatiale des précipitations en Entremont et jusqu'à Sion.

	Valeur maximale journalière	T 50 ans	T 100 ans	T 250 ans	T 500 ans
Grand-St-Bernard	159.6	171	187.5	208.8	225
Bourg-St-Pierre	119	99.6	110.7	125.1	135.9
Orsières	89.4	78.6	85.9	95.3	102.5
Mauvoisin-Fionnay	91.3	103.3	113.6	127.3	137.6
Montagnier	84.7	75.7	82.6	91.4	98.1
Martigny	96.1	84.8	92.9	103.4	111.4
Sion	81.3	70.9	77.3	85.9	92.3
Hérémece	74.5	75.4	82	90.6	97.1
Fey/Basse-Nendaz	65.9	64.6	70.4	78	83.7

**Tableau 5 : Récapitulatif des valeurs maximales journalières (en mm) sur la période d'étude 1961-2009 et les valeurs estimées pour T 50 ans, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans (en mm).**

Le principal désavantage des analyses de Gumbel est qu'elles ne concernent qu'un point précis (station) et non pas une région, une vallée ou un bassin versant. En effet, la loi de Gumbel ne tient pas compte de la variabilité spatiale des précipitations dans un bassin versant. Cela rend les résultats de ces analyses peu applicables, sans interprétation critique, à une problématique telle que le dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues. Audouard et al. (2006) ont confronté les résultats du WSL (1901-1970) avec un modèle de calcul (maille 2 km) des vents et précipitations extrêmes en Suisse. Actuellement, le même travail est poursuivi avec les nouvelles valeurs centennales obtenues avec les mesures de la période 1961-2007. Le but est de déterminer les précipitations maximales probables (PMP) afin de développer un véritable outil de prévention des crues au service des collectivités publiques. De meilleures prévisions auraient certainement permis une gestion plus efficace des situations de crise dues aux crues en évitant notamment des pertes humaines.



## 5. Analyse de trois épisodes pluvieux extrêmes du 20<sup>ème</sup> siècle

Les statistiques climatiques prouvent une augmentation des précipitations extrêmes depuis les années 1970 (Fallot, 2000). Cela n'est pas sans conséquences sur les populations et infrastructures en particulier dans les Alpes où cette tendance est sensible. Cette partie présente trois épisodes de pluies extrêmes qui ont entraîné de nombreux dégâts tant humains qu'infrastructurels. Une analyse précise des causes météorologiques ayant entraîné ces catastrophes est souhaitable afin qu'un jour elles puissent être non pas maîtrisées mais du moins prédites. Chaque évènement a donné lieu à des rapports qui permettent de mieux discerner les raisons de ces catastrophes au niveau météorologique. Les articles de Bonvin (1993), du CREALP (Centre de recherche en environnement alpin, 1994), de Grebner et al. (2000) et les rapports de l'OFEG (office fédéral des eaux et de la géologie, 2002) ont été mis à contribution dans le présent chapitre.

### 5.1. Intempéries du 24 au 25 août 1987

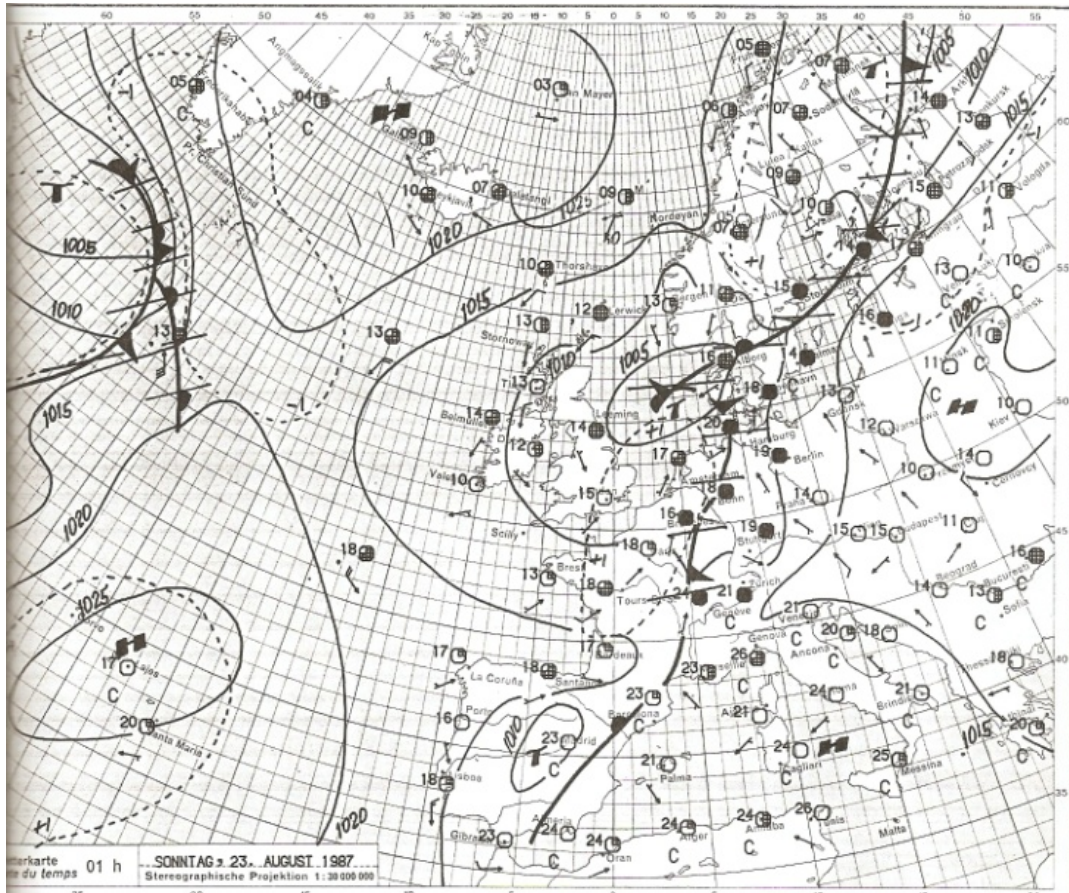
#### 5.1.1. Situation météorologique

L'été 1987 a été riche en épisodes pluvieux intenses. Après un hiver froid et un printemps humide, les précipitations du mois de juin furent entre 30 et 75% au-dessus de la moyenne et jusqu'à +125% au Tessin. Les violents orages qui éclatèrent entre le 1<sup>er</sup> et le 9 juillet, dans les Préalpes, furent particulièrement dévastateurs. Les sols déjà saturés en eau ne purent absorber ces nouvelles précipitations. Du 17 au 19 juillet, c'est la partie centrale des Alpes qui fut touchée de la même manière, ce qui a occasionné des laves torrentielles dévastatrices. Toutes les conditions favorisant les écoulements et donc les crues étaient réunies durant l'été 1987. Elles sont ici regroupées :

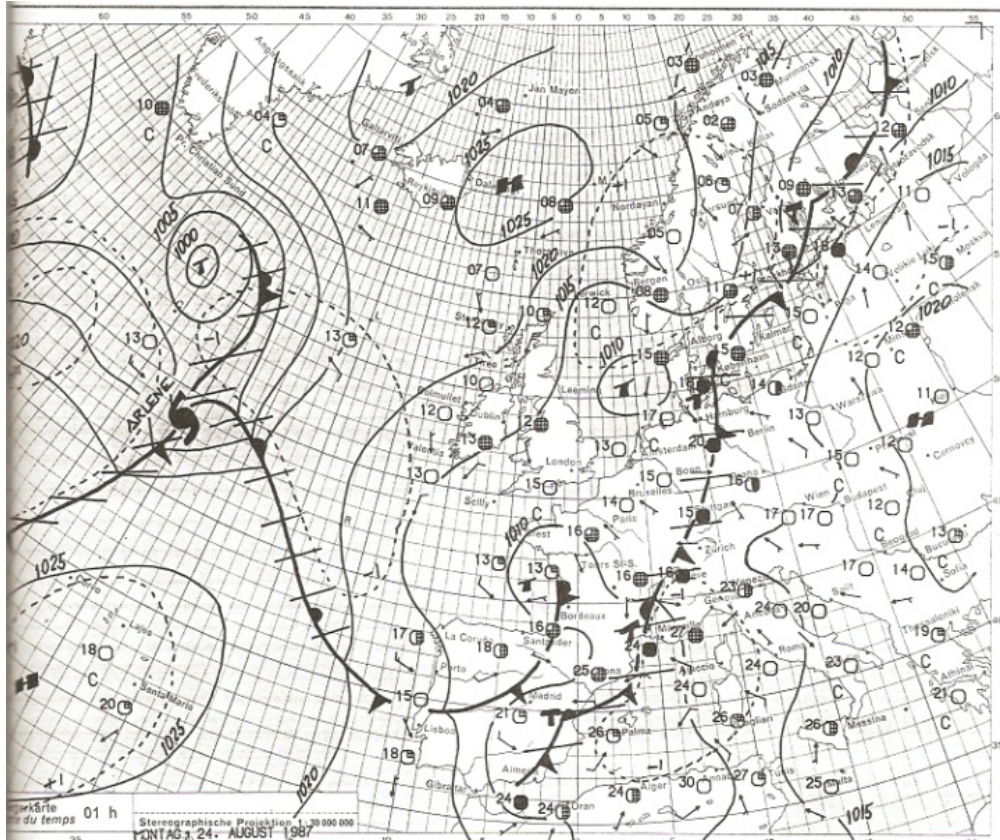
- Pluies intenses au mois de juin
- Fonte des neiges tardive
- Variations de températures
- Isotherme du 0° à une altitude élevée
- Chaleur avant les précipitations

Dans la journée du 23 août, une zone dépressionnaire qui s'étend de l'Angleterre jusqu'à la Mer du Nord influence le temps en Europe. Au-dessus de la Suisse, un courant d'air frais du nord-est rencontre de l'air chaud et humide venant du sud-ouest. L'air devient instable et les orages qui éclatent produisent de fortes pluies. De plus, un front froid présent entre ces deux masses d'air crée une dépression secondaire qui stationnera sur le Tessin et la Valtelline. C'est principalement le caractère stationnaire

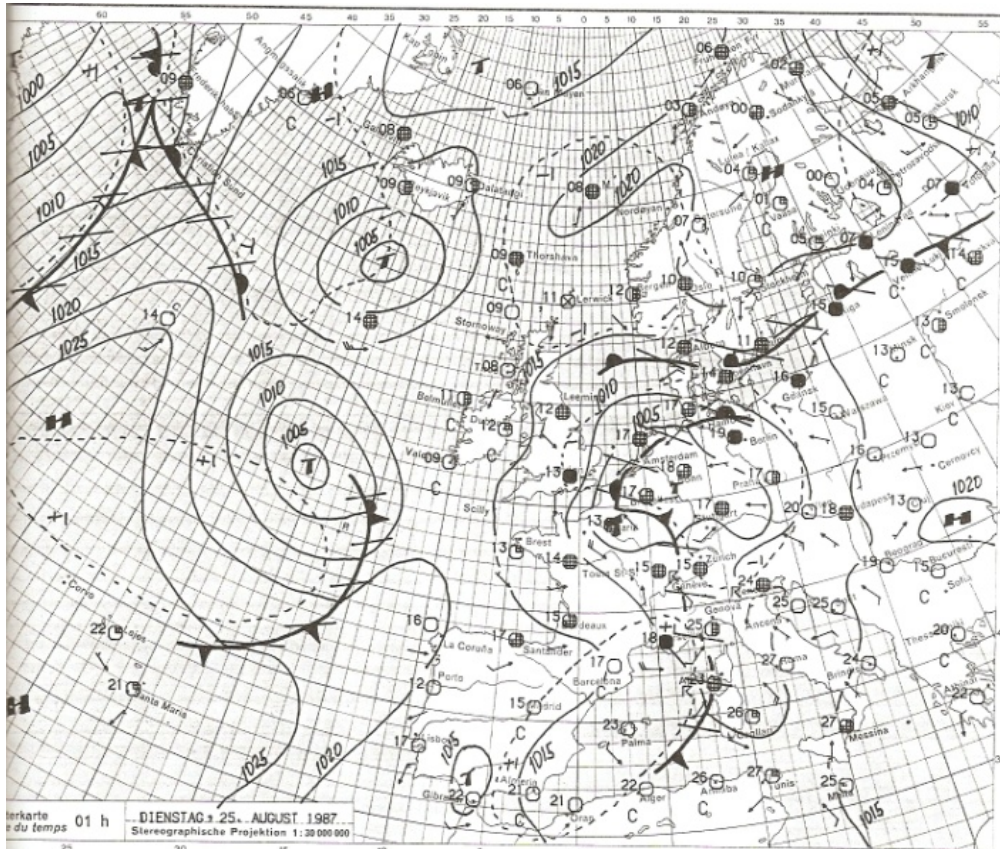
de la dépression entre le 24 et le 25 août qui a provoqué ces crues exceptionnelles. Des cas semblables avaient déjà eu lieu en 1927, 1951 et 1978. Selon la classification de Hess-Brezowski, c'est une situation de type TRW, ce qui signifie une situation sud-ouest à sud-est en passant par le sud avec la création d'un thalweg sur l'Europe occidentale (annexe 16).



Carte 3 : Position des fronts le 23 août à 01h UTC (bulletin MétéoSuisse)



Carte 4 : Position des fronts le 24 août à 01h UTC (bulletin MétéoSuisse)



Carte 5 : Position des fronts le 25 août à 01h UTC (bulletin MétéoSuisse)

### **5.1.2. Déroulement des précipitations**

Les précipitations des 24 et 25 août furent inférieures à celle du mois de juillet de la même année. Tant la durée que les quantités étaient moindres. Des cumuls de précipitations de tout de même 40 mm/heure ont été mesurés dans le Val Bedretto le 24 août en soirée. En Valais, c'est surtout le haut du canton qui a été arrosé (200 mm en 24 heures à Binn) avec des valeurs dégressives en direction de l'ouest avec une exception pour le Chablais touché par le front du nord-ouest. A relever que l'intensité horaire maximale des précipitations est intervenue en fin d'épisode. L'évènement d'août est rarissime en rapport à sa durée.

### **5.1.3. Conséquences des intempéries**

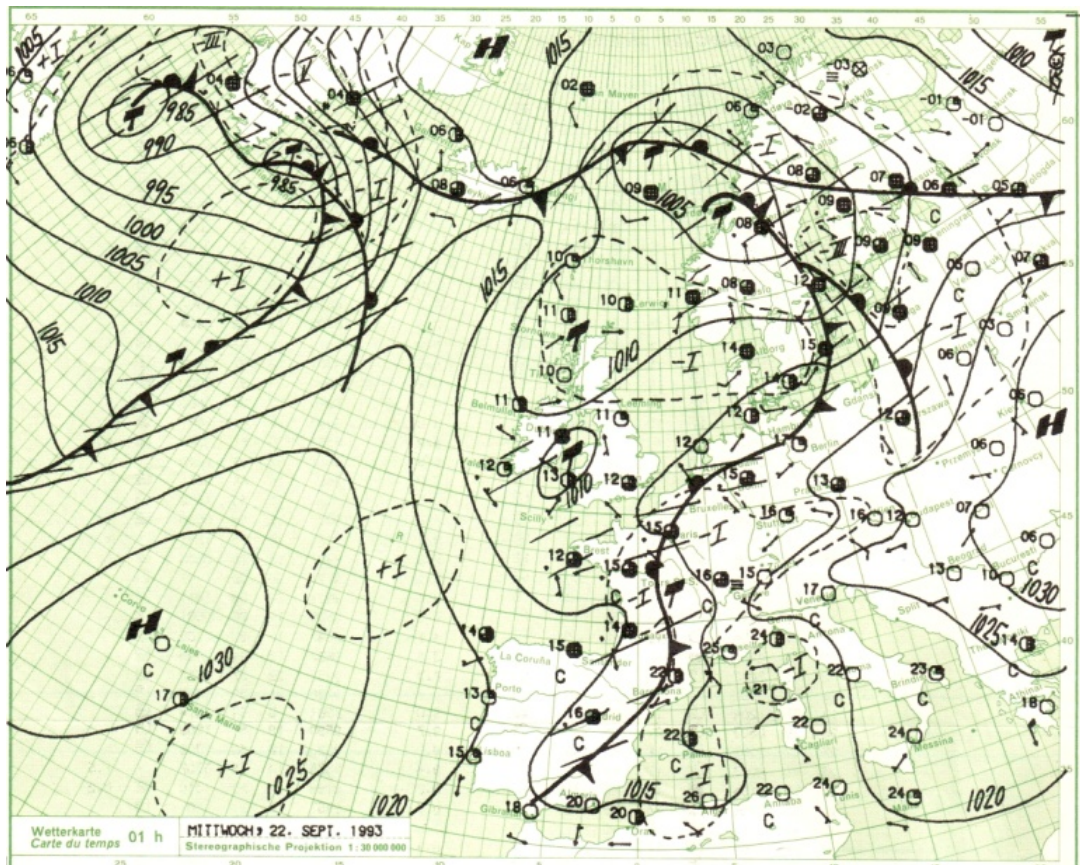
L'épisode pluvieux extrême du mois d'août a surtout touché les cantons d'Uri, du Tessin et du Valais. Le Rhône a débordé à de multiples endroits comme Naters et entre Loèche et Salquenen. La vallée de Conches a subi la furie des torrents latéraux qui sont sortis de leur lit. Les dommages aux infrastructures et aux habitations sont importants. Les vallées latérales ont également souffert. Des glissements de terrain et des laves torrentielles sont à l'origine de dégâts importants dans la vallée de Viège, du Lötschental et de Ferret. Heureusement, les barrages ont joué leur rôle de captation des eaux. Cela a permis une réduction du débit de pointe du Rhône et de ses affluents et par extension des dommages collatéraux.

## **5.2. Intempéries du 22 au 24 septembre 1993**

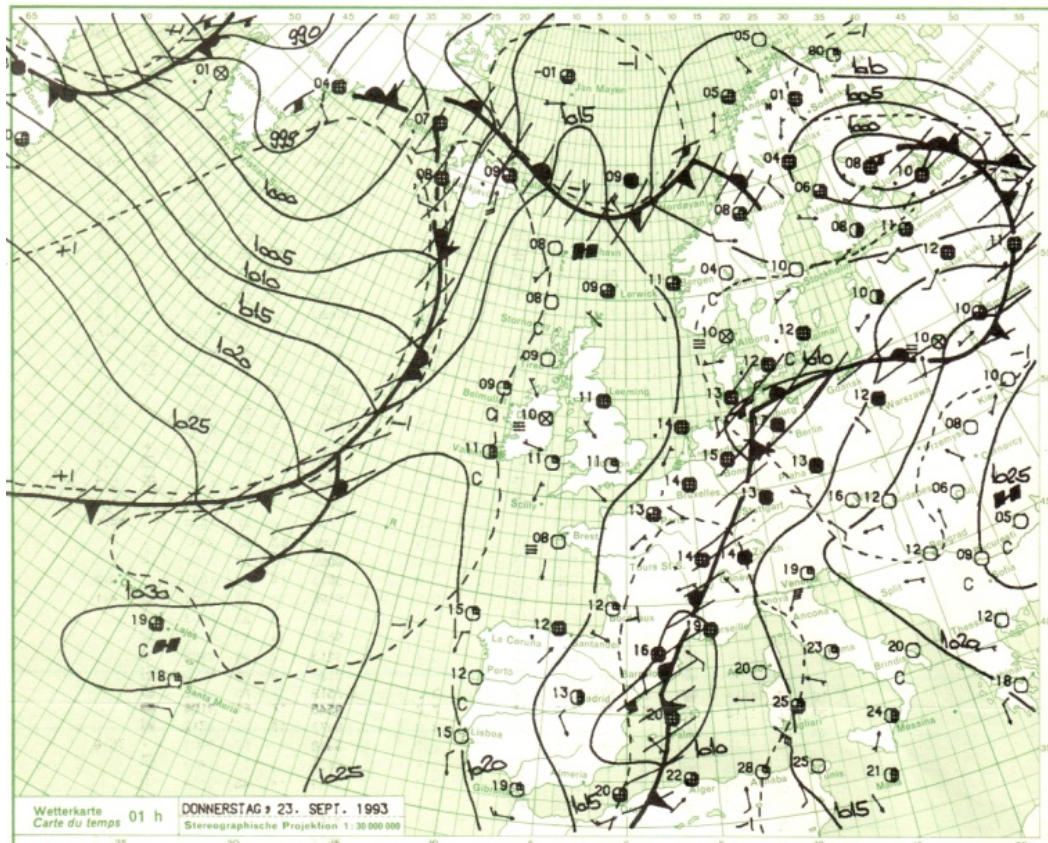
### **5.2.1. Situation météorologique**

Entre le 19 et le 22 septembre, la situation météorologique est définie par les facteurs ci-après. Une dépression se déplace d'ouest en est à la hauteur de l'Irlande. Simultanément, un anticyclone centré sur l'Ukraine influence le temps en Europe centrale. Lorsque ces deux centres d'action se rencontrent, la dépression se sépare en deux parties distinctes. L'une continue sa course vers le nord-est. L'autre descend au sud et stationne le 23 et 24 sur le Golfe du Lion. C'est aussi une situation classée TRW selon Hess-Brezowski. En raison de l'établissement d'un fort vent du sud-ouest en altitude, le front de la dépression a ondulé sur l'ouest de la Suisse du 22 au 24 septembre avant de s'évacuer le 25 septembre. Cet épisode pluvieux a deux origines différentes. Du 22 au 23 septembre, c'est un courant du sud qui amène de l'air doux et humide contre le versant sud des Alpes qui a été copieusement arrosé par effet de barrage. Les précipitations ont également touché le nord des Alpes par débordement.

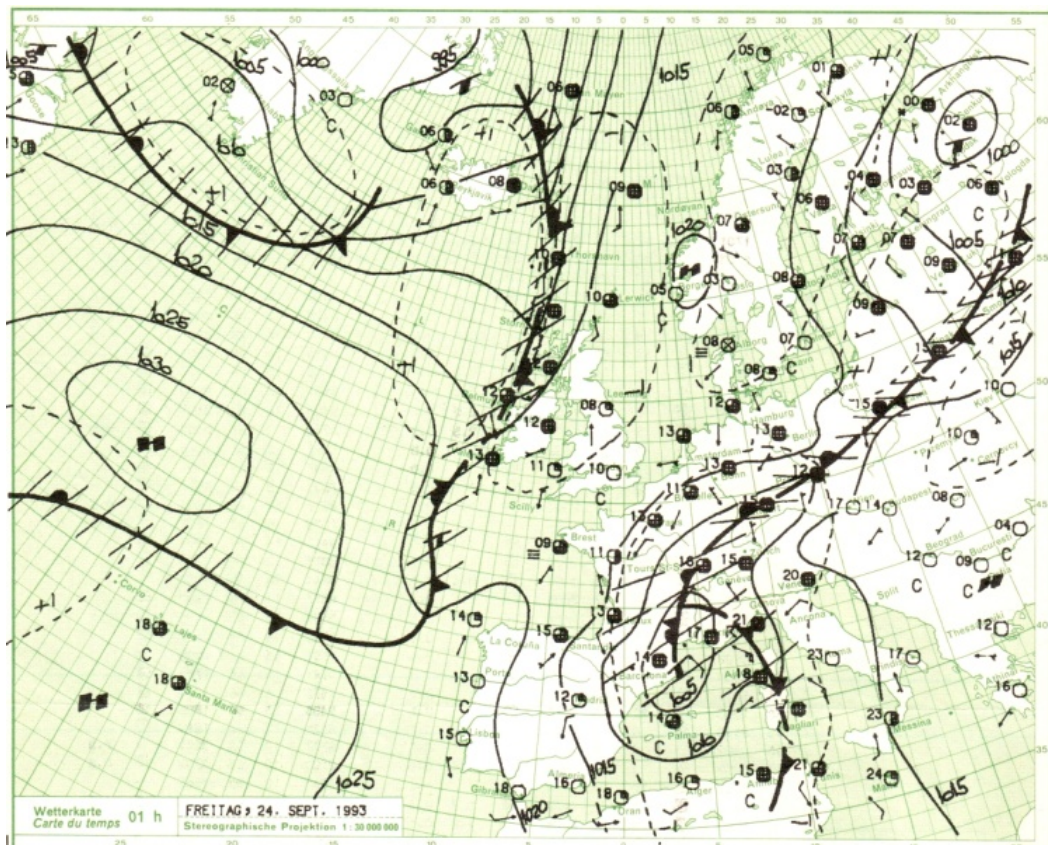
Ensuite, le 24 septembre, un front froid associé à la dépression creusée au sud des Alpes passe sur le Haut-Valais. Il provoque de nouvelles précipitations, cette fois de nature frontale et non pas orographique. Ces dernières viennent s'ajouter aux pluies de barrage des journées précédentes qui se sont encore poursuivies pendant la journée du 24.



Carte 6 : Position des fronts le 22 septembre à 01h UTC (bulletin MétéoSuisse)



Carte 7 : Position des fronts le 23 septembre à 01h UTC (bulletin MétéoSuisse)

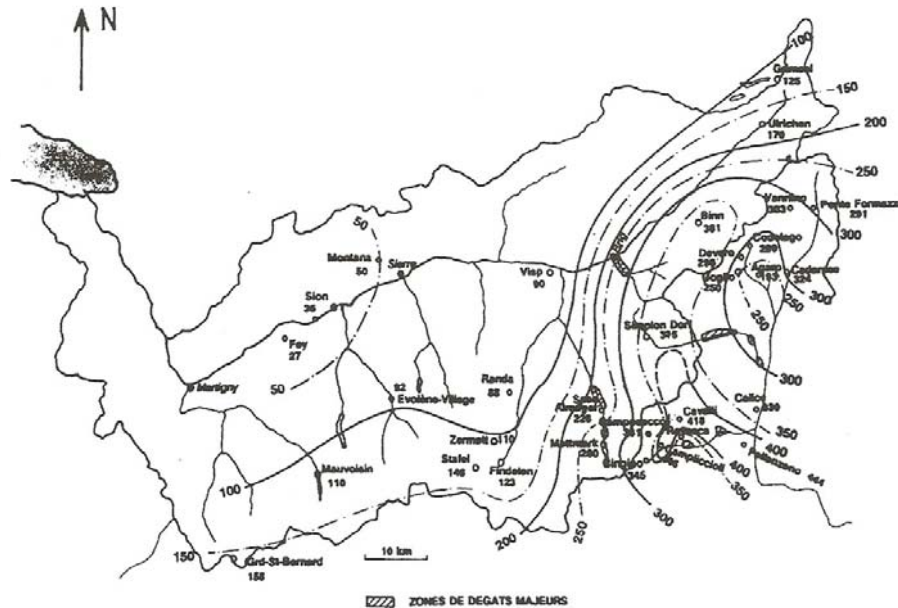


Carte 8 : Position des fronts le 24 septembre à 01h UTC (bulletin MétéoSuisse)



### 5.2.2. Déroulement des précipitations

La moitié des précipitations est tombée entre le 22 et le 23 septembre. L'autre moitié est arrivée le 24. Les cumuls de pluie de la journée du 24 ont été très importants. C'est principalement les régions du Simplon et du Binntal qui ont été touchées avec des records de précipitations sur trois jours. Les autres stations alentours n'ont pas enregistré de valeurs extraordinaires. La quantité de précipitations diminue rapidement vers l'ouest et le nord.



Carte 9 : Isolignes de précipitations mesurées dans la région du Simplon entre le 22 et le 25 septembre 1993 (CREALP, 1994)

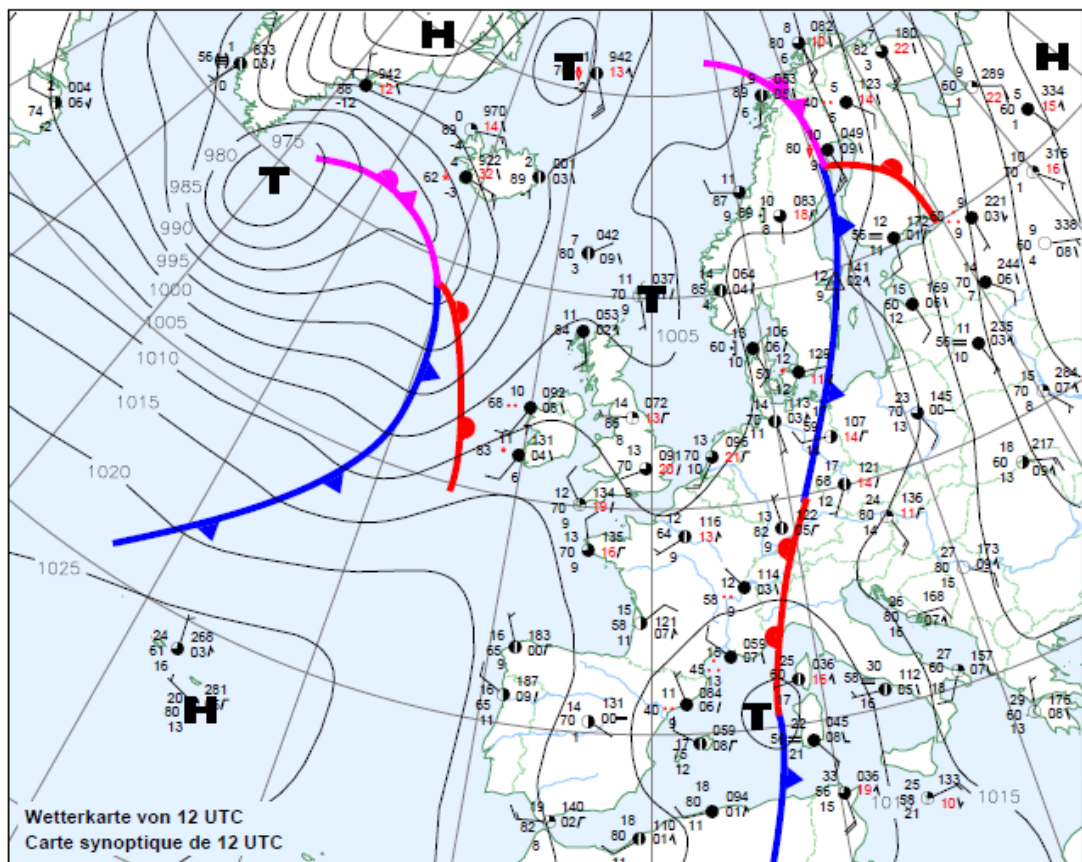
### 5.2.3. Conséquences des intempéries

Les précipitations du 22 au 23 septembre ont complètement gorgé d'eau les sols. Le 24, l'eau n'a pas pu s'infiltrer et a ruisselé, provoquant des crues et des laves torrentielles dévastatrices principalement dans les régions du Simplon, du Saastal et du Mattertal. Les dégâts les plus importants ont été constatés à Brigue où la Saltine est sortie de son lit suite à une embacle. Les rues de la ville ont été envahies par plus de 250'000 m<sup>3</sup> de boue et de gravats.

