Améliorations et optimisation globale de la méthode des analogues pour la prévision statistique des précipitations.

P. Horton

▶ **To cite this version:**

P. Horton. Améliorations et optimisation globale de la méthode des analogues pour la prévision statistique des précipitations. : Développement d'un outil de prévision et application opérationnelle au bassin du Rhône à l'amont du Léman.. Hydrologie. Université de Lausanne, 2012. Français. NNT : . tel-01441762

HAL Id: tel-01441762
https://theses.hal.science/tel-01441762

Submitted on 20 Jan 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIL | Université de Lausanne
Faculté des géosciences et de l'environnement
Centre de recherche en environnement terrestre

Améliorations et optimisation globale de la méthode des analogues pour la prévision statistique des précipitations

Développement d'un outil de prévision et application opérationnelle au bassin du Rhône à l'amont du Léman.

THÈSE DE DOCTORAT

présentée à la Faculté des géosciences et de l'environnement
de l'Université de Lausanne pour l'obtention du grade de
Docteur en géosciences et environnement
par

Pascal Horton

Diplôme d'ingénieur en environnement
École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Directeur de thèse	Prof. Michel Jaboyedoff
Co-directeur de thèse	Prof. Charles Obled
Jury	Prof. François Bussy (président)
	Dr. Dominique Bérod (expert)
	Dr. Daniel Cattani (expert)
	Dr. Vincent Fortin (expert)

LAUSANNE
2012

UNIL | Université de Lausanne
Faculté des géosciences et de l'environnement
Centre de recherche en environnement terrestre

Améliorations et optimisation globale de la méthode des analogues pour la prévision statistique des précipitations

Développement d'un outil de prévision et application opérationnelle au bassin du Rhône à l'amont du Léman.

Pascal Horton

Lausanne, 2012

UNIL | Université de Lausanne
Faculté des géosciences et de l'environnement
bâtiment Amphipôle
CH-1015 Lausanne

IMPRIMATUR

Vu le rapport présenté par le jury d'examen, composé de

Président de la séance publique :	M. le Professeur François Bussy
Président du colloque :	M. le Professeur François Bussy
Co-Directeur de thèse :	M. le Professeur Michel Jaboyedoff
Co-Directeur de thèse	M. le Professeur Charles Obled
Expert externe :	M. le Docteur Dominique Berod
Expert externe :	M. le Docteur Daniel Cattini
Expert externe :	M. le Docteur Vincent Fortin

Le Doyen de la Faculté des géosciences et de l'environnement autorise l'impression de la thèse de

Monsieur Pascal HORTON

Diplôme d'ingénieur en environnement
Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne

intitulée

AMELIORATIONS ET OPTIMISATION GLOBALE DE LA METHODE DES ANALOGUES POUR LA PREVISION STATISTIQUE DES PRECIPITATIONS

Lausanne, le 19 décembre 2012

Pour le Doyen de la Faculté des géosciences et de l'environnement

Professeur François Bussy, Vice-Doyen

À Elina, pour le bonheur de t'avoir auprès de nous

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Michel Jaboyedoff, qui m'a accueilli dans son institut et m'a donné cette opportunité de thèse. D'une grande curiosité et toujours plein d'idées, le brainstorming continue jusqu'au soir précédent le dépôt du manuscrit. Et certainement par la suite également. Il est intarissable en « je me demande... », alors même qu'on se demande quand il aurait bien pu avoir le temps d'y penser... Merci pour ces années riches et diversifiées, pour sa confiance et son intégrité.

Un merci tout particulier également à Charles Obled, qui n'a pas compté les kilomètres pour venir régulièrement s'investir entièrement dans ce travail. Il n'a rien caché de ses idées pointues, et en avait toujours une nouvelle qui germait sur l'oreiller de sa chambre d'hôtel. Un grand merci pour son investissement intense, d'une très grande importance pour ce travail, ainsi que pour son contact humain très agréable.

Dans la face cachée de cette recherche, au milieu de milliers de lignes de codes, se trouvent deux personnes qui m'ont été d'une grande aide pour concevoir l'architecture du logiciel développé, et pour le rendre interactif et « sexy », comme on le dit en langage informatique très spécialisé. Merci à Richard Metzger et à Lucien Schreiber pour leurs conseils et pour le temps qu'ils m'ont consacré.

Ma gratitude va également à Renaud Marty, qui s'est considérablement impliqué pour la validation des calculs de notre logiciel, à Abdelkader Mezghani, qui nous a fourni des résultats de son modèle, et à Frédéric Gottardi, qui a extrait des séries de précipitations de sa base de données de réanalyses, malgré nos difficultés à trouver le système de projection adéquat... Merci à Hamid Hussain-Khan pour la mise à disposition du cluster, qui m'a permis de condenser 26 années de calculs en quelques mois. Ma famille en est également reconnaissante...

Merci à toute la tribu de l'IGAR, une équipe dynamique et riche en diversité, pour ces années passées ensemble. En premier lieu, les « vieux », qui ont partagé un retournement de canoë au Canada ou qui ont joué avec le fusil d'un policier pakistanais au milieu du Cachemire : Andrea, Alexandre, Thierry. À Marc, coloc de bureau toujours au « top », à Clément (comment va le bananier ?), à Antonio, Marc-Henri, Ivanna, Marj, Simon, Carole, Loris, Giona, Mitch, Carmen, Zar Chi, Vincent, Mikhaïl, Dario, Pilar, Myriam, Céline, Benjamin, Raja, Battista, Jonas, Pierrick, Izabela, Dimitri, Laurence, Alain, Line, Martin, et tous les autres que je n'ai pas mentionnés...

Le projet MINERVE est développé en partenariat avec l'Office Fédéral de l'Environnement, les Services des Routes et Cours d'Eau, de l'Energie et des Forces Hydrauliques du canton du Valais et avec le Service des Eaux, Sols et Assainissement du canton de Vaud. MétéoSuisse fournit les prévisions météorologiques et les sociétés hydroélectriques communiquent les informations relatives à leurs aménagements. Les bureaux d'ingénieurs HydroCosmos et Epicard contribuent aux aspects informatiques. Les développements scientifiques sont confiés à deux entités de l'EPFL, le Laboratoire d'Ecohydrologie et le Laboratoire de Constructions Hydrauliques, ainsi qu'à l'Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque de l'UNIL. Merci à tous ces partenaires pour le projet intéressant que nous avons mené ensemble.

Nous tenons à remercier Dominique Bérod d'avoir initié cette recherche dans le domaine des analogues, et d'y avoir cru. Nos remerciements vont également à Jean-Louis Boillat pour l'encadrement du projet, et à Cara Tobin et Javier Garcia Hernandez – qui ont travaillé sur d'autres aspects du projet – pour les échanges intéressants que nous avons eus. Merci à tous les autres partenaires MINERVE : Jean-Pierre Jordan, Therese Bürgi, Eric Vez, Didier Ulrich, Bettina Schaefli, Pascal Ornstein, Jean-Yves Deleze, Ion Iorgulescu, Louis Bourguinet, Cédric Roy, Toni Arborino, et Stéphanie André.

Nos remerciements s'adressent également à MétéoSuisse, Météo France, ARPA Piémont, et ARPA Val d'Aoste pour la mise à disposition des mesures de précipitation aux stations. Les données des réanalyses NCEP ont été fournies par NOAA/OAR/ESRL PSD (Physical Sciences Division), Boulder, Colorado, USA, par leur site Internet www.esrl.noaa.gov/psd/. Les données du modèle GFS sont téléchargées depuis les serveurs NOMADS (NOAA Operational Model Archive and Distribution System) du NOAA (nomads.ncep.noaa.gov/).

Pour finir, un grand merci à mes amis et à mes parents qui m'ont encouragé, et spécialement à Rebecca, qui m'a réellement soutenu et qui a accepté une absence toujours plus fréquente en fin de thèse... Merci pour ton amour, tu es géniale.

Résumé

Le bassin du Rhône à l'amont du Léman peut être sujet à de fortes précipitations en mesure de provoquer des crues significatives. L'objectif du projet MINERVE dans lequel s'inscrit le présent travail consiste à fournir des outils pour la prévision et la gestion des crues par des actions préventives sur les aménagements hydroélectriques à accumulation. Pour satisfaire ce dernier, il est nécessaire de prévoir au mieux les cumuls de précipitations pour les jours suivants. Ceci est actuellement effectué par le modèle numérique de prévision de MétéoSuisse ; mais, en raison des grandes incertitudes liées à la quantification des événements extrêmes, il a été décidé qu'une approche parallèle de nature statistique pourrait compléter l'information disponible.

Ainsi, nous avons adapté la méthode des analogues, qui est une technique de prévision statistique des précipitations, au contexte alpin du bassin d'étude. Pour ce faire, plusieurs paramétrisations de la méthode ont été documentées et calibrées. Afin de prendre en main la méthode, nous avons effectué de multiples analyses paramétriques sur les variables synoptiques, mais également sur la constitution de groupements pluviométriques.

Une partie conséquente de cette étude a été consacrée à la programmation d'un logiciel de prévision automatique par la méthode des analogues, ainsi qu'à un outil de visualisation des résultats sous forme de cartes et graphiques. Ce logiciel, nommé *Atmoswing*, permet d'implémenter un grand nombre de méthodes différentes de prévision par analogie. L'outil est opérationnel depuis mi-2011 et nous a permis de confirmer l'intérêt de la prévision par analogie.

La méthode étant ici appliquée à un nouveau contexte, un grand nombre de variables synoptiques ont été évaluées. Nous avons alors confirmé l'intérêt des deux niveaux d'analogie sur la circulation atmosphérique et sur le flux d'humidité, tout en apportant des améliorations à celles-ci. Il en résulte des paramétrisations présentant des scores de performance supérieurs aux méthodes de référence considérées. Nous avons également évalué d'autres améliorations, comme l'introduction d'une fenêtre temporelle glissante afin de rechercher de meilleures analogies synoptiques à d'autres heures de la journée, ce qui s'est avéré intéressant, tout comme une prévision infrajournalière à pas de temps de 6 h.

Finalement, nous avons introduit une technique d'optimisation globale, les algorithmes génétiques, capable de calibrer la méthode des analogues en considérant tous les paramètres des différents niveaux d'analogie de manière conjointe. Avec cette technique, nous pouvons

nous approcher objectivement d'une paramétrisation optimale. Le choix des niveaux atmosphériques et des fenêtres temporelles et spatiales étant automatisé, cette technique peut engendrer un gain de temps, même si elle est relativement exigeante en calculs. Nous avons ainsi pu améliorer la méthode des analogues, et y ajouter de nouveaux degrés de liberté, notamment des fenêtres spatiales et des pondérations différenciées selon les niveaux atmosphériques retenus.

Abstract

The upper Rhone catchment is sometimes subject to heavy precipitation that can eventually result in floods. The MINERVE project, to which this work belongs, aims at providing tools for flood forecasting and management. For this purpose, actions can be undertaken on dam storage, but this requires forecasting precipitation accurately days beforehand. This is currently done by the numerical weather prediction model of MétéoSuisse. However, due to large uncertainties in the forecasting of extreme events, it was decided that a parallel forecast based on a statistical approach could complement the information available.

Therefore, we adapted a technique of statistical precipitation forecasting, namely the analogue method, to the alpine context of our catchment. Several parameterizations of the method have been documented and calibrated.

A substantial part of this study was devoted to programming a forecasting software, which was called *Atmoswing*. It is designed to process automatically forecasts by means of the analogue method, and to provide a tool for visualizing the results on maps and graphs. It can process many different versions of the analogue method. The software has been operational since mid-2011, and has allowed us to confirm the interest of prediction by analogy.

As the method is applied here to a new geographical context, a large number of synoptic variables were evaluated. We then confirmed the relevance of the traditional two levels of analogy, which are related first to the atmospheric circulation, and next to the humidity flux, while making improvements to them. As a result, we created new parameterizations that have better forecasting skills than the reference methods considered so far. We also evaluated other improvements, such as the introduction of a shifting time window to find better synoptic analogues at other hours of the day, which show some potential. A 6-hourly time step forecast has been evaluated and was found to bring useful information on precipitation characteristics.

Finally, we introduced a technique of global optimization : genetic algorithms. These were found to be able to calibrate the analogue method by considering jointly all parameters of the different analogy levels. With that kind of tool we can approach an objectively optimal parameterization.

As the choice of atmospheric levels and time windows is automated, this technique can result in a gain of time, even if it is relatively demanding in calculations. Thus we were able to improve the analogue method, and to add new degrees of freedom.

Table des matières

Table des matières **i**

Liste des tableaux **vii**

Liste des figures **x**

I Prise en main de la méthode et adaptation à la zone d'étude

1 Introduction **3**

1.1 Introduction du chapitre 4
1.2 Le projet MINERVE 4
1.3 Caractéristiques des précipitations dans le bassin 7
1.3.1 Sous-régions à comportement pluviométrique homogène 8
1.3.2 Les précipitations orographiques 10
1.3.3 Situations avec fortes précipitations dans les Alpes 12
1.4 Objectifs et structure du travail 17
1.4.1 Objectifs de la thèse 17
1.4.2 Structure du document 18

2 La prévision météorologique des précipitations **23**

2.1 Introduction du chapitre 24
2.2 Quelques concepts de la prévision météorologique 24
2.2.1 Les échelles de la prévision 24
2.2.2 Les incertitudes de la prévision 27
2.2.3 La prévision des événements extrêmes 29
2.3 La descente d'échelle (*downscaling*) 29
2.3.1 La descente d'échelle statistique 30
2.4 Évaluation des prévisions 33
2.4.1 La compétence d'une prévision 33
2.4.2 Le gain de performance 33
2.4.3 Prévisions déterministes discrètes 34
2.4.4 Prévisions déterministes continues 37

2.4.5 Prévisions probabilistes discrètes 37
2.4.6 Prévisions probabilistes continues 40

3 État de l'art de la prévision par analogie 43
3.1 Introduction du chapitre 44
3.2 Développements de la méthode des analogues 44
3.2.1 Le principe de la méthode 44
3.2.2 Historique de la méthode 45
3.2.3 Les pistes décevantes 52
3.2.4 Les critères d'analogie 53
3.2.5 Les niveaux atmosphériques d'intérêt 54
3.2.6 Implémentation actuelle 55
3.2.7 Autres cas d'études 56
3.2.8 Limites de la méthode 57
3.3 Établissement de références 58
3.3.1 R0, les origines 58
3.3.2 R1, analogie de circulation 59
3.3.3 R2, prise en compte de l'humidité 59
3.3.4 R3, prise en compte du flux d'humidité 59
3.3.5 R4, présélection sur les températures 60
3.3.6 R5, prise en compte des mouvements verticaux 61
3.3.7 Remarques générales 62
3.4 Calibration de la méthode des analogues 62
3.4.1 Analyse exploratoire : cartographie de la pertinence 63
3.4.2 Calibration classique 64

4 Données 67
4.1 Introduction du chapitre 68
4.2 Les prédictands 68
4.2.1 Réseau pluviométrique 68
4.2.2 Reconstitution des séries partielles 72
4.2.3 Statistiques des séries temporelles 73
4.2.4 Transformation des précipitations 75
4.2.5 Réanalyses de précipitations 75
4.2.6 Choix d'une période de validation 77
4.3 Les prédicteurs 80
4.3.1 Réanalyses 1 NCEP/NCAR 81
4.3.2 Prévisions GFS 85
4.3.3 Reprévisions GFS 87
4.3.4 Température de surface des océans du NOAA 87
4.4 Le catalogue de types de temps Cost733cat 88

5 Analyses paramétriques de la méthode des analogues 91
5.1 Introduction du chapitre . . . 92
5.2 Redimensionnement de la fenêtre spatiale . . . 92
5.3 Établissement de groupements pluviométriques . . . 93
5.4 Cohérence spatiale des paramètres . . . 96
5.5 Effet de la transformation des précipitations . . . 98
5.5.1 Effet de la normalisation . . . 98
5.5.2 Effet de la transformation en racine carrée . . . 99
5.6 Évolution temporelle de la carte de pertinence . . . 101
5.7 Analyse paramétrique par une méthode Monte-Carlo . . . 102

6 Implémentation en prévision opérationnelle 107
6.1 Introduction du chapitre . . . 108
6.2 Création des groupements pluviométriques . . . 108
6.3 Calibration des méthodes de référence . . . 109
6.3.1 R0, les origines . . . 110
6.3.2 R1, analogie de circulation . . . 112
6.3.3 R2, prise en compte de l'humidité . . . 113
6.3.4 R3, prise en compte du flux d'humidité . . . 115
6.3.5 R4, présélection sur les températures . . . 117
6.3.6 R5, prise en compte des mouvements verticaux . . . 122
6.3.7 Synthèse et utilisation d'autres scores . . . 122
6.4 Contraintes de la prévision en temps réel . . . 125
6.5 Logiciel développé . . . 127
6.5.1 Outil de prévision . . . 128
6.5.2 Outil de visualisation . . . 130
6.5.3 Gestion des données . . . 134
6.5.4 Approche modulaire . . . 135
6.5.5 Performances . . . 136
6.5.6 Tests unitaires . . . 137

II Suggestions d'améliorations et optimisation globale

7 Exploration de prédicteurs à l'échelle synoptique 141
7.1 Introduction du chapitre . . . 142
7.2 Les prédicteurs de la méthode des analogues . . . 142
7.2.1 Données des réanalyses . . . 142
7.2.2 Température des mers et océans . . . 158
7.3 Analyses parallèles . . . 161
7.3.1 Roses des vents des réanalyses . . . 161
7.3.2 Trajectoires inverses des masses d'air . . . 169

8 Propositions d'améliorations de la méthode 173
8.1 Introduction du chapitre . . . 174
8.2 Fenêtre temporelle glissante . . . 174
8.2.1 Conséquences de la réduction de l'archive sur la compétence . . . 175
8.2.2 Influence de la fenêtre glissante sur les critères d'analogie . . . 177
8.2.3 Conséquences sur les scores de performance . . . 181
8.2.4 Tentatives d'application à l'archive complète . . . 185
8.2.5 Conclusions sur la fenêtre temporelle glissante . . . 188
8.3 Prévisions infrajournalières . . . 188
8.4 Amélioration de la prévision de l'occurrence . . . 193
8.4.1 Prévision d'occurrence par un modèle linéaire généralisé . . . 194
8.4.2 Exploitation des catalogues de types de temps . . . 195
8.4.3 Calibration d'un modèle analogue de prévision d'occurrence . . . 197
8.4.4 Analyse des quantiles de la distribution . . . 197
8.4.5 Exploitation des prévisions d'ensemble du modèle GFS . . . 198
8.4.6 Conclusions sur la prévision de l'occurrence . . . 200
8.5 Amélioration du choix des variables d'analogie . . . 201
8.5.1 Amélioration de l'analogie de circulation . . . 201
8.5.2 Amélioration de l'analogie d'humidité . . . 203
8.5.3 Autres variables prédicteurs en troisième niveau d'analogie . . . 205

9 Évaluation de méthodes d'optimisation 207
9.1 Introduction du chapitre . . . 208
9.2 Quel intérêt à une optimisation automatique ? . . . 208
9.3 Contexte d'évaluation des méthodes d'optimisation . . . 209
9.4 Évaluation de la méthode de Nelder-Mead . . . 210
9.4.1 Structure et opérations . . . 210
9.4.2 Évaluation . . . 213
9.4.3 Conclusion . . . 215
9.5 Évaluation des algorithmes génétiques . . . 216
9.5.1 Concepts de base . . . 216
9.5.2 Structure et opérateurs . . . 220
9.5.3 Implémentation . . . 231
9.5.4 Paramétrisation . . . 231
9.5.5 Évaluation . . . 233
9.5.6 Recommandations de paramétrisation . . . 234

10 Optimisation automatique de la méthode 241
10.1 Introduction du chapitre . . . 242
10.2 Application des algorithmes génétiques . . . 242
10.3 Amélioration de l'analogie de circulation . . . 243
10.3.1 Optimisation des fenêtres spatiales et temporelles . . . 243

10.3.2 Optimisation des niveaux atmosphériques . . . 245
10.3.3 Ajout d'un troisième niveau atmosphérique . . . 247
10.3.4 Pondération de tous les niveaux atmosphériques . . . 247
10.3.5 Analogie de circulation sur 4 niveaux atmosphériques . . . 248
10.4 Amélioration de l'analogie d'humidité . . . 252
10.4.1 Optimisation du flux d'humidité uniquement . . . 253
10.4.2 Optimisation des deux niveaux d'analogie conjointement . . . 253
10.5 Conclusions . . . 257

III Bilan de la prévision opérationnelle et conclusions

11 Retour d'expérience de la prévision opérationnelle 263
11.1 Introduction du chapitre . . . 264
11.2 Performances des méthodes implémentées . . . 264
11.3 Retour sur quelques événements . . . 270
11.3.1 Événement de fin octobre 2011 . . . 271
11.3.2 Événement de début novembre 2011 . . . 273
11.3.3 Événement de début juillet 2012 . . . 282
11.4 Conclusions . . . 285

12 Conclusions et perspectives 287
12.1 Conclusions . . . 288
12.1.1 Optimisation automatique . . . 288
12.1.2 Nouvelles paramétrisations proposées . . . 289
12.1.3 Autres modifications de la méthode . . . 292
12.1.4 Performances en opérationnel . . . 293
12.2 Le contexte du changement climatique . . . 294
12.3 Perspectives . . . 295
12.3.1 Améliorations de la méthode . . . 295
12.3.2 Prévision opérationnelle et interprétation des prévisions . . . 297
12.4 Le mot de la fin . . . 298

Bibliographie 299

Annexes

A Détails de la reconstitution des séries pluviométriques A1

B Précipitations pour différents temps de retour B1

C Analyse de corrélation des séries de précipitations C1

D Manuel utilisateur d'Atmoswing D1

D.1 Introduction D3
D.2 Installation et configuration D3
D.2.1 Installation D3
D.2.2 Configuration D4
D.3 Gestion des données D11
D.3.1 Les catalogues D11
D.3.2 Archives de prédicteurs D12
D.3.3 Prédicteurs en temps réel D15
D.3.4 Prédictands D17
D.3.5 Création de la base de données des précipitations D19
D.4 Fichiers de paramètres D22
D.5 Logiciel de calcul (Forecaster) D27
D.5.1 Calculer une prévision à l'aide de l'interface graphique D28
D.5.2 Calculer une prévision de manière automatique sur un serveur D29
D.6 Logiciel de visualisation (Viewer) D31
D.6.1 Visualisation sur cartes D32
D.6.2 Visualisation de la série temporelle pour une station D34
D.6.3 Visualisation des distributions D35
D.6.4 Visualisation de la liste des analogues D36

E Recommandations de paramétrisation des AGs E1
E.1 Démarche de comparaison des opérateurs E2
E.2 Opérateurs d'accouplement E3
E.3 Opérateurs de mutation E9
E.4 Autres options E12
E.5 Évaluation pour un autre groupement E14
E.6 Évaluation de la sélection du niveau atmosphérique E16
E.7 Évaluation pour la méthode de référence R2 . . . . . E19
E.8 Évaluation pour la méthode de référence R4 . . . . . E20

F Comparaison des opérateurs d'accouplement des AGs F1

G Comparaison des opérateurs de mutation des AGs G1

H Bulletins météorologiques des situations d'intérêt H1

Liste des tableaux

2.1 Tableau de contingence d'une prévision discrète à deux classes. 34

3.1 Paramètres de la méthode R0a. 58
3.2 Paramètres de la méthode R0b. 59
3.3 Paramètres de la méthode R1. 59
3.4 Paramètres de la méthode R2. 59
3.5 Paramètres de la méthode R3a. 60
3.6 Paramètres de la méthode R3b. 60
3.7 Paramètres de la méthode R3c. 60
3.8 Paramètres de la méthode R4a. 61
3.9 Paramètres de la méthode R4b. 61
3.10 Paramètres de la méthode R4c. 61
3.11 Paramètres de la méthode R5a. 61
3.12 Paramètres de la méthode R5b. 62

4.1 Séquences d'années possibles pour la période de validation. 77
4.2 Sélection de variables à plusieurs niveaux de pression des réanalyses 1 NCEP/NCAR. . 83
4.3 Sélection de variables de surface des réanalyses 1 NCEP/NCAR. 84
4.4 Sélection de variables de flux de surface des réanalyses 1 NCEP/NCAR. 84
4.5 Liste des méthodes utilisées pour la création du catalogue Cost733cat. 89

5.1 Résultats pour différents groupements de stations dans le bassin des Drances. 95

6.1 Liste des groupements pluviométriques retenus. 108
6.2 Calibration et validation des paramètres de la méthode de référence R0. 110
6.3 Paramètres résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R0. 111
6.4 Calibration et validation des paramètres de la méthode de référence R1. 112
6.5 Paramètres résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R1. 112
6.6 Calibration et validation des paramètres de la méthode de référence R2. 113
6.7 Paramètres résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R2. 114
6.8 Calibration et validation des paramètres de la méthode de référence R3. 115
6.9 Paramètres de la méthode R3d. 116
6.10 Paramètres de la méthode R3e. 116
6.11 Paramètres de la méthode R3f. 116
6.12 Paramètres résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R3. 117

6.13 Calibration et validation des paramètres de la méthode de référence R4. 118
6.14 Paramètres optimaux de la présélection sur les températures. 120
6.15 Paramètres résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R4. 121
6.16 Synthèse des scores CRPSS pour chaque méthode retenue et chaque groupement. . . . 123
6.17 Nombre de jours avec des précipitations observées supérieures à certains seuils. 124
6.18 Scores calculés sur les méthodes de référence pour la prévision de l'occurrence. 124
6.19 Scores calculés sur les méthodes de référence pour la prévision du seuil $P/P10 \geq 2/3$. . 125
6.20 Évolution du nombre d'analogues des méthodes R1 et R2 avec l'échéance. 126

7.1 Abréviations des variables des réanalyses pour l'exploration de données. 143
7.2 Gammes des paramètres pour l'exploration de variables en premier niveau d'analogie. . 144
7.3 Paramètres du 1er niveau d'analogie utilisés pour l'exploration de variables du 2e niveau. 147
7.4 Paramètres des 2 premiers niveaux d'analogie pour l'exploration de variables du 3e niveau. 150

8.1 Paramètres retenus pour l'analogie sur le géopotentiel à 500 hPa et 1000 hPa. 176
8.2 Paramètres pour l'humidité et compétence de la méthode R2 sur l'archive complète. . . 176
8.3 Influence de la réduction de l'archive sur la compétence en CRPS. 176
8.4 Gain du CRPSS sur les deux niveaux d'analogie dû à la fenêtre temporelle glissante. . . 181
8.5 Paramètres et compétence de la méthode R1 après calibration pour la fenêtre glissante. 182
8.6 Paramètres et compétence de la méthode R2 après calibration pour la fenêtre glissante. 183
8.7 Changements en finesse et en justesse dus à la fenêtre glissante. 184
8.8 Performances de la fenêtre glissante avec une série générée par moyenne mobile. 186
8.9 Coefficient de détermination des séries reconstituées à l'aide d'un proxy météorologique. 187
8.10 Scores CRPSS avec la série glissée reconstituée à l'aide d'un proxy météorologique. . . . 187
8.11 Scores CRPSS des méthodes R1 et R2 à un pas de temps de 6 h. 192
8.12 Statistiques des fréquences d'occurrence selon les analogues et le modèle GLM. 194
8.13 Scores CRPSS pour la version modifiée selon un modèle GLM. 194
8.14 Méthodes de classification en types de temps expliquant le mieux l'occurrence. 196
8.15 Statistiques des séries constituées sur la base des prévisions d'ensemble de GFS. 199
8.16 Résultats de l'ajout de niveaux atmosphériques pour l'analogie de circulation. 201
8.17 Paramètres résultant de la procédure d'homogénéisation pour la nouvelle méthode M6. 202
8.18 Score CRPSS de la nouvelle méthode M6, et gains par rapport à R0 et à R1. 203
8.19 Score CRPSS d'une analogie d'humidité consécutive à celle de la méthode M6. 204
8.20 Fenêtres spatiales résultant de l'homogénéisation de la nouvelle méthode M7. 204
8.21 Score CRPSS de la méthode M7, et gains par rapport à R2, R3 et R4. 205

9.1 Gammes des paramètres de R1 pour l'évaluation des techniques d'optimisation. 209

10.1 Paramètres de la méthode R1 optimisés par les AGs. 243
10.2 Scores CRPSS des paramètres optimisés et gains par rapport à la méthode R1. 244
10.3 Paramètres de l'analogie de circulation avec optimisation des niveaux atmosphériques. . 245
10.4 Scores CRPSS et gains de l'analogie avec optimisation des niveaux atmosphériques. . . 245
10.5 Paramètres de l'analogie de circulation avec pondération des 4 niveaux atmosphériques. 249
10.6 Scores CRPSS et gains de l'analogie de circulation optimisée par les AGs. 251
10.7 Scores CRPSS et gains de l'analogie d'humidité optimisée par les AGs. 253
10.8 Paramètres de la méthode optimisée conjointement sur la circul. et le flux d'humidité. . 255

10.9 Gains de la méthode optimisée conjointement sur la circulation et le flux d'humidité. . . 256

12.1 Paramètres de la nouvelle méthode R6. 290
12.2 Paramètres de la nouvelle méthode optimisée R6*. 290
12.3 Paramètres de la nouvelle méthode R7. 290
12.4 Paramètres de la nouvelle méthode optimisée R7*. 290
12.5 Liste des groupements pluviométriques. 291

Liste des figures

1.1 Zone d'étude du projet MINERVE. 5
1.2 Concept de modélisation hydrologique des parties glaciaires et non-glaciaires. 5
1.3 Schéma opérationnel de MINERVE. 6
1.4 Découpages du bassin du Rhône en sous-régions à pluviométrie homogène. 8
1.5 Illustration des mécanismes de génération des précipitations orographiques. 10
1.6 Hauteur moyenne du géopotentiel à 500 hPa de certains événements majeurs. 14

2.1 Illustration d'un diagramme ROC. 38
2.2 Interprétation graphique du CPRS. 40

3.1 Exemple d'une carte de pertinence pour la station de Binn. 63

4.1 Carte des stations de MétéoSuisse à l'intérieur et autour du bassin. 69
4.2 Périodes disponibles des séries pluviométriques journalières. 70
4.3 Emplacements des stations météorologiques de MétéoSuisse et longueur des archives. . . 71
4.4 Périodes disponibles des séries pluviométriques horaires. 71
4.5 Carte des stations intégrées à la base de données. 73
4.6 Carte de la fréquence de pluies nulles aux stations considérées. 74
4.7 Carte des valeurs de la pluie journalière décennale aux stations. 74
4.8 Champs moyens des précipitations journalières calculés par la méthode SPAZM. 76
4.9 Caractéristiques des séries de précipitations pour les différentes périodes de validation. . 78
4.10 Caractéristiques des séries de précipitations pour les différentes périodes de calibration. 79
4.11 Représentation de la grille régulière des réanalyses NCEP/NCAR. 81
4.12 Représentation de la grille gaussienne T62 des réanalyses NCEP/NCAR. 82
4.13 Emplacement des 12 domaines des classifications de types de temps (de Cost733). . . . 90

5.1 Différents regroupements des stations des Drances. 94
5.2 Cartes des stations partageant la même fenêtre spatiale pour la méthode R1. 96
5.3 Cartes des fenêtres spatiales optimales pour la méthode R1. 97
5.4 Carte du meilleur niveau atmosphérique du géopotentiel par station. 98
5.5 Cartes des nombres d'analogues de la méthode R1. 100
5.6 Cartes des compétences en CRPS de la méthode R1. 100
5.7 Évolution temporelle de la carte de pertinence de la circulation à 500 hPa. 101
5.8 Résultats d'une méthode Monte-Carlo sur R1 pour les crêtes du sud-est. 103

5.9 Résultats d'une méthode Monte-Carlo sur R1 pour une période de calibration de 5 ans. 104
5.10 Résultats d'une méthode Monte-Carlo sur R1 pour le Chablais. 105
5.11 Résultats d'une méthode Monte-Carlo sur R2 pour les crêtes du sud-est. 106

6.1 Carte des groupements pluviométriques retenus. 109
6.2 Fenêtres spatiales pour la méthode R0. 111
6.3 Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R0. 111
6.4 Fenêtres spatiales pour la méthode R1. 113
6.5 Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R1. 113
6.6 Fenêtres spatiales pour la méthode R2. 114
6.7 Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R2. 114
6.8 Fenêtres spatiales pour la méthode R3. 117
6.9 Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R3. 117
6.10 Fenêtres spatiales pour la méthode R4. 121
6.11 Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R4. 121
6.12 Ajustement du nombre d'analogues croissant avec l'échéance pour la méthode R1. . . . 126
6.13 Interface graphique du logiciel de prévision. 128
6.14 Édition des détails d'un modèle dans Atmoswing. 129
6.15 Interface graphique du logiciel de visualisation. 130
6.16 Carte avec toutes les échéances, et symbole élaboré à cette fin. 132
6.17 Carte pour une échéance. 132
6.18 Graphique de l'évolution temporelle pour une station. 132
6.19 Graphique de la distribution du critère d'analogie des journées analogues. 133
6.20 Graphique de la distribution des valeurs de précipitations des journées analogues. . . . 133
6.21 Liste des journées analogues et de leurs précipitations associées. 133
6.22 Organigramme de l'implémentation de la méthode des analogues dans Atmoswing. . . . 136
6.23 Graphique de l'évolution des performances des calculs dans Atmoswing. 137

7.1 Graphiques des 30 meilleures variables des réanalyses en premier niveau d'analogie. . . 144
7.2 Suite de la Figure 7.1. 145
7.3 Graphiques des heures optimales pour toutes les variables en premier niveau d'analogie. 146
7.4 Identique à la Figure 7.1, mais pour le second niveau d'analogie. 148
7.5 Suite de la Figure 7.4. 149
7.6 Identique à la Figure 7.1, mais pour le troisième niveau d'analogie. 151
7.7 Suite de la Figure 7.6. 152
7.8 Identique à la Figure 7.1, mais pour un niveau d'analogie intermédiaire. 153
7.9 Suite de la Figure 7.8. 154
7.10 Graphiques des 30 meilleures variables en 1er niveau d'analogie pour les crêtes du SE. . 155
7.11 Identique à la Figure 7.10, mais pour le second niveau d'analogie. 156
7.12 Identique à la Figure 7.10, mais pour le troisième niveau d'analogie. 156
7.13 Cartes de pertinence de la température de surface de l'océan Atlantique en 2^{e} niveau. . 159
7.14 Cartes de pertinence de la température de surface de la mer Méditerranée en 2^{e} niveau. 160
7.15 Cartes de pertinence de la température de surface de la mer Méditerranée en 3^{e} niveau. 161
7.16 Roses des vents pour différents niveaux atmosphériques et seuils de pluie à Binn. 163
7.17 Roses des vents pour différents niveaux atmos. et seuils de pluie aux Marécottes. 164

7.18 Histogrammes des directions et vitesses des vents à 500 hPa pour diff. classes de pluie. . 165
7.19 Roses des vents au niveau 300 hPa pour les jours à précipitations extrêmes. 166
7.20 Roses des vents au niveau 500 hPa pour les jours à précipitations extrêmes. 167
7.21 Roses des vents au niveau 850 hPa pour les jours à précipitations extrêmes. 168
7.22 Carte des influences principales pour les précipitations extrêmes. 168
7.23 Trajectoires inverses à 500 hPa pour les quantiles 98 % et 99 % de la pluie journalière. . 171

8.1 Illustration du principe de la fenêtre temporelle glissante. 174
8.2 Changements dans les distributions du critère S1 dû à la fenêtre temporelle glissante. . 177
8.3 Synthèse du gain sur le critère S1 dû à la fenêtre temporelle glissante. 178
8.4 Gains sur le critère S1, dus à la fenêtre temporelle glissante, en fonction de seuils de pluie.179
8.5 Effet saisonnier sur le critère S1 et son gain dû à la fenêtre temporelle glissante. 180
8.6 Répartition des tranches horaires dans les dates analogues en fonction de la saison. . . . 180
8.7 Synthèse des changements sur le critère RMSE dû à la fenêtre temporelle glissante. . . 181
8.8 Différences sur le score CRPSS en fonction de seuils de précipitations. 182
8.9 Influence de la fenêtre temporelle glissante sur les composantes du CRPS. 184
8.10 Illustration de la création de séries par moyenne mobile. 185
8.11 Graphique de la prévision à pas de temps de 6 h pour l'événement d'août 1987. 189
8.12 Graphique de la prévision à pas de temps de 6 h pour l'événement de septembre 1993. . 190
8.13 Graphique de la prévision à pas de temps de 6 h pour l'événement d'octobre 2000. . . . 191
8.14 Illustration du changement de la fréquence de la pluie nulle. 193
8.15 Statistiques des séries constituées sur les quantiles de la distrib. des pluies analogues. . 198
8.16 Statistiques des séries constituées sur la base des prévisions du modèle GFS. 199
8.17 Fenêtres spatiales des différentes régions pour la nouvelle méthode M6. 202
8.18 Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la nouvelle méthode M6. . . 203

9.1 Organigramme de la technique d'optimisation de Nelder-Mead. 211
9.2 Illustration des opérations possibles sur un simplexe dans un espace à deux dimensions. 212
9.3 Valeurs des scores CRPSS de 100 optimisations avec l'algorithme de Nelder-Mead. . . . 213
9.4 Distribution des paramètres résultant des 100 optimisations par Nelder-Mead. 214
9.5 Représentation binaire des variables dans les AGs. 219
9.6 Représentation réelle des variables dans les AGs. 219
9.7 Organigramme de fonctionnement des algorithmes génétiques. 220
9.8 Illustration des différents opérateurs de sélection naturelle des AGs. 221
9.9 Illustration des différents opérateurs de sélection des couples des AGs. 223
9.10 Illustration des différents opérateurs de croisement des AGs. 224
9.11 Exemple d'évolution des scores des meilleurs individus de 10 optimisations. 233

10.1 Fenêtres spatiales de la méthode R1 optimisées par les AGs. 244
10.2 Fenêtres spatiales issues de l'optimisation des niveaux atmosphériques. 246
10.3 Régions pour l'analogie de circulation avec pondération des 4 niveaux atmosphériques. . 249
10.4 Fenêtres spatiales de l'analogie de circulation des 4 niveaux atmosphériques. 250
10.5 Régions pour la méthode optimisée conjointement sur la circul. et le flux d'humidité. . . 254
10.6 Fenêtres spatiales de l'optimisation conjointe sur la circulation et le flux d'humidité. . . 256

11.1 Graphiques mensuels des prévisions et des observations des précipitations à Binn. . . . 265

11.2 Graphiques mensuels des prévisions et des observations des précipitations à Zermatt. . 266
11.3 Graphiques mensuels des prévisions et des observations des précipitations à Sierre. . . . 267
11.4 Graphiques mensuels des prévisions et des observations des précip. aux Diablerets. . . . 268
11.5 Graphiques mensuels des prévisions et des observations des précip. aux Marécottes. . . 269
11.6 Évolution de la situation synoptique pour la période du 23 au 25 octobre 2011. 271
11.7 Évolution des prévisions à la station de Binn pour l'événement de fin octobre 2011. . . 272
11.8 Spatialisation donnée par Atmoswing pour le q60 % de la pluie prévue pour le 25.10. . 273
11.9 Évolution de la situation synoptique à 500 hPa pour début novembre 2011. 274
11.10 Évolution des prévisions à la station de Binn pour l'événement de novembre 2011. . . . 274
11.11 Graphiques des prévisions pour l'événement de début novembre 2011. 275
11.12 Spatialisation donnée par Atmoswing pour le q60 % de la pluie prévue pour le 4.11. . . 276
11.13 Spatialisation donnée par Atmoswing pour le q60 % de la pluie prévue pour le 5.11. . . 277
11.14 Cartes des alertes de MétéoSuisse et de Meteocentrale pour l'événement de nov. 2011. . 278
11.15 Évolution de la situation synoptique à 500 hPa pour début juillet 2012. 282
11.16 Graphiques des prévisions pour l'événement de début juillet 2012. 283
11.17 Distribution de toutes les analogues ainsi que des 10 meilleures pour le 2 juillet 2012. . 284
11.18 Graphiques des prévisions à Binn et Saas-Fee pour l'événement de début juillet 2012. . 284

12.1 Performances des méthodes développées par rapport à celles de référence. 291

Première partie

Prise en main de la méthode et adaptation à la zone d'étude

Chapitre 1

Introduction

Le présent chapitre décrit le projet MINERVE dans lequel s'inscrit notre travail. Celui-ci a pour objectif une gestion des crues du Rhône à l'amont du Léman par des actions préventives sur les aménagements hydroélectriques à accumulation. Notre contribution constitue une prévision statistique des précipitations visant à apporter une information supplémentaire pour l'analyse de la situation hydrométéorologique en cas d'événement à venir présumé.

Nous caractérisons en premier lieu le bassin en termes de comportement pluviométrique, et présentons les situations météorologiques critiques pour le Rhône. Ces dernières ont fait l'objet de nombreuses études, dont nous exposons les conclusions principales.

Finalement, les objectifs de la thèse sont présentés, ainsi que la structure du présent document.

1.1 Introduction du chapitre

Nous commençons par présenter le projet MINERVE auquel cette thèse prend part, puis donnons un aperçu des caractéristiques des précipitations dans la zone d'étude, le bassin du Rhône à l'amont du Léman. Les objectifs de la thèse et la structure du document sont ensuite présentés.

1.2 Le projet MINERVE

Plusieurs événements majeurs de précipitations ont récemment eu lieu dans le bassin alpin du Rhône (1987, 1993 et 2000). Durant l'événement d'octobre 2000, les cumuls précipités ont dépassé les 500 mm en 7 jours sur la partie sud-est du bassin, générant des crues sur le Rhône d'un temps de retour de 100 à 300 ans selon la section considérée (Petrascheck et Hegg, 2002).

À la suite de ces événements extrêmes, et dans l'attente de la réalisation des travaux de la troisième correction du Rhône, le projet MINERVE (*Modélisation des Intempéries de Nature Extrême sur les Rivières Valaisannes et de leurs Effets*, Boillat, 2005) a été mis en place dans le but d'anticiper les crues du Rhône et d'en réduire les dommages par des actions préventives sur les aménagements hydroélectriques à accumulation (Jordan et al., 2010; García Hernández et al., 2009b). Les surfaces drainées par les ouvrages hydro-électriques (directement, ainsi que par de nombreuses installations de captage et de pompage) constituant environ 30 % du bassin versant (voir Figure 1.1), une gestion des débits de certains affluents du Rhône peut donc avoir un impact significatif sur la pointe de la crue.

La zone d'étude est caractérisée par une surface de 5520 km^2 et des altitudes de 373 à 4634 m. Elle est constituée du canton du Valais, du Chablais vaudois (rive droite du Rhône après le coude de la vallée), et d'une petite surface du territoire français (Vallorcine, près du lac d'Emosson). L'essentiel de la zone d'étude constitue le bassin versant du Rhône à l'amont du Léman, sauf la région du Simplon, dont les eaux s'écoulent en direction de la plaine du Pô. Le bassin du Rhône à l'amont du Léman a un temps de concentration d'environ 24 à 36 h (Jordan et al., 2010).

La gestion est basée sur le système MINERVE, constitué du modèle hydrologique GSM-SOCONT (*Glacier Snow Melt - SOil CONTribution model*, voir Figure 1.2, Consuegra et al., 1998; Schaefli et al., 2005) et de *Routing System* (García Hernández et al., 2007). Le modèle intègre les prévisions météorologiques et calcule la réponse des bassins versants ainsi que les actions standards des aménagements hydroélectriques. Pour ce faire, le bassin versant est discrétisé en 239 sous-bassins, eux-mêmes encore découpés en bandes d'altitude (environ tous les 500 m) afin de tenir compte au mieux de l'effet de la température sur la nature des précipitations et sur les processus de fonte de la neige et de la glace (Jordan et al., 2010). Ce modèle semi-distribué intègre ainsi 1054 bandes d'altitude, unités hydrologiques élémentaires du modèle. L'horizon de prévision est de 72 h à un pas de temps horaire. Le

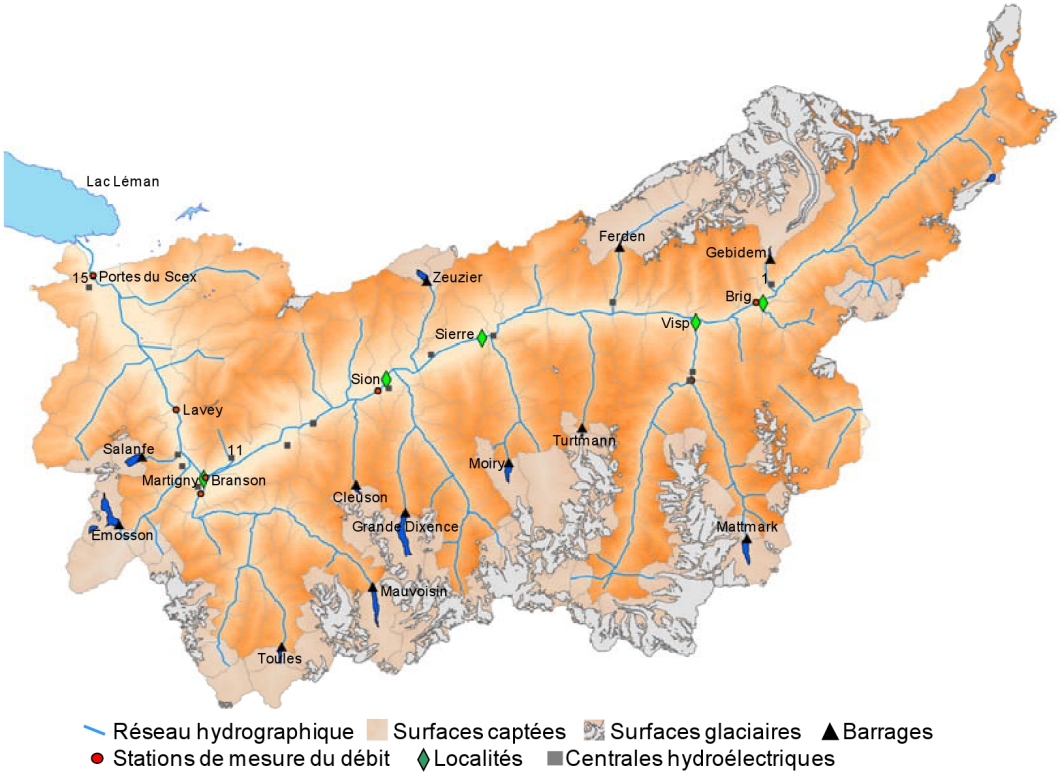


Figure 1.1 – Zone d'étude du projet MINERVE avec les principales retenues et les centrales hydroélectriques (de García Hernández et al., 2009b).

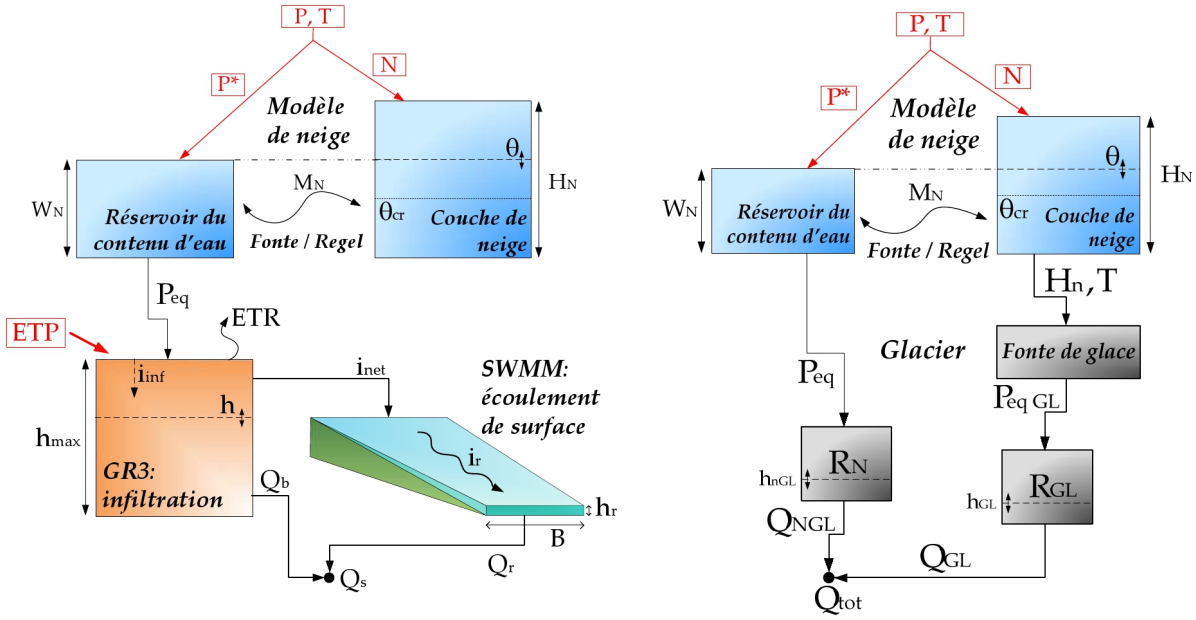


Figure 1.2 – Concept de modélisation hydrologique des parties (gauche) non-glaciaires et (droite) glaciaires (de García Hernández et al., 2009b). Pour les détails, voir Schaefli et al. (2005) ou García Hernández et al. (2007).

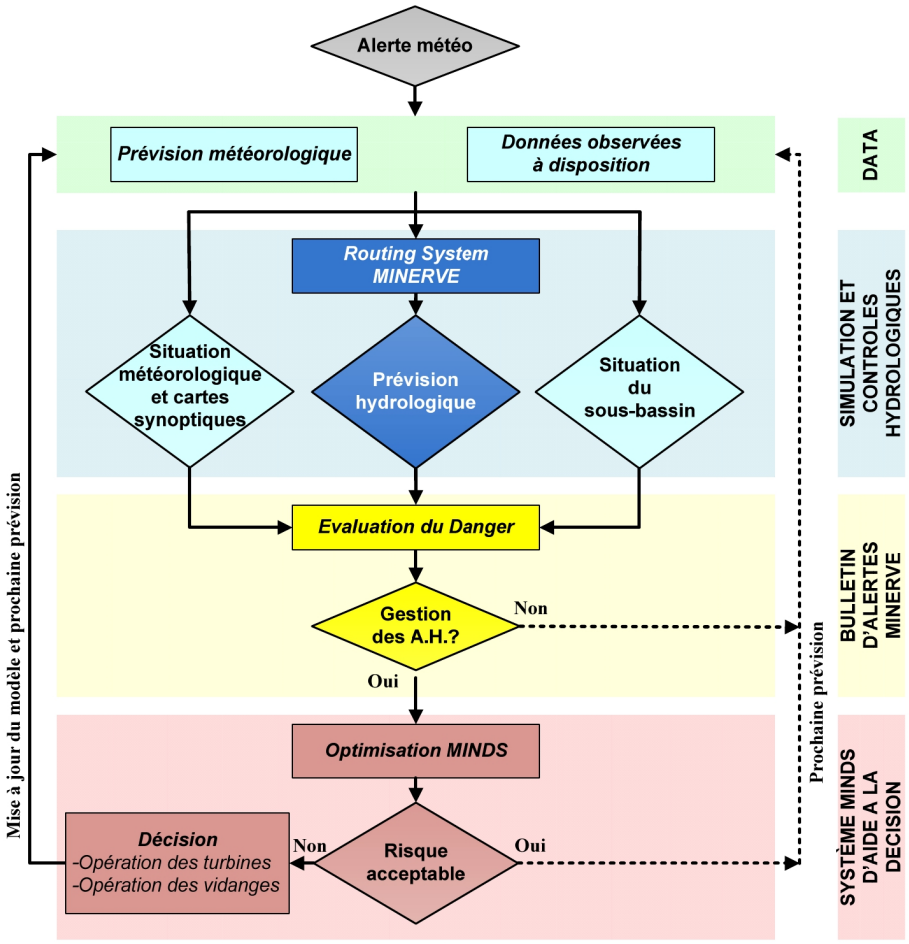


Figure 1.3 – Schéma opérationnel de MINERVE (de García Hernández et al., 2009b).

modèle comprend également une procédure de mise à jour des variables d'état afin que les débits simulés correspondent au mieux aux observations. Cette mise à jour ne concerne donc pas les paramètres de la méthode ni les données en entrée, mais les niveaux dans les différents réservoirs du modèle (Jordan et al., 2010).

Lorsqu'une situation critique pour le Rhône est identifiée, le système est alors utilisé pour l'évaluation de scénarios de gestion sur les aménagements dans un but de réduction du débit de pointe (voir Figure 1.3). Les scénarios sont constitués de turbinages préventifs, d'éventuelles vidanges de fond, ainsi que de réductions des lâchers d'eau pendant la crue. Ces actions doivent permettre d'éviter des inondations tout en limitant les pertes pour les exploitants des retenues. Les décisions sont prises par une cellule de crise et leur application est rendue obligatoire pour les exploitants par les responsables de la sécurité civile (Jordan et al., 2010). En cas de perte financière pour les exploitants, un dédommagement est convenu.

Il convient donc de limiter au maximum les risques de débordement du Rhône tout en minimisant les pertes financières liées aux vidanges préventives trop importantes. Pour ce faire, des outils d'aide à la décision ont été développés (voir Jordan et al., 2010), dont l'objectif est d'optimiser le bilan financier des dommages potentiels et des pertes économiques pour les

producteurs d'électricité, résultant des décisions de la cellule de crise. Les résultats de cette optimisation sont les horaires de turbinage préventif, ainsi que les éventuelles opérations de vidange de fond (Jordan et al., 2010). García Hernández (2011) a récemment développé un nouveau modèle d'aide à la décision, appelé MINDS (*Minerve Interactive Decision Support*). Celui-ci intègre un optimiseur proposant automatiquement des scénarios de gestion sur la base de prévisions d'ensemble (García Hernández et al., 2009a).

Les performances du modèle n'étaient pas satisfaisantes dans la vallée de la Viège et dans celle des Drances (Jordan et al., 2010), entre autres en raison d'une mauvaise interpolation spatiale des précipitations et des températures. Tobin et al. (2011) ont amélioré ces aspects ainsi que le modèle de fonte de la neige, permettant ainsi au modèle hydrologique de mieux reproduire certaines crues de référence.

Les précipitations les plus critiques pour le bassin se produisent en automne, lorsque les retenues sont pratiquement pleines (Jordan et al., 2010). Il peut donc être nécessaire de libérer une certaine tranche d'eau par des turbinages préventifs avant le début de l'événement. La décision d'actions préventives nécessite que le débit et les précipitations soient prévus plusieurs jours à l'avance. MétéoSuisse fournit les prévisions des modèles COSMO-2 (*Consortium for Small-scale Modeling*, anciennement *Lokal Modell*, voir Steppeler et al., 2003), COSMO-7 et COSMO-LEPS (*Limited Area Ensemble Prediciton System*, voir Montani et al., 2003; Marsigli et al., 2005). Ces dernières sont des prévisions d'ensemble et permettent ainsi de tenir compte de plusieurs scénarios réalisables lors de la prise de décision.

Toutefois, les prévisions météorologiques des extrêmes dans l'environnement alpin ne sont pas encore satisfaisantes et les incertitudes sur les intensités des précipitations ainsi que la localisation de celles-ci sont très importantes (Fritsch et al., 1998; Rodwell, 2006; Joly, 2008). En effet, les phénomènes de méso-échelle et les processus liés à l'orographie peuvent encore considérablement limiter la prédictibilité des événements extrêmes (Buzzi et al., 2003; Montani et al., 2003; Marsigli et al., 2005). Cette grande incertitude sur l'occurrence et sur la quantification d'un éventuel événement pluviométrique majeur nous incite à considérer davantage de sources de prévisions météorologiques, les plus indépendantes possible, afin de permettre une comparaison des différentes informations mises à disposition. C'est ainsi que le besoin d'une prévision de nature statistique s'est fait ressentir.

1.3 Caractéristiques des précipitations dans le bassin

Les Alpes sont la principale barrière orographique d'Europe. Certaines régions alpines – particulièrement les versants sud – sont plus fréquemment soumises à des événements de précipitations intenses (Frei et Schär, 1998). Le forçage de flux d'air humide sur ces chaînes de montagnes engendre des précipitations orographiques d'intensité remarquable et pouvant durer plusieurs jours.

1.3.1 Sous-régions à comportement pluviométrique homogène

Dans le but de comprendre la pluviométrie du bassin, il est nécessaire d'identifier les sous-régions ayant un comportement pluviométrique homogène. Notre objectif est donc de diviser le territoire de manière cohérente avec les principales influences atmosphériques définissant le comportement pluviométrique. Cette définition implique une forte composante subjective, puisque les données à disposition ne couvrent le territoire que de manière partielle. De plus, le comportement pluviométrique d'une région n'est pas discontinu au point de pouvoir en tracer les limites. Le mélange de multiples influences atmosphériques cache en réalité un comportement bien plus complexe. Ainsi, plusieurs sources ou recommandations ont été considérées.

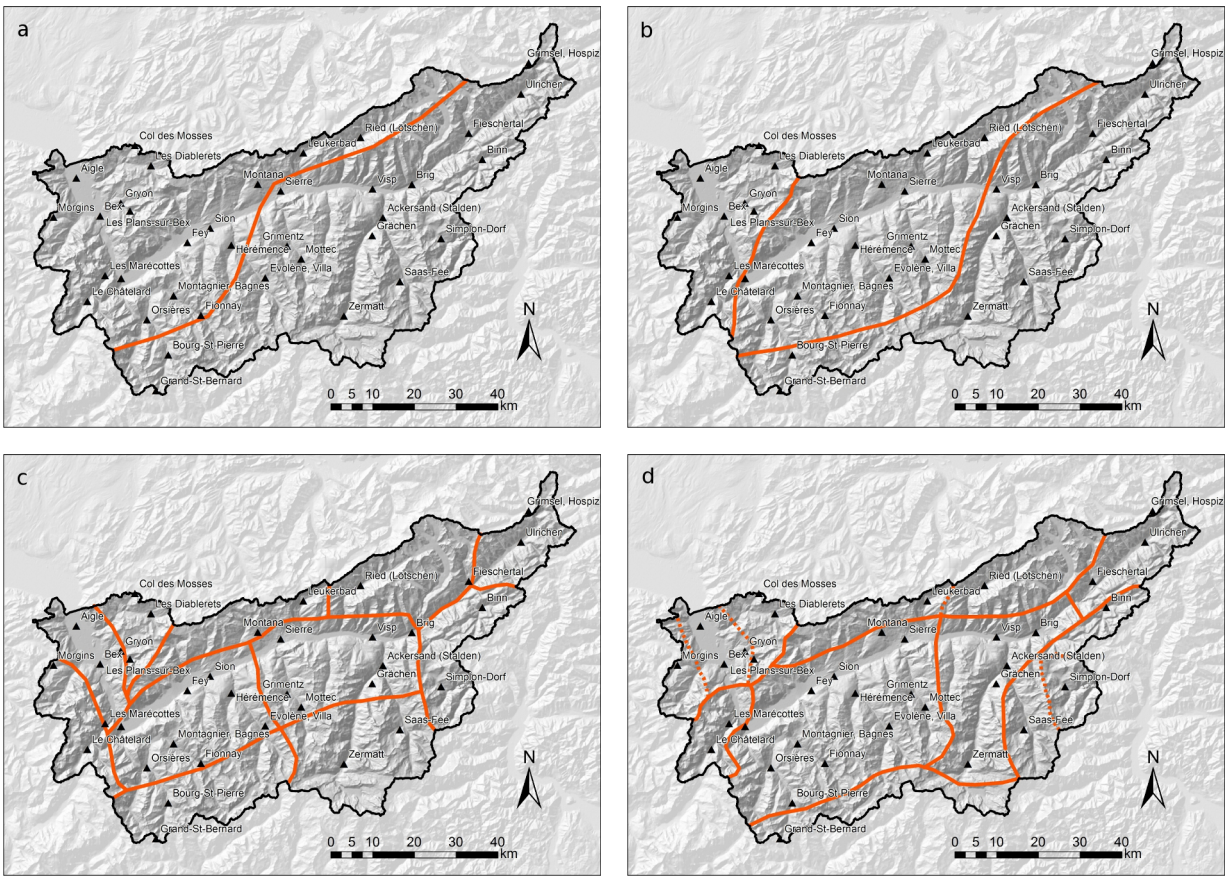


Figure 1.4 – Découpages du bassin du Rhône en sous-régions à pluviométrie homogène proposés par (a) Grebner (1995), (b) Attinger et Fallot (2003), (c) Didier Ulrich (MétéoSuisse), (d) Jean-Michel Fallot (Université de Lausanne) (Géodonnées © swisstopo – DV084371).

Grebner (1995), cité par Kunz et Rey (1995) et Brauchli (2009), propose une division du bassin en deux parties (voir Figure 1.4a), soumises à deux régimes principaux :

– le Bas-Valais et la rive droite du Valais central, sensibles aux courants d'ouest (SSO - NO) en provenance de l'Atlantique, et soumis à des précipitations modérées de longue durée ;

– la rive gauche du Valais central et le Haut-Valais, sensibles aux courants du sud (SO - SE) en provenance de la Méditerranée, et soumis à des précipitations plus violentes et concentrées.

Attinger et Fallot (2003) ont divisé le bassin en 3 grandes régions selon leurs régimes pluviométriques, à savoir le Chablais & Bas-Valais, le Valais central et le Haut-Valais (voir Figure 1.4b). Un autre découpage en des régions plus petites a été effectué rapidement avec l'aide de Didier Ulrich (MétéoSuisse) (Figure 1.4c).

Une dernière division a été proposée par Jean-Michel Fallot (Université de Lausanne), sur la base de son expérience et de sa connaissance du bassin (Figure 1.4d). Les limites établies tentent de séparer les régions homogènes du point de vue de leur pluviométrie et de leur sensibilité à différents types de temps, tout en maximisant leur taille afin de ne pas fractionner le bassin en unités trop petites contenant peu de stations pluviométriques. À cette fin, des subdivisions principales et secondaires ont été déterminées et sont indiquées respectivement en continu ou en discontinu sur la carte de la Figure 1.4d. L'analyse suivante résulte de son expertise :

– La vallée de Saas, la vallée de Binn et le Val Divedro (Simplon village) sont regroupées, ces trois vallées étant les plus exposées aux flux humides de sud-ouest à sud-est et leur régime pluviométrique se rapprochant de celui du sud des Alpes (avec la crête sud des Alpes valaisannes du massif du Mont Blanc à celui du Mont Rose). Néanmoins, le Val Divedro est situé de l'autre côté des crêtes, dans le bassin hydrologique du fleuve Pô, et se comporte en réalité de manière un peu différente, notamment au niveau des précipitations extrêmes. En principe, le Val Divedro est le plus exposé aux précipitations extrêmes avec des afflux d'air humide de sud-est à sud-ouest, devant respectivement la vallée de Binn et la vallée de Saas.

– L'approche est identique pour le Bas-Valais et les Préalpes vaudoises, qui pourraient être séparés en deux sous-régions, à savoir la vallée pour la première et les reliefs des deux rives ensemble dans la seconde. Une telle subdivision reflète davantage une différence entre les quantités précipitées dans la vallée et sur les reliefs qu'une discrimination des influences météorologiques. Cette région est sensible aux situations d'ouest cycloniques en particulier, tout comme le Valais Central, mais également à celles du nord.

– La région du col du Grand-Saint-Bernard et des crêtes environnantes est sensible à pratiquement toutes les influences, qu'elles soient du sud, de l'ouest, voire du nord. Ces deux derniers flux sont responsables des fortes pluies dans la région.

– La vallée de Conches est sensible à des influences du sud/sud-est, mais également, dans une moindre mesure, du nord, en raison de l'effet de barrage des Alpes bernoises. De ce point de vue, Reckingen est peut-être différent, car plus exposé aux débordements du nord.

– Les versants sud des Alpes bernoises sont plutôt exposés aux situations d'ouest, ainsi que du nord dans une moindre mesure. Il n'est pas sûr que les débordements du nord provoquent des pluies extrêmes.

Les propositions de division du bassin sont donc nombreuses et très différentes, bien qu'une distinction entre les influences du sud et de l'ouest constitue un aspect récurrent. Nous ne pouvons pas à ce stade proposer une division unique. Nous reviendrons sur cet aspect à la section 6.2.

1.3.2 Les précipitations orographiques

Les précipitations responsables des situations hydrologiques les plus critiques pour l'ensemble du bassin du Rhône sont de nature orographique (Grebner, 1995; Kunz et Rey, 1995). Les processus engendrant de telles précipitations sont complexes et font l'objet de nombreuses études. Roe (2005) présente une revue générale des processus de précipitations orographiques et des mécanismes conceptuels simplifiés responsables de la génération des pluies (voir Figure 1.5) :

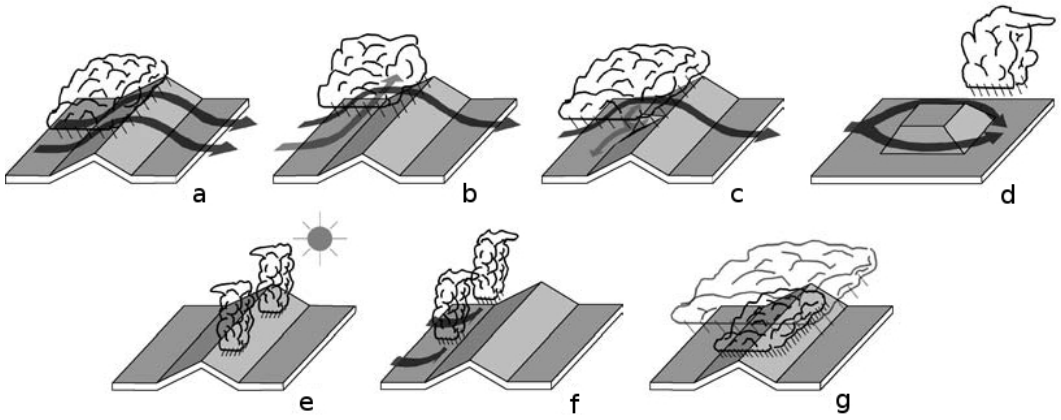


Figure 1.5 – Illustration de différents mécanismes de génération des précipitations orographiques : (a) Ascension stable de l'air, (b) blocage partiel de la masse d'air incidente, (c) écoulement de fond de vallée induit par le refroidissement lié à l'évaporation, (d) convergence sur le versant sous le vent, (e) convection thermique, (f) convection liée au forçage mécanique au-dessus du niveau de convection libre, et (g) mécanisme *seeder-feeder* (de Roe, 2005).

(a) Ascension stable de l'air : en montant sur la face au vent, l'air incident se refroidit, provoquant de la condensation, puis des précipitations. Celles-ci s'arrêtent lorsque l'air se réchauffe en redescendant de l'autre côté.

(b) Blocage partiel de la masse d'air incidente : lorsque la masse d'air est trop stable ou que le flux n'est pas assez fort, les basses couches ne parviennent pas forcément à passer par-dessus la barrière. Ces masses d'air sont alors détournées de l'obstacle, ou stagnent à son pied, ce qui peut créer une ascension de l'air plus à l'amont du flux. Nous parlons alors de situation de blocage.

L'écoulement peut être caractérisé par le nombre de Froude $Fr = U/(NH)$, où U est la vitesse moyenne du flux perpendiculairement à la chaîne de montagnes, N est la fréquence de Brunt-Väisälä * représentant la stabilité statique de l'air, et H est la hauteur

∗. fréquence des oscillations due à la poussée d'Archimède (EUMETCAL, 2012)

de la barrière orographique (Buzzi et al., 1998; Houze et al., 2001; Rotunno et Houze, 2007). Lorsque $Fr > 1$, le flux passe par-dessus l'obstacle, alors que lorsque $Fr < 1$, le flux contourne l'obstacle (Smith, 1979). Le nombre de Froude combine les influences de la vitesse du vent, de la stabilité de la masse d'air, et de la hauteur de l'obstacle. Il indique si le flux a suffisamment d'énergie cinétique pour s'élever au-dessus de la barrière orographique, et donc si le soulèvement orographique a lieu directement sur l'obstacle ou à l'amont du flux (Houze et al., 2001; Rotunno et Houze, 2007).

(c) Écoulement de fond de vallée induit par le refroidissement lié à l'évaporation : la fonte des cristaux de neige ou de glace et l'évaporation des précipitations refroidissent l'air et créent un flux sous-jacent, qui tend alors à redescendre les vallées. Les masses d'air incidentes doivent alors s'élever au-dessus de cet air bloqué.

(d) Convergence sur le versant sous le vent : les masses d'air contournant un obstacle peuvent converger sur le versant sous le vent, ce qui provoque un mouvement ascendant.

(e) Convection thermique : le réchauffement solaire sur les pentes des montagnes peut entraîner une convection provoquant des orages. La convection dans les Alpes est courante lorsque l'activité synoptique est faible, comme en été, où elle représente la plus grande source de précipitations (Binder et Schär, 1996). Cette convection est généralement provoquée par des circulations thermiques ou d'autres effets orographiques, ainsi que par des anomalies de haute altitude (Binder et Schär, 1996). Toutefois, comparé au reste de la Suisse, le bassin du Rhône est caractérisé de manière globale par une fréquence d'orages nettement inférieure (Aubert, 1991). Alors qu'ils sont rares dans la vallée du Rhône à l'amont de Sion, les orages sont plus fréquents dans le Chablais (Aubert, 1991).

(f) Convection liée au forçage mécanique au-dessus du niveau de convection libre : l'orographie peut également provoquer la convection par soulèvement des masses d'air au-dessus du niveau de convection libre. Cette ascension d'air instable augmente la condensation et peut accélérer les processus de formation de la pluie, laquelle peut alors être très intense localement.

(g) Mécanisme *seeder-feeder* : ce dernier mécanisme est un « ensemencement » de précipitations par un nuage haut dans l'atmosphère dans un nuage plus bas, ce qui crée une accumulation d'humidité dans ce dernier et une accélération de l'agrégation des particules d'eau, et donc un renforcement des précipitations. Le nuage supérieur est peu sensible à la topographie, alors que celui des niveaux inférieurs est de nature orographique. Ce phénomène existe également dans les nuages convectifs.

La localisation des précipitations (sur les versants au vent ou sous le vent) est encore un élément très difficile à prévoir et n'est actuellement pas entièrement compris. Ces phénomènes ont été le centre d'intérêt du projet MAP (*Mesoscale Alpine Project*, voir Binder et Schär, 1996), dont différentes observations et analyses ont été publiées (voir par exemple Bousquet et Smull, 2001, 2003; Houze et al., 2001; Medina et Houze, 2003; Rotunno et Houze, 2007; Steiner et al., 2003). Toutefois, la plupart des études effectuées se focalisent sur la répartition des précipitations dans la région du lac Majeur, et ne cherchent pas à expliquer

l'occurrence des débordements dans le bassin du Rhône. Brauchli (2009) a réalisé un travail de recherche sur cet aspect en analysant différents prédicteurs pouvant éventuellement expliquer les maxima des précipitations observées dans le bassin. Il a considéré l'eau précipitable, le flux de vapeur, et l'énergie potentielle de convection disponible (CAPE, *Convective Available Potential Energy*), mais n'a pas pu mettre en évidence un indicateur des fortes précipitations pour le bassin du Rhône. Lin et al. (2001) et Rotunno et Houze (2007) précisent également que l'énergie potentielle de convection disponible ne joue pas un rôle important dans les événements alpins.