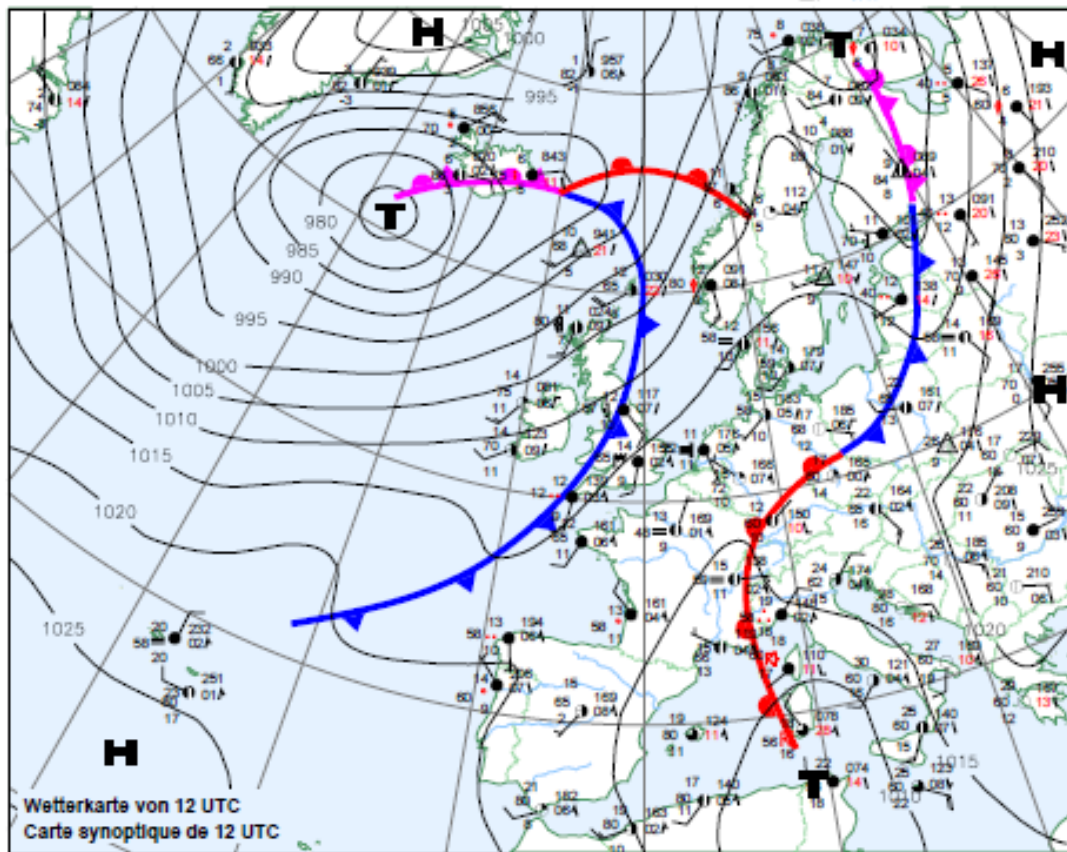
### 5.3. Intempéries d'octobre 2000

#### 5.3.1. Situation météorologique

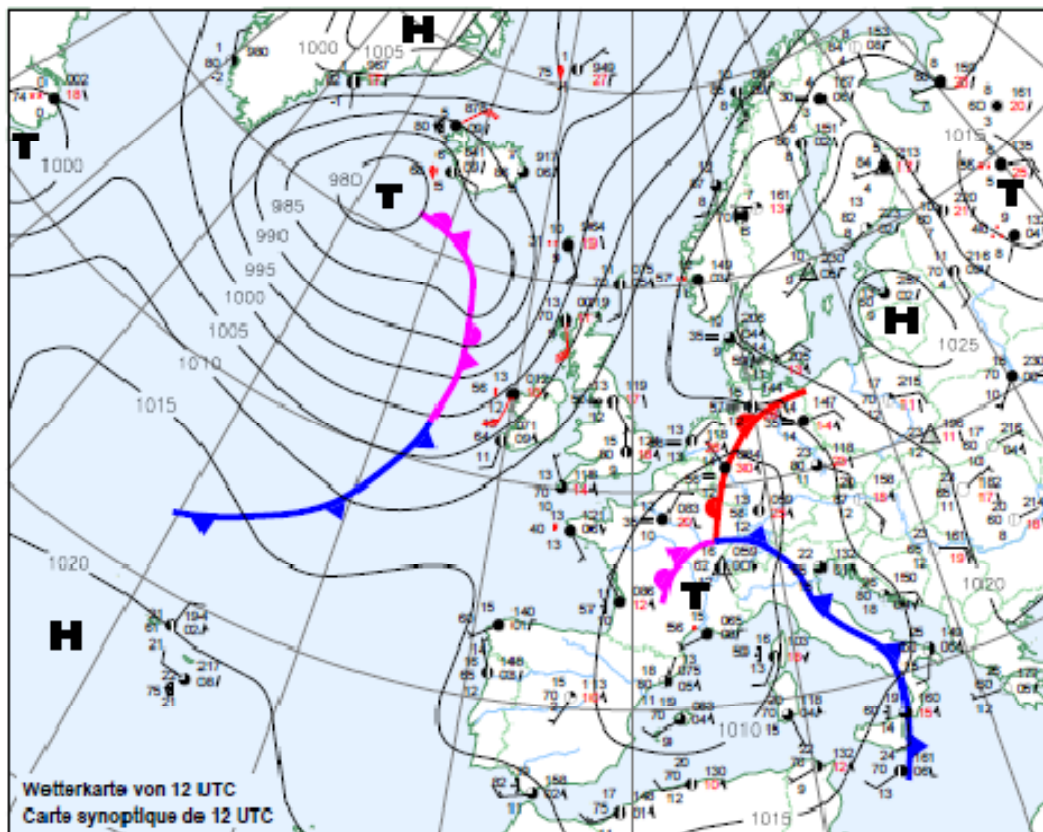
C'est, comme souvent, une situation du sud qui a provoqué les crues d'octobre 2000 doublée d'un thalweg dépressionnaire orienté sud-ouest/sud-est (TRW). Pendant 7 jours (du 10 au 16 octobre), un afflux d'air chaud et humide est venu buter contre le sud des Alpes. En gravissant les Alpes, ces masses d'air provoquent un effet de barrage actif et se déchargent de leur humidité sous forme de pluies intenses. La limite entre les masses d'air polaire et subtropical humide restera pendant plusieurs jours au voisinage des Alpes. Dès le 12 octobre, un couloir dépressionnaire se met en place entre l'Algérie et la Manche. Vers les Alpes, le flux provient du sud-sud-est. Entre les 13 et 14 octobre, le paroxysme de l'intensité des précipitations est atteint dans la région du sud du Simplon jusqu'à Domodossola. En effet, dès le 13, une masse d'air subtropical envahit les Alpes. Le contraste thermique avec l'air polaire d'altitude contribue au développement de précipitations convectives en plus de celles de barrage. Le 15 octobre, un front froid en provenance de l'Atlantique provoque des pluies importantes dans le Bas-Valais (90 mm). Le front froid s'évacue par l'est en cours de journée ce qui permet l'arrêt des précipitations le 16.



Carte 10 : Position des fronts le 13 octobre à 12h UTC (bulletin MétéoSuisse)



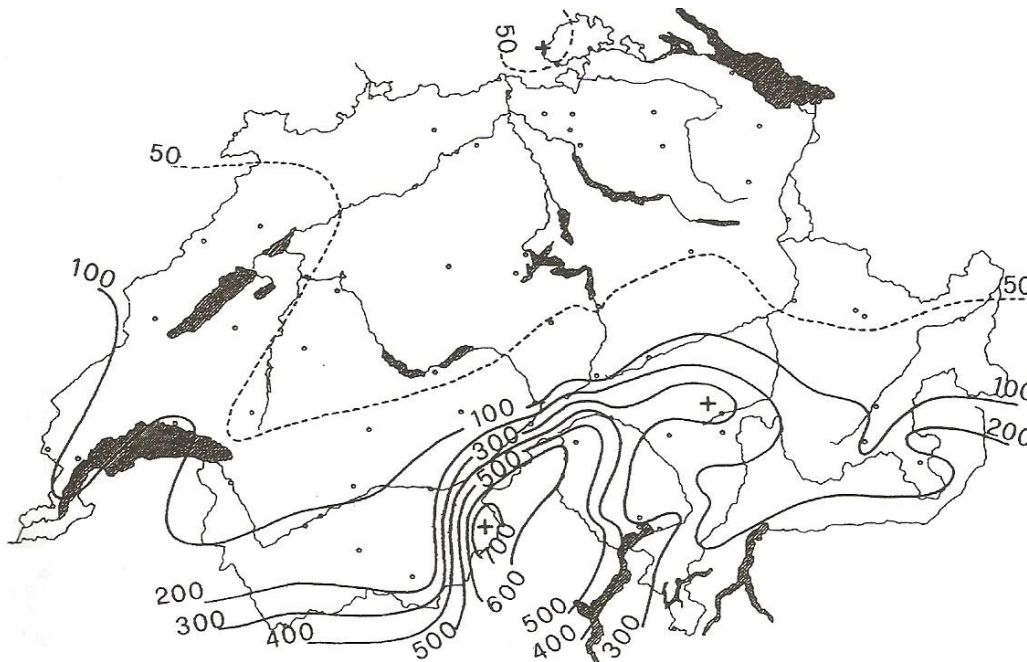
Carte 11 : Position des fronts le 14 octobre à 12h UTC (bulletin MétéoSuisse)



Carte 12 : Position des fronts le 15 octobre à 12h UTC (bulletin MétéoSuisse)

### 5.3.2. Déroulement des précipitations

Cet évènement se distingue de celui de 1993 par sa durée (7 jours contre 3) particulièrement longue. La quantité de précipitations est également plus élevée qu'en 1993. Les vallées situées en rive gauche du Rhône ont reçu entre 100 et 150 mm en 2 jours. Aux abords de la crête sud des Alpes, les valeurs étaient encore plus importantes. Ce sont là des valeurs centennales pour ces territoires plutôt secs. Le Haut-Valais et particulièrement la région du Simplon ont été touchés le 13 et 14 octobre (cumuls de plus de 500 mm en 48 heures). Le 15, c'est le Bas-Valais qui a été arrosé plus assidument. Pour la station du Grand-St-Bernard, le temps de retour calculé de ce type d'intempéries est de 1'000 ans (OFEG) sur l'ensemble de l'épisode. Ce temps de retour semble correctement estimé bien que la multiplication de l'occurrence des intensités extrêmes comme 1987, 1993 et 2000 porte à penser le contraire. Il se peut que le temps de retour de ce genre d'évènements se réduise dans le futur.



Carte 13 : Isolignes de précipitations mesurées entre le 8 et le 17 octobre 2000 (Grebner et al., 2000)

### 5.3.3. Conséquences des intempéries

Les dégâts sont importants dans tout le Valais et spécifiquement dans le Haut-Valais. Cette région a reçu les quantités d'eau les plus importantes. Les sols ont été rapidement saturés ce qui a notamment provoqué des coulées boueuses. Le village de Gondo sur le versant sud du Simplon a été coupé en deux par une avalanche de boue

suite à la rupture de la digue située à l'amont du village. En amont de Viège, à Neubrûck, une lave torrentielle a détruit 5 bâtiments. Ces deux catastrophes ont causé la mort de 15 personnes. Les autres vallées latérales du Haut-Valais n'ont pas été épargnées. Des laves torrentielles sont descendues dans le Binntal et dans la vallée de Conches provoquant des dégâts importants aux infrastructures routières notamment. Dans la plaine du Rhône, le village de Baltschieder a été recouvert de gravats par le torrent qui le traverse. Le Rhône a également débordé en plusieurs endroits comme entre Viège et Brigue, vers Steg-Gampel et entre Varone et Salquenen. Plus en aval, des ruptures de digues ont aussi provoqué des inondations vers Saillon et Fully. Dans les vallées latérales du Valais central et du bas, les dégâts bien qu'importants furent plus localisés. Certains lits de torrents ont été le théâtre de laves torrentielles de grande ampleur. Des glissements de terrain ont également eu lieu dans le Val d'Illiez et ailleurs. Le Valais a donc payé un lourd tribut à ces intempéries d'octobre 2000. Des mesures de protection et de prévention ont immédiatement été entreprises afin d'éviter de revivre un tel scénario.

#### **5.4. Conclusions**

Les trois intempéries présentées sont représentatives des autres épisodes de fortes précipitations qui ont émaillé le 20<sup>ème</sup> siècle. D'un point de vue météorologique, le point commun de toutes ces situations est une advection orientée sud-ouest à sud-est qui dure sur plusieurs jours. Les masses d'air humide en provenance du sud (Méditerranée surtout) viennent buter contre les Alpes. Les situations du sud sont les plus critiques à la fin de l'été et en automne lorsque la mer Méditerranée est chaude et que beaucoup d'eau s'évapore dans l'atmosphère. L'air chaud venant du sud peut emmagasiner beaucoup de vapeur d'eau car la capacité hygrométrique maximale de l'air augmente avec sa température. De fortes précipitations tombent sur le sud des Alpes alors que le nord est également arrosé par débordement. La région du Simplon et du Binntal ainsi que le Grand-St-Bernard peuvent mesurer des cumuls extraordinaires en cas de persistance de cette advection de sud. Les autres régions comme le Bas-Valais sont également touchées par un front froid du nord-ouest. Bloqué par la situation de barrage au sud, ce front froid stagne sur le nord des Alpes et provoque d'importantes pluies. Les facteurs météorologiques conduisant à des épisodes de précipitations exceptionnelles pour le Valais sont donc plus ou moins identifiés. Dans une optique de prévision avec un modèle de type cause-conséquence par recherche de situations analogues, les variables-causes des événements doivent être déterminées le plus justement possible. L'analyse des intempéries passées permet une meilleure compréhension des phénomènes. Cela servira plus tard lors du paramétrage du modèle notamment.



## 6. Essai de prévision de précipitations pour le val de Bagnes

Après un regard sur le passé, il est aussi pertinent de s'intéresser au futur. La deuxième partie du mémoire se concentre sur la prévision météorologique à court terme (24 à 36 heures) à l'aide d'un modèle de prévision de précipitations.

En 2009, la commune de Bagnes via son géologue communal, François-Joseph Baillifard, a mandaté la société *METEORISK* à Sion afin de développer un modèle de prévision de précipitations. Cette partie du mémoire a été réalisée sous la supervision du Dr. Robert Bolognesi, directeur du bureau *METEORISK*. L'organisme de gestion de la sécurité de la commune souhaite connaître la quantité d'eau qu'une perturbation peut engendrer. Les infrastructures sises sur le territoire de la commune sont en certains endroits vulnérables en cas de crues. Prévoir les précipitations, c'est mieux prévenir les possibles dommages envers les habitants et les infrastructures de la commune.

Ce travail a débuté en hiver 2009 par une recherche bibliographique qui a démontré la difficulté de trouver des études concernant la problématique des prévisions locales de précipitations. Elles sont soit le fruit de la recherche académique notamment en France à l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) ou en Suisse à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Des thèses réalisées à l'INPG ont utilisé un modèle de type CBR (case based reasoning). Le modèle *HydroLog*, présenté plus tard, est de ce type. Le début du travail a consisté à réunir des valeurs de précipitations recueillies sur le territoire de la commune de Bagnes. Dans un premier temps, les données de la station agronomique de Bruson ont été retenues. Du fait d'une durée de recueil trop courte, c'est finalement la station MétéoSuisse de Montagnier et ses données qui ont été utilisées pour mener les tests de fiabilité du système. Dans le même temps, les données de pluie de Mauvoisin et de Fionnay de la station des Forces Motrices de Mauvoisin (FMM) ont été gracieusement fournies. Après des essais prometteurs pour la prévision des jours avec des précipitations inférieures à 15 mm, d'autres ont été menés avec 116 jours, depuis 1985, où la quantité de précipitations est supérieure à 21 mm. Le système ainsi que les résultats des tests sont présentés dans les deux prochains chapitres.





## **7. Modèle de prévision de précipitations *HydroLog***

### **7.1. Principe général**

Le logiciel *HydroLog* a été réalisé sur la base du module de calcul *XLog Engine* conçu à l'origine pour le système de prévision des avalanches *NivoLog*. Il s'agit d'un système appartenant à la famille des modèles CBR, aussi nommés modèles de raisonnement par analogie. Son créateur est Robert Bolognesi, docteur ès Sciences de l'EPFL, fondateur et directeur du bureau d'étude *METEORISK* à Sion. L'actuel degré de développement du module de calcul est le fruit de plus de vingt ans d'améliorations continues.

Pour réaliser ce type de modèle, il est nécessaire d'identifier les causes directes du phénomène à prévoir. Pour *HydroLog*, c'est la quantité de précipitations qui doit être prévue. Ces causes doivent ensuite pouvoir être traduites par un jeu de variables statistiquement indépendantes et le plus discriminantes possibles. C'est cette dernière qualité qui rend ce type de modèle efficace. Il faut ensuite constituer une base de données aussi riche que possible, rassemblant des cas décrits par les variables-causes et par les variables-conséquences. Le principe de diagnostic consiste alors à rechercher des cas présentant la plus grande analogie en ce qui concerne les variables-causes puis, pour l'ensemble de ces cas similaires, à analyser les variables-conséquences. La recherche d'analogie s'effectue à l'aide de calculs de distance euclidienne dans l'espace des cas à  $n$  dimensions défini par les  $n$  variables-causes considérées.

### **7.2. Implémentation**

Le modèle *HydroLog* comporte plusieurs éléments distincts :

- Un module de gestion des données qui permet de stocker toutes les données utiles à l'analyse des résultats, sous forme de différents fichiers (relevés, photographies et vidéos).
- Un modèle de type CBR fournissant une sélection de cas similaires en permettant de choisir les différents paramètres utiles au calcul comme les pondérateurs, les normalisateurs et les filtres.
- Divers utilitaires de maintenance du système tels que la sauvegarde, le transfert de fichiers et autres.

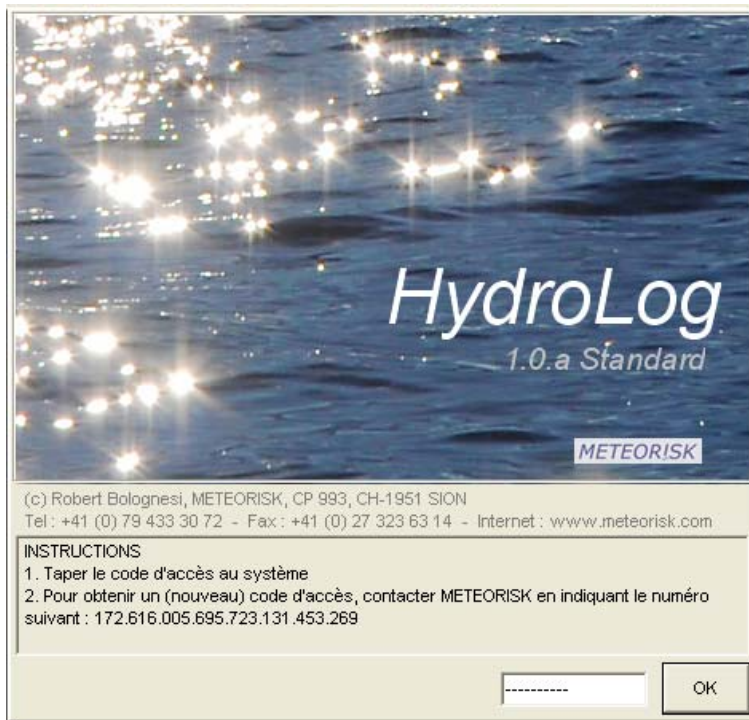


Figure 5 : Page d'accueil du système *HydroLog*

Figure 6 : Module de gestion des données du système *HydroLog*

### 7.3. Variables d'entrée

Pour le secteur géographique du val de Bagnes, des données géographiques, hydrographiques, hydro-météorologiques ainsi que des données sur les crues sont enregistrées dans le système. Les données géographiques et hydrographiques ne sont actuellement pas utilisées pour l'analyse. Elles le seront éventuellement lors de futurs développements dans le cas où d'autres types de modèles seraient utilisés. Elles permettent cependant d'archiver les informations de référence du secteur. Le fichier de données hydro-météorologiques regroupe des relevés météorologiques censés posséder un lien (plus ou moins fort et direct) de causalité avec les phénomènes à prévoir et des données décrivant ces derniers. Le fichier des crues permet de décrire plus en détail, si besoin, un phénomène particulièrement intéressant soit par son intensité, sa représentativité ou sa rareté.

Le système est ainsi conçu qu'il est possible de traiter plusieurs bassins versants. Pour chacun d'entre eux, la base de données peut être adaptée en fonction des besoins, avec autant de fichiers que nécessaire.

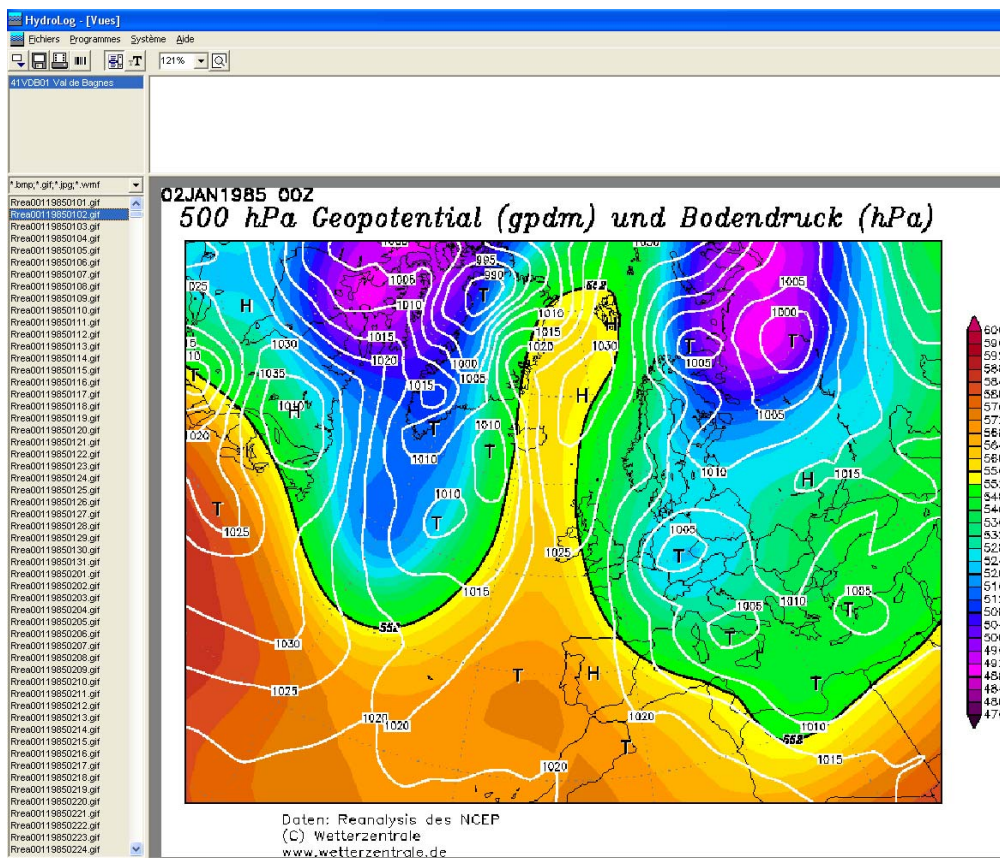


Figure 7 : Module de gestion des images du système *HydroLog*

Ce module permet d'archiver et de référencer toutes les images utiles. Trois types d'images sont intéressants pour l'application présente :

- Les cartes météorologiques synoptiques au niveau 500 hPa qui représentent les champs de pression sur l'Atlantique Nord et l'Europe, et qui permettent ainsi de valider les analogies locales en s'assurant qu'elles correspondent à des analogies globales. Au total, les cartes de 1985 à 2005 ont été archivées et référencées pour *HydroLog*. Ces cartes proviennent de la base de données de *METEORISK*, elle-même constituée à partir des informations de Wetterzentrale.
- Afin de réaliser une prévision de qualité, une carte météo au sol avec les fronts (MétéoSuisse) est analysée en parallèle. La position de ces derniers est importante afin de déterminer la localisation des précipitations.
- Les photographies d'événements particuliers pouvant contribuer à affiner les prévisions. Des images de crues, de cours d'eau et d'évènements particuliers sont aussi archivées.

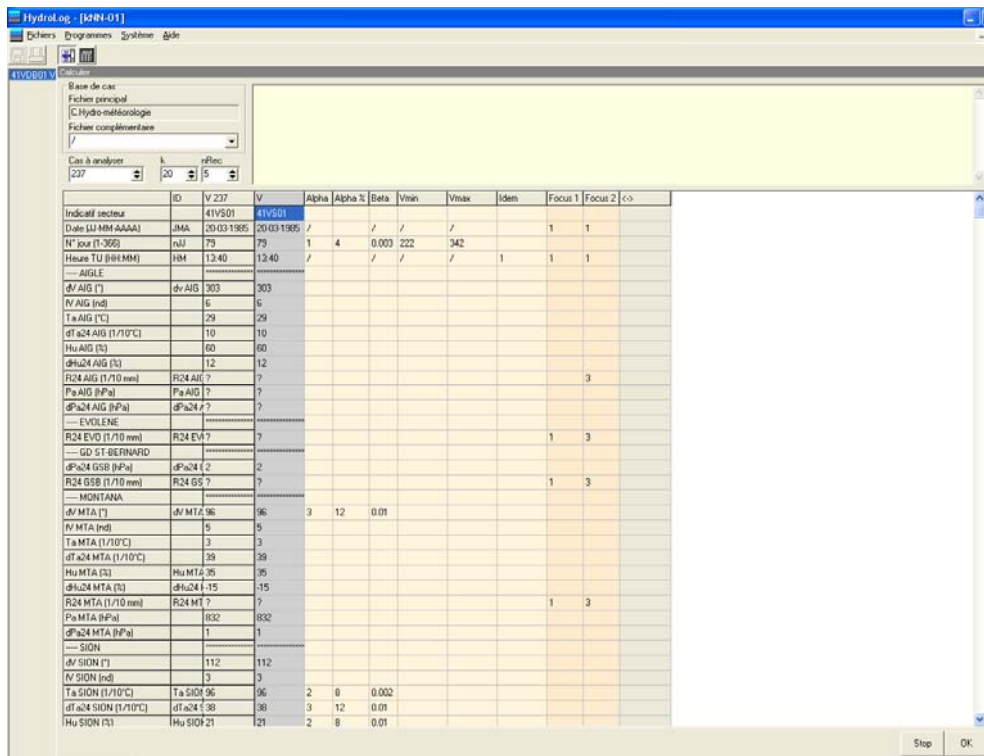


Figure 8 : Module d'analyse du système *HydroLog*

Ce module permet d'identifier les situations du passé similaires à la situation à analyser. Un panneau de contrôle invite l'utilisateur à paramétrer le calcul en initialisant :

- Le fichier à analyser (nommé « fichier principal » dans le panneau de contrôle).

- Le fichier comportant les éventuelles précisions sur les phénomènes à prévoir (nommée « fichier complémentaire »). Dans le cas présent, ce fichier n'est pas utilisé car non complété.
- Le cas à analyser, repéré par son numéro d'enregistrement.
- Le nombre de cas similaires à sélectionner (variable « k »).
- Le nombre de situations succédant à chacun des cas similaires et constituant ainsi un court historique (variable « nRec » dans le panneau de contrôle). Cette variable *nRec* est très utile car toutes les mesures et observations décrivant une même situation ne sont pas relevées à la même heure et donnent donc lieu à des enregistrements successifs indépendants. La succession des situations permet de percevoir l'évolution des conditions.
- Le paramètre Alpha, indiquant la pondération attribuée à chacune des variables (le paramètre Alpha%, non modifiable par l'utilisateur, indique la valeur relative de la pondération fixée par Alpha).
- Le paramètre Beta, fixant la normalisation des variables pondérées, évitant une distorsion due aux différentes étendues des domaines de définition des variables.
- Les filtres Vmin, Vmax et Idem, permettant de réduire, *a priori*, la base de cas utile à l'analyse.

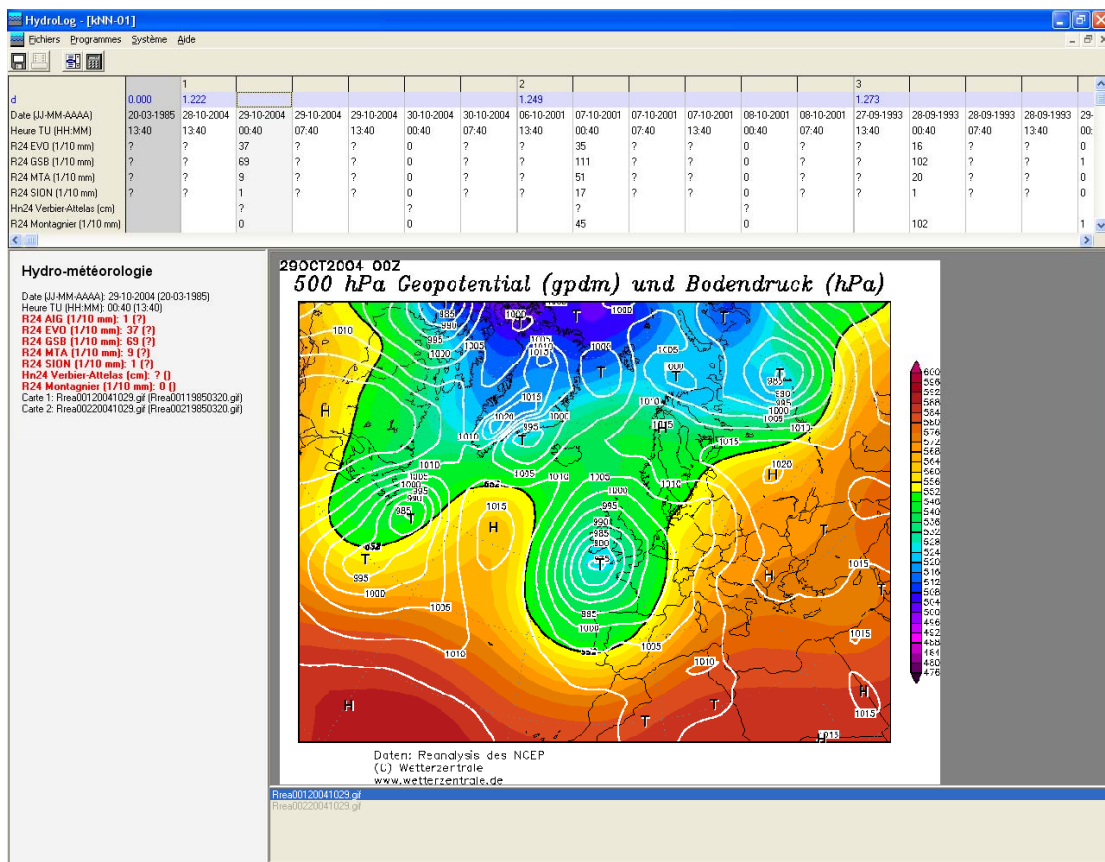


Figure 9 : Module d'analyse du système *HydroLog*. Exemple d'output

#### 7.4. Variables de sorties

Le programme délivre trois informations principales :

- La liste des cas analogues (fenêtre supérieure) avec les variables descriptives choisies par l'utilisateur.
- La carte synoptique correspondant au jour des cas analogues.
- La carte météo au sol avec les fronts correspondant au jour des cas analogues.

#### 7.5. Paramétrages

Le paramétrage, c'est-à-dire la pondération accordée à chaque variable descriptive, permet de caractériser les situations météorologiques selon leur provenance notamment. Un paramétrage efficace est celui qui trouve le plus de cas voisins (cartes synoptiques) dans la base de données. La détermination de la valeur accordée à chaque variable s'effectue de manière empirique par le prévisionniste responsable du projet. La connaissance de la météorologie locale est très importante pour repérer les variables les plus explicatives. Les discussions entre les collaborateurs de *METEORISK* permettent de légitimer un paramétrage précis qui sera ensuite testé.

Dans un premier temps, deux paramétrages ont été élaborés. Ils ont été utilisés pour les tests de performance du modèle avec les valeurs de précipitations de la station de Bruson. Ils se sont révélés efficaces pour la prévision des faibles précipitations (1 à 15 mm). Ces jeux de paramètres sont les suivants :

Abréviations :

- dV = direction du vent
- Pa = pression atmosphérique
- $\Delta Pa_{24}$  = variation de la pression atmosphérique en 24 h
- Hu = humidité relative de l'air
- $\Delta Hu_{24}$  = variation de l'humidité relative de l'air en 24 h
- Ta = température de l'air
- $\Delta Ta_{24}$  = variation de la température de l'air en 24 h

Ces jeux comportent également un filtre portant sur la direction du vent à Aigle :  $\pm 45^\circ$ .