Lin et al. (2001) ont synthétisé certains éléments communs des fortes précipitations orographiques observées en Europe, aux États-Unis et en Asie. Ils ont identifié les environnements méso-échelles et synoptiques suivants comme favorables au déclenchement de fortes précipitations orographiques (Lin et al., 2001) :

- un flux d'air potentiellement instable incident sur les montagnes ;
- un courant-jet de basse altitude (*low-level jet*) très humide ;
- la présence d'une chaîne de montagne escarpée pour aider à libérer l'instabilité potentielle † ;
- un système synoptique quasi-stationnaire ralentissant ou bloquant le système convectif au-dessus de la zone touchée.

Tous ces « ingrédients » ne doivent pas forcément être présents, mais la contribution de combinaisons de ceux-ci dans une mesure significative est nécessaire pour générer des précipitations orographiques importantes (Lin et al., 2001).

1.3.3 Situations avec fortes précipitations dans les Alpes

De fortes précipitations dans les Alpes peuvent être générées par différentes situations météorologiques (Grazzini, 2007) : interaction de la chaîne alpine avec des talwegs en haute atmosphère, dépression sur la Méditerranée (Buzzi et al., 2003), intensification de fronts froids de l'Atlantique, convection par soulèvement orographique de masses d'air instables. Toutefois, en préalable à des conditions favorables de méso-échelle, une configuration spéciale de la circulation à l'échelle globale est nécessaire pour produire des événements extrêmes de précipitations durant plusieurs jours – les événements pluviométriques récents les plus graves dans le bassin du Rhône ont duré au moins 3 jours (Attinger et Fallot, 2003; Grazzini, 2007) – sur une large région (Buzzi et al., 1998). Selon Martius et al. (2006), « *l'emplacement précis des maxima de précipitations est sensible à des dynamiques méso-échelles et des caractéristiques locales du terrain, alors que la structure et l'intensité de l'air incident sont, dans une large mesure, établies par les caractéristiques du flux à une échelle plus globale* ».

Les conditions météorologiques favorisant de fortes précipitations sont caractérisées entre autres par un apport d'humidité conséquent dans la basse troposphère, une stratification

†. « *État d'une colonne ou d'une couche d'air non saturé qui devient instable si elle est soulevée en masse jusqu'à saturation complète et si son gradient vertical est alors plus grand que le gradient vertical de l'adiabatique saturée* » (EUMETCAL, 2012)

verticale favorable pour de la convection, ainsi que des éléments provoquant et maintenant cette convection (Massacand et al., 1998).

De manière globale, les situations cycloniques d'ouest sont responsables du plus grand nombre d'épisodes très pluvieux, excepté dans la région du sud-est du bassin, où un talweg sur l'Europe occidentale provoquant un afflux d'air humide de sud-ouest à sud-est génère les situations les plus critiques (Attinger et Fallot, 2003). Finalement, les situations de nord-ouest à nord se trouvent en troisième position.

1.3.3.1 Situations de barrage du sud

Les remontées d'air du sud sont les situations météorologiques les plus critiques pour la partie sud-est du bassin du Rhône, particulièrement au printemps et en automne (Glenser, 1995d; Frei et Schär, 1998). Une telle situation peut engendrer de forts événements pluviométriques sur le sud des Alpes par soulèvement orographique (Massacand et al., 1998). La situation synoptique est très similaire dans la majeure partie des événements de forts cumuls de précipitations sur les pentes sud des Alpes (Fehlmann et Quadri, 2000). Bien que des phénomènes locaux complexes tels qu'un renforcement topographique, de la convection, ou la répartition spatiale du flux d'humidité aient une influence sur les cumuls précipités, la circulation atmosphérique à échelle globale est très importante pour produire les conditions nécessaires à de tels événements (Grazzini, 2007). Parfois, d'importantes quantités de précipitations peuvent aussi atteindre le bassin du Rhône, mais le plus souvent, les forts cumuls sont observés au sud du bassin.

L'analyse de certains événements de forts cumuls de précipitations sur les versants sud des Alpes a mis en évidence la présence d'un précurseur en haute atmosphère dans la répartition spatiale des tourbillons potentiels[‡] (Massacand et al., 1998, 2001; Buzzi et al., 1998). Lors du projet MAP (*Mesoscale Alpine Project*, voir Binder et Schär, 1996), de tels phénomènes ont été observés (Bougeault et al., 2001). Ces événements peuvent être caractérisés par de profondes (∼4 km) intrusions d'air stratosphérique (air à forte valeur de tourbillons potentiels) d'une forme méridiennement allongée (∼2000 sur 500 km) s'étendant des îles Britanniques à la partie ouest de la Méditerranée (Danielsen et al., 1987; Massacand et al., 1998). Martius et al. (2006) ont établi une forte corrélation entre cette anomalie de tourbillons potentiels et les précipitations extrêmes sur les versants sud des Alpes (les intrusions d'air stratosphériques étant présentes pour 73 % des jours à précipitations extrêmes (quantile 99 %), 71 % des jours à précipitations supérieures au quantile 95 %, et 69 % pour le quantile 90 %). Lors de simulations à l'aide d'un modèle numérique, il a été observé que la structure fine du filament peut largement influencer l'emplacement et l'intensité des précipitations prévues (Fehlmann et al., 2000).

‡. « *Tourbillon que présenterait une colonne d'air comprise entre deux surfaces isentropes adjacentes si elle était portée à une latitude arbitraire, puis étendue ou réduite à une épaisseur arbitraire. Le tourbillon potentiel est conservatif et permet d'identifier la masse d'air et de suivre son déplacement.* » (EUMETCAL, 2012)

Ces anomalies de tourbillons potentiels se déplacent depuis l'ouest et révèlent donc la présence de caractéristiques dynamiques et thermodynamiques distantes responsables de la formation d'un tel système (Fehlmann et Quadri, 2000; Massacand et al., 2001).

La circulation atmosphérique à 500 hPa est conjointement caractérisée par un profond talweg étendu de l'Islande à la Méditerranée (Plaut et al., 2001). Ce talweg est accompagné d'une dorsale à l'ouest assurant l'advection d'air et d'une autre à l'est qui contribue à bloquer la perturbation (Plaut et al., 2001). Les conséquences de ce système sont (Massacand et al., 1998) :

- un courant du sud chargé en humidité dans les basses couches qui s'étend de la Méditerranée aux Alpes ;
- une réduction de la stabilité statique ;
- un renforcement possible de la convection.

Grazzini (2007) a calculé une structure de référence et son anomalie associée pour les six événements les plus intenses sur les bassins du Pô et du Rhône en moyennant le géopotentiel à 500 hPa (Figure 1.6). Ces champs moyens révèlent le talweg méridiennement allongé et de forts gradients de pression sur sa face est.

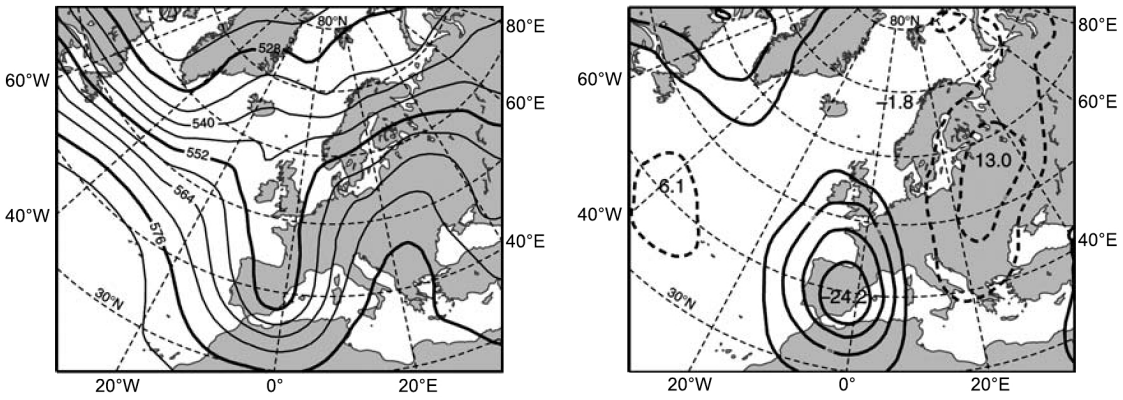


Figure 1.6 – (gauche) Composite du géopotentiel à 500 hPa à 12 h (pour les événements du 01.12.2003, 15.11.2002, 03.05.2002, 14.10.2000, 05.11.1994, et 23.09.1993) et (droite) anomalies moyennes par rapport au climat saisonnier. La hauteur du géopotentiel est donnée en décamètres (tiré de Grazzini, 2007).

Ces talwegs peuvent résulter d'une amplification d'ondes de Rossby (Grazzini, 2007; Martius et al., 2008), et sont donc générés par un système évolutif avec une origine lointaine. Les paquets d'ondes à des altitudes élevées (250 hPa) proviennent du sud-ouest des États-Unis pour les cas de printemps, et de la région du Pacifique ouest pour les cas d'automne et d'hiver (avec une propagation plus rapide), et peuvent être identifiés approximativement une semaine à l'avance (Grazzini, 2007; Martius et al., 2008). La mise en place de ces forts courants du sud est plus prédictible que leur disparition (Grazzini, 2007). Ceci peut être dû aux modélisations satisfaisantes du forçage dynamique associé à la propagation des ondes de Rossby (Grazzini, 2007), tandis que leur dissipation, résultant de phénomènes complexes et de processus locaux, est plus difficile à modéliser.

Plaut et al. (2001) ont travaillé sur un regroupement (*clustering*) de structures de la circulation globale pour de nombreux jours à fortes précipitations ($\geq$50 mm/j) pour différentes sous-régions. Deux des trois groupements obtenus sont composés d'anomalies sur le niveau 700 hPa révélant l'emplacement des talwegs autour desquels les masses d'air s'écoulent.

De forts courants du sud semblent donc nécessaires pour générer des événements de précipitations extrêmes sur les versants sud des Alpes, mais d'autres facteurs doivent également être considérés, puisque l'occurrence de telles circulations est plus élevée que celle des précipitations extrêmes (Martius et al., 2006; Grazzini, 2007). Ce type de structure de tourbillons potentiels est fréquent au-dessus de l'Europe de l'Ouest, et de fortes précipitations ne sont pas toujours observées (Martius et al., 2006). Medina et Houze (2003) illustrent deux situations dont les flux à 500 et 850 hPa étaient très similaires, mais dont les basses couches (<1 km) sont montées par-dessus l'obstacle dans un cas et sont restées bloquées dans l'autre, engendrant une spatialisation et une intensité très différentes des précipitations (voir section 1.3.2 pour la description des situations de blocage).

Buzzi et al. (1998) et Buzzi et Foschini (2000) ont mis en évidence l'existence d'un jet de basse altitude (*low-level jet*) chaud et humide jouant un rôle dans les cumuls précipités (voir également Doswell III et al., 1998). Ce jet (lié à la présence de l'anomalie de tourbillons potentiels, voir Fehlmann et al., 2000) est renforcé par le talweg et amène de l'air conditionnellement instable depuis la mer Méditerranée jusque dans le milieu alpin (Lin et al., 2001). Rotunno et Houze (2007) et Schneidereit et Schär (2000) montrent que le flux humide des basses couches peut s'avérer important pour son apport d'humidité, mais aussi pour son rôle dans l'écoulement orographique. La présence du courant-jet de bas niveau se soulevant rapidement par-dessus la barrière orographique peut amener de l'humidité des basses couches à des altitudes plus élevées, ce qui crée un renforcement des précipitations.

Houze et al. (2001) ont observé, à l'aide de mesures radar, que les précipitations sont les plus intenses lorsque le flux à une altitude d'environ 2 km est de sud ou sud-est, perpendiculairement à la barrière alpine. Lorsque nous sommes en situation non bloquée ($Fr > 1$), la couche d'air, depuis la surface jusqu'à une altitude d'environ 2 km, est entraînée par-dessus les reliefs, ce qui augmente significativement les précipitations sur les premiers versants au vent. Cette couche inférieure très humide est alors responsable du déclenchement de cellules convectives, dont les précipitations viennent s'ajouter aux pluies stratiformes (Houze et al., 2001). Dans une modélisation simplifiée des processus de précipitations liées à une situation de barrage du sud, Schneidereit et Schär (2000) mettent en évidence qu'une grande partie des cumuls peut être d'origine convective, due au forçage des masses d'air au-dessus de la limite de la convection libre.

Schneidereit et Schär (2000) identifient également que la position du jet de bas niveau a une influence sur la localisation des précipitations, ainsi que la forme en arc du massif alpin. Rotunno et Ferretti (2001) précisent encore que l'écoulement des masses d'air de basses couches dépend de l'humidité présente dans l'air, mais également du gradient horizontal de celle-ci. Ce gradient peut provoquer une convergence des masses d'air entre la partie bloquée et celle s'élevant au-dessus de la chaîne de montagnes.

Lorsque nous sommes en situation de blocage ($Fr < 1$, voir section 1.3.2), la masse d'air des niveaux inférieurs tourne de manière cyclonique à l'approche des Alpes afin d'éviter l'obstacle, ce qui renforce des précipitations à environ 140 km, ou plus, à l'amont des Alpes (dans le sens du flux), sans augmenter les cumuls précipités sur les versants des Alpes. La condition du blocage est principalement dépendante de la vitesse du flux et de la stabilité de la masse d'air (Houze et al., 2001; Medina et Houze, 2003). Durant le projet MAP, des vents d'une vitesse supérieure à 8 m/s ont généré les plus fortes précipitations sur les versants au vent.

Turato et al. (2004) relèvent que des événements de fortes précipitations sur les versants sud des Alpes peuvent également avoir lieu sans la présence d'une dépression dans la région méditerranéenne. De plus, la situation synoptique peut être très semblable à d'autres cas où seules de faibles précipitations ont été observées. Ils suggèrent que le flux d'humidité provenant de régions plus éloignées constitue un élément de différence entre ces situations (voir section 7.2.2 pour davantage de détails).

Les courants du sud provoquent de plus importantes précipitations en automne qu'au printemps, ce qui peut être dû à une moins grande stabilité des masses d'air avec davantage de convection (Glenser, 1995d; Attinger et Fallot, 2003). La Méditerranée, ayant une surface chaude en automne, est une source de chaleur et d'humidité et fournit donc un environnement favorable à la convection (Grazzini, 2007). Doswell III et al. (1998) et Martius et al. (2006) expliquent également cette différence par des températures d'eau de surface plus élevées en automne sur l'Atlantique et sur la Méditerranée, augmentant la capacité à humidifier les basses couches de l'atmosphère (voir également Reale et al., 2001; Turato et al., 2004).

1.3.3.2 Autres situations synoptiques

Les situations de vent d'ouest présentent des événements pluviométriques plutôt déterminés par la force et par la direction (horizontale) du vent (Glenser, 1995b). Cette circulation est la plus fréquente pour le nord des Alpes, et peut amener un temps perturbé et pluvieux sur une grande partie du bassin versant.

Les situations de vent du nord, caractérisées par un courant-jet de haute altitude en provenance du nord / nord-ouest, peuvent engendrer des précipitations sur les versants nord des Alpes bernoises (Glenser, 1995c). Ces événements peuvent déborder dans une certaine mesure dans le bassin du Rhône, mais ne constituent généralement pas une situation critique pour le bassin.

Le régime de vent d'est, qui suit en général celui du nord, est le moins fréquent de tous, bien qu'il soit caractérisé par les secteurs du nord-est au sud-est, c'est-à-dire une ouverture de 135° sur la rose des vents (Glenser, 1995a). En fonction de la direction du flux, des précipitations peuvent être observées sur les versants sud des Alpes et sur les crêtes des Alpes valaisannes, ou sur les versants nord des Alpes bernoises.

1.4 Objectifs et structure du travail

1.4.1 Objectifs de la thèse

L'objectif de notre contribution au projet MINERVE est donc de fournir une prévision des précipitations de nature statistique permettant d'enrichir les analyses des situations météorologiques à l'aide de prévisions indépendantes en termes de données de la circulation atmosphérique de base et de méthode de prévision des pluies. Cette information est donc destinée aux opérateurs du projet, et doit leur fournir des indications supplémentaires pour l'interprétation de la réalisation ou non de potentiels événements pluviométriques extrêmes. De plus, l'approche considérée, à savoir la méthode des analogues, est réputée pour permettre une prévision à moyen terme (environ une semaine) relativement fiable (Bontron, 2004). Elle permettrait donc une mise en vigilance plusieurs jours avant un événement intense.

Des analyses préliminaires des paramètres de la méthode des analogues sont nécessaires pour une bonne compréhension de leur sensibilité et de leur cohérence spatiale. Ces analyses serviront ensuite de repères lors de la calibration des méthodes de référence, ainsi que dans la recherche d'améliorations de celles-ci. Les méthodes de référence sont les paramétrisations de la méthode des analogues qui sont proposées par d'autres études et thèses, et qui sont implémentées en opérationnel dans différents centres de prévision.

La méthode des analogues doit donc être adaptée à la région d'étude de MINERVE. La première étape est l'agrégation des stations disponibles en groupements pluviométriques. Ces groupements doivent être représentatifs de régions homogènes du point de vue de leur pluviométrie, et devraient donc présenter une certaine cohérence de la paramétrisation de la méthode des analogues. Puis, pour chacun de ceux-ci, nous devons calibrer les méthodes de référence existantes, et comparer leurs performances. Les précipitations constituent le prédictand de la méthode, c'est-à-dire la variable que nous désirons prévoir.

Un logiciel doit aussi être développé pour effectuer les prévisions opérationnelles. Celui-ci doit donc être en mesure de procéder aux prévisions de manière autonome, en téléchargeant les données nécessaires et en calculant les pluies analogues pour les différents groupements et les différentes méthodes implémentées. Nous devons ensuite pouvoir visualiser ces prévisions sur une carte ainsi que sur des graphiques temporels, permettant au prévisionniste d'accéder au niveau de détail désiré.

Puisque nous travaillons sur une nouvelle région, différente de celles ayant servi aux choix des prédicteurs (les variables synoptiques sur lesquelles se base la prévision) des méthodes de référence, nous allons réévaluer chaque variable météorologique des jeux de données à disposition. Cette analyse nous permettra d'identifier quels types de variables sont les plus informatives pour notre milieu alpin en premier, en deuxième puis en troisième niveau d'analogie, et de proposer de nouvelles paramétrisations de la méthode des analogues. En plus des prédicteurs synoptiques classiques, la température des mers et océans sera testée afin de déterminer si cette information détient une capacité prévisionnelle.

Différentes améliorations de la méthode des analogues seront ensuite proposées, telles que l'introduction d'une fenêtre temporelle glissante permettant d'identifier des analogues

à différents moments des journées candidates plutôt que sur une fenêtre fixe comme c'est le cas actuellement. Nous tenterons également d'améliorer la prévision de l'occurrence des précipitations en la séparant de la prévision des cumuls. Puis nous évaluerons une prévision infrajournalière avec un pas de temps de 6 h.

L'approche de calibration classique de la méthode des analogues est sujette à certains choix subjectifs et utilise une démarche d'optimisation séquentielle des paramètres comprenant de nombreuses comparaisons manuelles (choix des niveaux atmosphériques et des fenêtres temporelles de comparaison des prédicteurs). Nous avons donc ressenti la nécessité d'une approche d'optimisation globale qui ne repose pas sur des choix arbitraires a priori, mais qui permette d'obtenir une paramétrisation objective représentant l'optimum global de l'ensemble des paramètres évalués conjointement. Différentes approches doivent être testées avant d'être en mesure de faire des recommandations, puis celles-ci seront appliquées à notre méthode afin d'en déterminer la meilleure paramétrisation.

1.4.2 Structure du document

Le présent document est donc constitué des 12 chapitres listés ci-dessous et organisés en 3 grandes parties. La première partie rassemble les chapitres 1 à 6 et concerne la prise en main de la méthode d'analogie dans son état le plus avancé et disponible au début du projet, son adaptation aux données et contexte du Rhône à l'amont du Léman ainsi que sa mise en œuvre opérationnelle, et la création des outils permettant son exploitation pour le projet MINERVE. Cette partie comporte évidemment des développements et des recherches exploratoires nécessaires à tout transfert de méthodologie vers un nouveau contexte. Elle est néanmoins marquée par un certain cadrage contractuel vers les besoins et objectifs du système MINERVE.

La seconde partie rassemble les chapitres 7 à 10 et décrit les recherches exploratoires et les développements testés pour améliorer la méthode en utilisant de nouvelles données et de nouvelles techniques algorithmiques. Dans cette partie, nous avons pu explorer un certain nombre de voies d'amélioration suggérées par la première partie. Sans prétendre être exhaustif, nous en présentons les plus prometteuses en évitant de nous attarder sur certaines impasses rencontrées.

La dernière partie est constituée des chapitres 11 et 12 et présente les conclusions de la phase opérationnelle puis du travail global.

Partie I - Prise en main de la méthode et adaptation à la zone d'étude

1. **Introduction**
2. **La prévision météorologique des précipitations**

   Nous commençons par rappeler quelques concepts de la prévision météorologique et de ses échelles spatiotemporelles. Les outils les plus couramment utilisés sont les modèles numériques de prévision. Toutefois, ceux-ci sont entachés d'une incertitude importante, d'autant plus quand il s'agit de prévoir un événement pluviométrique extrême. C'est

ainsi que différentes approches complémentaires de nature statistique ont été développées, telles que l'adaptation statistique qui permet une prévision probabiliste quantitative des précipitations. C'est dans ce cadre que s'inscrit la méthode des analogues que nous utilisons.

Nous décrivons également les scores habituellement utilisés pour l'évaluation des prévisions de nature déterministe ou probabiliste.

3. **État de l'art de la prévision des précipitations par analogie**

   Le principe de la méthode des analogues est présenté, ainsi que l'historique des développements ayant abouti à la version correspondant à l'état de l'art. Les pistes décevantes sont également données dans un but de justification de la non-exploration de certaines idées récurrentes et a priori intéressantes.

   Cinq méthodes de référence de complexité croissante sont présentées. Celles-ci sont constituées de différents niveaux d'analogie intégrant diverses variables météorologiques explicatives pour les précipitations. Ensuite, la méthode classique de calibration est explicitée.

4. **Données**

   Nous donnons une description du réseau pluviométrique de MétéoSuisse, dont les données utilisées sont issues. Nous présentons également la démarche adoptée pour la reconstitution des séries temporelles partielles, ainsi que les transformations des précipitations habituellement effectuées avant leur emploi dans la méthode des analogues. Le choix d'une période de validation est détaillé.

   Ensuite, toutes les variables synoptiques que nous utiliserons en tant que prédicteurs sont présentées, de même qu'un catalogue de classifications en types de temps regroupant toutes les méthodologies européennes.

5. **Analyses paramétriques de la méthode des analogues**

   Avant de chercher à améliorer la méthode des analogues, nous procédons à diverses analyses dans le but de bien caractériser sa sensibilité à ses différents paramètres, ou à différentes opérations sur les séries de précipitations.

   Nous testons en premier lieu quelques modifications de la méthode classique de calibration que nous utiliserons par la suite. Puis nous évaluons l'effet de l'établissement de groupements pluviométriques, justifiant ainsi le passage d'une analogie à la station à une analogie calculée à l'échelle d'une sous-région.

   Nous analysons ensuite la cohérence spatiale des paramètres établis pour chaque station, l'effet de la transformation des précipitations habituellement effectuée dans le cadre de la méthode des analogues, l'évolution temporelle de la carte de pertinence, et finalement la sensibilité des paramètres de l'analogie de circulation et de celle sur les humidités.

6. **Implémentation en prévision opérationnelle**

   L'implémentation en prévision opérationnelle est notre principal « livrable » du projet MINERVE. Elle implique en premier lieu la définition des groupements pluviométriques

utilisés pour la calibration. Puis, pour chacun de ceux-ci, nous calibrons les méthodes de référence avant de les comparer et d'identifier les plus intéressantes.

Suit une présentation du logiciel développé, Atmoswing, de son outil de prévision automatique, et de celui de visualisation des résultats. L'approche modulaire utilisée y est détaillée. Celle-ci permet de structurer la méthode des analogues sans devoir toucher au code.

Partie II - Suggestions d'améliorations et optimisation globale

7. **Exploration de prédicteurs à l'échelle synoptique**

   Nous avons reconsidéré une grande partie des variables du jeu de données des réanalyses habituellement utilisé pour en identifier les plus pertinentes pour notre région. Notre approche diffère des précédents travaux, car la fenêtre spatiale y est systématiquement optimisée, et un nombre plus important de variables et de niveaux atmosphériques y sont évalués.

   La température des mers et océans est également évaluée en tant que prédicteur de la méthode des analogues, celle-ci ayant un impact connu sur l'humidité et sur la stabilité des masses d'air.

   Pour finir, des analyses parallèles sont effectuées sur les variables de circulation des réanalyses. Des trajectoires inverses et des roses des vents permettent d'identifier des circulations typiques liées à des précipitations extrêmes en différents emplacements du bassin.

8. **Propositions d'améliorations de la méthode**

   Notre objectif consiste d'abord à améliorer certains ingrédients de la méthode des analogues ; nous présentons ici quelques résultats. Une fenêtre temporelle glissante est évaluée ; pour une cible donnée (0-24 h), cette dernière permet d'identifier des analogues commençant à différents moments des journées candidates plutôt qu'à une heure fixe comme cela est le cas actuellement. Nous évaluons ensuite une prévision infrajournalière, avec un pas de temps de 6 h. Puis nous cherchons à améliorer la prévision de l'occurrence des précipitations.

   Les résultats de l'exploration des variables du jeu de données des réanalyses sont exploités dans le but d'améliorer l'analogie de circulation de même que l'analogie d'humidité. Nous en proposons deux nouvelles méthodes.

9. **Évaluation de méthodes d'optimisation**

   Notre objectif consiste ici à améliorer la méthode de façon plus globale. Pour cela, nous évaluons deux techniques d'optimisation pour la calibration automatique de la méthode des analogues. Ces techniques doivent fournir des paramètres objectifs et optimaux lorsque nous les considérons conjointement, ce qui n'est pas le cas de la calibration classique. Une méthode d'optimisation permet également de s'affranchir des comparaisons (choix des niveaux atmosphériques et des fenêtres temporelles) jusqu'alors effectuées manuellement.

Des recommandations d'utilisation d'une optimisation à l'aide d'algorithmes génétiques sont données afin de permettre leur utilisation dans un autre contexte.

10. **Optimisation automatique des paramètres de la méthode**

    Les outils d'optimisation automatique présentés au chapitre précédent sont ici appliqués à la méthode des analogues sur la période de calibration complète et pour tous les groupements pluviométriques. Plusieurs paramétrisations sont considérées successivement, par complexité croissante.

    Nous pouvons ainsi principalement retravailler l'analogie de circulation en y ajoutant des degrés de liberté supplémentaires que nous ne pourrions calibrer que difficilement autrement.

    L'analogie d'humidité est encore brièvement réévaluée.

Partie III - Bilan de la prévision opérationnelle et conclusions

11. **Retour d'expérience de la prévision opérationnelle**

    Deux méthodes de référence ont été exploitées en prévision opérationnelle pendant quelques mois. Nous revenons ici sur les performances générales de ces méthodes, qui s'avèrent satisfaisantes, ainsi que sur leur pertinence pour la prévision d'événements spécifiques. Ces événements sont décrits de manière détaillée, tant concernant les situations synoptiques responsables des cumuls observés, que les prévisions des différents instituts météorologiques. Nous présentons également l'évolution des prévisions par analogie avec l'échéance, telles que nous en disposions en opérationnel.

    Cet exercice de la prévision opérationnelle nous a permis de nous plonger dans les conditions réelles des opérateurs de la méthode, avec parfois les difficultés de l'interprétation des résultats. Toutefois, en raison de la courte période de test, nos conclusions ne peuvent être que préliminaires.

12. **Conclusions et perspectives**

Chapitre 2

La prévision météorologique des précipitations

Nous commençons par rappeler quelques concepts de la prévision météorologique et de ses échelles spatiotemporelles. Les outils les plus couramment utilisés sont les modèles numériques de prévision. Toutefois, ceux-ci sont entachés d'une incertitude importante, d'autant plus quand il s'agit de prévoir un événement pluviométrique extrême. C'est ainsi que différentes approches complémentaires de nature statistique ont été développées, telles que l'adaptation statistique qui permet une prévision probabiliste quantitative des précipitations. C'est dans ce cadre que s'inscrit la méthode des analogues que nous utilisons.

Nous décrivons également les scores habituellement utilisés pour l'évaluation des prévisions de nature déterministe ou probabiliste.

2.1 Introduction du chapitre

Ce chapitre introduit en premier lieu quelques concepts de la prévision météorologique. Nous allons y présenter les outils standards de la prévision ainsi que la problématique des événements extrêmes. Puis nous situerons la méthode des analogues dans le contexte de la descente d'échelle des précipitations, plus particulièrement dans les méthodes d'adaptation statistique. Enfin, nous présenterons les différents scores utilisés pour qualifier une prévision.

2.2 Quelques concepts de la prévision météorologique

La prévision météorologique est une science en constante évolution qui cherche à extrapoler l'état de l'atmosphère pour une échéance choisie et à en estimer les conséquences locales en termes de temps sensible *. Cette tâche est généralement effectuée par des modèles complexes fonctionnant sur de puissants ordinateurs conjointement au travail des météorologues qui utilisent leur expertise pour analyser et interpréter la situation et les simulations proposées. Cette démarche, qui consiste à utiliser le passé observé pour mieux anticiper l'avenir, se rapproche des statistiques empiriques. Des approches statistiques plus structurées, moins sensibles à la subjectivité et à l'expérience propre à chaque prévisionniste, existent également, et sont utilisées en opérationnel afin d'enrichir les analyses de la situation météorologique. C'est dans cette dernière démarche que s'inscrit notre travail.

2.2.1 Les échelles de la prévision

La prévision météorologique s'intéresse aux phénomènes allant des plus globaux, tels que la dynamique de l'atmosphère à l'échelle du globe, aux plus locaux, tels que l'évolution d'une cellule orageuse. Toutefois, aujourd'hui encore, un modèle numérique de prévision (MNP, ou NWP en anglais) ne peut pas intégrer toutes les échelles, et il est donc habituellement optimisé pour l'une d'entre elles. Ces échelles spatiales sont étroitement liées à l'échelle temporelle (Orlanski, 1975), les phénomènes locaux étant généralement de courte durée, et les processus globaux se développant sur plusieurs jours, voire plusieurs mois.

Les événements extrêmes locaux tels que des tornades ou de la grêle ne durent que quelques heures au maximum, et leur emplacement exact ainsi que leur intensité sont difficilement prévisibles plusieurs jours à l'avance bien que les conditions favorables peuvent être prévues. Ces types d'événements font donc l'objet de prévisions à très court terme (*nowcasting*) qui s'appuient sur des mesures ou observations de phénomènes en cours. Les phénomènes régionaux, tels que des précipitations intenses sur une chaîne de montagnes ou de forts vents, peuvent souvent être prévus plusieurs jours à l'avance par les modèles numériques et font l'objet de prévisions à court ou moyen terme. Enfin, la prévision mensuelle ou

∗. Le temps sensible désigne, « *en un lieu déterminé de la surface terrestre et à un moment donné (ou sur un intervalle de temps donné, y compris une fraction de journée), l'ensemble des éléments significatifs de l'état de l'atmosphère, tels que peut les ressentir un observateur situé en ce lieu.* » (Glossaire de Météo France)

saisonnière ou encore le suivi des changements climatiques sont l'apanage des sciences du climat. Différentes catégories d'échéances de prévision, adaptées au phénomène météorologique étudié, sont habituellement considérées (Golding, 2000; Bontron, 2004) :

- la prévision à très court terme ou immédiate (*nowcasting*) : 0 - 6 heures ;
- la prévision à court terme (*short range forecasting*) : 6/12 - 48/72 heures ;
- la prévision à moyen terme (*medium range forecasting*) : 2/3 - 10/15 jours ;
- la prévision à long terme (*long range forecasting*) : au-delà de 15 jours ;
- la prévision climatique : au-delà de 20 ans.

Nous nous intéressons à la prévision quantitative des précipitations à un pas de temps journalier ou plus fin, ce qui concerne les trois premières échéances. Seules celles-ci sont décrites par la suite.

2.2.1.1 La prévision à très court terme ou immédiate

La prévision à très court terme ou immédiate (*nowcasting*) se focalise sur les situations des heures à venir, à l'échelle locale. Cette approche s'appuie essentiellement sur les observations permettant d'anticiper l'évolution d'un phénomène en cours.

Les déplacements et l'intensité des cellules orageuses ou de la grêle sont habituellement suivis à l'aide de radars de précipitations au sol (voir p.ex. Hering et al., 2004, 2005, 2006, pour une application opérationnelle à MétéoSuisse) ou par les systèmes de détection de l'activité électrique (voir p.ex. Tapia et al., 1998). Les impulsions radar émises donnent en retour une information sur la distribution spatiale des hydrométéores (leur nombre et leur taille) et donc sur l'intensité des précipitations. Le diamètre des gouttes de pluie ou des grêlons peut être estimé sur la base du facteur de réflectivité ou de l'atténuation du signal. Il existe toutefois plusieurs problèmes de caractérisation des précipitations sur la base des données radar :

- les gouttes sont détectées sur une large gamme d'altitudes et l'intensité calculée peut donc ne pas correspondre à la pluie observée au sol, à cause de la dérive engendrée par le vent ou de l'évaporation des gouttes lors de leur chute (Shuttleworth, 2012) ;
- dans les régions montagneuses, les massifs créent des masques dans les faisceaux radar (Germann et al., 2006).

Toutefois, divers algorithmes et méthodes de correction existent pour rendre les données radar utilisables pour la prévision à très court terme. L'objectif de cette prévision est d'estimer les déplacements et l'évolution des champs de précipitations (Austin et Bellon, 1974). Alors que ces données étaient initialement exploitées par extrapolation des cellules observées (voir p.ex. Dixon et Wiener, 1993), de nouvelles approches plus sophistiquées apparaissent intégrant des modèles numériques de prévision initialisés avec les images radar (Wilson et al., 1998), ou se basant sur des méthodes de prévision probabilistes (Germann et Zawadzki, 2004; Panziera et al., 2011), mais en restant toujours dans la gamme temporelle de quelques heures (Germann et Zawadzki, 2002).

2.2.1.2 La prévision à moyen terme

La prévision actuelle du temps sensible à moyen terme est principalement basée sur les modèles numériques de prévision, lesquels sont globaux en cela qu'ils représentent l'ensemble du globe. Ces modèles intègrent des procédures d'assimilation de données (*data assimilation*) pour ajuster les conditions initiales de la simulation aux conditions observées de l'atmosphère (Daley, 1993; Kalnay, 2003). Différentes données sont donc assimilées par les modèles météorologiques opérationnels, telles que des mesures de température, de pression, d'humidité et du vent, acquises par les réseaux de stations météorologiques ou les radiosondages (Malardel, 2005), ainsi que des images de satellites météorologiques (Bauer et al., 2007). L'assimilation peut intégrer la dimension du temps par interpolation spatio-temporelle entre les observations et l'état du modèle de manière à conserver un réalisme dans la dynamique et la physique du modèle (Andersson et Thépaut, 2008). La prise en compte de ces informations sur le contenu en eau initial de l'atmosphère a permis de réduire la phase de mise en régime des modèles (*spin-up*) par rapport à une initialisation plus basique. Rappelons aussi que ces modèles, étant donné l'échéance visée (2/3 - 10/15 jours), sont obligatoirement globaux. Leur résolution spatiale, horizontale, mais aussi verticale, est donc limitée pour des raisons de ressources informatiques, d'où une médiocre représentation des reliefs.

L'observation de systèmes précipitants de grande ampleur peut également apporter de l'information utile à la prévision à moyen terme. Ce type de phénomènes est couramment suivi par les outils de la télédétection, permettant des observations (de l'humidité, nébulosité, etc.) de manière plus globale. Les champs de précipitations peuvent être dérivés d'images satellitaires dans le domaine visible et infrarouge (Griffith et al., 1978; Vicente et al., 1998), ou être mesurés par des radars embarqués tels que sur les satellites TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*, Iguchi et al., 2000; Kawanishi et al., 2000).

2.2.1.3 La prévision à court terme

La prévision à court terme n'est pas simplement la considération des premières échéances de la prévision à moyen terme du modèle global au-delà de la phase d'initialisation. En effet, une plus grande précision est souhaitée, surtout en zones de relief, ce qui suppose de mieux les représenter. Cela conduit en général à développer sur chaque grande région d'intérêt un modèle régional à aire limitée (*Limited Area Model*) avec une résolution horizontale et verticale plus fine, qui décrit à la fois beaucoup mieux le relief et la couverture du sol, mais aussi certains processus comme la convection.

Un modèle à aire limitée doit être lui aussi initialisé puis alimenté à sa périphérie par le modèle global, de résolution plus faible. Il existe donc un risque que, à l'intérieur du domaine régional, le modèle global et le modèle à aire limitée proposent des évolutions différentes. Les modèles à aire limitée ne sont donc pas exempts de problèmes (voir p.ex. Warner et al., 1997).

2.2.2 Les incertitudes de la prévision

La prévision numérique tente de simuler les processus de l'atmosphère réelle afin de prévoir le temps sensible à venir. Cependant, les processus simulés sont de différentes natures. Il est reconnu que la modélisation de la dynamique de l'atmosphère (mécanique du mouvement des masses d'air) est plus fiable que celle des processus thermodynamiques et microphysiques (p.ex. la génération des précipitations) (Obled et al., 2002). Ces derniers ont lieu à une échelle sous-maille et ne peuvent donc pas être directement estimés par le modèle. Ils sont ainsi intégrés de manière moyenne par une technique appelée « paramétrisation », ce qui a des impacts sur la qualité des prévisions des variables du temps sensible. La paramétrisation concerne par exemple la radiation, les précipitations locales, la convection, la couverture nuageuse, la diffusion verticale due à la turbulence et les processus du sol (Steppeler et al., 2003).

Lorsque le système ne prévoit qu'un scénario, on parle de prévision déterministe. Les prévisions ont été pendant longtemps émises sous une forme déterministe sans aucune incertitude affichée (Krzysztofowicz, 2001). Une valeur unique des variables du temps sensible simulé était transmise aux utilisateurs sans quantifier une erreur possible. Malheureusement, la justesse des prévisions déterministes est faible pour la prévision des précipitations intenses (Atger, 2001; Richardson, 2003), ce qui peut avoir un effet important dans la simulation de la réponse hydrologique d'un bassin versant (Zappa et al., 2011).

En raison des incertitudes liées aux modèles numériques (conditions initiales, paramétrisation, etc, voir Kalnay, 2003) et à la non-linéarité des systèmes atmosphériques (Lorenz, 1969), une incertitude de prévision est toujours présente et croît avec l'échéance. L'approche déterministe ne permet donc pas d'estimer le risque d'une décision prise sur la base d'une telle prévision. Pour être en mesure de quantifier les risques liés à des décisions dans lesquelles la réalisation d'un scénario météorologique a des conséquences, il est nécessaire de disposer d'une information sur l'incertitude liée à la prévision (Krzysztofowicz, 1998, 1999).

L'évolution du système atmosphérique est fortement non-linéaire, donc très sensible aux conditions initiales, ce qui en fait un système chaotique (Lorenz, 1963, 1993). À cause de cette instabilité, des prévisions basées sur des conditions initiales légèrement différentes pourront rapidement diverger, et ceci quelle que soit la saison (Lorenz, 1969). Cet état initial ne pouvant être connu précisément, il demeurera toujours une part d'incertitude dans les prévisions météorologiques.

Les météorologues ont depuis longtemps conscience que l'initialisation de leur modèle présentait des faiblesses, ne serait-ce qu'à cause de la densité des réseaux de surface et d'altitude. Les techniques d'interpolation optimale (Gandin, 1965) fournissent, outre un champ initial estimé, la variance en tous points de ces estimations. Une première idée a donc été de bruiter ces champs initiaux dans la gamme de leur incertitude et de voir en quoi cela changeait les simulations prévues selon leur échéance (voir p.ex. Molteni et al., 1996). Une perturbation de la paramétrisation (Buizza et al., 2003) ou une combinaison des résultats de modèles multiples (Leutbecher et Palmer, 2008) ont été ultérieurement introduites. Ainsi, les simulations peuvent différer sensiblement (voire devenir extrêmes pour certaines), notamment pour les échéances éloignées (au-delà de 3 jours). Cette approche, aujourd'hui très populaire, s'ap-

pelle la prévision d'ensemble (EPS, *Ensemble Prediction System*, voir Leutbecher et Palmer, 2008). En Suisse, le modèle COSMO-LEPS (Limited Area Ensemble Prediction System, voir Montani et al., 2003; Marsigli et al., 2005) fournit des prévisions d'ensemble en opérationnel. Les prévisions d'ensemble se sont donc largement répandues (Siccardi et al., 2005; Fortin et al., 2006; Zappa et al., 2008; Thielen et al., 2009), et sont encore aujourd'hui l'objet de nombreuses études (voir p.ex. Schaake et al., 2007).

Pour des raisons de temps de calcul, les modèles simulent les scénarios des ensembles avec une résolution réduite (Mullen et Buizza, 2002). Nous appelons « trace » une simulation perturbée, et « contrôle » une simulation non perturbée, mais avec la même résolution que les traces.

Un premier aspect positif de la prévision d'ensemble est qu'elle affiche (sans prendre en compte totalement) l'effet de l'incertitude sur les conditions initiales. Un second aspect est qu'elle propose un nombre conséquent de traces possibles pour l'évolution des variables. Cela permet, pour une échéance donnée, de proposer par exemple une cinquantaine de valeurs, et donc une distribution statistique empirique, ce qui est une plus-value lorsqu'une décision doit être prise dans un contexte donné (Palmer et al., 2006). L'intérêt est de pouvoir quantifier le risque et d'estimer la pertinence d'une mesure dont le coût est connu. Un aspect limitatif est que cette prise en compte de l'incertitude mène souvent à une sous-dispersion entre les traces proposées (Hamill et Colucci, 1998; Raftery et al., 2005).

Les performances des EPS et des modèles déterministes ne peuvent pas être directement comparées, et l'intérêt n'est pas de les mettre en compétition, mais de combiner leurs informations pour améliorer la prévision et son interprétation (Rodwell, 2006). Différents systèmes de prévision d'ensemble peuvent également être combinés afin de rendre la distribution plus dispersive et meilleure en termes d'évaluation de l'incertitude (Park et al., 2008; Weigel et al., 2008).

La prévision du géopotentiel à 500 hPa (variable souvent utilisée pour évaluer les performances d'un modèle) par les modèles globaux s'est considérablement améliorée ces dernières décennies. Ainsi, une prévision pour une échéance à 7 jours en 2001 était en moyenne aussi bonne que celle à 5 jours en 1980 (Simmons et Hollingsworth, 2002), et s'est encore significativement améliorée depuis (Rodwell, 2006). Toutefois, la prévision quantitative des précipitations – surtout pour les événements de fortes précipitations – par les modèles à aire limitée n'est pas encore satisfaisante, bien qu'elle se soit également améliorée (Fritsch et al., 1998; Lalaurette et van der Grijn, 2003). Rodwell (2006) avance que les précipitations sont actuellement l'une des variables les plus difficiles à prévoir, alors même que c'est une information d'importance particulière pour les utilisateurs. En ce qui concerne le milieu alpin, Binder et Schär (1996) affirment que « *bien qu'il existe une certaine connaissance des situations préférentielles à l'échelle synoptique pour les fortes précipitations dans la région alpine, peu est actuellement connu sur les mécanismes précis qui mènent au déclenchement, à l'organisation, à la localisation, à la concentration et au maintien sur plusieurs heures de ce type de systèmes précipitants* ». Lin et al. (2001) soulignent également la difficulté de la prévision quantitative des fortes précipitations d'origine orographique. Plaut et al. (2001)

affirment également que « *les modèles opérationnels actuellement disponibles fournissent des prévisions plus précises de la circulation des masses d'air que des précipitations, particulièrement dans les régions montagneuses* ».

La prévision du temps est reconnue par les météorologues eux-mêmes comme étant très incertaine à cause de la limite de la prévisibilité : « *Même si l'on disposait d'un modèle quasi parfait en connaissant quasi parfaitement l'état initial, on resterait confronté à des erreurs de prévisions parfois très importantes.* » (Joly, 2008). Ces erreurs concernent toutes les échéances et toutes les échelles (Joly, 2008). Les météorologues ne considèrent donc pas tels quels les résultats de leurs modèles pour un événement pluviométrique important. L'interprétation est le quotidien du météorologue, lequel introduit dans le processus un jugement subjectif, non déterministe.

2.2.3 La prévision des événements extrêmes

La prédictibilité de l'atmosphère et les erreurs des modèles dépendent fortement de la situation météorologique, et ne sont donc pas forcément semblables pour des situations courantes et pour des cas extrêmes. Grazzini (2007) a démontré que les flux à l'échelle globale responsables d'événements pluviométriques majeurs dans la région des Alpes avaient plutôt une meilleure capacité prévisionnelle que la moyenne des autres situations. Cette affirmation n'implique pas que les précipitations elles-mêmes soient également plus prévisibles par les modèles numériques (Fehlmann et Quadri, 2000; Grazzini, 2007).

Buzzi et al. (1998) montrent en effet que la prévision quantitative des précipitations peut être sensible à toute une gamme de processus physiques agissant à de fines échelles spatio-temporelles. Les phénomènes de méso-échelle et les processus liés à l'orographie peuvent encore considérablement limiter la prédictibilité des événements extrêmes (Montani et al., 2003; Marsigli et al., 2005), ainsi qu'une représentation insuffisante de l'orographie dans les modèles numériques (Buzzi et al., 2003).

2.3 La descente d'échelle (downscaling)

En raison de la paramétrisation et de la taille de la maille des modèles globaux, il n'est pas possible d'utiliser directement leurs résultats pour une prévision des précipitations à l'échelle locale. Il est donc nécessaire de passer de l'échelle globale à une échelle plus locale, laquelle sera pour nous celle de la réponse naturelle des bassins versants alpins. Ce passage est effectué par des méthodes de descente d'échelle (Deidda, 1999) utilisées en prévision du temps, mais également pour la génération de séries temporelles plus ou moins perturbées pour l'étude des changements climatiques (Hewitson et Crane, 1996; Bárdossy, 2000).

La descente d'échelle peut être définie comme la création d'une relation entre la circulation générale et les variables du temps sensible (Wetterhall, 2005). Il existe principalement deux types de descente d'échelle : les méthodes dynamiques (par des modèles à aire limitée) et les méthodes statistiques (à base empirique) (Bárdossy, 2000).

L'approche dynamique, basée sur la modélisation numérique sur un domaine restreint, est la plus courante dans les services de prévision météorologique. Les modèles à aire limitée ont une résolution beaucoup plus fine que les modèles globaux et permettent donc de mieux représenter la topographie et les phénomènes locaux, ce qui les rend également très exigeants en ressources informatiques (Hewitson et Crane, 1996).

2.3.1 La descente d'échelle statistique

L'hypothèse de base de la descente d'échelle statistique est qu'il existe des relations entre les processus atmosphériques synoptiques et les séries hydrométéorologiques régionales (Wilby et al., 1998). L'objectif des approches statistiques consiste à expliciter une relation empirique entre des variables ayant une capacité prédictive (les prédicteurs) et les variables météorologiques locales d'intérêt (les prédictands). Pour pouvoir appliquer avec succès une méthode de descente d'échelle statistique, les critères suivants doivent être remplis (Hewitson et Crane, 1996; Wilby et al., 1998) :

- Une relation dominante entre prédictands et prédicteurs doit exister.
- Cette relation doit subsister en dehors de la période sur laquelle elle a été établie.
- Les prédicteurs doivent être reproduits de manière adéquate par les modèles globaux. Puisque les prévisions résultant de la partie dynamique de ces modèles sont reconnues comme pertinentes (Obled et al., 2002), les relations établies sur cette partie seront donc robustes. De plus, les modèles globaux évoluent constamment et chaque amélioration rend également la descente d'échelle plus pertinente.
- La relation établie entre prédicteurs et prédictands reste valable en cas de réchauffement climatique (Huth et Kyselý, 2000; Bárdossy, 2000). Nous reviendrons sur cet aspect à la fin de ce travail (section 12.2).

Les méthodes statistiques simples font elles-mêmes l'extrapolation temporelle. La prévision des échéances suivantes est alors réalisée sur la base des observations les plus récentes. De nombreux phénomènes ne peuvent être connus à un horizon de l'ordre de 15 jours que de manière statistique (Joly, 2008). S'il est vrai que ces approches restent d'actualité pour les prévisions saisonnières, ces dernières s'avèrent moins fiables pour les prévisions à court et à moyen terme, domaine pour lequel elles ont tendance à être abandonnées (Bontron, 2004).

Les approches déterministes et statistiques ont toutes deux leurs points forts et leurs points faibles. Combiner ces méthodes semble prometteur, car cela permet d'exploiter les bonnes capacités prédictives des phénomènes dynamiques, offertes par les modèles numériques, et les interprétations des effets locaux, par les approches statistiques (Glahn et Lowry, 1972; Obled et al., 2002; Bontron, 2004; Hamill et al., 2004). Une méthode possible est l'adaptation statistique. Celle-ci lie statistiquement les sorties des modèles dynamiques et les conséquences météorologiques locales. Ceci permet de contourner les difficultés de la modélisation physique des précipitations et autres variables locales en utilisant les informations présentes dans les séries météorologiques locales observées.

À la différence des méthodes statistiques n'utilisant que les observations, celles de l'adaptation statistique utilisent, en tant que prédicteur, des sorties de modèles numériques. La projection dans le temps est donc effectuée par le modèle numérique et suit ainsi les lois de l'atmosphère, ce qui constitue un avantage sur les méthodes statistiques classiques (Guilbaud, 1997).

Les méthodes d'adaptation mettent ces prédicteurs en relation avec les observations locales du temps sensible. Ces dernières représentent l'historique des effets locaux des événements passés, et contiennent donc intrinsèquement différentes influences locales ayant agi sur le temps observé, telles que l'effet de l'orographie du lieu sur les cumuls précipités. La relation statistique entre prédicteurs et prédictands représente un passage d'anomalies de la circulation synoptique à des anomalies du temps local (Zorita et von Storch, 1999).

Les principaux avantages d'une descente d'échelle statistique sont les suivants (Solman et Nuñez, 1999; Wetterhall, 2005) :

- Un simple ordinateur personnel est suffisamment puissant pour calculer la prévision.
- Elle est facile à mettre en œuvre (pour autant que des prévisions numériques soient disponibles).
- Les processus physiques n'ont pas besoin d'être connus en détail.
- La calibration à un niveau local est intégrée dans la procédure.
- Le nombre de paramètres nécessaires est relativement faible.

Le principal désavantage est qu'il est nécessaire de disposer de longues séries temporelles de prédictands et de prédicteurs pour en établir la relation statistique. Bien que beaucoup soient hybrides, nous pouvons distinguer trois grands groupes de méthodes de descente d'échelle (Bárdossy, 2000; Xu, 1999) :

- les méthodes de ré-échantillonnage,
- les méthodes de régression et
- les approches de classification.

2.3.1.1 Les méthodes de ré-échantillonnage

Les méthodes de ré-échantillonnage, dont la méthode des analogues fait partie, identifient un échantillon d'états météorologiques passés présentant des similarités avec les conditions actuelles (Bliefernicht, 2010).

La méthode des analogues est basée sur la recherche d'analogie entre situations synoptiques cibles et situations passées observées. Le temps sensible, associé aux situations passées les plus similaires, est alors utilisé en tant que prévision. Il s'agit d'une approche de type « plus proches voisins », qui présente une plus grande souplesse (adaptation dynamique) qu'une prévision basée p.ex. sur des types de temps prédéfinis (adaptation statique), et donne généralement de meilleures performances (Bontron, 2004).

2.3.1.2 Les méthodes de régression

Les méthodes de régression sont les plus courantes pour l'étude du climat comme pour les prévisions opérationnelles (voir p.ex. Antolik, 2000). Elles impliquent d'établir des relations linéaires ou non linéaires entre les prédictands et les prédicteurs (Wilby et Wigley, 1997). Le nombre de prédicteurs dans l'équation doit être optimisé, car s'il est trop élevé, les résultats seront plus difficiles à interpréter et l'équation commencera à reproduire des relations aléatoires qui ne seront pas présentes dans d'autres échantillons (Glahn et Lowry, 1972).

Des méthodes couramment utilisées dans les études climatiques sont les réseaux de neurones, les corrélations canoniques et les méthodes fractales (voir p.ex. Deidda, 1999; Olsson et al., 2001; Wetterhall, 2005). Les techniques multifractales s'appliquent principalement aux champs de précipitations prévus par les modèles globaux, et sont capables de transférer l'information des précipitations au niveau local, tout en préservant correctement les propriétés statistiques de la pluie observée (Deidda, 1999). Ces méthodes permettent de générer des pluies synthétiques présentant des propriétés statistiques proches des précipitations observées, et sont surtout utilisées pour des études climatiques.

2.3.1.3 Les approches de classification

L'approche de classification la plus courante est la reconnaissance de « patrons » météorologiques de types de temps (*weather patterns*). Cette approche utilise un schéma de classification du temps synoptique, subjectif ou objectif, pour prévoir les prédictands à la station (voir p.ex. Paegle, 1974; Paegle et Wright, 1975; Davis et Walker, 1992; Wetterhall, 2005). Les méthodes de classification objectives comprennent les composantes principales, la corrélation canonique, les règles floues, le *compositing*, les réseaux de neurones, les patrons basés sur la corrélation, les techniques de reconnaissance de formes, le regroupement et les procédures analogues (voir p.ex. Paegle et Kierulff, 1974; Stehlík et Bárdossy, 2002; Wetterhall, 2005). Les méthodes subjectives sont moins nombreuses. Dans cette dernière catégorie, nous pouvons citer la classification de Perret (1987), qui est une classification de Hess et Brezowsky (1977) modifiée, anciennement utilisée par MétéoSuisse. Elle contient 9 régimes et 31 situations types.

Lorsque la classification est établie, les variables locales sont associées aux types de temps sur la base des distributions des observations. Ces classifications peuvent également être utilisées pour améliorer les prévisions d'autres méthodes en les adaptant au régime d'intérêt (Paegle et Kierulff, 1974). La méthode est simple et permet également de conserver une compréhension humaine des prévisions du fait de leur signification physique. Cependant, elle ne fonctionne pas bien pour des situations météorologiques très complexes.

De plus, si une situation météorologique peut être adéquatement caractérisée à un instant donné, notre variable cible est souvent un cumul de précipitations – sur 24 h par exemple – correspondant à différentes situations qui se succèdent, parfois très différentes entre le début et la fin de la période de cumul. Par ailleurs, ce passage d'un type de temps à un autre est même parfois responsable des précipitations observées.

2.4 Évaluation des prévisions

Il est important d'évaluer les prévisions dans l'absolu non seulement pour évaluer le gain à attendre, mais également de manière relative pour comparer différentes approches et choisir la plus performante. Il existe différents scores de vérification (ou d'utilité) d'une prévision en fonction de la nature de la prévision et de son utilisation désirée. Cette section n'a pas pour objectif d'être exhaustive mais de présenter les quelques scores que nous allons utiliser.

2.4.1 La compétence d'une prévision

La plupart des scores de vérification ne nous renseignent pas directement et de manière absolue sur la qualité de notre prévision. Afin d'être en mesure d'en évaluer réellement la pertinence, nous devons la comparer à une valeur de référence. Ainsi, la qualité de la prévision peut être exprimée sous la forme d'un pourcentage d'amélioration par rapport à cette référence, que nous appelons la compétence (*skill score*) (Potts, 2003; Wilks, 2006).

La compétence est calculée de la manière suivante pour une prévision résultant en un score A :

$$Compétence = \frac{A - A_{ref}}{A_{parf} - A_{ref}} \tag{2.1}$$

où A_{ref} est la valeur du score pour une prévision de référence, et A_{parf} la valeur du score pour une prévision parfaite. Ainsi, lorsque notre prévision est parfaite, la compétence est égale à 100 %, lorsqu'elle est égale à la référence, la compétence vaut 0 %, et lorsqu'elle est moins bonne, la compétence devient négative.

On dénombre principalement trois types de références (Potts, 2003) : une prévision aléatoire, la persistance, ou la climatologie (ou distribution climatologique). La climatologie, soit la distribution des précipitations de l'ensemble des jours de l'archive, s'est avérée meilleure que les autres références (Guilbaud et Obled, 1998). Celle-ci est souvent considérée comme la référence pour la recherche d'une expression probabiliste de la prévision, le but des méthodes de prévision étant de produire un résultat plus informatif (Joly, 2008).

2.4.2 Le gain de performance

Comme l'a fait Ben Daoud (2010), nous utiliserons la notion de gain pour évaluer des améliorations apportées à la méthode. Le gain est simplement la compétence du nouveau modèle (M1) par rapport à un modèle de référence (M0) plutôt que la climatologie :

$$Gain = \frac{A_{M1} - A_{M0}}{A_{parf} - A_{M0}} \tag{2.2}$$

2.4.3 Prévisions déterministes discrètes

Les prévisions déterministes ne considérant aucune incertitude, une valeur unique est prévue pour une variable à une échéance donnée. Le premier groupe de ce type de prévisions se base sur des valeurs discrètes, également appelées catégories. Nous ne considérerons ici que deux valeurs, soit p. ex. oui/non. Ces scores sont utilisés, par exemple, pour évaluer une prévision déterministe de dépassement de seuil.

Table 2.1 – Tableau de contingence d'une prévision discrète à deux classes (Mason, 2003). Les lettres a-d sont les nombres d'occurrences des réalisations de chaque cas.

		Observé	
		Oui	Non
Prévu	Oui	a	b
	Non	c	d

Une prévision sur deux catégories est souvent résumée par un tableau de contingence (Table 2.1, voir Mason, 2003). Celui-ci est un tableau croisé contenant la somme des événements prévus et non prévus, observés et non observés (Wilks, 2006). La taille de l'échantillon est $n = a + b + c + d$. Sur la base de ce tableau, plusieurs scores peuvent être calculés. Les plus courants sont donnés ci-dessous. Il existe différents noms possibles pour ces scores, et une certaine confusion règne dans la littérature. Afin d'éviter tout malentendu, nous considérons la nomenclature définie par Wilks (2006) comme référence (voir également Jolliffe et Stephenson, 2003).

2.4.3.1 Proportion de prévisions correctes (PC)

La proportion de prévisions correctes (*Proportion correct*, Finley, 1884) quantifie les prévisions correspondant effectivement aux observations. C'est donc simplement la fraction des prévisions correctes sur la taille n de l'échantillon :

$$PC = \frac{a + d}{n} \tag{2.3}$$

L'occurrence et la non-occurrence ont donc le même poids, ce qui n'est pas forcément souhaitable lorsque l'événement est rare. De même, les erreurs de fausses alertes et les événements non prévus sont pénalisés de manière égale (Wilks, 2006). La plus mauvaise valeur est 0 % et la meilleure 100 %.

2.4.3.2 Score de menace (TS)

Le score de menace (*Threat Score*, Gilbert, 1884), ou indice de succès critique (*Critical Success Index*), est plus adapté aux situations où l'occurrence de l'événement est moins fréquente que sa non-occurrence. Il est donné par :

$$TS = \frac{a}{a+b+c} \tag{2.4}$$

Il représente donc le nombre de prévisions d'occurrence correctes divisé par le nombre total de cas où l'événement était prévu ou/et a été observé. Il ne tient pas compte des prévisions correctes de non-occurrence, qui peuvent avoir un effectif très important (dans la situation où l'événement est rare). La plus mauvaise valeur est 0 % et la meilleure 100 %.

2.4.3.3 Biais (B)

Le biais (*Bias*) est une comparaison de la prévision moyenne avec les observations moyennes des occurrences :

$$B = \frac{a+b}{a+c} \tag{2.5}$$

Une répartition non biaisée aura un score $B = 1$. Si les prévisions de l'événement sont plus nombreuses que les observations, le biais sera supérieur à 1, et il sera inférieur à 1 dans le cas contraire. Il ne quantifie donc pas la qualité de la prévision, mais plutôt sa cohérence climatologique (Bontron, 2004).

2.4.3.4 Ratio de fausses alertes (FAR)

Le ratio de fausses alertes (*False Alarm Ratio*) est le taux d'événements prévus mais n'ayant pas été observés :

$$FAR = \frac{b}{a+b} \tag{2.6}$$

Une valeur minimale de FAR est souhaitable. La plus mauvaise valeur est 100 % et la meilleure 0 %.

2.4.3.5 Indice de Réussite (H)

L'indice de réussite (*Hit Rate*) ou probabilité de détection (*Probabiliy of Detection*) est le ratio des prévisions d'occurrence correctes sur le nombre total d'observations de l'événement :

$$H = \frac{a}{a+c} \tag{2.7}$$

Une valeur maximale de H est souhaitable. La plus mauvaise valeur est 0 % et la meilleure 100 %. Ce score ignore les fausses alertes.

2.4.3.6 Taux de fausses alertes (F)

Le taux de fausses alertes (*False Alarm Rate*), ou probabilité de fausse détection (POFD), à distinguer du ratio de fausses alertes, est le ratio du nombre de fausses alarmes sur le nombre total de non-occurrences :

$$F = \frac{b}{b+d} \tag{2.8}$$

Plus F est petit, meilleure est la prévision (meilleur : 0 %, moins bon : 100 %).

2.4.3.7 Score de Heidke (HSS)

Le score de Heidke (*Heidke Skill Score*, Heidke, 1926) est un score de compétence ayant pour référence le hasard (voir Wilks, 2006, pour les détails). Il est basé sur la proportion de prévisions correctes (Eq. 2.3).

$$HSS = \frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)} \tag{2.9}$$

Une prévision parfaite est égale à 100 %, une prévision de la même pertinence que le hasard à 0 %, et une prévision inférieure aura une compétence négative.

2.4.3.8 Score de Peirce (PSS)

Le score de Peirce (*Peirce Skill Score*, Peirce, 1884), ou score de *Hanssen-Kuipers*, ou encore *True Skill Statistic*, est formulé de manière similaire au score de Heidke, à la différence que la valeur de référence, représentant également le hasard, respecte la climatologie de l'échantillon.

$$PSS = \frac{ad-bc}{(a+c)(b+d)} \tag{2.10}$$

La prévision parfaite reçoit un score de 100 %, une prévision aléatoire de 0 % et une prévision inférieure, un score négatif. Une différence avec le score de Heidke est qu'il donne plus de poids à la catégorie la moins représentée dans l'échantillon.

2.4.3.9 Score de Gilbert (GSS)

Le score de Gilbert (*Gilbert Skill Score*, Gilbert, 1884), ou score de menace équitable (*Equitable Threat Score*), est basé sur le score de menace (TS), mais dépend du nombre de non-occurrences correctement prévues :

$$GSS = \frac{a-a_{ref}}{a-a_{ref}+b+c} \tag{2.11}$$

où $a_{ref} = (a+b)(a+c)/n$ est la référence aléatoire.

2.4.4 Prévisions déterministes continues

Les prévisions déterministes continues fournissent une série de valeurs non discrètes dont il faut évaluer la pertinence avec des notions de distance. Un exemple d'application est la prévision déterministe des précipitations d'une région.

2.4.4.1 Erreur absolue moyenne (MAE)

L'erreur absolue moyenne (*Mean Absolute Error*) est une moyenne arithmétique des différences absolues entre les valeurs prévues et les valeurs observées :

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}|y_k - o_k| \tag{2.12}$$

où y_k est la k-ième prévision et o_k l'observation correspondante. Le MAE est nul lorsque la prévision est parfaite. Ce score est souvent utilisé pour évaluer les prévisions de température (Wilks, 2006).

2.4.4.2 Erreur quadratique moyenne (RMSE)

L'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Squared Error*) est, tout comme l'erreur absolue moyenne, largement utilisée. Cette fonction élève la différence au carré, puis considère la racine du résultat global :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(y_k - o_k)^2} \tag{2.13}$$

Du fait que les différences entre prévision (y_k) et observation (o_k) soient élevées au carré, ce score est plus sensible aux grandes erreurs que le MAE. Tout comme ce dernier, une prévision parfaite résulte en un score nul.

2.4.5 Prévisions probabilistes discrètes

Dans le cas de prévisions probabilistes discrètes, nous travaillons avec des probabilités d'occurrence ou des probabilités d'appartenir à une certaine catégorie. Ces scores sont par exemple utilisés pour évaluer une prévision de probabilité de pluie, que nous comparons à l'occurrence des pluies observées.

2.4.5.1 Le score de Brier (BS) et sa compétence (BSS)

Le score de Brier (*Brier Score*, Brier, 1950; Toth et al., 2003) est la mesure la plus commune pour les prévisions probabilistes d'événements dichotomiques.

Le score mesure la distance quadratique moyenne entre la probabilité de l'événement et son occurrence (Wilks, 2006) :

$$BS = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(y_k - o_k)^2 \tag{2.14}$$

où $y_k \in [0, 1]$ est par exemple la probabilité de pluie et $o_k = 1$ ou 0 selon s'il y a pluie ou non. Ce score est analogue au score de l'erreur quadratique moyenne sans la racine carrée. Une prévision parfaite aura un score de 0, alors que des erreurs de prévision font croître le score jusqu'à une valeur maximale de 1.

Tout comme les autres scores, le score de Brier peut s'exprimer sous la forme d'une compétence par rapport à une référence (Wilks, 2006) :

$$BSS = \frac{BS - BS_{ref}}{BS_{parf} - BS_{ref}} = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} \tag{2.15}$$

où BS_{ref} est le score de référence, $BS_{parf} = 0$ est le score parfait. Ce score est souvent utilisé pour évaluer la probabilité de précipitations.

2.4.5.2 Le diagramme ROC

Le diagramme ROC (*Relative Operating Characteristic* ou *Receiver Operating Characteristic*, Mason, 1982) offre une visualisation graphique de la valeur d'une prévision pour un événement dichotomique. Il permet d'intégrer tous les seuils de probabilité que nous pourrions utiliser pour transformer la prévision probabiliste en prévision déterministe.

Les probabilités sont donc discrétisées en un certain nombre de seuils. Les prévisions déterministes résultantes pour chacun de ces seuils sont évaluées en termes d'indice de réussite H (Eq. 2.7) et de taux de fausses alertes F (Eq. 2.8). Alors que nous augmentons le seuil de probabilité, H et F diminuent. Les paires de valeurs H et F calculées pour chacun de ces seuils sont alors placées dans un graphique et reliées par des segments de droite.

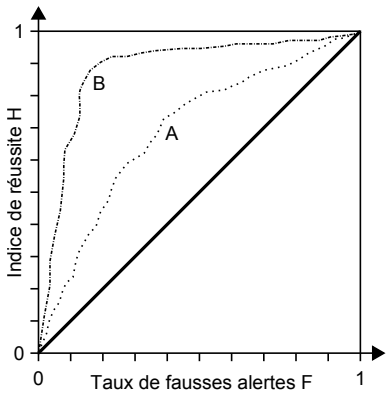


Figure 2.1 – Illustration d'un diagramme ROC. Dans cet exemple, les prévisions du modèle B donnent de meilleurs résultats que celles du modèle A.

Cette approche permet de facilement évaluer la capacité d'une prévision probabiliste à discriminer un événement dichotomique (Wilks, 2006). Une prévision aléatoire est représentée par la droite $H = F$, soit la diagonale. Plus la prévision est utile, plus elle tend vers le coin supérieur gauche du diagramme, soit $H = 1$ et $F = 0$.

Le calcul de l'aire sous la courbe ROC permet de résumer ce diagramme en une seule valeur, A_{ROC}. Lorsque la prévision est parfaite, $A_{ROC} = 1$, et quand elle est équivalente au hasard, $A_{ROC} = 0.5$. De manière similaire aux autres scores, ce score peut être exprimé en termes de compétence.

2.4.5.3 Indice de probabilité ordonnée (RPS)

Certaines méthodes discrétisent un champ de valeurs continues en K catégories pour évaluer la probabilité d'appartenance à chacune de ces catégories. On parle alors de prévision multicatégories, qui fonctionne, par exemple, sur des classes de précipitations. Il existe des scores adaptés à ce type de prévision qui introduisent une notion de distance entre les classes, ce qui est plus cohérent pour l'évaluation d'une prévision d'une variable de nature continue. En effet, la vérification pénalise les prévisions résultant en des écarts plus importants entre les catégories prévues et observées.

La méthode multicatégories la plus utilisée est l'indice de probabilité ordonnée (RPS, *Ranked Probability Score*, Epstein, 1969), qui est une extension du score de Brier (Eq. 2.14) et qui intègre une notion de distance par la considération des probabilités attribuées à chacune des K catégories par les prévisions (y) et les observations (o) (Wilks, 2006) :

$$RPS = \sum_{m=1}^{K} \left[\left(\sum_{j=1}^{m} y_j \right) - \left(\sum_{j=1}^{m} o_j \right) \right]^2 \tag{2.16}$$

Ce score est donc plus approprié que les précédents pour la vérification d'une prévision d'une variable de nature continue. Toutefois, il souffre du choix subjectif des catégories (du nombre K et de leurs bornes respectives) (Guilbaud, 1997). Le problème est de choisir des classes permettant de comparer par exemple les performances pour 2 stations n'ayant pas la même climatologie. On pourrait prendre pour référence des seuils exprimés en fonction de la pluie d'un temps de retour de 10 ans (P10) notamment, mais un problème se pose avec la première classe ne contenant que des valeurs nulles. En effet, la probabilité de pluies nulles est aussi une caractéristique de la région, indépendante de la P10. Il est donc difficile de trouver un découpage en classes qui soit normé de la même façon pour toutes les stations.

Pour parer à ce problème, une méthode de vérification récemment créée par Rodwell et al. (2010, 2011), et utilisée au Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT, ECMWF en anglais), est l'erreur équitable stable dans l'espace des probabilités (SEEPS, *Stable Equitable Error in Probability Space*). Appliquée aux précipitations, elle se base sur 3 catégories : (1) les jours secs ($\leqslant 0.2\ mm$ pour des données arrondies à 0.1 mm), (2) les précipitations « légères » et (3) les « fortes » précipitations. La limite entre ces deux dernières catégories est définie de façon à ce que les événements avec des précipitations « légères » soient deux fois plus nombreux dans la climatologie que les événements de « fortes » précipitations. Ces catégories dépendent donc de la climatologie de la station, ce qui permet à ce score d'être adapté au climat de la région (Rodwell et al., 2010). Ce score est basé sur l'espace des probabilités, dans le sens où il utilise les probabilités d'occurrence des catégories de précipitations et non leur valeur. Il est dit équitable car il pénalise fortement les prévisions constantes ou aléatoires, de manière à ce qu'une prévision contenant un peu de capacité prévisionnelle soit toujours supérieure.

2.4.6 Prévisions probabilistes continues

Les prévisions probabilistes continues d'une variable y sont émises sous la forme de la distribution statistique attendue pour cette variable et pour l'échéance considérée. Elles sont exprimées soit en fonction de répartition $F(y)$, soit en densité de probabilité $f(y)$, que nous devons alors comparer à une valeur observée. Nous évaluons par exemple une distribution de précipitations prévues par rapport au cumul mesuré. Nous devons donc comparer deux objets de nature différente, soit une prévision probabiliste et une réalisation déterministe (Bontron, 2004).

2.4.6.1 Indice continu de probabilité ordonnée (CRPS) et sa compétence (CRPSS)

Le CRPS (*Continuous Ranked Probability Score*, Brown, 1974; Matheson et Winkler, 1976; Hersbach, 2000) est une extension du score RPS (*Ranked Probability Score*, Eq. 2.16) au cas de prévisions probabilistes continues. Il permet d'évaluer la distribution prévue $F(y)$ par rapport à la valeur observée y_0. Pour une prévision, il s'écrit :

$$CRPS = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[F(y) - H(y - y_0)\right]^2 dy \tag{2.17}$$

où $H(y - y_0)$ est la fonction de Heaviside, qui est nulle quand $y - y_0 < 0$, et qui vaut 1 autrement. Plus la prévision est bonne, plus le score sera petit. À une prévision parfaite correspond un CRPS de 0. Bontron (2004) détaille la manière de parvenir à cette formulation, et précise dans quel contexte elle est optimale pour exprimer la performance.

Ce score est désormais communément utilisé pour l'évaluation de systèmes de prévision de variables continues (Casati et al., 2008; Marty, 2010). La Figure 2.2 illustre les surfaces intégrées lors du calcul du CRPS. Lorsque les cumuls prévus et précipités sont faibles, les courbes sont proches de l'origine, et les surfaces sont donc petites, alors que pour des valeurs fortes, les surfaces deviennent importantes.

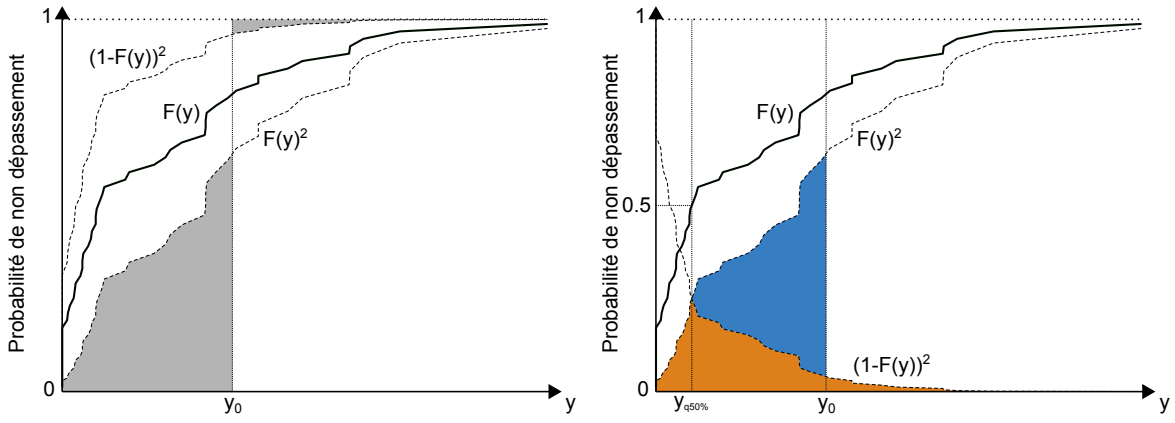


Figure 2.2 – Interprétation graphique (a) du CPRS avec inversion de la courbe $(1 - F(y))^2$ à des fins de représentation, et (b) de sa décomposition en justesse (bleu) et finesse (orange). Adapté de Marty (2010).

Le CRPS peut être décomposé en deux composantes (voir Figure 2.2), exprimant la « finesse » (*sharpness* ou *resolution*) et la « justesse » (*accuracy* ou *validity*) de la prévision (Bontron, 2004). La finesse mesure la dispersion de la prévision, indépendante des observations. La justesse correspond à la distance entre l'observation et la prévision, synthétisée ici par sa médiane ($y_{q50\%}$). La décomposition proposée par Bontron (2004), qui a l'avantage d'être facilement mise en œuvre par rapport à d'autres décompositions proposées dans la littérature, est la suivante :

$$Finesse = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[F(y) - H(y - y_{q50\%})\right]^2 dy \tag{2.18}$$

$$Justesse = \int_{y_0}^{y_{q50\%}} \left[1 - 2F(y)\right] dy \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned} CRPS &= Finesse + Justesse = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[F(y) - H(y - y_{q50\%})\right]^2 dy + \int_{y_0}^{y_{q50\%}} \left[1 - 2F(y)\right] dy \end{aligned} \tag{2.20}$$

Cette décomposition permet, quand on compare deux méthodes de prévision, de mesurer si l'on gagne grâce à une dispersion moindre ou une meilleure précision.

Pour comparer les gains entre différentes méthodes, on utilisera plutôt la compétence en se positionnant par rapport à une méthode de référence. La compétence en CRPS, le CRPSS (*Continuous Ranked Probability Skill Score*), est définie ainsi :

$$CRPSS = \frac{CRPS - CRPS_{ref}}{CRPS_{parf} - CRPS_{ref}} = 1 - \frac{CRPS}{CRPS_{ref}} \tag{2.21}$$

où $CRPS_{ref}$ est la valeur du CRPS pour la prévision de référence et $CRPS_{parf}$ celle pour une prévision parfaite, soit 0. Le score de compétence peut donc se simplifier à l'instar du BSS (Eq 2.15). Ce score de compétence, tout comme d'autres, est sensible aux événements extrêmes (Von Storch et Zwiers, 1999).

Chapitre 3

État de l'art de la prévision des précipitations par analogie

Le principe de la méthode des analogues est présenté, ainsi que l'historique des développements ayant abouti à la version correspondant à l'état de l'art. Les pistes décevantes sont également données dans un but de justification de la non-exploration de certaines idées récurrentes et a priori intéressantes.

Cinq méthodes de référence de complexité croissante sont présentées. Celles-ci sont constituées de différents niveaux d'analogie intégrant diverses variables météorologiques explicatives pour les précipitations. Ensuite, la méthode classique de calibration est explicitée.

3.1 Introduction du chapitre

Nous présentons ici le principe et l'historique de la méthode des analogues, et décrivons son implémentation actuelle. Les différentes paramétrisations proposées par d'autres auteurs sont détaillées, car elles constitueront des références dans la suite de ce travail. La dernière section détaille la technique de calibration classique de la méthode des analogues.

3.2 Développements de la méthode des analogues

3.2.1 Le principe de la méthode

La méthode part du principe que deux situations synoptiques similaires doivent engendrer des effets locaux similaires (Lorenz, 1956). L'analogie parfaite n'existe pas, mais des situations suffisamment analogues et conduisant à des effets semblables peuvent être identifiées. Ainsi, deux états de l'atmosphère qui se ressemblent seront appelés analogues (Lorenz, 1969). Mais pour être pertinente, cette analogie doit être sélectionnée en optimisant les aspects suivants :

- La **variable** d'analogie (le prédicteur) doit être choisie de manière à représenter une information synoptique ayant une relation avec la météorologie locale et la variable cible (ici les précipitations).

- La **fenêtre spatiale** est le domaine sur lequel la variable d'analogie est considérée. La taille idéale de ce domaine est celle qui maximise l'information utile.

- La **fenêtre temporelle** est l'heure de la journée à laquelle nous considérons la variable d'analogie. L'analogie recherchée peut être instantanée (p.ex. à 12 h UTC), ou au contraire moyenne sur une période (p.ex. 24 h).

- La **période** d'analogie est la période de l'année au sein de laquelle les situations analogues sont recherchées. Ainsi, nous comparons des situations pour lesquelles la distribution de l'énergie solaire pénétrant dans l'atmosphère est similaire (Lorenz, 1969). Il semble en effet peu probable que deux situations relativement similaires, à des périodes différentes, puissent évoluer de la même manière, car les champs du rayonnement solaire sont différents et donc les processus gouvernant les précipitations changent (Lorenz, 1969).

- Le **critère** d'analogie permet de comparer les variables sur les fenêtres spatiales et temporelles choisies. Il se présente sous la forme d'un score permettant de classer les situations passées en fonction de leur degré d'analogie (Bontron, 2004).

- Le **nombre d'analogues** idéal est le meilleur compromis entre une trop faible sélection dont seules les conditions locales feront diverger l'évolution de la situation météorologique, et une trop grande sélection entraînant une perte de l'analogie de la situation synoptique (Bontron, 2004).

À cause du chaos dynamique de l'atmosphère, deux situations analogues divergeront rapidement dans le temps (Lorenz, 1969). Ainsi, la méthode présente de fortes limitations en ce qui concerne l'extrapolation temporelle (Bontron, 2004). Les modèles numériques étant plus aptes à simuler l'évolution dynamique de l'atmosphère, l'extrapolation temporelle des variables synoptiques est laissée à ces derniers. Nous sommes donc bien ici dans un cadre d'adaptation statistique. L'analogie intervient alors pour relier la situation synoptique observée ou prévue à des variables du temps sensible (température, précipitations...), plus difficiles à simuler par les modèles numériques. En effet, ces dernières sont issues de la partie physique des modèles, moins robuste et nécessitant une résolution fine, tandis que les variables synoptiques sont issues de la partie dynamique (Obled et al., 2002). Ainsi, la « *qualité des prévisions des variables synoptiques se dégradant moins vite que celle des variables sensibles* » (Bontron, 2004), l'adaptation statistique peut présenter, pour les variables du temps sensible, des résultats supérieurs aux prévisions numériques pour certaines échéances. Les propriétés de la série temporelle du temps sensible, par exemple la période d'accumulation ou la technique de mesure ou d'interpolation, ont une influence dans l'application de la méthode.

La méthode des analogues est utilisée depuis de nombreuses années chez EDF (Électricité de France), afin d'établir des scénarios de précipitations et de température (Desaint et al., 2008). Elle est également opérationnelle à la Compagnie Nationale du Rhône (CNR, France) et au Service de Prévision des Crues (SPC) Alpes du Nord (France) (Marty, 2010).

3.2.2 Historique de la méthode

Lorenz (1969) a introduit la notion d'analogues et son concept de base. Il a défini que « *deux états de l'atmosphère se ressemblant mutuellement sont appelés analogues* », et que « *chacun des états d'une paire d'analogues peut être considéré comme égal à l'autre état additionné d'une petite erreur* ». Il a considéré la similitude sur le vent, la pression, la température, la vapeur d'eau, les nuages, ainsi que sur des facteurs environnementaux tels que la température de la surface de la mer ou la couverture de neige (Guilbaud, 1997). La plupart de ces données n'étant alors pas disponible, il a choisi de rechercher les analogues sur les champs de géopotentiel à 200, 500 et 850 hPa à l'aide d'une distance euclidienne corrigée et moyennée sur les 3 niveaux. De plus, les analogues devaient appartenir à la même période de l'année pour être comparables en termes de distribution de l'énergie solaire.

3.2.2.1 Début de la prévision opérationnelle

La mise en place d'une méthode appliquée pour la prévision des précipitations journalières trouve son origine dans les travaux de Duband (1970, 1974, 1981) au cours des années 70. Elle était alors destinée à la prévision opérationnelle chez EDF (Électricité de France) afin de mieux gérer les ressources en eau et les risques de crue. Le concept de base s'inspirait de la démarche d'un météorologue, qui, sur la base des situations prévues pour les jours à venir, utilise sa connaissance des événements passés semblables afin de quantifier les précipitations

possibles. La méthode des analogues automatise donc cette démarche pour exploiter au maximum les historiques des situations observées.

Le prédicteur utilisé initialement pour caractériser la situation atmosphérique était le géopotentiel à 700 hPa à 00 h car il est doté d'une stabilité plus importante que le champ de pression au sol et conserve par ailleurs une sensibilité à l'influence de perturbations (Guilbaud, 1997). Toutefois, le champ de pression au sol à 06 h était également utilisé pour la détermination de l'intensité des précipitations, ainsi que les températures à 700 hPa en tant que témoin de l'état thermique de la masse d'air (Duband, 1974). Les données étaient alors prises en 37 points de radiosondage (en Europe) et condensées par une analyse en composantes principales. Les 25 premières analogues sur le géopotentiel à 700 hPa étaient retenues, puis une équation de régression multiple locale entre les précipitations et les champs de pression au sol et de température à 700 hPa était calée sur ces analogues avant d'être appliquée à la situation courante (Guilbaud, 1997). Les archives étaient séparées par saison afin de considérer des analogues comparables en termes de distribution de l'énergie solaire (Lorenz, 1969). Ce découpage rigide en saisons a ensuite été transformé en une sélection mobile de plus ou moins 2 mois autour de la date cible.

La prévision était alors uniquement effectuée sur la base des observations et extrapolée temporellement aux deux jours suivants. Cette approche appartenait aux méthodes de prévisions statistiques simples et non à l'adaptation statistique, puisqu'aucun modèle numérique n'était utilisé et que l'extrapolation temporelle était du ressort de la relation statistique. Au bout de quelques années, l'extrapolation temporelle purement statistique a été abandonnée au profit d'une approche d'adaptation statistique par l'utilisation de prédicteurs résultant d'un modèle numérique global. L'échéance était alors de 4 jours.

Par la suite, la pression au sol a été remplacée par le géopotentiel à 1000 hPa à 00 h, et les analogues étaient sélectionnées sur la base du géopotentiel à 1000 et 700 hPa (Guilbaud, 1997). La sélection se faisait en deux temps : tout d'abord selon un critère de proximité, une distance euclidienne dans l'espace des composantes principales du champ de géopotentiel à 700 hPa, puis selon un critère de corrélation (sur les champs de géopotentiel à 700 et 1000 hPa, ainsi que sur l'épaisseur entre ces deux niveaux), afin d'éliminer les journées trop différentes. L'approche par régression pour la détermination des précipitations a finalement été abandonnée au profit de la prévision probabiliste (quantiles 20, 60 et 90 %), telle qu'elle est effectuée aujourd'hui, en interpolant linéairement sur la distribution empirique cumulée des précipitations journalières observées des analogues (Guilbaud, 1997; Guilbaud et Obled, 1998), ou en calant une loi théorique (loi Gamma).

3.2.2.2 Exploration de variables

Wilson et Yacowar (1980) ont recherché les 20 meilleures analogues (dans une archive d'une durée de 10 ans) sur les champs de géopotentiel à 500 et 1000 hPa à l'aide du critère S1 (Eq. 3.2). Woodcock (1980) a utilisé ce même critère sur le champ de pression au niveau de la mer pour sélectionner 50 analogues dans le but de prévoir la température journalière maximale. Yacowar (1975) a pour sa part considéré les 20 meilleures analogues de manière à

ce que la somme des corrélations sur les deux champs soit maximale (Guilbaud, 1997). Ces travaux ont démontré les meilleures performances des analogues par rapport aux méthodes de régression, ainsi que l'intérêt de considérer des analogues combinées sur les champs de géopotentiel à 500 et 1000 hPa.

Mandon (1985) a introduit un second niveau d'analogie en évaluant différentes variables, telles que le vent, l'humidité, la température de l'air, la température superficielle de la Méditerranée, le produit du vent et de l'humidité à 700 hPa, ainsi qu'un second critère barométrique différencié en fonction de la saison.

Vallée (1986) a continué à travailler sur ce critère de second niveau et s'est intéressé au vent à 700 hPa à 12 h. Il a défini la règle suivante, qui a permis d'améliorer la prévision des événements de fortes précipitations pour une région sensible aux flux de sud (Guilbaud, 1997) :

$$\begin{cases} P = 0.7P_{moy} & si\ V < 10\ m/s \\ P = 0.7P_{90} & si\ V > 10\ m/s \end{cases} \tag{3.1}$$

où P est la pluie prévue, P_{moy} est la pluie moyenne des analogues, P_{90} est le quantile 90 % de la distribution des analogues et V est la composante sud du vent.

3.2.2.3 Utilisation des variables prédicteurs brutes

Profitant d'outils informatiques plus performants, Guilbaud (1997) s'est affranchie des ACP pour travailler directement avec les données brutes sous forme de grilles (interpolées par Météo France), ce qui s'est avéré payant, surtout en considérant le score S1 de Teweles-Wobus (déjà utilisé pour la sélection d'analogues par Wilson et Yacowar, 1980 et Woodcock, 1980) plutôt que la distance euclidienne. Ce score donne de l'importance à la similitude de forme des réseaux d'isohypses, et donc à la circulation plutôt qu'aux valeurs absolues du champ de pression. Après avoir comparé ce critère à d'autres critères de sélection des analogues tirés de la littérature, ou des combinaisons de ceux-ci, elle a conclu que S1 est le plus performant (Guilbaud et Obled, 1998). Elle combinait alors les valeurs des critères calculés sur chaque niveau atmosphérique, et à chaque heure d'observation, à l'aide d'une moyenne arithmétique.

Elle a observé que la fenêtre spatiale d'analogie avait une taille optimale, intermédiaire, et qu'elle ne devait pas être trop grande ni trop petite. Elle a entre autres trouvé que l'épaisseur n'apportait pas d'information supplémentaire lorsque les niveaux 500 (ou 700) et 1000 hPa étaient considérés, et a confirmé que l'utilisation des deux niveaux atmosphériques conjointement était meilleure que l'analogie sur un seul de ceux-ci (Obled et al., 2002). Elle a relevé que les données à 24 h UTC (proche la fin de la période d'accumulation) étaient plus explicatives pour la pluie journalière (6 h UTC à 6 h UTC le lendemain) que celles à 00 h UTC (avant la période d'accumulation), et que considérer les deux heures d'observation était encore plus intéressant (toujours en considérant les deux niveaux atmosphériques). Elle a encore suggéré d'utiliser un second niveau d'analogie sur les humidités en basses couches.

À la suite de l'introduction de la prévision sous forme de distribution de pluie, elle a également amélioré l'évaluation de la prévision en introduisant un score basé sur des classes de précipitations, le RPS (*Ranked Probability Score*, Epstein, 1969, voir Equation 2.16). Ce score a l'avantage sur le score de Brier (Brier, 1950) de prendre en compte une notion de distance entre la classe prévue et celle observée (Guilbaud, 1997).

3.2.2.4 Évaluation en milieu alpin

Djerboua (2001) a appliqué la méthode développée par Guilbaud (1997) en prévision opérationnelle dans le cadre du projet MAP (*Mesoscale Alpine Programme*, voir Binder et Schär, 1996), lors de la période spéciale d'observation (Bougeault et al., 2001). Il a relevé que le quantile 60 % prévoyait le mieux les quantités de précipitations pour les situations normales, mais que lorsque la pluie observée était forte à extrême, le quantile 90 % s'avérait être un meilleur témoin. Il convient donc de porter une attention particulière au quantile 90 % qui, lorsqu'il monte brutalement, peut être le signe d'une situation propice à un événement de nature extrême, par la présence de plusieurs analogues dans la distribution avec des cumuls observés significatifs (Djerboua, 2001). En opérationnel, les prévisionnistes doivent prêter attention à la distribution des meilleures analogues. Si, par exemple, celle-ci est décalée vers des valeurs plus élevées, il y a un risque de sous-estimer l'événement.

En comparant les performances des modèles de Météo France avec la méthode des analogues, il en a conclu que les modèles numériques sont meilleurs pour la prévision du jour même, alors que les analogues deviennent plus concurrentielles (et meilleures pour les bassins de taille moyenne) pour les échéances suivantes.

Il a également proposé de normaliser la pluie par la pluie décennale à la station (ou groupement), ce qui nous permet de mieux identifier les contributions les plus importantes en précipitations.

3.2.2.5 Ajout de l'humidité en second niveau d'analogie

Bontron (2004) a poursuivi la recherche d'améliorations en s'appuyant sur les réanalyses NCEP/NCAR (résolution de 2.5°, cf. section 4.3.1), alors rendues accessibles au public. Ce jeu de données particulièrement long (de 1948 à aujourd'hui) lui a permis de tester l'utilisation de nouvelles variables météorologiques dans la méthode. Il a confirmé l'intérêt des champs de géopotentiel comparés à l'aide du critère S1 en tant que premier niveau d'analogie.

En évaluant un ensemble de variables à l'aide de différents critères, il a pu remarquer que le critère S1 n'est pertinent que pour la comparaison des champs de géopotentiel, alors que le RMSE l'est davantage pour les autres variables. Finalement, le coefficient de corrélation entre champs ne présente pas d'intérêt en tant que critère d'analogie.

Il a également montré que le choix de l'heure d'observation du géopotentiel était plus important que celui du niveau atmosphérique en termes de performance de la méthode. Le prédicteur doit être comparé à l'intérieur de la période de cumul des précipitations. La composante de la justesse du CRPS pèse davantage dans ce choix.

Il a ensuite évalué chaque combinaison de niveaux (6 niveaux) et d'heures (de -12 à +48, à pas de 12 h) pour l'utilisation conjointe de deux champs de géopotentiel. Il en a conclu que le couple de champs de géopotentiel à 1000 hPa à 12 h et à 500 hPa à 24 h était le plus performant sur l'ensemble des groupements pluviométriques évalués.

Après avoir travaillé sur une fenêtre spatiale de taille fixe, Bontron (2004) a introduit une méthode d'optimisation permettant de définir l'emplacement et la taille optimale de la fenêtre spatiale (voir section 3.4.2). Il a également relevé la pertinence de définir des fenêtres spatiales différentes pour chaque région (ou ensemble de groupements pluviométriques), plutôt qu'une fenêtre unique pour l'ensemble du territoire. Ces fenêtres sont donc à même de mieux considérer les influences propres de la région.

Par la suite, il a évalué plusieurs variables pour le second niveau d'analogie, et identifié les variables d'humidité (eau précipitable et humidité relative) et vitesse verticale comme les plus pertinentes. Il a élaboré différentes nouvelles variables composées sur cette base, telles que des flux d'humidité horizontaux et verticaux, ou le produit de l'humidité relative et de l'eau précipitable. Ce dernier s'est avéré être le plus informatif. En opérationnel, ce second niveau est pertinent jusqu'à une échéance de 3 jours. Au-delà, les prévisions d'humidité ne sont pas assez performantes pour être utiles.

En analysant les distributions de précipitations issues des analogues, Bontron (2004) a identifié le quantile 60 % comme étant le plus informatif pour l'occurrence des précipitations, et le quantile 90 % pour la prévision des précipitations moyennes à fortes ($P > P10/10$, soit un dixième de la pluie décennale). Par une étude de sensibilité, il a déterminé un plafonnement de la longueur de l'archive nécessaire à 30 ans pour la prévision en général, et à 40 ans pour les événements intenses. Il a également mis en lumière la dépendance entre le nombre d'analogues optimal et la taille de l'archive : plus l'archive est courte, plus le nombre d'analogues diminue. En revanche, ce nombre semble se stabiliser autour de 30 à partir d'une vingtaine d'années d'archive. En faisant varier la résolution des grilles de prédicteurs, il en a conclu que l'augmentation en performance n'est pas significative pour l'analogie de circulation en deçà d'une résolution de 5°. Cependant, elle semble plus importante pour le second niveau d'analogie sur les humidités, qui sont des variables plus locales.

3.2.2.6 Amélioration des aspects opérationnels de la méthode

Thevenot (2004) a étudié plusieurs aspects de la méthode des analogues en utilisation opérationnelle. Le premier a consisté à intégrer les prévisions d'ensemble du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT, ou *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF). Cette approche permet de tenir compte des incertitudes sur les prédicteurs issus du modèle global. Son implémentation est une combinaison des journées analogues retenues, associées à chacune des traces. La distribution des précipitations est ensuite établie sur l'ensemble des analogues. Ainsi, certaines journées peuvent être représentées plusieurs fois. À partir d'une échéance de 4 jours, la prévision sur l'ensemble des traces se montre plus performante que celle effectuée sur le seul contrôle déterministe.

Il a aussi effectué une calibration du nombre d'analogues à retenir en fonction de l'échéance pour la prévision déterministe, ainsi que pour la prévision d'ensemble. Pour la prévision déterministe, le nombre d'analogues pour les deux premières échéances est identique à celui de la prévision parfaite (calibration sur les réanalyses, Klein, 1963), puis croît de manière importante jusqu'à tendre vers l'ensemble de la climatologie. Cette optimisation a été effectuée sur la méthode à un niveau d'analogie (analogie de circulation), mais n'a pas pu être entreprise de manière aussi rigoureuse sur le second niveau d'analogie.

3.2.2.7 Correction du biais

Marty (2010) a appliqué plusieurs scores de validation aux quantiles de la distribution des prévisions opérationnelles de la méthode des analogues. Il en a conclu que la détection de l'occurrence des pluies était mieux prévue par les quantiles médians (50 à 70 %), avec un optimum à 60 %. Toutefois, pour les pluies significatives, le quantile 90 % donnait les meilleures performances. En comparant les résultats des analogues et des prévisions d'ensemble, pour le quantile 90 %, il a observé que, à partir de $P = 0.16 \cdot P10$, les analogues donnaient trop d'alertes, alors que les ensembles n'en émettaient pas assez. La prévision opérationnelle par analogie était meilleure que celle des ensembles considérés, et ceci particulièrement pour les forts cumuls (Marty, 2010). Le gain des analogues provient principalement d'une meilleure justesse, pour une moins bonne finesse. Au contraire, les prévisions d'ensemble sont très fines, mais manquent un peu de justesse.

Lors de l'analyse du biais des résultats de la méthode des analogues en opérationnel (également des ensembles), il a observé que la fréquence prévue des pluies nulles ($F(0)$) était biaisée et sous-estimait la fréquence réelle des précipitations nulles. Au contraire, les fréquences prévues des pluies positives (F_+) surestimaient les fréquences observées. Ainsi, par exemple, le quantile 50 % de la distribution prévue correspondrait au quantile réel 32 %, et le 90 % prévu au 81 % réel. Il a donc proposé une correction des biais.

En analysant le biais de la méthode des analogues en prévision parfaite (voir section 3.4), il a observé que $F(0)$ et F_+ n'étaient que très légèrement biaisés, et que les biais observés précédemment avaient donc une origine externe (l'échantillon des prévisions du modèle numérique global utilisé). Toutefois, en appliquant un conditionnement par $F(0)$, il est apparu que « *si la journée cible est prévue pour être plutôt humide ($F(0) \leq 0.10$), les fréquences de F_+ sont surestimées (et les quantiles de précipitations sont dès lors sous-estimés)* », et au contraire, que « *si elle est prévue pour être plutôt sèche avec une probabilité moyenne ($F(0) > 0.20$), alors les fréquences F_+ sont sous-estimées (et les quantiles de précipitations sont dès lors surestimés)* ». Il a donc proposé une méthode de correction a priori en appliquant un coefficient correctif sur chaque fréquence quantilique en fonction de $F(0)$, puis en déterminant la distribution a posteriori, ajustée selon la loi Gamma à deux paramètres. Cette correction s'est avérer améliorer les performances des prévisions pour les journées à fortes précipitations.

Il a encore proposé une désagrégation temporelle à 6 et 12 h des prévisions de la méthode des analogues pour une utilisation opérationnelle dans une chaîne hydrométéorolo-

gique. La meilleure méthode identifiée consistait à utiliser les cumuls prévus par la méthode des analogues à un pas de temps journalier, et de leur appliquer la chronologie des prévisions d'ensemble, lesquels reproduisent bien la répartition infrajournalière.

3.2.2.8 Niveaux d'analogie supplémentaires

Ben Daoud (2010) a appliqué la méthode dans un contexte de grands bassins, avec des reliefs moins marqués (Saône, Seine). Il a dans un premier temps évalué les réanalyses européennes ERA-40 (Uppala et al., 1999), avec une résolution de 1.125°, par rapport aux réanalyses américaines du NCEP/NCAR à 2.5° (Kalnay et al., 1996) utilisées jusqu'alors. Il a identifié une légère amélioration des performances, mais pas assez substantielle pour vraiment justifier un changement d'archive (Ben Daoud et al., 2008).

Grâce à son expérience de prévisionniste, Ben Daoud (2010) a évalué plusieurs variables simples ou élaborées, habituellement utilisées en prévision météorologique. La plupart de ces variables n'ont pas présenté d'intérêt lors de leur introduction dans la méthode des analogues, mis à part la température de l'air et les mouvements verticaux. La température (au point de grille le plus proche, et aux niveaux 925 hPa (36 h) et 600 hPa (12 h)) a pu remplacer la sélection rigide des ± 60 jours autour de la date cible par une présélection plus dynamique des situations similaires en terme de masse d'air. L'effet de saisonnalité est effectivement également présent dans les données de température. Cette présélection résulte en un échantillon dont environ deux tiers des jours sont dans la période des 4 mois centrés sur la date cible.

Afin de tenir compte des passages frontaux, Ben Daoud (2010) a introduit un niveau d'analogie supplémentaire sur les mouvements verticaux. La vitesse verticale s'est avérée être la variable la plus pertinente. Ce niveau d'analogie ne se situe pas en fin de chaîne, mais entre l'analogie de circulation et celle de l'humidité.

En opérationnel, ces niveaux supplémentaires se sont montrés utiles pour les deux à trois premières échéances, mais au-delà, toutes les méthodes deviennent équivalentes à l'analogie sur la circulation, car les autres variables, comme la vitesse verticale, sont alors mal prévues.

Enfin, il a réévalué le niveau atmosphérique considéré pour l'humidité relative, et a observé que tous les niveaux étaient plus pertinents que le niveau 850 hPa. Le meilleur gain en performance était donné par le niveau 700 hPa. En le combinant avec le niveau 925 hPa, la compétence montait encore.

3.2.2.9 Pondération des points de grille

Un travail assez voisin a été entrepris sur des bassins en Allemagne par Bliefernicht (2010). Celui-ci a proposé de pondérer les points de grille du prédicteur afin de s'affranchir d'une comparaison sur une fenêtre de taille fixe, et de donner plus d'importance aux régions où la circulation est importante. Il a donc implémenté un critère de distance euclidienne pondérée pour comparer les prédicteurs. Les poids attribués aux points de grille étaient optimisés à l'aide d'un algorithme de recuit simulé (Kirkpatrick et al., 1983). Il a toutefois remarqué qu'il y a un risque de surparamétrisation et qu'une simplification des champs de pondération

peut être nécessaire. Sa méthode permettait d'améliorer les prévisions des pluies moyennes à fortes, au détriment des petites. Toutefois, les gains en performance ne semblaient pas stables entre la période de calibration et celle de validation.

Bliefernicht (2010) s'est basé sur d'autres prédicteurs, d'autres critères d'analogie (voir Bliefernicht et Bárdossy, 2007) et d'autres scores de vérification et ne s'inscrit donc pas directement dans la continuité des travaux précédents, ce qui rend difficile une évaluation des gains de la pondération des points de grille dans notre cas.

Il a également comparé les performances de la méthode des analogues avec une méthode de prévision basée sur une classification en types de circulation atmosphérique et en a conclu que les analogues sont plus performantes.

Il a finalement exposé une notion de profondeur des données (*data depth*), qui est la mesure de la « centralité » des situations météorologiques dans leur population. L'objectif est de s'intéresser aux extrêmes locaux, souvent liés à des anomalies de l'atmosphère, et qui ne sont pas toujours issus du corps de la population, mais plutôt de sa périphérie (dans l'espace multidimensionnel des observations passées).

3.2.3 Les pistes décevantes

Dans cette section, nous allons présenter certaines idées intéressantes, mais qui n'ont pas porté leurs fruits. Elles sont données ici, car connaître les voies sans issue déjà explorées constitue une information utile.

Une **pondération des pluies** des analogues en fonction de leur distance au jour de référence n'a pas amélioré les résultats (Guilbaud, 1994; Obled et al., 2002). Guilbaud (1997) a encore évalué différentes méthodes de pondération des analogues (choisies par ACP) en fonction de la distance euclidienne entre la journée cible et les situations analogues. Toutefois, les gains sont négligeables pour la prévision quantitative des précipitations.

Une **pondération des variables météorologiques** a été évaluée, mais n'a pas été retenue à cause du gain trop faible en résultant (Guilbaud, 1997; Obled et al., 2002).

Une liste de 17 différents **indices** a été évaluée en second niveau d'analogie, au lieu des données brutes. Ce sont des indices d'instabilité (telles que *Lifted Index*, Instabilité potentielle humide, Indice *Severe Weather Threat*, ...), ou des paramètres liés à la théorie du soulèvement de la particule (CAPE, nombre de Richardson, vitesse maximale verticale), ou encore d'autres paramètres de base (cisaillement, isotherme 0°, masse d'eau précipitable) (voir Guilbaud, 1997, pour les détails). Aucun de ces indices n'a donné de meilleur résultat que les données brutes, même si dans un contexte de grands bassins versants de plaine, Ben Daoud (2010) a trouvé que la vitesse verticale était significative.

L'introduction d'un **critère S1 normalisé** afin de rendre les niveaux du géopotentiel plus similaires en termes d'écarts-types, avant de les combiner, ne s'est pas soldée par un gain en performance (Bontron, 2004).

Sur la base de l'observation que les fenêtres d'analogie sont positionnées en direction de la provenance dominante des situations responsables des précipitations, Bontron (2004) a évalué la pertinence de considérer des fenêtres non plus statiques, mais s'adaptant à la circulation

atmosphérique de la situation cible. Ces **fenêtres dynamiques** ne sont donc pas forcément rectangulaires et sont construites selon les directions des vents géostrophiques. Toutefois, cette approche s'est montrée moins intéressante que celle considérant les fenêtres statiques.

Disposant d'un catalogue de **types de temps** pour la France, Bontron (2004) a conditionné l'optimisation des fenêtres d'analogie du premier ordre par type de temps, ainsi que le choix des variables de second ordre. Cette différenciation a apporté un gain négligeable pour la plupart des régions, excepté pour une région sensible aux retours d'est. Les améliorations observées n'étaient donc pas suffisamment importantes pour que cette démarche soit intéressante. De plus, une classification a priori est une démarche risquée en prévision opérationnelle, car une erreur de classe change toute la prévision. Bontron (2004) relève toutefois une utilisation intéressante des types de temps en opérationnel : puisque nous pouvons déterminer les performances de la méthode des analogues pour différents types de temps, nous pouvons avoir une idée de l'incertitude liée à la situation prévue.

S'inspirant de la démarche d'un météorologue qui recherche l'information utile en fonction de la **direction du flux** dans la région d'intérêt, Ben Daoud (2010) a proposé de considérer 8 secteurs du flux ayant chacun leur fenêtre d'analogie correspondante pour les variables de circulation. Cette approche n'a pas permis de gagner en performance.

Un essai de **conditionnement de l'humidité** (de son niveau atmosphérique) par des types de temps a été mené par Ben Daoud (2010), qui n'a pas observé de réelle tendance.

3.2.4 Les critères d'analogie

Les critères d'analogie nous permettent de quantifier la similitude d'une situation atmosphérique, caractérisée par un ou plusieurs champs d'une ou plusieurs variables météorologiques (pression, température, vent, etc.), entre deux dates. Cette analogie peut être de différentes natures, par exemple sur les valeurs (critère de distance) ou sur la forme dans l'espace (cofluctuation) de la variable.

Deux critères classiques sont des critères de distances absolues : **MAE** (Eq. 2.12) et **RMSE** (Eq. 2.13). Nous les avions précédemment présentés sous l'angle d'une utilisation en évaluation la pertinence des prévisions, mais ils peuvent également être considérés en tant que critères d'analogie sur les variables météorologiques. Lorsqu'ils sont appliqués à une grille, nous calculons la moyenne des critères des différents points.

Pour comparer deux situations météorologiques, on peut d'abord rechercher une analogie de circulation, à savoir que les directions et les intensités des vents soient assez semblables. Ceci peut se faire indépendamment du niveau absolu de pression, en recherchant une ressemblance des gradients du champ. Nous utilisons ainsi le critère de similitude **S1** (Eq. 3.2), qui compare la forme des champs (Teweles et Wobus, 1954; Drosdowsky et Zhang, 2003). Il a été initialement développé pour évaluer des prévisions de champs de pression ou de champs de géopotentiel (voir p.ex. Hirano, 1988).

Son introduction dans la méthode des analogues a été proposée par Wilson et Yacowar (1980), puis mise en œuvre par Guilbaud (1997) et Bontron (2004).

$$S1 = 100 \frac{\sum_i |\Delta \hat{z}_i - \Delta z_i|}{\sum_i max\left\{|\Delta \hat{z}_i|, |\Delta z_i|\right\}} \tag{3.2}$$

où $\Delta \hat{z}_i$ est le gradient prévu entre la i-ème paire de points adjacents dans la situation cible, et Δz_i est le gradient observé correspondant dans la situation candidate. Les différences sont calculées séparément dans les deux directions et normées par la valeur maximale. Plus les valeurs de S1 sont petites, plus les champs de pression sont similaires : $S1 = 0$ pour des champs similaires, $S1 = 100$ pour des champs indépendants, et $S1 = 200$ pour des champs en opposition.

Le critère S1 a été comparé à d'autres critères par Bontron (2004). Le critère RMSE est meilleur pour comparer la plupart des variables à l'exception de la hauteur du géopotentiel. Dans ce cas, le critère S1 a montré de meilleures capacités prévisionnelles dans la méthode des analogues, car il permet de bien comparer l'information de la circulation atmosphérique, plutôt que les valeurs absolues de la hauteur du géopotentiel. Nous recherchons alors une analogie de circulation (Guilbaud et Obled, 1998).

3.2.5 Les niveaux atmosphériques d'intérêt

Les grandes lignes de la circulation atmosphérique générale sont bien caractérisées par le géopotentiel à 500 hPa, étant donné que celui-ci est situé à peu près au milieu de l'atmosphère et que les vents sont de nature géostrophique, c'est-à-dire insensibles aux effets de frottement que l'on rencontre en se rapprochant de la surface (Glenser, 1995e; Guilbaud, 1997; Ben Daoud, 2010). En prévision météorologique, ce niveau standard est généralement couplé à l'analyse d'un champ de pression proche de la surface terrestre, habituellement la pression au niveau de la mer. Cela permet d'identifier les centres d'action en altitude et au niveau de la mer (Ben Daoud, 2010).

On sait, de plus, que les précipitations d'été et d'automne se forment plutôt vers 700 hPa, contre 850 hPa pour celles d'hiver (Guilbaud, 1997). L'humidité à 700 hPa peut indiquer la présence de nuages moyens, ainsi qu'un potentiel d'orages organisés (Ben Daoud, 2010). À 925 hPa, la saturation de l'air en humidité indique la présence de nuages bas potentiellement générateurs de précipitations, surtout en montagne (Ben Daoud, 2010). Pour les précipitations convectives, l'humidité nécessaire au développement des nuages orageux se situe vers 950 à 850 hPa (Ben Daoud, 2010).

L'épaisseur de la couche 700/1000 hPa est informative de l'état thermique moyen de la basse atmosphère (Guilbaud, 1997).

3.2.6 Implémentation actuelle

La méthode est opérationnelle dans divers organismes, avec des objectifs parfois un peu différents (EDF - Electricité de France, CNR - Compagnie Nationale du Rhône, SCHAPI - Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations). Nous décrivons ici une version standard (pour davantage de détails, voir Obled et al., 2002; Bontron et Obled, 2005; Ben Daoud et al., 2009; Marty et al., 2012). Dans la description ci-dessous, nous sommes intéressés à prévoir les précipitations journalières (6h à 6h le lendemain) pour les 7 prochains jours, D_1 à D_7.

1. Nous acquérons d'abord différents prédicteurs (champs de géopotentiel et variables d'humidité) pour les 7 prochaines échéances (D_1 à D_7). Ces données sont issues d'un modèle de prévision global, et sont donc déjà extrapolées temporellement.
2. Ensuite, nous calculons le premier niveau d'analogie sur la circulation synoptique. Bontron (2004) a montré que les champs de géopotentiel à 500 hPa et 1000 hPa sont les meilleurs premiers prédicteurs de l'archive des réanalyses NCEP/NCAR. Ces champs sont extraits sur une certaine fenêtre spatiale pour chaque journée cible D_j afin d'être comparés aux journées contenues dans l'archives des réanalyses. Afin de tenir compte des effets saisonniers, les dates candidates sont extraites de l'archive, pour chaque année, dans une période de 4 mois centrée sur la date cible D_j.
3. Les N_j dates avec les plus petites valeurs de S1 sont considérées en tant qu'analogues à la journée cible D_j. Le nombre d'analogues, N_j, est un paramètre à calibrer qui varie avec l'échéance j en cas d'application opérationnelle. Il a un optimum clairement identifiable qui est souvent autour de 30 dates pour le premier pas de temps ($j = 1$) si nous ne considérons qu'un seul niveau d'analogie, et il croît ensuite avec les échéances suivantes.
4. Nous pouvons ajouter d'autres niveaux d'analogies consécutifs basés sur d'autres variables, telles que le flux d'humidité, afin de sélectionner un nombre d'analogues N'_j plus restreint parmi la sélection précédente. Si nous considérons un deuxième niveau d'analogie, le premier nombre d'analogues, N_j, doit être plus élevé que dans le cas d'un niveau d'analogie unique. Évidemment, $N'_j < N_j$.
5. Finalement, les précipitations observées des N'_j dates résultantes permettent d'élaborer la distribution conditionnelle empirique considérée en tant que prévision probabiliste pour la journée cible D_j.

Une prévision probabiliste est généralement exprimée par une distribution statistique (Krzysztofowicz, 1998). Dans la méthode des analogues, elle a la forme d'une fonction de répartition. La première étape de l'établissement d'une telle fonction est de classer toutes les valeurs de l'échantillon dans l'ordre croissant.

Puis, la fréquence empirique de chaque élément, tel que $F(x_i) = P(X \leq x_i)$, soit la probabilité que la variable X soit inférieure à x_i, peut être estimée par (Bois et al., 2007) :

$$F(x_i) = \frac{i - a}{n + b} \tag{3.3}$$

où i est le rang, n la taille de l'échantillon, et a et b des constantes qui ont un optimum dépendant de la loi dont sont issus les échantillons. Cunnane (1978) recommande les paramètres de Gringorten ($a = 0.44$, $b = 0.12$) pour une application à une loi de Gumbel ou exponentielle.

Au lieu de travailler avec une distribution empirique, certaines approches ajustent sur les données la loi statistique correspondante et utilisent cette nouvelle distribution pour la prévision. Une version de la méthode des analogues se base ainsi sur une loi gamma ajustée aux précipitations des journées analogues (Obled et al., 2002). Ceci a l'avantage de rappeler que l'on peut imaginer des valeurs supérieures au maximum de l'échantillon, mais, bien sûr, avec des probabilités faibles. Une forme analytique permet aussi certains calculs, comme la probabilité du cumul de deux jours successifs (voir Marty, 2010).

3.2.7 Autres cas d'études

Bliefernicht (2010) a observé que la performance de la méthode est plus élevée en hiver qu'en été. Ainsi, la relation entre les prédicteurs synoptiques et les précipitations locales est plus faible en été, en raison des pluies d'origine convective qui ont un caractère plus aléatoire.

La méthode des analogues, ou une forme proche, a également été utilisée pour la prévision à court ou moyen terme des températures journalières (Radinovic, 1975; Woodcock, 1980; Kruizinga et Murphy, 1983), des vents (Gordon, 1987), des avalanches (Obled et Good, 1980; Bolognesi, 1993), de l'insolation (Bois et al., 1981), et de la trajectoire de cyclones tropicaux (Keenan et Woodcock, 1981; Sievers et al., 2000; Fraedrich et al., 2003).

Guilbaud (1997) a effectué une recherche bibliographique des utilisations de la méthode en prévision à long terme et a identifié des applications opérationnelles pour des prévisions mensuelles dans de nombreux pays, notamment au Canada (Shabbar et Knox, 1986), en Hongrie (Toth, 1989), aux Pays-Bas (Nap et al., 1981), et en Angleterre (Murray, 1974), ainsi que des prévisions saisonnières : Barnett et Preisendorfer (1978), Bergen et Harnack (1982) et Livezey et Barnston (1988).

L'utilisation de la méthode des analogues en tant que technique d'adaptation de modèles climatiques fait l'objet d'un nombre croissant d'études (Zorita et von Storch, 1999; Wetterhall, 2005; Matulla et al., 2008). Wetterhall et al. (2007) ont également utilisé la méthode des analogues en Suède, dans le cadre d'une étude sur le réchauffement climatique, et la trouvent simple, mais moins performante que d'autres méthodes plus complexes. Cependant, ils n'utilisent que la pression au niveau de la mer en tant que prédicteur, et considèrent uniquement la meilleure analogue. Ces deux aspects ne sont clairement pas optimaux, et une qualité médiocre de la méthode n'est alors pas surprenante. L'implémentation actuelle de la méthode (voir section 3.2.6) fournit clairement des résultats plus pertinents.

Une version de la méthode a été évaluée dans le projet STARDEX (*STAtistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions*, voir Goodess, 2003; STARDEX, 2005). Un des objectifs du projet étant de comparer différentes méthodes de descente d'échelle pour la détermination des extrêmes météorologiques, la méthode des analogues a été mise en concurrence avec d'autres techniques et a été sélectionnée parmi les plus intéressantes (Maheras et al., 2005; Schmidli et al., 2007).

Gibergans-Báguena et Llasat (2007) ont implémenté la méthode pour des prévisions de précipitations journalières en Catalogne. Ils ont considéré le géopotentiel à 700 et 1000 hPa, ainsi que l'épaisseur entre ces deux niveaux pour la recherche d'analogie de circulation, puis ont appliqué une seconde sélection sur la base de données locales obtenues par radiosondage : indices de stabilité, eau précipitable, température, etc...

Hamill et al. (2006) ont utilisé une approche par analogie sur les reprévisions du modèle global des États-Unis (GFS, voir sections 4.3.2 et 4.3.3). Cette application a permis de corriger des erreurs systématiques dans les prévisions d'ensemble des températures et des précipitations. En effet, l'approche statistique a mis en évidence certains biais dans les prévisions du modèle numérique, qui ont pu être ajustés par la prise en compte de la climatologie locale intrinsèque à la méthode des analogues. De plus, la dispersion des analogues étant plus importante que celle des prévisions d'ensemble, la sous-dispersion de ces dernières a pu être corrigée à l'aide des analogues (Hamill et al., 2006). Une des raisons invoquées pour la bonne performance de la méthode des analogues par rapport au modèle numérique global est le fait que ce dernier a une orographie lissée, qui ne tient pas compte des réelles spécificités locales, ce que permet l'approche par analogie.

3.2.8 Limites de la méthode

La méthode présente cependant des limites dont il faut être conscient. La première est la nécessité de disposer d'une archive conséquente de la variable cible à un pas de temps pertinent, ici les précipitations. Sans une base de données de prédictands de plusieurs décennies, la méthode n'est pas applicable.

Les archives des prédicteurs sont également importantes et plus particulièrement leur homogénéité. Nous disposons actuellement de jeux de données de réanalyses (voir section 4.3.1) de bonne qualité, mais contenant tout de même des discontinuités significatives dues à la densification des réseaux de mesures et au déploiement de nouvelles techniques de mesure et de l'imagerie satellitaire. Nous ne pourrons a priori jamais complètement éliminer cette hétérogénéité, car les données demeureront manquantes. Toutefois, la qualité de ces données les rend tout à fait utilisables pour la méthode des analogues, et ceci partout sur le globe !

Un aspect supplémentaire concerne les différences entre les prédicteurs disponibles en temps réel et les archives de ces prédicteurs. En effet, les deux jeux de données n'ont généralement pas la même climatologie, car ils ne résultent pas du même modèle, et n'ont pas été élaborés de la même manière. Il existe des alternatives, telles que l'utilisation en opérationnel de prévisions émises par un modèle figé, conjointement à des archives élaborées par ce même modèle en reprévision.

Toutefois, les prévisions que nous utiliserions de cette manière ne seraient pas à l'état de l'art, et les reprévisions (archives) contiendraient des erreurs et des incertitudes beaucoup plus importantes que des réanalyses. Il convient donc d'utiliser des prédicteurs robustes qui dépendent au minimum des spécificités du modèle numérique.

Une autre limite réside dans le fait que les événements extrêmes peuvent être sous-représentés dans l'échantillon d'analogues considéré. En effet, dans une archive météorologique d'une durée limitée, les événements correspondants à des temps de retour élevés ne sont pas très nombreux. Leur représentation est certainement inférieure au nombre d'analogues que nous retenons, ce qui peut biaiser la prévision.

Enfin, Bliefernicht et Bárdossy (2007) ont montré que les prévisions sont moins bonnes en été. Ceci est dû à la part plus importante de la convection durant les mois chauds. Les variables de la circulation synoptique ne sont en effet pas à même de prévoir la localisation des cellules orageuses. Ceci a également été constaté par Ben Daoud (2010), qui avait mis en place un modèle spécifique pour les mois d'été (du 15 juin au 15 septembre). Nous pouvons estimer que les prédicteurs sont à reconsidérer (variables, niveaux, etc.), et que leur domaine peut être différent. Le problème est que, durant cette période, on peut également rencontrer situations classiques avec une circulation atmosphérique dominante comme dans les autres saisons, ou des situations de marais barométriques accompagnées d'un fort risque de convection locale, sans signature dans les variables synoptiques.

3.3 Établissement de références

Un des objectifs de notre travail est de tenter d'améliorer et de faire progresser la méthode. Afin d'évaluer les améliorations apportées, les différentes versions existantes de la méthode nous serviront de références. Nous considérerons les diverses variantes, de la plus simple à la plus complexe. Les versions résultant des travaux relatés à la section 3.2.2 sont listées ici et éventuellement adaptées au fonctionnement actuel de la méthode. Nous retiendrons donc les étapes d'analogie et les prédicteurs utilisés. Les fenêtres spatiales d'analogie ne sont pas précisées, car celles-ci sont spécifiques et seront réévaluées pour notre région.

3.3.1 R0, les origines

Une référence préliminaire résulte des travaux de Guilbaud (1997) et Obled et al. (2002). Elle est constituée d'un seul niveau d'analogie sur la circulation atmosphérique considérée à 1000 hPa et 700 hPa (R0a, Table 3.1) ou 500 hPa (R0b, Table 3.2). Le critère S1 de Teweles-Wobus est alors utilisé pour comparer les champs de géopotentiel.

Table 3.1 – Paramètres de la méthode R0a.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	±60 jours autour de la date cible			
1	géopotentiel à 700 hPa	00, 24 h	S1	50
	géopotentiel à 1000 hPa	00, 24 h		

Table 3.2 – Paramètres de la méthode R0b.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	±60 jours autour de la date cible			
1	géopotentiel à 500 hPa géopotentiel à 1000 hPa	00, 24 h 00, 24 h	S1	50

3.3.2 R1, analogie de circulation

Ce que nous considérerons comme notre première référence est l'analogie de circulation (R1, Table 3.3) optimisée par Bontron (2004). Ce dernier a observé que le choix de l'heure était plus important que celui du niveau atmosphérique. La méthode est alors constituée du géopotentiel à deux niveaux atmosphériques et à des heures différentes.

Table 3.3 – Paramètres de la méthode R1.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	±60 jours autour de la date cible			
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	12 h 24 h	S1	50

3.3.3 R2, prise en compte de l'humidité

Toujours d'après les travaux de Bontron (2004), la référence suivante (R2, Table 3.4) intègre un second niveau d'analogie sur un indice d'humidité : le produit de l'humidité relative à 850 hPa et de l'eau précipitable de la colonne. Cette variable ne représente pas une grandeur physique réelle, mais exprime le contenu en eau de la colonne et sa proximité ou son éloignement de la saturation (à 850 hPa).

Table 3.4 – Paramètres de la méthode R2.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	±60 jours autour de la date cible			
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	12 h 24 h	S1	70
2	eau précipitable * humidité relative 850 hPa	12, 24 h	RMSE	30

3.3.4 R3, prise en compte du flux d'humidité

Marty (2010) a recalibré les paramètres déterminés par Bontron (2004) pour une application infrajournalière (résolution temporelle de 12 h), et sur la base d'un jeu de données de réanalyses plus complet. Il a proposé deux modèles avec un second niveau d'analogie sur l'humidité (R3a, Table 3.5) ou le flux d'humidité au niveau 700 hPa (R3b, Table 3.6) ou 925 hPa (R3c, Table 3.7). Les heures et les niveaux changent par rapport à ceux établis par Bontron (2004), car ceux-ci n'étaient alors pas disponibles.

Table 3.5 – Paramètres de la méthode R3a.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	±60 jours autour de la date cible			
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	06 h 18 h	S1	75
2	eau précipitable * humidité relative 925 hPa	06, 18 h	RMSE	30

Table 3.6 – Paramètres de la méthode R3b.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	±60 jours autour de la date cible			
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	06 h 18 h	S1	60
2	V 700 hPa * eau préc. * humidité rel. 700 hPa	06, 18 h	RMSE	25

Table 3.7 – Paramètres de la méthode R3c.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	±60 jours autour de la date cible			
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	06 h 18 h	S1	60
2	V 925 hPa * eau préc. * humidité rel. 925 hPa	06, 18 h	RMSE	25

Le flux d'humidité est composé du produit de l'eau précipitable et de l'humidité relative, multiplié par la norme de la vitesse du vent (V).

3.3.5 R4, présélection sur les températures

La quatrième référence reconsidère la sélection des journées candidates à l'analogie et utilise la présélection sur les températures introduite par Ben Daoud (2010). Nous nous affranchissons donc de la sélection d'une période de 4 mois centrée sur la date pour une approche plus dynamique qui tient différemment compte de l'effet de saisonnalité. Le nombre d'analogues de la présélection est équivalent au nombre de jours que nous aurions retenus par la période de ±60 jours, soit $N_0 = 60 \cdot 2 \cdot n_a$, où n_a est le nombre d'années de la période de calibration. Mais la sélection est ici fondée sur un critère de similitude thermique au droit de la région cible.

Trois références sont donc retenues ici : la première (R4a, Table 3.8) considère le niveau d'analogie sur l'humidité tel que l'a défini Bontron (2004), la deuxième (R4b, Table 3.9) intègre les niveaux d'humidité calibrés par Ben Daoud (2010), et la troisième (R4c, Table 3.10) considère toutes les heures d'observation disponibles pour ce dernier niveau d'analogie.

Table 3.8 – Paramètres de la méthode R4a.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	température de l'air 925 hPa température de l'air 600 hPa	36 h 12 h	RMSE	N_0
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	12 h 24 h	S1	70
2	eau précipitable * humidité relative 850 hPa	12, 24 h	RMSE	25

Table 3.9 – Paramètres de la méthode R4b.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	température de l'air 925 hPa température de l'air 600 hPa	36 h 12 h	RMSE	N_0
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	12 h 24 h	S1	70
2	eau précipitable * humidité relative 925 hPa eau précipitable * humidité relative 700 hPa	12, 24 h 12, 24 h	RMSE	25

Table 3.10 – Paramètres de la méthode R4c.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	température de l'air 925 hPa température de l'air 600 hPa	36 h 12 h	RMSE	N_0
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	12 h 24 h	S1	70
2	eau précip. * humidité rel. 925 hPa eau précip. * humidité rel. 700 hPa	06, 12, 18, 24, 30 h 06, 12, 18, 24, 30 h	RMSE	25

3.3.6 R5, prise en compte des mouvements verticaux

Ben Daoud (2010) a encore ajouté un niveau d'analogie sur les mouvements verticaux. Ce niveau vient s'insérer entre l'analogie de circulation et celle de l'humidité. À nouveau, nous considérons une première référence (R5a, Table 3.11) avec les paramètres d'humidité selon Bontron (2004), et une seconde (R5b, Table 3.12) avec les paramètres de Ben Daoud (2010).

Table 3.11 – Paramètres de la méthode R5a.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	température de l'air 925 hPa (1 point) température de l'air 600 hPa (1 point)	36 h 12 h	RMSE	N_0
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	12 h 24 h	S1	170
2	vitesse verticale 850 hPa	06, 12, 18, 24 h	RMSE	70
3	eau précip. * humidité relative 850 hPa	12, 24 h	RMSE	25

Table 3.12 – Paramètres de la méthode R5b.

Niveau	Variable	Heure	Critère	Nb analogues
présélection	température de l'air 925 hPa (1 point) température de l'air 600 hPa (1 point)	36 h 12 h	RMSE	N_0
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	12 h 24 h	S1	170
2	vitesse verticale 850 hPa	06, 12, 18, 24 h	RMSE	70
3	eau précip. * humidité relative 925 hPa eau précip. * humidité relative 700 hPa	12, 24 h 12, 24 h	RMSE	25

3.3.7 Remarques générales

Ces différentes méthodes sont de complexité croissante et ont montré des gains de performance successifs, mais parfois dans des contextes différents les uns des autres et de celui que nous allons étudier. Ainsi, la méthode R5, qui intègre les mouvements verticaux, a été optimisée par Ben Daoud (2010) sur des grands bassins versants de plaine où les mouvements verticaux de grande ampleur, vus par les réanalyses, pouvaient jouer un rôle dans la genèse des précipitations frontales, notamment. Bontron (2004), qui avait testé cette variable sur des bassins très montagneux, ne l'avait pas retenue, du fait que sa résolution dans les réanalyses est insuffisante pour de tels bassins versants et que les mouvements verticaux sont contrôlés plus majoritairement par l'orographie locale de ces bassins.

Il faut donc toujours garder à l'esprit ce que représente effectivement une variable issue des réanalyses : une moyenne sur une grille de 2.5° de résolution (environ 190 km N-S et 280 km E-O à l'emplacement des Alpes) résultant d'un modèle où l'orographie des Alpes est très grossière.

3.4 Calibration de la méthode des analogues

La calibration de la méthode sera, comme chez Bontron (2004) et Ben Daoud (2010), effectuée en prévision parfaite (*Perfect Prognosis*, Klein et al., 1959). La prévision parfaite utilise des données observées ou réanalysées pour caler la relation entre prédicteurs et prédictands. En opérationnel, cette relation sera appliquée aux résultats du modèle numérique, que nous considérerons comme prédicteurs non biaisés.

La relation statistique permet une adaptation locale de variables météorologiques. Elle est donc utile pour identifier les prédicteurs ayant un potentiel de prévision d'une variable locale, et ce de manière indépendante en regard du modèle numérique de prévision utilisé et de l'incertitude liée aux différentes échéances. Ainsi, si le modèle numérique présente un biais sur les prédicteurs par rapport aux observations, les résultats peuvent être faussés. Cette approche est basée sur l'hypothèse que la prévision numérique des prédicteurs est parfaite (Bontron, 2004). Nous désirons nous affranchir au maximum des incertitudes de la prévision afin d'identifier les variables météorologiques expliquant au mieux les précipitations sur notre bassin, (presque) indépendamment de tout modèle numérique de prévision.

Il faut toutefois prendre en considération le fait qu'un jeu de données (réanalyses) établi sur des observations n'aura pas les mêmes caractéristiques climatologiques (propriétés statistiques des valeurs de la variable météorologique d'intérêt, prévues ou observées) que les prévisions du modèle numérique, et qu'un biais est donc probable. Il serait effectivement pertinent de travailler avec les données de prévision en tant qu'archive (voir p.ex. Glahn et Lowry, 1972; Thevenot, 2004) étant donné qu'il s'agit en effet de celles que nous utiliserons par la suite en opérationnel. Celles-ci évoluant de manière trop importante avec les constantes améliorations des modèles numériques, il serait nécessaire de recalibrer la méthode à chaque nouvelle version de modèle (Wilson et Vallée, 2002). Toutefois, il n'existe pas de reprévision systématique des situations passées produites pour chaque nouvelle version du modèle. Nous finirions donc par également travailler avec deux jeux de données qui ont une climatologie différente.

La seconde raison est qu'il existe des jeux de données élaborés sur la base d'observations (cf. section 4.3.1) avec une longueur d'archive très importante, ce qui n'est pas le cas de reprévisions à l'aide de modèles numériques. La taille de l'archive synoptique est un élément important pour la méthode des analogues.

3.4.1 Analyse exploratoire : cartographie de la pertinence

La carte de pertinence est une représentation spatiale des capacités prévisionnelles de chaque cellule de la grille de données du prédicteur (voir p.ex. Figure 3.1). Pour l'établir, une fenêtre spatiale de taille unitaire (1 point pour le critère RMSE, et 2x2 points pour le critère S1 qui doit calculer des gradients) est déplacée sur tout le domaine, et chaque emplacement est évalué (Bontron, 2004).

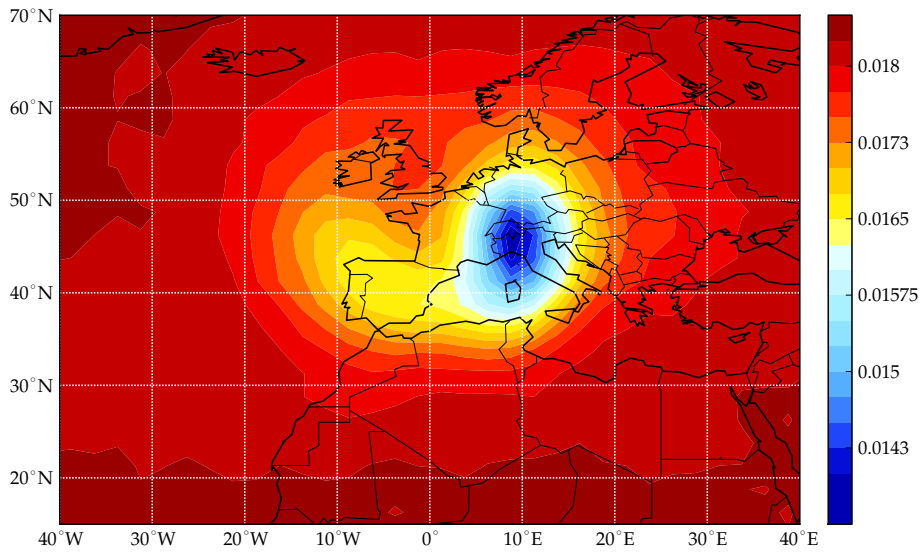


Figure 3.1 – Exemple d'une carte de pertinence du géopotentiel à 500 hPa à 18 h pour la station de Binn. Une valeur inférieure du CRPS reflète une plus grande capacité prédictive.

De ce processus résulte une carte des scores (CRPS ou autre score) permettant de visualiser la localisation de la circulation atmosphérique ayant une importance pour la détermination des précipitations sur la région d'intérêt (station ou bassin versant).

Les zones les plus pertinentes ne sont pas forcément les mêmes pour différentes stations, mais correspondent aux caractéristiques météorologiques de leur région. La localisation optimale des prédicteurs devrait évidemment être cohérente avec les phénomènes météorologiques influençant le temps sensible de la région.

3.4.2 Calibration classique

La calibration que nous appellerons classique a été développée par Bontron (2004) au laboratoire LTHE (INPG). Elle permet de déterminer les paramètres optimaux pour les différentes variables de chaque niveau d'analogie. Les niveaux d'analogie (p.ex. la circulation atmosphérique ou les variables d'humidité) sont traités de manière séquentielle. Les 120 jours autour de la date cible sont exclus afin de ne considérer que des journées candidates vraiment indépendantes.

La méthode de calibration est basée sur l'approche « essai et erreur ». Chaque nouveau jeu de paramètres est évalué en effectuant une prévision pour chacun des jours de la période de calibration, et en comparant les prévisions aux valeurs observées à l'aide d'un score choisi (voir section 2.4). Les étapes peuvent être définies comme suit (Bontron, 2004) :

1. choix des variables météorologiques à certains niveaux et à certaines heures, et choix d'un nombre d'analogues initial ;
2. pour chaque niveau d'analogie :
   a) Établissement de la carte de pertinence pour le niveau d'analogie en cours d'évaluation (de manière commune aux différentes variables du niveau d'analogie).
   b) Depuis le point le plus pertinent, la fenêtre spatiale est dilatée par itérations successives dans la direction du plus grand gain en performance. Les étapes sont les suivantes :
      i. À partir de la fenêtre élémentaire, l'agrandissement dans chacune des 4 directions est évalué par le calcul du score de performance des prévisions.
      ii. Le meilleur score est retenu et la fenêtre est agrandie dans la direction correspondante.
      iii. À partir de cette nouvelle fenêtre, l'agrandissement dans chacune des 4 directions est à nouveau évalué.
      iv. La fenêtre grandit (les étapes précédentes sont répétées) jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de gain en performance (ou que nous arrivions à la limite de l'archive).
   c) Optimisation du nombre d'analogues pour ce niveau d'analogie.
   d) Ajout d'un niveau d'analogie supplémentaire et de ses variables, puis reprise de la démarche depuis (a).

3. Finalement, ajustement du nombre d'analogues de manière conjointe pour les différents niveaux d'analogie. Ceci est effectué en faisant varier itérativement le nombre d'analogues de chaque niveau.

Bontron (2004) précise que « *ce type d'algorithme, qui fait évoluer les paramètres d'un modèle selon un chemin unique, peut conduire à la meilleure solution à condition qu'il n'y ait pas d'optima locaux* ». Il émet l'hypothèse que c'est raisonnablement le cas, au vu de la régularité des cartes de pertinences établies. Il note toutefois que les points de la fenêtre optimale et des fenêtres intermédiaires feront « *nécessairement partie de la fenêtre retenue comme optimale* ».

La calibration est donc effectuée par étapes successives, permettant de déterminer les paramètres optimaux de manière systématique. Les étapes sont distinctes et les paramètres préalablement optimisés ne sont généralement pas réévalués.

La méthode est développée dans un objectif opérationnel et a vocation à fonctionner en continu, chaque jour, quelle que soit la situation. Elle a donc été optimisée en conséquence, c'est-à-dire de façon à fournir, en espérance, les meilleures prévisions au sens d'un certain score. Cette optimisation a été effectuée en prévision parfaite (les prédicteurs sont des observations réanalysées, Klein et al., 1959) et sur toute la période de l'archive (ici une cinquantaine d'années). Cela signifie que nous moyennons les scores sur l'ensemble des journées aussi bien sèches que faiblement pluvieuses ou à pluies intenses. Il y a en fait une pondération par le nombre : climatologiquement, les journées non pluvieuses sont très nombreuses (45 à 75 % pour le bassin du Rhône à l'amont du Léman, voir Figure 4.6) et il est primordial, pour maximiser l'optimisation, de bien les prévoir. Les journées de pluies intenses sont rares, mais peuvent en revanche donner un score individuel ($CRPS_j$) très pénalisant, qui implique que l'optimisation a également intérêt à bien les prévoir. Cependant, ces aspects ne sont pas explicitement contrôlés. Il faut donc garder à l'esprit que les méthodes retenues sont le résultat d'une optimisation globale, sans intervention ni recherche de pondération, sur l'ensemble des journées de la période d'apprentissage.

Chapitre 4

Données

Nous donnons dans ce chapitre une description du réseau pluviométrique de MétéoSuisse, dont les données utilisées sont issues. Nous présentons également la démarche adoptée pour la reconstitution des séries temporelles partielles, ainsi que les transformations des précipitations habituellement effectuées avant leur emploi dans la méthode des analogues. Le choix d'une période de validation est détaillé.

Ensuite, toutes les variables synoptiques que nous utiliserons en tant que prédicteurs sont présentées, de même qu'un catalogue de classifications en types de temps regroupant toutes les méthodologies européennes.

4.1 Introduction du chapitre

Ce chapitre introduit toutes les données utilisées dans la suite de ce travail. Il commence avec une description des prédictands, qui sont dans notre cas les séries de précipitations, variable que nous désirons prévoir. Nous en présenterons, entre autres, le réseau d'observation, quelques analyses statistiques unimodales, et le choix d'une période de validation. La section suivante présente les prédicteurs, qui sont les variables synoptiques que nous utilisons pour prévoir les précipitations. Enfin, un catalogue de types de temps, que nous exploiterons pour une analyse ultérieure, est brièvement introduit.

4.2 Les prédictands

Les prédictands sont les variables du temps sensible que nous désirons prévoir. Avec la méthode des analogues, la prévision se base sur une archive aussi longue que possible de ces observations. Dans le cadre du projet MINERVE, ainsi que lors des applications habituelles de la méthode des analogues, la variable d'intérêt est les précipitations.

4.2.1 Réseau pluviométrique

Il existe actuellement, dans le bassin du Rhône à l'amont du Léman, différents réseaux de mesure des précipitations, gérés par divers organismes (p.ex. l'État du Valais, l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, ou Agrometeo). Toutefois, la plupart de ces réseaux ont vu le jour récemment (dans les années 2000) et ont donc une archive trop courte pour notre étude. La base de données qui est de loin la plus fournie est celle de MétéoSuisse. Nous avons donc intégré les données de leurs stations situées dans le bassin versant, ainsi que quelques-unes se situant sur les versants opposés, dans le but d'avoir une vision un peu plus globale de la spatialisation des événements en prévision. Avec ce même objectif, nous avons acquis des données de Météo France, de Arpa (Agence régionale pour la protection de l'environnement) Vallée d'Aoste et de Arpa Piémont. Toutefois, ces données n'ont finalement pas été intégrées au présent travail, pour les raisons suivantes :

- Les séries présentent de nombreuses lacunes et discontinuités, surtout en Italie, dues à des changements de stations. Il n'a pas été considéré comme prioritaire d'investir du temps pour la reconstitution de ces données.

- Les données provenant de différents instituts, et donc résultant de divers réseaux de mesure et procédures de traitement, peuvent souffrir d'un manque d'homogénéité. Les données de précipitations journalières pour la région du Piémont sont par exemple disponibles pour la période de mesure de 9 h UTC à 9 h UTC le lendemain, alors que MétéoSuisse fournit des observations à 6 h UTC (plus exactement 5 h 40).

- Les séries temporelles de MétéoSuisse sont fournies après un contrôle de qualité. Les vérifications statistiques et les éventuelles corrections ont donc déjà été effectuées et n'ont pas besoin d'être réitérées, ce qui ne semble pas être le cas des autres fournisseurs.

– Finalement, la plupart des analyses que nous allons effectuer se limitent au bassin du Rhône, sans considération des versants opposés. Les données en périphérie du bassin sont principalement intéressantes lors de la prévision en temps réel, afin de mieux visualiser la spatialisation d'un événement. Toutefois, les mandataires du projet MINERVE disposent d'accords sur les données de MétéoSuisse, mais pas sur celles de Météo France ou des instituts Arpa italiens. Les séries de ces derniers ne pourraient donc pas être utilisées en prévision.

Les archives de précipitations journalières (6 h UTC à 6 h UTC le lendemain) de MétéoSuisse sont disponibles en grande partie pour la période 1961-2008. Les séries antérieures à 1961 n'existent pas sous forme numérique pour la plupart des stations, et les données postérieures à 2008 n'étaient pas disponibles au moment de l'acquisition des fichiers. C'est donc sur cette période qu'est constituée notre base de données. La Figure 4.1 présente la répartition spatiale des stations météorologiques d'intérêt de MétéoSuisse. Chacune de ces stations a au moins une période de mesure dans la fenêtre temporelle qui nous intéresse. Mais ces séries ne sont pour la plupart pas continues (voir Figure 4.2).

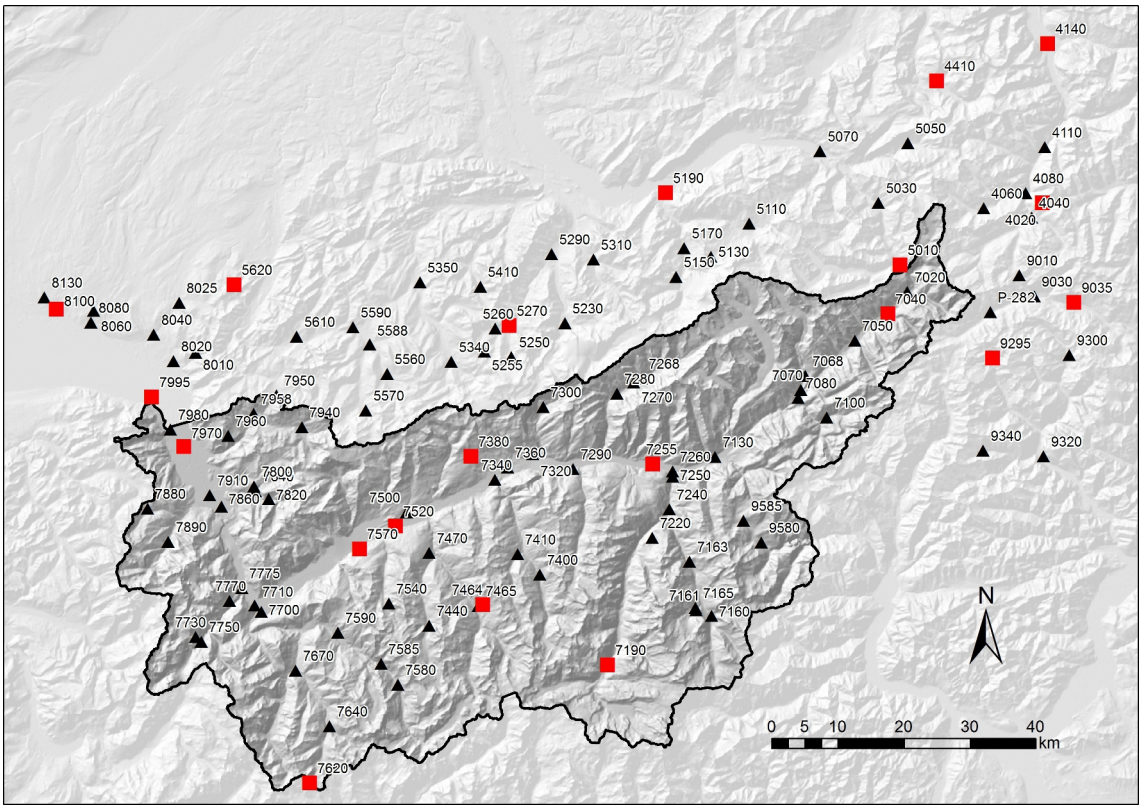


Figure 4.1 – Carte des stations de MétéoSuisse à l'intérieur et autour du bassin versant du Rhône à l'amont du Léman. Les triangles noirs représentent les stations avec des données journalières, et les carrés rouges, celles ayant été remplacées par des stations à résolution infrajournalière (Géodonnées © swisstopo – DV084371).