	JP1	JP2
dV Aigle	+/- 45°	+/- 45°
Pa Aigle	1	4
$\Delta$ P24 Aigle	4	7
Hu Montana	1	1
$\Delta$ Hu24 Montana	2	2
Pa Sion	2	1
dPa24 Sion	6	2
Ta Sion	1	4
$\Delta$ Ta Sion	2	2

**Tableau 6 : Paramétrages 1 et 2 utilisés lors des premiers tests**

Dans un deuxième temps, il est devenu indispensable de mieux caractériser chaque situation météorologique. Lors de l'étude des cartes synoptiques, afin de définir un paramétrage efficace pour les fortes précipitations, des situations typiques de par la position des centres d'action sont apparues. Elles ont été triées en 4 régimes particuliers en plus du paramétrage standard de *METEORISK* déjà utilisé par les prévisionnistes. Les situations synoptiques suivantes ont fait l'objet d'un paramétrage spécifique en fonction de la position des centres d'action :

- Situation de nord-ouest
- Situation de sud-ouest
- Situation de sud
- Paramétrage pour les situations anticycloniques ou de marais barométrique à tendance orageuse

A noter que les appellations des trois premiers types de situations se définissent par la provenance des flux perturbés. Lors de l'utilisation du modèle, le champ de recherche à l'intérieur de la base de données a été limité à une fourchette de 60 jours avant et 60 après la date de la situation à prédire. Cette limitation permet de catégoriser les sorties du modèle selon une période de l'année.

Ces paramétrages sont présentés ci-après avec les variables prises en compte pour chaque station et les pondérations accordées aux variables. A noter que la station d'Aigle, *a priori* intéressante pour la prévision des précipitations dans le Val de Bagnes, n'a pas été retenue car les relevés des variables-causes entre 1985 et 1990 sont lacunaires.

### 7.5.1. Paramétrage standard *METEORISK*

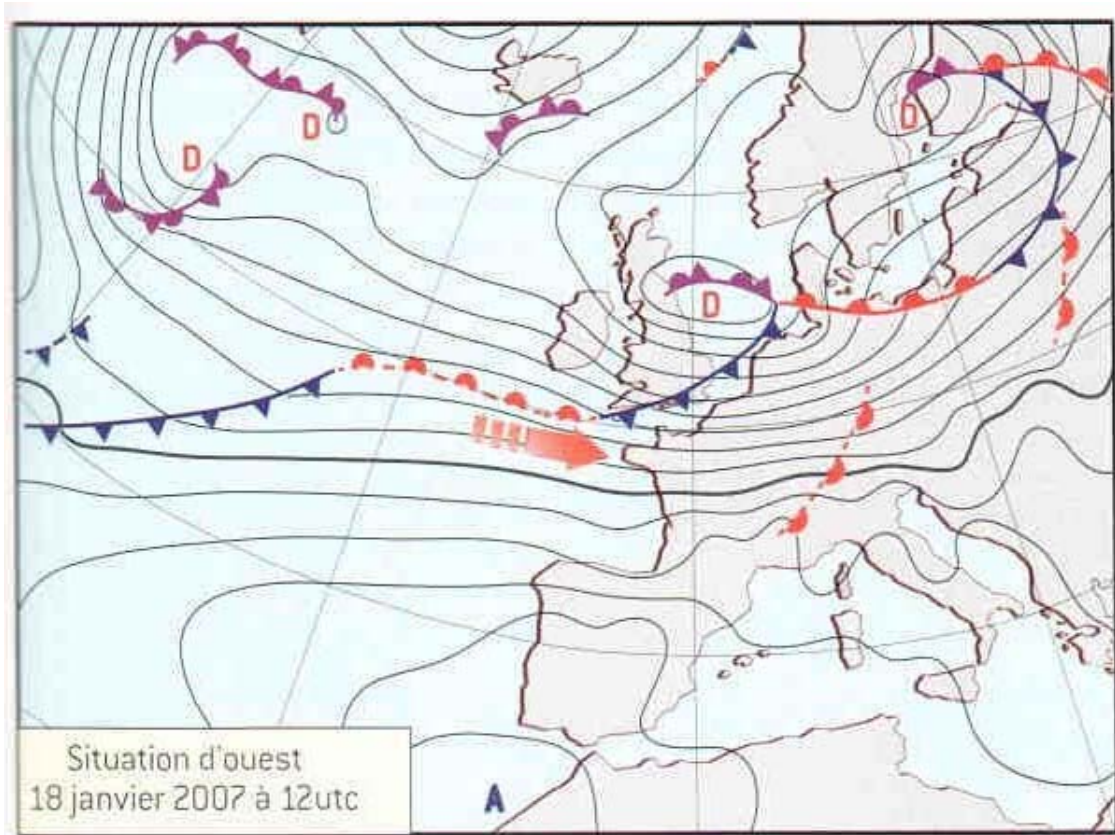
	<i>METEORISK</i>
dPa24 Grand-St-Bernard	/
dV Montana	3
Ta Montana	/
Ta Sion	2
dTa24 Sion	3
Hu Sion	2
dHu24 Sion	3
Pa Sion	3
dPa24 Sion	8

Tableau 7 : Paramétrage standard *METEORISK*

En premier lieu, c'est le paramétrage ci-dessus qui a été utilisé pour les essais de performance du modèle. Il provient du logiciel *MeteoLog* et a été affiné par les prévisionnistes de *METEORISK*. Il tient essentiellement compte des variables fournies par la station météorologique de Sion qui s'est trouvée être particulièrement indicative pour la prévision des précipitations en Valais. Le vent à Montana est retenu car il est en général moins canalisé que plus bas en altitude dans la vallée du Rhône. Ce sont principalement les situations mal définies qui ont été testées avec ce jeu de



paramètres et les situations plein ouest. Les cas où la situation est clairement établie nord-ouest ou sud-ouest ont été traités avec les jeux de paramètres ci-après.



Carte 14 : Situation d'ouest (Thillet et Schueller, 2009)

### 7.5.2. Paramétrages régimes nord-ouest et sud-ouest

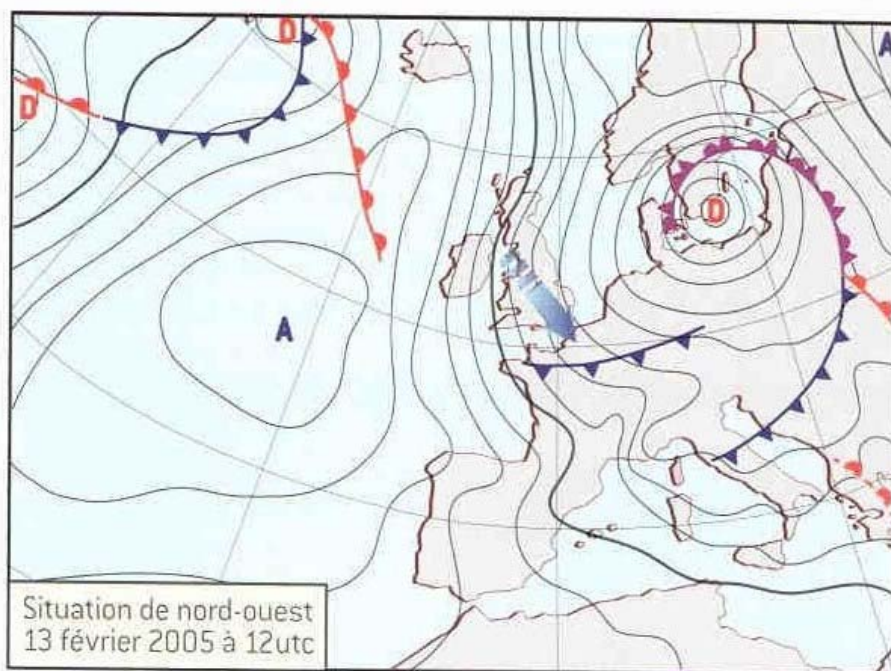
Le régime d'ouest est celui qui influence principalement le temps en Suisse. Notre pays bénéficie d'un climat tempéré dépendant du couple formé par l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. La circulation générale atmosphérique créée par ces deux centres d'action est orientée d'ouest en est sous nos latitudes à mi-chemin entre le pôle et l'équateur. Le flux perturbé (précipitations) provient préférentiellement du nord-ouest lorsque l'anticyclone des Açores est situé plus au nord sur l'Atlantique et que la dépression d'Islande est décalée vers l'est de l'Ecosse ou carrément sur le sud de la Scandinavie (cf. carte 15). Par contre, lorsque la dépression d'Islande se situe sur les îles britanniques et repousse l'anticyclone des Açores plus au sud, le flux perturbé s'oriente au sud-ouest (cf. carte 16). Ces deux situations sont possibles toute l'année. Deux paramétrages distincts en fonction de la provenance du flux perturbé (nord-ouest et sud-ouest) ont été élaborés.

### Paramétrage situation de nord-ouest

	Nord-Ouest
dPa24 Grand-St-Bernard	/
dV Montana	5
Ta Montana	/
Ta Sion	2
dTa24 Sion	3
Hu Sion	2
dHu24 Sion	3
Pa Sion	3
dPa24 Sion	8

**Tableau 8 : Paramétrage situation de nord-ouest**

Ce paramétrage ne diffère que peu de celui de base présenté plus haut. La pondération du vent à Montana est plus importante car cette station de mesure est particulièrement sensible au vent du nord-ouest annonciateur de l'arrivée d'un système perturbé générateur de précipitations. Les autres variables conservent leur pondération originale.



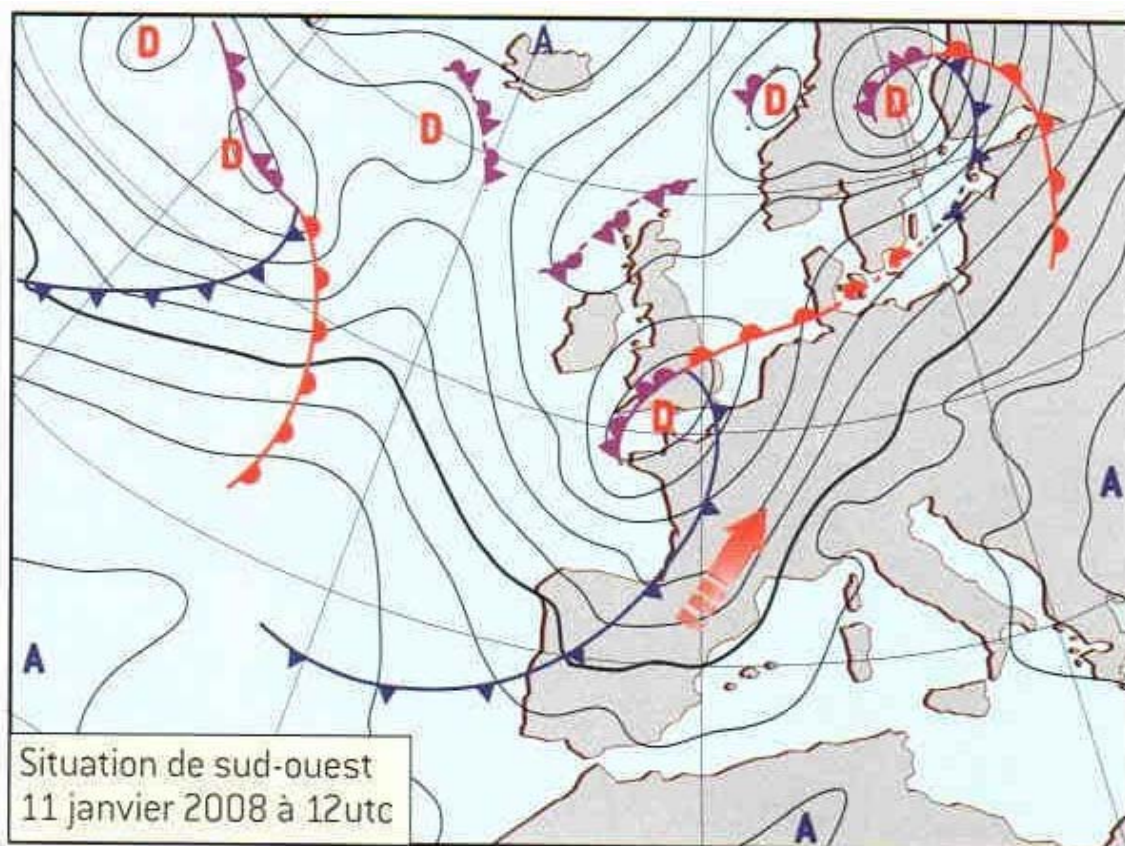
**Carte 15 : Situation de nord-ouest (Thillet et Schueller, 2009)**

### Paramétrage situation de sud-ouest

	Sud-Ouest
dPa24 Grand-St-Bernard	5
dV Montana	4
Ta Montana	/
Ta Sion	2
dTa24 Sion	3
Hu Sion	2
dHu24 Sion	4
Pa Sion	4
dPa24 Sion	5

**Tableau 9 : Paramétrage situation de sud-ouest**

Le paramétrage pour les situations de sud-ouest prend en compte la variation de pression sur 24 heures à la station du Grand-St-Bernard. Cette station reçoit passablement de précipitations lors de tels flux perturbés. Une baisse de pression est un bon indicateur d'une prochaine dégradation des conditions météorologiques. La même variable est pondérée également à Sion tandis que le vent à Montana est pondéré avec un facteur 4. La prise en compte des autres mesures ne diffère pas du paramétrage *METEORISK*.



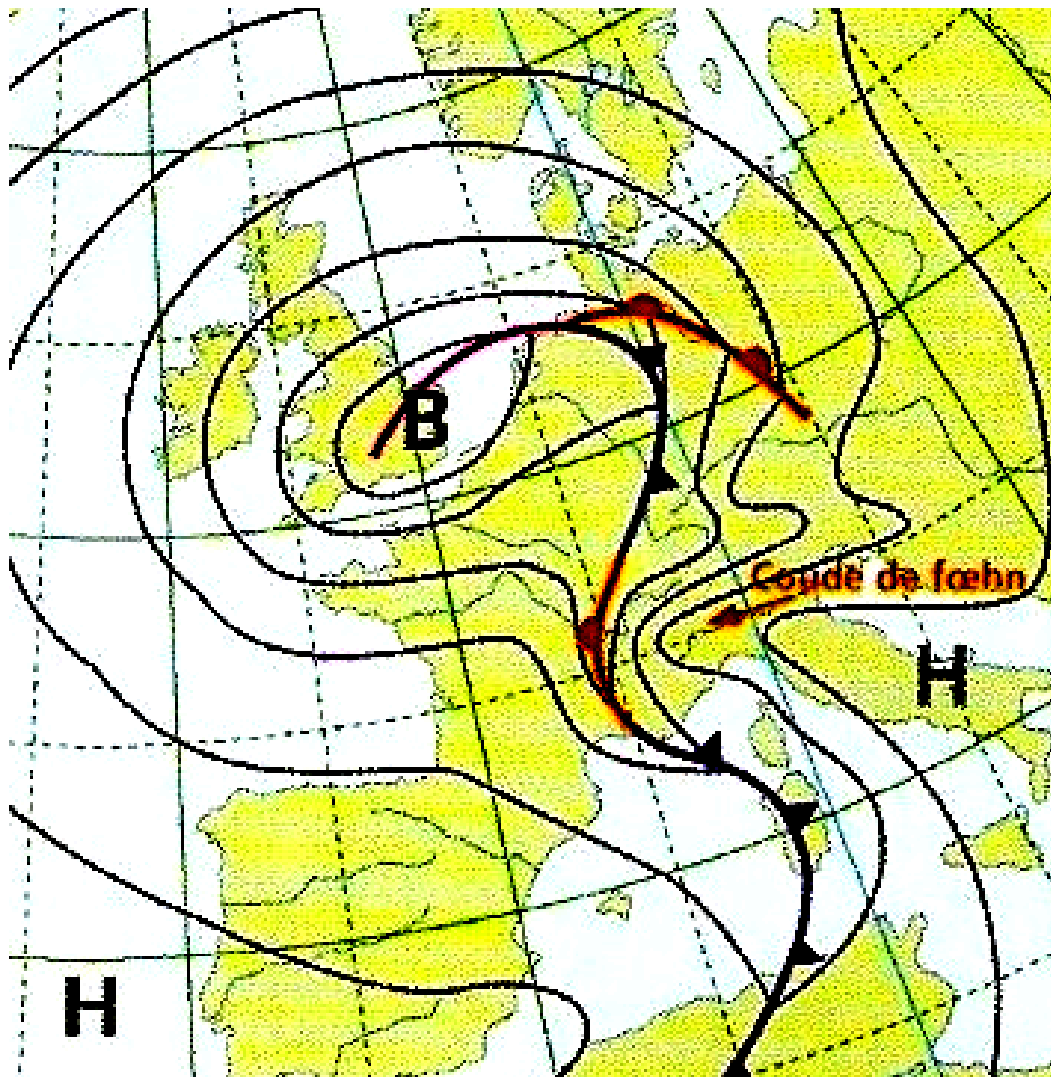
Carte 16 : Situation de sud-ouest (Thillet et Schueller, 2009)

### 7.5.3. Paramétrage régime de sud

	Sud
dPa24 Grand-St-Bernard	8
dV Montana	/
Ta Montana	/
Ta Sion	2
dTa24 Sion	3
Hu Sion	2
dHu24 Sion	3
Pa Sion	2
dPa24 Sion	/

**Tableau 10 : Paramétrage situation de sud**

Ce paramétrage est utilisé lorsqu'il y a un excès de pression centré sur le golfe de Gênes ou le nord de l'Italie. Ce dernier est provoqué par un afflux d'air du sud-ouest à sud-est qui provoque une augmentation de la pression sur le versant sud des Alpes. Cet air en provenance de la Méditerranée s'accumule au sud des Alpes et provoque des précipitations. Cette situation occasionne du foehn sur le versant nord de la crête principale des Alpes et la création du coude de foehn. Les précipitations peuvent parfois déborder au nord au voisinage des cols. De manière générale, le foehn dans les vallées du nord des Alpes indique une tendance à un temps sec. Cependant, lorsque le foehn s'arrête, des précipitations sont possibles grâce à une entrée d'air humide depuis le sud-ouest. Ce paramétrage est utile pour prédire la quantité de précipitation par débordement dans le fond des vallées de la rive gauche du Rhône par temps de foehn ou pour repérer les situations de foehn suivies de précipitations en provenance du sud-ouest.



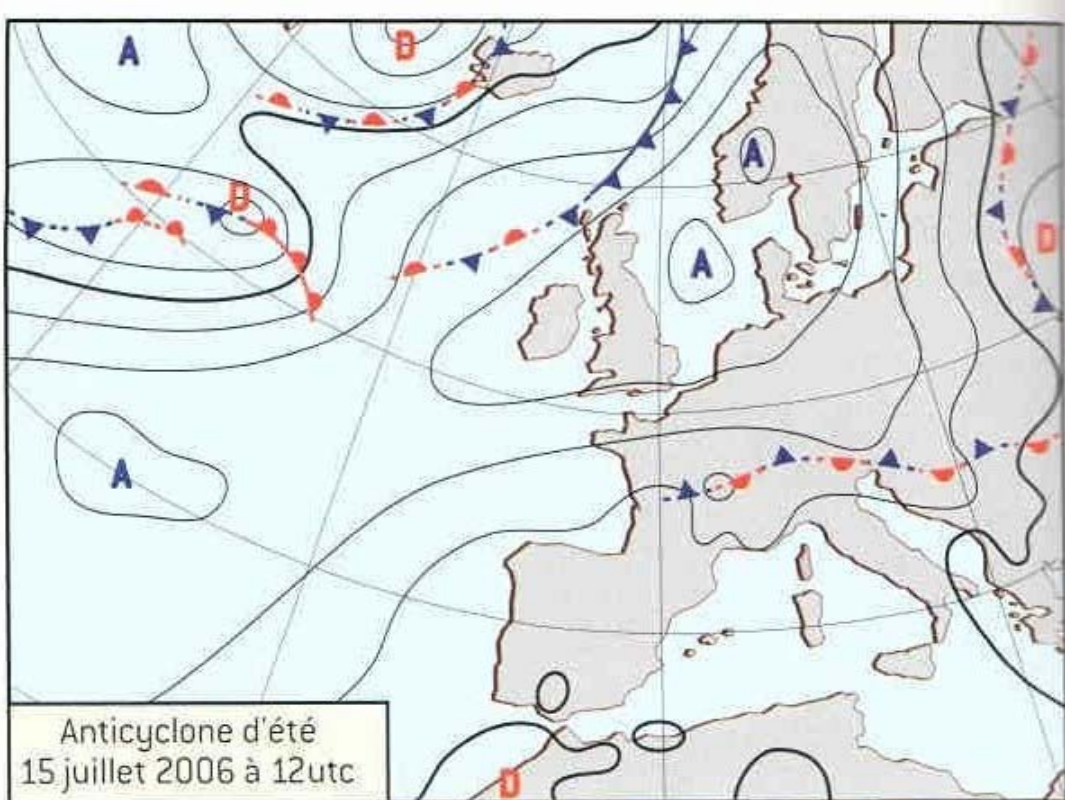
Carte 17 : Situation de sud (MétéoSuisse)

#### 7.5.4. Paramétrage situation à tendance orageuse

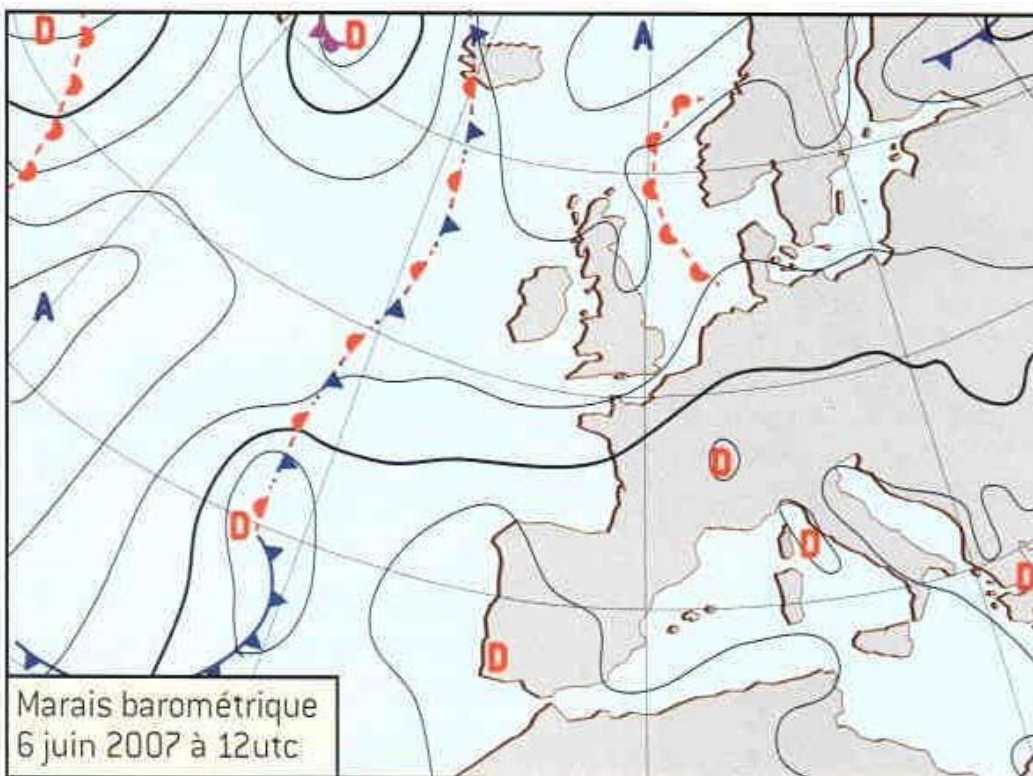
	Tendance orageuse
dPa24 Grand-St-Bernard	/
dV Montana	/
Ta Montana	4
Ta Sion	3
dTa24 Sion	/
Hu Sion	4
dHu24 Sion	6
Pa Sion	2
dPa24 Sion	2

**Tableau 11 : Paramétrage situation anticyclonique ou de marais barométrique à tendance orageuse**

Ce paramétrage est utilisé quasi uniquement pour la saison d'été lorsque l'anticyclone des Açores est actif sur l'Europe centrale ou lorsqu'une situation de marais barométrique prédomine. Il sert principalement à déterminer la probabilité d'occurrence d'orages convectifs lors des chaudes journées d'été. A cette fin, l'humidité et la variation d'humidité sur 24 heures sont pondérées plus fortement car elles déterminent le potentiel convectif de l'atmosphère. Les températures à Sion et en altitude à Montana sont aussi précieuses afin de reconnaître les journées à caractère orageux.



Carte 18 : Situations d'anticyclone estivale (Thillet et Schueller, 2009)



Carte 19 : Situations de marais barométrique (Thillet et Schueller, 2009)



### 7.5.5. Tableau récapitulatif des paramétrages

Les différents paramétrages permettent de caractériser au mieux la situation synoptique du jour précédent les précipitations. Après avoir déterminé la situation météorologique qui prévaut, l'opérateur choisit le paramétrage adapté. En cas de doute ou si le modèle ne fournit pas de sorties analogues, plusieurs paramétrages peuvent être utilisés pour le même cas jusqu'à obtenir suffisamment de situations similaires. Cette démarche est utile quand la caractérisation d'une situation est difficile ou que cette dernière est mal déterminée.

	<i>METEORISK</i>	Nord-Ouest	Sud-Ouest	Sud	Tendance orageuse
dPa24 G-St-Ber.	/	/	5	8	/
dV Montana	3	5	4	/	/
Ta Montana	/	/	/	/	4
Ta Sion	2	2	2	2	3
dTa24 Sion	3	3	3	3	/
Hu Sion	2	2	2	2	4
dHu24 Sion	3	3	4	3	6
Pa Sion	3	3	4	2	2
dPa24 Sion	8	8	5	/	2

**Tableau 12 : Récapitulatif des différents paramétrages**



## 8. Performances obtenues avec le modèle *HydroLog*

Les tests de fiabilité du modèle *HydroLog* ont été menés en deux fois. La première volée de tests s'est surtout concentrée sur les cas de faibles précipitations car la station de Bruson ne comptait pas suffisamment de cas de fortes précipitations afin d'établir des statistiques de performances fiables. La deuxième volée de tests a servi à évaluer les capacités du modèle à prédire les précipitations au-dessus de 21 mm en 24 heures. A cette fin, ce sont les données de la station de Montagnier, plus riche en cas d'épisodes extrêmes car la période de relevés est plus longue (20 ans), qui ont été utilisées. Les données de la station de Montagnier et de Bruson ont été comparées. Sensiblement les mêmes valeurs se retrouvent pour chaque station lors de précipitations.

### 8.1. Indicateurs de performances

Les indicateurs retenus sont au nombre de trois :

- La moyenne des écarts (en valeur absolue) ;

Cette moyenne est calculée de la façon suivante : pour chaque cas de l'échantillon de test, une prévision de précipitation exprimée en millimètres est produite puis la différence entre la valeur mesurée et la valeur prédite est calculée. Ensuite, la moyenne des valeurs absolues de ces écarts est calculée. Enfin, cette moyenne est qualifiée à l'aide de l'écart-type (pour mémoire : racine carré positive de la variance).

- L'écart-type qui précise cette moyenne ;

L'écart-type permet d'apprécier la dispersion des valeurs autour de leur moyenne.

Ici cet écart-type a été calculé de façon conventionnelle en appliquant la formule :

$$\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

(n=nombre de cas traités ayant fourni une prévision)

- Les indices classiques des tables de contingence.

Les indices retenus sont les indices permettant de quantifier la fiabilité globale des prévisions mais aussi d'apprécier les tendances à la surestimation et à la sous-estimation pour chacun des paramétrages.

## 8.2. Résultats pour les précipitations faibles ou nulles

Les premiers tests de performances ont été réalisés sur les faibles précipitations (1 à 15 mm en 24 heures). Ce sont les données de précipitations de la station de Bruson qui ont servi lors de ces tests. Elles sont étalées sur la période 1998-2005 en tenant compte uniquement des précipitations liquides (pas de relevés de neige à cette station). Malgré un échantillon de test restreint affectant la fiabilité des résultats, ils sont présentés ci-dessous.

Les jeux de paramètres JP1 et JP2 ont été testés sur un échantillon de cas répartis en trois classes. Le nombre de cas par classe est proportionnel à leur occurrence dans l'échantillon total.

	JP1	JP2
Moyenne des écarts pour la classe 0 – 1 mm - 28 cas	0.32	1.25
Ecart-type	0.69	2.73
Moyenne des écarts pour la classe 1 – 5 mm - 6 cas	1.38	1.80
Ecart-type	0.96	1.33
Moyenne des écarts pour la classe 5 – 15 mm - 3 cas	1.20	5.57
Ecart-type	0.30	3.75

**Tableau 13 : Moyenne des écarts entre les valeurs observées et prédites et écart-type pour chaque classe pour les jeux de paramètres JP1 et JP2**

## Commentaires

Ce premier test montre très clairement que les cas sans précipitations (classe 0-1 mm) sont bien prévus avec une moyenne des écarts et un écart-type faible pour les deux paramètres et en particulier pour le jeu de paramètres 1. Les faibles précipitations (entre 1 et 15 mm) sont également bien prévues avec des valeurs statistiques concluantes pour les deux autres classes.

Ce résultat appelle quelques commentaires. En effet, ce test n'est peut-être pas très fiable en ce qui concerne la classe 5-15 mm, d'une part parce que le nombre de cas testés est trop faible (seulement 3 cas), d'autre part parce que le nombre de cas enregistrés dans la base de données est également faible. Pour mieux évaluer la performance du modèle et mieux apprécier son potentiel d'assistance pour la gestion du risque de crue, il est donc nécessaire de faire un test systématique sur tous les cas de fortes précipitations. Cela a été effectué avec les données plus nombreuses de la station de Montagnier. Les résultats sont présentés au point 8.4.

En ce qui concerne la validation du paramétrage, le premier jeu de paramètres donne de bonnes performances pour les faibles précipitations de 0 à 15 mm. Le deuxième jeu de paramètres conduit à une performance globale moins bonne tant pour la moyenne des écarts que pour l'écart-type. Ce premier test conduirait donc à choisir le premier jeu de paramètres car il permet de mieux prédire les jours sans précipitations et avec des précipitations > 15 mm. Afin de le valider, ce jeu de paramètres doit être encore testé avec une base de données élargie soit avec les valeurs relevées à la station de Montagnier.

## Tables de contingence

### JP 1

		Valeurs prévues			Somme
		0-1 mm	1-5 mm	5-15 mm	
Valeurs observées	0-1 mm	19	3	0	22
	1-5 mm	1	3	0	4
	5-15 mm	0	0	2	2
Somme		20	6	2	28

Tableau 14 : Table de contingence par classes pour le jeu de paramètres 1 (JP1)

### JP 2

		Valeurs prévues			Somme
		0-1 mm	1-5 mm	5-15 mm	
Valeurs observées	0-1 mm	17	4	2	23
	1-5 mm	0	3	2	5
	5-15 mm	0	2	1	3
Somme		17	9	5	31

Tableau 15 : Table de contingence par classes pour le jeu de paramètres 2 (JP2)

La diagonale descendante de la table (ici en vert) regroupe tous les cas correctement prévus. Au-dessus de cette diagonale se trouvent les cas où les précipitations ont été surévaluées; en dessous sont regroupées les prévisions où les précipitations ont été sous-évaluées. A noter que des cas n'ont pas pu être prédits car aucune situation synoptique ne correspondait d'où la différence entre le nombre de cas du premier tableau statistique et celui des tables de contingence.

A partir de ces tables, on peut calculer certains indices quantifiant la performance du modèle en rendant compte de sa tendance à surévaluer ou sous-évaluer les précipitations futures :

**Perf** : Indice de performance générale : nombre de bonnes prévisions rapporté au nombre total de prévisions.

**SR** : Indice de surestimation : nombre de prévisions surestimées rapporté au nombre total de prévisions.

**SS** : Indice de sous-estimation : nombre de prévisions sous-estimées rapporté au nombre total de prévisions.

Les valeurs obtenues ici sont présentées ci-dessous :

	JP1	JP2
Perf	86%	68%
SR	10%	26%
SS	4%	6%

**Tableau 16 : Performances des jeux de paramètres 1 et 2 pour les faibles précipitations**

## Commentaires

Selon les résultats des tests fournis par les tables de contingence, le jeu de paramètres 1 est plus performant que le deuxième : le premier donne 86% de prévisions correctes contre 68% pour le deuxième.