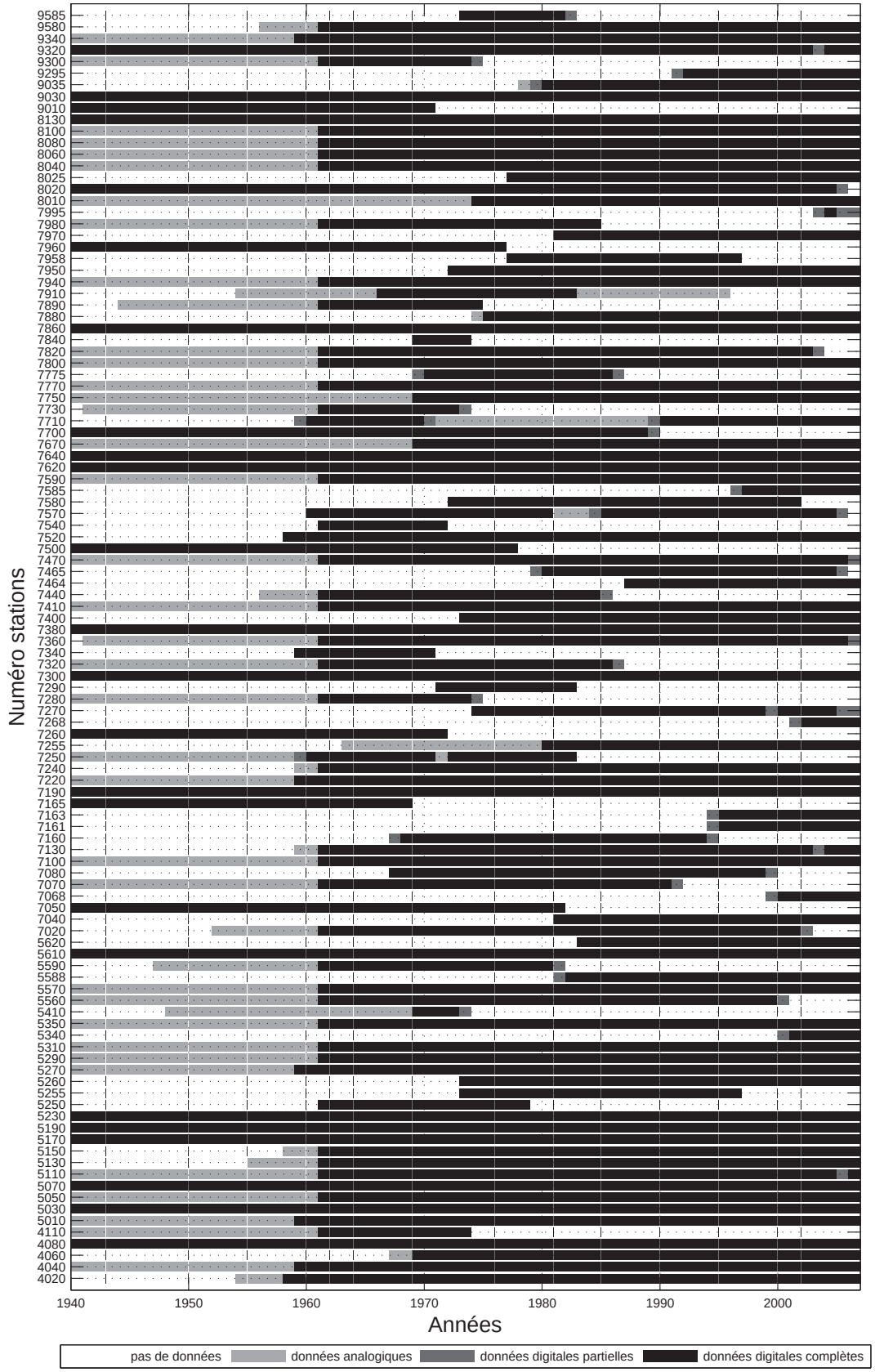


Figure 4.2 – Schéma représentant les périodes disponibles, dans les archives de MétéoSuisse, des séries pluviométriques **journalières**. Les plages blanches signifient qu'il n'y a pas de donnée disponible, les plages gris clair que les données existent uniquement sous forme analogique, les plages gris foncé que les données sont partielles, et les plages noires, que les données sont disponibles.

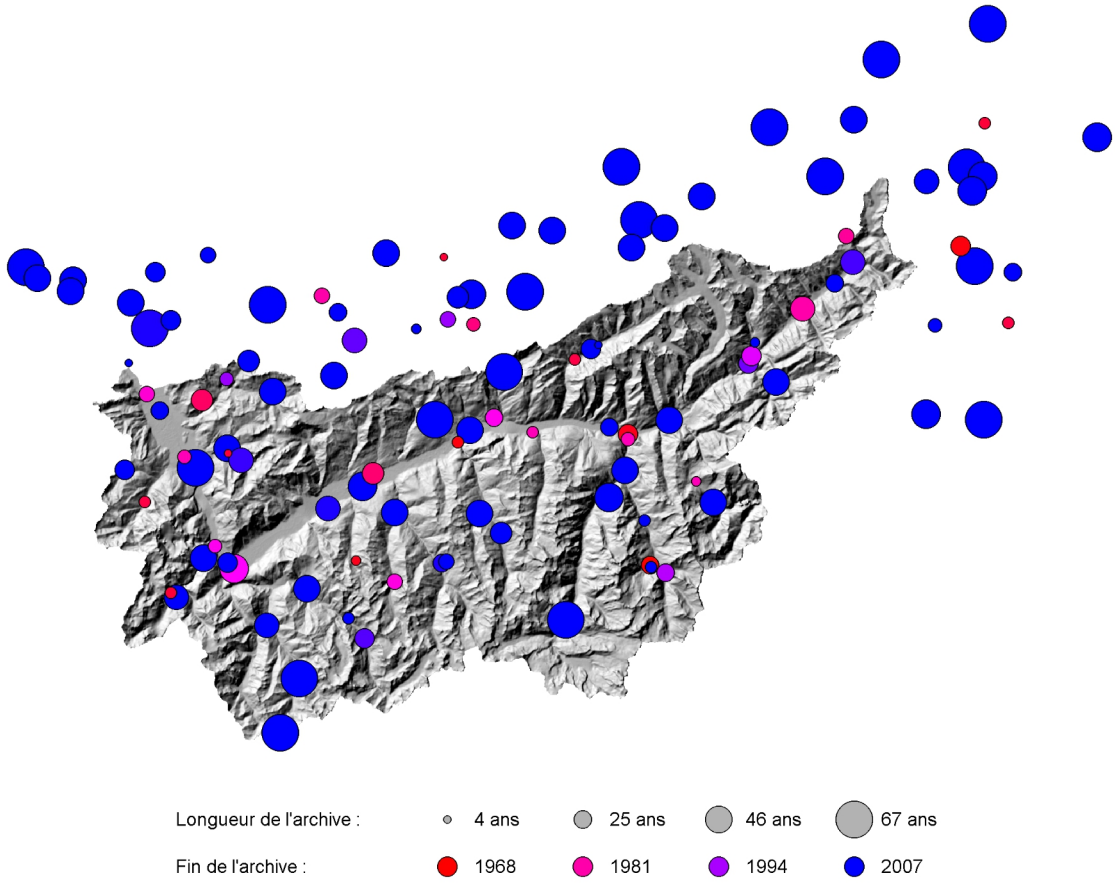


Figure 4.3 – Carte représentant les longueurs d'archives des stations météorologiques de MétéoSuisse. La taille des points est proportionnelle à la longueur de la série (depuis 1940), et la couleur est représentative de son actualité. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

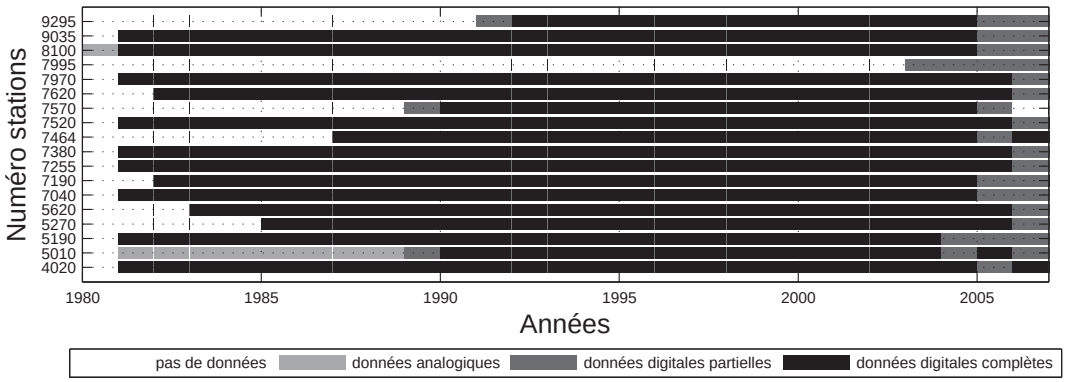


Figure 4.4 – Schéma représentant les périodes disponibles, dans les archives de MétéoSuisse, des séries pluviométriques **horaires**. Mêmes conventions que la Figure 4.2.

À partir de 1982, des stations automatiques infrajournalières ont été installées, permettant des mesures à un pas de temps beaucoup plus fin, à savoir 10 minutes (anciennement réseau ANETZ). Nous avons constitué une base de données horaire avec ces séries. Le réseau automatique (carrés rouges dans la Figure 4.1) est très épars par rapport au réseau journalier (triangles noirs). Actuellement, ces deux réseaux sont remplacés par un nouveau réseau homogène entièrement automatisé, nommé SwissMetNet (MétéoSuisse, 2010).

La Figure 4.4 présente la disponibilité des séries horaires. Les séries horaires présentent un intérêt pour tester la méthode des analogues avec une archive infrajournalière à pas de temps de 6 h (voir section 8.3), ou une fenêtre temporelle glissante (voir section 8.2). Il est en effet nécessaire de disposer de données de bonne qualité, et sur une période importante, pour évaluer les gains potentiels apportés par une archive pluviométrique à plus fine résolution temporelle.

4.2.2 Reconstitution des séries partielles

Un travail de reconstitution de plusieurs séries de précipitations journalières a été nécessaire afin de disposer de séries complètes et d'un réseau aussi dense que possible. La reconstitution peut concerner les cas suivants :

- La série a quelques petits trous : les données manquantes peuvent être complétées à partir des stations les plus corrélées, sur la base d'une régression linéaire préalablement établie (la constante de la régression est forcée à 0 ; même approche que Djerboua, 2001).
- La série est partielle, car la station a été installée après le début de la période d'intérêt ou a été retirée avant la fin de celle-ci : comme dans le cas précédent, la période manquante peut être complétée à partir des stations les plus corrélées.
- La série est partielle, car la station a été déplacée : les deux stations peuvent être assemblées sans correction, pour autant que la distance entre les deux emplacements et la différence d'altitude soient minimes.

La régression linéaire entre les stations (Table A.1 et A.2 de l'Annexe A) est établie pour les jours où les précipitations sont non nulles à la station de référence. La régression linéaire est forcée par l'origine, afin de réduire le biais sur les petits cumuls. Au final, les précipitations restaurées à la station d'intérêt sont donc un assemblage de séries mises à l'échelle par leur facteur d'adaptation respectif.

Les stations choisies pour compléter les données d'une série partielle sont sélectionnées en fonction de la distance à la station d'intérêt, de la différence d'altitude et du coefficient de corrélation entre les séries. Dans le cas d'assemblage de séries de différentes stations (Table A.3 de l'Annexe A), l'emplacement conservé est celui de la station qui est encore en fonction. Ceci permettra aux opérateurs du projet MINERVE de facilement mettre la base de données à jour avec les nouvelles observations, sans transformation. Les stations intégrées à notre base de données sont cartographiées dans la Figure 4.5.

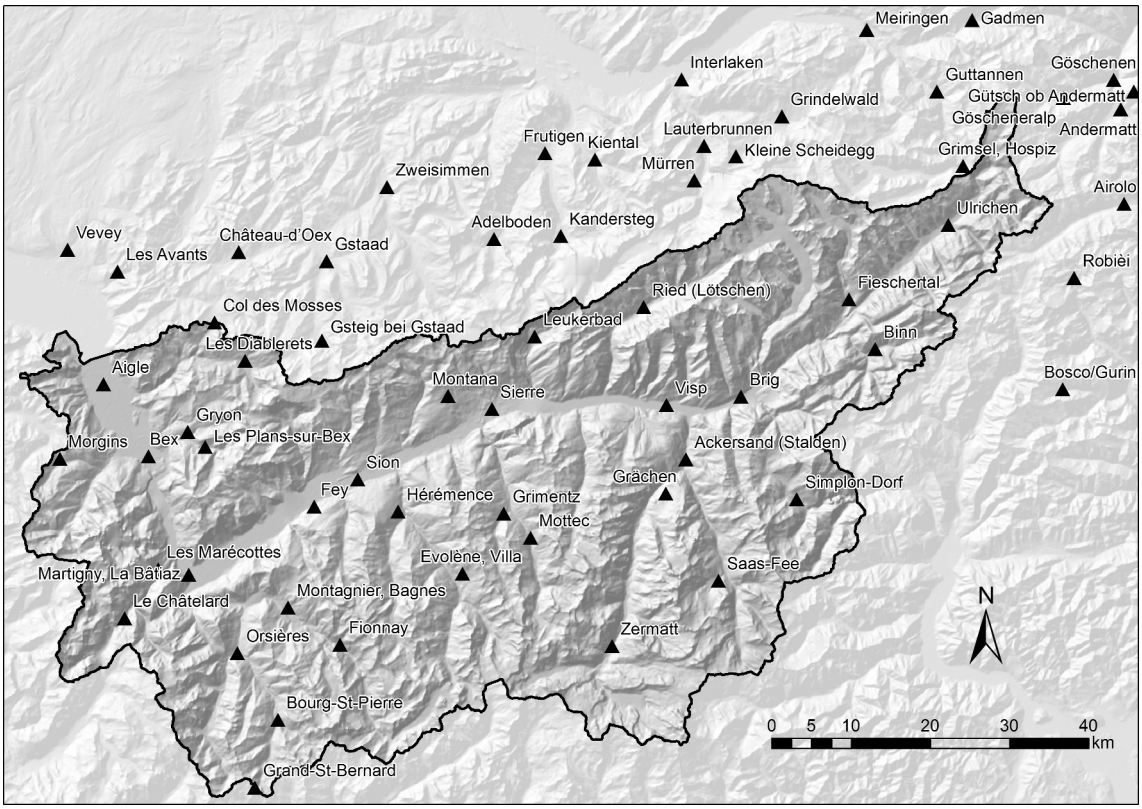


Figure 4.5 – Carte des stations avec une série complète ou reconstituée et intégrée à la base de données du présent travail. (Géodonnées © swisstopo – DV084371).

4.2.3 Statistiques des séries temporelles

Nous avons calculé la fréquence des pluies nulles pour chaque station de notre base de données, afin de vérifier la cohérence des séries reconstituées. La Figure 4.6 illustre la répartition spatiale de cette caractéristique, qui est globalement cohérente. Nous nous sommes intéressés à quelques stations pouvant être supposées biaisées après analyse visuelle :

- Les Plans-sur-Bex : la série pourrait contenir trop de zéros lorsque nous la comparons avec Gryon. Pourtant, ce n'est pas le cas, puisque les données ont été reconstituées à 12.2 % sur la base de celles de Gryon.
- Orsières : cette station a été reconstituée à 16.7 % à l'aide des données de Montagnier. La différence apparente avec celle-ci n'est donc pas due à la reconstitution.
- Visp : cette station n'a été complétée qu'à 4.2 % à l'aide d'autres stations très proches ne faisant pas partie de la sélection finale. La petite différence avec Brig ou Ackersand doit donc dépendre de la climatologie locale.

Le milieu alpin est caractérisé par de très grandes différences spatiales des intensités de précipitations. Les valeurs pour différents temps de retour sont données dans l'Annexe B. La pluie journalière décennale est représentée dans la Figure 4.7. Nous retrouvons alors la structure connue d'un maximum au Tessin débordant aux stations de Binn et du Simplon, ainsi qu'une valeur importante au col du Grand-Saint-Bernard. Nous pouvons finalement noter que la station des Marécottes présente une pluie décennale relativement élevée.

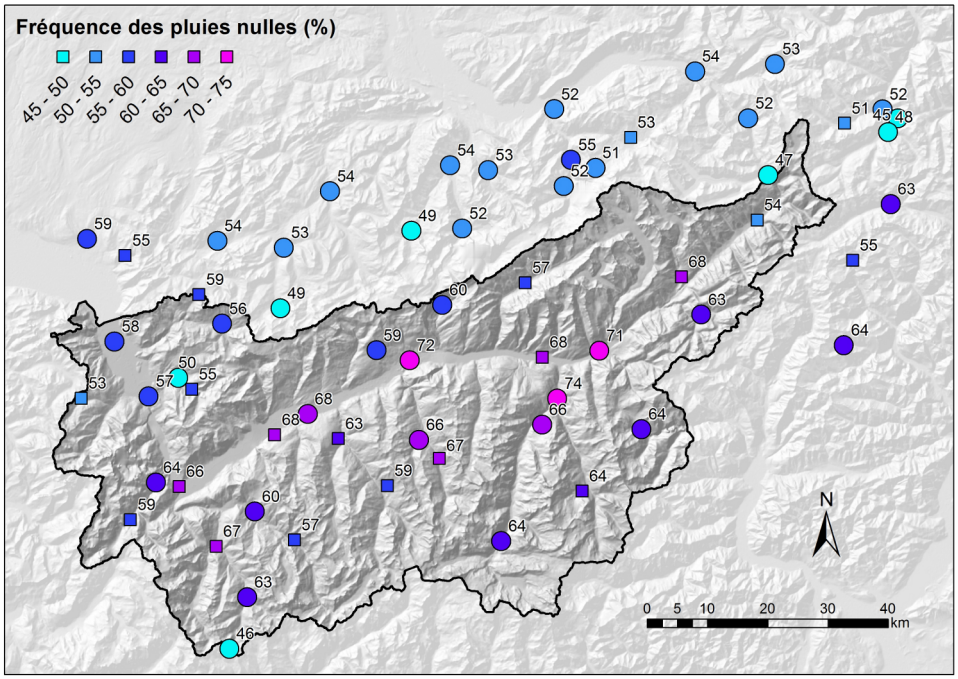


Figure 4.6 – Carte de la fréquence (%) de pluies nulles aux stations considérées. Les ronds représentent les stations ayant une série originale complète ou presque (moins de 2 mois de reconstitution), et les carrés, les stations ayant subi une reconstitution substantielle (Géodonnées © swisstopo – DV084371).

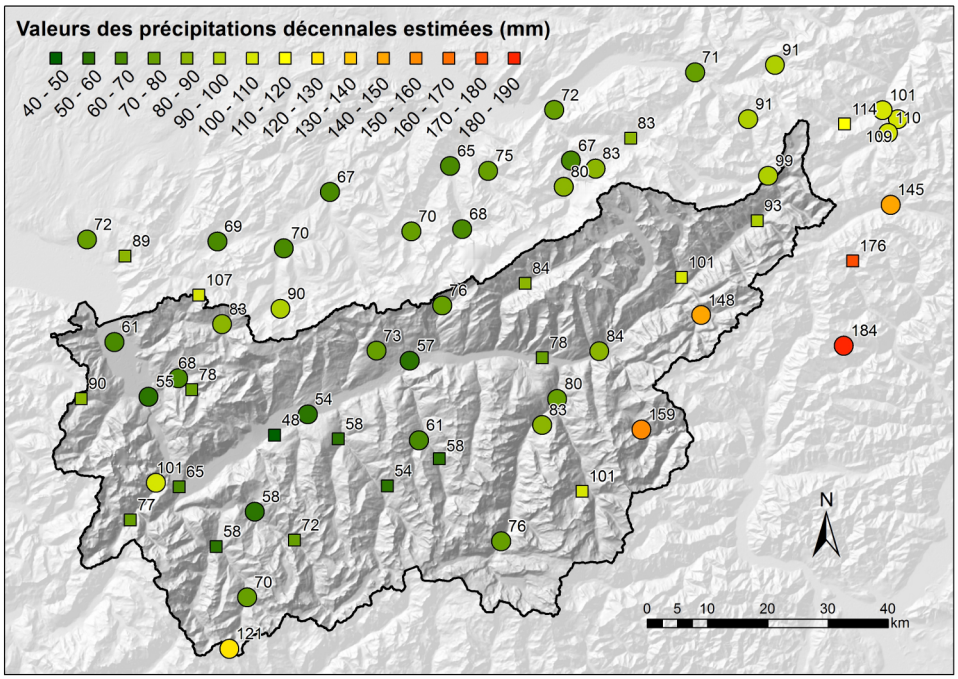


Figure 4.7 – Carte des valeurs de la pluie journalière décennale (mm) aux stations considérées. Pour de la forme des symboles, voir détails de la Figure 4.6 (Géodonnées © swisstopo – DV084371).

4.2.4 Transformation des précipitations

Les données de précipitations ne sont habituellement pas considérées telles quelles, mais sont soumises à deux transformations (Bontron, 2004) :

- Afin de rendre les valeurs comparables d'une région/station à une autre, les séries de précipitations sont dans un premier temps normalisées par une pluie de référence. Tout comme l'avait proposé Djerboua (2001, voir section 3.2.2), les précipitations sont normalisées par la pluie décennale. Nous pouvons ainsi mieux évaluer la signification d'un volume de précipitations pour une région donnée (en proportion de la décennale).
- Les données normalisées sont ensuite habituellement transformées en considérant la racine carrée de celles-ci. Cette transformation a pour but de réduire le poids des fortes valeurs et d'augmenter celui des valeurs normales à faibles. Cela aura une influence sur les scores d'évaluation, qui pourraient alors préférer une autre paramétrisation de la méthode (voir section 5.5.2).

Le premier traitement est appliqué à nos données pluviométriques. Les valeurs de précipitations décennales sont calculées à l'aide d'un ajustement de la loi de Gumbel sur les maxima annuels de chaque station ou groupement.

Cependant, en raison de l'objectif du projet MINERVE dans lequel s'inscrit ce travail, nous n'appliquons pas la racine carrée à ces valeurs. En effet, dans un cadre de prévision des crues, nous ne désirons pas réduire la qualité des prévisions des fortes pluies, même si cela doit éventuellement se faire au détriment des petites.

4.2.5 Réanalyses de précipitations

Quand notre cible est une station de mesure ponctuelle, l'archive est constituée de la série observée, éventuellement corrigée et homogénéisée. En revanche, quand la cible est constituée d'un domaine spatial étendu (région climatologiquement « homogène » ou bassin versant), le problème se pose d'élaborer la série des pluies moyennes représentatives de cette entité. Or, la qualité de la prévision par analogie peut dépendre de la méthode utilisée pour élaborer la variable cible. Les méthodes simples consistent à effectuer une moyenne arithmétique, ou pondérée (p.ex. par la méthode de Thiessen), des valeurs ponctuelles mesurées sur la région. Ces méthodes ne sont toutefois pas recommandées en milieu alpin.

Des réanalyses de précipitations journalières résultant des travaux de Gottardi (2009) nous ont été fournies sur la région des Drances. Celles-ci ont été élaborées à une résolution de 1 km^2 à l'aide d'une méthode d'interpolation nommée SPAZM (*spatialisation en zones de montagne*), qui se base sur une classification des circulations atmosphériques et utilise comme ébauche les champs de précipitations moyens pour les différentes classes respectives (voir Figure 4.8). Cette approche permet de tenir compte des courants atmosphériques dominants durant un événement, et spatialise donc les précipitations de manière plus cohérente sur les versants au vent et sous le vent que des spatialisations établies sur l'ensemble des situations météorologiques. La classification des circulations utilisée a été développée par

EDF (Électricité de France) pour le territoire français (Garavaglia et al., 2010), et contient les 8 classes données dans la Figure 4.8.

Les champs de précipitations sont générés en tenant compte des gradients altimétriques (linéaires) locaux propres à chaque classe de circulation atmosphérique. Cette première phase, élaborée sur une période où les réseaux de mesures étaient particulièrement denses, donne lieu à des champs moyens pour chaque type de temps. Ensuite, ces champs sont adaptés à chaque jour de l'archive en appliquant des facteurs d'échelle locaux déterminés sur la base des observations aux stations. Enfin, les résidus sont krigés pour fournir l'estimation finale (Gottardi et al., 2012).

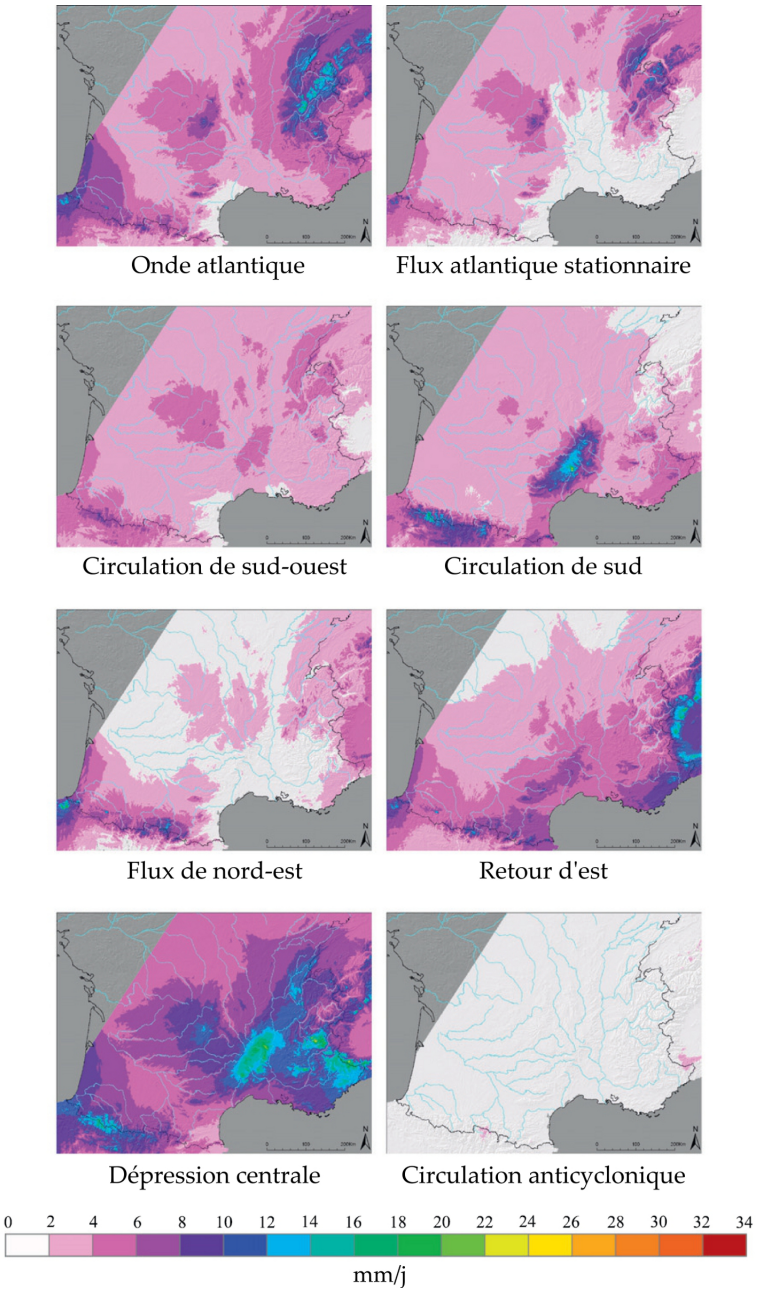


Figure 4.8 – Champs moyens des précipitations journalières correspondant aux différentes classes de circulation atmosphérique, calculés par la méthode SPAZM (d'après Gottardi et al., 2012).

Les vérifications (validation croisée) et les comparaisons avec d'autres méthodes d'interpolation ont montré l'intérêt de l'approche SPAZM, surtout pour les régions montagneuses, où elle semble spatialiser les précipitations de manière cohérente avec l'altitude et les influences atmosphériques (Gottardi et al., 2012).

Les séries temporelles utilisées pour l'établissement de ces réanalyses proviennent de plusieurs réseaux de mesure des précipitations journalières, ainsi que de totalisateurs pour les régions de haute altitude. Le jeu de données utilisé par Gottardi (2009) comprend des stations de MétéoSuisse situées dans une bande de 30 à 50 km au-delà de la frontière française (pour la période de 1953 à 2005). Ainsi, une partie du bassin supérieur du Rhône est intégrée à l'archive, ce qui nous permet une évaluation pour le bassin des Drances, mais pas pour la totalité de la zone d'étude. Notre intérêt sera donc d'évaluer la plus-value supposée d'un tel jeu de données par rapport à une régionalisation plus simple (moyenne arithmétique) des précipitations.

4.2.6 Choix d'une période de validation

Une période de validation indépendante de la période de calibration est indispensable pour évaluer les améliorations réelles apportées à la méthode, ainsi que pour éviter de surparamétrer le modèle. Cette période est fréquemment considérée comme unique et continue, pour autant que la série temporelle ne présente pas de tendance. Dans le cas de notre série de précipitations d'une durée de 48 années, il est possible qu'une tendance soit présente. Celle-ci peut être par exemple l'influence d'un éventuel changement climatique, ou, de manière plus importante, le changement des appareils de mesure, ou encore l'évolution du réseau (pour les séries régionalisées).

L'approche choisie ici sera identique à celle de Ben Daoud (2010). Afin d'éviter un éventuel biais, la sélection de la période de validation est répartie de manière homogène sur toute la série. Ainsi, nous sélectionnons une année tous les six ans pour la validation, ce qui représente un total de huit ans pour la validation et de quarante pour la calibration.

Table 4.1 – Séquences d'années possibles pour la période de validation.

Périodes de validation possibles					
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1961	**1962**	1963	1964	1965	1966
1967	**1968**	1969	1970	1971	1972
1973	**1974**	1975	1976	1977	1978
1979	**1980**	1981	1982	1983	1984
1985	**1986**	1987	1988	1989	1990
1991	**1992**	1993	1994	1995	1996
1997	**1998**	1999	2000	2001	2002
2003	**2004**	2005	2006	2007	2008

Nous avons donc six possibilités pour choisir les huit années de la période de validation (Table 4.1). Une approche très rigoureuse pourrait consister à considérer toutes ces possibilités et de systématiquement calibrer et évaluer les algorithmes sur les périodes correspondantes (*cross-validation*). Cette technique est très exigeante en temps de calcul et les résultats sont difficiles à synthétiser et à présenter. C'est pourquoi elle est écartée au profit d'une période de validation unique présentant une climatologie au plus proche de la série complète.

Les critères des séries de précipitations analysés pour chacune des périodes de validation possibles sont :

- la moyenne ;
- le nombre de jours à précipitations nulles ;
- le quantile 75 % ;
- le quantile 95 % ;
- le maximum ;
- l'écart-type.

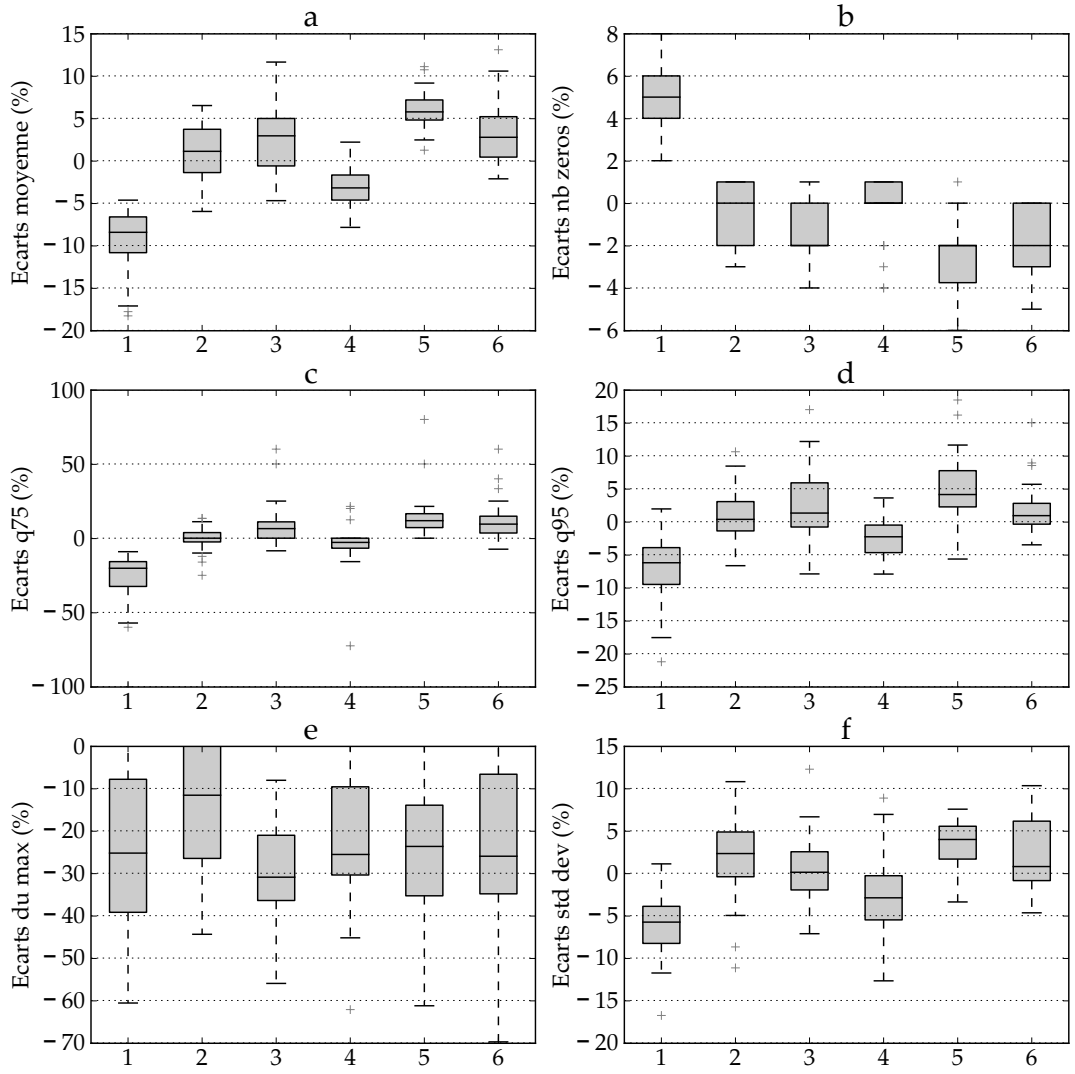


Figure 4.9 – Écarts normalisés de certaines caractéristiques des précipitations journalières entre la série totale et les différentes périodes de **validation**. Les statistiques présentées sont (a) la moyenne, (b) le nombre de zéros, les quantiles (c) 75 % et (d) 95 %, (e) le maximum, et finalement (f) l'écart type. Les boîtes sont délimitées par les quantiles 25 et 75 %, et les moustaches par le dernier point dans la gamme 1.5 x l'écart interquartile. Les points restants se situent en dehors de cet intervalle.

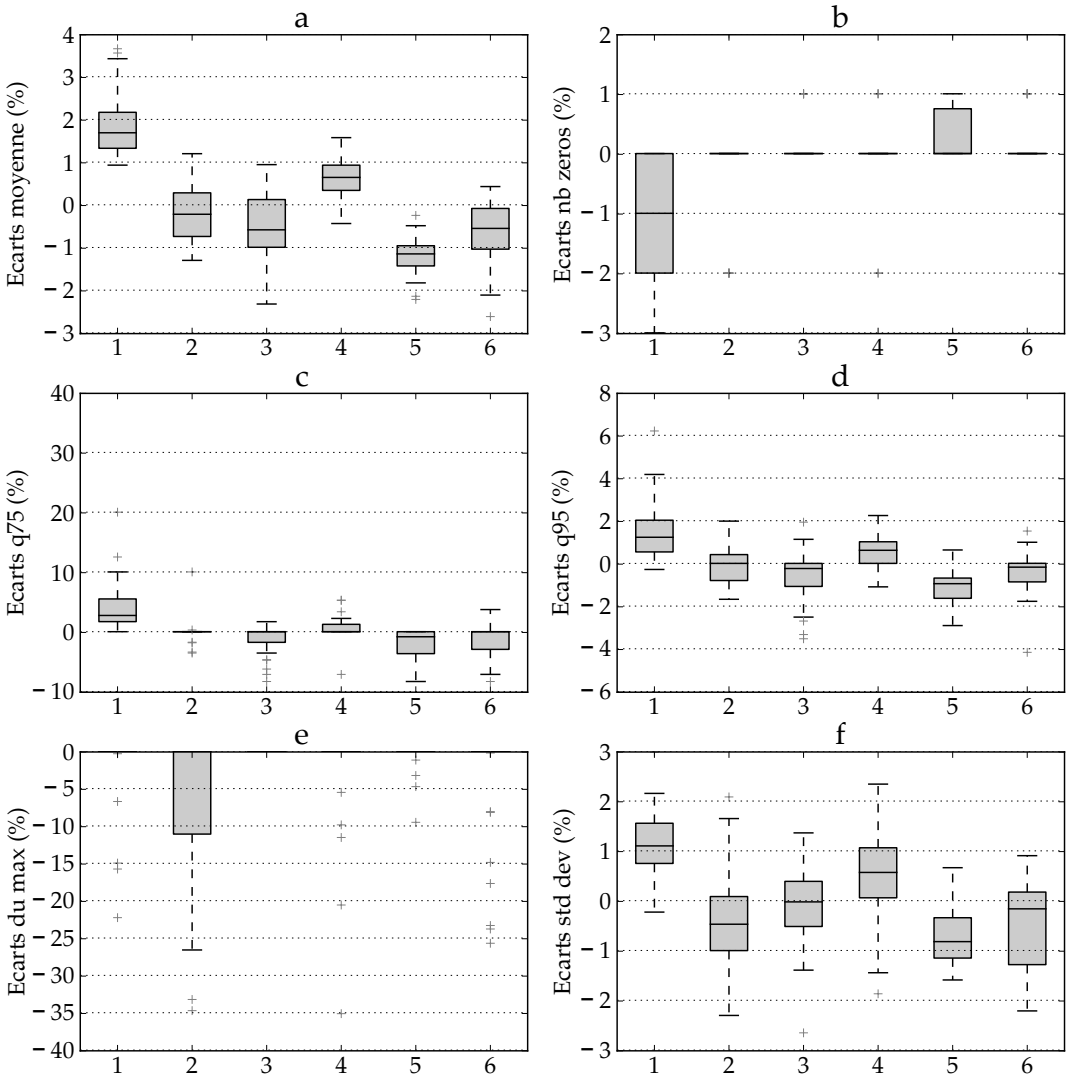


Figure 4.10 – Écarts normalisés de certaines caractéristiques des précipitations entre la série totale et les différentes périodes de **calibration**. Mêmes conventions que Figure 4.9.

La Figure 4.9 présente les résultats des analyses des 6 périodes de validation possibles. Chacun des critères listés précédemment est calculé de la manière suivante :

1. Les données de la période de validation à évaluer sont extraites pour chacune des 34 stations situées dans le bassin.
2. Les différentes statistiques sont calculées sur cet échantillon, pour toutes les stations.
3. Ces valeurs sont exprimées relativement à celles calculées sur l'ensemble de la série temporelle : $100 * (xValid - xTot)/xTot$. Ce calcul est effectué pour chaque station indépendamment.
4. Les résultats de toutes les stations sont synthétisés sous la forme de boîte à moustaches (*boxplot*) représentant les changements des critères étudiés entre la période de validation et la série complète.

La période numéro 2 est choisie (1962, 1968, 1974, 1980, 1986, 1992, 1998, 2004), car ses différences par rapport à la série totale sont inférieures sur la plupart des critères. Ceci est également vrai pour la période de calibration correspondante d'une durée de 40 ans (Figure 4.10), de laquelle les 8 années de validation ont été exclues. Dans la suite de ce travail, ces différentes périodes sont appliquées de la manière suivante :

- Lors des calculs de calibration, les situations cibles et les situations candidates sont extraites de la période de calibration (excluant la période de validation).
- Pour la période de validation, les situations cibles (à prévoir) sont extraites de la période de validation, alors que les situations candidates (analogues potentielles) le sont de la période de calibration (voir Bontron, 2004; Ben Daoud, 2010).
- La période de validation est donc indépendante, car elle n'est jamais utilisée comme source de situations candidates à l'analogie.

4.3 Les prédicteurs

Les prédicteurs sont les variables météorologiques utilisées pour prévoir les précipitations. La plupart de ces variables caractérisent un état « instantané » de l'atmosphère, déduites de mesures (radiosondages, entre autres) effectuées dans une petite fenêtre horaire. À l'inverse, le prédictand précipitations est une variable cumulée sur 6, 12, ou souvent 24 h.

Les séries de prédicteurs doivent également permettre de constituer une archive la plus longue possible. La longueur temporelle nécessaire dépend de la fenêtre spatiale considérée pour l'analogie. Ainsi, une cinquantaine d'années devraient suffire pour une fenêtre spatiale de 20° de côté, alors que la longueur nécessaire pour des domaines plus grands deviendrait vite démesurée (Van Den Dool, 1994; Bontron, 2004).

Il est nécessaire de rassembler plusieurs variables d'analogie liées aux processus de précipitations. Idéalement, toute variable ayant une influence sur les précipitations devrait être intégrée à la méthode (Bontron, 2004). Cependant, en augmentant le nombre de variables, la probabilité de trouver une bonne analogue (c.-à-d. sur l'ensemble des variables) diminue. De plus, il existe un risque de surparamétrisation de la méthode pouvant résulter en des pertes de performances en validation. Le bon équilibre doit donc être trouvé, à savoir celui qui maximise l'information utile pour la prévision des précipitations, et ceci de manière robuste.

Les archives doivent aussi être homogènes sur toute la période afin que les données soient comparables. En cas de discontinuité dans une série de prédicteurs, la sélection peut être biaisée. Pour cette raison, les variables choisies doivent être robustes (Bontron, 2004). Premièrement, elles ne doivent que peu dépendre du système météorologique dont elles sont issues (radiosondage, satellites, etc.) ou du modèle météorologique utilisé pour les réanalyser, et deuxièmement, elles doivent avoir une échelle spatiale adaptée pour que les changements dans le réseau de mesure aient un effet réduit (Bontron, 2004). De plus, leur valeur doit être cohérente et doit contenir un minimum d'erreurs.

4.3.1 Réanalyses 1 NCEP/NCAR

Les données des réanalyses 1 NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001) – dénommées par la suite réanalyses – constituent les prédicteurs de base du présent travail. Ces réanalyses sont issues d'un système d'analyse/prévision dans le cadre d'un projet commun du NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) et du NCAR (*National Center for Atmospheric Research*). Les principales données météorologiques disponibles (réseaux de mesure au sol, données de radiosondages, mesures effectuées par des bateaux ou des avions, données satellitaires, etc.) ont été assimilées par un modèle météorologique unique. Celui-ci a donc simulé l'évolution des variables de l'atmosphère, dans un respect des lois physiques, tout en restant au plus proche des observations. Le modèle utilisé est un modèle global avec une troncature horizontale T62 (environ 210 km, voir Figure 4.12) et 28 niveaux verticaux, figé à l'état de l'art de 1995 (Bontron, 2004). Comme dans tout modèle global, les processus physiques principaux (convection, précipitations, radiation, etc.) sont paramétrisés. La procédure d'élaboration de ces réanalyses comprend une phase préliminaire de traitement des données (correction d'erreurs, formatage, etc.), ainsi qu'une étape postérieure de contrôle de qualité et de comparaison avec des produits provenant d'autres institutions.

Ces réanalyses sont disponibles sur la période de 1948 au présent. L'archive n'est pas parfaitement homogène, car les systèmes de mesure n'ont cessé de changer au fil des années. Il y a deux principales discontinuités (Kalnay et al., 1996) : la première en 1957, en raison

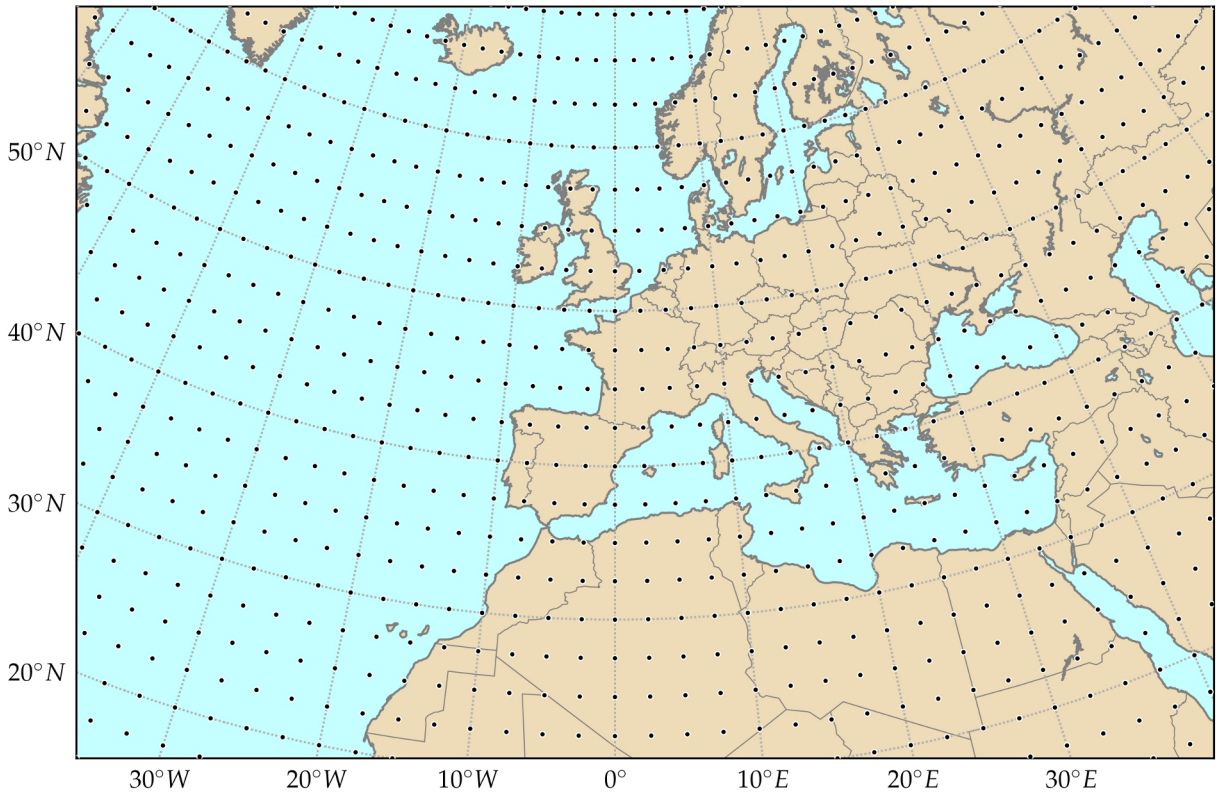


Figure 4.11 – Représentation de la grille régulière des réanalyses NCEP/NCAR, avec une résolution de 2.5° .

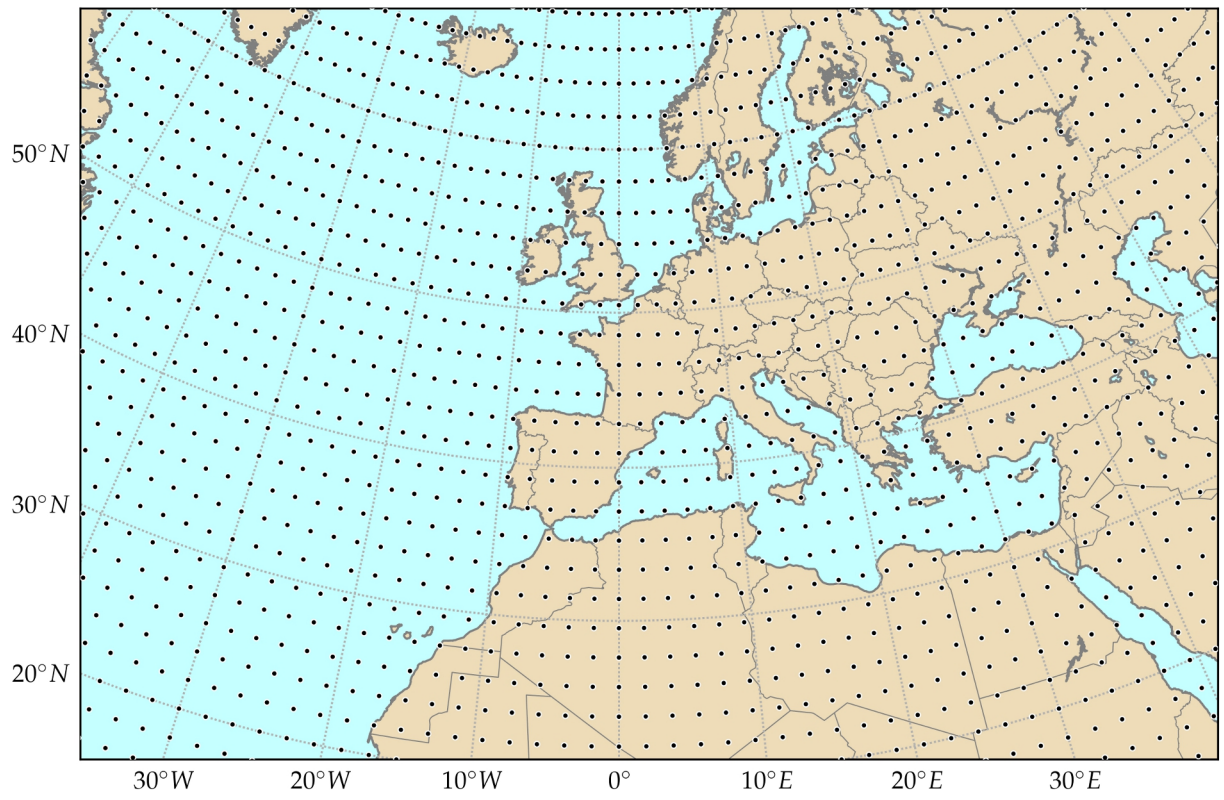


Figure 4.12 – Représentation de la grille gaussienne T62 des réanalyses NCEP/NCAR.

de différences dans les heures de mesure des variables et du début des radiosondages, et la seconde en 1979, année à partir de laquelle les données satellitaires ont commencé à apparaître.

Ce second changement a un impact sur les variables situées dans l'hémisphère sud ou dans les régions polaires, ainsi que sur celles se trouvant au-delà de 200 hPa. Une étude comparative a montré que la plupart des variables situées dans l'hémisphère nord ne sont que peu influencées en raison de l'assimilation des radiosondages, déjà très riches en information (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001). Des erreurs humaines identifiées tardivement sont également présentes dans ces archives (voir Kistler et al., 2001).

Les fichiers sont disponibles avec un pas de temps de 6 h, une résolution de 2.5° en latitude et longitude pour les grilles régulières (Figure 4.11) et une troncature T62 pour les grilles gaussiennes (Figure 4.12), constituées de 192x94 points. Il faut bien garder en tête la résolution de ces réanalyses, et relativiser leur signification à cette échelle. Il se trouve en effet tout juste un point de la grille régulière en Suisse, et aucun dans le bassin supérieur du Rhône. De plus, les Alpes culminent à 1151 m dans le modèle météorologique utilisé.

Les fichiers des réanalyses ont différentes résolutions verticales. La hauteur du géopotentiel est par exemple disponible pour 17 niveaux de pression atmosphérique (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa). D'autres variables sont disponibles sur moins de niveaux, ou pour la surface terrestre, ou encore pour toute la tranche de l'atmosphère.

Les variables sont plus ou moins influencées par les données ou par le modèle qui les a générées. Une classification empirique est proposée par Kalnay et al. (1996) pour qualifier la robustesse des données :

(A) Les variables dérivent principalement des observations, le modèle a peu d'influence. C'est donc la classe la plus robuste.

(B) Les observations ont toujours une influence sur les données, mais le modèle a également une influence importante.

(C) Les observations n'ont pas d'influence directe sur les variables (peu ou pas d'observations de ces variables), qui dérivent uniquement du modèle (celui-ci étant forcé par les données pour rester proche de l'état de l'atmosphère).

(D) Les variables ont des valeurs fixes basées sur la climatologie et ne dépendent pas du modèle.

Une influence importante du modèle est un problème, principalement lorsque nous comparons des variables issues de deux modèles différents. Une telle comparaison est risquée, puisque les variables n'ont certainement pas la même climatologie, et peuvent contenir un biais. Ce problème apparaît lors de la prévision en temps réel, laquelle se base sur des fichiers résultant de modèles globaux différents pour rechercher les situations analogues contenues, pour leur part, dans les séries des réanalyses.

Une large sélection a été effectuée dans les nombreuses variables des réanalyses. Les données choisies sont des variables à plusieurs niveaux de pression (Table 4.2), de surface (Table 4.3), ou caractérisant des flux à la surface (Table 4.4). La sélection exclut les données du type D, ainsi que celles qui ne présentent pas d'intérêt pour notre étude. Elle inclut en revanche de nombreuses variables dont la capacité prévisionnelle est discutable, mais qui seront tout de même évaluées. Les données choisies ne comprennent pas seulement des variables de la classe A, mais également des classes B et C. Les données de ces deux classes sont dans une large mesure dépendantes du modèle utilisé. Il conviendra donc d'être vigilant en les comparant avec les données d'autres modèles. Néanmoins, elles peuvent présenter un intérêt avec l'émergence des approches de reprévision (*reforecast*) des décennies précédentes à l'aide des modèles globaux utilisés en prévision. En comparant les archives et les prévisions issues de la même version du modèle, une utilisation de ces données devient intéressante.

Table 4.2 – Sélection de variables à plusieurs niveaux de pression des réanalyses 1 NCEP/NCAR. Le nom original, l'unité et la classe sont donnés pour chacune des variables.

Variable	**Nom original**	**Unité**	**Cl.**
Température de l'air	*Air Temperature*	°K	A
Hauteur du géopotentiel	*Geopotential Height*	m	A
Humidité relative	*Relative Humidity*	%	B
Humidité spécifique	*Specific Humidity*	kg/kg	B
Vitesse verticale	*Omega (Pressure Vertical Velocity)*	Pascals/s	B
Composante U du vent	*U-Wind*	m/s	A
Composante V du vent	*V-Wind*	m/s	A

Table 4.3 – Sélection de variables de surface des réanalyses 1 NCEP/NCAR. Le nom original, l'unité et la classe sont donnés pour chacune des variables.

Variable	**Nom original**	**Unité**	**Cl.**
Température de l'air proche de la surface	*Air Temperature at sigma level 995*	°K	B
Indice de soulèvement à la surface	*Surface lifted index*	°K	B
Meilleur indice de soulèvement des 4 couches	*Best (4-layer) lifted index*	°K	B
Vitesse verticale proche de la surface	*Omega (Pressure Vertical Velocity)*	Pascals/s	B
Température potentielle proche de la surface	*Pot. Temperature at sigma level 995*	°K	B
Eau précipitable	*Precipitable Water*	kg/m^2	B
Pression	*Pressure*	Pascals	B
Humidité relative proche de la surface	*Relative Humidity at sigma level 995*	%	B
Pression au niveau de la mer	*Sea Level Pressure*	Pascals	A
Composante U du vent proche de la surface	*U-Wind at sigma level 995*	m/s	B
Composante V du vent proche de la surface	*V-Wind at sigma level 995*	m/s	B

Table 4.4 – Sélection de variables de flux de surface des réanalyses 1 NCEP/NCAR. Le nom original, l'unité et la classe sont donnés pour chacune des variables.

Variable	**Nom original**	**Unité**	**Cl.**
Température de l'air à 2 m	*Air Temperature 2 m*	°K	B
Taux potentiel d'évaporation	*Potential evaporation rate*	W/m^2	C
Humidité spécifique à 2 m	*Specific humidity at 2 meter*	kg/kg	B
Température de la surface	*Skin Temperature*	°K	C
Température de la couche 0-10 cm	*Temperature of 0-10cm layer*	°K	C
Température de la couche 10-200 cm	*Temperature of 10-200cm layer*	°K	C
Température à 300 cm	*Temperature at 300cm*	°K	C
Composante U du vent à 10 m	*U-wind at 10 m*	m/s	B
Composante V du vent à 10 m	*V-wind at 10 m*	m/s	B
Taux de précipitations convectives	*Convective precipitation rate*	$kg/m^2/s$	C
Flux incident du rayonnement thermique	*Downward longwave radiation flux*	W/m^2	C
Flux incident du rayonnement solaire	*Downward solar radiation flux*	W/m^2	C
Flux de chaleur au sol	*Ground heat flux*	W/m^2	C
Flux net de chaleur latente	*Latent heat net flux*	W/m^2	C
Flux incident direct du proche IR	*Near IR beam downward solar flux*	W/m^2	C
Flux incident diffux du proche IR	*Near IR diffuse downward solar flux*	W/m^2	C
Rayonnement net en grandes long. d'ondes	*Net longwave radiation*	W/m^2	C
Rayonnement net en courtes long. d'ondes	*Net shortwave radiation*	W/m^2	C
Taux de précipitations	*Precipitation rate*	$Kg/m^2/s$	C
Flux net de chaleur sensible	*Sensible heat net flux*	W/m^2	C

Ces réanalyses ont été choisies de préférence aux réanalyses européennes ERA-40 (Uppala et al., 1999) du centre européen ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) pour leur accessibilité (aucune restriction d'usage), leur facilité d'acquisition (par *ftp*, *http*, ou *web service*), ainsi qu'en raison de leur utilisation fréquente dans l'application de la méthode des analogues et des études climatologiques. Bien que l'utilisation de données européennes pourrait sembler plus pertinente, celles-ci ne sont disponibles gratuitement que dans un cadre de recherche, et n'auraient donc pas pu être utilisées en opérationnel.

Ben Daoud (2010) a comparé les performances de la méthode des analogues avec les deux archives, et a trouvé une très légère amélioration en utilisant les données européennes (résolution de 1.125°), qui n'est cependant pas assez substantielle pour justifier un changement d'archive. Par ailleurs, Ben Daoud (2010) a identifié des incohérences dans l'humidité relative des réanalyses ERA-40. De plus, lors de l'utilisation opérationnelle de la méthode, et pour les mêmes raisons (accès libre, pas de restriction d'usage), nous utiliserons les prévisions du modèle GFS américain (voir section 4.3.2). Celui-ci a la même base que celui employé pour l'élaboration des réanalyses (mais avec une résolution plus fine). La climatologie des prédicteurs acquis en prévision et des prédicteurs issus des archives présente donc davantage de similarité. Enfin, l'utilisation de la même archive que Bontron (2004) et Ben Daoud et al. (2009) nous a permis, en appliquant nos algorithmes sur un bassin commun, de valider et de vérifier nos codes au début de notre travail, avant de les faire ensuite évoluer.

Un nouveau jeu de données, les réanalyses 2 de NCEP/DOE (*Department of Energy*), est actuellement disponible, mais à partir de 1979 uniquement (Kanamitsu et al., 2002). Celles-ci constituent une mise à jour des réanalyses 1, avec correction des erreurs identifiées, produites par un modèle plus récent. Les modifications principales sont : une meilleure assimilation de certaines données dans l'hémisphère sud, une amélioration des températures proches du sol en hiver, de la couverture neigeuse, de l'humidité du sol, de l'albédo, de certaines couvertures nuageuses, des précipitations (surtout convectives) et des flux radiatifs (Kanamitsu et al., 2002). Toutes les variables ne sont donc pas forcément meilleures (certaines semblent même avoir été dégradées), et il conviendrait de changer d'archive si l'une de ces variables corrigées est primordiale. Ces nouvelles réanalyses ont été brièvement évaluées (sur les méthodes de référence R1 et R2, soit avec les variables de hauteur du géopotentiel, de l'humidité relative, et de l'eau précipitable) et n'ont pas engendré d'améliorations significatives de la méthode des analogues (résultats non présentés). Elles ne seront donc pas exploitées dans la suite du présent travail. Toutefois, de nouvelles réanalyses avec une résolution bien plus fine, un modèle récent, et des techniques d'assimilation plus avancées sont au programme du NCEP. Un tel jeu de données présente un grand intérêt pour la méthode des analogues, d'autant plus qu'il réduit l'écart en opérationnel entre les variables prévues par le modèle global et les archives, et devra impérativement être évalué.

4.3.2 Prévisions GFS

Les prévisions en temps réel que nous allons utiliser pour l'implémentation opérationnelle de la méthode sont élaborées par le modèle GFS (*Global Forecast System*, Kanamitsu, 1989; Kanamitsu et al., 1991) opéré par le NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) et le NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Les prévisions sont effectuées 4 fois par jour, pour des échéances allant jusqu'à 16 jours. Toutefois, la résolution spatiale et temporelle du modèle est plus élevée jusqu'à 192 h (8 jours) que pour les échéances de 192 à 384 h (16 jours). La résolution temporelle est de 3 h pour la première période, et de 12 h pour la seconde. Des prévisions d'ensemble (20 traces) sont également calculées. Le modèle est en constante évolution, avec une augmentation de sa résolution, ainsi qu'une

amélioration de la modélisation des processus dynamiques et physiques, ou de l'assimilation des observations (voir p.ex. Kanamitsu et al., 1991; Kalnay et al., 1990; Caplan et al., 1997).

Le modèle se base sur une représentation spectrale (fonctions sphériques) triangulaire T574 (1760x880) pour les 8 premiers jours et T190 (576x288) pour les suivants, ainsi que sur une grille gaussienne de taille 768x384, soit approximativement de 0.5x0.5° (NOAA, 2011). Le domaine vertical est constitué de 64 niveaux selon un système de référence hybride comprenant des niveaux de coordonnées sigma proche du sol, un mélange de niveaux sigma et de niveaux à pression constante pour le milieu de l'atmosphère, et uniquement des niveaux à pression constante pour la partie supérieure (NOAA, 2011). Le système normé de coordonnées sigma se définit comme le rapport de la pression en un point relativement à la pression au sol et à la limite supérieure du domaine (sigma = 1 à la surface terrestre et sigma = 0 en haut de l'atmosphère). Les surfaces, dans ce système de coordonnées, suivent l'orographie du terrain, ce qui évite le problème des intersections avec le terrain (Kanamitsu, 1989). La résolution verticale est plus élevée proche du sol, ce qui permet de mieux simuler les processus complexes de la couche limite. Cette représentation est toutefois moins adaptée que d'autres pour la prévision des vents (Zhang, 2002).

La représentation du terrain dans le modèle est une orographie moyennée, calculée sur la base d'un modèle numérique de terrain d'une résolution d'environ 1 km. La température de surface des mers et océans observée est assimilée par le modèle, ainsi que la banquise et la couverture neigeuse initiale (Moorthi, 2003; NOAA, 2011). D'autres variables (par exemple la végétation) sont initialisées selon leurs valeurs issues de la climatologie. La procédure d'assimilation considère la prévision précédente du modèle, interpole les données observées, met à jour l'état initial du modèle et l'initialise (stabilisation des ondes de gravité) (Kanamitsu, 1989). Après cette procédure, le modèle calcule des états futurs de l'atmosphère.

Les données (139 variables) du modèle GFS sont distribuées par les serveurs NOMADS (*National Operational Model Archive and Distribution System*, Rutledge et al., 2006) à une résolution de 1° et sur 26 niveaux verticaux pour des échéances de 3 à 192 h. Les données peuvent être acquises en format GRIB (*Gridded Binary*) par différents protocoles. Celui que nous utilisons pour la prévision opérationnelle est du *http* avec un URL (*Uniform Resource Locator*) fixe auquel est ajoutée une expression décrivant la sélection des données désirée. Il est ainsi possible de télécharger un fichier contenant uniquement les données qui nous intéressent (en termes de variable, dates, échéances, domaine spatial, et niveau atmosphérique), au lieu d'un fichier complet inutilement volumineux. Ces serveurs ont des copies miroirs situées à d'autres emplacements dans le but de garantir un accès aux données tous les jours et à chaque heure (Rutledge et al., 2006). Les prévisions du modèle global GFS sont fournies gratuitement et sans restriction.

4.3.3 Reprévisions GFS

Les « reprévisions » (*reforecasts*) sont des prévisions météorologiques effectuées rétrospectivement à l'aide d'une version figée du modèle numérique utilisé. Elles présentent l'avantage de fournir des séries longues de prévisions résultant du même modèle, alors qu'en opérationnel, la version des modèles change environ tous les 6 mois.

L'intérêt de ces reprévisions est de pouvoir optimiser les algorithmes de prévision par analogie en tenant compte des différences entre les situations cibles et les situations réanalysées de l'archive. Jusqu'à présent, les situations des journées cibles servant à l'optimisation étaient issues de l'archive des réanalyses (approche de prévision parfaite), alors que les prévisions opérationnelles se basent sur un modèle un peu différent (paramétrisation, meilleure résolution). Les reprévisions permettent donc de mieux prendre en compte le rôle des incertitudes croissantes avec l'échéance.

Nous avons téléchargé les reprévisions du modèle GFS (voir section précédente) pour la période de 1978 à aujourd'hui. Ce produit a été élaboré à l'aide de la version du modèle GFS de 1998, avec une résolution réduite à T62 (identique aux réanalyses, soit environ 210 km) et 28 niveaux verticaux (Hamill et al., 2006). Pour chaque journée, un ensemble de 15 membres est généré pour des échéances allant jusqu'à 15 jours. Le nombre de membres et les résolutions horizontales et verticales sont réduits par rapport au modèle opérationnel pour des raisons de temps de calcul. Les conditions initiales du modèle consistent en une simulation de contrôle initialisée à l'aide des réanalyses (voir section 4.3.1).

Ces données se sont montrées très intéressantes pour des applications en prévision statistique des températures et précipitations par adaptation des sorties de modèle (MOS, *Model Output Statistics*, Glahn et Lowry, 1972), ou à l'aide d'une approche par analogie (Hamill et al., 2004, 2006). Il est alors possible d'identifier et de corriger des biais dans les prévisions du modèle numérique à l'aide de ces reprévisions.

4.3.4 Température de surface des océans du NOAA

Le NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*) met à disposition des données journalières réanalysées de température de la surface des mers et océans (SST, *Sea Surface Temperature*) avec une résolution de 0.25° (ftp ://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/oisst/, Reynolds et al., 2007). Ces nouvelles analyses font suite à un jeu de données de séries hebdomadaires avec une résolution de 1° (Reynolds et Smith, 1994; Reynolds et al., 2002).

Les données de base proviennent de mesures effectuées à l'aide de satellites, de capteurs sur des bouées ou des bateaux, et d'observations de l'étendue des banquises. Les données satellitaires sont issues de deux systèmes différents : un satellite AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) avec capteur infrarouge, et un satellite AMSR (*Advanced Microwave Scanning Radiometer*) utilisant la technologie micro-ondes. La méthode infrarouge offre une très bonne résolution lorsque le ciel est dégagé, mais ne peut pas mesurer correctement la température de surface en cas de couverture nuageuse.

Au contraire, la technologie micro-ondes parvient à mesurer la température à travers les nuages (mais pas les précipitations), ce qui étend considérablement la surface observée, mais elle est un peu moins précise, et ne peut pas déterminer la température de l'eau à moins de 75 km des côtes (Reynolds et al., 2007). Ces deux produits se complètent donc de manière efficace. Toutefois, le satellite AMSR n'étant disponible qu'à partir de 2002, Reynolds et al. (2007) proposent deux analyses SST, la première basée sur les données (ou réanalyses) des satellites AVHRR depuis 1981, et la seconde basée sur une combinaison de ces deux technologies, mais depuis 2002. Pour des raisons d'homogénéité, ces deux produits n'ont pas été mélangés. Afin de maximiser la taille de notre archive, nous avons considéré les analyses basées sur les satellites AVHRR uniquement.

Ces données provenant de différents capteurs sont dans un premier temps débiaisées, puis assemblées et interpolées à l'aide de la méthode d'interpolation optimale, qui permet de remplacer partiellement certaines lacunes dans les observations, notamment par une considération de la continuité temporelle (Reynolds, 2009). Ainsi, même les grilles résultant de l'analyse des données satellitaires AVHRR contiennent une grande partie du signal (Reynolds et al., 2007). Leur qualité est toutefois moindre en hiver, à cause de la couverture nuageuse souvent plus persistante.

Les principaux produits fournis sont la température de surface de l'eau ainsi que son anomalie. Les anomalies sont calculées relativement à une climatologie mensuelle élaborée sur la période 1971-2000. Ces analyses sont également effectuées en opérationnel en temps réel (toutefois sans une étape de lissage temporel) et sont disponibles au téléchargement.

4.4 Le catalogue de types de temps Cost733cat

Un catalogue européen des classifications en types de temps, ou types de circulations atmosphériques, a été créé dans le cadre du projet *Cost Action 733* (« Harmonisation and Applications Of Weather Types Classifications for European Regions », voir Philipp et al., 2010). Le but de ce projet était de rendre possible une évaluation et une comparaison des différentes méthodes de classification en Europe, et ceci pour différentes régions du continent. Un logiciel permettant d'effectuer les classifications automatiques a été développé, ainsi qu'un catalogue de séries temporelles classifiées selon chacune des 22 méthodes (73 variantes au total) automatiques (ou objectives) et manuelles (ou subjectives) (Table 4.5).

Les différentes techniques utilisées pour la constitution des classifications sont de différentes natures (Philipp et al., 2010) :

- Les méthodes manuelles et les méthodes basées sur des seuils se fondent sur l'établissement préalable d'une liste de types de temps ou de règles à appliquer aux données, alors que les autres méthodes arrangent les entités en différentes classes en recherchant les structures existantes dans le jeu de données.
- Les méthodes subjectives se basent sur la connaissance de l'expert qui définit les circulations typiques.

Table 4.5 – Liste des méthodes utilisées (noms dans la langue originale) pour la création du catalogue Cost733cat. Pour les détails et les variantes, voir Philipp et al. (2010).

Méthodes subjectives		
HBGW	*Hess and Brezowsky European Grosswetterlagen/-typen*	Hess et Brezowsky (1977)
OGWL	*Objective Grosswetterlagen*	James (2007)
PECZELY	*Carpathian basin weather types*	Péczely (1958)
PERRET	*Alpine Weather Statistics*	Perret (1987)
ZAMG	*ZAMG Institute, Eastern Alpine weather types*	Lauscher (1985)
Méthodes basées sur des seuils		
GWT	*Grosswetter-types or prototype classification*	Beck (2000)
LIT	*Litynski advection and circulation types*	Lityński (1969)
LWT2	*Lamb-weather types version 2*	James (2006)
WLK	*Objektive Wetterlagenklassifikation*	Dittmann et al. (1995)
SCHUEPP	*Alpine Weather Statistics*	Schüepp (1979)
Méthodes basées sur une analyse en composantes principales (PCA)		
TPCA	*Principal component analysis in t-mode*	Huth (1993)
P27	*Kruizinga empirical orthogonal function types*	Kruizinga (1979)
PCAXTR	*Principal component analysis extreme scores*	Esteban et al. (2005, 2006)
Méthodes basées sur l'algorithme du leader (leader algorithm)		
LUND	*Classical leader algorithm*	Lund (1963)
ERPICUM	*Erpicum and Fettweis*	Erpicum et al. (2008)
KH	*Kirchhofer types*	Blair (1998)
Méthodes d'optimisation		
CKMEANS	*k-means by dissimilar seeds*	Enke et Spekat (1997)
PCACA	*k-means by seeds from hierarch. cluster analysis of PC*	Yarnal (1993)
PETISCO	*leader algorithm with optimized key patterns*	Petisco et al. (2005)
PCAXTRKMN	*k-means using PCA derived seeds*	Esteban et al. (2005, 2006)
SANDRA	*Simulated annealing and diversified randomization clust.*	Philipp et al. (2007)
NNW	*Neural network self-organizing feature maps*	Michaelides et al. (2001)

- Les méthodes basées sur des seuils ne fonctionnent pas sur la définition de types de circulations, mais sur celle des seuils qui les séparent.
- Les méthodes basées sur une ACP déterminent les composantes principales expliquant la majeure partie de la variance et en établissent des classes.
- Les méthodes basées sur l'algorithme du leader (Hartigan, 1975) recherchent les structures des situations situées au centre des nuages (de jours) à haute densité.
- Les méthodes d'optimisation arrangent les situations en classes de manière à minimiser la variabilité interne de ces classes (Philipp et al., 2010).

Les techniques de classification ont été appliquées sur 12 domaines spatiaux (Figure 4.13) et avec diverses données (14 variables synoptiques) des réanalyses ERA-40 (Uppala et al., 1999). Il en résulte un catalogue de 5076 classifications différentes, contenant également des séries aléatoires dans un but de comparaison.

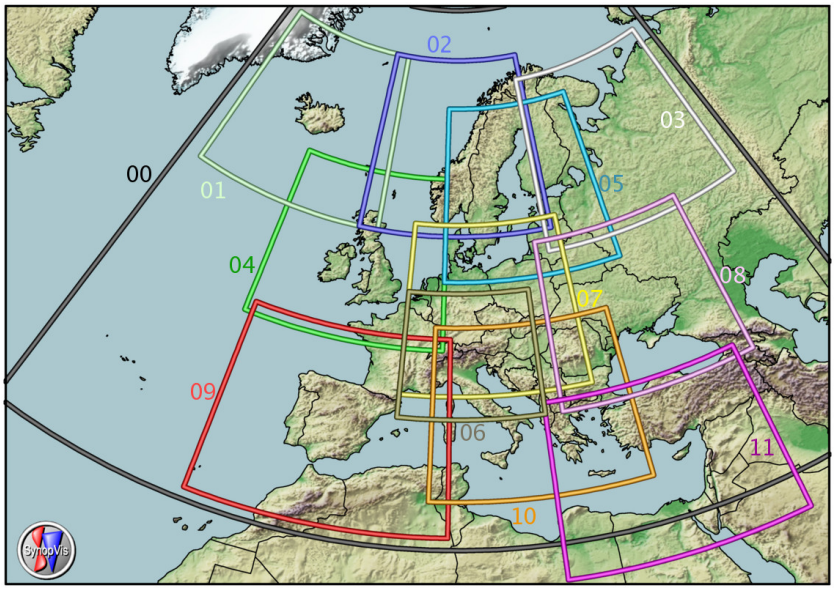


Figure 4.13 – Emplacement des 12 domaines pour lesquels des classifications de types de temps sont disponibles dans le catalogue Cost733cat. Source : cost733.met.no/domains.htm

Le nombre de types de temps varie entre 9 et 43 d'une classification à une autre, et les classifications objectives ont chacune été réalisées avec 9, 18, et 27 types. Le catalogue couvre la période de septembre 1957 à août 2002.

Le processus de classification conduit à une forte simplification des conditions atmosphériques et à un mélange de types de circulations, et engendre donc une perte d'information (Philipp et al., 2010). Un lien direct avec les séries du temps sensible n'est donc pas toujours évident. Schiemann et Frei (2010) ont évalué le catalogue de classifications pour la prévision des précipitations sur l'ensemble des Alpes et en tirent plusieurs conclusions :

- Il n'y a pas une classification unique qui soit largement supérieure aux autres.
- Les méthodes automatiques sont systématiquement meilleures que les classifications subjectives.
- Les précipitations faibles à moyennes sont mieux prévues que les fortes précipitations.
- La capacité prévisionnelle est clairement supérieure pour l'hiver que pour l'été.
- Les classifications avec un nombre supérieur de types de circulations ont des scores supérieurs comparativement aux classifications avec un nombre réduit.
- Les prévisions sont généralement meilleures pour l'ouest et pour le nord des Alpes que pour l'est et pour le sud.

Ces classifications présentent un intérêt pour la prévision de l'occurrence des précipitations. Nous allons donc évaluer leur pertinence pour la prévision de la pluie nulle dans la méthode des analogues (voir section 8.4.2).

Chapitre 5

Analyses paramétriques de la méthode des analogues

Avant de chercher à améliorer la méthode des analogues, nous procédons à diverses analyses dans le but de bien caractériser sa sensibilité à ses différents paramètres, ou à différentes opérations sur les séries de précipitations.

Nous testons en premier lieu quelques modifications de la méthode classique de calibration que nous utiliserons par la suite. Puis nous évaluons l'effet de l'établissement de groupements pluviométriques, justifiant ainsi le passage d'une analogie à la station à une analogie calculée à l'échelle d'une sous-région.

Nous analysons ensuite la cohérence spatiale des paramètres établis pour chaque station, l'effet de la transformation des précipitations habituellement effectuée dans le cadre de la méthode des analogues, l'évolution temporelle de la carte de pertinence, et finalement la sensibilité des paramètres de l'analogie de circulation et de celle sur les humidités.

5.1 Introduction du chapitre

Ce chapitre tente de caractériser certaines propriétés de la paramétrisation de la méthode des analogues. La première section introduit quelques légères modifications à la calibration classique. Ensuite, nous évaluerons l'effet de l'établissement de groupements pluviométriques, puis nous analyserons la cohérence spatiale des paramètres de la méthode. La section suivante évalue l'effet de la transformation des séries de précipitations telle qu'elle est habituellement pratiquée. Puis nous étudierons la sensibilité des paramètres en faisant largement varier, dans un premier temps, la fenêtre temporelle, puis l'ensemble des autres paramètres par une approche de Monte-Carlo.

5.2 Redimensionnement de la fenêtre spatiale

Nous proposons ici des modifications à la calibration classique (voir section 3.4.2). La différence concerne la procédure d'optimisation de la taille de la fenêtre spatiale, qui est ici constituée de deux étapes. La première est l'algorithme tel que Bontron (2004) l'a décrit, lequel recherche la taille optimale de la fenêtre par agrandissements successifs, à partir d'une fenêtre unitaire. Le principe consiste à évaluer les agrandissements possibles dans chacune des 4 directions, puis de choisir celui qui maximise le score de performance. Une fois que cette procédure est terminée et que nous avons identifié la taille optimale de la fenêtre, nous proposons une seconde étape d'évaluation, où tous les mouvements suivants sont effectués :

- (1) agrandissement dans les 4 directions ;
- (2) réduction des 4 directions ;
- réduction au (3) nord, (4) à l'est, (5) au sud, (6) à l'ouest ;
- réduction simultanée (7) au nord et au sud, (8) à l'est et à l'ouest ;
- agrandissement (9) au nord, (10) à l'est, (11) au sud, (12) à l'ouest ;
- agrandissement simultané (13) au nord et au sud, (14) à l'est et à l'ouest ;
- déplacement (15) au nord, (16) à l'est, (17) au sud, (18) à l'ouest ;
- déplacement (19) au nord-ouest, (20) au nord-est, (21) au sud-ouest, (22) au sud-est.

Ces opérations sont effectuées successivement avec un facteur d'échelle évolutif (redimensionnement ou déplacement sur 1, 2, ou 3 cellules). Quand une nouvelle position améliore la prévision, elle est conservée et les boucles de calculs sont réinitialisées. Si après avoir testé à nouveau toutes les combinaisons de mouvements et de facteurs d'échelle, la fenêtre ne bouge plus, alors son optimisation est terminée.

Il peut paraître de prime abord surprenant de réduire la fenêtre, ce qui semble en contradiction avec l'hypothèse de Bontron (2004) sur la régularité de la carte de pertinence. Toutefois, ce mouvement intervient parfois pour améliorer les performances. Ceci peut être expliqué par l'intégration de nouvelles informations à la suite des divers agrandissements qui peuvent au final rendre une zone précédemment sélectionnée moins intéressante.

Ces changements n'ont pas une influence importante sur le CRPSS, puisque nous observons des améliorations de l'ordre de 0.05 point (gain de 0.2 %) de ce score. De plus, certaines paramétrisations sont identiques à celles obtenues par la calibration classique. Au vu du gain très marginal obtenu, nous continuerons d'appeler cette méthode la calibration classique, bien que nous procéderons systématiquement à ces évaluations supplémentaires sur le redimensionnement de la fenêtre spatiale.

5.3 Établissement de groupements pluviométriques

Nous n'observons pas forcément une même répartition spatiale des précipitations entre les différentes occurrences d'une même situation type. Ainsi, les précipitations observées pour les analogues d'une journée cible peuvent se répartir spatialement de manière un peu différente. Nous pouvons donc supposer qu'une prévision pour un groupement pluviométrique devrait être plus performante qu'une prévision à la station. Le regroupement homogénéise la série temporelle sur une sous-région pluviométrique cohérente et les précipitations deviennent alors plus facile à prévoir.

Afin de quantifier cet effet, une étude comparative a été menée sur les Drances, sur la région Binn-Simplon, celle du val Ferret, et celle du Chablais. Diverses séries temporelles comportant différents niveaux de regroupement ont été considérées. Pour chacune d'elles, les paramètres de la méthode R1 (section 3.3.2) sont optimisés à l'aide de la calibration classique.

Seuls les résultats concernant les Drances seront présentés ; ceux des autres régions confirment les mêmes tendances, mais se basent sur moins de données et n'apportent rien de nouveau. Les Drances ont été choisies en raison de la taille importante des bassins, de la présence de plusieurs pluviomètres, ainsi que de la disponibilité de séries temporelles de bassin (section 4.2.5). L'analyse a pour but de comparer les différentes séries suivantes :

- Mesures à 6 stations pluviométriques : Fionnay, Montagnier, col du Grand-Saint-Bernard, Bourg-Saint-Pierre, Orsières, Martigny.
- Groupements de stations assemblées par la méthode des polygones de Thiessen (pondération par les surfaces). Les séries résultantes ne sont donc pas de réelles séries de bassin, puisque cette spatialisation est trop basique pour le milieu alpin, mais plutôt une moyenne arithmétique un peu plus représentative de la sous-région. Les groupements considérés sont au nombre de 5 (Figure 5.1) : (1) partie supérieure et (2) inférieure à l'amont de la confluence des deux Drances, (3) bassin de la Drance de Bagnes et (4) celui de la Drance d'Entremont, et (5) bassin complet de la Drance jusqu'à Martigny.
- Pluies de bassin proposées par la méthode SPAZM (section 4.2.5) pour (1) la Drance de Bagnes, (2) la Drance d'Entremont, (3) la partie inférieure à la confluence des deux Drances jusqu'à Martigny et enfin (4) le bassin dans son ensemble.

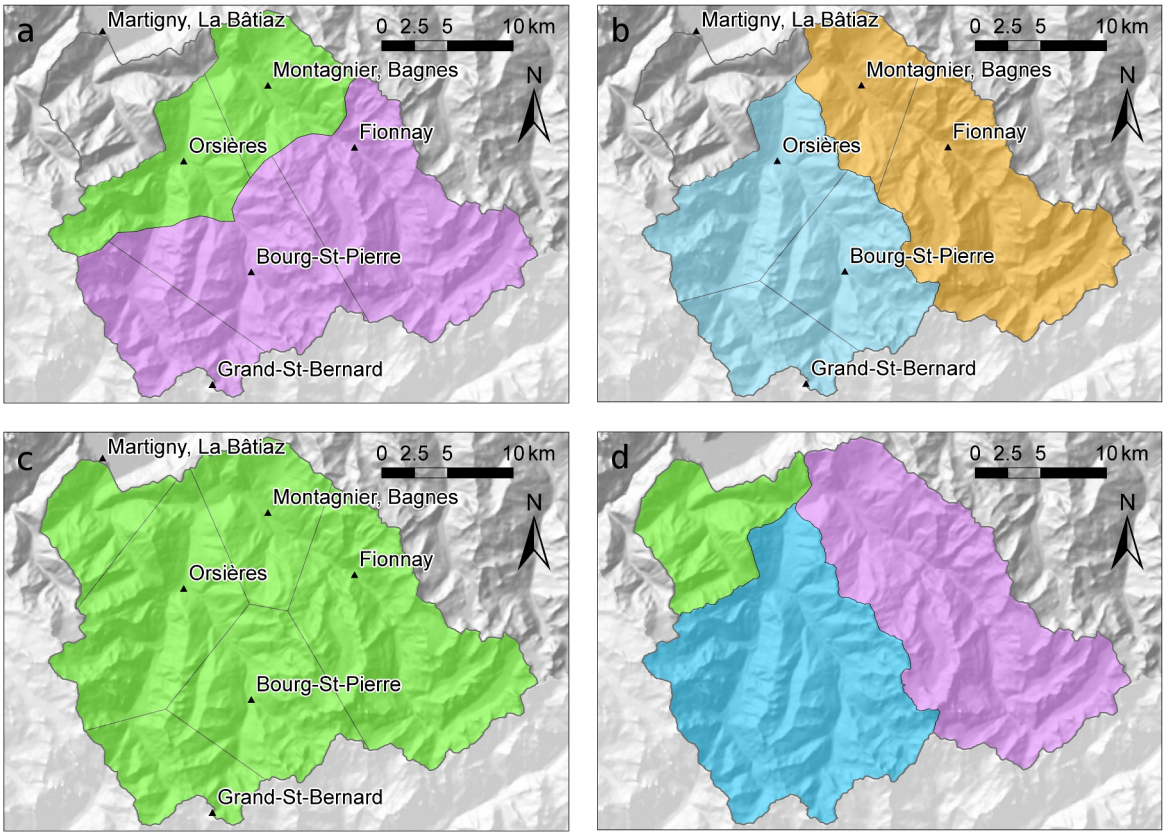


Figure 5.1 – Différents découpages pour le regroupement des stations des Drances : (a) découpage en sous-régions supérieures et inférieures, (b) découpage des bassins des deux Drances jusqu'à leur confluence, (c) représentation des polygones de Thiessen pour le bassin complet, (d) découpage en 3 parties pour la génération des pluies de bassin (Géodonnées © swisstopo – DV084371).

Nous avons considéré les séries de précipitations avec et sans traitement par la racine carrée (voir section 4.2.4). Nous avons pu observer pour ces deux variantes que si les fenêtres spatiales peuvent parfois être différentes et que les CRPSS (voir section 2.4.6.1) ne présentent pas les mêmes valeurs, les rangs des résultats sont en général conservés. Ainsi, dans un but de lisibilité, seuls les résultats des séries transformées par la racine carrée seront présentés.

Les résultats de l'étude (Table 5.1) montrent tout d'abord qu'il existe des variations significatives du CRPSS entre les stations, bien que les paramètres de la fenêtre spatiale et du nombre d'analogues soient très proches sur l'ensemble des stations. Nous observons ensuite dans la Table 5.1 que les scores des groupements sont systématiquement meilleurs que le meilleur score des stations individuelles qu'ils contiennent. Le regroupement a donc l'effet que nous attendions et permet effectivement d'homogénéiser les séries pluviométriques dans une sous-région. La compétence qui s'avère plus élevée pour la Drance d'Entremont que pour celle de Bagnes peut être due à différents facteurs : (1) ce sous-bassin contient 3 stations contre 2 pour la Drance de Bagnes, (2) la station du col du Grand-Saint-Bernard a une compétence plus élevée et permet d'augmenter celle du bassin, et enfin, (3) la station du col du Grand-Saint-Bernard intègre les précipitations sur la partie supérieure du bassin et permet de générer une série de précipitations plus représentative de l'ensemble.

Table 5.1 – Résultats de la calibration pour différents groupements de stations dans le bassin des Drances. Les fenêtres spatiales optimales sont définies par leur longitude minimale (Lon min), leur latitude minimale (Lat min), et leur taille en degrés de longitude (Taille lon) et de latitude (Taille lat). Le nombre d'analogues optimal (N_1) est donné, tout comme le CRPSS et le rang de ce score. Le bassin inférieur pour les pluies de bassin SPAZM est différent de la partie inférieure des pluies de bassin Thiessen.

Série temporelle	**Lon min**	**Taille lon**	**Lat min**	**Taille lat**	**N_1**	**CRPSS (%)**	**Rang**
Stations individuelles							
Fionnay	-2.5	20	40	7.5	35	37.44	10
Montagnier, Bagnes	-5	22.5	40	7.5	45	33.92	15
Col du Grand-St-Bernard	-2.5	20	40	7.5	35	40.10	6
Bourg-St-Pierre	-2.5	20	40	7.5	35	34.49	13
Orsieres	-5	22.5	40	7.5	35	33.96	14
Martigny / Ravoire	-5	22.5	40	7.5	30	36.84	11
Pluies de bassin (Thiessen), cf. Figure 5.1a-c							
Drance de Bagnes	-2.5	20	40	7.5	35	37.92	9
Drance d'Entremont	-5	22.5	40	7.5	35	40.16	5
Partie inférieure	-5	22.5	40	7.5	35	35.37	12
Partie supérieure	-2.5	20	40	7.5	35	40.55	3
Bassin total	-5	22.5	40	7.5	30	40.27	4
Pluies de bassin (SPAZM), cf. Figure 5.1d (Pas de « bassin supérieur » traité.)							
Drance de Bagnes	-5	22.5	40	7.5	30	39.67	7
Drance d'Entremont	-5	22.5	40	7.5	35	40.76	1
Bassin inférieur	-5	22.5	40	7.5	35	38.95	8
Bassin total	-5	22.5	40	7.5	30	40.56	2

Finalement, les séries de bassin présentent une amélioration de 0.7 % à 4.6 % par rapport aux groupements correspondants. Ces séries sont fondées sur davantage de données et intègrent donc mieux les précipitations sur la partie supérieure des reliefs que les polygones de Thiessen. Il n'est donc pas surprenant que le plus grand gain concerne la Drance de Bagnes.

Le regroupement de stations permet donc d'améliorer le score pour un sous-bassin. Ceci semble d'autant plus vrai lorsque les stations sont réparties sur la gamme d'altitudes, en intégrant l'information des parties supérieures des reliefs. Malheureusement, la densité de stations en altitude est généralement largement insuffisante pour obtenir une série représentative de l'ensemble du bassin par moyenne arithmétique. C'est donc particulièrement dans ces régions-là que les séries de bassin, élaborées de manière plus sophistiquée, se révèlent très intéressantes pour la méthode des analogues, pour autant qu'elles soient assez longues. Les grilles de précipitations à une résolution de 2 km élaborées par Wüest et al. (2010) sont malheureusement disponibles sur une période trop courte (15 ans) pour être utilisées aujourd'hui comme archives.

5.4 Cohérence spatiale des paramètres

L'objectif de l'analyse de la cohérence spatiale des paramètres consiste à vérifier que ceux-ci soient relativement homogènes dans une sous-région. Nous pouvons en effet nous attendre à ce que les stations soumises à une même influence dominante partagent les mêmes fenêtres spatiales. Les paramètres de la méthode R1 (section 3.3.2) ont donc été calibrés pour chaque station indépendamment.

La Figure 5.2 nous révèle qu'une très bonne cohérence spatiale est présente dans les paramètres optimaux. En effet, de nombreuses stations partagent les mêmes fenêtres spatiales sur les champs de géopotentiel (Figure 5.3), et ce de manière cohérente dans l'espace. Certaines similitudes avec les définitions des sous-régions à comportement pluviométrique homogène peuvent être identifiées (voir section 1.3.1). Ces résultats confirment la pertinence des fenêtres spatiales identifiées par la calibration classique, ainsi que la capacité prédictive des champs de géopotentiel. La sélection des fenêtres optimales sur la base des séries de précipitations avec ou sans traitement par la racine carrée est très similaire.

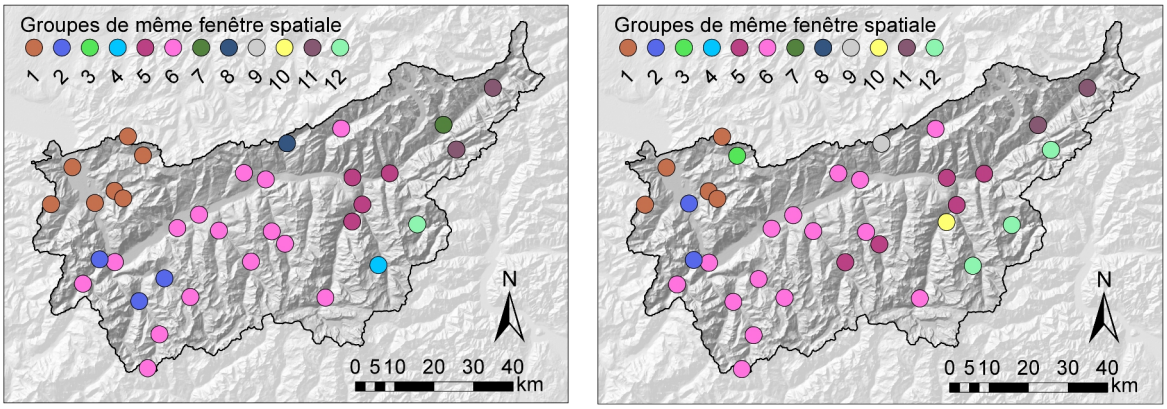


Figure 5.2 – Cartes des stations partageant la même fenêtre spatiale pour la méthode R1 (géopotentiel à 500 hPa et 1000 hPa). Les paramètres sont optimisés pour la série de précipitations (gauche) avec traitement par la racine carrée et (droite) sans ce traitement. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

Les stations du Bas-Valais et des Préalpes vaudoises ont une fenêtre spatiale très étendue à l'ouest, qui englobe même la France jusqu'à l'Atlantique (Figure 5.3). Tout le Valais central jusqu'aux crêtes présente des paramètres plutôt homogènes, avec une limite ouest également très étendue. Les seules stations dotées d'une fenêtre ne comprenant pas une grande partie du territoire français sont le Simplon, ainsi que Binn et Saas pour les séries non transformées par la racine (voir également la section suivante). Il apparaît que les stations sensibles aux situations d'ouest (voir section 1.3.1) ont une fenêtre spatiale d'autant plus étendue dans cette direction.

Les latitudes minimales ne présentent pas de grandes variations entre stations. Nous aurions pu néanmoins nous attendre à ce que les stations de Binn, du Simplon et de Saas aient une fenêtre optimale davantage étirée vers le sud. Nous observons en réalité l'effet

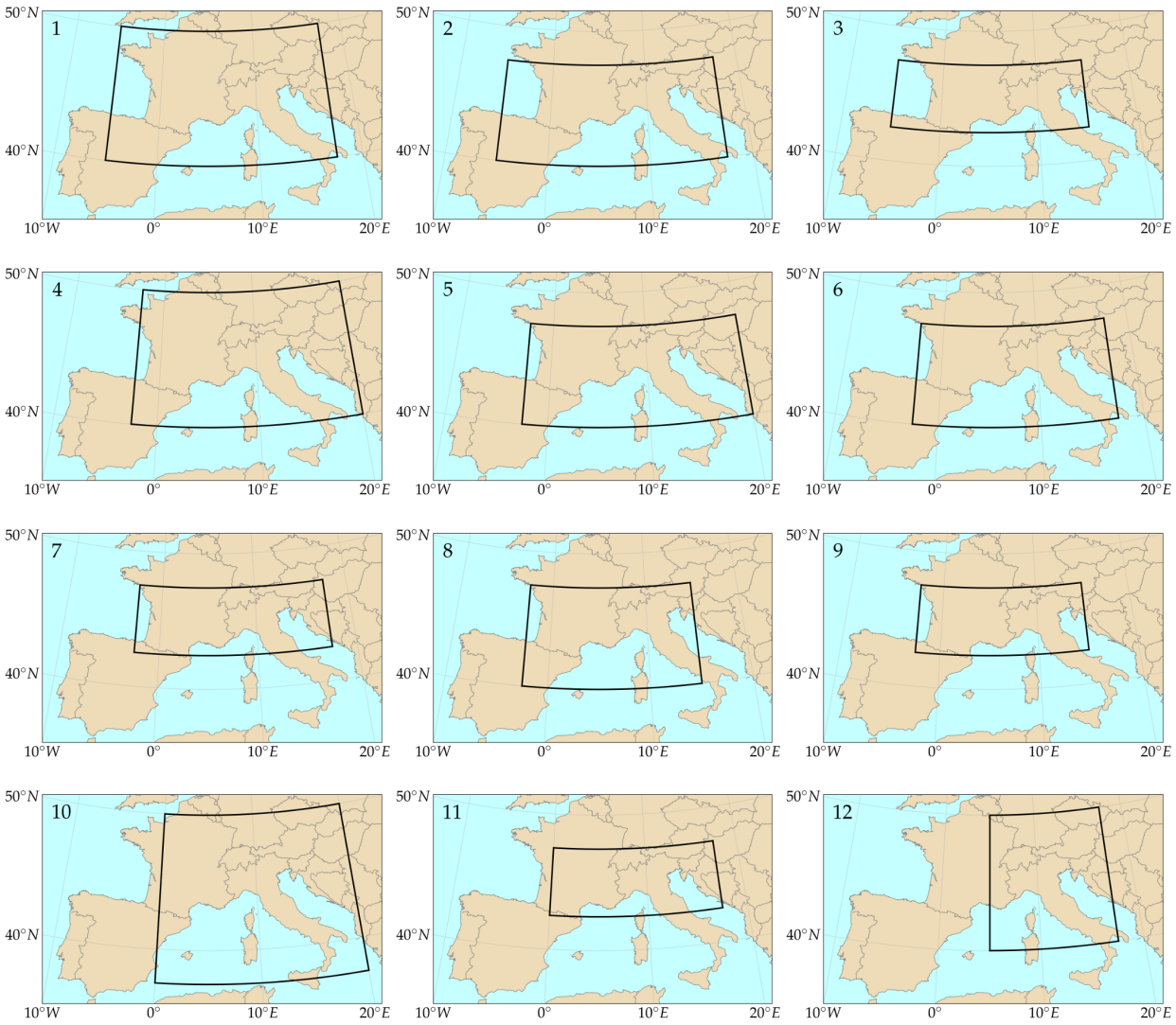


Figure 5.3 – Cartes des fenêtres spatiales optimales pour la méthode R1 (géopotentiel à 500 hPa et 1000 hPa) correspondant aux groupes de stations de la Figure 5.2.

inverse pour Binn, qui présente une limite inférieure à 42.5° (avec les séries transformées par la racine). Ceci signifie que, pour cette région, l'information de l'intensité et de la direction des flux considérés conjointement à 500 et 1000 hPa est plus pertinente à proximité du bassin que davantage au sud. Avec une fenêtre plus grande, l'analogie intégrerait également les gradients situés à distance du bassin. Notre hypothèse est que, puisque les performances sont meilleures lorsque nous n'intégrons pas l'information au sud, cette région doit contenir une variabilité dans les formes des champs de géopotentiel, aux deux niveaux considérés, qui est néfaste à la prévision. Cette variabilité peut provenir de la configuration particulière des flux de sud qui résultent d'un talweg ou d'une goutte froide, présentant donc une forte courbure dans les lignes de la circulation générale, alors que les flux d'ouest sont plus linéaires. L'emplacement et l'intensité de cette courbure peuvent varier d'un événement à l'autre, alors que l'impact sur les précipitations dans le bassin est similaire. Les champs de géopotentiel étant comparés en termes de forme, une mauvaise correspondance de la courbure du flux peut engendrer une valeur du critère fortement réduite.

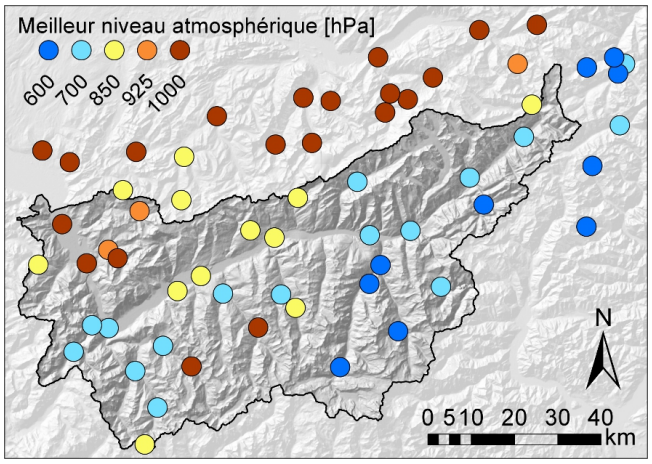


Figure 5.4 – Carte du meilleur niveau atmosphérique du géopotentiel par station. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

Nous avons également recherché le meilleur niveau atmosphérique par station pour le géopotentiel. Nous n'utilisons donc ici qu'un seul niveau pour la recherche des analogues. Les résultats, présentés dans la Figure 5.4, montrent une grande cohérence spatiale. Il est intéressant de relever que le niveau atmosphérique le plus explicatif pour une station ne dépend pas de l'altitude de celle-ci, mais semble dépendre des influences atmosphériques principales.

5.5 Effet de la transformation des précipitations

Les précipitations sont habituellement transformées avant d'être utilisées dans la méthode des analogues (voir section 4.2.4). La première transformation consiste en une normalisation par la pluie décennale, ce qui a pour objectif de permettre une comparaison des scores CRPS entre les stations. La seconde consiste en l'application de la racine carrée à ce dernier ratio dans le but de réduire l'influence des gros événements de précipitations et donc d'optimiser la méthode pour une pluviométrie globale.

5.5.1 Effet de la normalisation

L'effet de la normalisation a été analysé par comparaison des résultats de la série de précipitations brutes, et des séries normées par la pluie d'un temps de retour de 2 ans, 10 ans et 50 ans. Les paramètres de la méthode R1 (section 3.3.2) ainsi que les scores CRPSS sont strictement identiques pour chacune de ces séries.

Ceci est facilement explicable. Soit $CRPS_M(\alpha \cdot x)$, le CRPS d'un quelconque modèle M pour la série de précipitations normalisées par la pluie P_T d'un temps de retour T, tel que $\alpha = 1/P_T$:

$$CRPS_M(\alpha \cdot x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \left[F_i(\alpha \cdot x) - H_i(\alpha \cdot x - \alpha \cdot x_i^0) \right]^2 \alpha \cdot dx \right) \tag{5.1}$$

La fonction de Heaviside donne le même résultat tant que $\alpha > 0$:

$$H(\alpha \cdot x - \alpha \cdot x_i^0) = H(x - x_i^0) \qquad \forall \alpha > 0 \tag{5.2}$$

La fonction de répartition est également identique avec la constante α :

$$F_{\alpha \cdot X}(\alpha \cdot x) = P(\alpha \cdot X \leqslant \alpha \cdot x) = P(X \leqslant x) = F_X(x) \qquad \forall \alpha > 0 \tag{5.3}$$

En intégrant les équations 5.2 et 5.3 dans l'équation 5.1, nous obtenons

$$CRPS_M(\alpha \cdot x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \left[F_i(x) - H_i(x - x_i^0) \right]^2 \alpha \cdot dx \right) \tag{5.4}$$

que nous pouvons transformer en

$$CRPS_M(\alpha \cdot x) = \alpha \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \left[F_i(x) - H_i(x - x_i^0) \right]^2 dx \right) \tag{5.5}$$

Nous pouvons déduire de l'équation 5.5 la relation suivante :

$$CRPS_M(\alpha \cdot x) = \alpha \cdot CRPS_M(x) \tag{5.6}$$

Cette dernière équation (Equation 5.6) nous confirme donc que le choix des paramètres ne sera pas affecté par une telle normalisation. La compétence du CRPS peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} CRPSS_M(\alpha \cdot x) &= \frac{CRPS_M(\alpha \cdot x) - CRPS_{ref}(\alpha \cdot x)}{CRPS_{parfait}(\alpha \cdot x) - CRPS_{ref}(\alpha \cdot x)} \\ &= \frac{CRPS_M(x) - CRPS_{ref}(x)}{CRPS_{parfait}(x) - CRPS_{ref}(x)} \\ &= CRPSS_M(x) \end{aligned} \tag{5.7}$$

L'équation 5.7 nous montre que la normalisation n'a effectivement aucun effet sur la valeur du CRPSS, puisque celui-ci est relatif à une valeur de référence également normalisée. La valeur du CRPS, en revanche, est modifiée par le facteur d'échelle que nous appliquons à la série temporelle.

5.5.2 Effet de la transformation en racine carrée

Pour analyser l'effet de la racine carrée sur la calibration de la méthode, nous utilisons les résultats de l'analyse de la cohérence spatiale des paramètres (section 5.4). Nous nous intéressons ici aux nombres d'analogues sélectionnés par la calibration (Figure 5.5), ainsi qu'aux scores CRPSS (Figure 5.6).

La Figure 5.5 nous révèle que si les fenêtres spatiales sont relativement proches dans les deux cas (voir section 5.4), il semble cependant que le nombre d'analogues optimal diffère

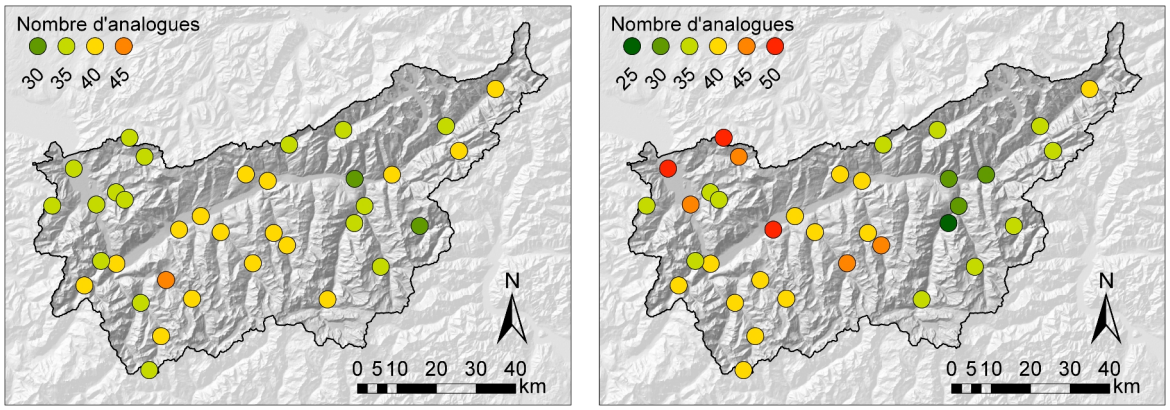


Figure 5.5 – Cartes des nombres d'analogues de la méthode R1 optimisés pour la série de précipitations (gauche) avec traitement par la racine carrée et (droite) sans ce traitement. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

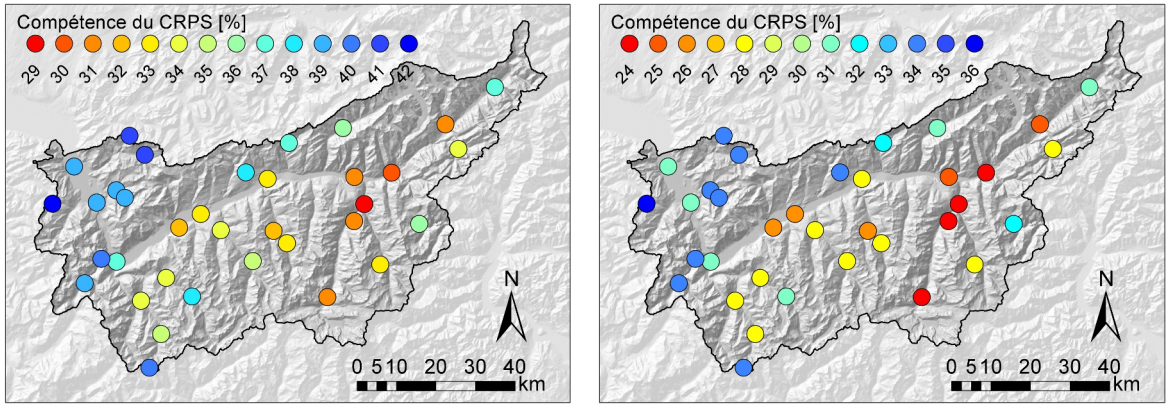


Figure 5.6 – Cartes des compétences en CRPS de la méthode R1 pour la série de précipitations (gauche) avec traitement par la racine carrée et (droite) sans ce traitement. Les échelles de couleur sont différentes entre les deux cartes. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

davantage. Lorsque la série de précipitations n'est pas transformée par la racine carrée, le nombre d'analogues varie globalement un peu plus. Les stations situées dans la moitié ouest du bassin possèdent un nombre d'analogues parfois plus élevé que la série transformée par la racine carrée, alors que nous observons l'effet inverse pour la moitié est.

La Figure 5.6 présente des scores CRPSS systématiquement inférieurs lorsque nous n'appliquons pas la racine carrée. Cette différence signifie que la série transformée produit de meilleurs scores lorsque nous donnons davantage d'importance aux petits cumuls et moins aux gros cumuls. Cet effet résulte de la contraction des aires sous la courbe du CRPS pour les cumuls supérieurs à la pluie décennale, et de la dilatation des plus petits cumuls. Toutefois, cette différence ne signifie pas que la prévision a plus de valeur, surtout lorsque nous nous intéressons aux événements extrêmes. Ainsi, nous ne désirons pas appliquer cette transformation par la racine carrée dans la suite de ce travail, afin de ne pas réduire l'importance des événements fortement pluvieux, qui revêtent un intérêt particulier pour le projet

MINERVE. Il conviendra donc d'être prudent concernant la comparaison de la compétence du CRPS entre notre étude et celles de Bontron (2004), Ben Daoud (2010), ou de Marty (2010), car les valeurs ne représentent pas la même capacité prévisionnelle.

5.6 Évolution temporelle de la carte de pertinence

Le jeu de données des réanalyses (section 4.3.1) a une résolution temporelle plus fine que les précipitations journalières. Lors de la calibration, nous devons donc choisir la fenêtre temporelle de comparaison des prédicteurs à l'intérieur ou à l'extérieur de la journée cible associée aux précipitations.

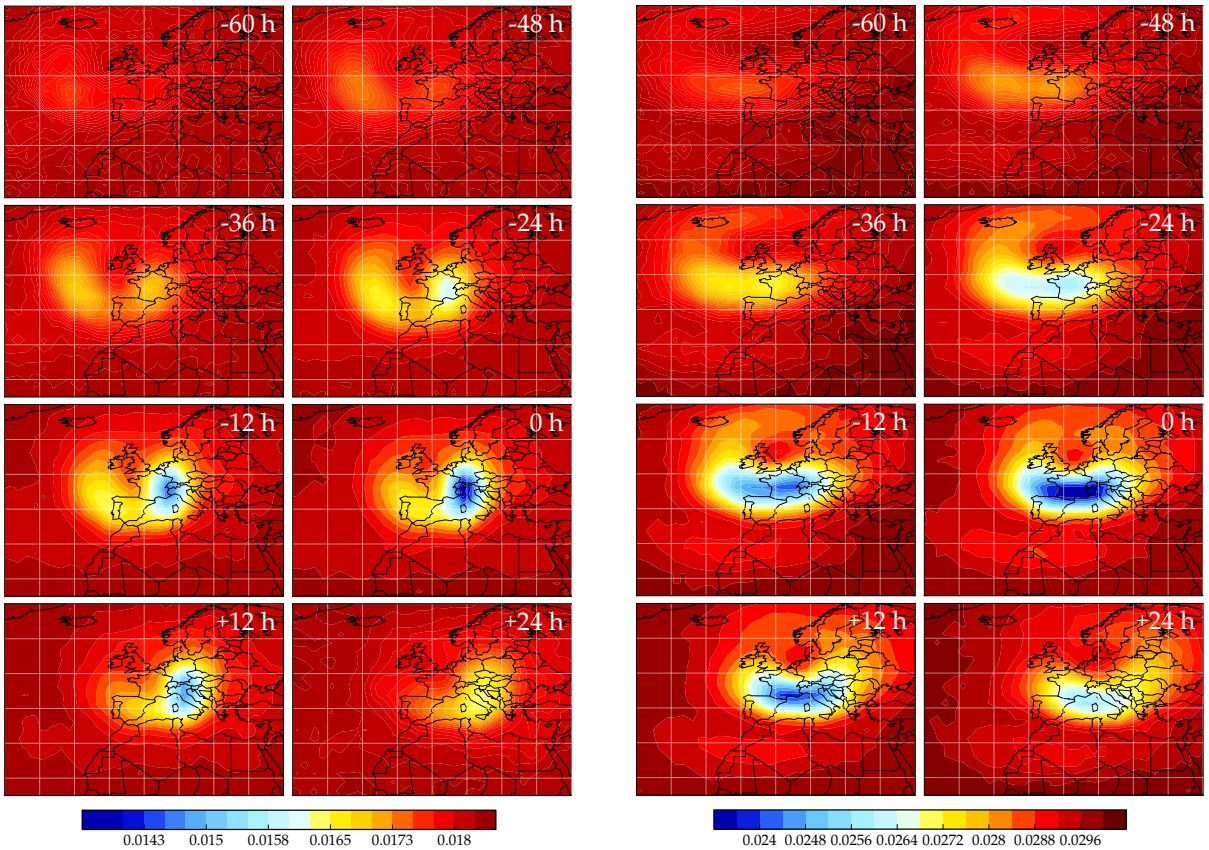


Figure 5.7 – Évolution temporelle de la carte de pertinence de la circulation atmosphérique à 500 hPa pour les stations (gauche) de Binn et (droite) des Marécottes. Les valeurs correspondent au score CRPS.

Nous avons donc évalué, en considérant un grand domaine autour du bassin, si nous pouvions identifier une information pertinente dans la circulation atmosphérique à distance de la station étudiée dans les jours précédant la situation d'intérêt. Nous avons donc calculé des cartes de pertinence (voir section 3.4.1) pour différentes fenêtres temporelles, jusqu'à 3 jours avant l'événement. Nous avons considéré le prédicteur au temps $h + \Delta t$ pour prévoir les précipitations journalières centrées au temps h, avec Δt variant de -60 h à +24 h. Dans

cette analyse, h est 18 h UTC, ce qui correspond au centre de la période d'accumulation (6 h UTC à 6 h UTC le lendemain).

L'évolution de la carte de pertinence pour les stations de Binn et des Marécottes (Figure 5.7) illustre la formation des zones où la circulation atmosphérique est déterminante pour la prévision des précipitations. Ces motifs se forment à une certaine distance du bassin du Rhône, et évoluent en direction de celui-ci, où le maximum de pertinence est atteint. Puis ceux-ci continuent d'évoluer à l'est après l'échéance.

Les scores sont donc optimaux lorsque la fenêtre temporelle correspond au centre de la période de mesure (18 h UTC). Ceci s'explique facilement par le fait que des situations similaires à un moment donné évoluent rapidement de manière différente (Lorenz, 1956). Ainsi, même pour une situation météorologique pour laquelle nous avons pu identifier de bonnes analogues, la configuration de l'atmosphère les jours précédents peut être différente.

5.7 Analyse paramétrique par une méthode Monte-Carlo

Une analyse de sensibilité des paramètres de la référence R1 a été réalisée par une méthode de Monte-Carlo en effectuant 10'000 tirages aléatoires des valeurs de ces paramètres selon une loi uniforme. Au contraire de la calibration classique, les fenêtres spatiales sur les champs 500 hPa et 1000 hPa ne sont pas forcément recouvrantes. Il se trouve donc 9 paramètres qui varient, dont 8 définissent les fenêtres spatiales (latitudes et longitudes minimales et maximales sur chacun des 2 niveaux atmosphériques), le dernier étant le nombre d'analogues. Les fenêtres temporelles, elles, ne sont pas changées. Notre première analyse porte sur une série de précipitations moyennée de 3 stations des crêtes du sud-est (Binn, Simplon, Saas-Fee).

La Figure 5.8 présente les nuages de points résultant de l'exploration aléatoire de l'espace des paramètres, ainsi que le résultat de la calibration classique (croix rouge). Malgré le nombre élevé de simulations, la partie supérieure des distributions semble incomplète, et le score de la calibration classique (32.29 %) n'est pas atteint (31.94 %). Une telle approche peut donc être utile pour évaluer l'espace des paramètres, mais ceux-ci sont ici trop nombreux pour garantir de trouver la combinaison idéale (Magnin, 2006).

La forme des nuages de points révèle une faible sensibilité quant à l'emplacement exact des fenêtres spatiales. Il existe un seuil maximal pour les longitudes et latitudes minimales et, à l'inverse, un seuil minimal pour les longitudes et latitudes maximales, mais, du côté externe de ces limites, on ne relève pas de pente bien marquée dans les distributions. Une fenêtre spatiale peut donc être plus ou moins grande pour des performances quasiment identiques, tant qu'elle englobe au moins une région déterminante. Ceci avait également été observé par Bontron (2004), qui notait que « *les performances diminuent lentement si l'on considère une fenêtre légèrement trop grande, alors que l'utilisation d'une fenêtre trop petite pénalise fortement les résultats* ». Le meilleur jeu de paramètres aléatoires est par exemple étendu de 7.5° plus au sud sur le niveau atmosphérique 1000 Pa, comparé

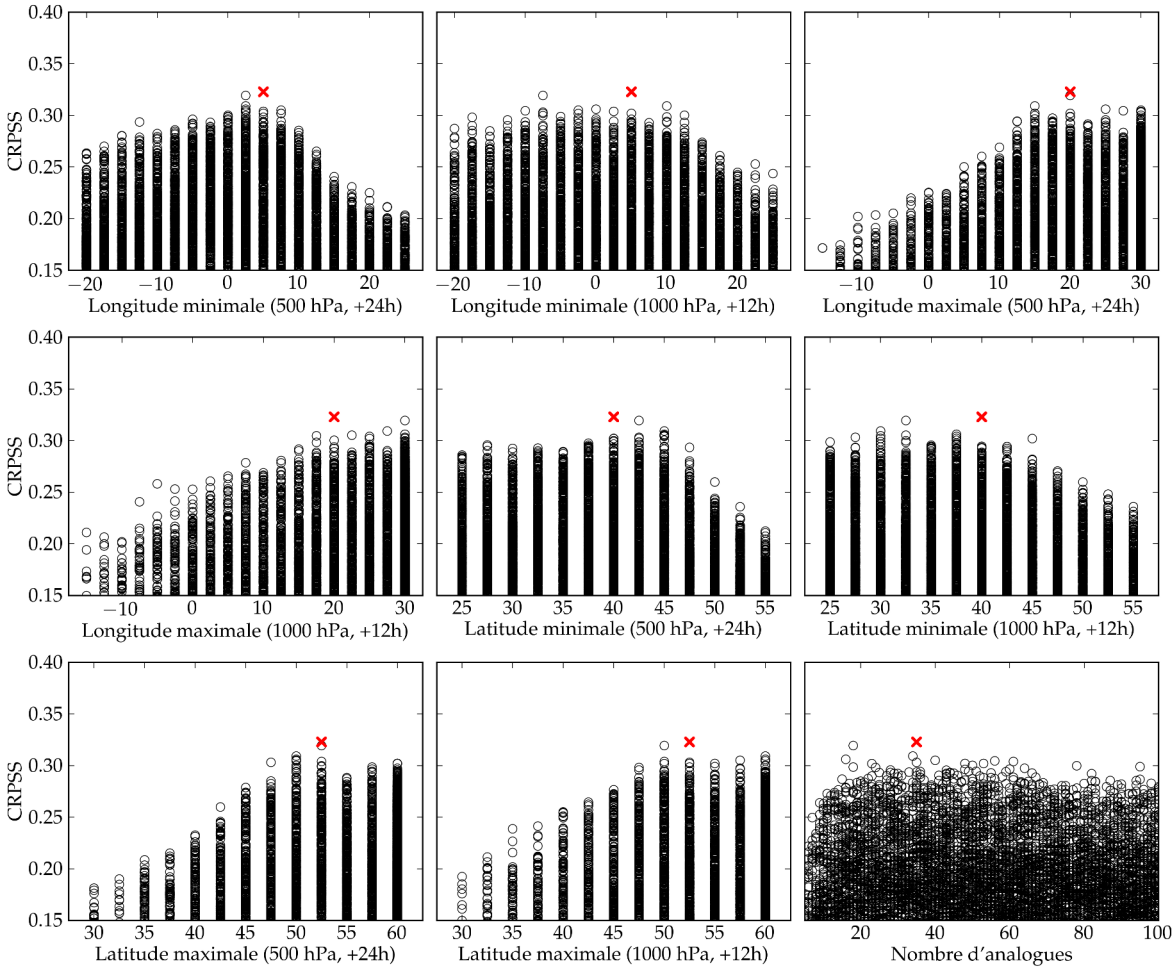


Figure 5.8 – Nuage de points (tronqué par le bas) résultant d'une méthode Monte-Carlo sur les paramètres de R1 pour la région des crêtes du sud-est, sur l'ensemble de l'archive. La croix rouge est le résultat de la calibration classique.

à celui de la calibration classique (croix rouge dans la Figure 5.8) pour des performances quasiment similaires. La dilution d'une partie de l'information synoptique pertinente n'a donc pas forcément un impact négatif significatif sur les performances, alors qu'ignorer une partie de cette information entraîne une perte de performance non désirable. Il en va de même pour le nombre d'analogues, pour lequel, passé un optimum, la pente supérieure de la distribution est relativement douce. Ainsi, le meilleur jeu de paramètres aléatoires a un nombre d'analogues de 18, alors que la calibration classique en propose 35.

Cette région semble plus sensible à l'emplacement de la fenêtre spatiale sur le niveau atmosphérique 500 hPa que sur le 1000 hPa (voir Figure 5.8). En effet, les distributions des longitudes et latitudes minimales et maximales ont des pentes plus marquées pour le niveau atmosphérique 500 hPa, ainsi qu'une région optimale plus facilement identifiable.

Lorsque nous ne faisons varier qu'un paramètre, comme le nombre d'analogues, un optimum relativement clair est identifiable. Ce que révèle également cette analyse, c'est que les dépendances entre paramètres sont très importantes et qu'il est possible de trouver des combinaisons différentes fournissant des prévisions acceptables. Nous devons prendre cela

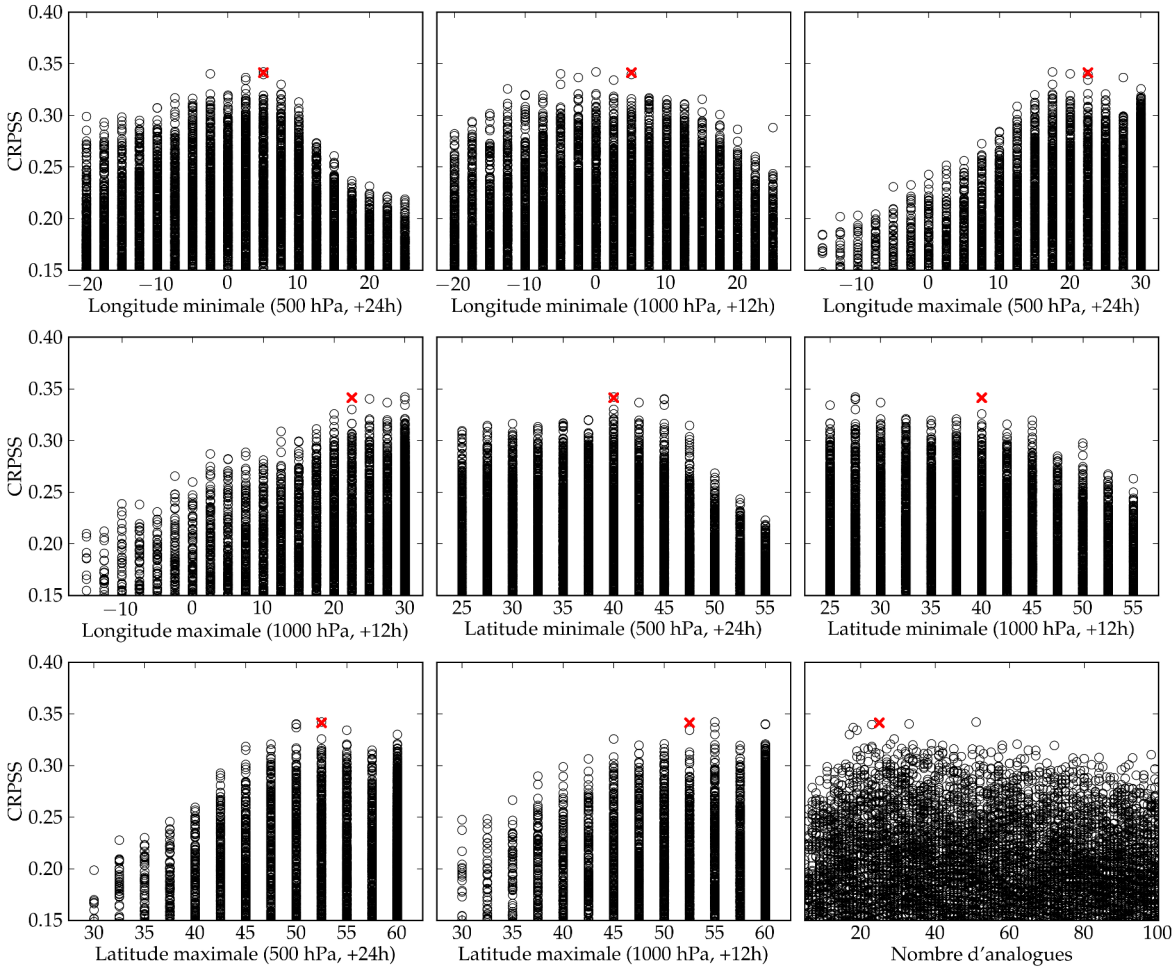


Figure 5.9 – Nuage de points (tronqué par le bas) résultant d'une méthode Monte-Carlo sur les paramètres de R1 pour la région des crêtes du sud-est, pour la période de calibration de 1998 à 2002. La croix rouge est le résultat de la calibration classique.

en considération lors de l'utilisation de méthodes de calibration basées sur des choix de paramètres a priori et visant à calibrer ceux-ci successivement.

La même analyse a été menée sur une petite période de calibration de 5 ans définie arbitrairement de 1998 à 2002 (tout en conservant l'archive complète pour les situations candidates). Une telle période est trop courte pour que nous puissions généraliser les paramètres résultant de cette calibration, mais celle-ci peut être utile pour explorer rapidement des variables météorologiques ou évaluer la convergence de méthodes de calibration. Certaines approches d'optimisation (voir section 9) sont en effet très gourmandes en temps et il est donc préférable de les évaluer sur une période réduite.

La Figure 5.9 résultante est très semblable à celle établie sur la période complète, et la courte période de calibration ne modifie pas les propriétés des distributions. Le hasard révèle qu'un jeu de paramètres aléatoires est cette fois-ci légèrement supérieur (34.22 %) au résultat de la calibration (34.15 %).

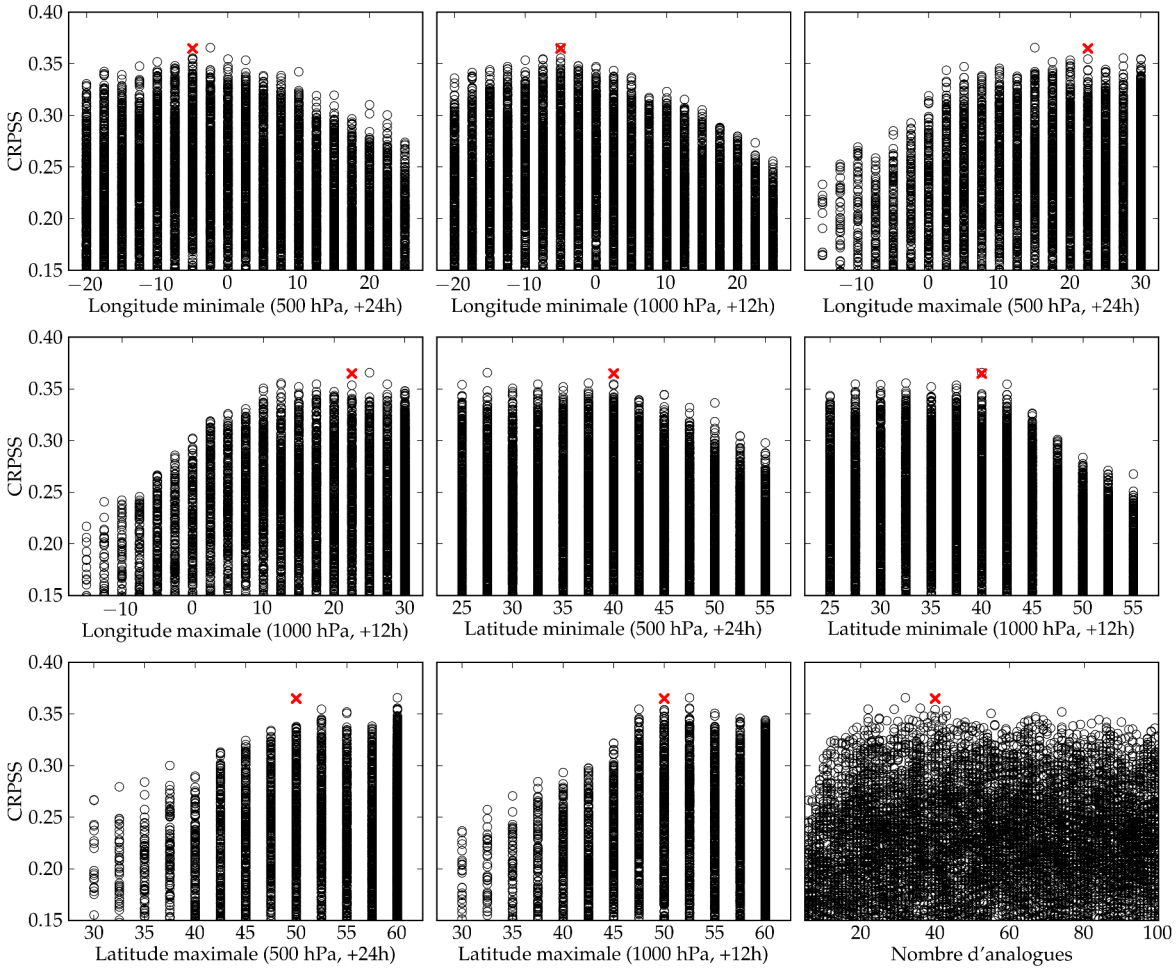


Figure 5.10 – Nuage de points (tronqué par le bas) résultant d'une méthode Monte-Carlo sur les paramètres de R1 pour la région du Chablais, pour la période de calibration de 1998 à 2002. La croix rouge est le résultat de la calibration classique.

Les principales différences consistent en une fenêtre spatiale plus étendue de 10° de longitude et de 12.5° de latitude sur le niveau atmosphérique 1000 hPa, ainsi qu'un nombre d'analogues de 51 au lieu de 25. À nouveau, des combinaisons différentes peuvent donner des performances quasiment similaires.

La même analyse a été menée sur la station de Binn afin de comparer la réponse d'une station par rapport à la série du groupement. Les résultats sont extrêmement semblables à la Figure 5.9 et ne seront donc pas présentés. La partie supérieure de la distribution ne présente pas plus de discrimination, et cette « mollesse » que nous avons observée auparavant n'est donc pas le fruit d'un lissage dû au regroupement des stations.

Cette analyse a été répétée pour la région du Chablais (Figure 5.10), constituée de 7 stations, qui est sensible à d'autres influences atmosphériques que les crêtes du sud-est. Si les paramètres optimaux varient, comprenant notamment un étirement plus à l'ouest des fenêtres spatiales, les conclusions précédentes sont également valables, à savoir que la fenêtre spatiale peut être plus grande que la taille optimale et que le nombre d'analogues peut varier sans forcément beaucoup influencer les performances de la méthode.

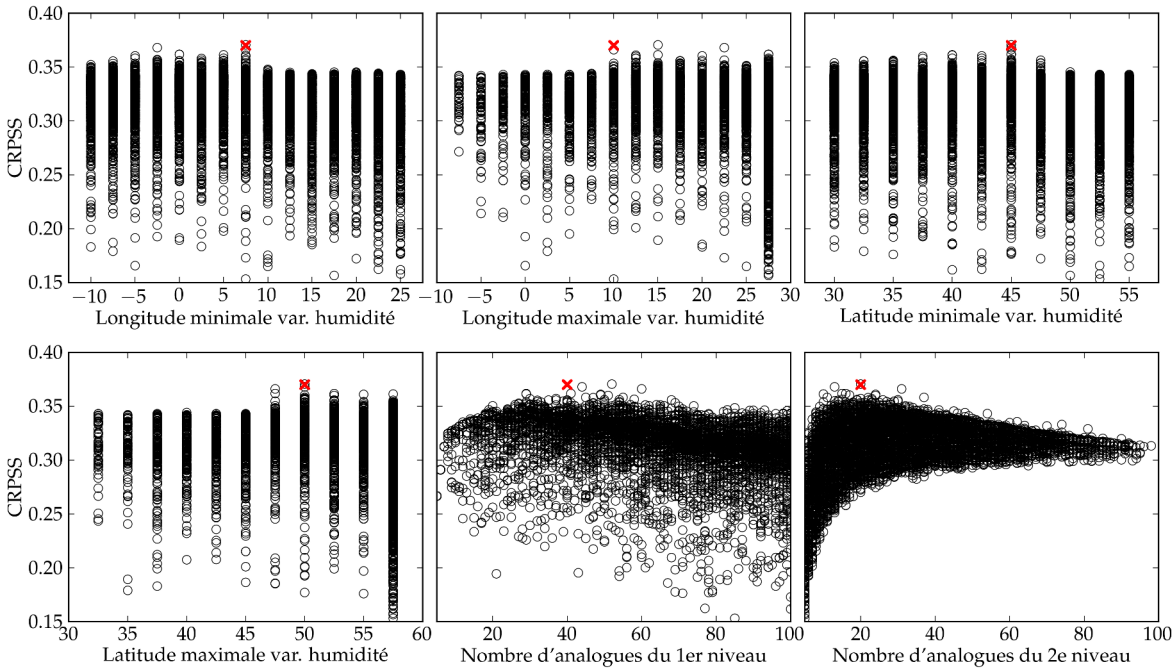


Figure 5.11 – Nuage de points (tronqué par le bas) résultant d'une méthode Monte-Carlo sur les paramètres de R2 pour la région des crêtes du sud-est, pour la période de calibration de 1998 à 2002. La croix rouge est le résultat de la calibration classique.

Finalement, les paramètres de la méthode de référence R2 ont été évalués de la même manière (Figure 5.11). Pour cette analyse, les fenêtres spatiales du premier niveau d'analogie ont été fixées. Seuls varient les paramètres de la fenêtre spatiale des variables d'humidité, ainsi que le nombre d'analogues du premier et du second niveau d'analogie. À nouveau, la fenêtre spatiale pourrait être légèrement plus étendue sans affecter grandement les performances.

L'optimum du nombre d'analogues du premier niveau s'est déplacé vers des valeurs plus élevées que précédemment, ce qui est en accord avec les paramètres habituellement proposés par les méthodes de calibration classiques. Le nombre d'analogues du second niveau présente une zone optimale relativement large, mais bien marquée. En effet, la partie supérieure du nuage affiche une tendance claire.

Cette analyse paramétrique par la méthode de Monte-Carlo nous renseigne sur la sensibilité relativement faible de certains paramètres, tels que les tailles exactes des fenêtres spatiales. Des performances acceptables sont possibles avec des combinaisons différentes de paramètres. Cette variation de combinaisons admissibles peut être un problème pour les approches de calibration classiques reposant sur des valeurs fixées a priori, bien qu'elles semblent ici plutôt performantes. Finalement, il est évident qu'une exploration uniquement aléatoire des paramètres n'est pas adaptée pour calibrer la méthode des analogues.

Chapitre 6

Implémentation en prévision opérationnelle

L'implémentation en prévision opérationnelle est notre principal « livrable » du projet MINERVE. Elle implique en premier lieu la définition des groupements pluviométriques utilisés pour la calibration. Puis, pour chacun de ceux-ci, nous calibrons les méthodes de référence avant de les comparer et d'identifier les plus intéressantes.

Suit une présentation du logiciel développé, Atmoswing, de son outil de prévision automatique, et de celui de visualisation des résultats. L'approche modulaire utilisée y est détaillée. Celle-ci permet de structurer la méthode des analogues sans devoir toucher au code.

6.1 Introduction du chapitre

L'implémentation en prévision opérationnelle commence par la création de groupements de stations pluviométriques, et par la calibration des méthodes de référence pour ceux-ci. La section suivante relève quelques contraintes liées à la prévision en temps réel. Nous présentons ensuite l'outil qui a été développé pour calculer et visualiser les prévisions.

6.2 Création des groupements pluviométriques

Ainsi que nous l'avons vu dans la section 5.3, il est préférable d'établir des groupements de stations pluviométriques plutôt que de travailler au niveau de la station. En effet, des influences synoptiques similaires peuvent avoir des effets régionaux semblables, mais avec une certaine variabilité spatiale locale, voire très locale. Les groupements homogénéisent ces aspects, ce qui améliore les performances de la méthode.

Ces groupements ne sont pas faciles à déterminer, car ils ne peuvent pas être délimités de manière directe. Ils dépendent d'un mélange d'influences atmosphériques, de l'effet de l'orographie, et de notre connaissance de la spatialisation des précipitations basée entre autres sur un réseau de stations assez épars en haute altitude. La délimitation des groupements a été effectuée manuellement sur la base d'un compromis entre les données suivantes :

- les sous-régions à comportement pluviométrique homogène résultant de plusieurs expertises (voir section 1.3.1) ;
- une analyse des corrélations entre stations (voir Annexe C) ;
- la cohérence des paramètres des méthodes de référence R1 et R2 calibrées séparément pour chaque station (voir section 5.4) ;
- ainsi que la taille des groupements qui devrait être similaire.

Table 6.1 – Liste des groupements pluviométriques retenus, avec les identifiants des stations concernées.

	Nom région	**Identifiant stations inclues**
1.	Chablais	7880,7970,7860,7800,7820,7940,7950
2.	Vallée du Trient	7710,7770,7750
3.	Alpes bernoises ouest	7300,7380
4.	Vallée du Rhône aval	7360,7520,7570,7470
5.	Vallées latérales gauches	7670,7590,7585,7464,7410,7400
6.	Crêtes du sud	7640,7620,7190
7.	Vallée du Rhône amont	7130,7255,7240,7220
8.	Crêtes du sud-est	7100,7161,9580
9.	Alpes bernoises est	7270
10.	Vallée de Conches	5010,7040,7068

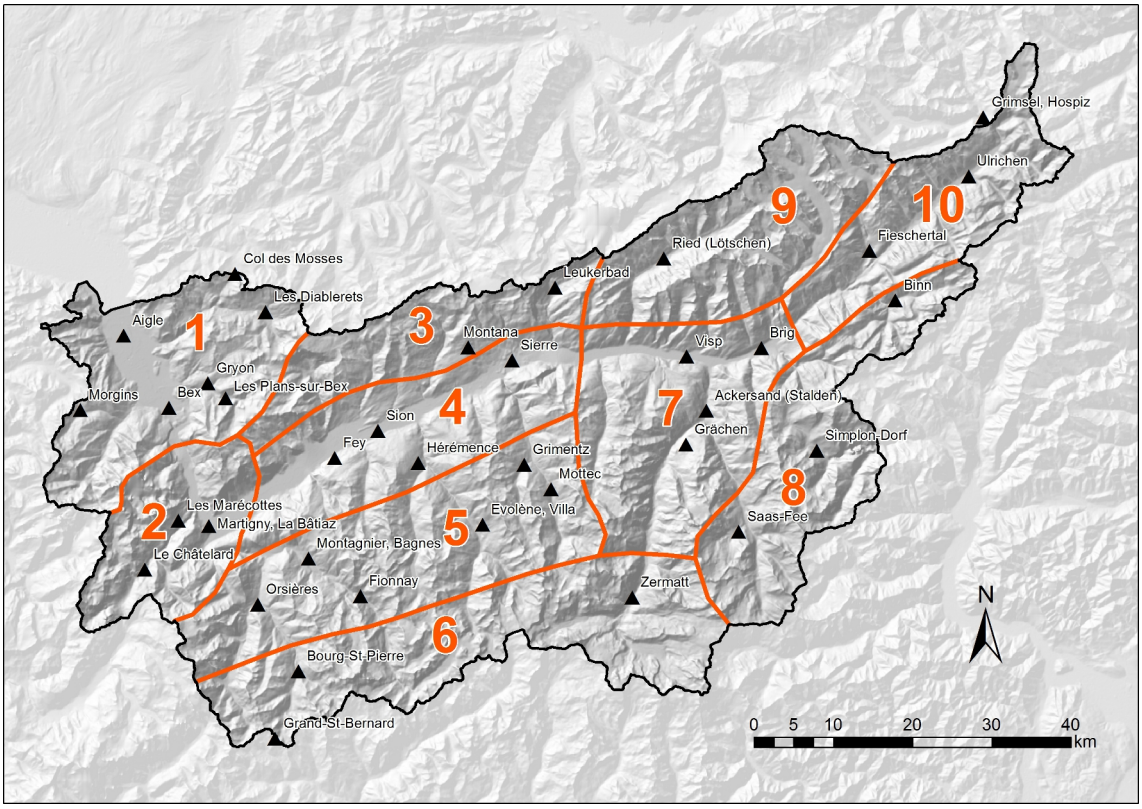


Figure 6.1 – Carte des groupements pluviométriques retenus. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

Toutes les sous-régions à comportement pluviométrique homogène ont été évaluées, ainsi que d'autres groupements manuels basés sur les aspects listés précédemment. Le choix des groupements finaux (voir Table 6.1 et Figure 6.1) a été effectué de manière à ce que l'ensemble des scores de la méthode des analogues soit équilibré. Idéalement, le nombre de stations devrait être similaire par groupement. Ceci ne peut pas être satisfait dans notre zone d'étude, puisque la densité du réseau est extrêmement variable. Ainsi, le nombre de stations va de 1 pour la région est des Alpes bernoises, ce qui est clairement sous-optimal, à 7 pour le Chablais.

Il existe des méthodes de regroupement automatique de stations (voir p.ex. Creutin et Obled, 1980), dont il peut être intéressant de comparer les résultats à notre proposition. Ceci ne sera toutefois pas entrepris dans le cadre de ce travail.