Avec le premier jeu, les valeurs prévues sont sous-estimées par rapport aux valeurs observées dans 4% des cas et surestimées dans 10% des cas. Pour le deuxième jeu, le même phénomène est observé : les valeurs prédites ont tendance à être surestimées dans 26% des cas et sous-estimées dans 6% des cas. Les réserves formulées précédemment sur la faible taille de l'échantillon et de la base de cas restent valables.

Lors de l'interprétation de ces résultats, il ne faut pas perdre de vue qu'ils peuvent être biaisés en limite de classe. Une prévision peut être considérée comme incorrecte alors que la précipitation prévue est proche de la valeur estimée.

Exemple : si la valeur prévue est de 14 mm et la valeur observée est de 16 mm, la prévision sera considérée comme incorrecte, la limite de classe ayant été fixée à 15 mm ; or elle serait tout à fait utile et exploitable.

### 8.3. Conclusions

On peut noter que le modèle fournit de bonnes prévisions quantitatives pour les précipitations jusqu'à 15 mm. Il est cependant nécessaire de réaliser des tests sur un échantillon plus large et à partir d'une base de données plus fournie pour pouvoir juger définitivement des performances réelles des paramétrages et du modèle en général.

Le modèle fournit aussi d'assez bons résultats en termes de caractérisation des situations sans montrer une tendance excessive à surestimer ou à sous-estimer. Il devrait donc permettre de distinguer assez bien les situations de faibles précipitations jusqu'à 15 mm, surtout si la base de cas est enrichie et si les limites de classes sont affinées. Il peut donc déjà être utilisé pour une « pré-caractérisation » des situations.



#### 8.4. Résultats pour les fortes précipitations

Devant la nécessité de tester les performances du modèle pour les fortes précipitations (> 21 mm), de nouveaux essais ont été menés avec une base de données élargie et avec de nouveaux paramétrages adaptés aux diverses situations météorologiques rencontrées dans le val de Bagnes. Les résultats ci-après sont séparés en deux parties, soit une pour les précipitations de 21 à 40 mm et une pour celles supérieures à 40 mm. Il faut d'ailleurs noter que le seuil définissant les « fortes » précipitations en 24 heures (15, 25, 50 mm) pourrait être fixé de façon plus objective, notamment à partir des dommages constatés après de fortes pluies.

##### 8.4.1. Précipitations entre 21 et 40 mm

	Précipitations 21 – 40 mm
Moyenne des écarts pour le paramétrage <i>METEORISK</i> – 68 cas	14.37
Ecart-type	6.97
Moyenne des écarts pour le paramétrage nord-ouest – 9 cas	21.32
Ecart-type	9.03
Moyenne des écarts pour le paramétrage sud-ouest – 7 cas	20.09
Ecart-type	8.01
Moyenne des écarts pour le paramétrage sud – 2 cas	15.9
Ecart-type	9.76
Moyenne des écarts pour le paramétrage orages – 13 cas	12.32
Ecart-type	6.2
Moyenne des écarts pour les précip. 21 – 40 mm -99 cas	15.16
Ecart-type	7.5

Tableau 17 : Moyenne des écarts entre les valeurs observées et prédites et écart-type pour les cas entre 21 et 40 mm selon les paramétrages

Le tableau 17 illustre les résultats obtenus pour les précipitations mesurées de 21 à 40 mm en 24 heures. Ce sont les données de la station de MétéoSuisse de Montagnier qui ont été utilisées. Elles s'étalent sur 20 ans soit de 1985 à 2005. Les résultats sont ici présentés séparément pour chaque paramétrage. La moyenne des écarts entre les précipitations mesurées et prédites a été calculée ainsi que l'écart-type.

## Commentaires

Le paramétrage le plus utilisé lors des tests de performance du modèle a été celui de *METEORISK*. Nombre de situations n'ont pas pu être catégorisées clairement pour être testées avec les autres paramétrages spécifiques à certaines situations synoptiques. La moyenne des écarts entre les précipitations mesurées et prédites est de 14.37 pour les 68 cas qui ont fourni des résultats. L'écart-type est 6.97 ce qui illustre une dispersion limitée autour de la moyenne des écarts. Ce paramétrage fournit donc une assez bonne prévision des précipitations entre 21 et 40 mm. Les résultats sont d'autant plus valables que le nombre de cas testés est suffisant. Il est aussi à relever que ce paramétrage a, pour chaque cas, fourni une prévision. C'est-à-dire que le modèle a trouvé à chaque interrogation une ou plusieurs situations synoptiques analogues accompagnées de précipitations.

Le paramétrage pour les situations de nord-ouest typiques a été utilisé 9 fois. La moyenne des écarts est de 21.32 ce qui est relativement élevé en comparaison avec la moyenne des écarts pour le paramétrage *METEORISK*. L'écart-type, avec 9.03, affiche une dispersion également plus importante. Ces chiffres sont toutefois à relativiser en raison du faible nombre de cas analysés. Sur les 11 cas de départ, 2 cas n'ont pas fait l'objet de situations similaires dans le passé. Un plus grand nombre de cas fournirait certainement de meilleurs résultats. La problématique est également la même pour le paramétrage destiné aux flux de sud-ouest. Le modèle a fourni des résultats exploitables pour 7 cas sur 10. La moyenne des écarts affiche 20.09 et l'écart-type 8.01, ce qui est légèrement meilleur que pour le paramétrage nord-ouest.

Les résultats obtenus pour le paramétrage sud ne sont pas significatifs car seul 2 cas ont répondu aux critères de sélection de ce paramétrage.

Les orages sont par nature difficiles à prédire. Pourtant le paramétrage spécifique destiné aux orages de type convectif lors de situations anticycloniques ou de marais barométrique a donné des résultats réjouissants. Le nombre de cas analysés (13) est supérieur que pour les autres paramétrages. La moyenne des écarts entre les précipitations mesurées et prédites est de 12.32 et l'écart-type de 6.2. Cela démontre des erreurs de prévision limitées et influencées de moindre manière par de grandes erreurs. Le bémol vient des 5 cas d'orages qui n'ont pas trouvé de situations analogues

dans le passé. Il convient donc de poursuivre l'amélioration de ce paramétrage afin d'obtenir un maximum de cas similaires pour chaque journée à prédire. Le cumul des résultats de chaque paramétrage donne un aperçu de leur qualité. Sur les 109 cas entre 21 et 40 mm testés 99 ont permis une prévision de précipitations. Pour 10 cas, le modèle n'a pas présenté de situations analogues. Pour un cas, des situations similaires ont été trouvées mais aucune précipitation n'était prévue. Ainsi, pour l'ensemble des précipitations de 21 à 40 mm en 24 heures sur la période 1985-2005, les résultats du modèle sont les suivants : une moyenne des écarts de 15.16 et un écart-type de 7.5. Ces résultats quoique moyennement satisfaisants démontrent la capacité du modèle à caractériser correctement les situations de précipitations. Tous les paramétrages présentés peuvent être encore améliorés. La recherche va essentiellement se concentrer sur les variables fortement discriminantes propres à chaque situation.

Les tableaux suivants illustrent les tendances à la surestimation ou à la sous-estimation des valeurs prédites pour les précipitations entre 21 et 40 mm et pour chaque paramétrage. Une fourchette de +/- 5 mm a été déterminée pour considérer une prévision comme très bonne. Entre +/- 5-15 mm, la prévision est satisfaisante et au-delà de +/- 15 mm comme mauvaise. Le deuxième tableau présente le résultat des calculs de performance tels déjà vus plus haut pour les paramétrages JP1 et JP2.

### Paramétrage *METEORISK*

A la vue du tableau 18, un niveau de performance correct est obtenu pour le paramétrage *METEORISK*. La majorité des cas prédits (53%) se situent dans la fourchette de +/- 15 mm par rapport aux précipitations mesurées. Il y a tout de même une tendance à sous-estimer jusqu'à - 15 mm les précipitations dans 41.2% des cas et plus lourdement dans 45.6% des cas. Cela est problématique dans une optique de préventions des crues. La surestimation est elle quasi inexistante.

Différences entre valeurs observées et prédites <sup>2</sup>					
> - 15 mm	> - 5-15 mm	+/- 5 mm	> + 5-15 mm	> + 15 mm	Somme
31	28	7	1	1	68 cas
46.6%	41.2%	10.3%	1.5%	1.5%	100%

**Tableau 18 : Différences entre valeurs observées et prédites pour le paramétrage *METEORISK* et performances du paramétrage *METEORISK* (précipitations 21-40 mm)**

<sup>2</sup> Code couleur pour la comparaison entre valeur observée et prédite :  
vert : bonne prévision ; jaune : assez bonne prévision ; rouge : mauvaise prévision

### Paramétrage nord-ouest et sud-ouest

Pour les paramétrages nord-ouest (tableau 19) et sud-ouest (tableau 20), la tendance à la sous-estimation des précipitations prévues est très claire (> 15 mm) : nord-ouest 77.7% de sous-estimation et sud-ouest 71.4%. Le solde est contenu dans la fourchette - 15 mm. Seule une prévision se situe dans la classe +/- 5 mm. Ces performances relativement médiocres nécessitent une révision de ces deux paramétrages afin d'en améliorer la qualité des résultats. Une base de situations météorologiques plus conséquentes pour ces paramétrages serait aussi un moyen d'améliorer les résultats.

Différences entre valeurs observées et prédites					Somme
> - 15 mm	> - 5-15 mm	+/- 5 mm	> + 5-15 mm	> + 15 mm	
7	1	1	0	0	9 cas
77.7%	11.15%	11.15%	0%	0%	100%

**Tableau 19 : Différences entre valeurs observées et prédites pour le paramétrage nord-ouest et performances du paramétrage nord-ouest (précipitations 21-40 mm)**

Différences entre valeurs observées et prédites					Somme
> - 15 mm	> - 5-15 mm	+/- 5 mm	> + 5-15 mm	> + 15 mm	
5	2	0	0	0	7 cas
71.4%	28.6%	0%	0%	0%	100%

**Tableau 20 : Différences entre valeurs observées et prédites pour le paramétrage sud-ouest et performances du paramétrage sud-ouest (précipitations 21-40 mm)**

## Paramétrage orages

Bien que les orages soient difficilement prévisibles, le modèle permet une bonne caractérisation de ce genre de situations (tableau 21). Plus de 69.2% des cas analysés donnent une prévision correcte à +/-15 mm dont 15.4% correcte à +/- 5 mm. Ces résultats sont réjouissants. La tendance habituelle à la sous-estimation est toujours présente avec plus de 4 cas sur 13 mal prédits ( $> - 15\text{mm}$ ). Ici aussi, une base de données plus grande permettrait de connaître plus précisément la validité du modèle pour les situations orageuses.

Différences entre valeurs observées et prédites					
> - 15 mm	> - 5-15 mm	+/- 5 mm	> + 5-15 mm	> + 15 mm	Somme
4	6	2	1	0	13 cas
30.8%	46.1%	15.4%	7.7%	0%	100%

**Tableau 21** Différences entre valeurs observées et prédites pour le paramétrage orages et performances du paramétrage orages (précipitations 21-40 mm)

## Tous paramétrages

La performance totale de l'ensemble des paramétrages est donnée par le tableau 22. Les prévisions pour les précipitations entre 21 et 40 mm sont comprises dans un intervalle de +/- 15 mm pour 49.5% des situations. Etant donné que seulement 6 cas se situent dans le secteur positif de la fourchette entre 0 et + 15 mm, il est à considérer que la majorité des cas prédits se trouvent entre - 15 et 0 mm par rapport aux valeurs mesurées. Egalement 49.5% des cas ont été sous-estimés avec plus de 15 mm d'écart. Les améliorations futures amenées aux paramétrages pourront éventuellement corriger cette tendance marquée à la sous-estimation (alerte manquée) des sorties du modèle.

Différences entre valeurs observées et prédites					
> - 15 mm	> - 5-15 mm	+/- 5 mm	> + 5-15 mm	> + 15 mm	Somme
49	37	10	2	1	99 cas
49.5%	37.4%	10.1%	2%	1%	100%

**Tableau 22 :** Différences entre valeurs observées et prédites pour tous les paramétrages et performances globales tous paramétrages (précipitations 21-40 mm)

#### 8.4.2. Précipitations > 40 mm

Le modèle a aussi été testé sur les cas où les précipitations ont excédé 40 mm en 24 heures. Voici les résultats pour les 12 cas (sur 16 testés) ayant fourni des valeurs de précipitations avec une ou des situations synoptiques similaires. Le paramétrage sud n'a pas été utilisé car aucune situation synoptique ne représentait un flux en provenance du sud. Par contre, les situations ont pu être caractérisées avec les autres paramétrages définis par provenance de précipitations. Le paramétrage *METEORISK* n'a donc pas été utilisé pour les précipitations > 40 mm. Ces dernières ont été mesurées à Montagnier sur la période 1985-2005. Ci-dessous, le tableau 27 présente les résultats obtenus pour les précipitations extrêmes.

	Précipitations > 40 mm
Moyenne des écarts pour le paramétrage nord-ouest – 5 cas	28.4
Ecart-type	7.89
Moyenne des écarts pour le paramétrage sud-ouest – 5 cas	21.88
Ecart-type	16.29
Moyenne des écarts pour le paramétrage orages – 2 cas	13.05
Ecart-type	18.03
Moyenne des écarts pour les précipitations > 40 mm – 12 cas	23.13
Ecart-type	13.43

**Tableau 23 : Moyenne des écarts entre les valeurs observées et prédites et écart-type pour les cas > 40 mm**

## Commentaires

Trois paramétrages ont été utilisés : nord-ouest, sud-ouest et orages. Pour le premier, la moyenne des écarts entre les valeurs prédites et mesurées est de 28.4 sur un jeu de 5 cas. La dispersion autour de la moyenne est limitée puisque l'écart-type est de 7.89, le plus faible des différents paramétrages. Le paramétrage du sud-ouest a été employé pour 5 cas. Il fournit une moyenne des écarts de 21.88 et un écart-type élevé de 16.29. Le paramétrage spécifique pour les orages n'a été utilisé que pour deux situations. Les résultats ne sont donc pas significatifs pour les précipitations > 40 mm.

Sur les 20 années de relevés, seulement 16 cas ont dépassé les 40 mm en 24 heures. Cela pose la question de la fiabilité des tests effectués. Pour une prévision correcte, le modèle doit faire ressortir une ou plusieurs de ces situations. Malheureusement, les situations synoptiques propres aux épisodes de précipitations extrêmes sont très rarement semblables. Les résultats s'en ressentent et sont beaucoup moins bons que pour les précipitations entre 21 et 40 mm. La taille réduite de l'échantillon d'analyse ne permet pas non plus d'affirmer que le modèle est mauvais en ce qui concerne les précipitations > 40 mm. Il faudrait agrandir la base de cas extrêmes et tester à nouveau *HydroLog*. Après seulement, des conclusions définitives quant à la performance du modèle et à la pertinence des paramétrages pour la prévision des fortes précipitations pourraient être tirées.

Les tableaux suivants illustrent les performances pour le paramétrage sud-ouest et pour tous les paramétrages réunis. Une fourchette de +/- 15 mm a été déterminée pour considérer une prévision comme assez bonne.

### Paramétrage nord-ouest

Les valeurs prédites avec le paramétrage nord-ouest sont toutes sous-estimées avec un écart négatif supérieur à 15 mm. Le modèle a trouvé des précipitations de 16.3 à 25.1 mm en 24 heures mais pas au-dessus. Il n'y avait donc pas lieu de représenter les résultats.

### Paramétrage sud-ouest

Le paramétrage sud-ouest fournit 3 prévisions avec moins de 15 mm de sous-estimation (tableau 24). Une prévision est même précise à +/- 5 mm. Les 2 autres sont plus largement sous-estimées. Ce résultat est malgré tout réjouissant car il signifie que le modèle peut trouver des situations analogues même lors de précipitations extrêmes. Le tableau montre aussi une caractérisation assez bonne à bonne pour 60% (40 + 20) des cas. Bien sûr, le nombre peu élevé de cas ne permet pas de tirer des conclusions définitives quant à la validité du modèle pour ce type de précipitations.

Différences entre valeurs observées et prédites					Somme
> -15 mm	> -5-15 mm	+/- 5 mm	> + 5-15 mm	> +15 mm	
2	2	1	0	0	5 cas
40%	40%	20%	0%	0%	100%

Tableau 24 : Différences entre valeurs observées et prédites pour le paramétrage sud-ouest et performances du paramétrage sud-ouest (précipitations 21-40 mm)

### Paramétrage orages

Seuls 2 cas ont été analysés avec ce paramétrage. Si un cas a été largement sous-estimé (-25.8 mm), l'autre a été prédit à moins de 1 mm près (0.3 mm). Aucune conclusion ne peut, bien entendu, être tirée à partir de ces résultats. C'est pourquoi, les résultats du paramétrage orages pour les précipitations > 40 mm ne sont pas représentés.



## Tous paramétrages

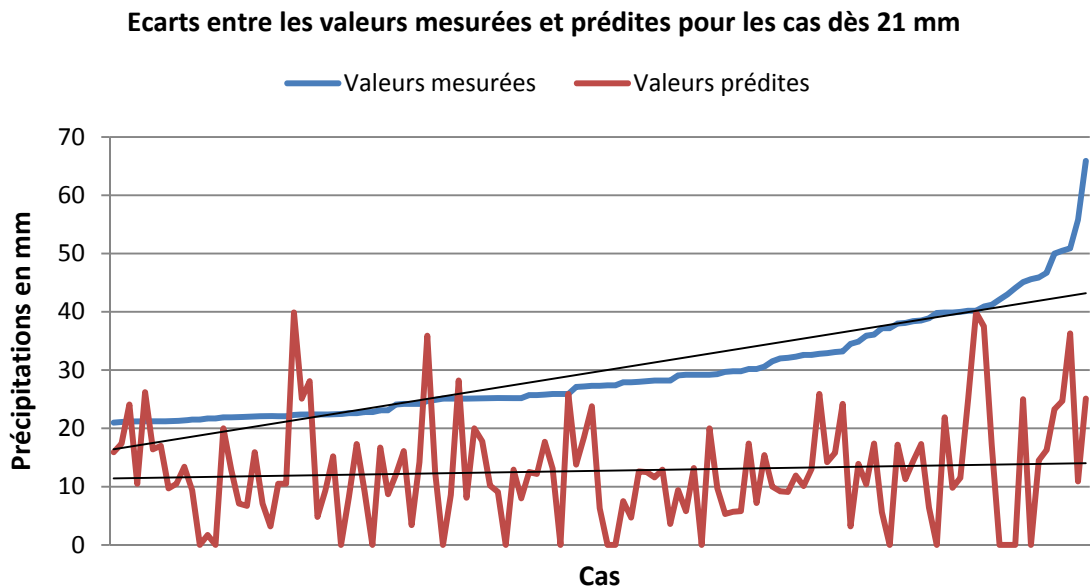
La performance générale des paramétrages pour les situations de précipitations > 40 mm est faible. Représentés dans le tableau 25, seuls 4 cas se retrouvent dans la fourchette +/- 15 mm : 3 cas pour le paramétrage sud-ouest et 1 pour celui destiné aux orages. Aucun cas n'est surestimé. Pour le reste, 16,7% des cas sont bien prédits, 16,7% des cas assez bien prédits quoique sous-estimés et 66,6% des cas sont fortement sous-estimés. Le modèle ne propose pas une bonne fiabilité des prévisions pour les précipitations > 40 mm. L'agrandissement de la base de cas et la détermination de paramétrages spécifiques aux situations synoptiques les plus courantes ont déjà permis des avancées. Des progrès restent encore indispensables à une prévision opérationnelle journalière de qualité au service d'une collectivité dans une optique de prévisions des crues. Les paramétrages doivent être affinés et la base de cas si possible encore agrandie notamment avec les données de 2005 à 2010.

Différences entre valeurs observées et prédites					
> -15 mm	> -5-15 mm	+/- 5 mm	> + 5-15 mm	> +15 mm	Somme
8	2	2	0	0	12 cas
66.6%	16.7%	16.7%	0%	0%	100%

**Tableau 25 : Différences entre valeurs observées et prédites pour tous les paramétrages et performances globales tous paramétrages (précipitations > 40 mm)**

## 8.5. Conclusions

Les tests effectués sur les cas de précipitations supérieures à 21 mm ont permis de constater une amélioration sensible par rapport aux premiers essais du modèle en 2009 (résultats non présentés ici). Pour la majeure partie des situations, le modèle a fourni des situations synoptiques analogues et également des précipitations. Cela est absolument réjouissant et permet d'espérer encore une progression des performances. Le tableau ci-dessous illustre le principal problème actuel d'*HydroLog* : le modèle sous-estime les précipitations à venir. Les valeurs mesurées sont classées dans l'ordre croissant. Les valeurs prédites sont classées vis-à-vis du cas qu'elles représentent. Si les précipitations mesurées augmentent, celles prédites ne croissent de loin pas avec la même tendance. La sous-estimation est donc toujours plus marquée pour les précipitations extrêmes.



Graphique 19 : Ecarts entre les valeurs mesurées et prédites pour les cas de précipitations dès 21 mm

Deux raisons peuvent expliquer cet état de fait. Tout d'abord, les cas de précipitations > 40 mm en 24 heures sont rares. La station de Montagnier a relevé seulement 16 cas de ce type de 1985 à 2005. Comme *HydroLog* base son efficacité sur la richesse de la base de données, cette faiblesse est rédhibitoire pour espérer une performance élevée. Une extension de la base de données vers le bas et vers le haut pourrait déjà permettre une amélioration sensible des résultats. Ensuite, une bonne prévision repose principalement sur la reconnaissance des variables explicatives des cas de précipitations et en particulier lors de fortes pluies ou neiges. Ce type de variable n'a

peut-être pas encore été identifié en tant que telle. Des adaptations des paramétrages voire la recherche d'autres variables-causes seraient sans doute bénéfiques à la fiabilité des résultats du modèle.

Le développement du modèle *HydroLog* se poursuit au sein du bureau *METEORISK*. Il s'oriente maintenant vers l'utilisation de cartes de fronts, en sus des cartes synoptiques, afin de mieux caractériser et différencier les situations météorologiques ; vers l'agrandissement de la base de données ; vers l'affinage des paramétrages selon la provenance des flux perturbés et la recherche de variables-causes les plus explicatives possibles (potentiel d'eau précipitable notamment, PWAT).



## 9. Forces et faiblesses du modèle *HydroLog*

### 9.1. Forces

Au contraire des logiciels de prévisions numériques, le modèle *HydroLog* effectue une recherche dans une base de données pour fournir un résultat. La puissance informatique requise pour effectuer une telle démarche est beaucoup moins importante que celle requise pour l'utilisation des modèles numériques. Un modèle numérique tel *COSMO* (MétéoSuisse) nécessite des super-ordinateurs capables d'effectuer des milliards d'opérations en peu de temps. Par exemple, pour une prévision, *COSMO* intègre 100'000 milliard d'opérations à réaliser en 20 minutes (MétéoSuisse, 2010). *HydroLog* permet d'analyser les premiers résultats après environ une vingtaine de secondes. La rapidité et le peu de puissance de calculs nécessaires rendent possible l'utilisation de ce programme sur des ordinateurs portables. Cela est très utile dans une optique de diffusion de ce logiciel au plus grand nombre d'utilisateurs possibles. Cette rapidité permet également une réactivité accrue lors d'une demande de prévision à faible échéance.

Une grande qualité d'*HydroLog* est sa capacité à être modifié dans des délais très courts par son inventeur R. Bolognesi. Les options de paramétrage, de visualisation ou encore de recherche des données peuvent être modifiées au besoin des utilisateurs pour une meilleure efficacité ou pour l'adapter à des besoins spécifiques. De plus, pour les utilisateurs habitués à *NivoLog*, la prise en main est relativement aisée en raison de la parenté des modèles.

### 9.2. Faiblesses

Les performances du modèle *HydroLog* dépendent en grande partie de la richesse de la base de données. Plus le recueil de données s'étale sur une longue période, plus la possibilité de trouver des cas similaires est grande. Il est donc nécessaire de posséder des données de la région étudiée en suffisance pour une prévision fiable des précipitations. Cependant, au-delà de 40 ans de données, les performances de ce genre de modèles stagnent (Bontron, 2004). Avec une grande base de données, le temps d'analyse du logiciel augmente aussi.

Le modèle *HydroLog* ne fournit pas des résultats directement exploitables. L'utilisateur doit les interpréter notamment par rapport à la situation synoptique actuelle et à la position des fronts. Il doit faire preuve de connaissances météorologiques pour fournir une prévision correcte.

Les événements extrêmes tels octobre 2000 sont très difficiles à prédire notamment au niveau de leur ampleur. En effet, si la base de données ne contient pas

d'évènements exceptionnels, il n'est pas possible d'avoir des résultats satisfaisants pour des précipitations avec des temps de retour de 500 ou 1000 ans. Cela est particulièrement gênant car les autorités sont intéressées à connaître la survenance des précipitations extrêmes pour proposer des mesures de protection appropriées contre les intempéries.

Le modèle *HydroLog* tend à sous-estimer les précipitations lorsque les hauteurs d'eau dépassent 20 mm en 24 heures. Cette sous-estimation est la plus grande pour les précipitations extrêmes (> 40 mm).

## 10. Autres modèles de prévision de précipitations ou de crues

### 10.1. MétéoSuisse

MétéoSuisse utilise et développe un système numérique de prévisions à haute précision nommé *COSMO* (MétéoSuisse, 2010). Le but est de générer automatiquement des prévisions locales et régionales au-dessus de topographies complexes comme les Alpes. *COSMO* est développé dans le cadre d'une collaboration internationale. Les six services météorologiques nationaux d'Allemagne, de Grèce, d'Italie, de Pologne, de Roumanie, de Russie et de Suisse collaborent étroitement au sein du Consortium for Small-Scale Modelling (*COSMO*). Ce consortium a été fondé en octobre 1998 avec l'objectif général suivant : développer, améliorer et maintenir un modèle atmosphérique non-hydrostatique à aire limitée pour une utilisation opérationnelle et pour des activités de recherche par les membres du consortium. Les détails concernant ce modèle sont difficiles à connaître. La description ci-dessous provient en grande partie des informations disponibles au travers de MétéoSuisse.

Un modèle numérique de prévisions est basé sur des lois physiques qui décrivent les processus atmosphériques ainsi que les processus de surface comme par exemple la conservation de l'énergie, les transformations de phase, etc. Il nécessite des conditions initiales et des conditions aux bords appropriées ainsi qu'une méthode numérique pointue pour résoudre le système complexe d'équations correspondant à l'expression mathématique des lois physiques susmentionnées. Ces équations décrivent une grande variété de processus atmosphériques se déroulant à différentes échelles spatio-temporelles, comme le développement de systèmes de basse pression, les chutes de neige, le foehn ou encore la convection estivale. Les calculs sont réalisés sur une grille tridimensionnelle dans laquelle l'espacement vertical des niveaux n'est pas constant afin d'obtenir une résolution plus fine pour les conditions atmosphériques des basses couches de l'atmosphère.

Les conditions initiales adéquates pour démarrer une prévision sont produites en combinant les observations atmosphériques actuelles, les résultats de précédentes simulations réalisées avec les modèles et des informations climatiques d'une façon compatible avec les équations du modèle. *COSMO* reprend aussi les résultats des simulations réalisées par les modèles de circulation atmosphérique globale de l'*ECMWF* (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) pour les affiner à une échelle régionale et locale. C'est le processus dit d'assimilation. Dans une période d'assimilation type de 24 heures, *COSMO-7* intègre environ 120 sondages verticaux, quelques 8'000 observations issues de l'aviation, 28'000 observations de surface et environ 1'000 mesures de vent. *COSMO-2* prend encore en compte des données de pluie issues de mesures radar afin de mieux représenter l'activité convective notamment en été. Ensuite, pratiquement, une image détaillée de l'état futur de

l'atmosphère est calculée depuis la basse stratosphère jusqu'à la surface du sol en incluant l'évolution de la couverture neigeuse, la température des lacs et des mers et les caractéristiques du sol. Les prévisions standards sont disponibles jusqu'à trois jours à l'avance sur un domaine couvrant l'Europe Centrale et l'Europe de l'Ouest (prévisions *COSMO-7*) et des produits plus détaillés sont disponibles jusqu'à 24 heures en avance sur un domaine recouvrant essentiellement l'arc alpin (prévisions *COSMO-2*). Ces prévisions fournissent une aide quantitative aux prévisionnistes dans l'établissement de leurs prévisions journalières. Ils contribuent à la sécurité de la population par le biais d'alertes, par exemple en cas d'événements météorologiques extrêmes. Ils répondent aux besoins spécifiques de nombreux utilisateurs professionnels. Le contrôle permanent du système *COSMO* est indispensable à toute prévision de haute qualité.

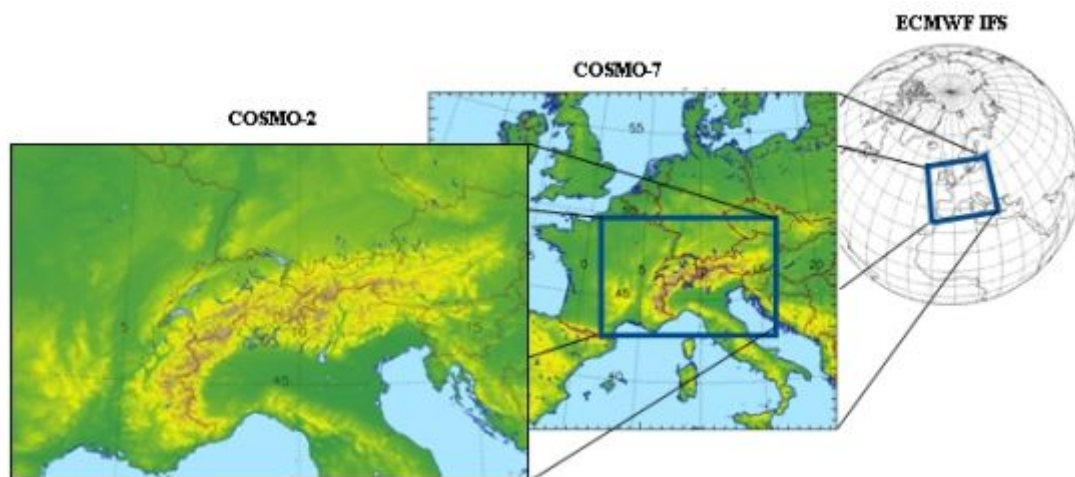
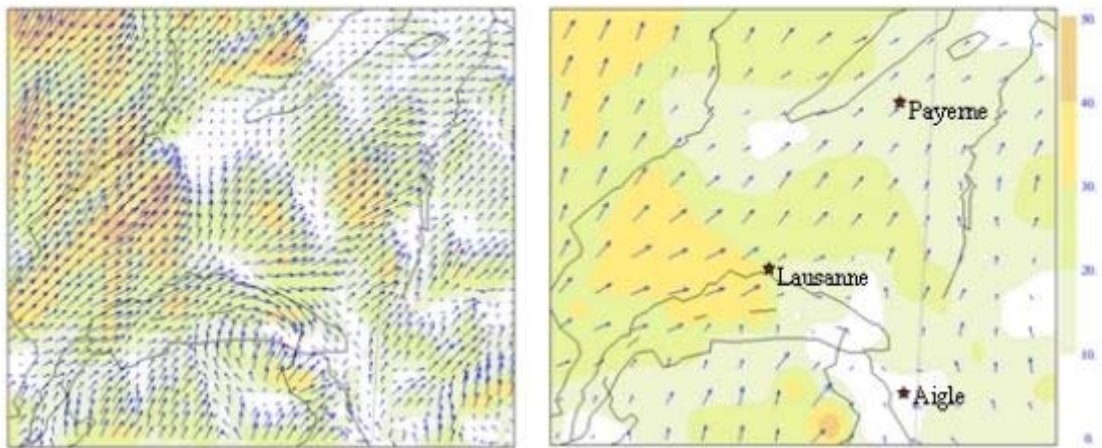


Figure 10: Les trois modèles numériques de prévision imbriqués du système *COSMO*. Le Centre Européen pour les Prévisions à Moyenne Echelle (*ECMWF*) exploite un modèle global décrivant les échelles synoptiques. MétéoSuisse exploite un modèle à l'échelle régionale, *COSMO-7* et à l'échelle locale, *COSMO-2* (MétéoSuisse, 2010)





**Carte 20 : Bénéfice d'une haute résolution dans le cas de topographie complexe. Simulation du vent à 30 mètres au-dessus du sol dans le canton de Vaud, avec les modèles COSMO-2 et COSMO-7 respectivement (MétéoSuisse, 2010)**

Les prévisions calculées avec un modèle numérique sont une opération très gourmande en ressources informatiques et en temps. Une prévision type de 24 heures avec COSMO-2 requiert plus de  $10^{14}$  opérations mathématiques (100'000 milliards !). Cela prend plus de vingt minutes avec un super-ordinateur. C'est pourquoi le système COSMO se compose de 3 modèles numériques imbriqués: un modèle global simulant l'atmosphère entière mais avec une précision moyenne et deux modèles à aire limitée plus précis. Ceci explique également pourquoi l'évolution des modèles de prévisions s'est déroulée parallèlement au développement des super-ordinateurs toujours plus rapides dans les vingt dernières années.

## **10.2. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**

L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) par le biais du Laboratoire de Construction Hydraulique (LCH) est active depuis le début des années 2000 dans le projet MINERVE. Ce projet a pour but de prévenir les crues dans le haut bassin du Rhône soit en Valais. L'objectif *in fine* de MINERVE (Bérod, 2006) est de pouvoir développer un système d'aide à la décision pour la protection contre les crues. A plus court terme, il s'agit de développer un outil de prévision et de gestion des crues en temps réel. C'est-à-dire de suivre en direct les précipitations et les écoulements sur l'ensemble du réseau hydrologique.

## Fonctionnement de MINERVE: modèle

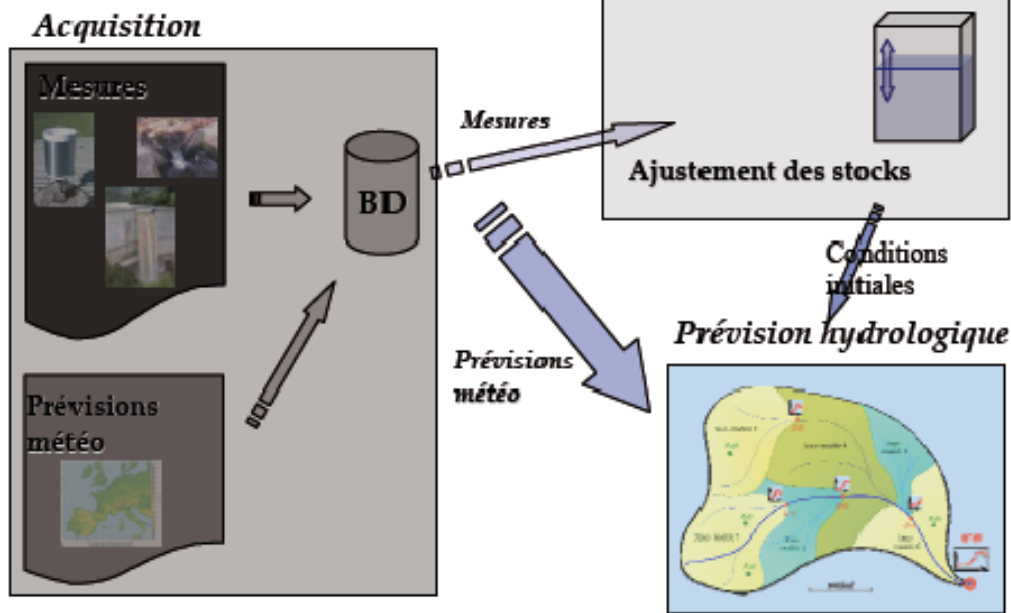


Figure 11 : Principe de fonctionnement de *MINERVE* (source : F. Jordan, LCH-EPFL)

Les données sont à la fois des données météorologiques (précipitations, températures, pressions) qui serviront notamment à alimenter le modèle de prévisions météo et des données de débits qui viennent d'une part des stations de mesures fédérales et d'autre part des sociétés hydroélectriques. Les prévisions météorologiques sont réalisées à partir du modèle *ALMO* de MétéoSuisse qui possédait une maille de 5 km au début des essais de *MINERVE*.

Le système *MINERVE* a été mis en œuvre dans un cas réel pour la première fois le 13 septembre 2006 suite à une alerte météo. Pour l'affluent du Rhône, la Viège, les simulations prévoient des débits d'environ  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ , alors que la Viège a, à cet endroit, une capacité maximale d'environ  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cela laissait supposer des débordements dans la ville de Viège. Dans les faits, le modèle *ALMO* de prévisions de précipitations a largement surestimé toutes les précipitations sur la partie haute du canton d'où une surestimation des débits de crue. Les simulations réalisées ensuite avec les précipitations observées ont montré des débits de crue très proches de ceux observés ( $80 \text{ m}^3/\text{s}$ ) pour la Viège : le modèle hydrologique n'est donc pas remis en cause. Par contre, le modèle *ALMO* doit absolument gagner en fiabilité.

Pour permettre au système de fonctionner correctement, la qualité des prévisions de précipitations est indispensable. Après ce malheureux essai, il a été prévu de porter la maille du modèle météorologique à 2 km au lieu de 5 km. Le modèle *Almo2* sera aussi épaulé par le modèle *COSMO LEPS* (prévisions probabilisées de MétéoSuisse). La

méthode des analogues développée à Grenoble et présentée ci-après pourra aussi confirmer les résultats obtenus avec les modèles numériques.

Pour densifier le réseau de mesures, le canton instrumente actuellement les bassins versants où il y a les plus grandes lacunes avec des débitmètres et pluviomètres. Le programme *MINERVE* est avant tout un outil d'aide à la décision, un appui à la gestion des risques résiduels des projets importants. Il est utilisable uniquement sur de grands bassins versants tels le Rhône et ses principaux affluents, la Viège (Vispa) ou la Dranse. L'objectif final est d'intégrer ce programme dans le système beaucoup plus général des plans d'alarme cantonaux pour le Rhône et communaux pour les affluents.

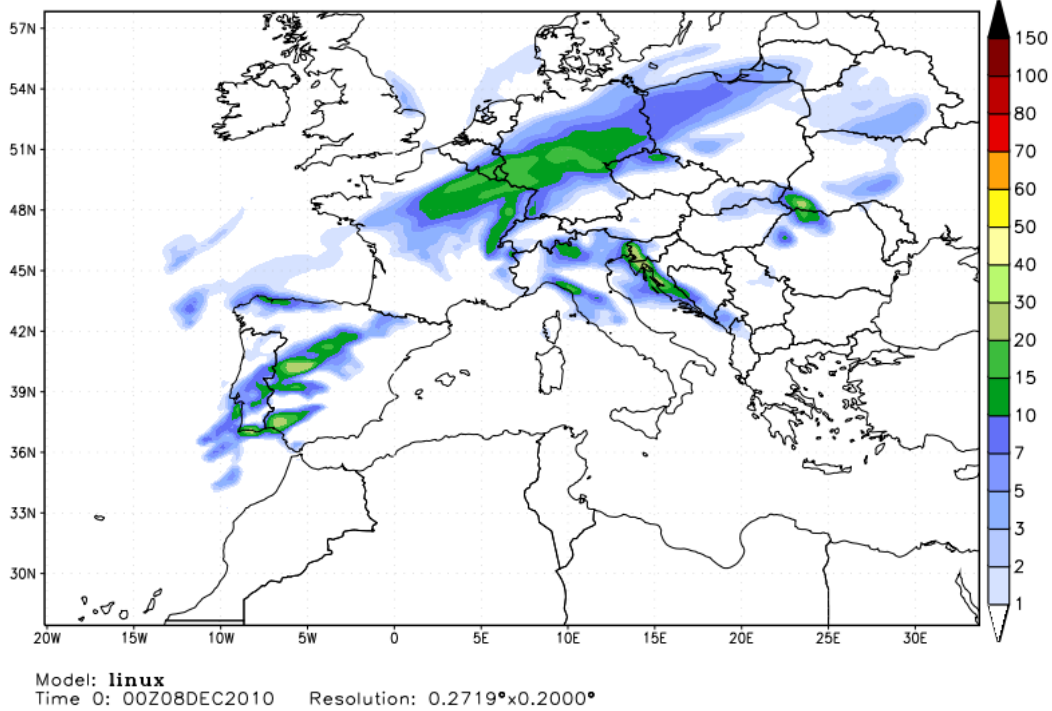
### **10.3. Meteoliguria**

Le modèle *BOLAM* (Bologna Limited Area Model) est le résultat de la coopération entre l'institut des sciences atmosphériques et du climat de l'université de Bologne, le département de physique de l'université de Gênes et le centre hydro-météorologique de la région Ligurie. Ce modèle a été développé dans le cadre du programme *MAP* (Mesoscale Alpine Programme) qui a pour intérêt les processus météorologiques et hydrologiques dans les régions de montagne et ce depuis 1999.

C'est un modèle numérique dérivé du modèle européen *ECMWF* (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Il est considéré comme « à maille fine » et disponible en deux versions. La version à mailles (horizontales) de 6,5 km, centrée sur le nord de l'Italie, couvre efficacement une partie du Sud-Est de la France et la Suisse, et se révèle particulièrement utile et performante lors des épisodes de fortes précipitations. La version à mailles de 21 km couvre quant à elle la majeure partie de l'Europe. Les échéances vont de 12 à 48 heures pour la version à 6,5km, et de 0 à 72 heures pour la version à 21 km, par pas de 3 heures. L'initialisation du modèle se fait une fois par jour à 00h00 et est disponible en fin de matinée.

ARPAL (Genoa - Italy) - DIFI (Genoa - Italy) - ISAC-CNR (Bologna - Italy)  
Total precipitation cumulated on previous 12h [mm (12h)<sup>-1</sup>]

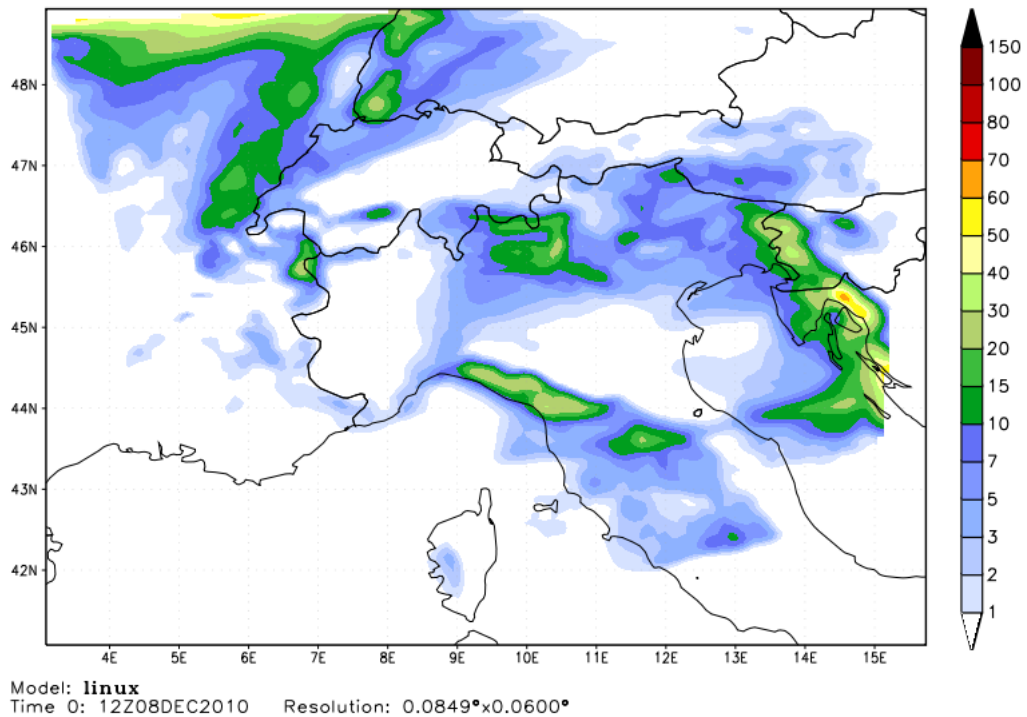
00Z Thu 09 DEC  $\tau = 24h$



Carte 21 : Carte créée avec le modèle BOLAM (21 km) pour les précipitations dans les prochaines 24h

ARPAL (Genoa - Italy) - DIFI (Genoa - Italy) - ISAC-CNR (Bologna - Italy)  
Total precipitation cumulated on previous 12h [mm (12h)<sup>-1</sup>]

00Z Thu 09 DEC  $\tau = 12h$



Carte 22 : Carte créée avec le modèle BOLAM (6,5 km) pour les précipitations dans les prochaines 24h

Ces sorties de modèle sont disponibles sur le site internet de meteoliguria gratuitement. Elles sont remises à jour chaque 3 heures. Des prévisions spécifiques de chute de neige, de vent ou de couverture nuageuse sont également générées par *BOLAM* et consultables.

A partir de *BOLAM* 6,5 km, les scientifiques italiens ont encore réduit la maille jusqu'à 2,8 km. C'est le modèle *MOLOCH*. Ces modèles sont intéressants car ils s'appliquent à prévoir les précipitations dans la région des Alpes.

#### **10.4. Institut National Polytechnique de Grenoble**

La méthode développée par le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement) permet de prévoir des cumuls journaliers de précipitations sous forme de probabilité à l'échelle locale et cela à partir de prévisions météorologiques à l'échelle synoptique. Cette approche considère que les situations synoptiques, que nous allons connaître aujourd'hui ou dans les jours à venir, se sont déjà produites dans le passé sous une forme plus ou moins voisine. Le programme *HydroLog* de *METEORISK* fonctionne selon le même principe. Si une archive suffisamment longue et homogène est à disposition et s'il est possible de caractériser correctement une situation synoptique, il est probable qu'une cause (situation synoptique) semblable donne statistiquement des effets similaires (température, précipitations, etc.) de ceux observés sur les situations voisines, analogues. C'est E. Lorenz (1969) aux Etats-Unis qui a développé cette idée. Elle a ensuite été reprise en France par D. Duband (1970) et exploitée depuis à EDF (Electricité de France) pour la prévision des précipitations. Elle est quotidiennement utilisée depuis les années 1970.

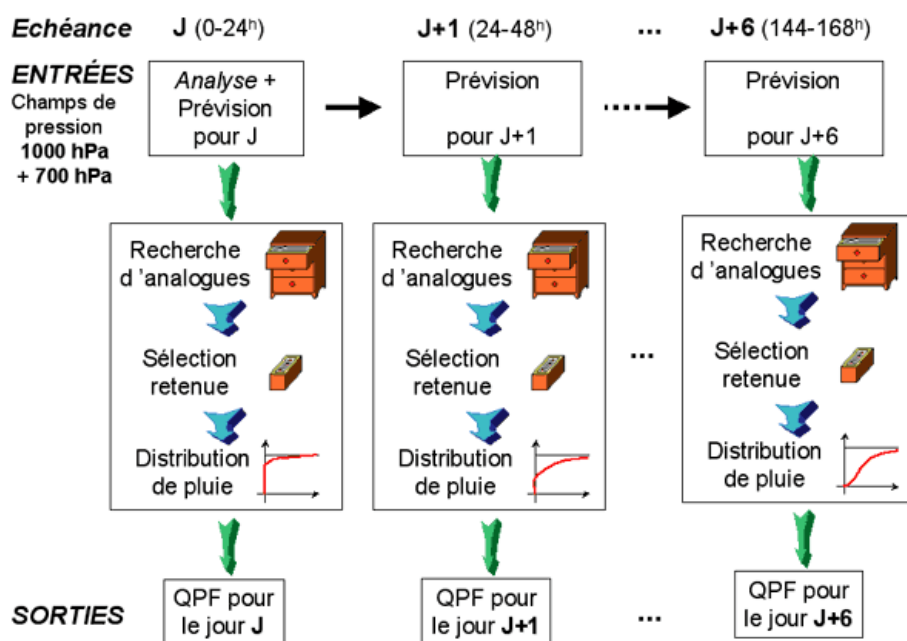


Figure 12 : Représentation schématique de la méthode des analogues (Thévenot, 2004)

A partir de prévisions des situations synoptiques issues de modèles déterministes, les situations passées analogues sont recherchées dans la plus longue archive météorologique possible. L'ensemble des précipitations passées observées lors de ces situations analogues permet d'élaborer des prévisions de précipitations et de quantifier leur incertitude. Ainsi, la méthode des Analogues offre une réponse au besoin en prévision de précipitations à courte et moyenne échéance (1 à 7 jours) sur des bassins versants de taille moyenne (200 à 2'000 km<sup>2</sup>). Elle permet notamment une mise en garde voire une mise en alerte des autorités quelques jours avant une situation à risque.

Cette méthode a été appliquée à d'autres phénomènes comme le risque d'avalanches (Obled, 1979) et améliorée progressivement au cours des années 1980. Jusque dans les années 1990, sa principale limitation venait des archives météorologiques que chaque utilisateur devait constituer avec peine et mettre à jour régulièrement. Avec l'avènement des programmes de ré-analyse du climat, américains d'abord (NCEP/NCAR) puis européens (ERA40), des archives météorologiques de 40 ou 50 ans sont disponibles pour la planète entière. Cela a permis des recherches exploratoires et des optimisations de la méthode plus poussées (Guilbaud, 1997 puis Bontron, 2004).

## 11. Perspectives de développement de la prévision météorologique locale

La prévision météorologique locale possède une marge de développement importante et ce dans plusieurs domaines.

Elle représente tout d'abord un défi scientifique motivant pour les météorologues. La prédiction du temps dans les chaînes de montagne et particulièrement dans les Alpes est extrêmement complexe. Le relief, la continentalité, les effets de barrages et de foehn ou encore l'orientation des vallées sont autant de paramètres qui entrent en ligne de compte pour produire une prévision météorologique correcte pour les Alpes. Les modèles actuels éprouvent de grandes difficultés à rendre une prévision fiable et régulière pour les vallées de l'arc alpin suisse. De plus, les instituts nationaux délaissent quelque peu cette spécialité de la prévision locale et ultra-locale pour se concentrer sur une prévision plus généraliste. Il y a (ou il y a eu) néanmoins plusieurs projets de recherche en météorologie locale et régionale dans les Alpes : *ALPEX* dans les années 80 et actuellement le projet *MAP* (Mesoscale Alpine Programme). Certains bureaux d'études privés s'intéressent de près à cette problématique. Ils entrevoient le potentiel économique de la prévision météorologique locale. Ils se frottent aussi aux difficultés d'élaborer des modèles fiables pour une prévision locale. La recherche scientifique académique et privée est donc absolument stimulée par ces défis que posent les Alpes du point de vue météorologique.

Ensuite, la prévision météorologique locale répond à deux besoins qui stimulent son développement. Le premier besoin est de nature institutionnelle. Dans le cas du canton du Valais, les administrations cantonales et communales sont demandeuses de prévisions locales notamment en termes de précipitations. Le service « Routes et cours d'eau » du canton sollicite les bureaux d'étude privés spécialisés afin de connaître les quantités de pluie ou de neige à venir. Grâce à des prévisions de qualité, la sécurité de la population et des infrastructures, notamment les routes, peut être assurée en cas de fortes précipitations. Certains responsables de sécurité de différents secteurs travaillent déjà avec le programme *NivoLog* de prévision des précipitations neigeuses et des avalanches. L'hiver, le service de voirie est ainsi très réactif dans les cas de fermetures de route en cas de danger ou pour le déblaiement des chaussées. Des communes sollicitent également ce genre de services dans une optique de prévoir les crues torrentielles. Elles soutiennent le développement de modèles météorologiques à l'échelle locale pour calculer efficacement les précipitations et les crues extrêmes afin de dimensionner les ouvrages de protection contre les crues (rivières, torrents et lacs artificiels) et les autres instabilités de versants. La commune de Bagnes est partie prenante dans le projet *HydroLog*. Par son géologue communal, elle a participé au

développement du programme. Elle désire l'utiliser à l'avenir pour prédire les précipitations sous forme de pluie ou de neige.

La deuxième demande en prévisions météorologiques locales est le fait des acteurs économiques. Cela va de l'agriculteur à l'artisan de la construction en passant par les milieux touristiques. Certaines stations de sports d'hiver sont très friandes de bulletins météorologiques personnalisés. Elles disposent ainsi d'un service supplémentaire sur leur site internet dans le but d'informer au plus juste si le temps est adapté à la pratique du ski. En effet, la lecture de bulletins imprécis ou trop généraux conduit bien souvent les skieurs vers une autre activité alors que les conditions pour skier sont en réalité optimales. La perte de clientèle journalière pour les stations est alors très sensible. Le bulletin de prévisions météorologiques devient alors un réel argument de vente pour les stations de ski. Le bulletin spécifique à la station finit de convaincre le skieur potentiel de se déplacer. Au-delà de l'aspect purement promotionnel, une prévision précise des précipitations neigeuses permet en outre une meilleure gestion de l'exploitation du domaine skiable. Les dameurs, les patrouilleurs et le responsable de l'enneigement artificiel peuvent ainsi mieux coordonner leurs efforts. Cela permet un gain d'efficacité opérationnelle, de réaliser des économies d'heures de damage et d'ouvrir le plus vite possible les pistes au public.

La prévision météorologique locale en est donc aux prémices de ses possibles applications pratiques. Elle demande encore de nombreuses heures de recherche et développement pour tenir compte de toutes les particularités de chaque vallée alpine et produire une prévision fiable. Tant les avancées scientifiques que les retombées économiques découlant de la commercialisation de bulletins météorologiques locaux sont prometteuses. Ce marché de niche reste pour l'instant l'apanage de quelques bureaux d'études.



## 12. Conclusion

Dans ce travail, les dimensions temporelles passées, présentes et futures ont été mises à contribution. L'étude des précipitations du siècle dernier a permis de remarquer et de confirmer l'existence d'une évolution en termes d'occurrence et de quantité. En effet, les jours avec des précipitations > 30 mm en 24 heures ont sensiblement augmentés année après année pour la majorité des stations étudiées. Certaines ont cependant vu une régression de ce type de journée depuis le début de la période de mesures. Ces constatations statistiques se conjuguent bien avec l'observation des « anciens » qui affirment avoir senti un changement de climat. Ils perçoivent notamment plus de sécheresse dans le bas des vallées et une recrudescence du foehn au nord des Alpes. La projection dans le futur rendue possible grâce aux analyses de Gumbel démontre une autre tendance lourde du climat de ces prochaines décennies. Depuis les années 1960, les précipitations journalières (24h) maximales par année suivent, pour la plupart des stations, une courbe plus ou moins ascendante quant à la quantité. L'extrapolation qui estime les valeurs de pluie pour les temps de retour jusqu'à 500 ans montre des cumuls journaliers impressionnants. Ils sont parfois plus hauts que des crues données comme millénales. Certes, la loi de Gumbel tend à surestimer quelques fois les quantités mais cela amène une réflexion considérable sur les temps de retour et sur le dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues. Les événements catastrophiques de la fin du 20<sup>ème</sup> siècle sont encore présents dans les mémoires avec leurs effets dévastateurs. Les pouvoirs publics ont le devoir de protéger la population et les infrastructures lors d'épisodes de pluie exceptionnels et ce malgré des investissements requis importants.

La mise en place de stratégie de prévention en cas de pluies exceptionnelles ne peut pas se réaliser sans outil d'aide à la décision. Un modèle comme *HydroLog* entre pleinement dans le cadre de prévention des catastrophes que les autorités politiques tentent de déployer. Il permet de caractériser les situations météorologiques et de détecter les situations qui pourraient produire des précipitations extrêmes. Un événement particulier peut être détecté 24 à 36 heures à l'avance, ce qui permet d'alerter les services concernés. A l'heure actuelle, la prévision des précipitations centennales ou cinquentennales est possible statistiquement, mais il est impossible de vérifier leur justesse. D'ailleurs, aucun modèle ne peut donner une information sûre et fiable à 100%. Le facteur humain tant au niveau de l'analyse des sorties du modèle qu'au niveau de la prise de décision est indissociable de ce type de programme. L'ordinateur ne décide pas à la place de l'homme. Par contre, il aide à prendre les bonnes décisions dans le temps imparti afin de préserver population et infrastructures. La plupart du temps, les résultats de plusieurs modèles de conception différentes sont croisés avant une prise de décision. Dans une optique de confrontation des performances entre modèles et d'adéquation avec la réalité, le logiciel *HydroLog* sera

testé en situation réelle lors de l'hiver 2011. La commune de Bagnes a installé des installations de déclenchement d'avalanche sur les hauts de Verbier. Elle désire utiliser *HydroLog* en parallèle avec d'autres programmes pour anticiper les situations de fortes chutes de neige et ainsi utiliser les déclencheurs de manière judicieuse. L'objectif est de protéger une route et un quartier de chalets des coulées de neige pouvant les atteindre. Les faiblesses actuelles du logiciel pourront aussi être pointées efficacement. En parallèle, le développement se poursuivra avec l'augmentation de la base de données météorologiques et notamment l'intégration des données depuis les années 1970 et de 2005 à 2010. Les cartes synoptiques de fronts seront aussi ajoutées à l'analyse ainsi que d'éventuelles autres variables-causes des phénomènes telles que la position des jets-streams sur l'Europe.

La recherche climatologique et météorologique ne souhaite pas maîtriser les phénomènes météorologiques extrêmes. Cela reste une utopie tant les forces en jeu sont gigantesques. Ces recherches tentent tout de même de déterminer avec précision la quantité de pluie à venir dans les 24 à 36 heures. Elles travaillent aussi à connaître les temps de retour de phénomènes météorologiques extrêmes susceptibles de se produire dans les Alpes. Les autorités politiques sont ainsi incitées à prendre des mesures de protection appropriées contre de tels phénomènes. La recherche météorologique et climatologique poursuit également l'idéal d'une connaissance plus grande du sujet dans le but de limiter les impacts négatifs lors de la survenance de tels événements. Les climatologues et météorologues sont des chercheurs pour qui l'analyse du passé permet non seulement la compréhension du présent mais aussi la prospection du futur.

### 13. Bibliographie

Attinger S. (2002). *Etudes des intempéries et des précipitations abondantes en Valais durant le 20ème siècle*, Lausanne, Institut de géographie, Mémoire de licence.

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.

Bader S., Kunz P. (1998). *Climats et risques naturels – la Suisse en mouvement*. Rapport scientifique final PNR31. Georg Genève, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

Baeriswil P. A. (1995). Différences régionales des précipitations et de l'insolation relatives en Suisse. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 8, p. 189-197.

Beniston M., Goyette S., Stephenson D.B., Christensen O.B., Frei C., Schöll R., Halsnaes k., Hotl T., Palutikof J., Jyhlhä K., Koffi B., Semmler T., Worth K. (2007). Future extreme events in Europe climate : an exploration of regional climate model projection. *Climatic Change*, 81 (s.1), p. 71-95.

Bérod D. (2006). Prévion et gestion des crues en Valais : le projet MINERVE. *Actes de la Conférence finale*, INTERREG III A, Projet n°179, p. 72-79.

Bontron G. (2004). *Prévion quantitative des précipitations : adaptation probabiliste par recherche d'analogues*. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble.

Bonvin J.-M. (1993). Crues du 24 septembre 1993 en Valais. *Nimbus : climat et glaciers des Alpes occidentales*, 2, p. 31-35.

Bouët M. (1948). Les causes météorologiques de la crue du Rhône valaisan du 4 septembre 1948. *Bulletin de la Murithienne*, Société Valaisannes des Sciences naturelles, 65, p. 95-101.

Bouët M. (1950). La pluie en Valais. *Bulletin de la Murithienne*, Société Valaisannes des Sciences naturelles, 67, p. 12-24.

Bouët M. (1985). *Climat et météorologie de la Suisse romande*. Payot, Lausanne, 170 p.

CIPRA (2006). Le climat et les Alpes en mutation Tourisme et aménagement du territoire sous le stress météorologique. *Actes de la conférence 23/2006*, CIPRA grande série documentaire, Kempten, CIPRA Deutschland.

CREALP (1994). *Die Hochwasser 1993 im Wallis und Tessin : Messdaten und ausgesuchte Auswertungen*. Sion.

Duband, D. (1970). *Reconnaissance dynamique de la forme des situations météorologiques. Application à la prévision quantitative des précipitations*. Thèse de 3ème cycle de la Faculté des Sciences de Paris.

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*, vol. 13, p.100-109.

Fallot J.-M. (2009). *Climatologie I*. Matériaux pour les cours et séminaires n°38, Institut de géographie de l'université de Lausanne (IGUL), Lausanne.

Fallot J.-M. (2008). *Climatologie II*. Matériaux pour les cours et séminaires n°42, Institut de géographie de l'université de Lausanne (IGUL), Lausanne.

Fallot J.-M. et Hertig J.-A. (2009). Détermination des précipitations en Suisse à l'aide d'analyses statistiques. *Actes du 22ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Geographica Technica numéro spécial, Cluj University Press, p. 163-168

Fallot J.-M. (2010). Evolution de l'intensité moyenne et de la fréquence des précipitations en Suisse de 1900 à 2009. *Actes du 23ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes, 1-4.09.2010, p. 215-220.

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.

Gerstengarbe F.-W. et Werner P.-C (1993). *Katalog der Grosswetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmut Brezowsky 1881-1992*. Berichte des Deutschen Wetterdienstes n°113, Offenbach am Main.

Grebner D. et al. (2000). Charakteristik des Hochwassers vom 9. Bis 16. Oktober 2000 auf der Alpensüdseite und im Wallis. *Wasser, Energie, Luft*, 92, Heft 11-12. p. 369-377.

Guilbaud S. (1997). *Prévision quantitative des précipitations journalières par une méthode statistico-dynamique de recherche d'analogues*. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble.

Gumbel E.J. (1958). *Statistics of extremes*. Columbia University press.

MétéoSuisse (1985-2010). *Bulletins météorologiques quotidiens*. Zürich

IPCC (2007). *Climate Change, 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.

Kunz P. et Rey J.-M. (1995). Intempéries du 23 septembre 1994 dans le Haut-Valais (Massif du Simplon) : répétition de l'évènement de 1993 un an après. *Bulletin de la Murithienne*, 113 : p. 3-19.

Lorenz E. (1969). Atmospheric predictability as revealed by natural occurring analogues. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26, pp 636-646.

Office fédéral de l'économie des eaux (1991). *Analyse des causes des crues de l'année 1987. Rapport final*. OFEE, Service hydrologique et géologique national (SHGN), Berne.

Office fédéral des eaux et de la géologie (2002). *Les crues 2000. Analyse des événements, cas exemplaires*. Rapports de l'OFEG, Série Eaux, Nr. 2. Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Berne.

Office fédéral des eaux et de la géologie, DTEE (2001). *CONSECRU. Concept de protection contre les crues*. Rapport final. Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Département des transports, de l'équipement et de l'environnement (DTEE, canton du Valais), Sion.

Office fédéral des eaux et de la géologie (2002). *Les crues 2000 – Analyse des événements/Cas exemplaire*. Rapports de l'OFEG, Série Eaux, No 2, Berne.

Office fédéral de météorologie et de climatologie (2007). *Situations météorologiques typiques dans la région des alpes*, MétéoSuisse, Berne.

Perret R. (1987). *Une classification des situations météorologiques à l'usage de la prévision*. Publications de l'institut suisse de météorologie n°46, Berne.

Roth G. D. (1996). *Guide de la météorologie*. Guides pratiques du naturaliste, Science de la nature, Delachaux et Niestlé, Paris.

Thévenot, N. (2004). *Prévision quantitative des précipitations : Adaptation par une méthode d'Analogie de la prévision d'ensemble du CEPMMT - Aspects opérationnels*. Mémoire de Master 2 TUE, INPG, Grenoble.

Thillet J.-J. et D. Schueller (2009). *Petit Manuel de météo montagne*. Editions Glénat, Grenoble.

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), Birmensdorf.