6.3 Calibration des méthodes de référence

Nous allons considérer toutes les méthodes de référence définies à la section 3.3, afin de les évaluer sur chaque groupement pluviométrique de la zone d'étude. Chacune des méthodes sera dans un premier temps calibrée avec la calibration classique, puis les plus intéressantes seront comparées à l'aide de différents scores de performance.

Les calibrations étant effectuées pour chaque groupement indépendamment, il en résulte des jeux de paramètres variables. Dans le but de ne pas multiplier les versions des méthodes à implémenter, une étape d'homogénéisation est effectuée sur les paramètres. Elle consiste à agréger certains groupements en leur attribuant un jeu de paramètres commun. Pour ce faire, différents compromis sont évalués, et les meilleurs, soit ceux qui n'engendrent pas de perte significative de performance (seuil de 0.2 % à 0.3 % sur les scores), sont conservés.

6.3.1 R0, les origines

La méthode R0 est une analogie de circulation qui se base sur une similitude (critère S1) de la hauteur du géopotentiel à 1000 et 700 hPa (R0a) ou à 1000 et 500 hPa (R0b). Nous avons effectué 4 calibrations, à savoir :

- la méthode R0a, en fixant le nombre d'analogues à 50, comme Guilbaud (1997) ;
- la méthode R0a, en réévaluant le nombre d'analogues ;
- la méthode R0b, avec un nombre d'analogues fixe ;
- et la dernière, R0b, avec une recalibration du nombre d'analogues.

Les résultats, présentés dans la Table 6.2, montrent des préférences plus ou moins prononcées pour les champs 700 hPa (R0a) ou 500 hPa (R0b). Les régions de la vallée du Trient (2) et des Alpes bernoises ouest (3) présentent un score significativement plus élevé en calibration et en validation pour le champ 700 hPa, alors que les régions de la vallée du Rhône amont (7), des crêtes du sud-est (8) et de la vallée de Conches (10) ont une préférence marquée pour le niveau 500 hPa. Les autres régions ne sont pas très sensibles au choix du niveau atmosphérique.

Table 6.2 – Calibration et validation des paramètres de la méthode de référence R0 pour les groupements du bassin supérieur du Rhône. Les nombres en gras sont les meilleurs scores.

	groupements									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
					calibration					
R0a^f	36.28	34.31	32.91	28.06	30.97	33.01	24.58	30.50	29.48	34.79
R0a	36.69	**34.53**	**33.33**	28.12	31.15	33.38	24.80	31.35	29.65	35.37
R0b^f	36.56	34.11	32.62	27.98	31.13	33.28	25.02	31.46	29.42	35.19
R0b	**36.94**	34.26	32.89	**28.14**	**31.30**	**33.59**	**25.26**	**32.25**	**29.74**	**35.44**
					validation					
R0a^f	35.04	32.09	30.45	**27.97**	34.22	37.17	25.81	34.00	27.22	35.95
R0a	**35.55**	**32.48**	**30.49**	27.82	34.44	37.62	25.96	35.14	**27.40**	36.65
R0b^f	35.12	32.15	29.69	27.62	33.96	37.32	26.49	35.08	27.23	36.25
R0b	35.42	31.90	29.88	27.80	**34.44**	**37.71**	**26.82**	**35.46**	27.25	**37.85**

^{f} nombre d'analogues fixes : 50

Table 6.3 – Paramètres résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R0.

Régions	Niveaux	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_1	Groupements
A	500, 1000	-2.5	20	40	7.5	30	1,4-7,9
B	500, 1000	2.5	15	42.5	5	30	8
C	500, 1000	0	17.5	42.5	2.5	30	10
D	700, 1000	-2.5	20	40	7.5	30	2,3

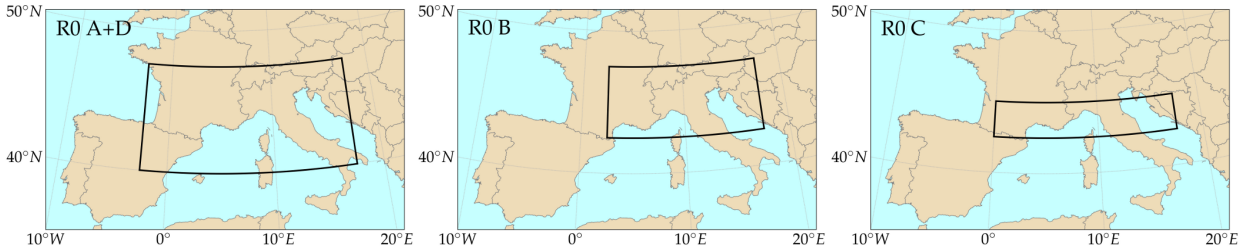


Figure 6.2 – Fenêtres spatiales des différentes régions pour l'analogie de circulation de la méthode de référence R0.

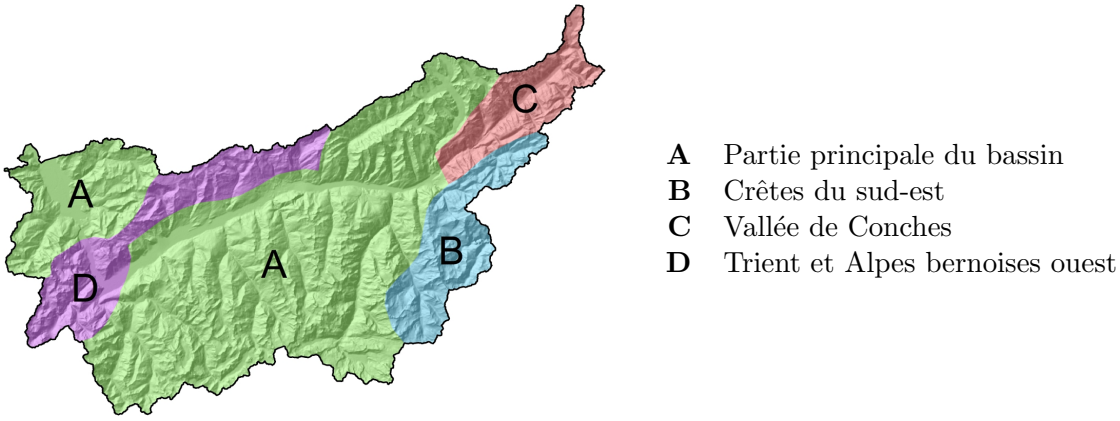


Figure 6.3 – Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R0. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

La procédure d'homogénéisation produit une réduction de la variabilité des paramètres entre groupements (voir Table 6.3). La région A agrège ainsi 6 groupements. Les paramètres pour les groupements du Chablais (1), de la vallée du Rhône aval (4), et des Alpes bernoises est (9), faisant partie de la région A, demeurent inchangés. Ceux des vallées latérales gauches (5), des crêtes du sud (6), et de la vallée du Rhône amont (7) subissent une réduction du nombre d'analogues et une augmentation de la taille de la fenêtre spatiale en latitude, ce qui donne lieu à un gain en performance pour chacun des trois groupements. Leur calibration était donc sous-optimale, ce qui est dû aux dépendances entre paramètres, et donc à l'influence de la valeur initiale du nombre d'analogues sur le choix de la fenêtre spatiale. De même, la vallée du Trient (2) est agrégée aux Alpes bernoises ouest (3) par une réduction du nombre d'analogues et une légère extension du domaine en longitude. Les quatre régions sont représentées dans la Figure 6.3.

6.3.2 R1, analogie de circulation

La méthode R1 est également une analogie de circulation sur le géopotentiel à 500 et 1000 hPa. La différence est le choix des heures, qui sont respectivement 24 h UTC et 12 h UTC.

Nous avons effectué 2 calibrations, à savoir :

– la méthode R1 en fixant le nombre d'analogues à 50, tel que défini par Bontron (2004) ;

– la méthode R1 en réévaluant le nombre d'analogues.

Les résultats de la calibration (Table 6.4) sont systématiquement meilleurs lorsque le nombre d'analogues est recalibré, ce qui est le cas de 8 groupements sur 10 en validation. Tous les scores de calibration sont inférieurs à ceux de la méthode R0, excepté pour la vallée de Conches (10). Les scores en validation présentent une tendance différente, avec des valeurs significativement plus élevées pour les Alpes bernoises ouest (3), la vallée du Rhône amont (7), les crêtes du sud-est (8), et les Alpes bernoises est (9).

Les performances de cette méthode sont mitigées par rapport à R0. Toutefois, il s'agit d'une méthode utilisée dans certains centres opérationnels (voir p.ex. OHM-CV, 2012), et souvent considérée comme référence (voir p.ex. Marty, 2010; Ben Daoud, 2010). Ainsi, nous allons tout de même l'implémenter en opérationnel, et la considérer comme l'une des références principales lors de ce travail.

Table 6.4 – Calibration et validation des paramètres de la méthode de référence R1 pour les groupements du bassin supérieur du Rhône. Même conventions que la Table 6.2.

	groupements									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
	calibration									
R1^f	35.50	33.40	32.67	27.32	30.06	32.67	24.43	31.24	28.93	35.00
R1	**35.55**	**33.55**	**32.89**	**27.51**	**30.29**	**32.98**	**25.01**	**31.65**	**29.18**	**35.60**
	validation									
R1^f	34.06	**32.47**	31.11	**27.83**	33.51	36.77	27.20	35.83	27.43	36.53
R1	**34.24**	32.19	**31.20**	27.67	**33.52**	**37.16**	**27.47**	**36.48**	**27.71**	**37.19**

^{f} nombre d'analogues fixes : 50

Table 6.5 – Paramètres résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R1.

Régions	**Niveaux**	**Lon min**	**Taille lon**	**Lat min**	**Taille lat**	$\mathbf{N_1}$	**Groupements**
A	500, 1000	-2.5	20	40	7.5	35	1,2,3,4,5,6,7,9
B	500, 1000	5	12.5	40	10	30	8
C	500, 1000	-2.5	20	42.5	5	30	10

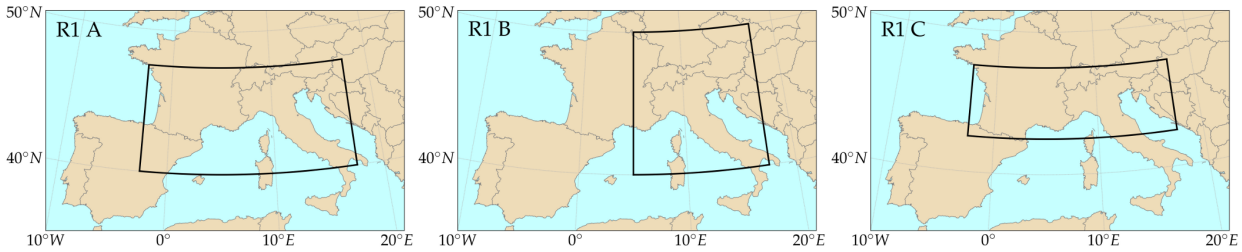


Figure 6.4 – Fenêtres spatiales des différentes régions pour l'analogie de circulation de la méthode de référence R1.

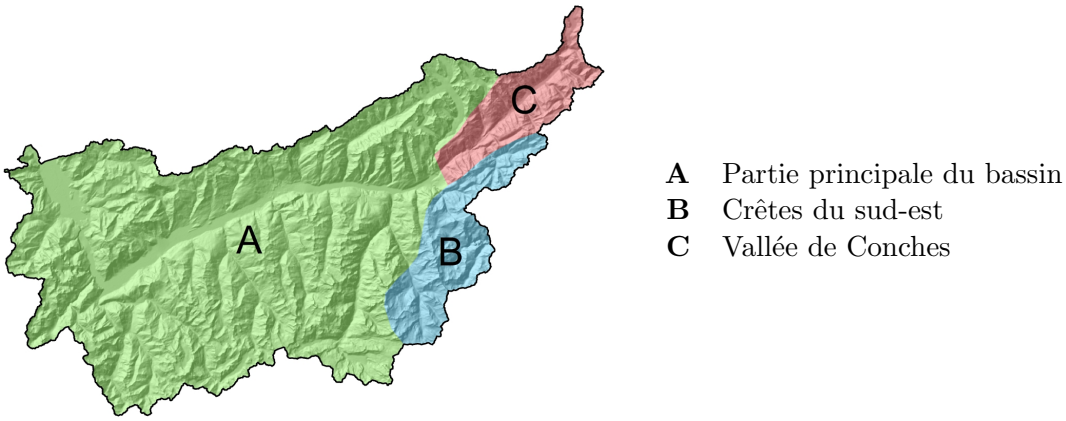


Figure 6.5 – Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R1. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

L'homogénéisation des paramètres aboutit à 3 régions distinctes, très semblables à celles de la méthode R0. La différence est que la région Trient et Alpes bernoises ouest est ici intégrée à la partie principale, puisque nous ne considérons plus le niveau atmosphérique 700 hPa. Les régions homogènes pour la méthode R1 sont illustrées dans la Figure 6.5.

6.3.3 R2, prise en compte de l'humidité

La méthode R2 ajoute un niveau d'analogie à R1, en considérant l'humidité à 850 hPa à 12 et 24 h UTC.

Table 6.6 – Calibration et validation des paramètres de la méthode de référence R2 pour les groupements du bassin supérieur du Rhône. Même conventions que la Table 6.2.

	groupements									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
					calibration					
R2^f	40.71	**38.29**	**36.58**	**32.14**	34.40	36.80	28.25	34.11	33.27	37.80
R2	**40.98**	38.24	36.42	32.06	**34.71**	**36.92**	**28.62**	**34.44**	**33.85**	**38.03**
					validation					
R2^f	40.02	37.27	**35.01**	32.99	**38.05**	**41.19**	30.28	37.91	31.97	38.78
R2	**40.02**	**37.41**	34.83	**33.08**	37.84	40.98	**30.57**	**38.55**	**32.23**	**39.39**

^{f} nombre d'analogues fixes : 70, puis 30

Les résultats de la calibration (Table 6.6) sont tous supérieurs aux méthodes avec un seul niveau d'analogie sur la circulation atmosphérique. Les scores sont généralement meilleurs lorsque le nombre d'analogues est recalibré, à part pour trois groupements, où la valeur fixée initialement est très légèrement préférable. À nouveau, cet aspect pouvant sembler

Table 6.7 – Paramètres résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R2.

Rég.	Analogie circulation					Analogie humidité					Group.
	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_1	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_2	
A	-2.5	20	40	7.5	55	5	5	45	2.5	25	3-7,9,10
B	5	12.5	40	10	40	5	5	45	2.5	25	8
C	-5	20	40	7.5	55	7.5	0	45	2.5	25	1
D	-2.5	17.5	40	7.5	70	5	5	45	0	30	2

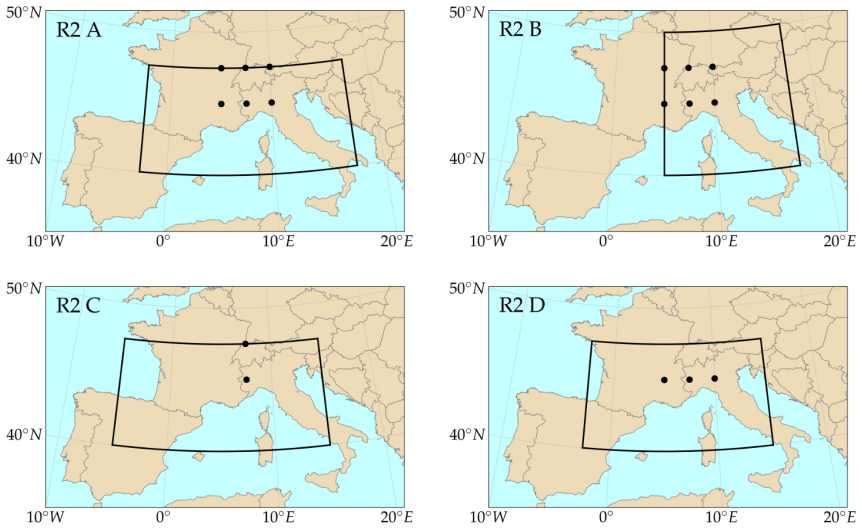
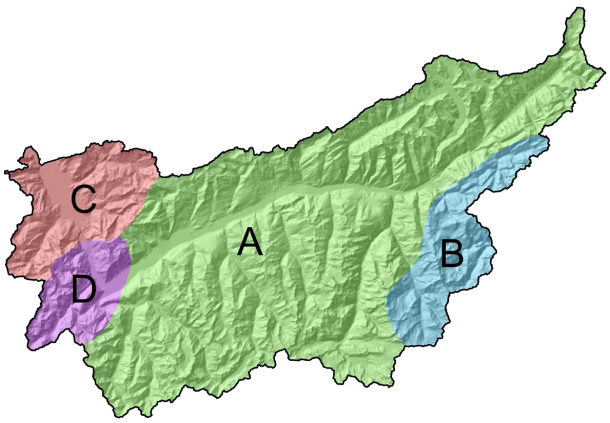


Figure 6.6 – Fenêtres spatiales des différentes régions pour l'analogie de circulation (cadre continu) et l'analogie d'humidité (points) de la méthode de référence R2.



A Partie principale du bassin
B Crêtes du sud-est
C Chablais
D Vallée du Trient

Figure 6.7 – Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R2. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

surprenant est dû aux dépendances entre paramètres, qui deviennent encore plus importantes avec l'ajout d'un niveau d'analogie. Le choix initial du nombre d'analogues conditionne le domaine spatial retenu. Puis, lors de la recalibration du nombre d'analogues, la valeur correspondant au mieux au domaine calibré sera considérée comme optimale.

La phase d'homogénéisation résulte en une définition de 4 régions (voir Table 6.7 et Figure 6.7), avec toujours une grande partie du bassin partageant les mêmes paramètres. Le groupement des Alpes bernoises ouest gagne même un peu en compétence lors du changement de paramètres.

6.3.4 R3, prise en compte du flux d'humidité

La méthode de référence R3 est une variante de R2 qui considère le flux d'humidité en tenant compte des variables du vent outre celles de l'eau précipitable et de l'humidité relative. Le niveau atmosphérique pour le vent et l'humidité est 925 ou 700 hPa, au lieu de 850 hPa.

Table 6.8 – Calibration et validation des paramètres de la méthode de référence R3 pour les groupements du bassin supérieur du Rhône. Même conventions que la Table 6.2.

	groupements									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
					calibration					
R3a	38.25	35.60	34.51	30.25	33.02	35.43	26.58	33.12	31.40	36.65
R3b^f	39.09	37.76	36.93	31.76	34.04	37.12	27.83	34.37	33.74	38.70
R3b	39.16	38.06	37.09	31.95	34.31	37.32	27.94	34.60	33.80	38.68
R3b*	38.58	36.25	35.16	30.52	33.76	36.23	26.88	33.88	32.80	37.60
R3c	37.09	35.56	34.84	29.76	32.15	34.91	26.31	32.63	31.09	36.80
R3d	40.64	38.68	37.26	31.90	34.27	36.78	28.08	33.40	33.80	38.76
R3e	**41.77**	**40.09**	**39.16**	**34.06**	**35.85**	**38.43**	**29.63**	**35.69**	**35.87**	**39.84**
R3f	40.84	39.40	37.85	32.78	34.96	37.83	28.52	34.90	34.55	39.20
					validation					
R3a	38.09	34.25	32.11	31.26	35.50	39.10	28.50	37.84	30.44	38.68
R3b^f	38.58	36.90	34.42	32.81	38.18	41.76	30.25	38.11	32.48	40.52
R3b	38.93	36.92	34.47	32.97	38.06	41.59	30.29	38.41	32.77	40.62
R3b*	38.28	34.84	33.59	31.40	36.85	40.08	29.14	37.33	31.60	39.54
R3c	37.27	34.81	32.60	30.89	35.98	39.56	28.42	37.27	30.40	38.81
R3d	40.79	38.38	36.17	33.38	37.60	40.95	30.71	38.66	32.74	40.70
R3e	**42.47**	**40.83**	**37.56**	**36.20**	**40.47**	**42.78**	**33.25**	**40.44**	**35.02**	41.35
R3f	40.54	39.97	36.27	35.01	39.41	42.71	31.11	38.85	34.09	**41.39**

^{f} nombre d'analogues fixes : 60 puis 25
* sans la variable du vent

La calibration des différentes variantes de la méthode R3 (voir Table 6.8) montre un faible intérêt pour l'humidité au niveau 925 hPa (R3a et R3c), qui présente des scores systématiquement inférieurs aux niveaux 850 et 700 hPa.

Afin de caractériser la part du score liée au choix du niveau 700 hPa à celle liée à l'utilisation des variables de vent, nous avons évalué la méthode R3b sans inclure le vent. Les résultats montrent que la prise en compte du flux est préférable (voir Table 6.8).

En comparant la méthode R2 à la méthode R3b, nous observons que cette dernière est souvent moins performante pour notre région, excepté pour 4 groupements, où de petits gains ont été réalisés sur les scores. Nous nous sommes donc intéressés à la prise en compte du flux en considérant les mêmes niveaux atmosphériques et les mêmes heures que pour la méthode R2. Nous appellerons cette méthode R3d (voir Table 6.9). Puis nous avons renouvelé l'exercice en considérant le premier niveau d'analogie de R2, mais en comparant l'humidité au niveau 700 hPa au lieu de 850 hPa, à 12 et 24 h UTC (R3e, voir Table 6.10) et 06 et 18 h UTC (R3f, voir Table 6.11).

Table 6.9 – Paramètres de la méthode R3d.

Niveau	**Variable**	**Heure**	**Critère**	**Nb analogues**
présélection	±60 jours autour de la date cible			
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	12 h 24 h	S1	60
2	V 850 hPa * eau préc. * humidité rel. 850 hPa	12, 24 h	RMSE	25

Table 6.10 – Paramètres de la méthode R3e.

Niveau	**Variable**	**Heure**	**Critère**	**Nb analogues**
présélection	±60 jours autour de la date cible			
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	12 h 24 h	S1	60
2	V 700 hPa * eau préc. * humidité rel. 700 hPa	12, 24 h	RMSE	25

Table 6.11 – Paramètres de la méthode R3f.

Niveau	**Variable**	**Heure**	**Critère**	**Nb analogues**
présélection	±60 jours autour de la date cible			
1	géopotentiel à 1000 hPa géopotentiel à 500 hPa	12 h 24 h	S1	60
2	V 700 hPa * eau préc. * humidité rel. 700 hPa	06, 18 h	RMSE	25

Les évaluations de ces nouvelles variantes confirment notre intuition, à savoir que la prise en compte du flux est une amélioration, mais que les paramètres n'étaient pas optimaux pour notre région. Le niveau 700 hPa est préférable au 850 hPa pour l'analogie d'humidité, et la fenêtre temporelle 12 et 24 h UTC est meilleure que 06 et 18 h UTC pour notre région (voir Table 6.8).

La procédure d'homogénéisation aboutit à trois régions un peu différentes de celles de R2. Une large partie prédominante est toujours présente, de même que le groupement des crêtes du sud-est isolé, mais les régions de la vallée du Trient (2) et du Chablais (1) ont disparu, et la vallée du Rhône amont (7) est ici isolée.

Table 6.12 – Paramètres des régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R3.

Rég.	Analogie circulation					Analogie flux d'humidité					Group.
	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_1	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_2	
A	-2.5	20	40	7.5	90	5	5	45	0	25	1-6,9,10
B	5	12.5	40	10	45	7.5	2.5	45	0	20	8
C	-2.5	22.5	40	7.5	50	5	5	45	0	15	7

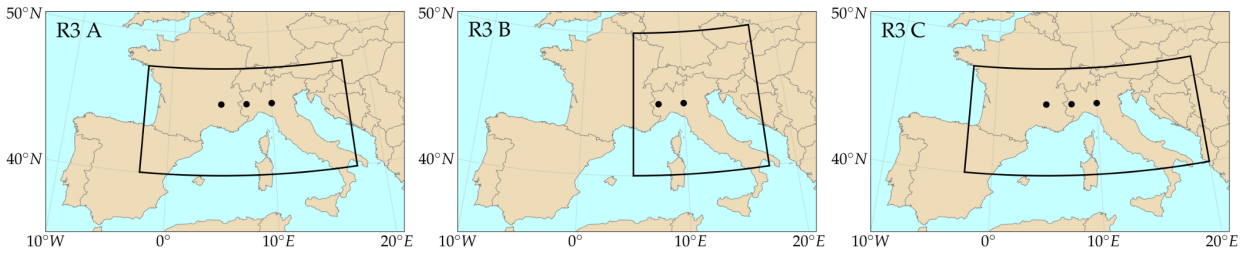


Figure 6.8 – Fenêtres spatiales des différentes régions pour l'analogie de circulation (cadre continu) et l'analogie d'humidité (points) de la méthode de référence R3.

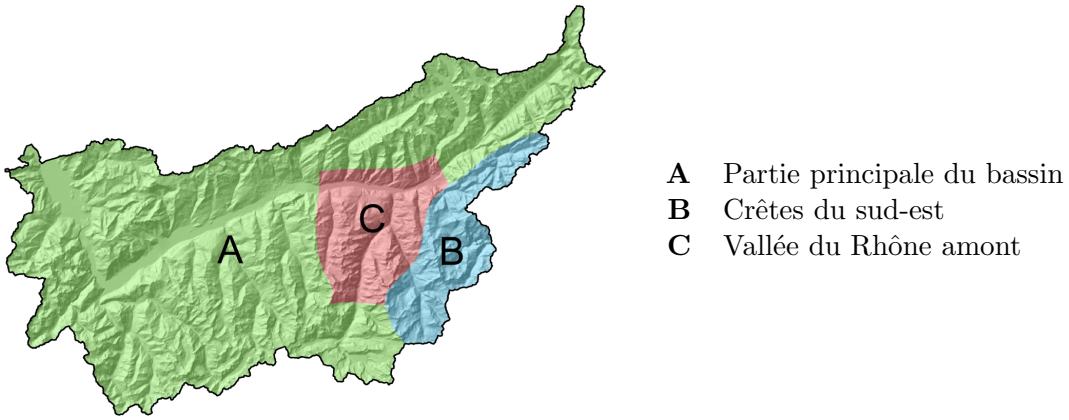


Figure 6.9 – Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R3. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

6.3.5 R4, présélection sur les températures

Ben Daoud (2010) a proposé une présélection des journées candidates sur la base des températures plutôt que sur une période de plus ou moins 60 jours autour de la date cible, ce qui constitue la méthode R4. Cette méthode ne peut pas être calibrée comme les autres, c'est-à-dire en introduisant successivement chaque niveau d'analogie, car la présélection de la température doit être suivie d'une recherche d'analogie, et ne peut pas être calibrée indépendamment (nous avons essayé, mais avons obtenu de piètres résultats). L'approche consiste

Table 6.13 – Calibration et validation des paramètres de la méthode de référence R4 pour les groupements du bassin supérieur du Rhône. Même conventions que la Table 6.2.

	groupements									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
					calibration					
R4a^{pf1}	41.60	38.57	36.69	32.43	35.37	37.34	29.35	34.75	34.28	38.49
R4a^{pf6}	41.72	38.77	37.00	32.46	35.56	37.49	29.23	35.03	34.40	38.78
R4a^{pf6}*****	41.34	38.44	36.71	32.41	35.39	37.34	29.25	35.07	34.31	38.59
R4a^{pf6}******	41.24	38.46	36.64	32.33	35.39	37.37	29.20	34.99	34.27	38.57
R4a^{pf}	41.89	38.91	37.17	32.95	35.71	37.86	29.72	35.88	35.04	39.24
R4a^{p}	41.05	38.54	36.86	32.85	35.17	37.67	29.78	36.37	35.00	39.25
R4a	41.76	39.15	37.10	33.05	35.55	37.95	**30.17**	**36.43**	35.05	**39.49**
R4b^{pf}	42.79	39.39	38.28	33.32	36.13	38.56	29.62	33.87	35.58	39.20
R4b	**42.90**	**39.72**	**38.55**	**33.65**	**36.49**	**38.62**	30.08	34.31	**35.66**	39.38
R4c^{pf}	38.21	35.41	34.18	29.44	32.82	35.17	25.87	31.01	30.46	36.58
					validation					
R4a^{pf1}	41.73	38.10	36.16	33.94	38.33	41.19	30.95	38.62	33.28	39.77
R4a^{pf6}	41.79	38.50	35.94	34.11	38.68	41.35	31.46	38.95	33.08	39.86
R4a^{pf6}*****	41.58	38.19	36.30	33.61	38.39	41.09	31.20	38.96	33.35	39.79
R4a^{pf6}******	41.68	38.00	35.94	33.90	38.39	41.43	30.99	38.79	33.26	39.93
R4a^{pf}	41.64	38.18	35.89	33.95	38.67	41.39	31.55	39.01	**33.81**	39.86
R4a^{p}	41.26	38.26	35.99	33.75	38.05	41.51	**31.95**	39.67	33.52	39.51
R4a	41.80	38.38	35.92	33.74	38.27	41.60	31.52	**39.81**	33.30	39.89
R4b^{pf}	42.40	**39.27**	36.36	34.43	39.47	**41.79**	31.01	37.87	33.68	39.91
R4b	**42.43**	39.07	**36.97**	**34.84**	**39.64**	41.75	31.71	38.33	33.51	**40.11**
R4c^{pf}	38.06	34.55	32.31	31.05	36.48	38.67	27.90	35.37	29.26	37.74

^{p} nombre d'analogues de la présélection fixe : 4800
^{f} nombre d'analogues des niveaux de R2 fixe : 70 puis 25
^{1} présélection à l'aide de la température au point le plus proche du bassin (45° / 7.5°)
^{6} présélection à l'aide de la température aux 6 points entourant le bassin (45-47.5° / 5-10°)
* température de l'air à 24 h UTC au lieu de 36 h UTC pour le niveau 925 hPa
** température de l'air à 18 h UTC pour les 2 niveaux

donc à considérer les paramètres de la méthode R2 (analogie de circulation et d'humidité) optimaux pour chaque groupement, et à optimiser la présélection en fonction de ceux-ci.

Différentes approches ont été testées (voir Table 6.13) en laissant plus ou moins de liberté à la méthode de calibration, ainsi qu'en évaluant d'autres fenêtres temporelles. Les variantes suivantes ont été évaluées sur la méthode R4a :

– Présélection à l'aide de la température (925 hPa à 36 h UTC et 600 hPa à 12 h UTC) au point le plus proche du bassin (45° / 7.5°) avec des nombres d'analogues fixes pour chaque niveau d'analogie. Cette variante et les trois suivantes n'ont pas de paramètre à optimiser, puisqu'ils sont tous déterminés au préalable. Les calculs sont donc relativement rapides, car il s'agit de simples évaluations. Les scores sont légèrement supérieurs à ceux de la méthode R2, avec des différences variables.

- Présélection à l'aide de la température aux 6 points entourant le bassin (45-47.5° / 5-10°), et avec des nombres d'analogues fixés. Les scores sont globalement un peu meilleurs lorsque nous considérons les 6 points entourant le bassin au lieu du point le plus proche.
- Même variante que la précédente, mais en considérant la température de l'air à 24 h au lieu de 36 h pour le niveau 925 hPa. Ce changement d'heure engendre une petite perte sur les performances de la méthode.
- Toujours la même variante, mais en considérant la température de l'air à 18 h UTC pour les 2 niveaux. Ce second changement d'heure engendre également une légère perte de performances.
- Optimisation de la fenêtre spatiale pour les températures avec des nombres d'analogues fixés. Nous ne sommes plus ici dans un cas de simple évaluation, ce qui requiert des calculs beaucoup plus intensifs. Le choix d'une fenêtre spatiale optimale (qui peut être ponctuelle) améliore les scores de tous les groupements.
- Optimisation de la fenêtre spatiale pour les températures, avec le nombre d'analogues de la présélection fixe, mais en recalibrant ceux des niveaux suivants. Les résultats obtenus sont variables et ne sont pas systématiquement meilleurs que le cas précédent. Ceci est dû aux dépendances entre paramètres, et donc aux choix de valeurs initiales non optimales.
- Optimisation de la fenêtre spatiale pour les températures, ainsi que des nombres d'analogues de tous les niveaux. Chaque combinaison possible des nombres d'analogues des différents niveaux d'analogie a été évaluée (en présélection, $1000 \leqslant N_0 \leqslant 10000$ avec un pas de 100 ; pour l'analogie de circulation, $10 \leqslant N_1 \leqslant 150$ avec un pas de 10 ; pour l'analogie d'humidité, $5 \leqslant N_2 \leqslant 80$ avec un pas de 5). Cette variante doit effectuer un nombre très important de calculs, et s'avère donc très gourmande en temps. Les scores sont globalement similaires au cas où les nombres d'analogues de tous les niveaux sont fixés, mais avec quelques améliorations notables pour la vallée du Rhône amont (7), les crêtes du sud-est (8), et la vallée de Conches (10).

Par la suite, nous avons évalué les différentes variantes (la fenêtre spatiale est systématiquement optimisée) : R4a (humidité à 850 hPa à 12 et 24 h UTC), R4b (humidité à 925 et 700 hPa à 12 et 24 h UTC), et R4c (humidité à 925 et 700 hPa toutes les 6 h). La méthode R4b est généralement la meilleure, avec des différences significatives par rapport aux autres, excepté pour les crêtes du sud-est (8), où l'humidité à 850 hPa est préférable, ainsi que pour les groupements de la vallée du Rhône amont (7), et de la vallée de Conches (10), où les performances selon R4a et R4b sont proches. Finalement, la considération de toutes les heures (R4c) donne des scores largement inférieurs.

Table 6.14 – Paramètres optimaux de la présélection sur les températures.

Région	N_0	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_1	N_2
1	5800	5	0	50	0	90	30
2	9600	17.5	2.5	50	0	100	30
3	7700	17.5	2.5	47.5	2.5	70	30
4	8700	17.5	2.5	47.5	2.5	70	30
5	9000	17.5	2.5	47.5	2.5	70	30
6	9100	10	2.5	50	2.5	60	25
7	9300	15	2.5	47.5	5	50	20
8	6000	17.5	2.5	50	0	40	20
9	6500	15	2.5	50	0	70	25
10	5000	12.5	5	50	0	50	25

Nous nous sommes penchés sur le choix des paramètres optimaux de la présélection retenus précédemment. Les fenêtres spatiales sur lesquelles les températures sont comparées, de même que le nombre d'analogues de la présélection et ceux des niveaux d'analogie suivants sont donnés dans la Table 6.14. Le nombre d'analogues de la présélection est très élevé : jusqu'à deux fois le nombre de jours en fenêtre temporelle fixe (4800), ce qui représente 2/3 des jours de l'archive.

Le plus dérangeant est l'emplacement de la fenêtre spatiale optimale proposée, qui se situe souvent en Pologne ! Cette fenêtre spatiale n'est pas proche de la Suisse, ce qui diffère des travaux de Ben Daoud (2010). Cette position à l'aval du flux peut peut-être s'expliquer par le choix de la fenêtre temporelle d'analogie, constituée des heures 12 h UTC (pour le niveau 600 hPa) et 36 h (pour 925 hPa). Toutefois, comme nous l'avions évalué précédemment, c'est bien cette combinaison de fenêtres spatiales et temporelles qui donne les meilleurs scores. Ceci ne nous amène aux réflexions suivantes :

- Le choix d'une fenêtre spatiale située si loin du bassin et d'une échéance aussi éloignée de la période cible semble difficilement défendable.
- La variable de température à 36 h sera moins bien prévue par le modèle global, puisque celle-ci se trouve à une échéance plus éloignée. De plus, la température constitue également une variable difficile à prévoir de manière exacte, surtout à proximité de la surface, et d'autant plus lorsqu'elle est perturbée par des fronts et des précipitations. Il serait donc raisonnable de considérer une fenêtre temporelle située dans la journée prévue, qui sera peut-être moins efficace en prévision parfaite (calibration), mais qui contiendra moins d'incertitude en opérationnel.
- Ben Daoud (2010) a montré que la température à 36 h dans les très basses couches est préférable à d'autres fenêtres temporelles et à d'autres niveaux pour les jours pluvieux (le niveau 600 hPa à 12 h UTC explique bien les jours non pluvieux) et le justifie par l'identification du passage d'un front. Nous sommes alors davantage dans une recherche d'analogie que dans une présélection basée sur une similitude de l'énergie thermique.

Nous avons encore réalisé de multiples tests en sélectionnant le seul niveau 600 hPa, en contraignant les heures de sélection dans la même journée, etc., mais toutes ces variantes aboutissent à une perte plus ou moins significative des compétences. Malgré nos interrogations, nous avons choisi de garder la méthode de Ben Daoud (2010), et de considérer le niveau 925 hPa à 36 h. Cette méthode devra cependant être évaluée dans un cadre de prévision opérationnelle pour connaître ses réelles capacités prévisionnelles.

Trois régions résultent de la procédure d'homogénéisation (voir Table 6.15 et Figure 6.11). Chacun de ces groupements utilise les 6 points autour du bassin pour la comparaison des températures (5-10° en longitude, et 45-47.5° en latitude), mais le nombre d'analogues varie. À l'aide de cette présélection forcée, nous pouvons choisir les niveaux d'humidité 700 et 925 hPa pour tous les groupements, sans perte notable pour ceux qui favorisaient

Table 6.15 – Paramètres résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R4.

Rég.	T°	Analogie circulation					Analogie flux d'humidité					Group.
	N_0	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_1	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_2	
A	8700	-5	20	40	7.5	70	7.5	0	45	2.5	30	1-6
B	6000	5	12.5	40	10	40	5	5	45	2.5	20	8
C	9300	-2.5	22.5	40	7.5	50	5	5	45	2.5	20	7,9,10

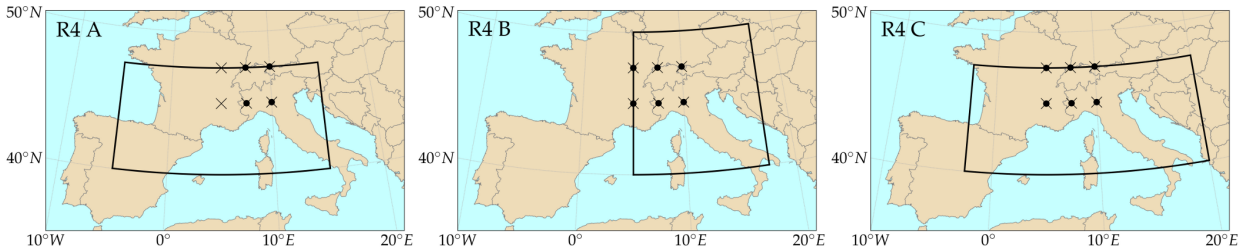


Figure 6.10 – Fenêtres spatiales des différentes régions pour l'analogie de température (croix), de circulation (cadre continu), et d'humidité (points) de la méthode de référence R4.

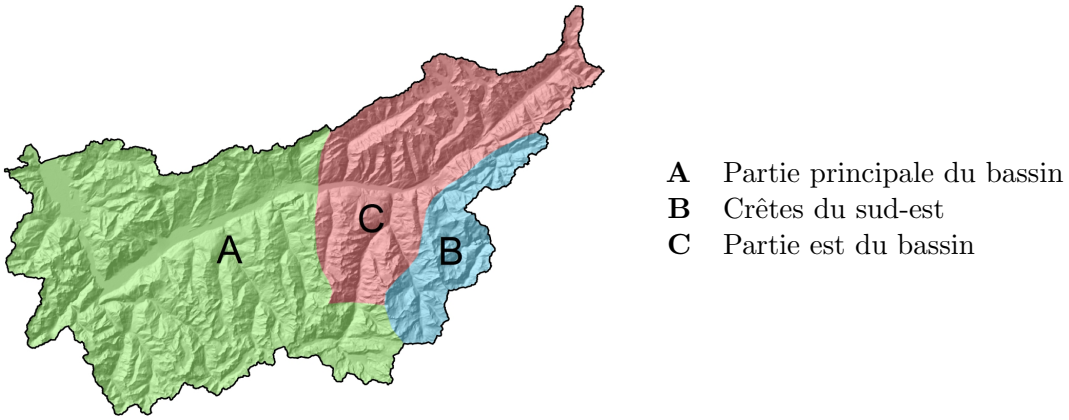


Figure 6.11 – Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la méthode R4. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

jusqu'alors le niveau 850 hPa. Lors de l'agrégation, nous avons autorisé des regroupements au détriment d'une perte en compétence un peu plus importante que précédemment (-0.48 % dans le pire des cas) afin de restreindre le nombre de régions. En revanche, nous gagnons systématiquement en validation (jusqu'à 0.74 %) par rapport, entre autres, à une présélection qui utiliserait une fenêtre spatiale située en Pologne.

Au final, la méthode R4 aura été compliquée à calibrer. Le fait d'optimiser la présélection contraint à connaître les paramètres des autres niveaux d'analogie, et à les fixer au début de la procédure. Nous gérons également ici un nombre très important de situations candidates (jusqu'à plus de 9000 par jour cible), ce qui consomme beaucoup de mémoire et de temps de calcul. Les efforts nécessaires à la calibration de cette présélection sont très importants comparés aux autres méthodes d'analogie, et ce pour un gain peu convaincant. Nous la garderons cependant parmi les références.

6.3.6 R5, prise en compte des mouvements verticaux

La méthode de référence R5 ajoute un niveau d'analogie sur les mouvements verticaux à la méthode R4. Toutefois, cette méthode a été développée sur de grands bassins versants de plaine, où les mouvements verticaux de grande ampleur (au contact des masses d'air) peuvent jouer un rôle dans la genèse des précipitations. Dans le cas de bassins versants alpins, ces mouvements sont majoritairement contrôlés par l'orographie locale, et ne sont donc pas forcément bien représentés dans les réanalyses en raison de leur résolution et de leur représentation des Alpes.

Nous avons évalué cette dernière méthode en partant des paramètres de la méthode R4 (présélection sur les températures) établis pour chaque région en y insérant le niveau supplémentaire entre l'analogie de circulation et celle de l'humidité. Les résultats que nous obtenons avec les mouvements verticaux extraits des réanalyses sont systématiquement inférieurs à ceux de la méthode R4. La considération des mouvements verticaux, telle qu'elle est paramétrée ici, n'est donc pas intéressante pour le milieu alpin, ce qu'avait également constaté Bontron (2004). Nous ne considérerons plus cette méthode par la suite.

6.3.7 Synthèse et utilisation d'autres scores

Lors des multiples calibrations sur des méthodes à complexité croissante, nous avons été confrontés à la difficulté de la démarche et à la subjectivité inévitable introduite par les choix de paramètres initiaux. Un effet que nous avons pu observer est l'impact du choix du nombre d'analogues initial sur l'optimisation de la fenêtre spatiale, et réciproquement. Ainsi, plus les niveaux d'analogie sont nombreux, plus la quantité de paramètres prédéterminés et leurs interactions sont importantes. Cette influence est d'autant plus marquée lors de l'utilisation d'une présélection sur la température, laquelle nécessite de fixer préalablement les paramètres de tous les niveaux d'analogie ultérieurs.

Une telle méthode ne peut quasiment pas être calibrée par une approche classique, car la présélection et les niveaux d'analogie ne peuvent pas être optimisés indépendamment, ni réellement de manière conjointe en raison du temps trop important de calculs. Nous suspectons donc que plus la méthode est complexe, plus il est probable que notre paramétrisation ne soit pas optimale. Nous avons d'ailleurs de fortes indications dans ce sens, puisque lors des procédures d'homogénéisation, nous avons découvert par hasard des jeux de paramètres meilleurs en calibration et en validation que ceux proposés par une approche de calibration classique.

Nous avons reporté dans la Table 6.16 les scores CRPSS de toutes les méthodes retenues après homogénéisation des régions. La méthode R3e, soit notre version modifiée de l'analogie du flux d'humidité, et la méthode R4b – avec présélection sur les températures – sont les plus performantes. Toutefois, les scores de validation sont systématiquement supérieurs pour la méthode R3e par rapport à la méthode R4, ce qui est signe d'une plus grande robustesse.

Nous avons également calculé presque tous les scores donnés dans la section 2.4 pour chacune des 5 méthodes de référence retenues, et pour chaque région. Lorsque les scores sont conçus pour des prévisions déterministes discrètes, nous avons considéré les quantiles 20 %, 60 % et 90 % de nos distributions d'analogues et les avons comparés aux seuils des précipitations normalisées $P/P10 > 0$, $\geq 1/3$, $\geq 2/3$, ≥ 1. Les nombres de journées où les précipitations observées sont supérieures à ces seuils pour chacun des groupements sont donnés dans la Table 6.17.

Au vu du nombre important de scores ainsi évalués (128 par groupement), avec des significations variables, nous ne pouvons pas tous les présenter. Nous avons donc synthétisé tout d'abord quelques résultats de la prévision de l'occurrence des précipitations. Le quantile 60 % étant meilleur que le 20 % ou le 90 % pour la prévision de l'occurrence (pour la plupart des scores), seul celui-ci est donné dans la Table 6.18. Les résultats sont toujours exprimés en pourcentage d'amélioration par rapport à la moyenne des scores par groupement, quel

Table 6.16 – Synthèse des scores CRPSS pour chaque méthode retenue et chaque groupement.

	groupements									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
					calibration					
R0ab	36.94	34.51	33.33	28.14	31.54	33.84	25.30	32.25	29.74	35.44
R1	35.47	33.54	32.93	27.47	30.26	32.98	24.81	31.65	29.18	35.60
R2	40.98	38.29	36.90	32.12	34.55	36.77	28.60	34.44	33.77	37.86
R3e	41.61	**40.45**	**39.47**	**34.06**	35.69	**38.54**	29.63	35.69	**35.87**	**39.60**
R4b	**42.42**	39.42	38.25	33.45	**36.30**	38.53	**30.32**	**36.31**	35.33	39.21
					validation					
R0ab	35.42	32.64	30.49	27.80	34.41	37.99	27.13	35.46	27.25	37.85
R1	34.41	32.38	30.96	27.64	33.71	37.16	27.59	36.48	27.71	37.19
R2	40.02	37.27	35.07	32.83	37.67	40.76	30.76	38.55	32.39	39.23
R3e	**42.59**	**40.99**	**38.30**	**36.20**	**41.02**	**43.45**	**33.25**	**40.44**	**35.02**	**41.71**
R4b	**42.59**	39.22	37.23	34.86	39.96	41.80	32.26	40.20	33.98	40.04

Table 6.17 – Nombre de jours avec des précipitations observées supérieures aux seuils indiqués pour chaque groupement du bassin supérieur du Rhône. Statistiques données pour la période de calibration et celle de validation.

	groupements									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
P/P10	**Période de calibration (total = 14607 jours)**									
> 0	8604	6536	6732	6061	7519	8284	6013	7210	6239	8365
$\geq 1/3$	561	304	337	306	317	299	144	151	228	299
$\geq 2/3$	51	31	25	33	27	30	26	31	26	47
≥ 1	4	3	4	5	4	3	2	4	3	3
P/P10	**Période de validation (total = 2924 jours)**									
> 0	1718	1342	1346	1231	1444	1668	1171	1450	1226	1667
$\geq 1/3$	122	68	82	64	55	52	30	27	56	60
$\geq 2/3$	8	11	7	9	4	3	4	2	2	5
≥ 1	1	1	2	2	1	2	2	1	1	1

Table 6.18 – Scores calculés sur les méthodes de référence pour la prévision de l'occurrence des précipitations à l'aide du quantile 60 %. Les meilleurs scores sont indiqués en gras.

	Période de calibration					**Période de validation**				
	R0	**R1**	**R2**	**R3**	**R4**	**R0**	**R1**	**R2**	**R3**	**R4**
PC (%)	-1.56	-2.08	0.12	**2.14**	1.39	-1.82	-2.11	0.13	**2.44**	1.36
TS (%)	-1.99	-2.58	0.39	2.03	**2.14**	-2.29	-2.62	0.37	**2.60**	1.94
FAR (%)	-6.92	-9.15	-1.04	**13.05**	4.07	-7.54	-9.11	-0.81	**13.05**	4.40
H (%)	0.13	0.19	0.81	-2.25	**1.12**	0.07	0.29	**0.74**	-1.76	0.65
F (%)	-9.26	-12.38	-1.80	**18.81**	4.63	-10.08	-12.54	-1.44	**18.48**	5.58
HSS (%)	-4.18	-5.67	0.25	**5.77**	3.83	-4.80	-5.73	0.29	**6.58**	3.67
PSS (%)	-4.06	-5.60	0.19	**5.62**	3.85	-4.62	-5.66	0.23	**6.42**	3.63
GSS (%)	-5.95	-7.98	0.24	**8.27**	5.41	-6.85	-8.10	0.28	**9.52**	5.16
BSS (%)	-7.79	-9.69	2.48	**9.57**	5.42	-7.26	-9.26	1.39	**9.13**	6.01
BIAS	1.19	1.2	1.18	**1.09**	1.16	1.23	1.24	1.21	**1.13**	1.19

que soit leur sens ; une valeur supérieure est donc préférable (excepté pour le biais qui doit être proche de 1). Les chiffres donnés dans la Table 6.18 représentent les moyennes des groupements.

Ces résultats pour l'occurrence des précipitations sont très souvent en faveur de la méthode R3, que ce soit en calibration ou en validation, et les écarts sont généralement importants. Si cette méthode semble détenir un indice de réussite en moyenne inférieur aux autres, elle se distingue par des taux de fausses alarmes (FAR et F) largement inférieurs, une valeur de pourcentage correct (PC), du *Brier Skill Score* (BSS) et d'autres indices significativement plus élevés. De plus, elle a le plus petit biais.

Nous nous sommes intéressés aux valeurs de précipitations plus élevées, mais le seuil $P/P10 \geq 1$ a trop peu de membres pour en établir des statistiques significatives, ce qui est également le cas du seuil $P/P10 \geq 2/3$ en validation. En revanche, les résultats de ce

Table 6.19 – Scores calculés sur les méthodes de référence pour la prévision du seuil $P/P10 \geq 2/3$ à l'aide du quantile 90 % (sur la période de calibration).

	R0	**R1**	**R2**	**R3**	**R4**
PC (%)	-0.04	0.03	0.00	**0.02**	0.00
TS (%)	-23.35	-63.65	-5.68	**62.95**	29.72
FAR (%)	-5.53	-6.55	-3.88	**12.22**	3.74
H (%)	-16.24	-67.99	-5.84	**55.21**	34.86
F (%)	-23.19	38.14	-2.90	**8.35**	-20.40
HSS (%)	-22.36	-62.59	-4.90	**61.56**	28.29
PSS (%)	-16.69	-68.39	-5.84	**55.93**	34.99
GSS (%)	-23.78	-64.12	-5.69	**63.72**	29.86
BSS (%)	-1.43	-1.68	0.89	**1.58**	0.64
BIAS	0.9	**0.48**	0.71	0.72	0.89

dernier sont présentés dans la Table 6.19 pour la période de calibration et le quantile 90 %. À nouveau, la méthode R3 semble plus performante que les autres. Toutefois, avec des seuils plus élevés, et donc des occurrences plus faibles, il devient difficile d'établir des statistiques fiables, et les autres méthodes ne sont donc en tout cas pas à exclure.

6.4 Contraintes de la prévision en temps réel

Lors de la prévision en temps réel, les prédicteurs pour la situation cible changent, puisque ce ne sont plus des observations ou des réanalyses qui caractérisent la situation cible, mais des sorties d'un modèle global différent de celui qui a servi à élaborer les réanalyses que nous utilisons comme archive. Premièrement, la résolution est différente (2.5° pour les réanalyses et 1° pour les prévisions du modèle GFS), et le logiciel de prévision doit donc interpoler les données du modèle global afin d'obtenir une grille comparable aux réanalyses.

Ensuite, l'implémentation des processus physiques peut varier d'un modèle à l'autre. Les deux modèles (pour les réanalyses et les prévisions) sont peut-être biaisés, et ils peuvent ne pas avoir le même biais, ce qui peut induire en erreur les calculs de prévision. La robustesse des variables météorologiques utilisées prend ici toute son importance. Une variable peu robuste, qui dépend donc significativement du modèle, risque de voir les erreurs entre les modèles augmenter avec l'échéance, et donc la prévision diverger. Nous devons alors être très prudents quant à l'interprétation de telles prévisions à l'échéance de quelques jours. Ainsi, nous considérons que les variables d'humidité sont moins robustes et de qualité acceptable jusqu'à une échéance de 2 à 3 jours seulement. C'est pourquoi nous ne considérerons que les méthodes R0 et R1, qui sont les analogies de circulation, jusqu'à une échéance de 7 jours, et limiterons les autres méthodes à 5 jours. Nous pourrions également imaginer appliquer les analogues sur les sorties de modèles différents.

Lors du passage de la prévision parfaite à la prévision opérationnelle, il faut tenir compte de l'incertitude croissante des données utilisées. Une option, pour en tenir compte, consiste à moduler le nombre d'analogues et à l'augmenter avec l'éloignement de l'échéance. En effet, pour des échéances lointaines, le modèle global n'est plus informatif, et la prévision des pluies devient la distribution climatologique, donc celle obtenue en prenant toutes les journées de l'archive comme analogues. Cela ne peut se faire que par apprentissage sur une archive suffisamment longue de prévisions du modèle considéré. La longueur de cette archive pose elle-même problème, car il faut au minimum 3 ou 4 ans d'archive pour que les résultats (le choix optimal du nombre d'analogues à utiliser pour chaque échéance) se stabilisent. De plus, sur de telles périodes, le modèle numérique a souvent évolué ; une archive reconstituée des prévisions à l'aide d'une version actuelle du modèle est donc préférable (voir section 4.3.3 sur les reprévisions).

Toutefois, cette analyse étant conséquente, elle n'a pas pu être réalisée dans le présent travail. Nous nous basons alors sur les travaux de Thevenot (2004), qui a réalisé cet exercice pour le territoire français en partant de l'archive de prévision du modèle européen (environ 5 années de prévision).

Thevenot (2004) a calibré le nombre d'analogues pour les 5 premières échéances. Puisque, pour certains modèles, nous considérons une échéance jusqu'à 7 jours, nous avons cherché à extrapoler la courbe qu'il proposait. Afin de rester le plus objectif possible, nous avons calé une loi polynomiale du deuxième ordre sur ces valeurs. Nous considérons donc les deux

Table 6.20 – Évolution du nombre d'analogues des méthodes R1 et R2 avec l'échéance, selon Thevenot (2004).

Échéances (jours)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Nb analogues R1	30	30	40	60	120	230
Nb analogues R2 1er niveau	60	60	80	120	240	500
Nb analogues R2 2^{e} niveau	30	30	40	60	170	350

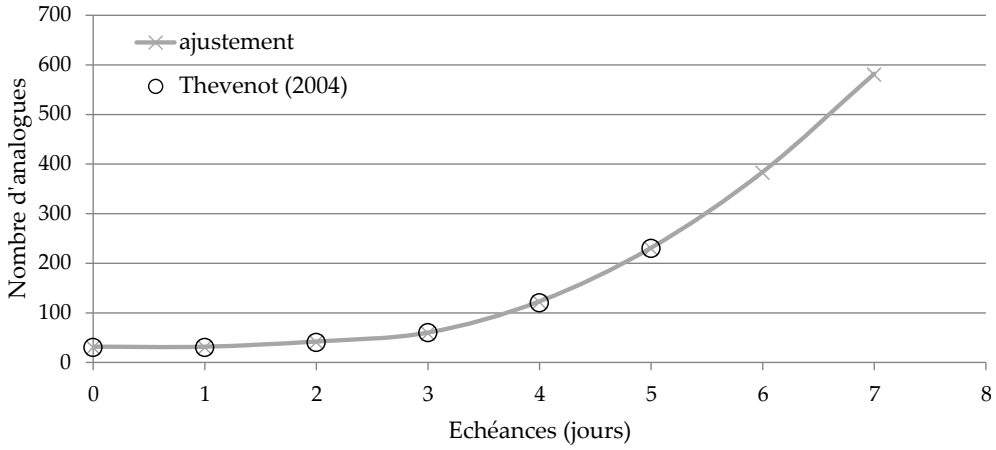


Figure 6.12 – Ajustement du nombre d'analogues croissant avec l'échéance pour la méthode R1.

premières échéances constantes, avec un nombre d'analogues égal à celui obtenu en prévision parfaite (lors de la calibration avec les réanalyses), puis nous calons la courbe sur les échéances suivantes. Sur cette base, nous extrapolons le nombre d'analogues à 7 jours (voir Figure 6.12).

Cette approche est certes discutable, une recalibration restant préférable, mais elle nous permet de nous approcher de nombres d'analogues bien plus adaptés en opérationnel que les nombres issus de la calibration en prévision parfaite. Ces courbes ne devraient pas non plus être extrapolées beaucoup plus loin, car les erreurs ainsi effectuées vont certainement croître.

À l'ère de la prévision d'ensemble, il serait également intéressant de considérer ce type de données pour la prévision par analogie, d'autant plus que Thevenot (2004) en a obtenu un gain en performances. Les paramètres, plus particulièrement le nombre d'analogues, doivent être réévalués pour une application à un modèle ensembliste.

6.5 Logiciel développé

Un logiciel a été développé pour la prévision par analogie : Atmoswing, pour *Analog Technique MOdel for Statistical Weather forecastING*. Il a été écrit en C++ orienté objet pour des raisons de performances, ainsi que pour permettre la création d'une interface graphique (le C++ est préférable au Fortran, car les outils d'interfaçage sont plus riches et plus adaptés à une utilisation hors académique). Pour cette dernière, la bibliothèque graphique libre wxWidgets (Smart et al., 2006) a été choisie, car elle permet la conception d'interfaces multiplateformes ayant une apparence native sur chaque environnement. Le logiciel peut ainsi être compilé sur Microsoft Windows, Linux/Unix, Mac (OS X, iOS), ou autres. Atmoswing est actuellement compilé pour Linux Ubuntu 64 bits, Linux RedHat 64 bits, et Windows 32 bits.

Atmoswing implémente la prévision par analogie en temps réel et permet de visualiser les résultats à l'aide de cartes et de graphiques interactifs. Il est constitué de deux outils distincts, soit le logiciel de prévision, et celui pour la visualisation. Cette séparation offre la possibilité d'automatiser les prévisions, p.ex. sur un serveur, et de les visualiser localement (voir Annexe D pour les détails).

La configuration d'Atmoswing est automatique. Toutefois, une interface permet de définir des chemins (répertoires des données et des prévisions effectuées), ainsi que des préférences générales (niveau de log, options d'affichage des prévisions, couches SIG pour le fond de carte, téléchargements, réactivité de l'interface, multithreading, options de calcul, etc.). Toutes les options sont enregistrées dans un fichier .ini placé dans le dossier de l'utilisateur.

6.5.1 Outil de prévision

L'interface de l'outil de prévision est illustrée dans la Figure 6.13. Ce logiciel permet de calculer une prévision actuelle ou passée, de définir la liste des modèles (paramétrisations différentes de la méthode des analogues) à traiter par défaut, et de générer la base de données des précipitations.

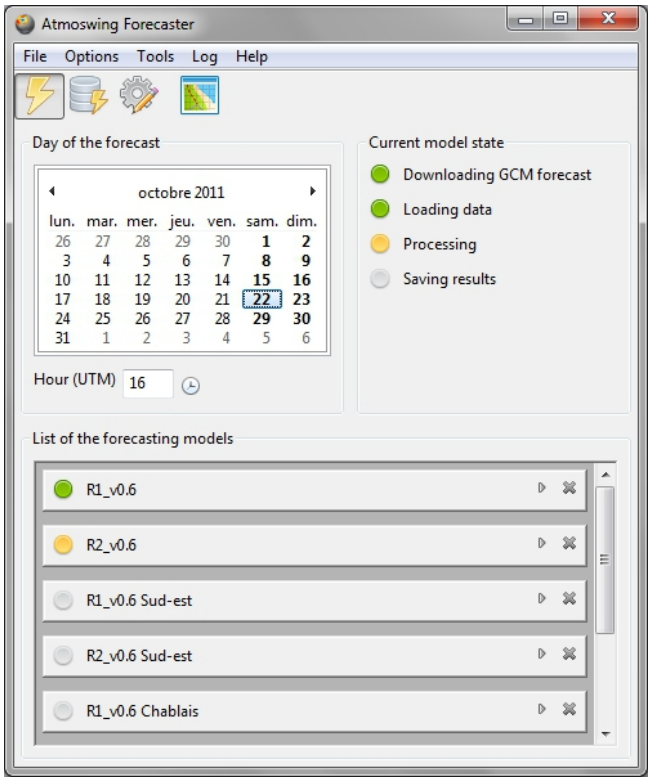


Figure 6.13 – Interface graphique du logiciel de prévision.

Le calcul de prévision en temps réel peut être effectué par un ordinateur standard, sans ressources particulières. Nous avons par exemple calculé des prévisions depuis une clé USB sur un ordinateur des salles de cours de l'Université de Lausanne, en quelques minutes. Les deux étapes les plus longues sont le téléchargement des sorties du modèle global, ainsi que la lecture du fichier d'archives des prédicteurs.

La prévision peut être exécutée à la demande, en sélectionnant la date dans le calendrier sur la fenêtre principale, date qui est initialisée à la valeur actuelle lors de l'ouverture du logiciel. Les modèles exécutés sont ceux listés sous *list of the forecasting models*. Les modèles sont calculés les uns après les autres. Une icône ● signifie que le modèle est en cours de calcul, ● que les calculs ont été exécutés avec succès et ⚠ que la prévision a échoué pour ce modèle.

La liste des modèles peut être complétée, et des modèles peuvent être supprimés. Un modèle est une paramétrisation spécifique optimale pour une région. Il est représenté dans l'interface graphique par le choix d'un fichier de paramètres et d'une base de données des prédictands. L'icône ▸ permet d'ouvrir le panneau du modèle et d'en éditer les propriétés

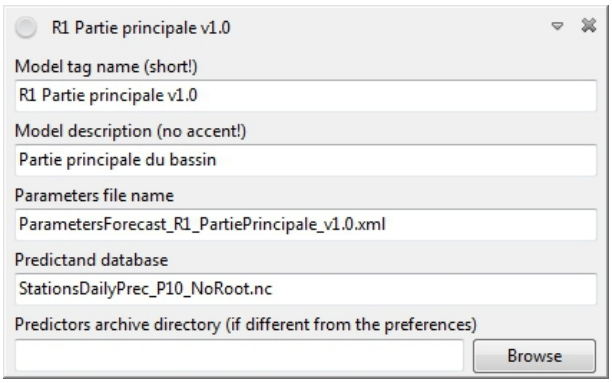


Figure 6.14 – Édition des détails d'un modèle dans Atmoswing.

par l'intermédiaire des différents champs présents (voir Figure 6.14). Un modèle peut être supprimé par l'icône ✖. Il est également possible d'ajouter des modèles à l'aide de l'icône ✚ située sous la liste.

Atmoswing peut être utilisé sans interface, en lignes de commandes. Ceci permet donc d'automatiser les prévisions sur un serveur. Il est possible d'effectuer la prévision la plus actuelle, de spécifier une date passée à reprévoir, ou de reprévoir les x derniers jours (voir Annexe D pour les détails).

Le logiciel fonctionne en opérationnel à l'Université de Lausanne, sur un serveur Linux. Toutes les 30 minutes, le serveur initialise une prévision. Le logiciel contrôle alors si de nouvelles sorties du modèle global sont disponibles, et, si ce n'est pas le cas, la procédure est annulée sans consommer inutilement des ressources au serveur. Nous sommes ainsi assurés de générer 4 prévisions par jour dès que les données deviennent disponibles. Les fichiers de prévision sont ensuite placés dans un dossier Dropbox (service de stockage et de partage de fichiers) pour diffusion.

Le logiciel de prévision utilise les librairies suivantes (la plupart sont liées lors de la compilation) :

- wxWidgets : bibliothèque graphique pour la conception d'interfaces multiplateformes ;
- TiCPP : pour la lecture et l'écriture de fichiers xml (*eXtensible Markup Language*) ;
- NetCDF 4 : pour la lecture et l'écriture de fichiers NetCDF (*Network Common Data Form*, Rew et Davis, 1990; Rew et Hartnett, 2004), qui est le format des archives des prédicteurs (réanalyses), ainsi que de notre base de données de précipitations ;
- Gdal : pour la lecture des fichiers GRIB (*GRIded Binary*), qui est le format des prédicteurs téléchargés en temps réel (prévisions GFS) ;
- libcURL : pour la gestion des téléchargements des sorties du modèle global ;
- Eigen 3 : une librairie d'algèbre linéaire offrant des classes de matrices performantes ;
- Proj 4 : pour la conversion d'un système de projection à un autre.

6.5.2 Outil de visualisation

L'outil de visualisation permet d'afficher les fichiers de prévision produits par le logiciel de calcul. Son interface est illustrée dans la Figure 6.15. La visualisation choisie se base sur un SIG (Système d'Information Géographique), outil auquel les météorologues ont de plus en plus couramment recours (voir p.ex. Joe et Falla, 2004).

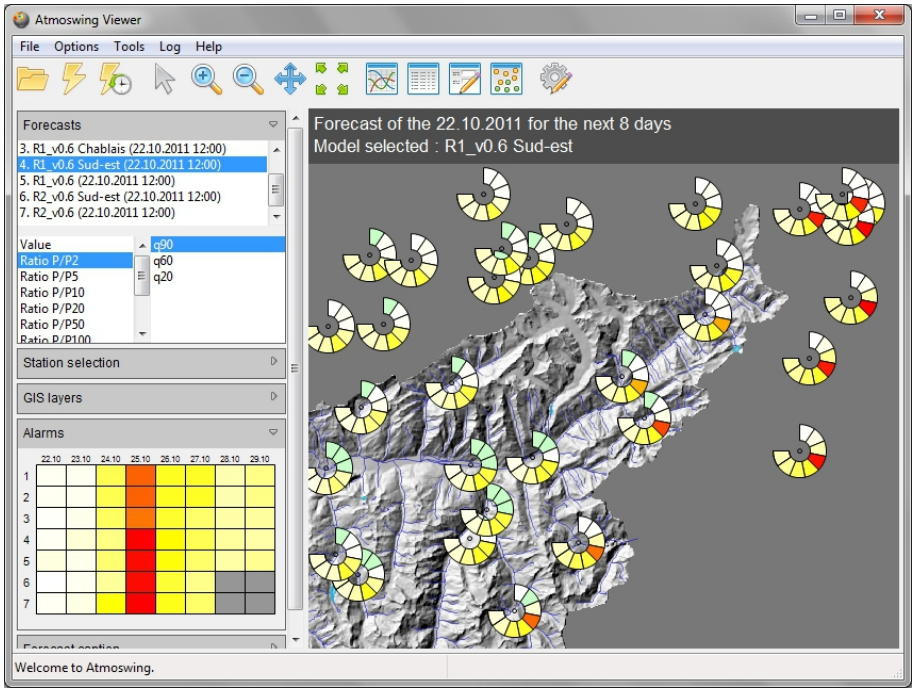


Figure 6.15 – Interface graphique du logiciel de visualisation.

L'outil de visualisation présente plusieurs niveaux de synthèse des prévisions. L'utilisateur peut ainsi passer d'un aperçu très global des tendances au détail des analogues à la station. Les différents niveaux d'agrégation, du plus général au plus détaillé, sont les suivants :

- **Le panneau des alarmes** : après ouverture des fichiers de prévision, un panneau latéral (voir Figure 6.15) présente une grille synthétisant tous les modèles (lignes) et toutes les échéances (colonnes). La couleur affichée dans une cellule de la grille, correspondant donc à un modèle (paramétrisation de la méthode des analogues) et une échéance, est la valeur maximale prévue de toutes les stations (pour un temps de retour et un quantile choisi par l'utilisateur) ; ce panneau permet d'identifier en un coup d'œil si une situation critique est prévue pour au moins une station par un modèle et pour une échéance.

- **La carte des échéances** : la première carte proposée à l'utilisateur est une synthèse des prochaines échéances pour un modèle donné (Figure 6.16). Nous avons conçu une représentation symbologique permettant un affichage synthétique : à l'emplacement de chaque station, une bande circulaire est affichée avec un casier par échéance.

Le nombre de casiers est ajusté au nombre d'échéances. La couleur attribuée à chaque casier est proportionnelle à la valeur prévue pour l'échéance en question. Cette représentation offre un rapide aperçu des jours à venir et permet d'identifier facilement un éventuel événement prévu par une paramétrisation des analogues. Elle offre une visualisation spatio-temporelle globale avant d'entrer davantage dans les détails du modèle. L'utilisateur peut passer d'un modèle à un autre en les sélectionnant dans la barre latérale (voir Figure 6.15). Il peut également ajuster la représentation des prévisions en choisissant une normalisation par un des nombreux temps de retour proposés, et en sélectionnant un quantile spécifique (20 %, 60 % ou 90 %).

- **La carte journalière** : l'utilisateur peut ensuite afficher la carte pour une échéance du modèle (voir Figure 6.17) afin de mieux visualiser la spatialisation des précipitations et d'accéder directement aux valeurs attendues (affichées à chaque station). Un curseur situé sur le haut de la carte permet de changer d'échéance.

- **Les séries temporelles** : lorsqu'une station est sélectionnée (sur la carte ou dans la liste déroulante de la barre latérale), le graphique de la série temporelle prévue s'affiche (Figure 6.18). Les options d'affichage sont les suivantes :
  - les 3 quantiles classiques (20 %, 60 %, 90 %) sous forme de lignes bleues épaisses ;
  - tous les dixièmes de quantiles par des surfaces grisées ;
  - toutes les analogues sous forme de petites croix grises ;
  - les 5 ou 10 meilleures analogues par des croix jaunes, oranges, ou rouges. Les couleurs sont proportionnelles aux rangs des analogues. Le rouge est pour la meilleure analogue et le jaune pour la 5^{e} ou 10^{e} ;
  - la valeur du temps de retour de 10 ans, ou de tous les temps de retour, sous la forme de traits rouges ;
  - les traces des anciennes prévisions, afin d'évaluer la cohérence temporelle.

- **Les distributions** : pour une station et une date choisie, l'utilisateur peut visualiser les distributions du critère d'analogie (Figure 6.19) et des précipitations (Figure 6.20). La distribution du critère d'analogie permet d'identifier d'éventuelles discontinuités dans les valeurs des critères et donc de porter plus de crédit aux meilleures analogues. Le graphique des précipitations permet de comparer la distribution de toutes les analogues et celle des 5 ou 10 meilleures.

- **Le détail des analogues** : le détail des dates analogues, des valeurs du critère et des précipitations associées peut être affiché dans un tableur interactif (Figure 6.21).

Lors de la calibration (section 6.3), nous avons déterminé des paramètres de la méthode des analogues optimaux pour certaines régions. Ces paramètres sont donc certainement plus robustes que s'ils avaient été établis directement à la station. Toutefois, lors du calcul de prévision, nous appliquons ces paramètres à l'échelle de la station individuelle. Ce choix a été fait pour offrir la plus grande résolution possible à l'utilisateur, dans le cadre du projet MINERVE. De plus, alors que les paramètres sont optimaux pour une région précise, ils

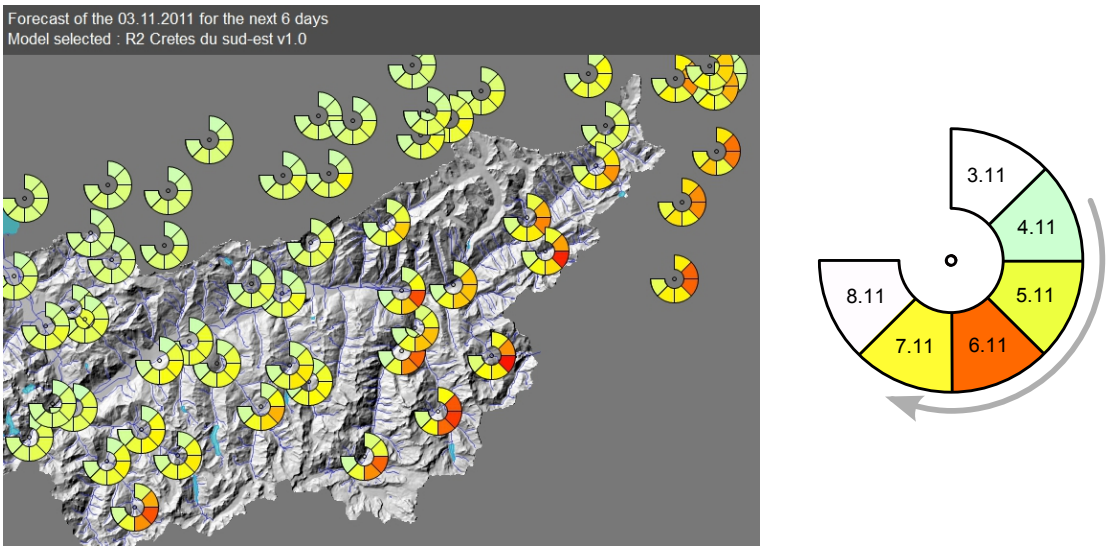


Figure 6.16 – Carte avec toutes les échéances, et symbole élaboré à cette fin.

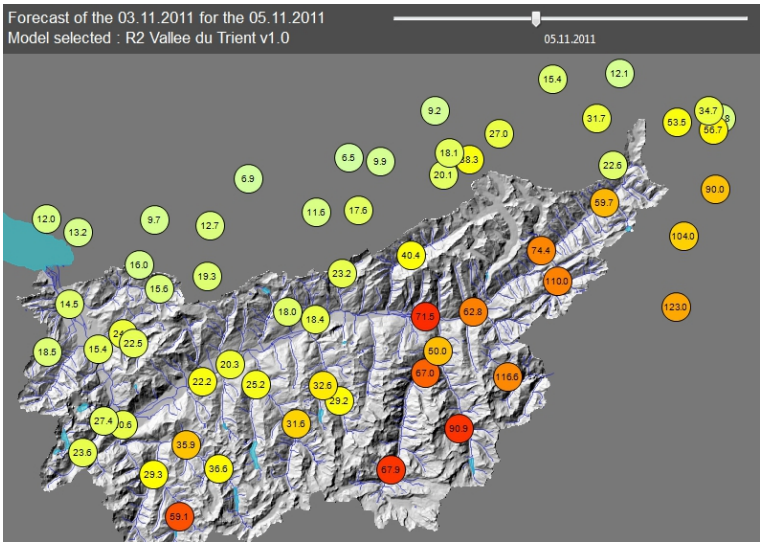


Figure 6.17 – Carte pour une échéance.

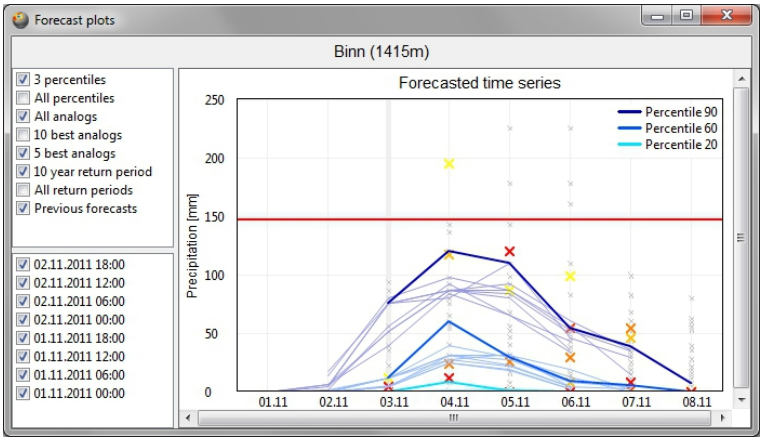


Figure 6.18 – Graphique de l'évolution temporelle pour une station.

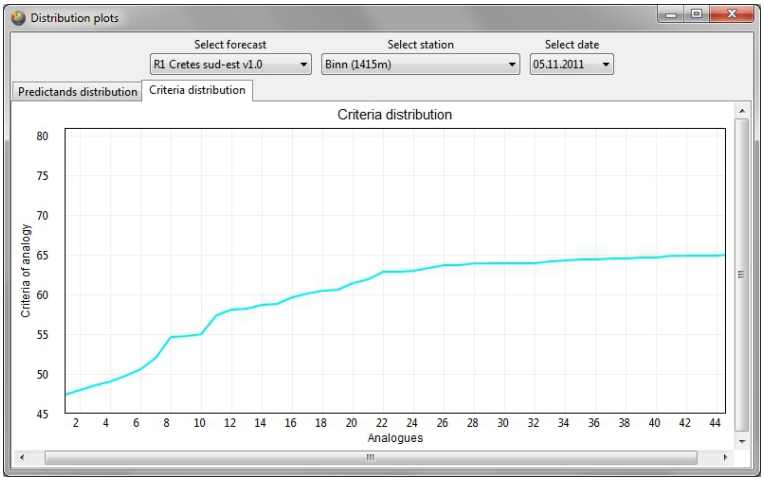


Figure 6.19 – Graphique de la distribution du critère d'analogie des journées analogues.

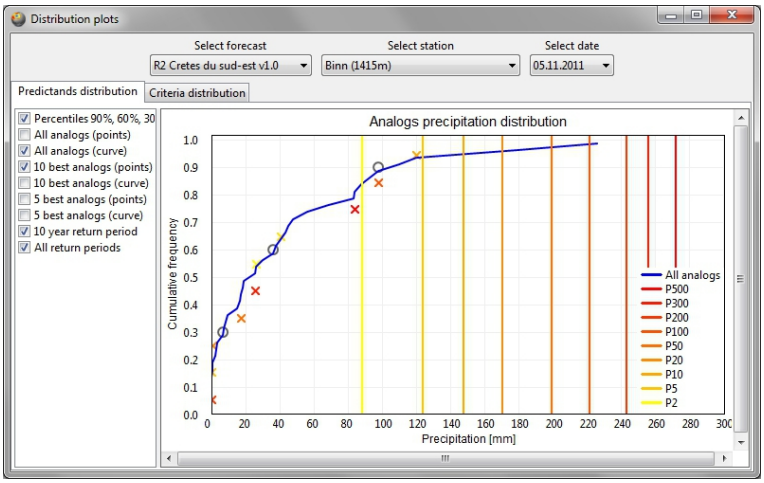
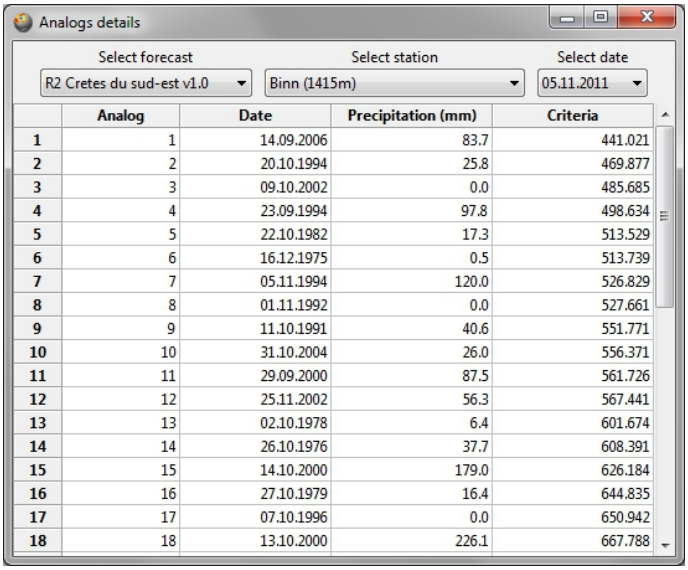


Figure 6.20 – Graphique de la distribution des valeurs de précipitations des journées analogues.



	Analog	Date	Precipitation (mm)	Criteria
1	1	14.09.2006	83.7	441.021
2	2	20.10.1994	25.8	469.877
3	3	09.10.2002	0.0	485.685
4	4	23.09.1994	97.8	498.634
5	5	22.10.1982	17.3	513.529
6	6	16.12.1975	0.5	513.739
7	7	05.11.1994	120.0	526.829
8	8	01.11.1992	0.0	527.661
9	9	11.10.1991	40.6	551.771
10	10	31.10.2004	26.0	556.371
11	11	29.09.2000	87.5	561.726
12	12	25.11.2002	56.3	567.441
13	13	02.10.1978	6.4	601.674
14	14	26.10.1976	37.7	608.391
15	15	14.10.2000	179.0	626.184
16	16	27.10.1979	16.4	644.835
17	17	07.10.1996	0.0	650.942
18	18	13.10.2000	226.1	667.788

Figure 6.21 – Liste des journées analogues et de leurs précipitations associées.

sont ici appliqués à l'ensemble des stations. Nous avons donc une carte complète par modèle (paramétrisation). Le but de cette approche est d'éviter de mélanger des dates sur une même carte, et donc d'amalgamer différentes influences atmosphériques. Les divers modèles présentent toujours une répartition des précipitations cohérente spatialement, avec des tendances claires. Il incombe à l'utilisateur de choisir le modèle approprié pour la région où semble se profiler un événement.

En plus des librairies listées précédemment, le logiciel de visualisation intègre :

- VroomGIS : une bibliothèque SIG pour l'affichage de données géoréférencées, développé par L. Schreiber au CREALP (*Centre de recherche sur l'environnement alpin*) ;
- wxPlotCtrl : une librairie permettant d'afficher des graphiques interactifs.

6.5.3 Gestion des données

Trois types de données sont utilisés par Atmoswing : les archives de prédicteurs, les prédicteurs prévus par le modèle global, et les prédictands (précipitations). La gestion de ces données diffère d'un type à l'autre, mais chacune est décrite par un fichier catalogue.

Les catalogues sont des fichiers xml contenant quelques métadonnées sur les prédictands et prédicteurs utilisés. Ces informations peuvent être modifiées en cas de changement dans les données utilisées, ce qui facilite la maintenance en conservant un maximum des caractéristiques des données en dehors du code. Il n'existe qu'un seul catalogue par type de données, référençant éventuellement plusieurs jeux de données (voir Annexe D) :

- *CatalogPredictorsArchive.xml* pour les archives des prédicteurs (p.ex. réanalyses), soit les données auxquelles les variables prévues seront comparées ;
- *CatalogPredictorsRealtime.xml* pour les prédicteurs du modèle global (p.ex. GFS) caractérisant les situations cibles. Ces données sont téléchargées automatiquement lors des calculs de prévision ;
- *CatalogPredictands.xml* pour les prédictands (précipitations). Il contient une liste des stations intégrées à la base de données. Ce fichier n'est utilisé que lors de la création de la base de données des prédictands. La base de données est ensuite autonome.

Le catalogue des archives de prédicteurs permet de spécifier le début et la fin des données, leur zone horaire, leur pas de temps, le système de coordonnées, le contenu des fichiers, etc. Le catalogue des prédicteurs en temps réel contient les mêmes informations, plus des renseignements sur la disponibilité des données à télécharger (échéances, pas de temps, heure d'émission des prévisions), ainsi que le lien dynamique pour le téléchargement. Celui-ci est une commande (URL) passée au serveur fournisseur pour acquérir les données du modèle global qui nous intéressent. La commande contient le choix des variables, des niveaux atmosphériques et du domaine désiré. En cas de changement du côté des serveurs fournissant les prévisions, ou du choix d'autres domaines spatiaux, niveaux atmosphériques ou variables, ces commandes peuvent être mises à jour sans recompiler le logiciel. Le catalogue des prédictands définit également le début et la fin des observations, le pas de temps, les unités, ainsi que les stations météorologiques, leur emplacement et leur altitude.

Une interface permet la création de la base de données des précipitations. La génération de la base de données consiste à extraire les données des fichiers textes et à les combiner dans un fichier NetCDF, ainsi qu'à effectuer automatiquement des ajustements de Gumbel pour calculer les valeurs de précipitations correspondant à différents temps de retour. La base de données contient les précipitations brutes, ainsi que les valeurs normalisées par un temps de retour choisi (par défaut 10 ans). Il est possible d'effectuer ou non la transformation par la racine carrée sur ce ratio. Afin d'être en mesure d'intégrer n'importe quel fichier de précipitations, l'utilisateur peut en décrire sa structure dans un fichier xml, qui sera ensuite utilisé par Atmoswing pour assimiler la série temporelle. Il a en effet été choisi de ne pas forcer l'utilisateur à transformer ses données dans un format spécifique, mais de le laisser décrire la structure de ses fichiers (voir Annexe D pour les détails). Après exécution, un fichier NetCDF contenant toutes les données nécessaires au logiciel est créé dans le répertoire choisi.

6.5.4 Approche modulaire

Une grande force d'Atmoswing est qu'il est élaboré pour effectuer des prévisions par analogie de manière modulaire. Aucune structure (nombre de niveaux d'analogie, nombre de variables prédicteurs) n'est fixée a priori, mais les étapes de la méthode sont définies par l'utilisateur uniquement. Le logiciel effectue donc successivement autant de niveaux d'analogie que l'utilisateur en définit (voir Figure 6.22), avec autant de prédicteurs qu'il en désire. De chaque niveau d'analogie résulte un objet contenant les dates cibles, les dates analogues, et les valeurs du critère d'analogie. Cet objet peut être sauvegardé dans un fichier NetCDF, ce qui peut être utile en calibration pour réutiliser des sélections d'analogues intermédiaires (au lieu de les recalculer).

Toute la structure de la méthode est définie dans un fichier xml généré par l'utilisateur. Ce fichier a par exemple la structure générale suivante (pour les détails, voir Annexe D) :