### **Sites internet**

MétéoSuisse (2010). *MétéoSuisse*, [www.meteosuisse.ch](http://www.meteosuisse.ch) (consulté le 02.10.2010)

Meteoliguria (2010). *Meteoliguria*, [www.meteoliguria.it](http://www.meteoliguria.it) (consulté le 08.08.2010)

Nendaz Ambassador (2010). *4 Valleys*, [www.ndzalps.co.uk](http://www.ndzalps.co.uk) (consulté le 27.12.2009)



**Précipitations extrêmes dans le val de Bagnes:  
occurrence et prévision**

---

**Annexes**

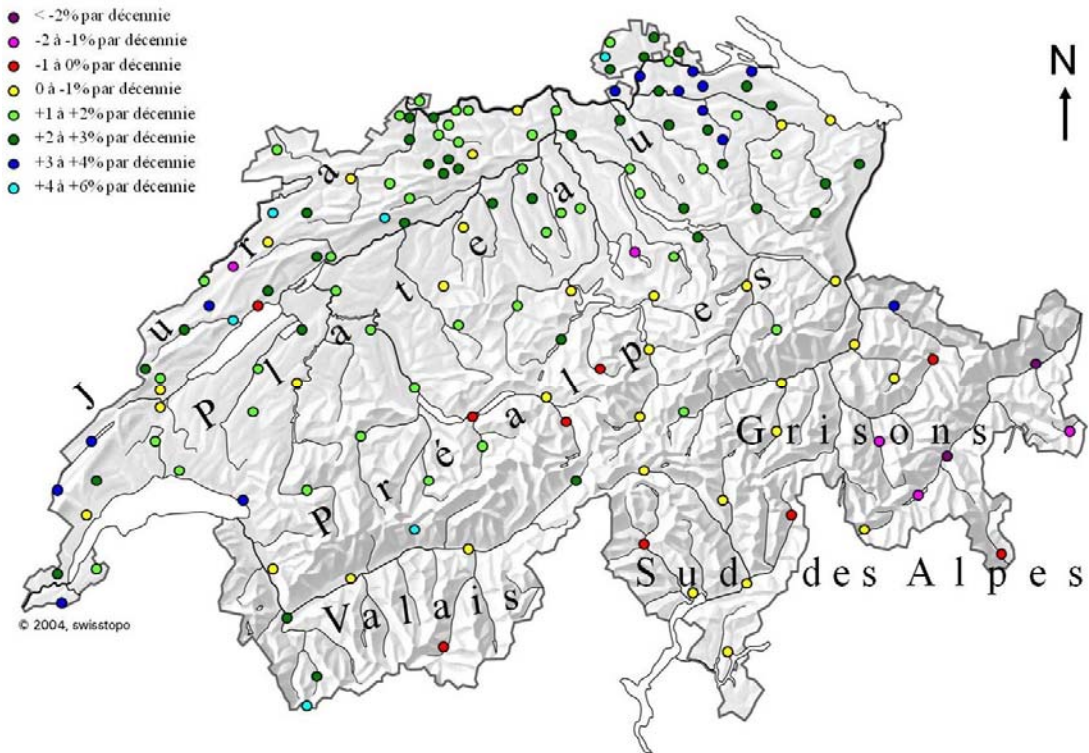


## 14. Annexes

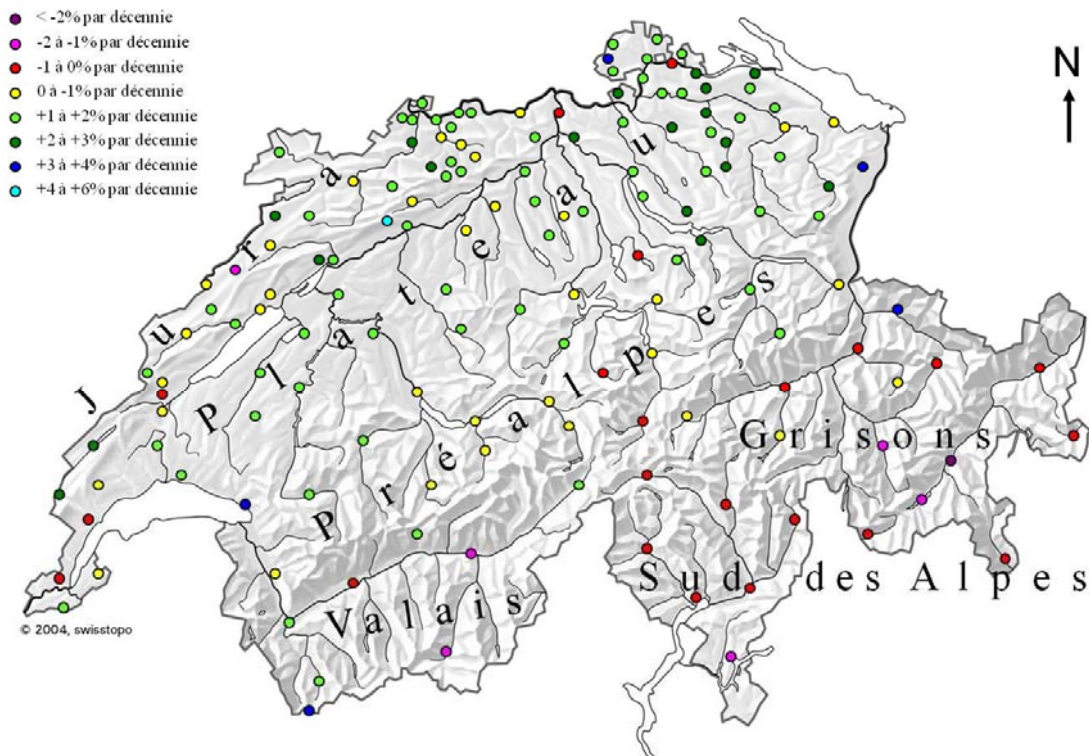
### TABLES DES ANNEXES

ANNEXE 1 : EVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES EN HIVER EN SUISSE : TENDANCES 1900-2009 (FALLOT, 2010)	120
ANNEXE 2 : EVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES AU PRINTEMPS EN SUISSE : TENDANCES 1900-2009 (FALLOT, 2010) .....	120
ANNEXE 3 : EVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES EN ÉTÉ EN SUISSE : TENDANCES 1900-2009 (FALLOT, 2010)...	121
ANNEXE 4 : EVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES EN AUTOMNE EN SUISSE : TENDANCES 1900-2009 (FALLOT, 2010) .....	121
ANNEXE 5 : EVOLUTION DU NOMBRE MOYEN DE JOURS DE PLUIE EN HIVER EN SUISSE : TENDANCES 1900-2009 (FALLOT, 2010) .....	122
ANNEXE 6 : EVOLUTION DU NOMBRE MOYEN DE JOURS DE PLUIE AU PRINTEMPS EN SUISSE : TENDANCES 1900-2009 (FALLOT, 2010) .....	122
ANNEXE 7 : EVOLUTION DU NOMBRE MOYEN DE JOURS DE PLUIE EN ÉTÉ EN SUISSE : TENDANCES 1900-2009 (FALLOT, 2010) .....	123
ANNEXE 8 : EVOLUTION DU NOMBRE MOYEN DE JOURS DE PLUIE EN AUTOMNE EN SUISSE : TENDANCES 1900-2009 (FALLOT, 2010) .....	123
ANNEXE 9 : MARTIGNY : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1900-2009).....	124
ANNEXE 10 : CHÂTELARD : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1969-2009).....	124
ANNEXE 11 : LES MARÉCOTTES : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1969-2009).....	125
ANNEXE 12 : RÉGION DE MARTIGNY : COMPARAISON JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM.....	125
ANNEXE 13 : SION : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1900-2009).....	126
ANNEXE 14 : HÉRÉMENCE : JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM (1969-2009).....	126
ANNEXE 15 : RÉGION DE SION : COMPARAISON JOURS PAR ANNÉE AVEC PRÉCIPITATIONS > 30 MM.....	127
ANNEXE 16 : CLASSIFICATION DES SITUATIONS MÉTÉOROLOGIQUES SELON HESS-BREZOWSKI .....	128
ANNEXE 17 : HÉRÉMENCE : PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR AN CLASSÉES PAR RANG ET MESURÉES DE 1961 À 2009 ET ESTIMATION À T 50 ANS, T 100 ANS, T 250 ANS ET T 500 ANS .....	129
ANNEXE 18 : FEY/BASSE-NENDAZ : PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR AN CLASSÉES PAR RANG ET MESURÉES DE 1961 À 2009 ET ESTIMATION À T 50 ANS, T 100 ANS, T 250 ANS ET T 500 ANS .....	129
ANNEXE 19 : GRAND-ST-BERNARD : DISTRIBUTION DES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR ANNÉE (1961-2009) .....	130
ANNEXE 20 : BOURG-ST-PIERRE : DISTRIBUTION DES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR ANNÉE (1961-2009) .....	130
ANNEXE 21 : ORSIÈRES : DISTRIBUTION DES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR ANNÉE (1969-2009) .....	131
ANNEXE 22 : MAUVOISIN-FIONNAY : DISTRIBUTION DES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR ANNÉE (1972-2009) .....	131
ANNEXE 23 : MONTAGNIER : DISTRIBUTION DES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR ANNÉE (1961-2009) ..	132
ANNEXE 24 : MARTIGNY : DISTRIBUTION DES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR ANNÉE (1961-2009) .....	132
ANNEXE 25 : SION : DISTRIBUTION DES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES PAR ANNÉE (1961-2009) .....	133
ANNEXE 26 : CARTES AU SOL ET EN ALTITUDE (500 HPA) DE MÉTÉOSUISSE POUR LE 23, 24 ET 25 AOÛT 1987 .....	134
ANNEXE 27 : CARTES AU SOL ET EN ALTITUDE (500 HPA) DE MÉTÉOSUISSE POUR LE 22, 23 ET 24 SEPTEMBRE 1993 .....	137
ANNEXE 28 : CARTES AU SOL ET EN ALTITUDE (500 HPA) DE MÉTÉOSUISSE POUR LE 13, 14, 15 ET 16 OCTOBRE 2000 ..	140

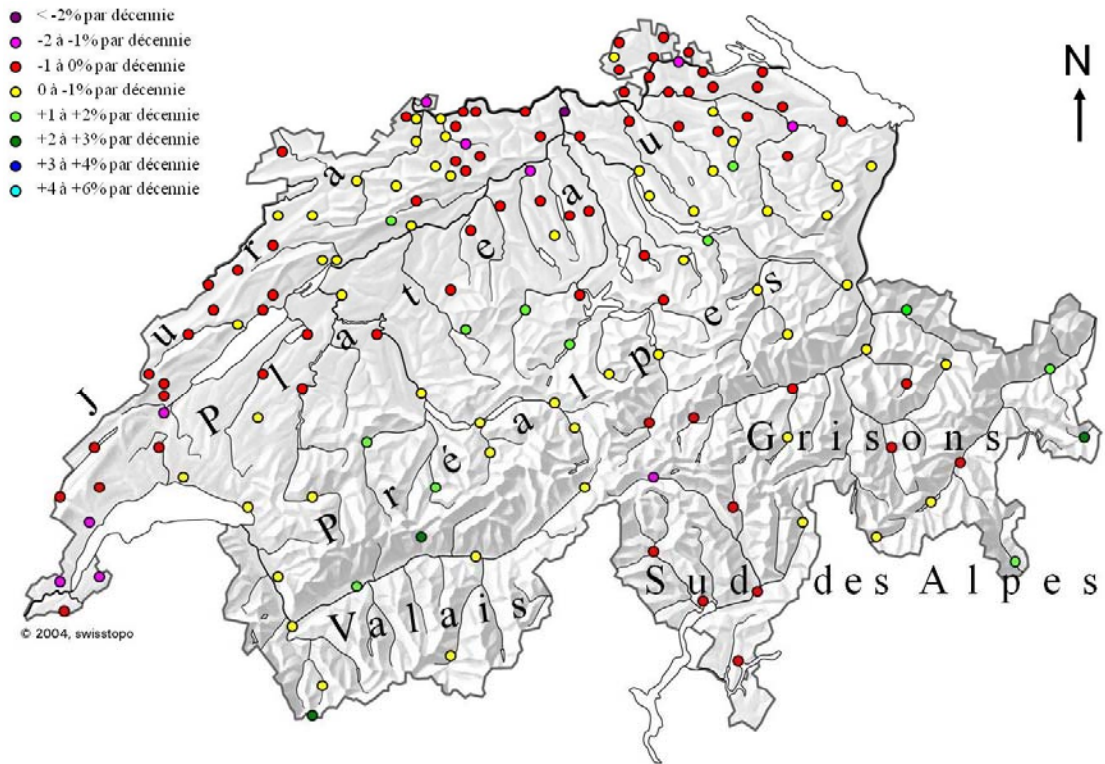




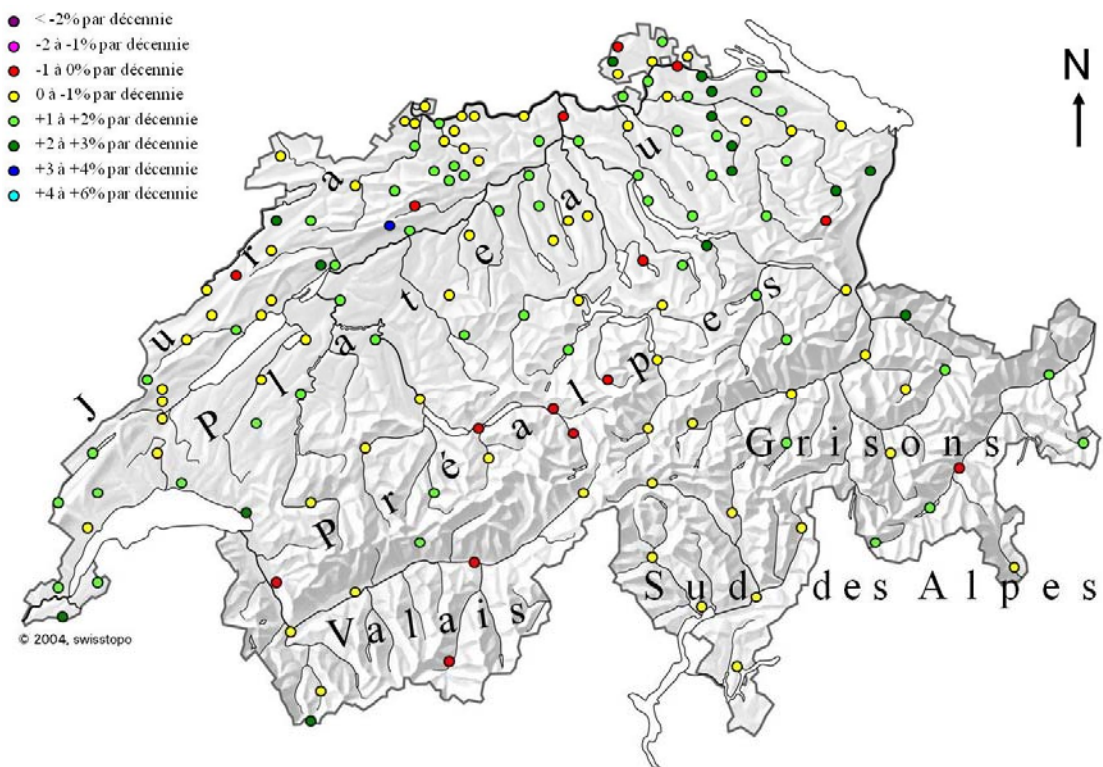
**Annexe 1 : Evolution des précipitations moyennes en hiver en Suisse : tendances 1900-2009 (Fallot, 2010)**



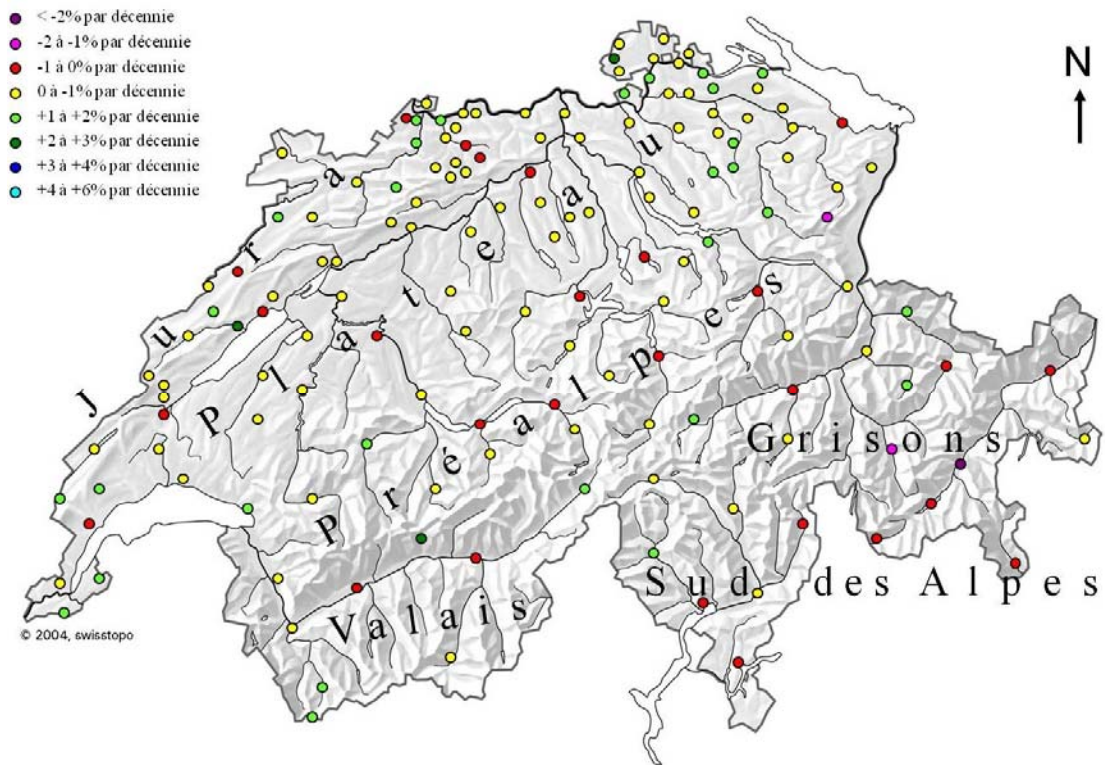
**Annexe 2 : Evolution des précipitations moyennes au printemps en Suisse : tendances 1900-2009 (Fallot, 2010)**



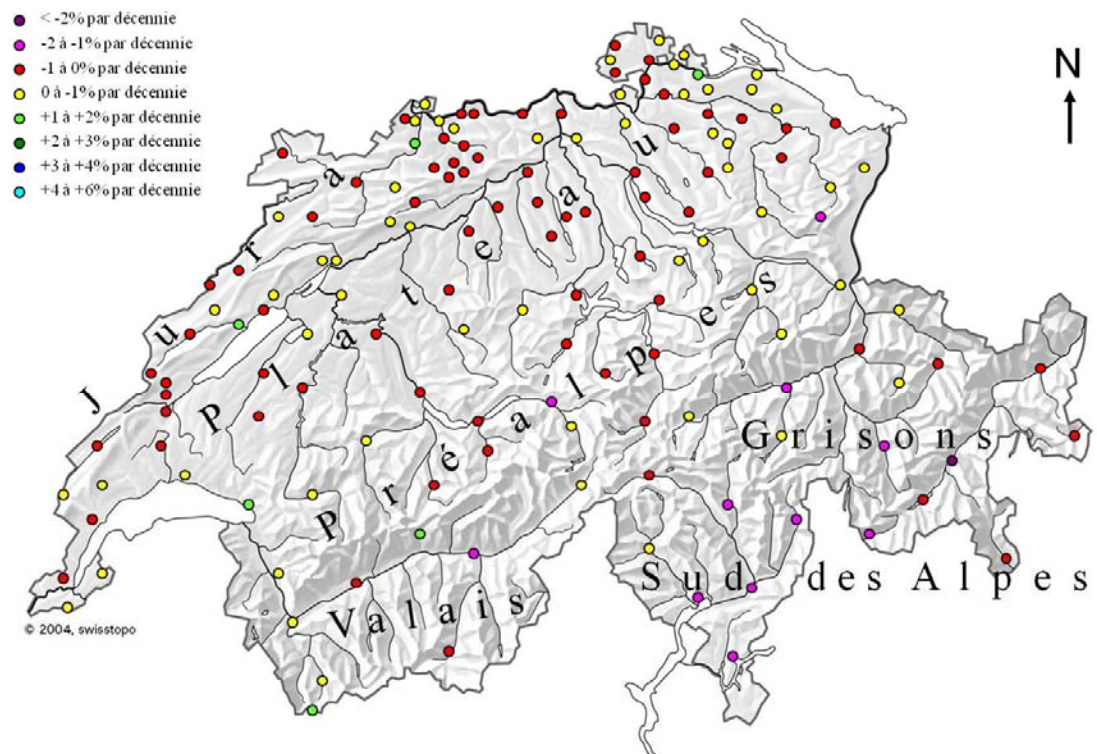
**Annexe 3 : Evolution des précipitations moyennes en été en Suisse : tendances 1900-2009 (Fallot, 2010)**



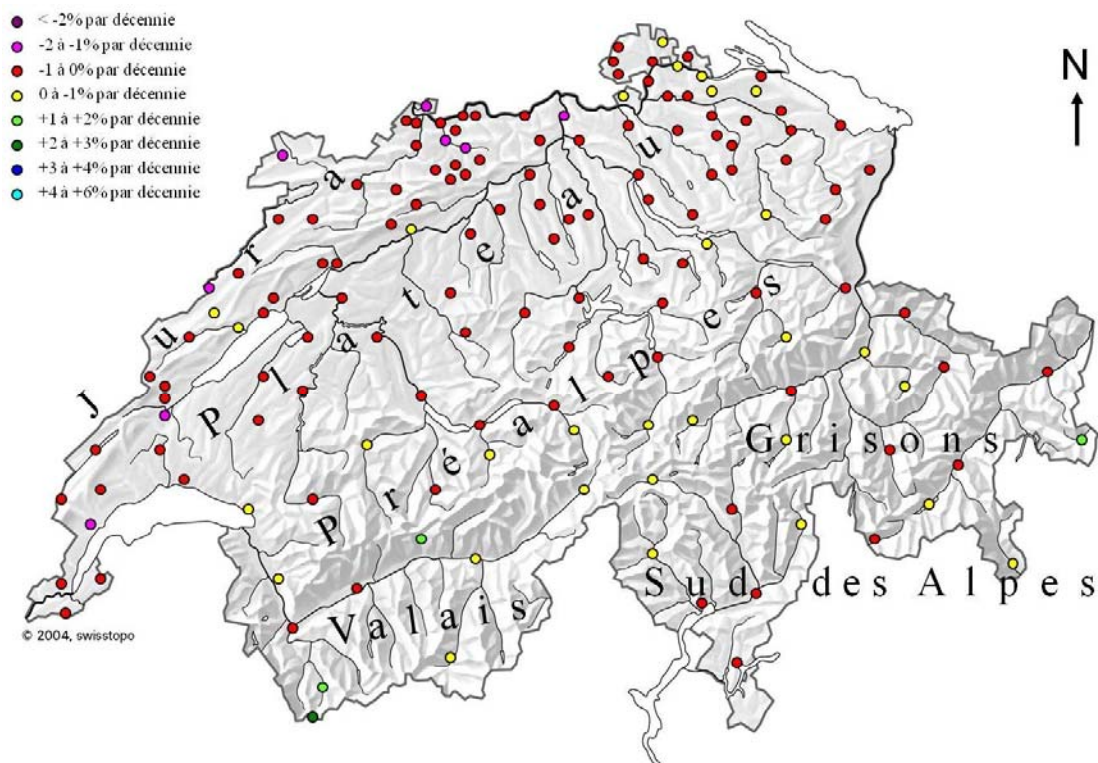
**Annexe 4 : Evolution des précipitations moyennes en automne en Suisse : tendances 1900-2009 (Fallot, 2010)**



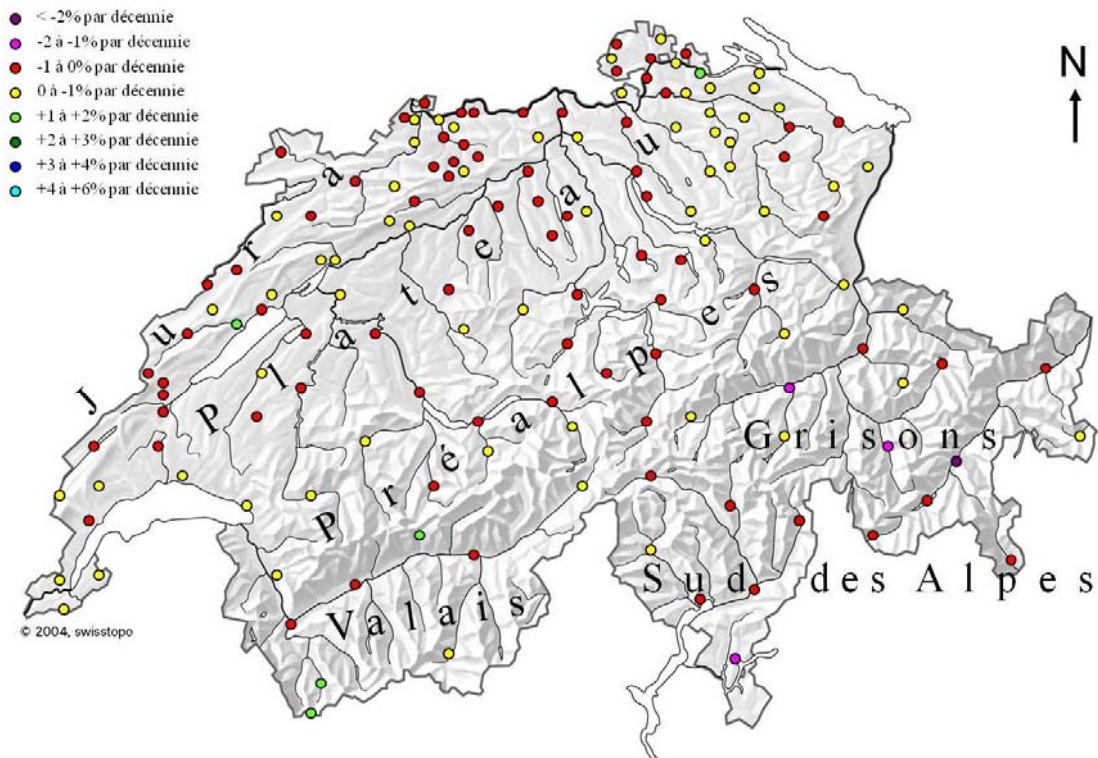
**Annexe 5 : Evolution du nombre moyen de jours de pluie en hiver en Suisse : tendances 1900-2009 (Fallot, 2010)**



**Annexe 6 : Evolution du nombre moyen de jours de pluie au printemps en Suisse : tendances 1900-2009 (Fallot, 2010)**

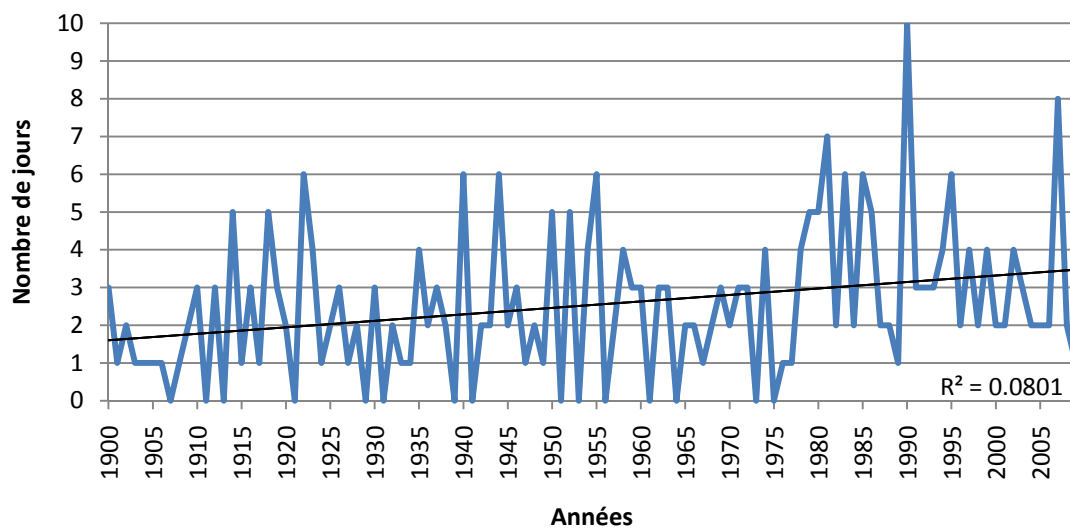


**Annexe 7 : Evolution du nombre moyen de jours de pluie en été en Suisse : tendances 1900-2009 (Fallot, 2010)**



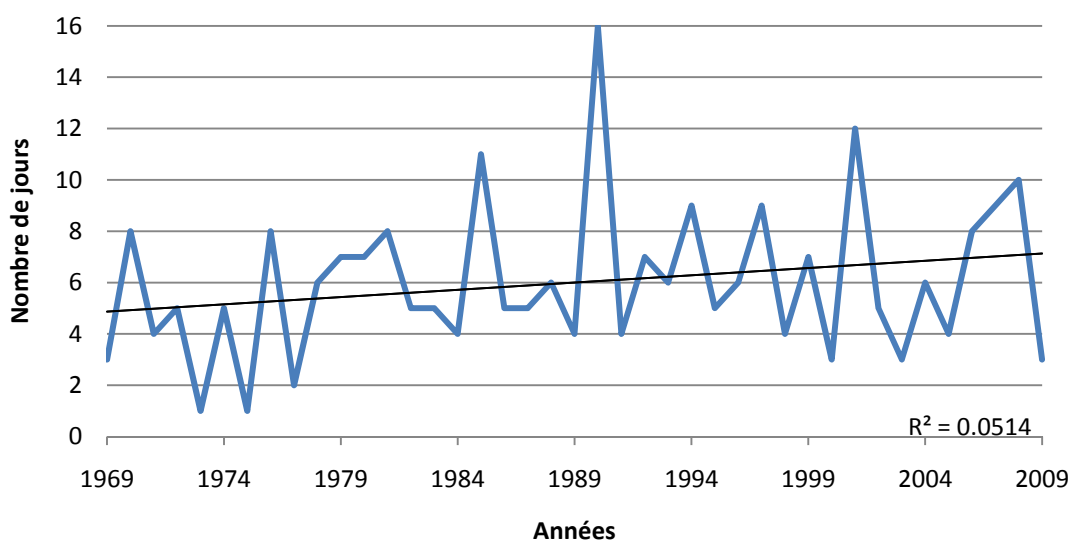
**Annexe 8 : Evolution du nombre moyen de jours de pluie en automne en Suisse : tendances 1900-2009 (Fallot, 2010)**

**Jours par année avec précipitations > 30 mm (1900-2009)**  
**Martigny**



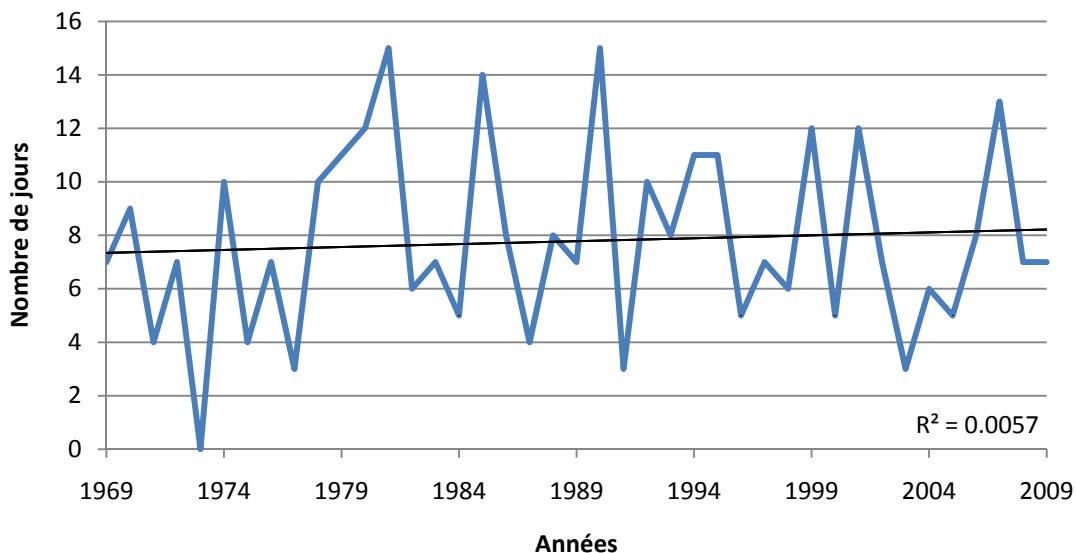
**Annexe 9 : Martigny : jours par année avec précipitations > 30 mm (1900-2009)**

**Jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)**  
**Châtelard**



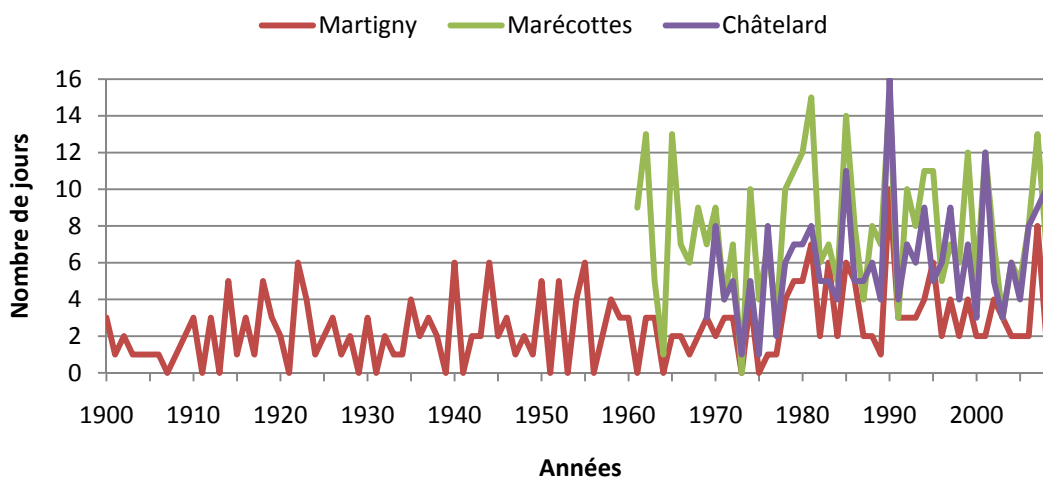
**Annexe 10 : Châtelard : jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)**

**Jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)  
Les Marécottes**



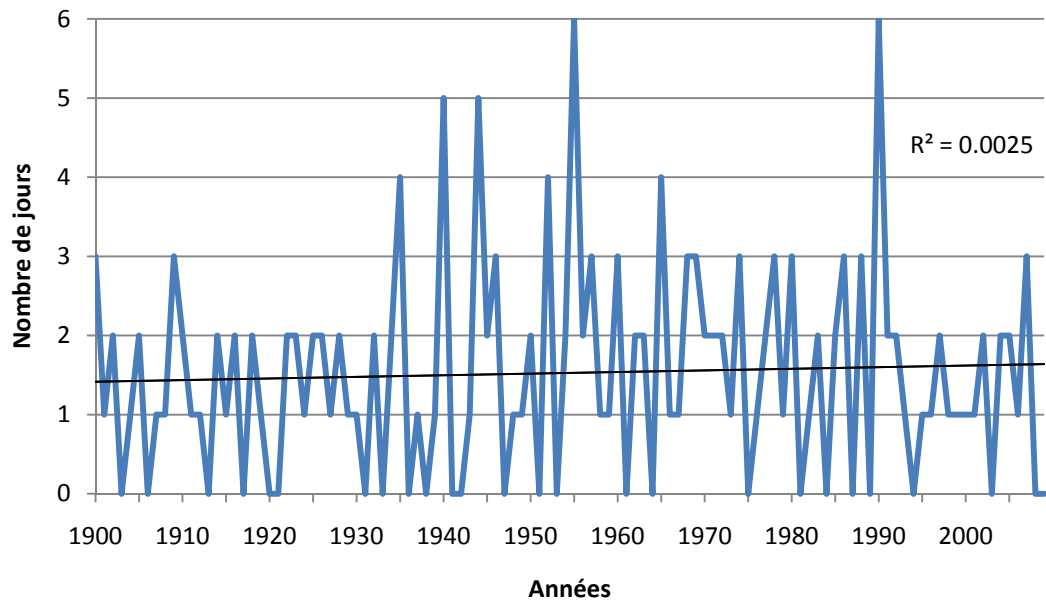
**Annexe 11 : Les Marécottes : jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)**

**Comparaison jours par année avec précipitations > 30 mm  
Région de Martigny**



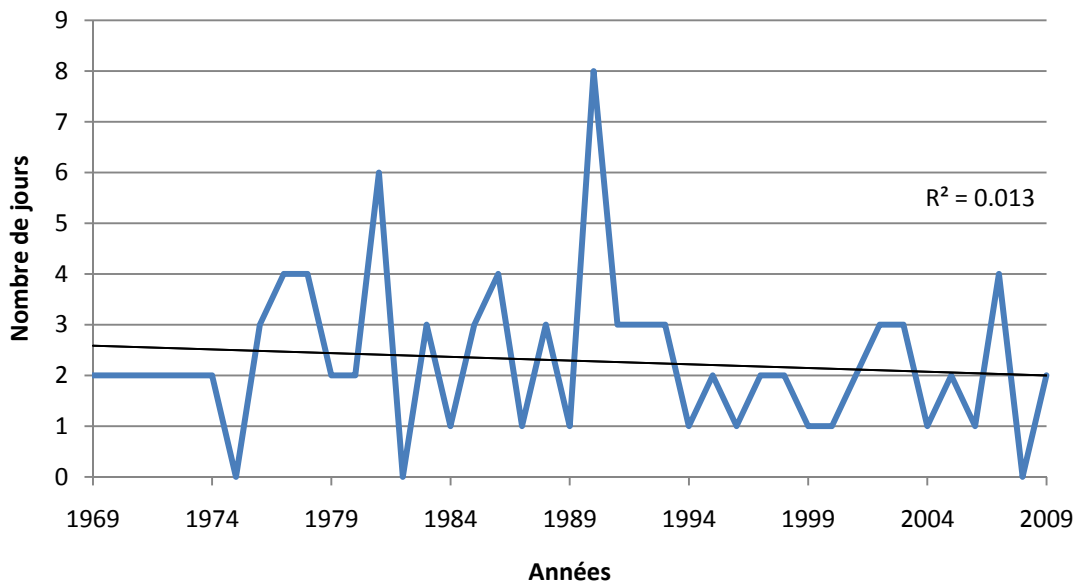
**Annexe 12 : Région de Martigny : comparaison jours par année avec précipitations > 30 mm**

**Jours par année avec précipitations > 30 mm (1900-2009)  
Sion**



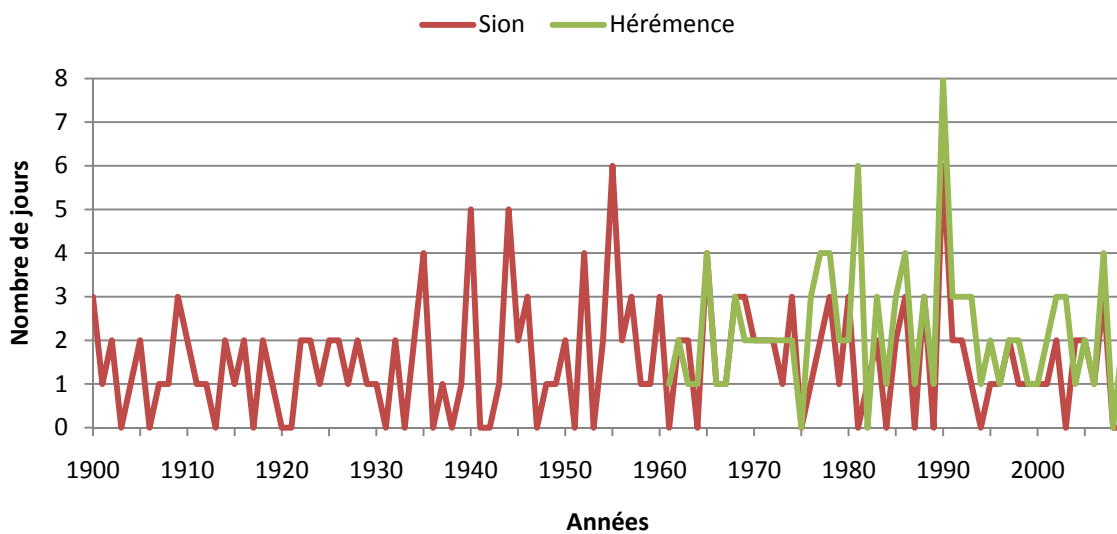
**Annexe 13 : Sion : jours par année avec précipitations > 30 mm (1900-2009)**

**Jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)  
Hérémente**



**Annexe 14 : Hérémente : jours par année avec précipitations > 30 mm (1969-2009)**

### Comparaison jours par année avec précipitations > 30 mm Région de Sion

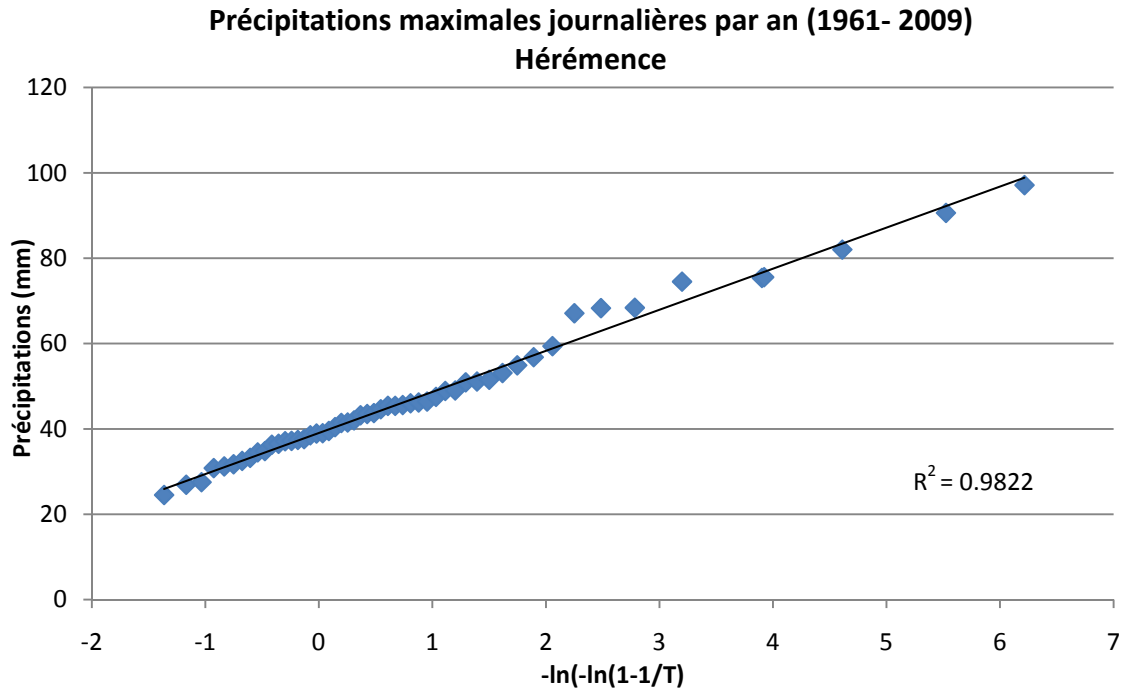


Annexe 15 : Région de Sion : comparaison jours par année avec précipitations > 30 mm

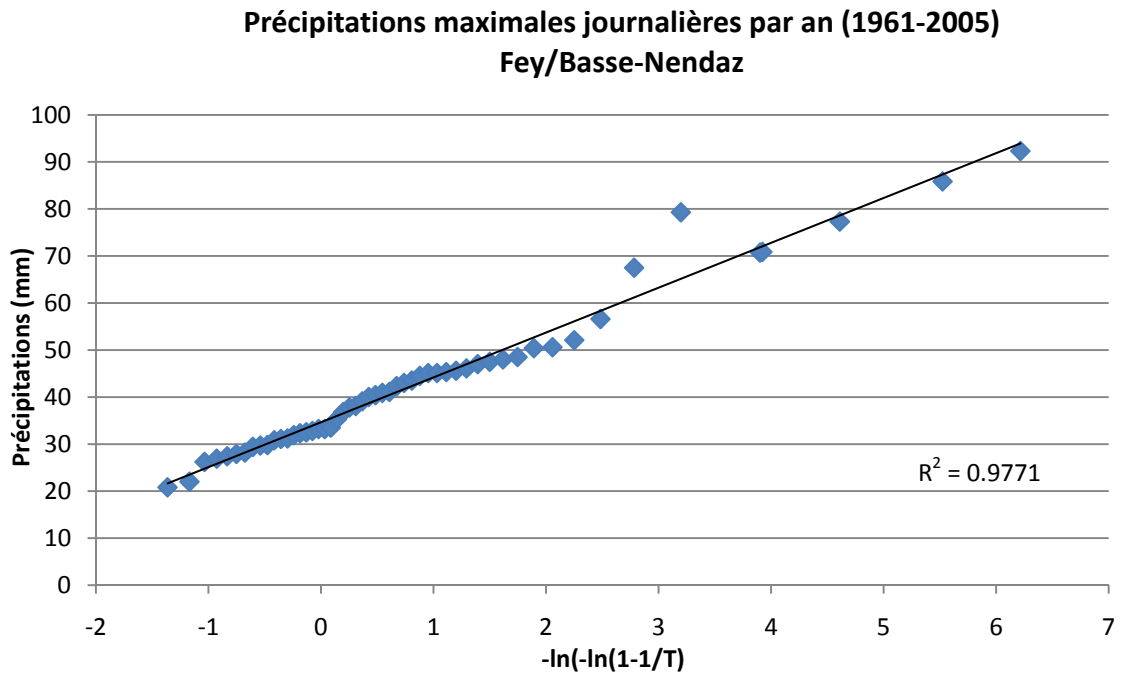


<i>Désignation de la situation météorologique Hess-Brezowski</i>	<i>Abrév.</i>	<i>Groupe</i>
Situation d'Ouest, anticyclonique	WA	Situations d'Ouest
Situation d'Ouest, cyclonique	WZ	
Situation d'Ouest méridionale	WS	
Situation d'Ouest « formant un angle »	WW	
Situation du Sud-Ouest, anticyclonique	SWA	Situations du Sud-Ouest, du Sud et du Sud-Est
Situation du Sud-Ouest, cyclonique	SWZ	
Situation du Sud, anticyclonique	SA	
Situation du Sud, cyclonique	SZ	
Dépression sur les Iles Britanniques	TB	
Thalweg sur l'Europe occidentale	TRW	
Situation du Sud-Est, anticyclonique	SEA	
Situation du Sud-Est, cyclonique	SEZ	
Situation du Nord-Ouest, anticyclonique	NWA	Situations du Nord-Ouest et du Nord
Situation du Nord-Ouest, cyclonique	NWZ	
Situation du Nord, anticyclonique	NA	
Situation du Nord, cyclonique	NZ	
Anticyclone sur Mer du Nord – Islande, anticyclonique	HNA	
Anticyclone sur Mer du Nord – Islande, cyclonique	HNZ	
Anticyclone sur les Iles Britanniques	HB	
Thalweg sur l'Europe centrale	TRM	
Situation du Nord-Est, anticyclonique	NEA	Situations du Nord-Est et d'Est
Situation du Nord-Est, cyclonique	NEZ	
Anticyclone sur Scandinavie, anticyclonique	HFA	
Anticyclone sur Scandinavie, cyclonique	HFZ	
Anticyclone sur Mer du Nord - Scandinavie, anticyclonique	HNFA	
Anticyclone sur Mer du Nord - Scandinavie, cyclonique	HNFZ	
Anticyclone sur l'Europe centrale	HM	Centre d'action sur l'Europe centrale
Pont de haute pression sur l'Europe centrale	BM	
Dépression sur l'Europe centrale	TM	

Annexe 16 : Classification des situations météorologiques selon Hess-Brezowski

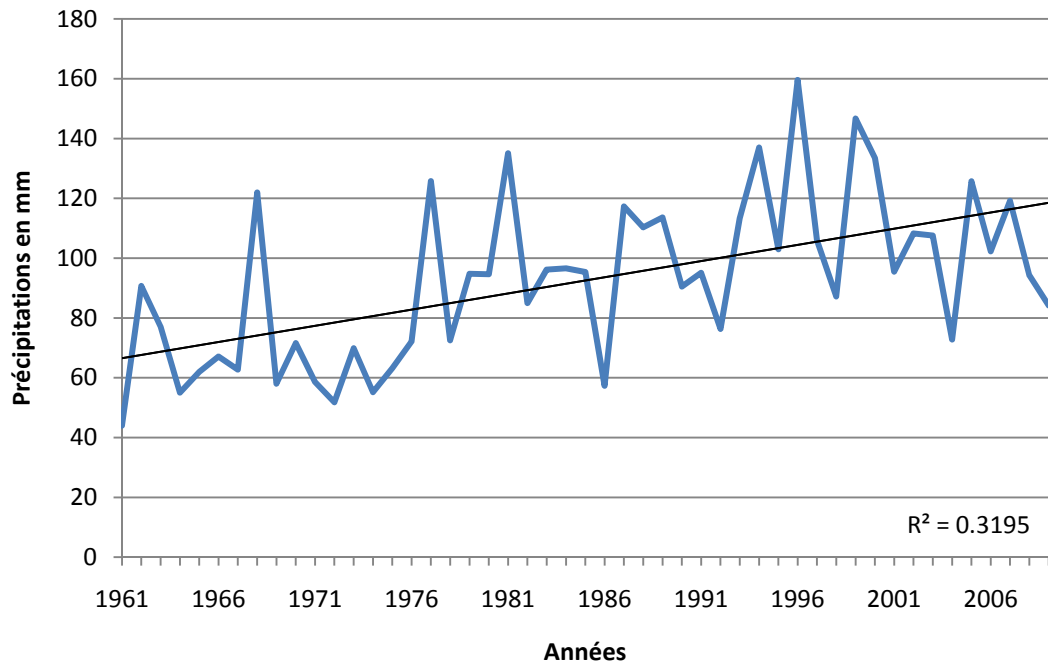


**Annexe 17 : Hérémece : précipitations journalières maximales par an classées par rang et mesurées de 1961 à 2009 et estimation à T 50 ans, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans**



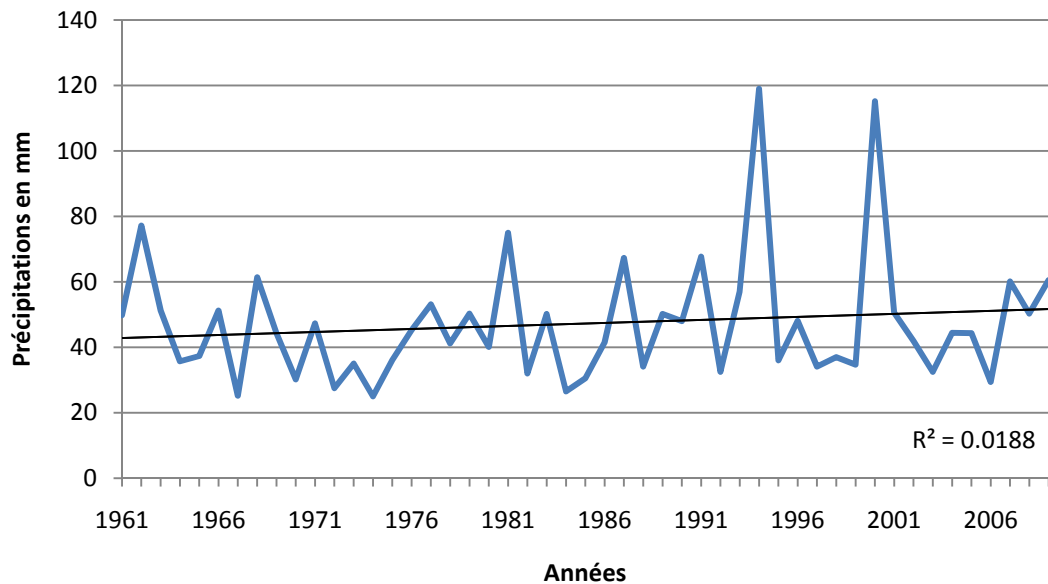
**Annexe 18 : Fey/Basse-Nendaz : précipitations journalières maximales par an classées par rang et mesurées de 1961 à 2009 et estimation à T 50 ans, T 100 ans, T 250 ans et T 500 ans**

**Précipitations maximales journalières par année (1961-2009)  
Grand-St-Bernard**



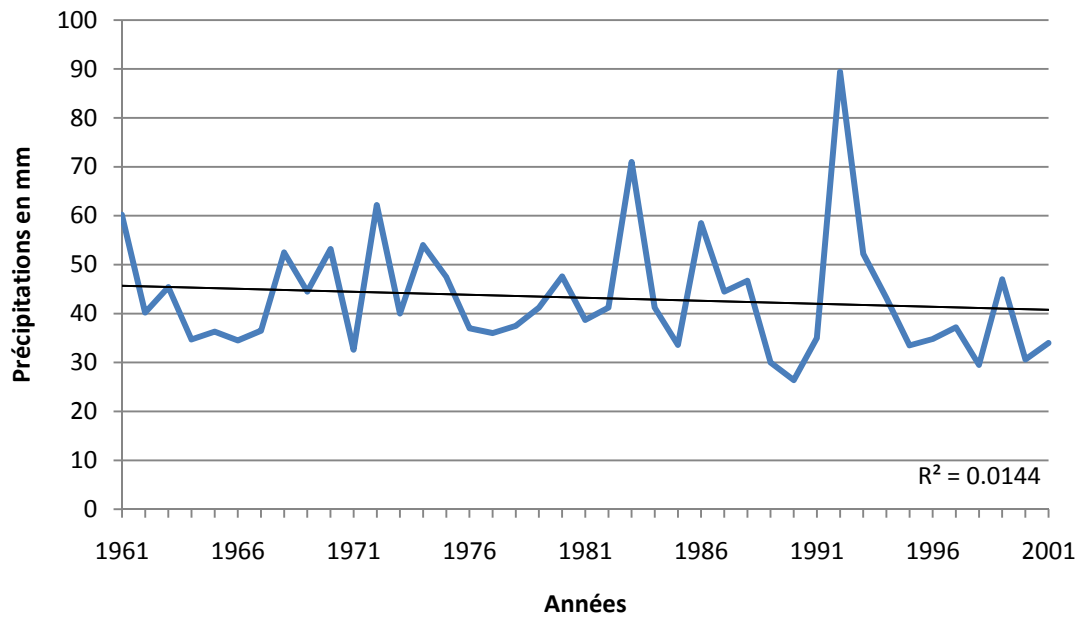
**Annexe 19 : Grand-St-Bernard : distribution des précipitations journalières maximales par année (1961-2009)**

**Précipitations maximales journalières par année (1961-2009)  
Bourg-St-Pierre**



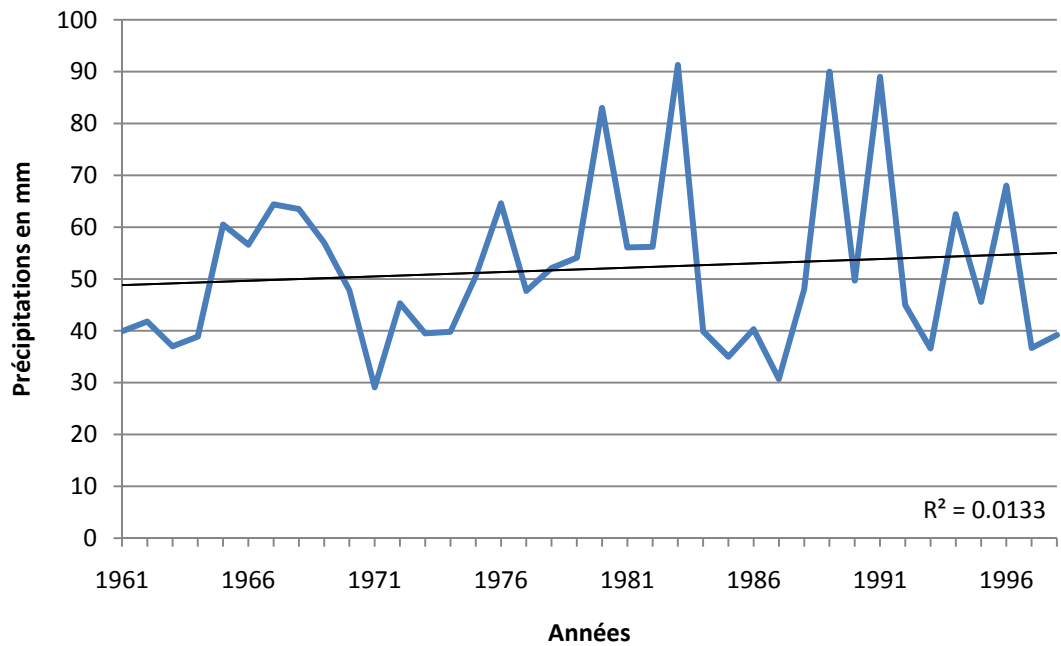
**Annexe 20 : Bourg-St-Pierre : distribution des précipitations journalières maximales par année (1961-2009)**

**Précipitations maximales journalières par année (1969-2009)  
Orsières**

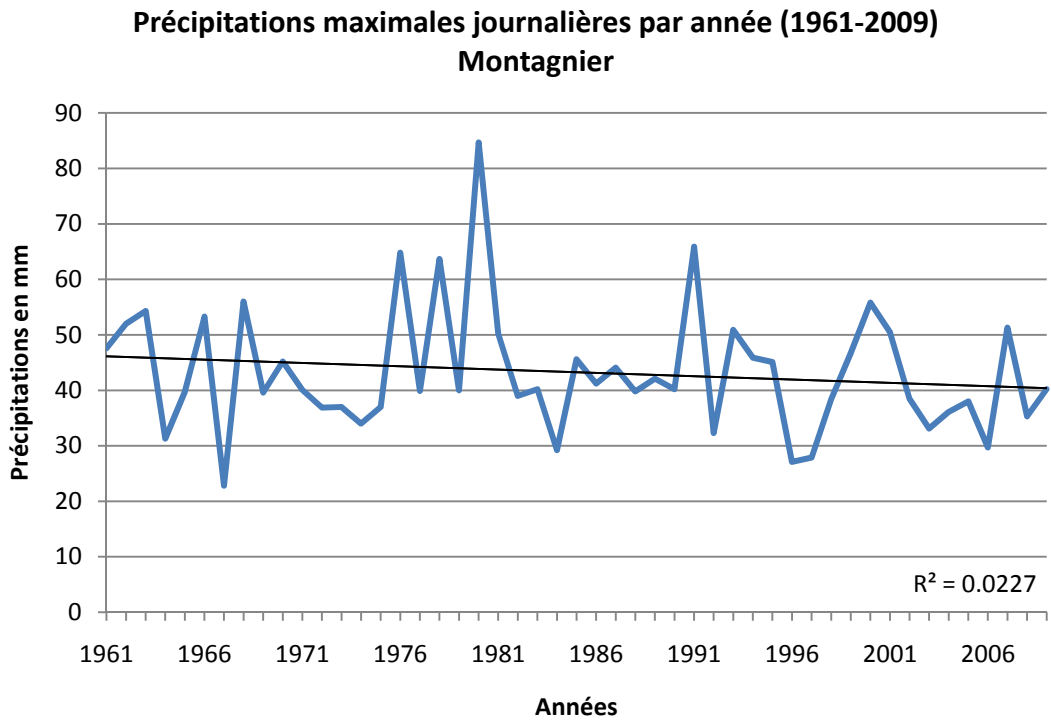


**Annexe 21 : Orsières : distribution des précipitations journalières maximales par année (1969-2009)**

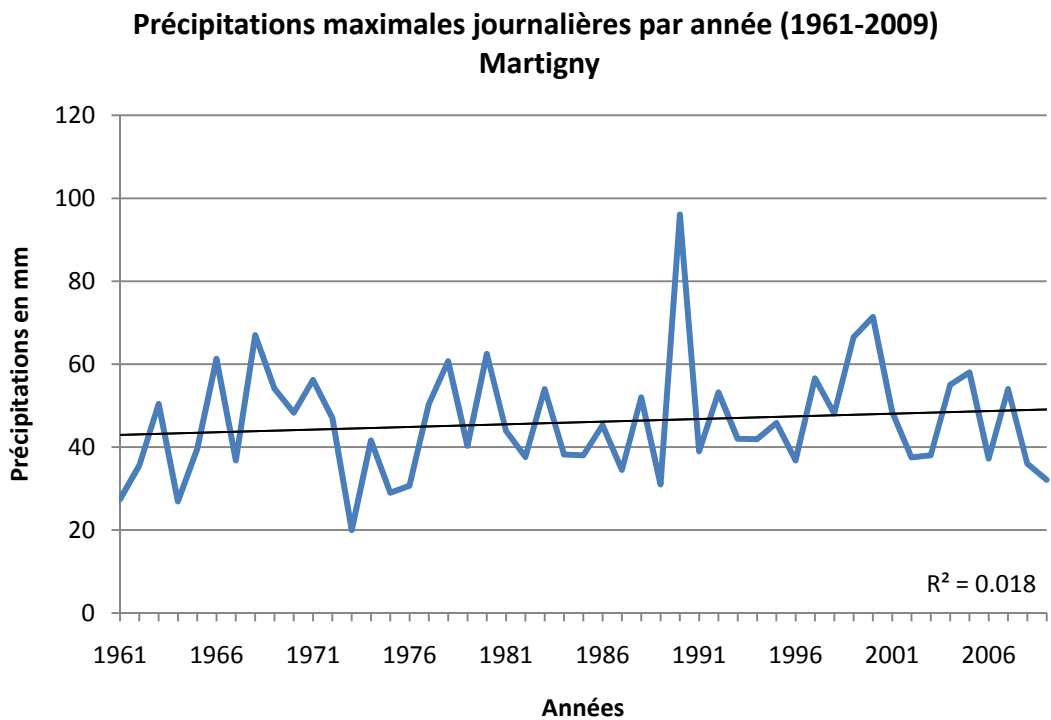
**Précipitations maximales journalières par année (1972-2009)  
Mauvoisin-Fionnay**



**Annexe 22 : Mauvoisin-Fionnay : distribution des précipitations journalières maximales par année (1972-2009)**

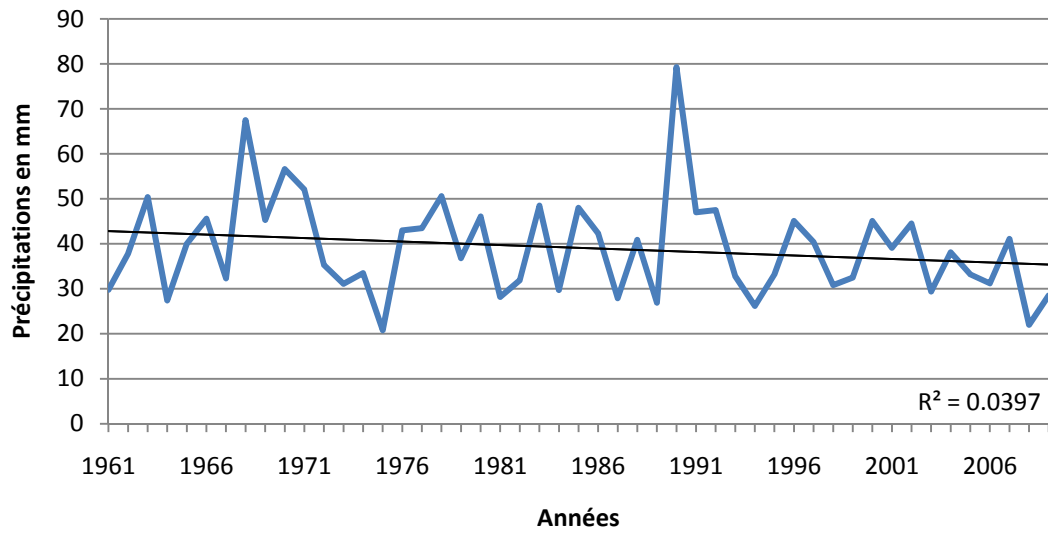


**Annexe 23 : Montagnier : distribution des précipitations journalières maximales par année (1961-2009)**



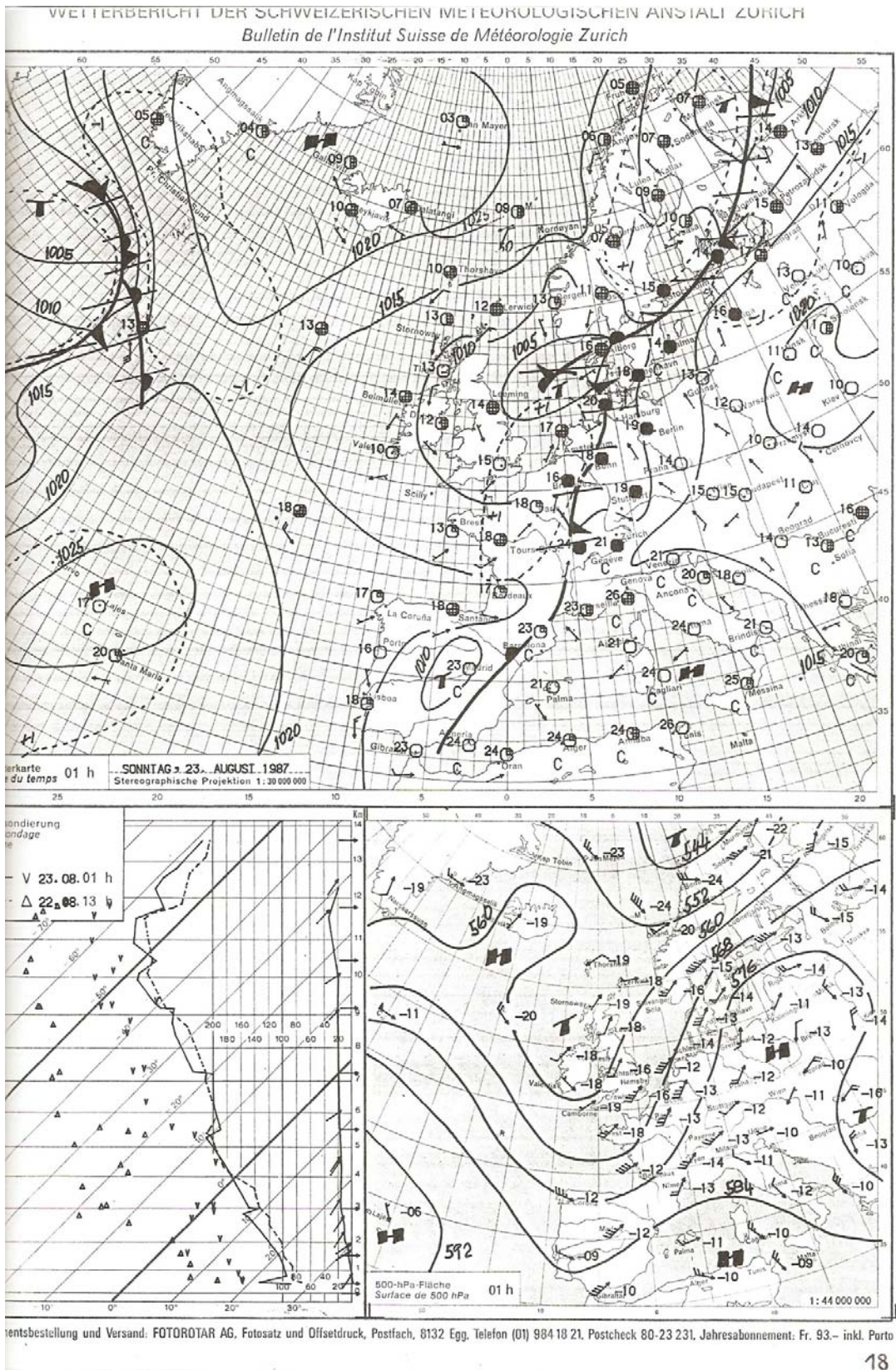
**Annexe 24 : Martigny : distribution des précipitations journalières maximales par année (1961-2009)**

**Précipitations maximales journalières par année (1961-2009)**  
**Sion**

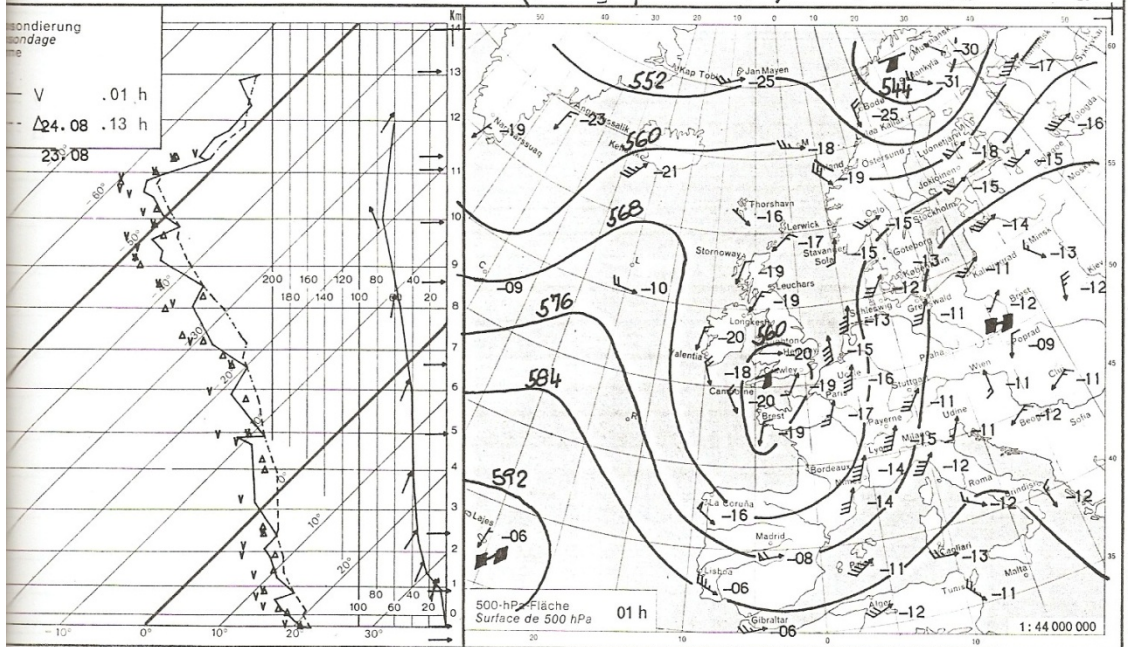
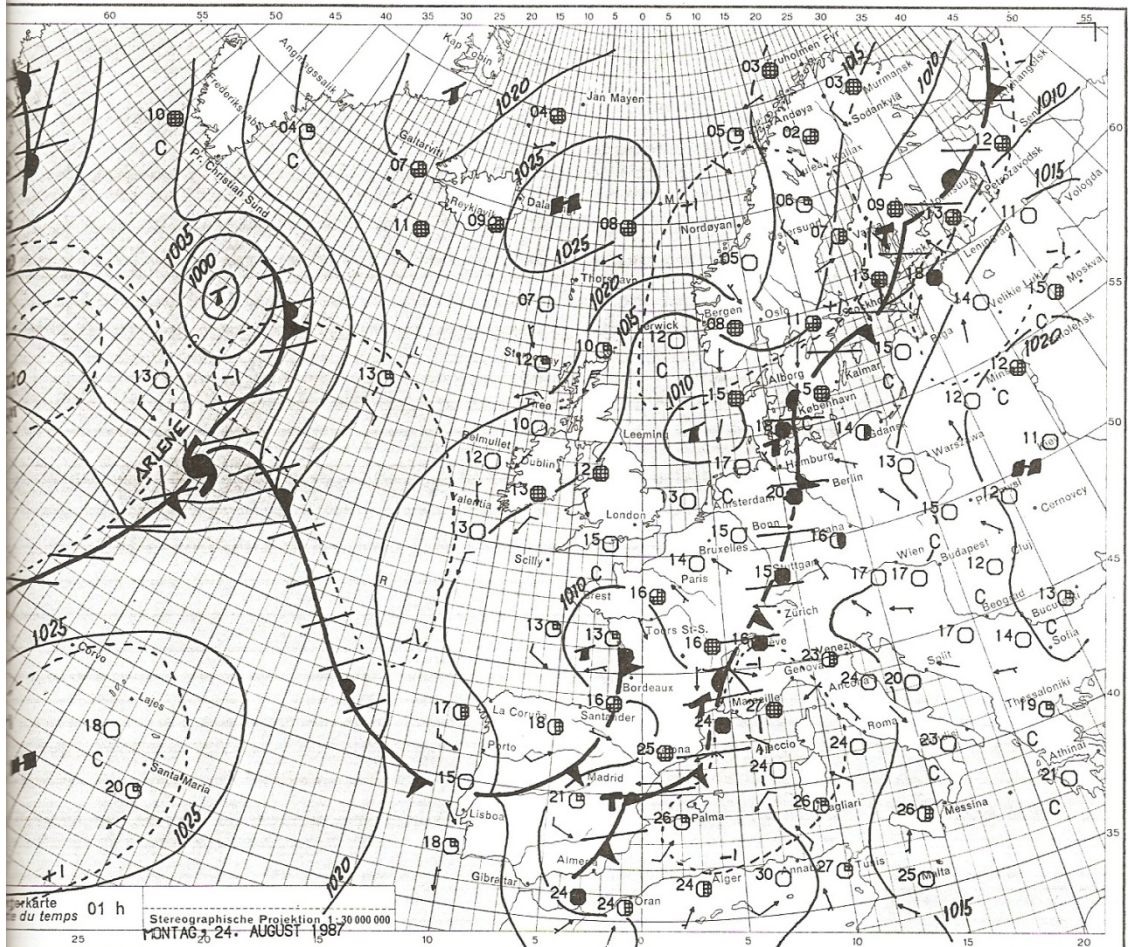


**Annexe 25 : Sion : distribution des précipitations journalières maximales par année (1961-2009)**

Annexe 26 : Cartes au sol et en altitude (500 hPa) de MétéoSuisse pour le 23, 24 et 25 août 1987



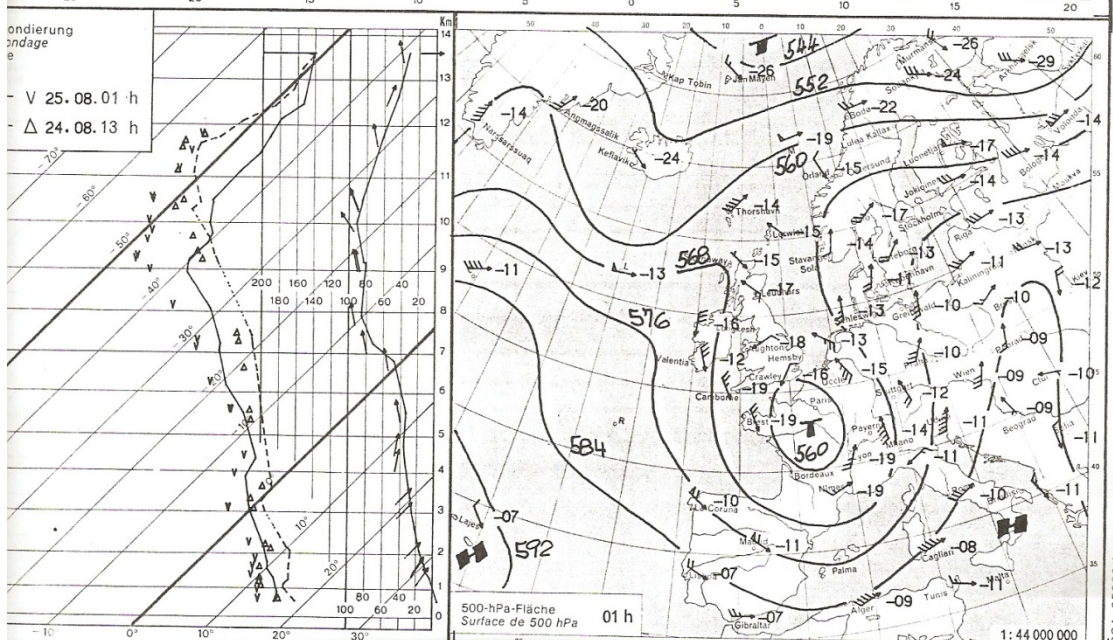
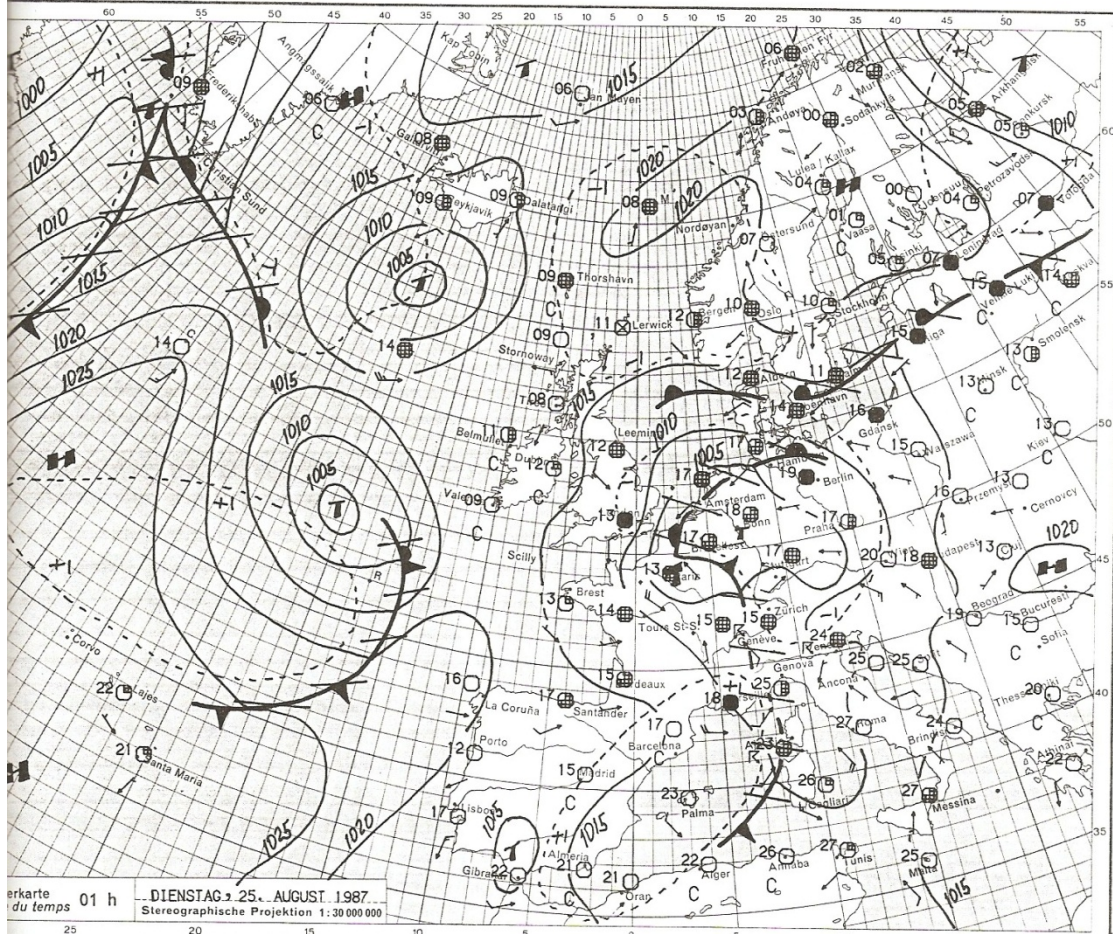
WETTERBERICHT DER SCHWEIZERISCHEN METEOROLOGISCHEN ANSTALT ZÜRICH  
 Bulletin de l'Institut Suisse de Météorologie Zurich



Abbestellung und Versand: FOTOROTAR AG, Fotosatz und Offsetdruck, Postfach, 8132 Egg, Telefon (01) 984 18 21, Postcheck 80-23 231, Jahresabonnement: Fr. 93.- inkl. Porto

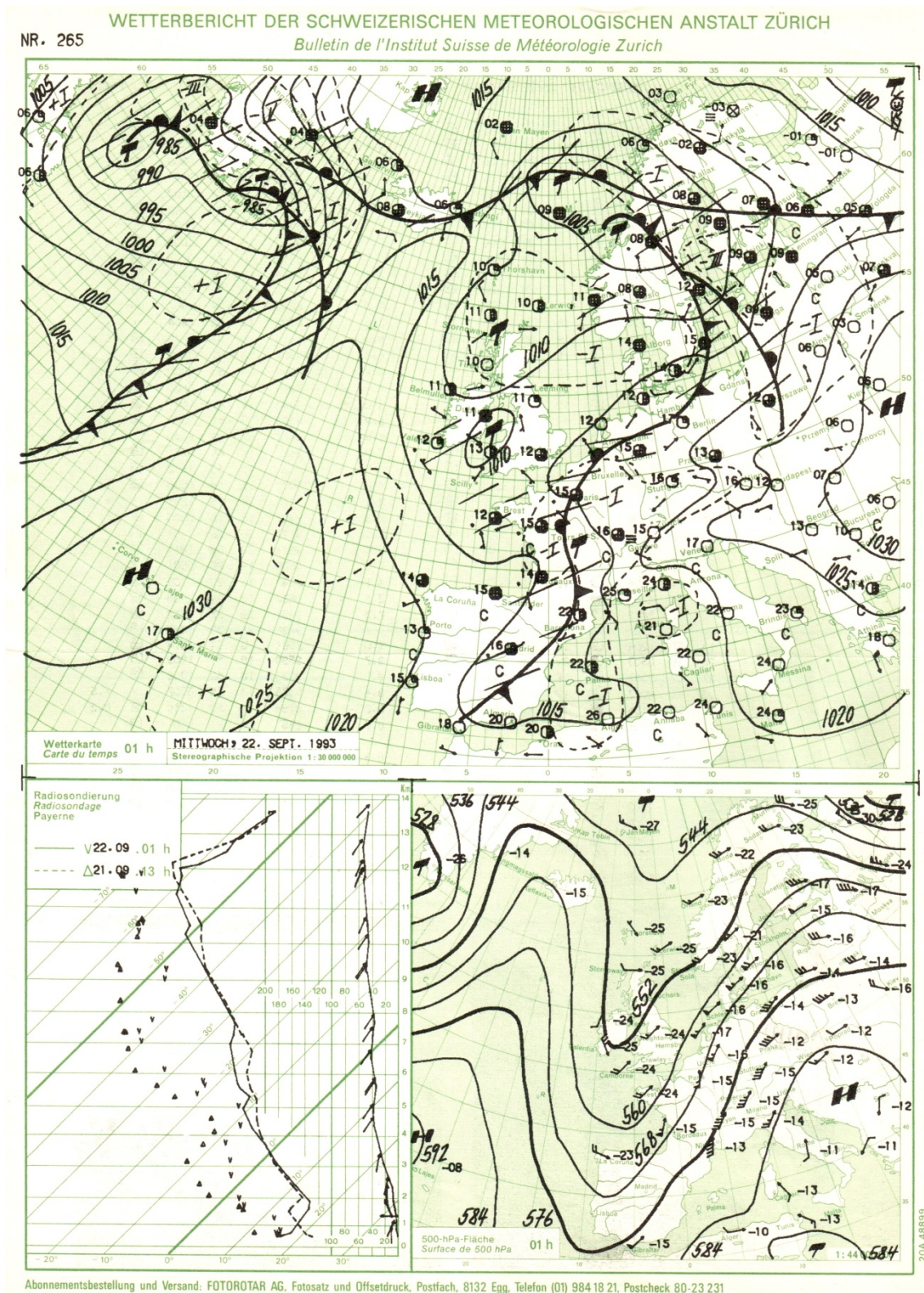


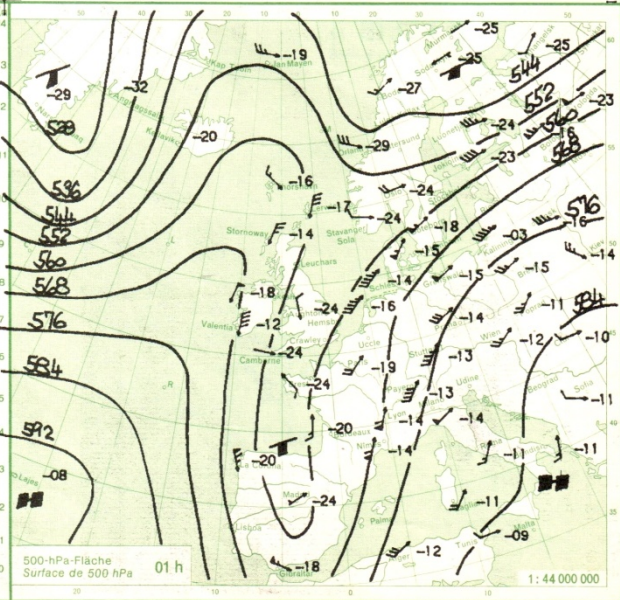
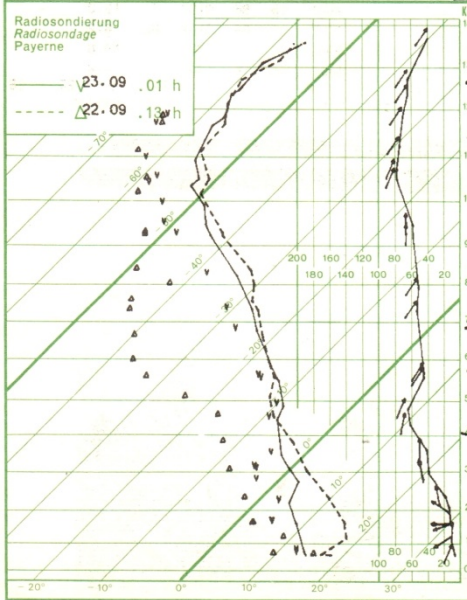
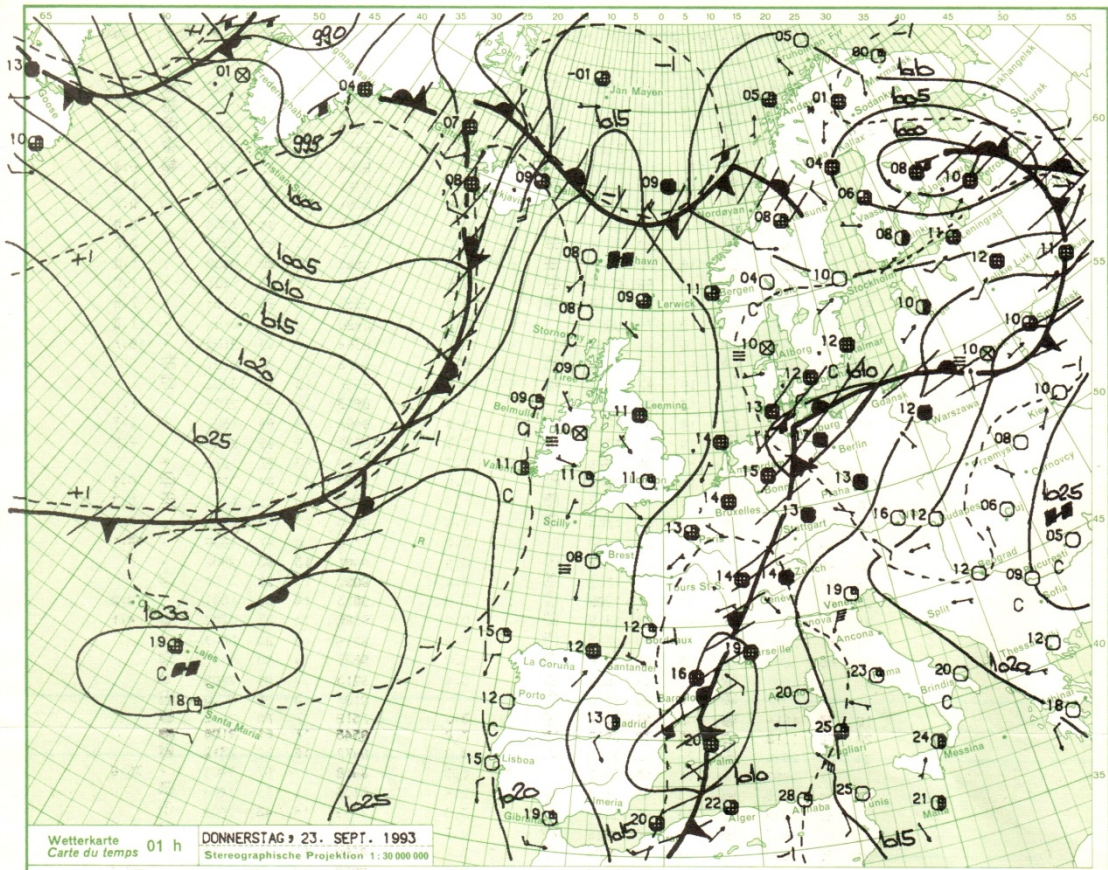
WETTERBERICHT DER SCHWEIZERISCHEN METEOROLOGISCHEN ANSTALT ZÜRICH  
 Bulletin de l'Institut Suisse de Météorologie Zurich



Bestellung und Versand: FOTOROTAR AG, Fotosatz und Offsetdruck, Postfach, 8132 Egg, Telefon (0) 584 18 21, Postcheck 80-23 231, Jahresabonnement: Fr. 52.- inkl. Porto

Annexe 27 : Cartes au sol et en altitude (500 hPa) de MétéoSuisse pour le 22, 23 et 24 septembre 1993



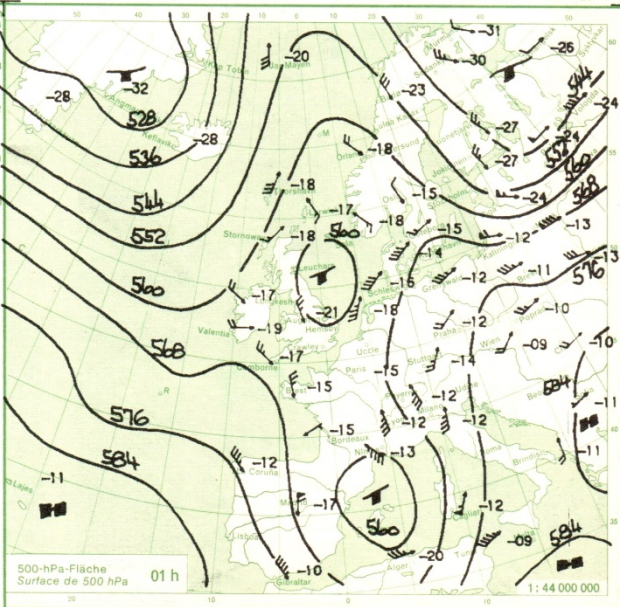
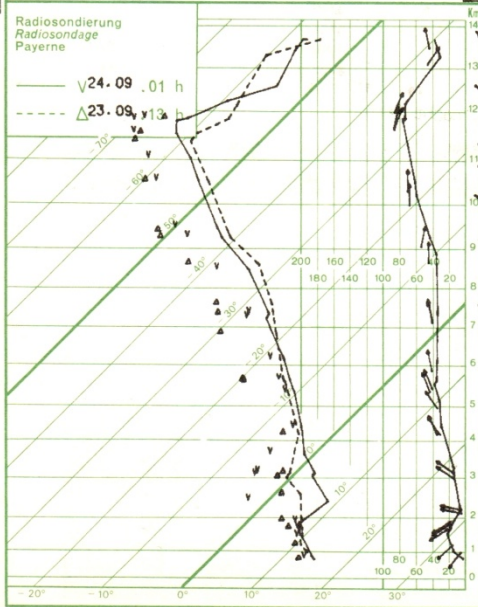
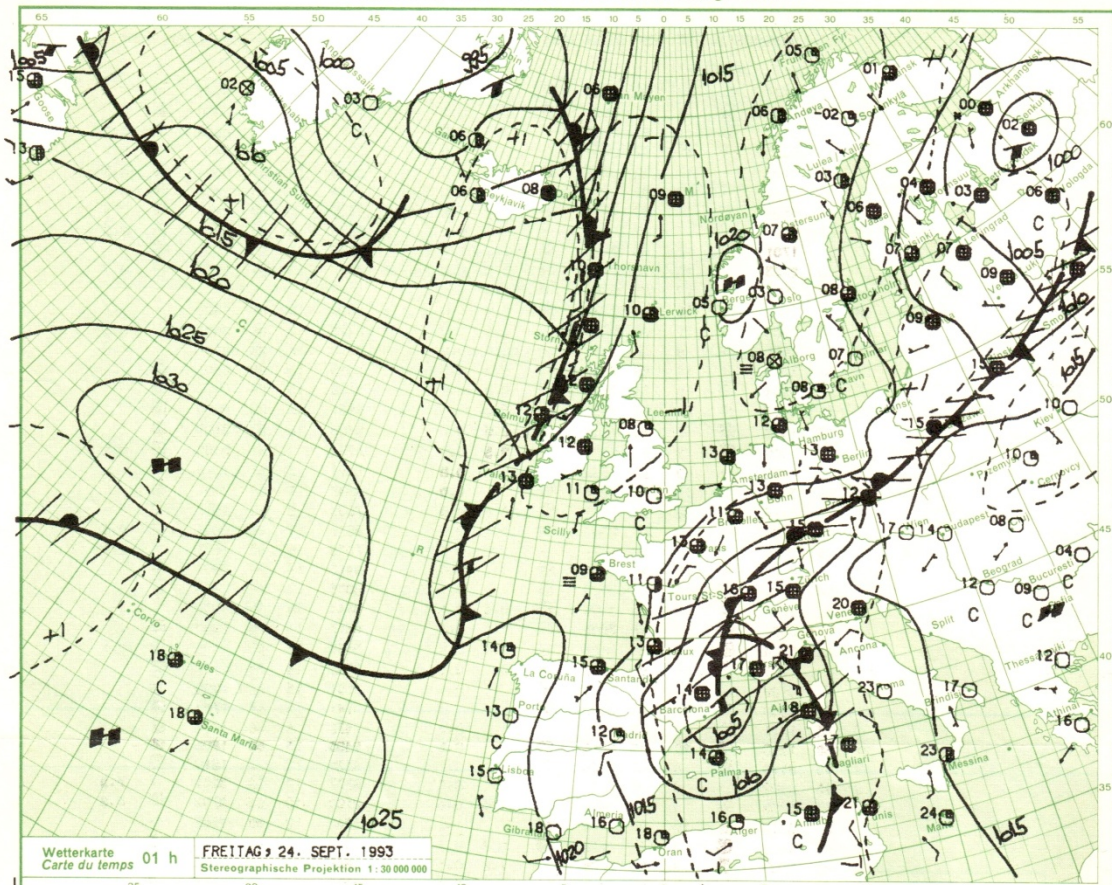


Abonnementsbestellung und Versand: FOTOROTAR AG, Fotosatz und Offsetdruck, Postfach, 8132 Egg, Telefon (01) 984 18 21, Postcheck 80-23 231

WETTERBERICHT DER SCHWEIZERISCHEN METEOROLOGISCHEN ANSTALT ZÜRICH

NR. 267

Bulletin de l'Institut Suisse de Météorologie Zurich



Annexe 28 : Cartes au sol et en altitude (500 hPa) de MétéoSuisse pour le 13, 14, 15 et 16 octobre 2000

Wetterübersicht vom Freitag  
 Résumé météorologique du Vendredi 13.10.2000 