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<AtmoswingFile version="0.2">
   <ForecastSet>
      <General name="General">
         ...
      </General>
      <Process name="Analogs Dates">
         ...
      </Process>
      <Process name="Analogs Dates">
         ...
      </Process>
      <Process name="Analogs Dates">
         ...
      </Process>
      <Process name="Analogs Values">
         ...
      </Process>
   </ForecastSet>
</AtmoswingFile>
```

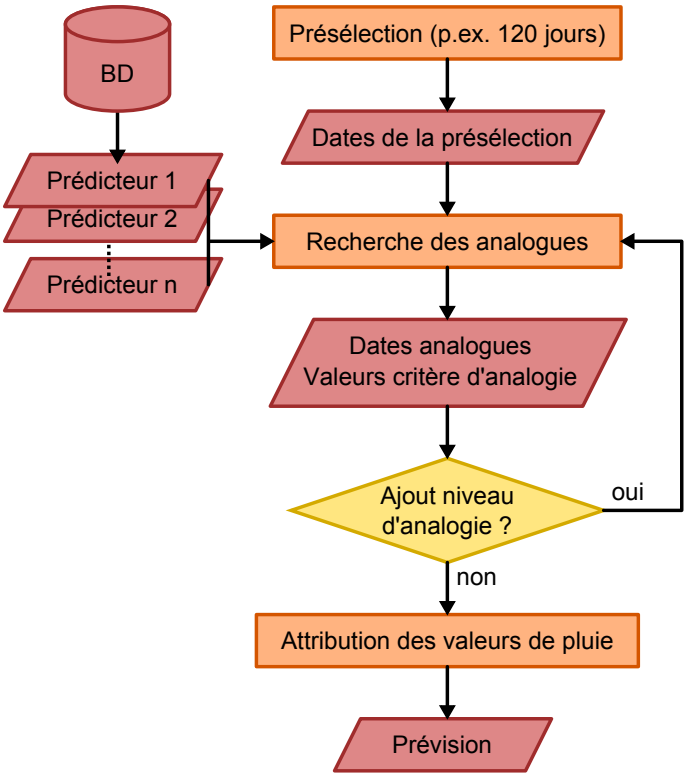


Figure 6.22 – Organigramme simplifié de l'implémentation de la méthode des analogues dans Atmoswing.

Cet exemple illustre une implémentation en prévision d'une méthode ayant 3 niveaux d'analogie. Le modèle effectuera autant de niveaux d'analogie qu'il y a de blocs *Analogs Dates*, et il utilisera autant de prédicteurs par niveau que l'utilisateur en définit (selon la Figure 6.22). Ce type de fichier constitue le cœur de la méthode et décrit au modèle la manière dont il doit l'implémenter. Le langage xml se prêtre bien à cette approche, puisqu'il permet de structurer des éléments de manière modulaire. Chaque implémentation de la méthode des analogues peut entrer dans ce schéma, même si elle est constituée de variables élaborées (p.ex. l'indice d'humidité). Différentes fonctions de prétraitement sont donc implémentées, comme le calcul des flux d'humidité, des opérations de multiplication ou le calcul des gradients.

6.5.5 Performances

La performance en termes de temps de calcul a été prioritaire lors des développements. Ainsi, le logiciel utilise, pour les calculs, la librairie d'algèbre linéaire Eigen 3 (Guennebaud et Jacob, 2010) permettant d'effectuer des opérations sur des vecteurs et matrices de manière performante. Cette librairie est utilisée par plusieurs grandes entreprises ou projets conséquents, dont *Google*, *European Space Agency*, ou pour des outils MATLAB (voir liste sous Guennebaud et Jacob, 2010). Les options d'optimisation des compilateurs sont bien entendu utilisées.

De plus, un travail fastidieux a été réalisé à l'aide d'outils de profilage de code dans le but de réduire le temps de calcul. Ces outils ont permis d'identifier les calculs nécessitant le

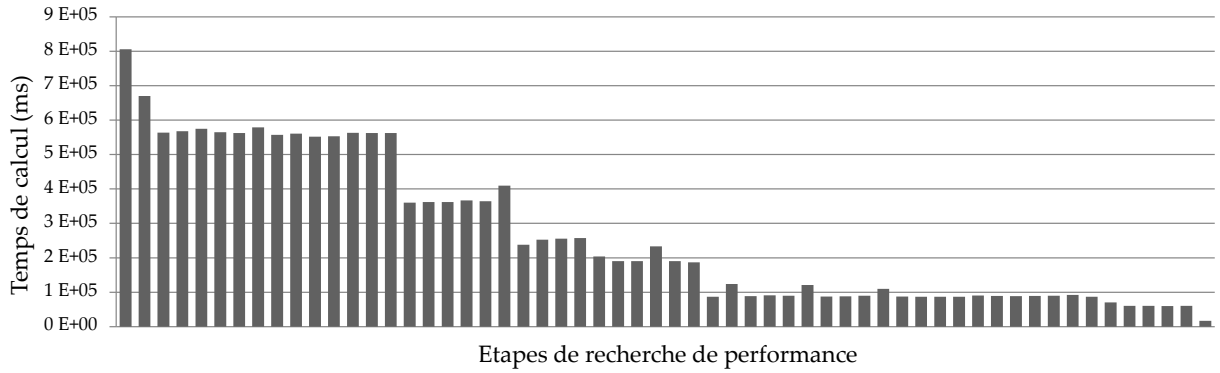


Figure 6.23 – Graphique de l'évolution des performances des calculs dans Atmoswing.

plus de temps, et donc de concevoir des stratégies pour en réduire le nombre d'appels, ainsi que pour en optimiser les performances.

Les principaux gains en performance (voir Figure 6.23) ont été obtenus par :

- une réduction des matrices utilisées dans les calculs,
- l'utilisation de pointeurs (et donc la diminution de copies des données)
- une meilleure recherche des dates dans les vecteurs temporels, avec utilisation du précédent emplacement,
- une meilleure gestion du vecteur des analogues retenues,
- un prétraitement des gradients des champs de géopotentiel,
- et finalement par une implémentation des calculs en parallèle (sur des machines à multiprocesseurs).

D'autres améliorations non citées ont également permis de gagner du temps, par exemple l'utilisation de la méthode de tri rapide (*quicksort*, Hoare, 1962) pour ordonner les vecteurs de dates selon les valeurs des critères d'analogie.

6.5.6 Tests unitaires

Les développements ont été effectués avec une approche de tests unitaires. Cette technique, qui constitue un élément important des bons procédés de programmation, est également une aide au développement. Elle consiste à écrire des fonctions de tests dont nous connaissons le résultat au préalable, et à développer les fonctions de notre programme, qui devront alors retourner le résultat attendu. Cette approche permet donc de vérifier le bon fonctionnement de chaque fonction et la justesse de chaque calcul ; elle permet de se focaliser sur le résultat attendu, et donc de limiter le code non utilisé. Ces contrôles sont fréquemment évalués et constituent une suite de tests devant être satisfaits en tout temps. Ces fonctions d'évaluation sont également utiles pour vérifier que des modifications ultérieures n'introduisent pas de régression. La philosophie veut que lorsque nous identifions un bug, celui-ci soit transformé en test afin qu'il n'apparaisse plus dans le futur.

Nous avons appliqué cette approche lors de nos développements, et avons ainsi créé plus de 500 fonctions tests contenant chacune plusieurs vérifications. Chaque critère d'analogie, score de prévision, fonction de recherche, de tri et de manipulation des données est ainsi testé. Les valeurs de référence pour le contrôle sont issues de la littérature ou calculées de manière indépendante. Pour ce qui est des fonctions propres à la méthode des analogues, un travail de comparaison a été effectué avec l'aide de R. Marty et C. Obled pour que les résultats d'Atmoswing soient exactement équivalents à ceux du modèle développé à Grenoble. Cette étape a permis d'identifier quelques imprécisions dans notre modèle, mais également dans le leur. Ces tests font partie des contrôles effectués régulièrement, de manière à ce que ces résultats soient toujours reproductibles.

Un outil de gestion des versions, *subversion*, a également été utilisé pour gérer les itérations du code. Celui-ci conserve sur un serveur chaque changement effectué au code source, de manière incrémentale, et permet de restaurer une ancienne version, de comparer les versions, et donc de rechercher plus facilement une éventuelle source d'erreur.

Deuxième partie

Suggestions d'améliorations et optimisation globale

Chapitre 7

Exploration de prédicteurs à l'échelle synoptique

Nous avons reconsidéré une grande partie des variables du jeu de données des réanalyses pour en identifier les plus pertinentes pour notre région. Notre approche diffère des précédents travaux, car la fenêtre spatiale y est systématiquement optimisée, et un nombre plus important de variables et de niveaux atmosphériques y sont évalués.

La température des mers et océans est également évaluée en tant que prédicteur de la méthode des analogues, celle-ci ayant un impact connu sur l'humidité et sur la stabilité des masses d'air.

Pour finir, des analyses parallèles sont effectuées sur les variables de circulation des réanalyses. Des trajectoires inverses et des roses des vents permettent d'identifier des circulations typiques liées à des précipitations extrêmes en différents emplacements du bassin.

7.1 Introduction du chapitre

Ce chapitre comprend en premier lieu les résultats de l'exploration d'une grande partie des variables des réanalyses pour la prévision des précipitations pour nos différents groupements. Ces données seront évaluées en premier, second, et troisième niveau d'analogie. Nous tenterons également de considérer des données de température de surface des mers et océans dans la méthode des analogues. Finalement, d'autres analyses seront effectuées sur les données des vents des réanalyses, en dehors du contexte de la prévision par analogie.

7.2 Les prédicteurs de la méthode des analogues

Notre objectif, dans cette section, est d'évaluer les performances de diverses variables pour la prévision des précipitations par la méthode des analogues. Ces variables seront considérées en premier, deuxième, ainsi qu'en troisième niveau d'analogie.

7.2.1 Données des réanalyses

Bontron (2004) avait entrepris un travail systématique de comparaison des variables fournies par les réanalyses NCEP/NCAR, sur le premier et le second niveau d'analogie. Nous désirons également procéder à cette recherche pour les raisons suivantes :

- Bontron (2004) détenait un jeu de données de réanalyses moins complet que celui qui est disponible aujourd'hui : il disposait de moins d'heures d'observation et de moins de niveaux atmosphériques.
- Les variables avaient alors été évaluées sur des fenêtres spatiales fixes et avec un nombre d'analogues fixes. Or nous désirons procéder à une démarche de calibration pour chacune de ces variables, et donc les évaluer sur leur fenêtre spatiale optimale et avec le nombre d'analogues adéquat.
- Nous travaillons dans une autre région que Bontron (2004), et ne pouvons pas exclure que certaines variables qu'il avait alors rejetées soient pertinentes pour le bassin supérieur du Rhône. De plus, nous considérons une sélection plus large de variables.
- Enfin, alors que Bontron (2004) a effectué la sélection des variables sur la base d'une prévision moyenne de tous les groupements pluviométriques, nous désirons déceler d'éventuelles spécificités locales en établissant cette sélection à l'échelle de chaque groupement.

Nous avons donc considéré toutes les variables listées à la section 4.3.1 et rappelées dans la Table 7.1, qu'elles soient robustes ou non. Chaque heure d'observation est également considérée, de 0 h UTC à 24 h UTC. Nous utilisons le critère RMSE pour l'ensemble des prédicteurs, ainsi que S1 pour une sélection restreinte. Cette évaluation est effectuée sur la période de calibration uniquement (1961-2008, sans les années intercalaires de la validation).

Table 7.1 – Abréviations (par ordre alphabétique) des variables des réanalyses 1 NCEP/NCAR pour l'exploration de données. La classe définie par Kalnay et al. (1996) est également rappelée pour chacune des variables.

Identifiant	**Variable**	**Classe**
Eau precip	Eau précipitable	B
Evapo pot	Taux potentiel d'évaporation	C
Flux chal lat	Flux net de chaleur latente	C
Flux chal sensi	Flux net de chaleur sensible	C
Flux chal sol	Flux de chaleur au sol	C
Flux diff IR	Flux incident diffux du proche IR	C
Flux dir IR	Flux incident direct du proche IR	C
Flux ray sola	Flux incident du rayonnement solaire	C
Flux ray therm	Flux incident du rayonnement thermique	C
H gpot	Hauteur du géopotentiel	A
Ind soul	Indice de soulèvement à la surface	B
Ind soul 4	Meilleur indice de soulèvement des 4 couches	B
Precip	Taux de précipitations	C
Precip conv	Taux de précipitations convectives	C
Press	Pression	B
Ray ct ondes	Rayonnement net en courtes long. d'ondes	C
Ray gd ondes	Rayonnement net en grandes long. d'ondes	C
Rhum	Humidité relative	B
Rhum surf	Humidité relative proche de la surface	B
Shum	Humidité spécifique	B
Shum 2m	Humidité spécifique à 2 m	B
Slp	Pression au niveau de la mer	A
T 0-10	Température de la couche 0-10 cm	C
T 10-200	Température de la couche 10-200 cm	C
T 300	Température à 300 cm	C
T air	Température de l'air	A
T air 2m	Température de l'air à 2 m	B
T air surf	Température de l'air proche de la surface	B
T pot surf	Température potentielle proche de la surface	B
T surf	Température de la surface	C
V vert	Vitesse verticale	B
V vert surf	Vitesse verticale proche de la surface	B
Vent U	Composante U du vent	A
Vent U 10m	Composante U du vent à 10 m	B
Vent U surf	Composante U du vent proche de la surface	B
Vent V	Composante V du vent	A
Vent V 10m	Composante V du vent à 10 m	B
Vent V surf	Composante V du vent proche de la surface	B

7.2.1.1 Premier niveau d'analogie

L'exploration des variables a été réalisée sur un large domaine (voir Table 7.2) afin d'identifier des variables qui seraient éventuellement informatives, même loin du bassin. Tous les niveaux atmosphériques n'ont cependant pas pu être évalués pour l'analogie du premier niveau, et nous n'avons considéré que les 4 valeurs suivantes : 300, 500, 850, et 1000 hPa.

Table 7.2 – Gammes des valeurs de paramètres pour l'exploration de variables en premier niveau d'analogie.

Paramètre	**min**	**max**
Nombre d'analogues	5	100
Fenêtre temporelle	0	24
Longitude minimale de la fenêtre spatiale	-50	20
Taille de la fenêtre spatiale en longitude	2.5	90
Latitude minimale de la fenêtre spatiale	10	60
Taille de la fenêtre spatiale en latitude	2.5	60

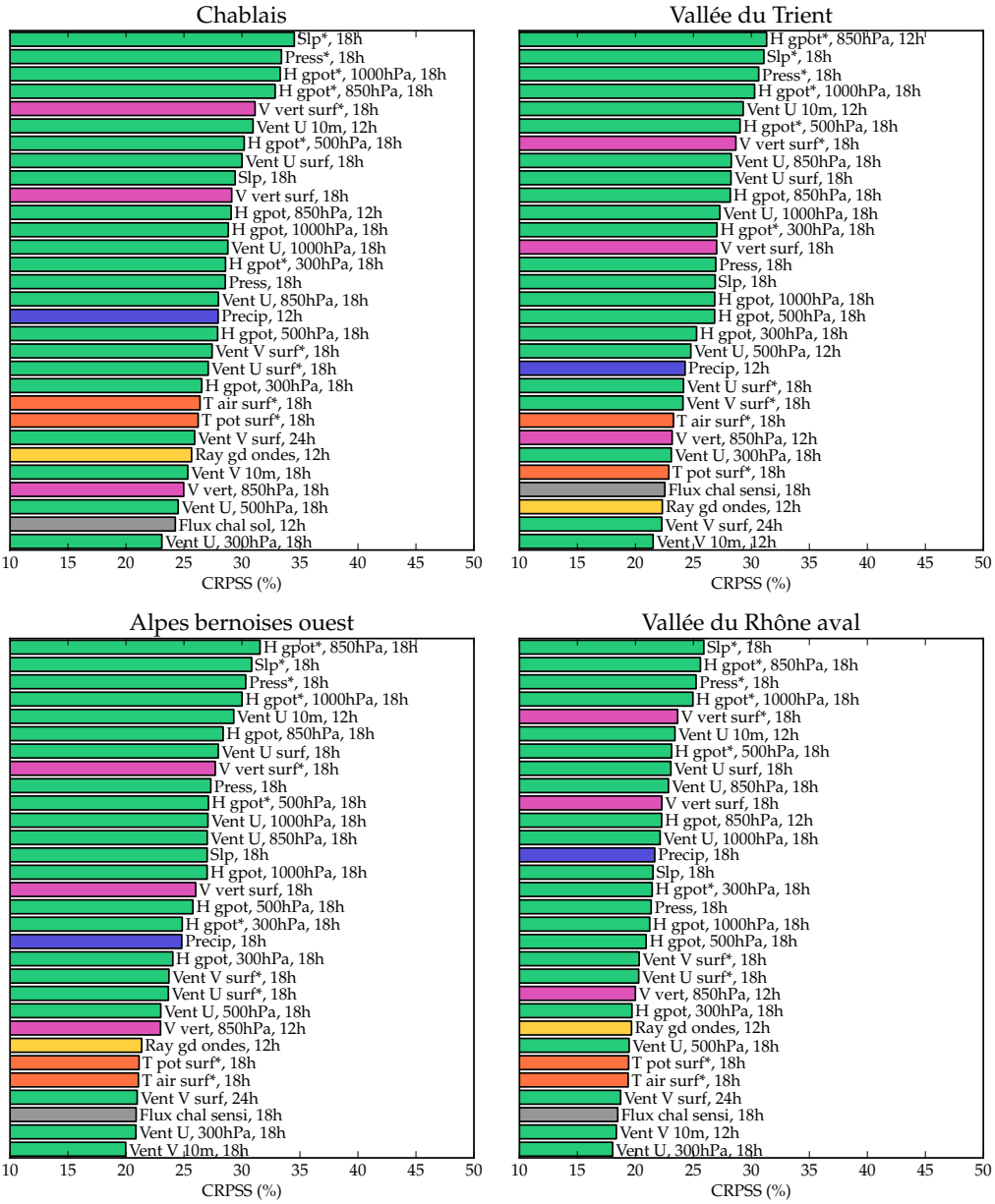


Figure 7.1 – Graphiques des 30 meilleures variables des réanalyses en premier niveau d'analogie selon les groupements (la fenêtre spatiale est optimisée pour chaque variable). Le critère S1 est utilisé lorsqu'il y a un astérisque à côté du nom de la variable, autrement le RMSE est employé. La couleur représente le type de la variable : vert = circulation, bleu = humidité, orange = température, jaune = rayonnement, mauve = vitesse verticale, gris = autre.

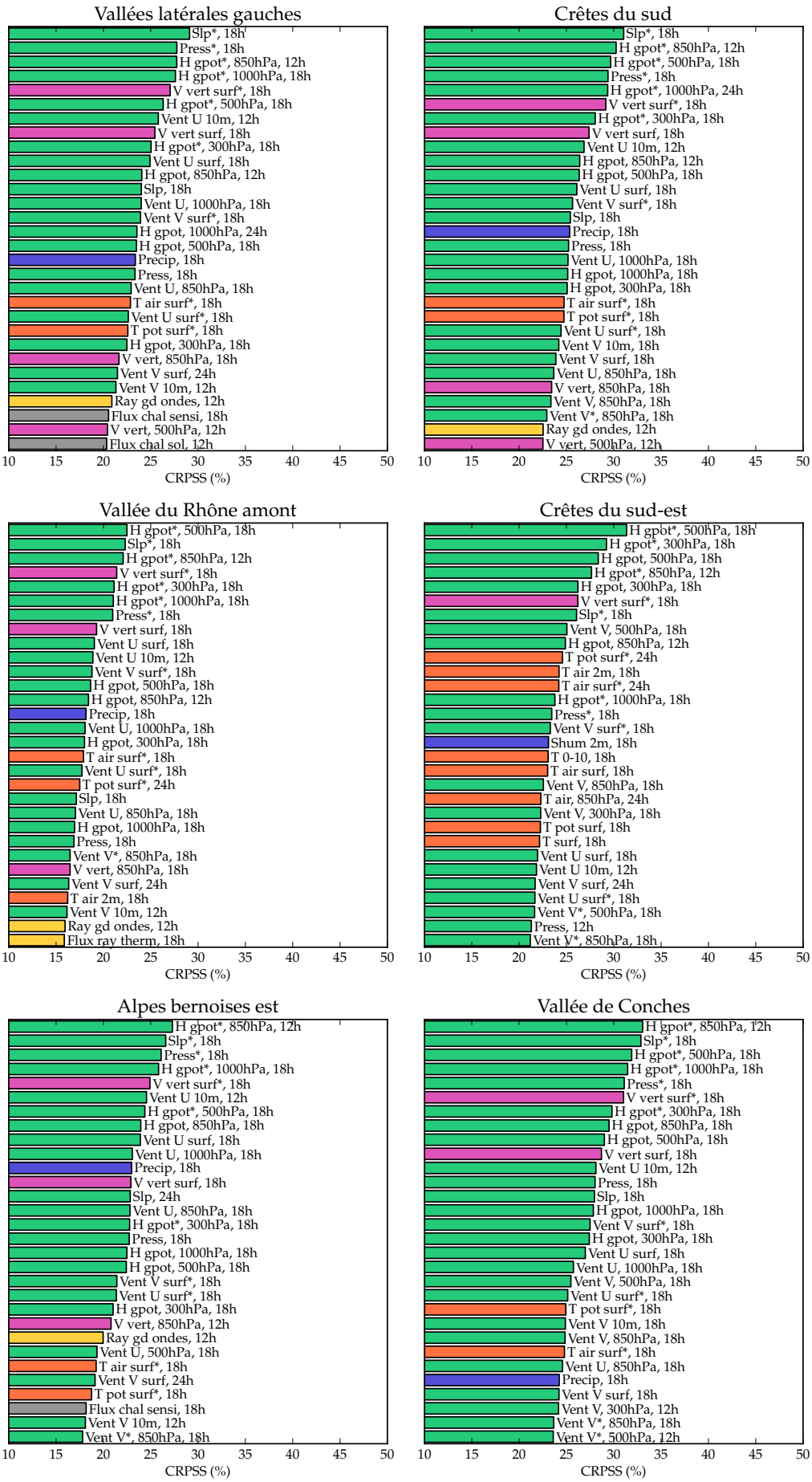


Figure 7.2 – Suite de la Figure 7.1.

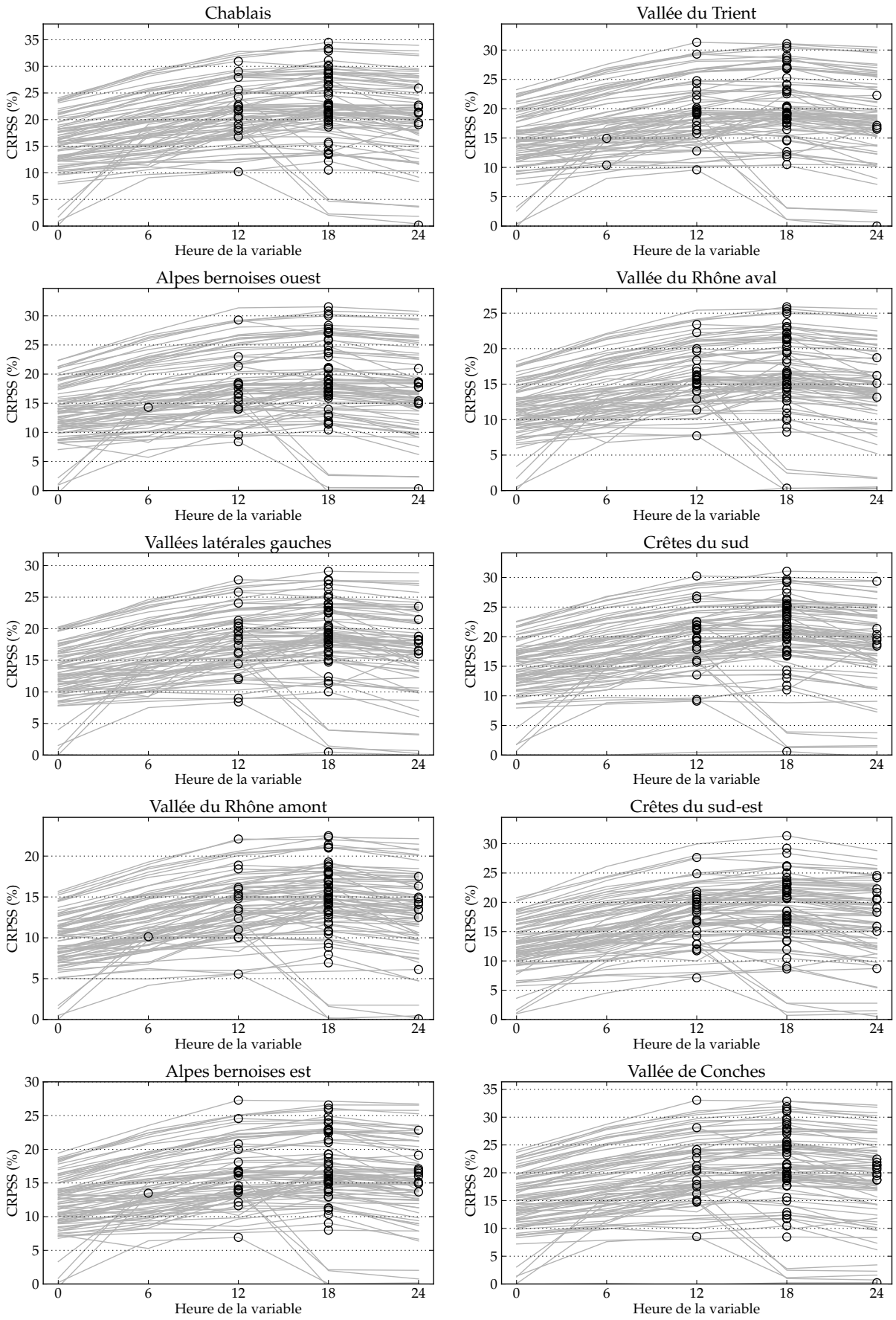


Figure 7.3 – Graphiques des heures optimales pour les différentes variables des réanalyses en premier niveau d'analogie selon les groupements.

Les Figures 7.1 et 7.2 présentent les résultats synthétisés de cette recherche. Seules les heures optimales pour une variable et un niveau sont affichées, et nous ne présentons que les 30 meilleurs résultats. Les variables de circulation y sont représentées en vert, les variables d'humidité en bleu, les variables liées à la température en orange, les variables liées au rayonnement en jaune, et la vitesse verticale en mauve. Il apparaît clairement que les variables de circulation sont les plus explicatives, avant même les précipitations analysées. Ceci n'est évidemment pas une surprise, et correspond aux résultats de Bontron (2004). La pression au niveau de la mer et la hauteur du géopotentiel à 500, 850 et 1000 hPa figurent souvent dans les meilleurs prédicteurs. Le groupement des crêtes du sud-est est caractérisé par une préférence marquée pour le géopotentiel dans la moitié supérieure de l'atmosphère (500 et 300 hPa), alors que le niveau 1000 hPa semble passablement moins pertinent. Le critère S1 est systématiquement meilleur que le RMSE pour la comparaison des champs de pression, mais également pour la vitesse verticale de surface.

Nous avons également procédé à une analyse des heures optimales pour chaque variable de premier ordre (voir Figure 7.3). Les compétences des variables choisies, en vue d'expliquer les cumuls de précipitations 6 h - 30 h UTC, sont le plus souvent maximales pour 18 h UTC, parfois 12 h UTC, et rarement 24 h UTC. La fenêtre temporelle de 0 à 6 h UTC n'est quasiment jamais sélectionnée, et les scores sont largement inférieurs. La sélection d'une variable unique pour le premier niveau d'analogie semble donc optimale lorsqu'elle est centrée sur la période d'accumulation des précipitations (6 h UTC à 6 h UTC le lendemain). Cette constatation n'est pas valable lorsque nous combinons deux niveaux atmosphériques. Les heures d'observation tendent alors souvent à se répartir dans la journée (par exemple 12 h UTC et 24 h UTC).

7.2.1.2 Second niveau d'analogie

Nous avons ensuite effectué une comparaison des variables de second niveau, soit après l'analogie de circulation. Nous avons utilisé le premier niveau de la méthode R1, c'est-à-dire la hauteur du géopotentiel à 500 et 1000 hPa. Pour cette analyse, nous avons choisi une fenêtre spatiale fixe et commune pour l'analogie de circulation (Table 7.3), alors que la fenêtre du second niveau est optimisée comme précédemment.

Table 7.3 – Valeurs des paramètres communs du premier niveau d'analogie utilisés pour l'exploration de variables du second niveau.

Paramètre	**Valeur**
Nombre d'analogues	60
Fenêtre temporelle	12 & 24 h UTC
Fenêtre spatiale en longitude	-5° à 20°
Fenêtre spatiale en latitude	40° à 50°

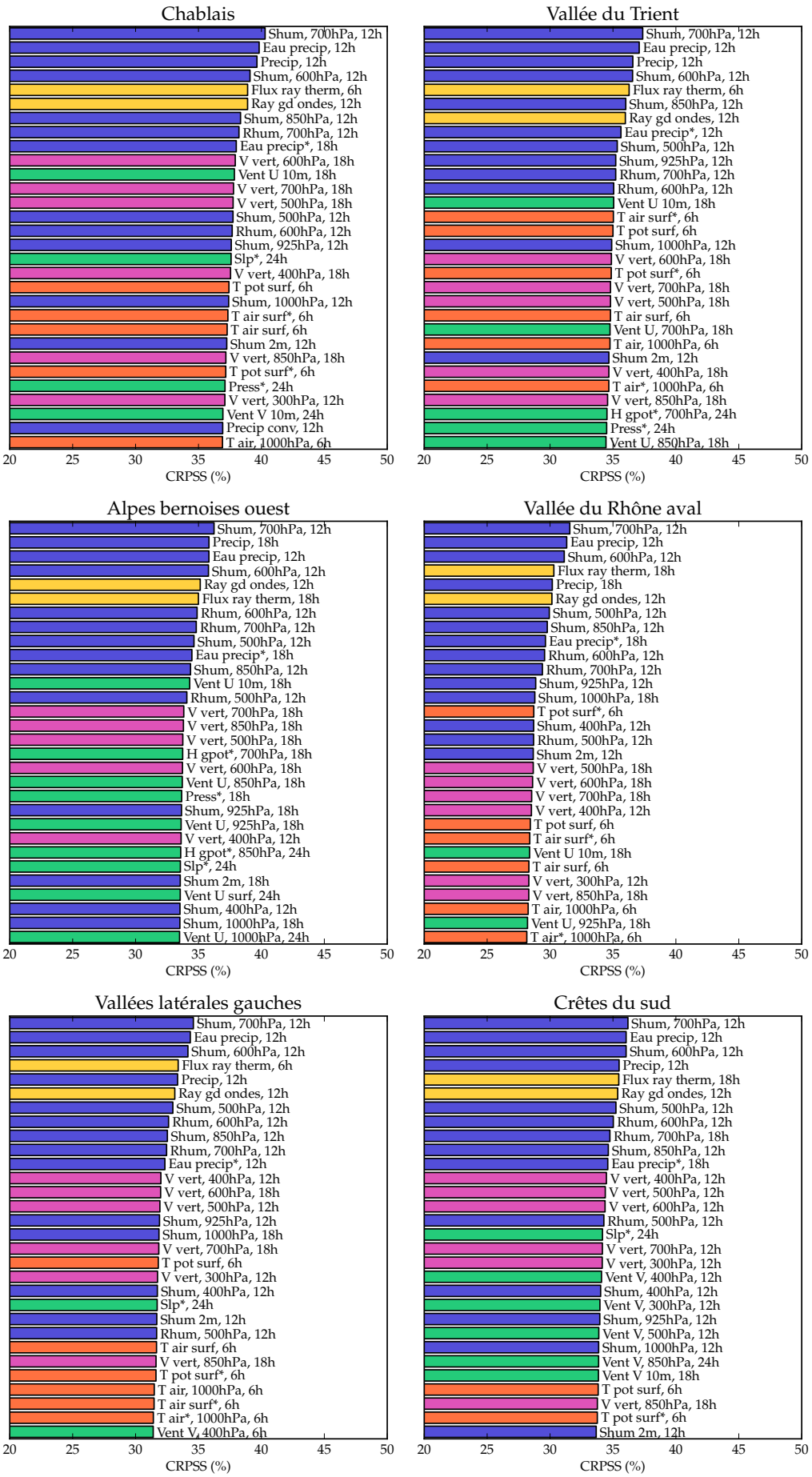


Figure 7.4 – Identique à la Figure 7.1, mais pour le second niveau d'analogie.

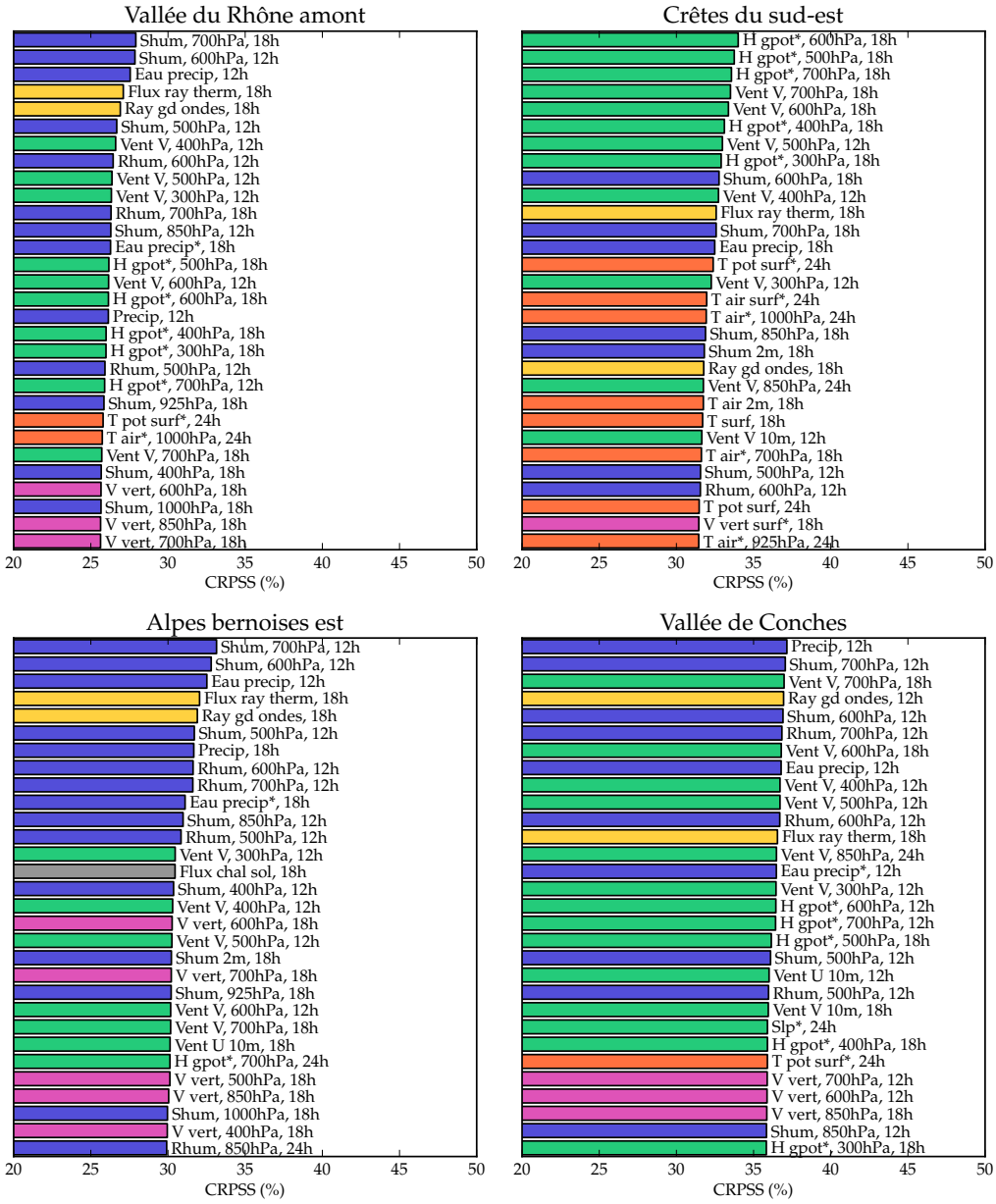


Figure 7.5 – Suite de la Figure 7.4.

Les valeurs des paramètres fixés (voir Table 7.3) sont un assemblage des différents optimums des différents groupements. Les crêtes du sud-est constituent le groupement le moins proche de ce jeu de paramètres. Les gammes de valeurs des paramètres du second niveau sont les mêmes que précédemment (voir Table 7.2). Nous avons toutefois considéré davantage de niveaux atmosphériques, à savoir : 300, 400, 500 600, 700, 850, 925, 1000 hPa.

Les résultats, présentés dans les Figures 7.4 et 7.5, montrent clairement une préférence pour les variables d'humidité (bleu) en second niveau, excepté pour les crêtes du sud-est, où une nouvelle analogie de circulation est préférable. Cette dernière différence est facilement explicable par le choix sous-optimal pour ce groupement des paramètres communs du premier niveau. Il apparaît également, pour tous les groupements, que la vitesse verticale de surface ne semble plus aussi intéressante après l'analogie de circulation.

L'humidité spécifique à 700 hPa est très souvent sélectionnée comme meilleure variable, suivie de l'eau précipitable, de l'humidité spécifique à 600 hPa, et du taux de précipitations. Évidemment, cette dernière n'est pas conseillée en prévision opérationnelle, car elle n'est pas robuste et n'est pas prévue de manière satisfaisante, surtout à une résolution grossière. De manière générale, les variables d'humidité ne sont pas aussi robustes que les variables de circulation.

Nous voyons également apparaître en tête de liste deux variables de rayonnement : le flux incident du rayonnement thermique et le rayonnement net en grandes longueurs d'onde. Le flux incident du rayonnement thermique (*downward longwave radiation flux*) est le rayonnement de grandes longueurs d'ondes émis par l'atmosphère en direction de la surface terrestre. Le rayonnement net en grandes longueurs d'ondes (*net longwave radiation*) représente la différence entre le rayonnement de grandes longueurs d'ondes émis par la surface terrestre, et le rayonnement atmosphérique de retour. Ces variables sont très dépendantes du modèle météorologique utilisé pour les calculer, et il serait dangereux de les utiliser aveuglément en opérationnel. Toutefois, beaucoup d'efforts ont été investis pour améliorer leur représentation dans les modèles par les communautés étudiant le réchauffement climatique (voir p.ex. Wild et al., 2001). Seule une évaluation à l'aide de sorties de modèles de prévision pourrait déterminer si cette variable est utilisable en opérationnel.

7.2.1.3 Troisième niveau d'analogie

Selon la même démarche que précédemment, nous désirons évaluer les variables présentant un intérêt potentiel après l'analogie d'humidité.

Nous utilisons donc les deux premiers niveaux d'analogie de la méthode de référence R2 (géopotentiel à 500 et 1000 hPa pour la circulation atmosphérique et variable élaborée d'humidité). Les paramètres choisis pour ces deux niveaux, et communs pour tous les groupements, sont donnés dans la Table 7.4. Les gammes de paramètres et les niveaux atmosphériques évalués pour le troisième niveau sont identiques à ceux de la section précédente.

Table 7.4 – Valeurs des paramètres communs des deux premiers niveaux d'analogie utilisés pour l'exploration de variables du troisième niveau.

Paramètre	**Valeur**
Premier niveau d'analogie	
Nombre d'analogues	100
Fenêtre temporelle	12 & 24 h UTC
Fenêtre spatiale en longitude	-5° à 20°
Fenêtre spatiale en latitude	40° à 50°
Deuxième niveau d'analogie	
Nombre d'analogues	60
Fenêtre temporelle	12 & 24 h UTC
Fenêtre spatiale en longitude	5° à 10°
Fenêtre spatiale en latitude	45° à 47.5°

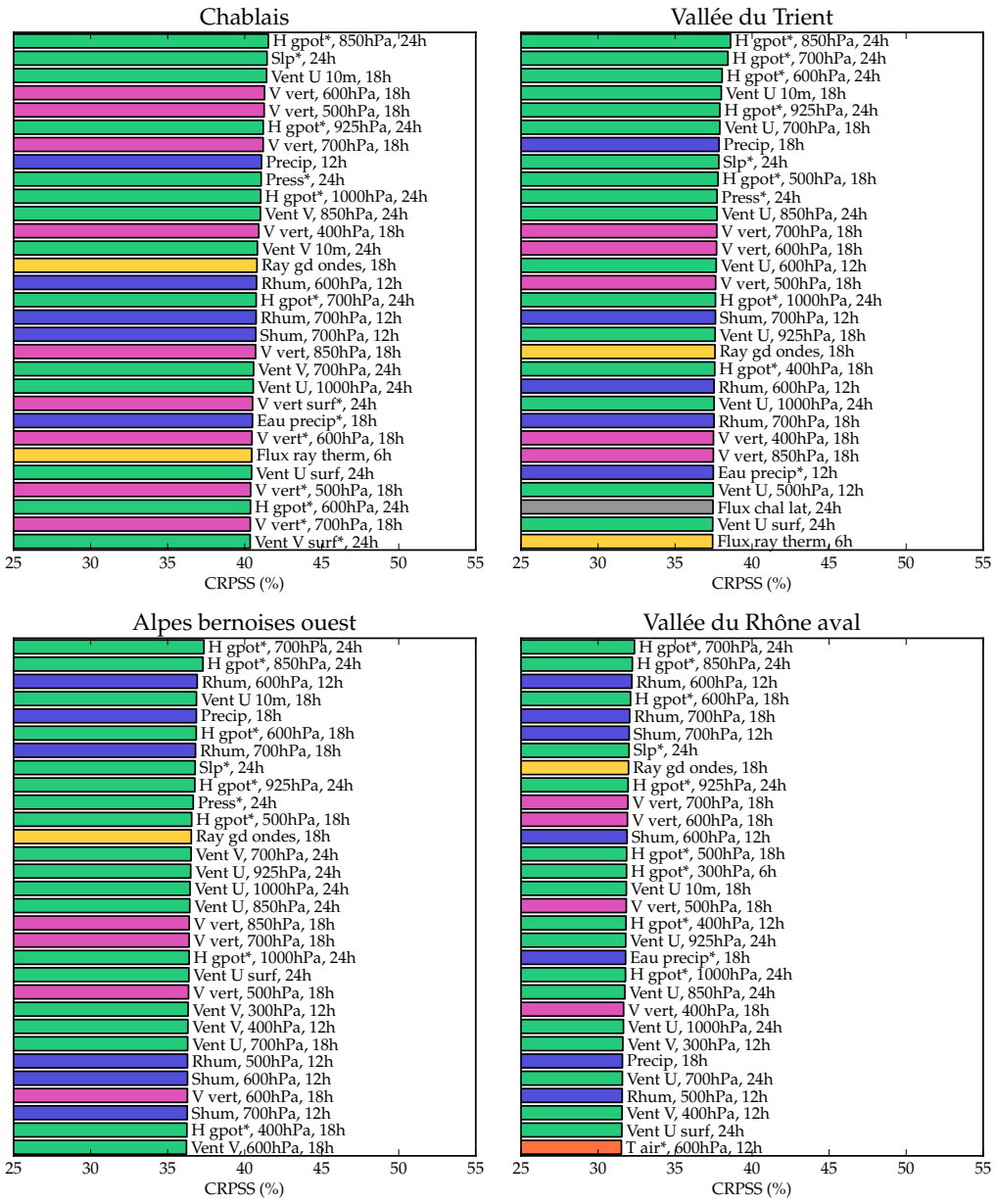


Figure 7.6 – Identique à la Figure 7.1, mais pour le troisième niveau d'analogie.

Les résultats sont présentés dans les Figures 7.6 et 7.7. La première constatation est que les gains obtenus par l'utilisation de variables simples pour un troisième niveau d'analogie semblent moindres, excepté pour les groupements à l'est du bassin où l'analogie de circulation semble toujours mal représentée (le groupement des crêtes du sud-est fera l'objet d'une analyse ultérieure spécifique). De manière générale, les variables de circulation et d'humidité sont très souvent en tête de liste et laissent supposer qu'il reste encore dans celles-ci de l'information non exploitée par la méthode de référence R2. Plus spécifiquement, des niveaux intermédiaires, entre 500 et 1000 hPa, pour l'analogie de circulation, semblent apporter une légère plus-value, ainsi qu'une humidité à 600 ou 700 hPa.

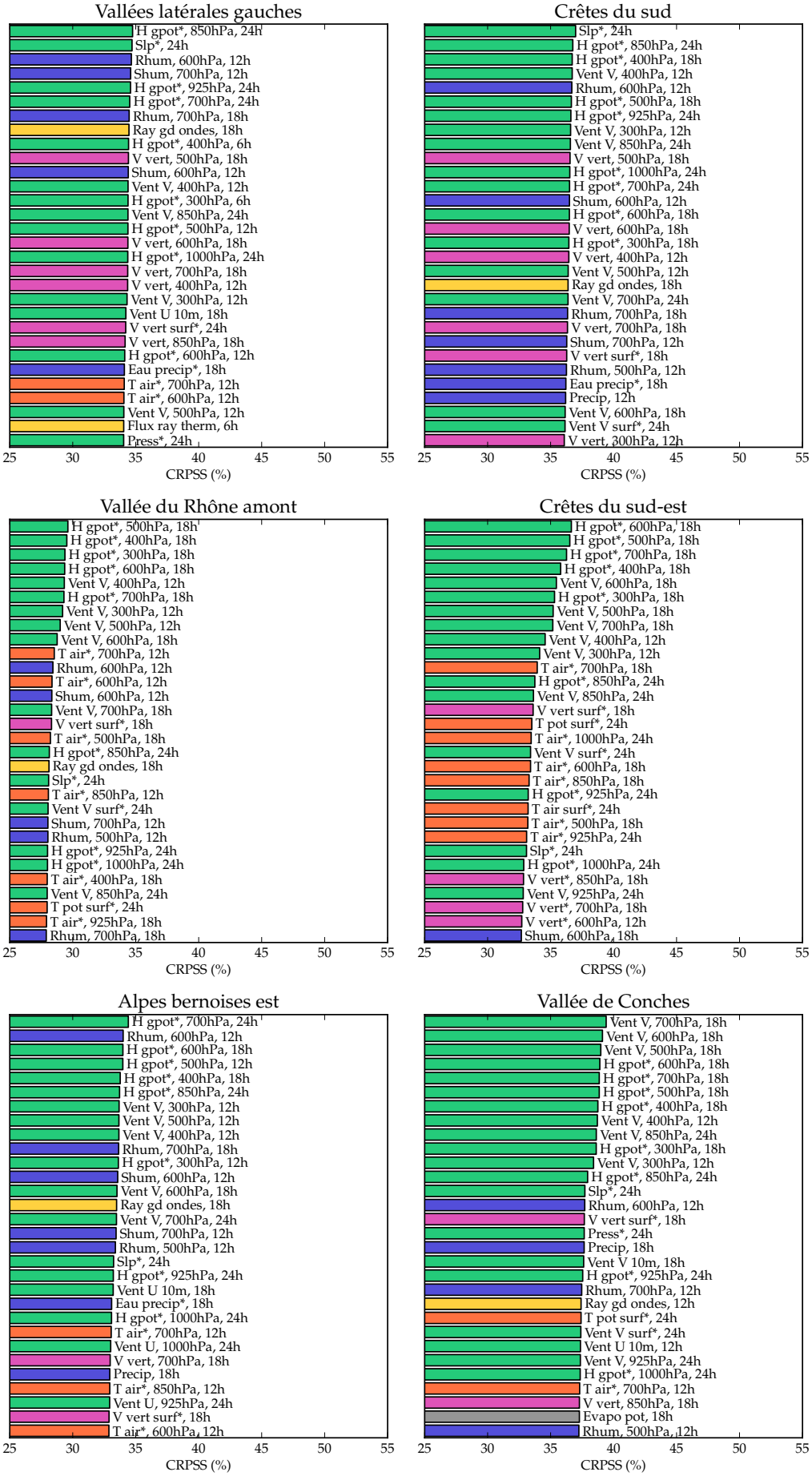


Figure 7.7 – Suite de la Figure 7.6.

7.2.1.4 Niveau d'analogie intermédiaire

Comme le propose Ben Daoud (2010), nous avons finalement évalué l'insertion d'un niveau d'analogie supplémentaire dans la méthode R2, entre celui de la circulation atmosphérique et celui de l'humidité. La différence avec l'analyse de la section 7.2.1.2, est que nous recherchons ici les variables les plus explicatives, en sachant qu'une analogie sur l'humidité est ensuite effectuée. Les paramètres considérés sont semblables à ceux de la section précédente, tout en inversant les niveaux 2 et 3 d'analogie. Les nombres d'analogues sont ici fixés pour chaque niveau aux valeurs suivantes : $N1 = 120$, $N2 = 60$, $N3 = 30$.

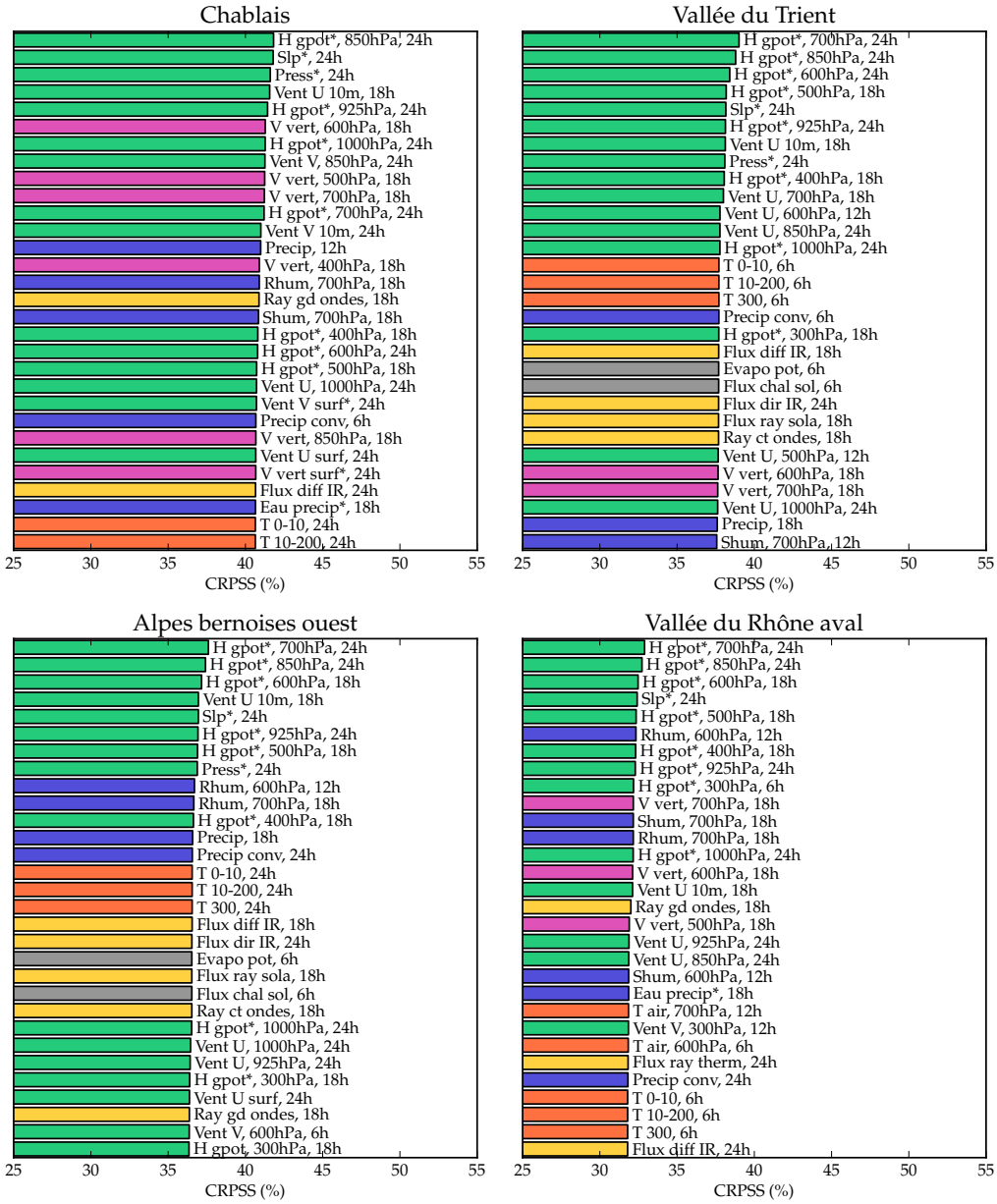


Figure 7.8 – Identique à la Figure 7.1, mais pour un niveau d'analogie entre celui sur la circulation atmosphérique et celui sur l'humidité.

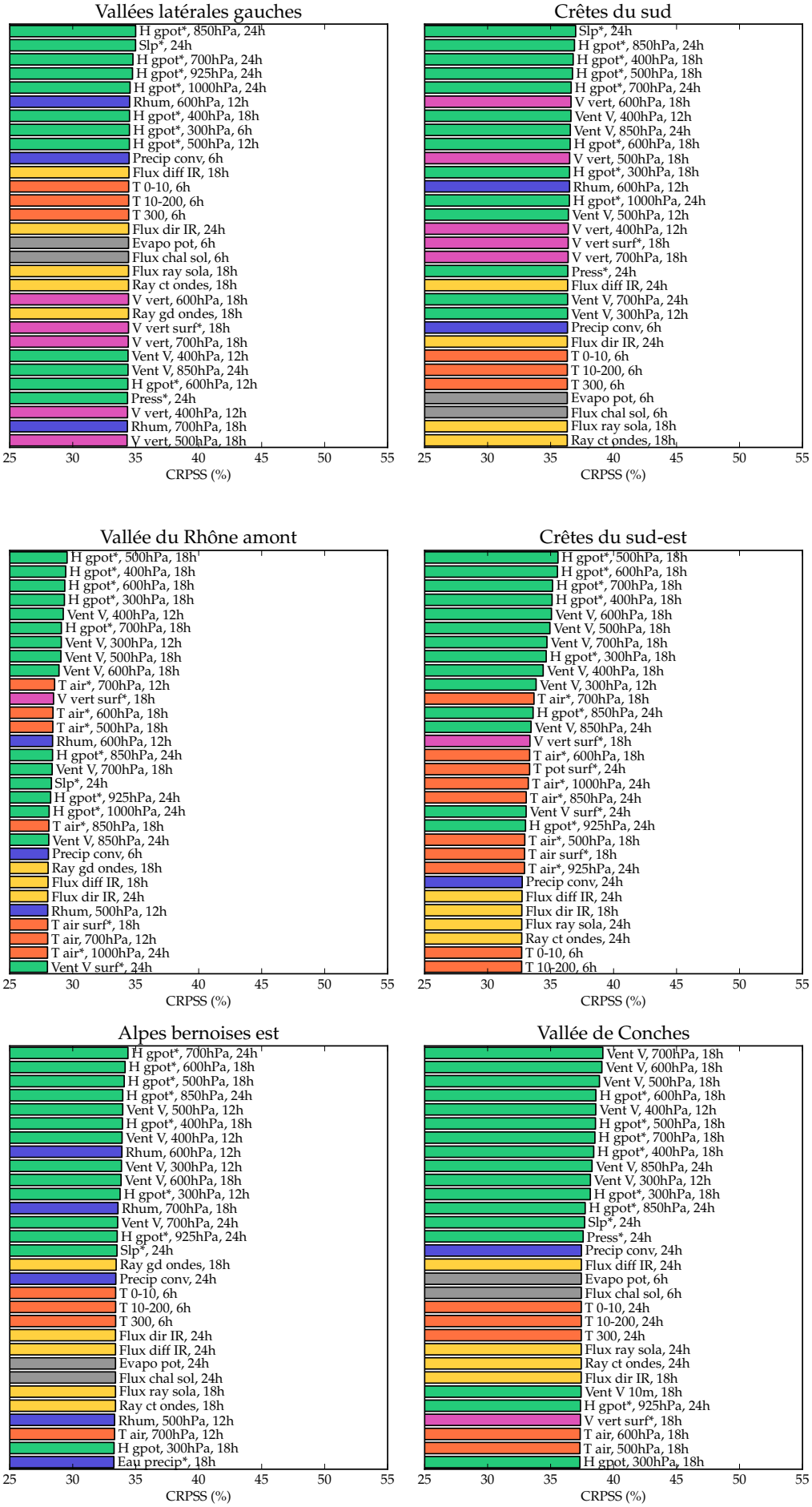


Figure 7.9 – Suite de la Figure 7.8.

Les résultats de cette exploration sont illustrés dans les Figures 7.8 et 7.9. Nos constatations sont semblables à celles de la section précédente ; en effet, d'autres niveaux atmosphériques semblent encore informatifs pour l'analogie de circulation, et dans une moindre mesure, pour l'analogie d'humidité. Une particularité de ces résultats est l'apparition des variables de température du sol, ainsi que de différents rayonnements. Toutefois, ces variables ne sont pas robustes et leur contribution semble moindre. Leur utilisation en prévision est donc peu recommandable.

7.2.1.5 Analyse spécifique des crêtes du sud-est

Le groupement des crêtes du sud-est était particulièrement désavantagé lors des analyses précédentes en raison de paramètres communs défavorables. Pourtant, nous avons un intérêt élevé pour ce groupement, qui est généralement concerné par les situations à risque pour le bassin du Rhône. Nous avons donc réitéré les analyses précédentes en optimisant les paramètres des méthodes de référence R1 et R2 pour ce groupement. De plus, nous effectuons cette exploration de variable en parallèle, d'une part sur la période de calibration complète, et d'autre part sur une sélection des dates où $P > P10/2$ (moitié de la pluie décennale), afin de vérifier que les variables les plus explicatives pour l'ensemble des situations le soient également pour les journées à fortes précipitations. Les gammes des paramètres sont identiques aux analyses précédentes.

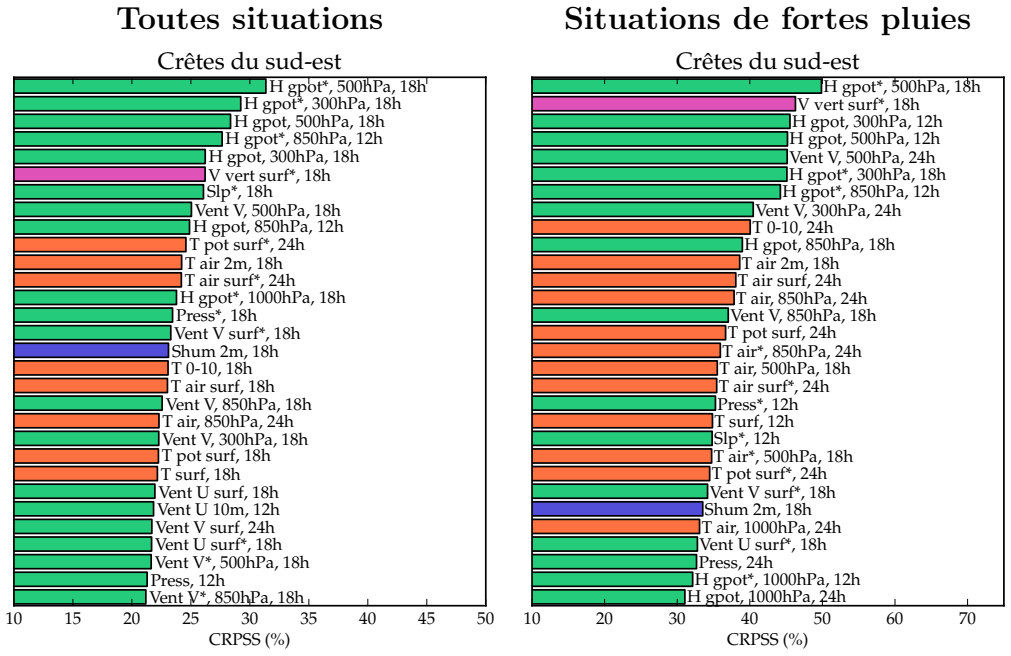


Figure 7.10 – Graphiques des 30 meilleures variables des réanalyses en premier niveau d'analogie (la fenêtre spatiale est optimisée pour chaque variable) pour le groupement des crêtes du sud-est. La Figure de gauche est élaborée sur l'ensemble des journées, et celle de droite, sur les jours où $P > P10/2$. Le critère S1 est utilisé lorsqu'il y a un astérisque à côté du nom de la variable, autrement le RMSE est employé.

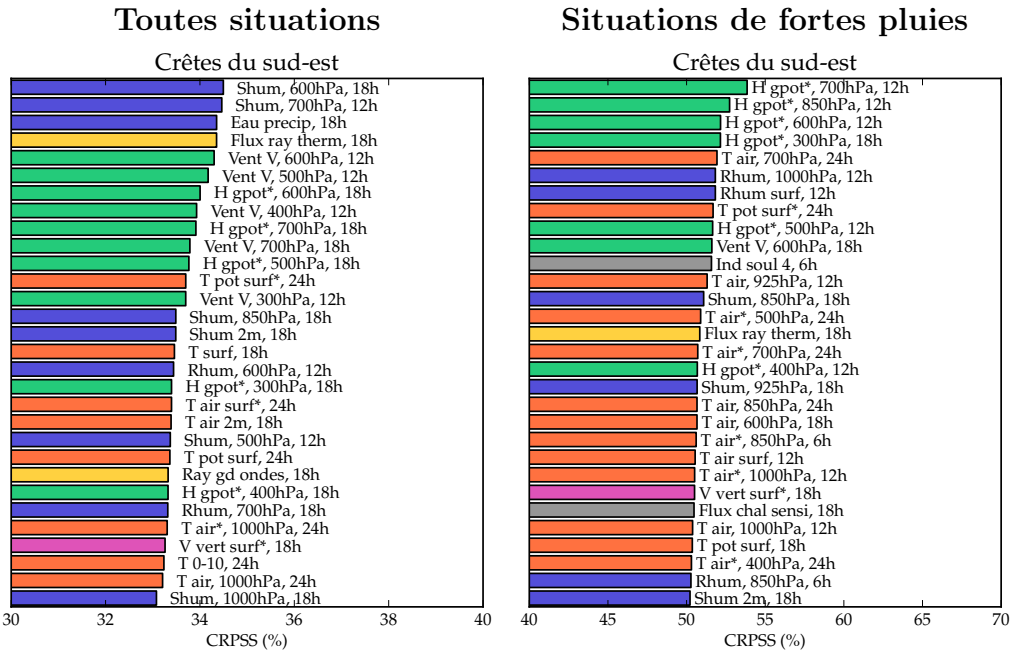


Figure 7.11 – Identique à la Figure 7.10, mais pour le second niveau d'analogie.

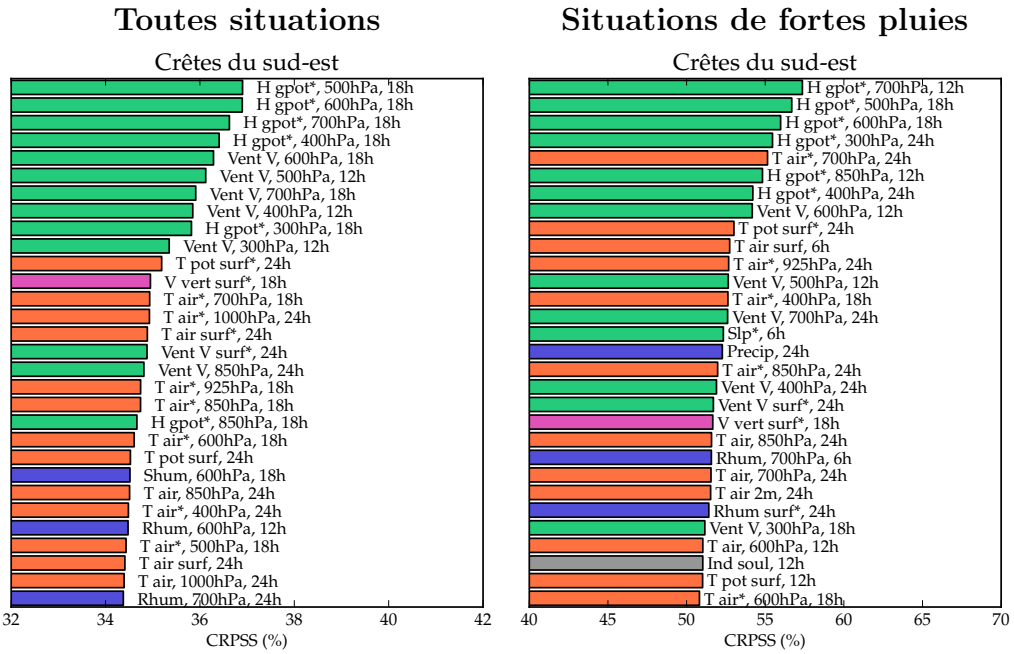


Figure 7.12 – Identique à la Figure 7.10, mais pour le troisième niveau d'analogie.

La Figure 7.10 illustre les résultats pour le premier niveau d'analogie. Il apparaît en premier lieu que le géopotentiel à 500 hPa à 18 h UTC est la variable la plus pertinente pour les deux sélections (globale et seuillée). Les variables de circulation atmosphérique sont toujours les plus explicatives, même dans le cas de la sélection des jours à forte pluie. Une différence dans ce cas est la présence plus importante de variables de températures par rapport à la sélection totale.

Le second niveau d'analogie, représenté par la Figure 7.11, présente une plus grande différence entre les deux sélections. Alors que dans le cas global, les humidités sont les

premières variables, les variables de circulation demeurent en tête de la sélection des jours à fortes précipitations. Ceci peut être un indicateur que l'information non exploitée de la circulation atmosphérique par la méthode de référence R1 est en défaveur de la prévision des jours fortement pluvieux. Il semble donc important d'intégrer un ou plusieurs niveaux atmosphériques supplémentaires dans la recherche d'analogie de circulation.

Les variables de température semblent tout aussi importantes que les variables d'humidité pour les jours fortement pluvieux. Il est intéressant de noter que les températures sont parfois plus pertinentes lorsqu'elles sont comparées avec le critère S1 plutôt que le RMSE. Cela signifie donc que le gradient explique davantage les précipitations que les valeurs absolues de température, peut-être en renseignant sur la position des fronts.

Finalement, l'humidité sélectionnée pour les jours fortement pluvieux est celle des basses couches, et ne correspond pas aux niveaux moyens préférables pour l'ensemble des situations. Cette préférence des bas niveaux pour les événements significatifs sur les crêtes du sud-est est cohérente avec les diverses études mettant en évidence l'importance du flux d'humidité dans les basses couches pour les situations du sud (voir section 1.3.3.1).

Le troisième niveau d'analogie, illustré dans la Figure 7.12, montre à nouveau que l'analogie de circulation semble incomplète, et que les températures (comparées sous forme de gradients) pourraient présenter un potentiel d'amélioration. Finalement, la vitesse verticale de surface, également comparée à l'aide du critère S1, apparaît toujours dans la sélection.

Comme précédemment, nous avons évalué un niveau d'analogie intermédiaire entre celui de la circulation et celui de l'humidité (voir section 7.2.1.4), mais les résultats n'apportent rien de nouveau et ne seront pas présentés.

7.2.1.6 Synthèse de l'exploration des variables des réanalyses

Cette exploration des données des réanalyses a permis de confirmer l'intérêt d'une analogie de circulation en premier niveau, et l'intérêt d'une analogie sur l'humidité en second niveau, pour notre région alpine. On ne peut pas clairement établir si un troisième niveau d'analogie est en mesure d'améliorer significativement la méthode. Une variable de température, comparée à l'aide du critère S1, semble pouvoir apporter de l'information, surtout pour les jours où des précipitations extrêmes ont été observées dans le bassin. L'information du gradient de température pourrait aider à localiser approximativement les fronts, mais rappelons toutefois que les données utilisées ont une résolution de 2.5°.

Nous avons mis en évidence que l'analogie de circulation semble ne pas être complète, puisque les champs de géopotentiel sont encore souvent sélectionnés en tant que meilleures variables de second ou troisième niveau. Soit les niveaux 500 et 1000 hPa sélectionnés ne sont pas optimaux, soit il serait nécessaire d'intégrer un ou plusieurs niveaux supplémentaires. De la même manière, le niveau auquel l'humidité est considérée (850 hPa) dans la méthode R2 n'est vraisemblablement pas optimal, ou insuffisant. Ce dernier point a également été mis en évidence par Ben Daoud (2010). Ces aspects seront repris dans la section 8.5, où des améliorations du choix des prédicteurs sont proposées.

7.2.2 Température des mers et océans

La température des mers et océans a un effet sur la température des masses d'air des basses couches, et joue un rôle important dans les processus de recharge en eau de l'atmosphère. MétéoSuisse (2011), après un non-événement dans le bassin du Rhône, a mentionné dans l'analyse de la situation : « *La température de la Méditerranée est un facteur très important dans la genèse des précipitations de barrage au sud des Alpes. En effet, plus la mer est chaude, plus l'air situé dans les basses couches de l'atmosphère se réchauffera à son contact ; or plus cet air est chaud, plus il peut emmagasiner d'eau sous forme de vapeur.* »

L'Atlantique est également une source d'humidité importante des perturbations arrivant sur le bassin du Rhône, même pour les situations de sud. Plusieurs études, dont Reale et al. (2001), Ferraris et al. (2001), et Turato et al. (2004), ont mis en évidence la contribution de l'Atlantique pour certains événements sur les versants sud des Alpes. L'humidité provenant de cette région serait liée à d'anciens systèmes tropicaux qui ont provoqué une forte recharge en humidité des masses d'air, puis une advection dans la région méditerranéenne (Reale et al., 2001). Cette humidité vient alors s'ajouter à celle provenant de la Méditerranée pour créer des intensités de précipitations particulièrement élevées (Krichak et Alpert, 1998; Reale et al., 2001). Mariotti et al. (2002) ont observé de manière générale, en établissant le cycle hydrologique de la région méditerranéenne, qu'un flux important d'humidité provient de l'Atlantique. Turato et al. (2004) ont étudié les sources d'humidité de la crue d'octobre 2000 et en concluent que seulement 20 % de cette humidité provient de la Méditerranée, et 60 % de l'Atlantique. Cette configuration est particulière aux événements extrêmes, car pour les précipitations plus ordinaires lors d'un flux de sud, la majeure partie de l'humidité semble provenir de la Méditerranée (Turato et al., 2004). Une dizaine de jours avant l'épisode d'octobre 2000, une dépression subtropicale située près des côtes de la Floride, puis évoluant en direction de l'Europe, pourrait être responsable d'une partie de l'humidité des précipitations observées (Turato et al., 2004).

Toutefois, l'évaporation peut avoir lieu à des échelles temporelles et spatiales très différentes (Reale et al., 2001), et il est peu probable que l'humidité provienne de manière récurrente d'une surface bien définie. Comme nous l'avons vu, la Méditerranée et l'Atlantique sont deux grandes sources d'humidité, mais il existe encore d'autres sources liées à des événements extrêmes, par exemple la mer d'Arabie (Krichak et Alpert, 1998).

Nous avons voulu vérifier si la température de surface des mers et océans pouvait être exploitée dans la méthode des analogues, dans le but de caractériser l'humidité de la masse d'air ou sa stabilité. Cette variable a été introduite en second niveau (après l'analogie de circulation), ainsi qu'en troisième niveau (après l'analogie d'humidité), et les résultats sont décrits dans les sections suivantes. Cette température (voir description des données dans la section 4.3.4) a été comparée à l'aide du critère RMSE, mais celui-ci est calculé sur la moyenne d'une sélection de plusieurs points plutôt que directement sur la valeur des points, dans le but de lisser les irrégularités. De plus, nous avons dégradé la résolution initiale de 0.25° en une grille de 1° pour accélérer les calculs de cette première évaluation.

7.2.2.1 Analogie en second niveau

Nous avons tout d'abord recherché une analogie de second niveau sur la quasi-totalité de l'Atlantique nord. Des cartes de pertinence ont été élaborées avec une fenêtre spatiale de 5° en longitude et latitude pour différents groupements et différentes fenêtres temporelles (voir Figure 7.13).

Les cartes de pertinence de l'océan Atlantique présentent une zone persistante affichant une meilleure capacité prévisionnelle située au centre de l'océan ou proche des côtes américaines. Une telle zone est présente pour tous les groupements (résultats non présentés). Il apparaît également que la pertinence de la Méditerranée augmente pour le Chablais lorsque nous nous rapprochons de l'échéance, alors que celle-ci est relativement constante pour le

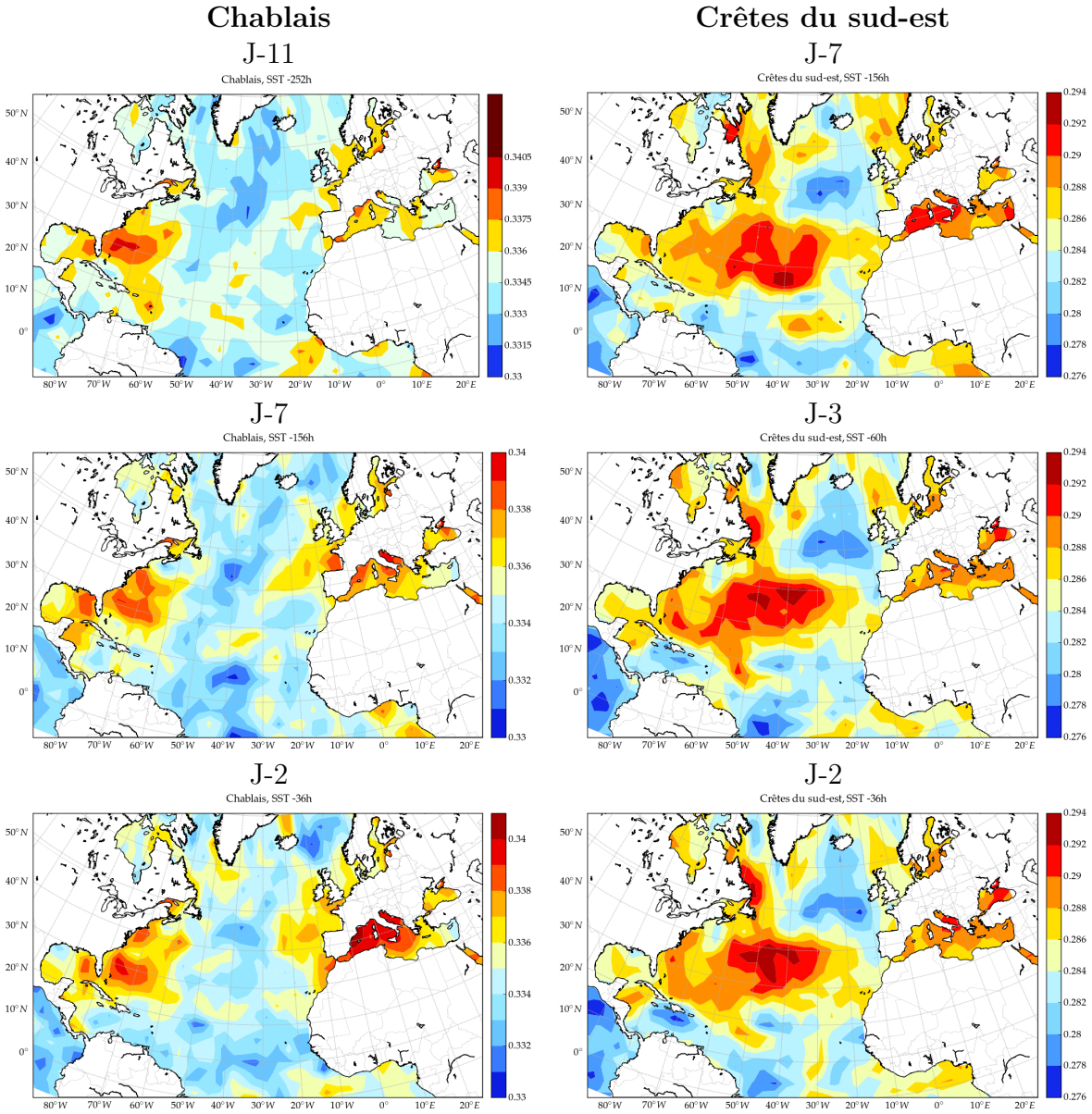


Figure 7.13 – Cartes de pertinence de la température de surface de l'océan Atlantique en second niveau d'analogie, pour le groupement du Chablais et celui des crêtes du sud-est et pour différentes fenêtres temporelles.

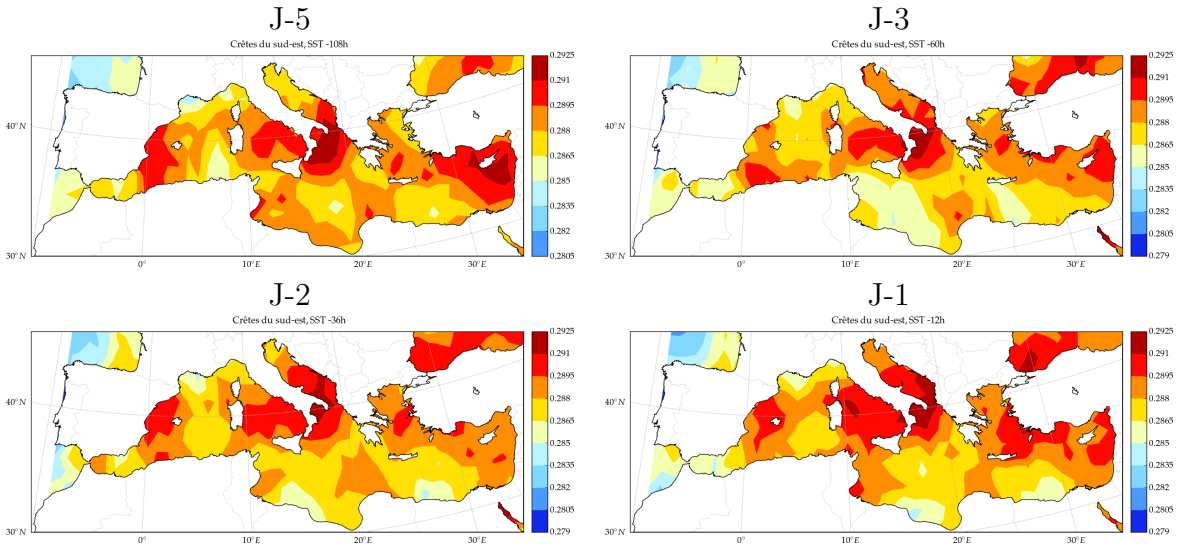


Figure 7.14 – Cartes de pertinence de la température de surface de la mer Méditerranée en second niveau d'analogie, pour le groupement des crêtes du sud-est et pour différentes fenêtres temporelles.

groupement des crêtes du sud-est. La pertinence de la Méditerranée pour le Chablais peut être due à une influence de la température sur la circulation, ou à un effet indirect lié à d'autres processus. La présence d'une zone d'intérêt au milieu de l'Atlantique ou même proche des côtes américaines est cohérente avec les observations des sources d'humidité de Turato et al. (2004). Cependant, la pertinence ne signifie pas forcément que l'information d'intérêt se situe dans une eau plus chaude, ni même que la région en question est une source d'humidité. Une telle zone pourrait par exemple améliorer légèrement la prévision grâce à l'effet de la température (chaude ou froide) sur la circulation atmosphérique et la genèse de systèmes perturbés ou bloquants. De même, les cartes de la Méditerranée (élaborées avec une fenêtre spatiale de 3° ; voir Figure 7.14) présentent des zones pertinentes, qui peuvent à nouveau avoir un effet sur l'humidité ou la circulation.

Toutefois, malgré la présence de zones pertinentes dans l'Atlantique et la Méditerranée, l'amélioration du score de prévision est négligeable. Nous avons également évalué les anomalies de température, mais les scores sont encore moins bons.

7.2.2.2 Analogie en troisième niveau

Nous avons réédité l'exercice avec l'analogie du troisième niveau, c'est-à-dire après l'analogie sur les humidités. Nous ne présentons ici que les cartes de pertinence de la Méditerranée pour le groupement des crêtes du sud-est (Figure 7.15).

Nous nous attendions à voir une zone de pertinence dans le golfe de Gènes ou dans le golfe du Lion (souvent considérés lors de prévisions de situations de barrage du sud pour la région de Binn-Simplon), mais cela n'a pas été le cas, même en nous intéressant uniquement aux fortes précipitations (résultats non présentés). À nouveau, que ce soit pour la Méditerranée ou l'Atlantique, cette variable apporte un gain quasiment nul et ne semble donc pas inté-

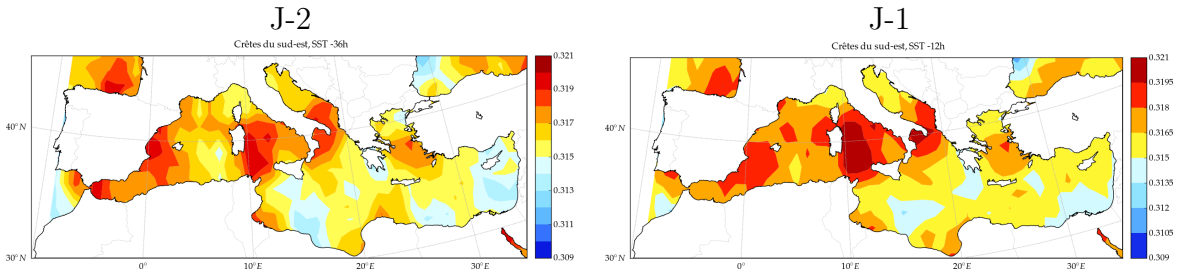


Figure 7.15 – Cartes de pertinence de la température de surface de la mer Méditerranée en troisième niveau d'analogie, pour le groupement des crêtes du sud-est et pour différentes fenêtres temporelles.

ressante en opérationnel dans la méthode des analogues. La raison probable de cette faible pertinence est que les masses d'air ne suivent pas exactement les mêmes trajectoires d'un événement à un autre, et donc que l'emplacement des sources d'humidité et de chaleur varie. Il existe peut-être un meilleur moyen d'intégrer cette information que de la considérer sur une fenêtre spatiale fixe, comme nous le faisons dans la méthode des analogues. Une application opérationnelle intéressante consisterait à identifier en temps réel les sources d'humidité des masses d'air arrivant sur le bassin, par exemple à l'aide de la méthodologie utilisée par Turato et al. (2004).

7.3 Analyses parallèles

Des analyses sur les prédicteurs ont été réalisées en dehors du contexte de la méthode des analogues afin de mettre en évidence certaines informations sur la circulation atmosphérique propre aux événements extrêmes observés dans nos différents groupements.

7.3.1 Roses des vents des réanalyses

La première analyse consiste à élaborer des roses des vents sur la base des réanalyses, pour différents seuils de précipitations. Afin de considérer une sélection sur les précipitations comparable pour les différentes stations, nous avons préféré une approche basée sur les quantiles plutôt que sur les valeurs absolues. Ainsi, de manière similaire à la démarche de Martius et al. (2008), nous considérons un seuil de précipitations extrêmes au quantile 99 % des jours pluvieux, un seuil de précipitations fortes au quantile 95 %, ainsi que d'autres seuils de quantiles (90 % et 75 %).

Au vu de la résolution du jeu de données des réanalyses (2.5°), les vents ont été considérés en un point unique et central au bassin du Rhône. Les vents en ce point ont été établis à l'aide des 4 points autour du bassin (pondération en fonction de la distance). Les roses des vents présentent l'information de la répartition des fréquences de l'azimut et de la force du vent.

7.3.1.1 Résultats

La première analyse s'intéresse aux différents seuils de précipitations à la station de Binn (Figure 7.16) et à celle des Marécottes (Figure 7.17), pour les niveaux 300, 500, 850 et 1000 hPa. La période de travail s'étend de 1961 à 2008.

Les résultats pour la station de Binn (Figure 7.16) présentent une évolution claire des fréquences de l'azimut du vent en direction du sud avec un seuil croissant sur les précipitations. Mis-à-part le niveau 1000 hPa qui est très bruité, et dont la considération est discutable dans le milieu alpin, tous les niveaux affichent une divergence marquée en termes d'azimut entre les situations extrêmes et la climatologie. Il semble en effet que presque uniquement des situations de flux de sud (surtout pour les niveaux 300 et 500 hPa) ont généré des pluies extrêmes à fortes à la station de Binn. La vitesse du vent, telle que réanalysée, ne semble pas déterminante.

Nous n'observons qu'un seul événement extrême pour la station de Binn avec un flux de nord. Celui-ci correspond au 21 décembre 1991, où les Alpes ont été touchées par de très abondantes chutes de neige. Nous avions montré dans Horton et al. (2012) que pour 152 événements de précipitations supérieures à 50 mm à la station de Binn, seules 3 ne présentaient pas un flux de sud à 500 hPa. Ces trois événements ont eu lieu en novembre et décembre, et les précipitations étaient vraisemblablement sous forme solide pour une grande partie du bassin. Ceci signifie que 98 % des événements supérieurs à 50 mm dans notre archive présentent une circulation du sud.

À la station des Marécottes, les événements forts et extrêmes ont eu lieu des jours où la circulation est zonale (Figure 7.17). Cette direction correspond à une fréquence très élevée dans la climatologie, et l'azimut ne peut donc pas être utilisé comme élément discriminatoire. Toutefois, la vitesse du vent détient ici une grande importance, puisque la grande majorité des événements extrêmes ont eu lieu lorsque les courants de haute altitude étaient forts (supérieurs à 40 ou 50 m/s).

Ces analyses ne démontrent évidemment pas que chaque situation du sud engendre des précipitations extrêmes à Binn, ni que chaque fort courant zonal de haute altitude est lié à des pluies extrêmes aux Marécottes. Dans le but de quantifier les non-événements, ou les pluies moindres, nous avons élaboré des histogrammes des directions et des vitesses des vents au niveau 500 hPa par classes de précipitations (du plus foncé au plus clair dans la Figure 7.18) :

1) $P > q99\%$ 2) $q99\% \geq P > q95\%$ 3) $q95\% \geq P > q90\%$
4) $q90\% \geq P > q75\%$ 5) $q75\% \geq P > q50\%$ 6) $q50\% \geq P > 0$
7) $P = 0$

Cette analyse a également été effectuée à 300 hPa, mais les résultats étant très semblables, ils ne sont présentés que pour le niveau 500 hPa. Il apparaît effectivement que les situations critiques mises en évidence précédemment ne génèrent pas systématiquement des précipitations.

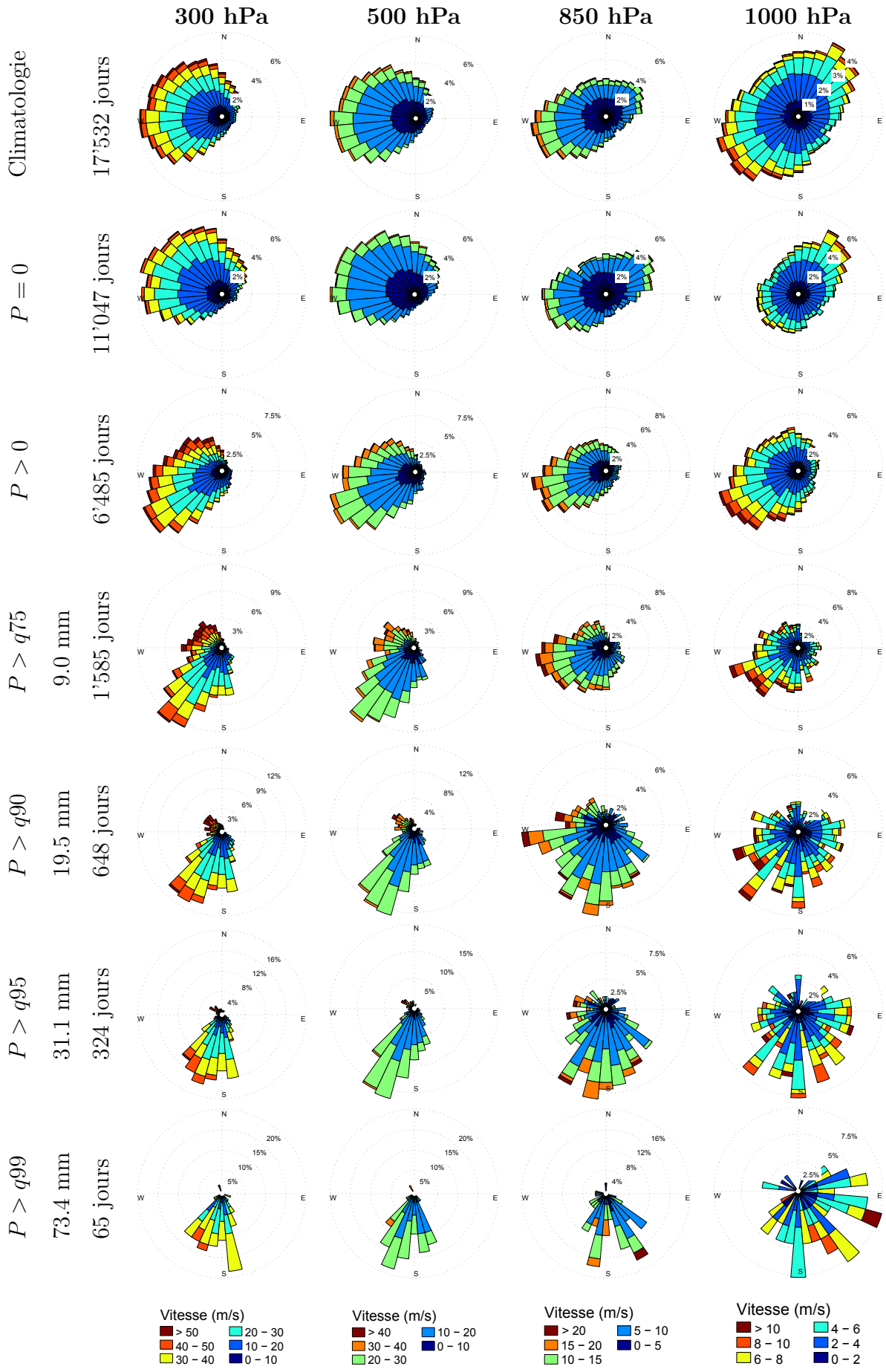


Figure 7.16 – Roses des vents élaborées avec les réanalyses sur la période 1961-2008, pour différents niveaux atmosphériques et seuils de précipitations à la station de **Binn**.

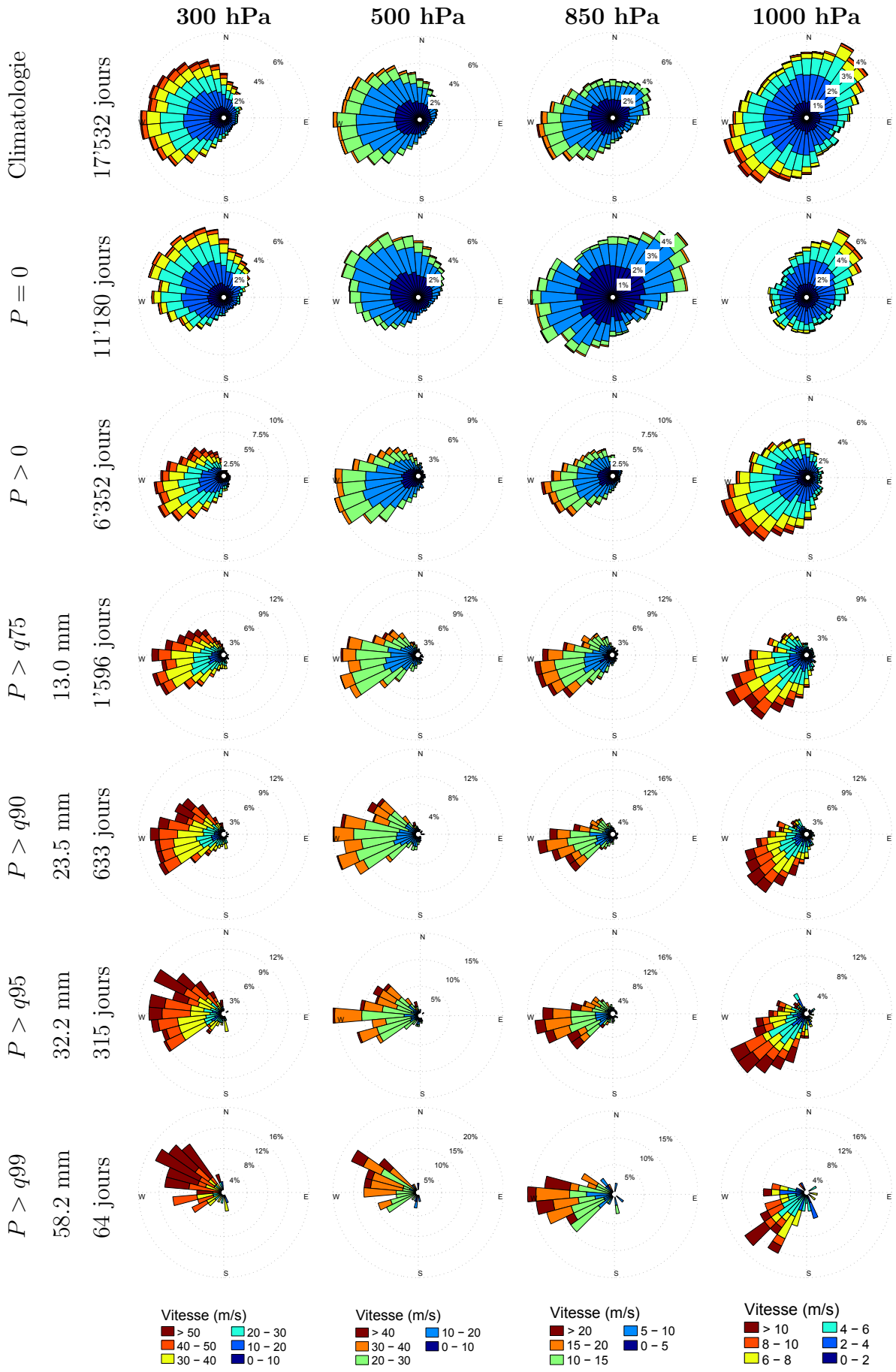


Figure 7.17 – Roses des vents élaborées avec les réanalyses sur la période 1961-2008, pour différents niveaux atmosphériques et seuils de précipitations à la station des **Marécottes**.

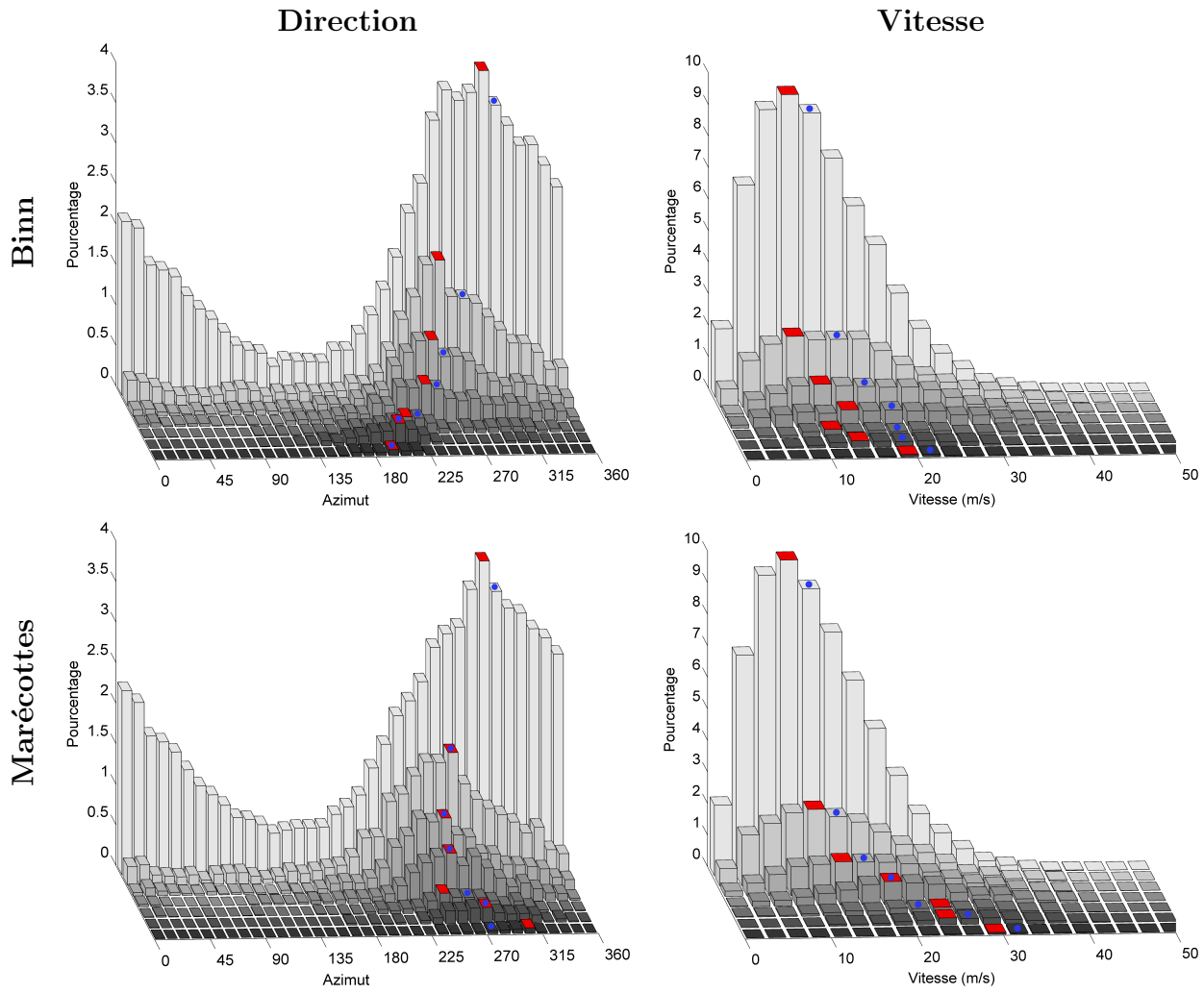


Figure 7.18 – Histogrammes (gauche) des directions et (droite) des vitesses des vents au niveau 500 hPa pour différentes classes de précipitations (voir texte pour les détails) aux stations (haut) de Binn et (bas) des Marécottes. Les maxima des distributions sont marqués en rouge, et les barres contenant la valeur moyenne sont indiquées par un point bleu.

La forme des distributions des directions aux deux stations est quasi unimodale, avec, dans les deux cas, un mode secondaire beaucoup plus faible, réparti dans une enveloppe d'environ 45° autour de l'azimut 315°, correspondant à un flux de nord-ouest. Dans le cas de la station des Marécottes, ce maximum devient le mode principal pour les situations extrêmes, alors qu'il disparaît pour cette même classe à Binn. Pour cette dernière station, nous voyons clairement les distributions se décaler vers le sud (180°) avec l'augmentation des cumuls précipités. Les histogrammes des vitesses des vents montrent la tendance identifiée précédemment pour les Marécottes, soit un décalage des distributions vers de plus fortes valeurs, alors que Binn ne présente pas de tendance claire.

Les barres contenant les valeurs moyennes sont indiquées par un point bleu. Les médianes calculées sur les vitesses tombent systématiquement dans les mêmes gammes que les moyennes. La moyenne de la direction est calculée sur la base de la moyenne des composantes méridiennes et zonales normées de chaque situation de la classe en question. Les moyennes présentent les mêmes tendances que les maxima des distributions, bien qu'ils ne se confondent pas toujours.

Nous avons ensuite réalisé des cartes des roses des vents aux niveaux 300 hPa (Figure 7.19), 500 hPa (Figure 7.20), et 850 hPa (Figure 7.21) de la plupart des stations pour les événements extrêmes (quantile 99 %). Les jours extrêmes sont donc différents pour chaque station.

Ces cartes, principalement celles des niveaux 300 et 500 hPa, montrent clairement les principales influences atmosphériques pour les événements extrêmes aux différentes stations. Nous avons cherché à synthétiser cette information en élaborant une carte qui discrétise les principales sensibilités des sous-régions du bassin (voir Figure 7.22). Cette synthèse est une interprétation libre dont le zonage ne doit pas être considéré de manière rigide et ce en raison du manque de données entre les stations et du fait que ces zones n'ont en réalité pas un contour net, et que, de plus, les influences atmosphériques sont souvent mélangées. De manière globale, 3 influences principales peuvent être distinguées :

- Flux de sud (S) : comme nous l'avions déjà analysé précédemment, les précipitations extrêmes de la région de Binn-Simplon (comprenant également Saas-Fee et Grächen) sont expliquées quasi exclusivement par des situations de barrage du sud. Les vitesses des vents sont moyennes par rapport à la climatologie.
- Fort vent de l'ouest-nord-ouest (ONO) : cette situation peut affecter de manière significative la région des Marécottes, mais également les versants nord et sud des Alpes

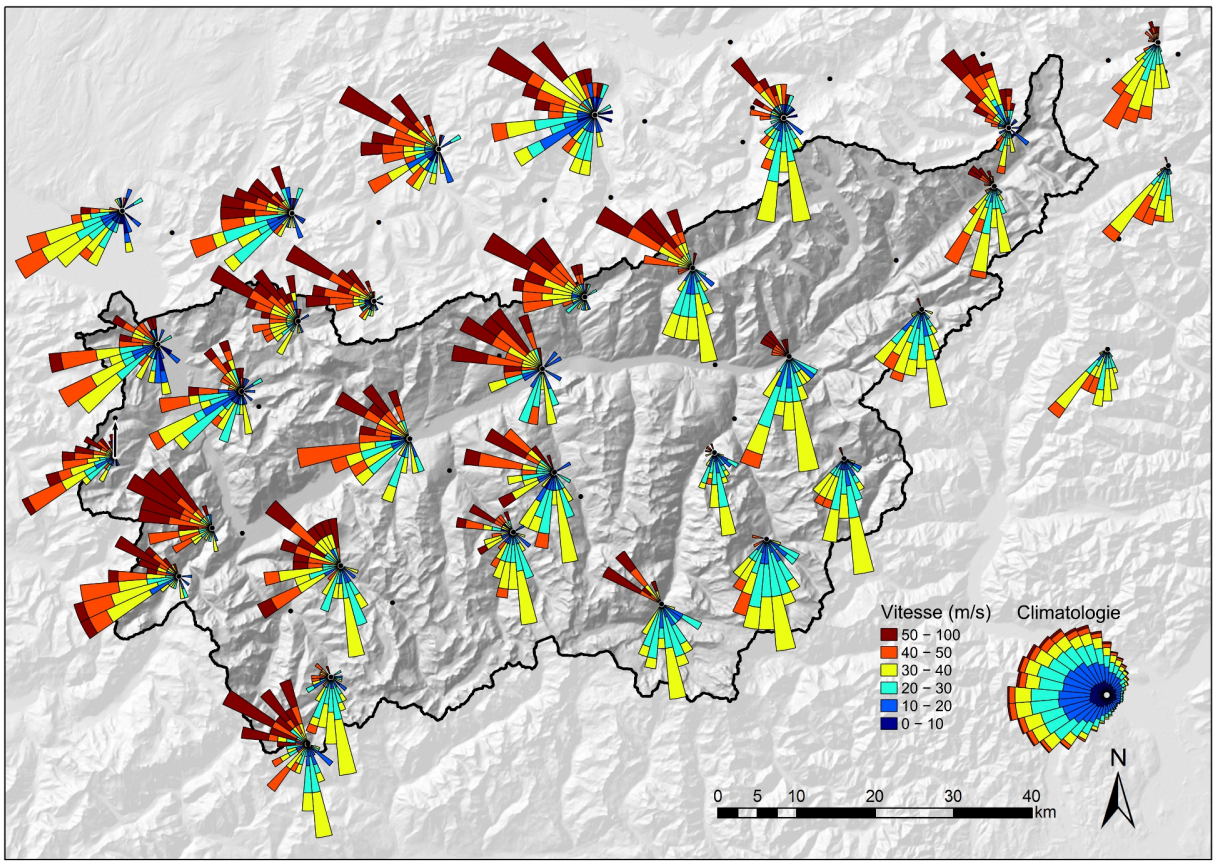


Figure 7.19 – Roses des vents au niveau 300 hPa pour les jours à précipitations extrêmes.

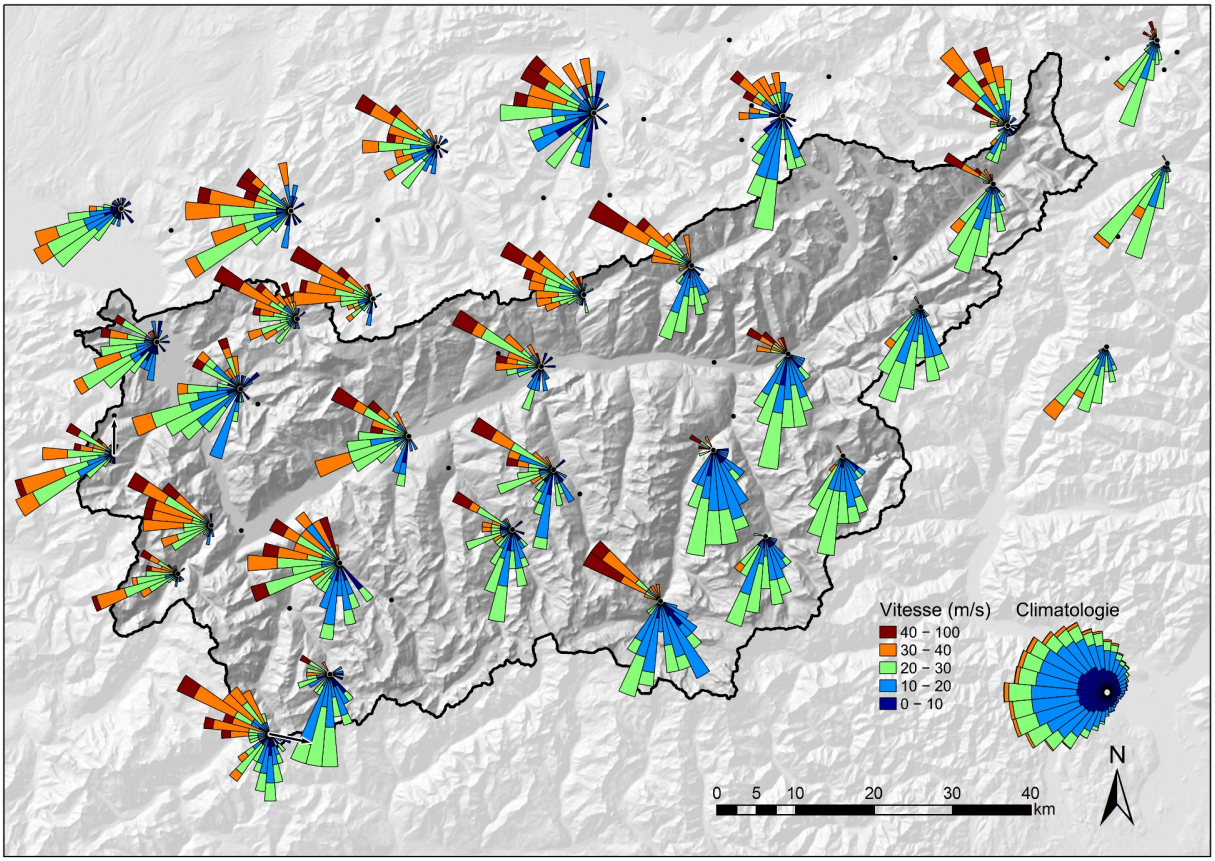


Figure 7.20 – Roses des vents au niveau 500 hPa pour les jours à précipitations extrêmes. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

bernoises. La particularité de cette configuration est que le jet de haute altitude doit être particulièrement fort pour que des pluies extrêmes soient observées aux différentes stations.

– Flux de l'ouest-sud-ouest (OSO) : un tel courant semble affecter principalement le Chablais, qui est également touché par d'autres influences.

La zone de « mélange » de la Figure 7.22 couvre une grande partie du bassin du Rhône. Nous y retrouvons les trois influences listées ci-dessus, avec une dominance de situations du sud dans sa partie sud-est, une grande proportion de flux ONO proche des Alpes bernoises, mais également au col du Grand-Saint-Bernard, et une influence des flux OSO dans la vallée du Rhône et dans les vallées latérales gauches. Le cas de la station du col du Grand-Saint-Bernard est intéressant car cette dernière diffère de Bourg-Saint-Pierre, située à proximité, par une influence beaucoup plus importante des situations ONO. Ceci peut peut-être s'expliquer par la différence d'altitude entre les deux emplacements, et nous permet de mieux comprendre pourquoi les séries de précipitations à la station du col du Grand-Saint-Bernard sont mal corrélées avec celles des autres stations de la région.

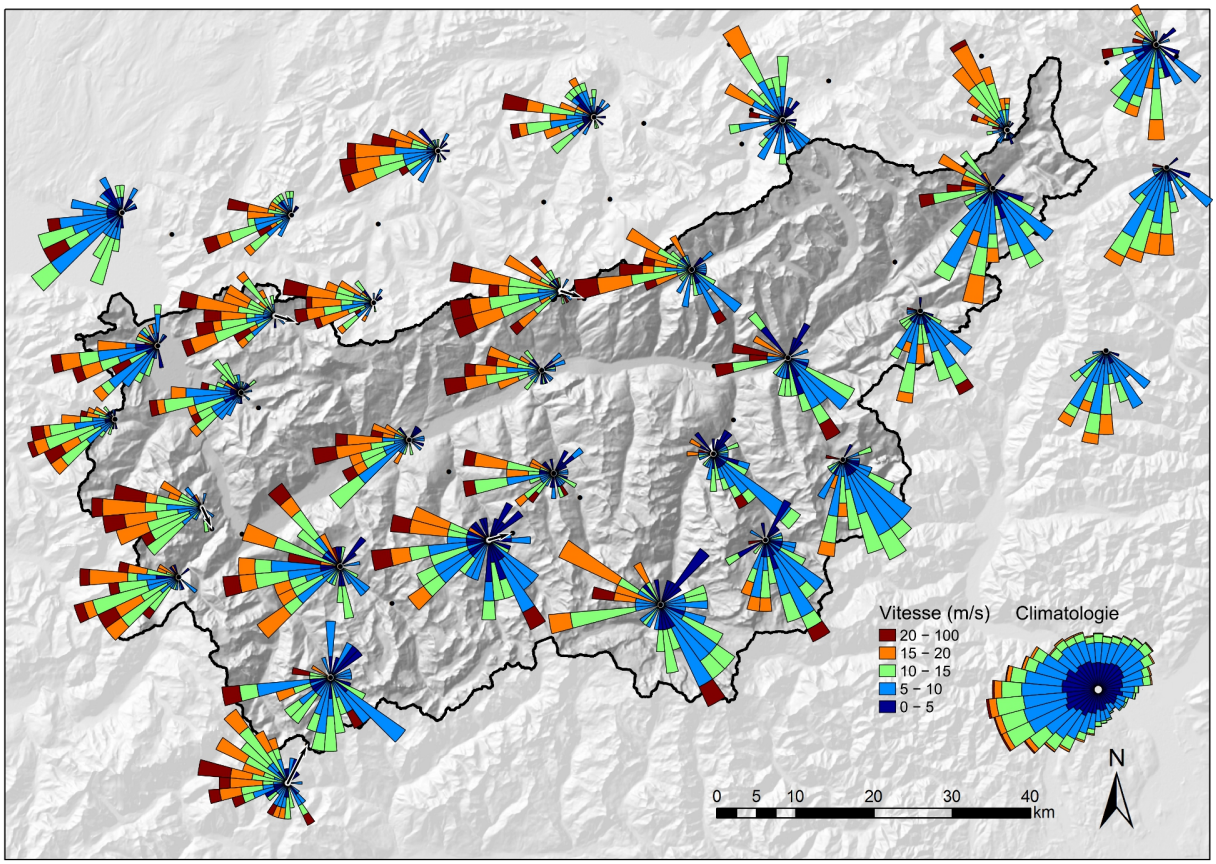


Figure 7.21 – Roses des vents au niveau 850 hPa pour les jours à précipitations extrêmes. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

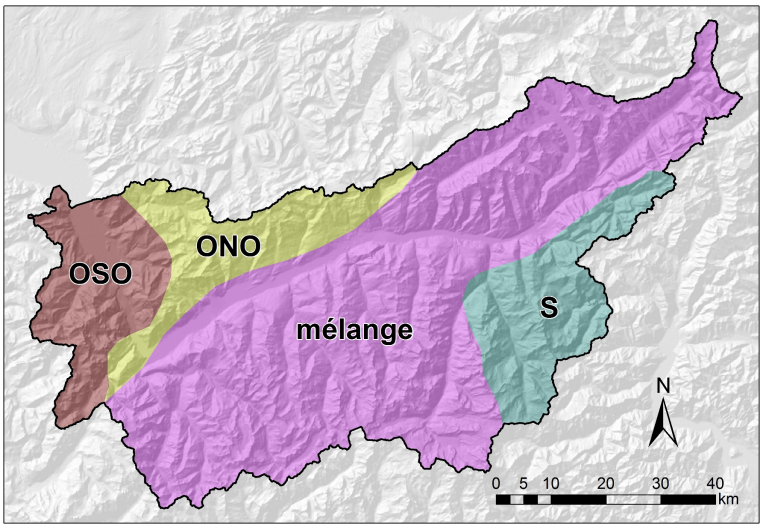


Figure 7.22 – Carte des influences principales pour les précipitations extrêmes, élaborée sur les analyses des roses des vents à 300 et 500 hPa. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

7.3.2 Trajectoires inverses des masses d'air

Après l'analyse des directions et vitesses des vents d'altitude présentée dans la section précédente, nous nous sommes intéressés aux trajectoires des masses d'air se trouvant davantage à l'amont du flux. Nous avons donc élaboré, sur la base des réanalyses, des trajectoires inverses des masses d'air arrivant au point central du bassin (voir section précédente).

Il existe différentes approches simplificatrices pour calculer les trajectoires des masses d'air, sur des surfaces de nature différente. Elles sont plus ou moins applicables à certains niveaux de l'atmosphère et à certaines échelles de mouvement (Danielsen, 1961; Kuo et al., 1985) :

- La **méthode isosigma** considère que le flux d'air suit le terrain. Elle peut être pertinente pour les flux de bas niveau sur de courtes périodes.

- La **méthode isobarique** calcule les trajectoires sur des niveaux à pression constante. Il est intéressant d'utiliser cette méthode lorsque des processus non adiabatiques interviennent, tels qu'un échange thermique avec le sol ou la génération de précipitations, ou alors pour des niveaux supérieurs de l'atmosphère. Cette méthode est souvent utilisée pour élaborer des climatologies de trajectoires des masses d'air en raison de sa facilité de mise en œuvre.

- La **méthode isentropique** considère les trajectoires sur une surface à température potentielle constante. Cette hypothèse est valide pour les mouvements dans les niveaux moyens et supérieurs (au-dessus de la couche limite), au-dessus de régions sans fortes précipitations. Ces modèles donnent des résultats considérablement meilleurs que les modèles isobariques ou isosigma, particulièrement en ce qui concerne le transport vertical (Kuo et al., 1985).

Nous utilisons la méthode isobarique, car les vents des réanalyses sont donnés pour des niveaux de pression. Il conviendra donc d'être prudent quant aux résultats obtenus sur les basses couches, qui sont très probablement entachés d'une large erreur. De plus, la pertinence des trajectoires est limitée par la résolution spatiale et temporelle des données, par les erreurs dans ces données et par toute hypothèse simplificatrice (Kuo et al., 1985).

Les trajectoires sont calculées sur la base des champs de vents des réanalyses. Nous avons choisi la même approche que Dirmeyer et Brubaker (1999) et Reale et al. (2001), qui consiste à calculer les positions antérieures des masses d'air (x_{n-1}, y_{n-1}) selon :

$$\begin{aligned} x_{n-1} &= x_n + \frac{\tau}{2}\left(u_n + u'_{n-1}\right) \\ y_{n-1} &= y_n + \frac{\tau}{2}\left(v_n + v'_{n-1}\right) \end{aligned} \tag{7.1}$$

où τ est l'intervalle de temps (6 h dans notre cas), u et v sont les composantes horizontales du vent. Cette technique consiste dans un premier temps à calculer un point temporaire (x'_{n-1}, y'_{n-1}) en remontant les vents, puis à utiliser les valeurs des vents (u'_{n-1}, v'_{n-1}) à ce point temporaire pour recalculer un nouveau point corrigé (x_{n-1}, y_{n-1}) sur la base de la

moyenne des vitesses. Le premier point n'est pas gardé, et nous continuons à remonter le vent sur 10 jours depuis le point corrigé.

Nous avons ajouté un aspect itératif pour minimiser l'erreur effectuée sur l'estimation de l'emplacement du point, de manière à ce que la projection de (x_n, y_n) en arrière et de (x^i_{n-1}, y^i_{n-1}) en avant corresponde au mieux. Un point est considéré comme satisfaisant si l'erreur est inférieure à un seuil choisi, ou si l'optimisation ne parvient pas à la réduire après 40 itérations.

7.3.2.1 Résultats

Les résultats des trajectoires inverses à 500 hPa sont présentés pour les jours dépassant le seuil des précipitations extrêmes (quantiles 98 % et 99 %). Alors que les trajectoires ont été calculées pour diverses stations, nous les présentons pour Binn et pour les Marécottes (voir Figure 7.23), qui sont, parmi d'autres, moins soumises à un mélange d'influences.

Nous pouvons aisément observer les différences des trajectoires des masses d'air arrivant sur le bassin pour les journées à précipitations extrêmes à l'une ou l'autre des stations (voir Figure 7.23). La circulation est globalement zonale pour les Marécottes, alors que les trajectoires semblent osciller sur l'Atlantique pour arriver par le sud pour Binn. Le faisceau des trajectoires critiques pour Binn est bien marqué pour les quantiles 99 et 98 %, et est cohérent avec la carte de pertinence de la méthode des analogues pour cette station (voir Horton et al., 2012). Cette circulation est également en accord avec les analyses de Massacand et al. (1998), Martius et al. (2006), et Plaut et al. (2001) (voir section 1.3.3.1).

Les trajectoires dans les couches où l'air se déplace relativement librement et de manière rapide, comme les jets à 500 hPa, comportent certainement une plus petite erreur relative que les trajectoires à proximité de la surface terrestre qui sont contraintes par le relief et les phénomènes thermiques, et où les processus sont majoritairement sous-maille. En revanche, de manière absolue, la vitesse de ces masses d'air est telle que les imprécisions s'amplifient rapidement en erreurs importantes (Kuo et al., 1985). Des tests qualitatifs de sensibilité pour des trajectoires inverses de 10 jours à ce niveau ont été entrepris en introduisant des erreurs aléatoires de maximum 1°, en premier lieu sur le point de départ, puis le long du trajet. Il en ressort que lorsque le courant est bien défini, le faisceau des trajectoires se disperse un peu, mais reste cohérent. En revanche, lorsque l'on s'approche des centres actifs, de petites erreurs font très vite diverger les trajectoires, de telle manière qu'il est utopique de déterminer la région de départ de la masse d'air 10 jours auparavant.

Il est cependant difficile d'intégrer les trajectoires sous cette forme dans la méthode des analogues, car une comparaison directe n'est pas aisée. Il faut en effet être en mesure de déterminer un critère de correspondance, par exemple de la manière suivante :

– En calculant les distances entre les points correspondant aux mêmes pas de temps, et en les sommant avec une pondération décroissante (de manière à ce que les points proches du bassin aient plus de poids).

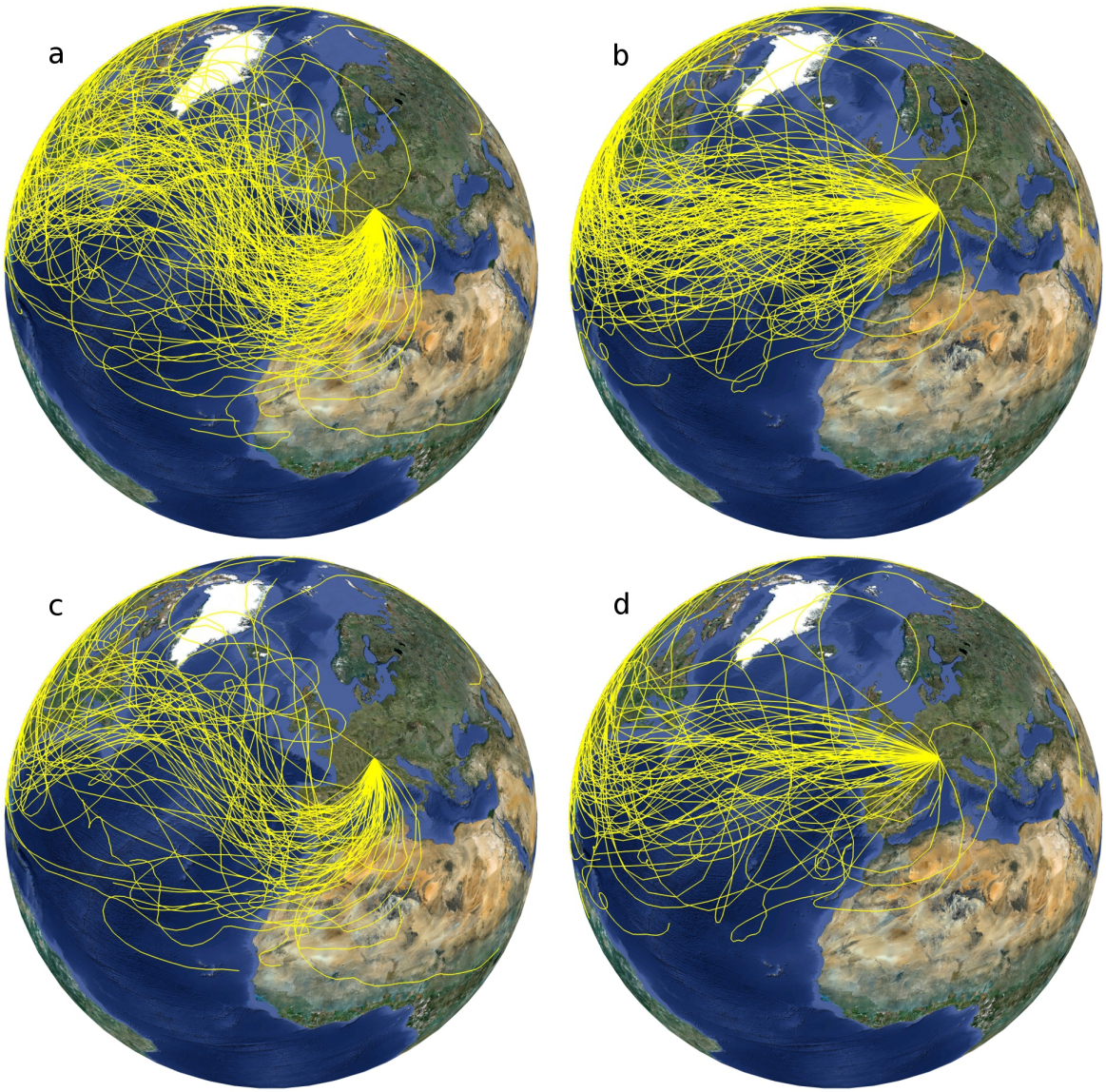


Figure 7.23 – Trajectoires inverses à 500 hPa pour les jours où les précipitations dépassent (haut) le quantile 98 % et (bas) le quantile 99 %, aux stations (gauche) de Binn et (droite) des Marécottes.

– En calculant un indice proportionnel au temps passé au-dessus des mers et océans pour les moyens à bas niveaux.

Mais ces trajectoires ont également un intérêt en dehors de la méthode des analogues, en apportant de l'information supplémentaire au prévisionniste pour son expertise, par exemple dans un tableau de bord. La visualisation des trajectoires prévues et la comparaison avec des événements passés peuvent être informatives. De même, une visualisation des sources d'humidité peut être intégrée, comme le proposent Dirmeyer et Brubaker (1999) et Reale et al. (2001).

Chapitre 8

Propositions d'améliorations de la méthode

Notre objectif consiste d'abord à améliorer certains ingrédients de la méthode des analogues ; nous présentons ici quelques résultats. Une fenêtre temporelle glissante est évaluée ; pour une cible donnée (0-24 h), cette dernière permet d'identifier des analogues commençant à différents moments des journées candidates plutôt qu'à une heure fixe comme cela est le cas actuellement. Nous évaluons ensuite une prévision infrajournalière, avec un pas de temps de 6 h. Puis nous cherchons à améliorer la prévision de l'occurrence des précipitations.

Les résultats de l'exploration des variables du jeu de données des réanalyses sont exploités dans le but d'améliorer l'analogie de circulation de même que l'analogie d'humidité. Nous en proposons deux nouvelles méthodes.

8.1 Introduction du chapitre

Dans ce chapitre, nous évaluons plusieurs propositions d'améliorations. La première est une fenêtre temporelle glissante, au lieu d'une fenêtre fixe, pour la sélection des situations analogues. La deuxième est un passage de la prévision, en infrajournalier, à un pas de temps de 6 h. Ensuite, nous essaierons d'améliorer la prévision de l'occurrence des précipitations. La dernière section est une recherche d'amélioration des analogies de circulation et d'humidité.

8.2 Fenêtre temporelle glissante

La méthode des analogues est habituellement implémentée avec un pas de temps journalier, la disponibilité de longues archives de données pluviométriques journalières n'ayant pas d'équivalent à une résolution plus fine. Ce pas de temps nous contraint à chercher des situations analogues aux mêmes heures fixes de la journée, sans quoi nous ne saurions pas quelles valeurs de précipitations leur attribuer. Nous pouvons néanmoins nous attendre à ce que l'analogie des situations météorologiques n'ait pas lieu systématiquement à la même heure de la journée, et que de meilleures candidates soient trouvées en autorisant un certain décalage.

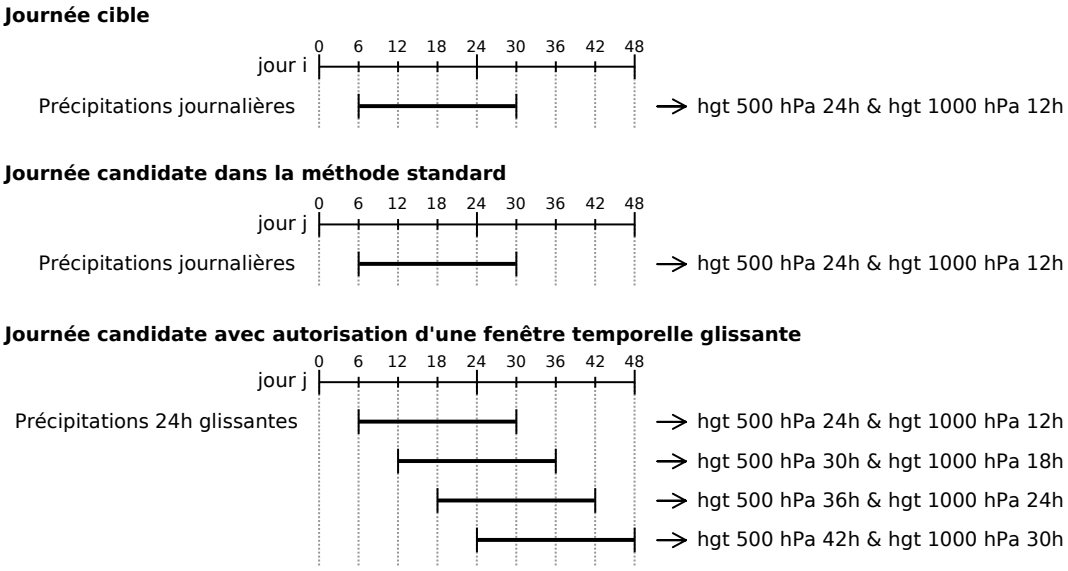


Figure 8.1 – Illustration du principe de la fenêtre temporelle glissante.

De premiers essais (Finet et al., 2008) avaient porté sur la seule recherche de situations synoptiques analogues à une situation cible. Ils avaient montré que pour une situation cible 0-24 h UTC, on pouvait obtenir de meilleures analogies synoptiques en acceptant des situations « glissées » 6-30 h, 12-36 h ou 18-42 h plutôt que de se limiter à 0-24 h. Mais il n'avait pas été possible de constituer les archives pluviométriques correspondantes, c'est-à-dire qui soient décalées, elles-aussi, dans le but de quantifier d'éventuelles améliorations de la prévision de précipitations.

Afin d'évaluer ce gain potentiel, nous avons donc d'abord traité les mesures des stations automatiques de résolution 10 minutes (voir section 4.2.1) ayant une durée respectable (1982-2007), pour élaborer des séries de précipitations représentant des cumuls de 24 h, mais sur une fenêtre temporelle glissante. Cela veut dire que nous constituons une série de 24 h centrée sur chaque tranche de 6 h de la journée, ce dernier pas de temps étant la résolution des prédicteurs synoptiques (voir section 4.3.1).

Une telle série présente certains avantages. Le premier étant que la compétence résultant de ce modèle sera comparable à celle établie précédemment, et que le gain d'une telle modification peut donc être directement évalué. Le second s'inscrit dans la perspective de création de ce genre de séries à partir de données journalières désagrégées (en 6 h) puis recomposées (en 24 h glissées), où les erreurs seront alors réduites par rapport à une série à pas de temps de 6 h.

Nous ne disposons pas de séries temporelles sur des bassins à ces pas de temps infra-journalier, ni de stations automatiques suffisamment proches pour être regroupées. Nous travaillons donc sur les séries issues de 6 stations automatiques, à savoir Ulrichen, Zermatt, Visp, Montana, Sion et Aigle. La station du col du Grand-Saint-Bernard n'est pas intégrée à l'étude en raison de forts doutes émis par Jean-Michel Fallot (Université de Lausanne) sur l'homogénéité de ces données.

Les situations cibles et leurs valeurs de précipitations observées (utilisées pour la validation) ne changent pas, puisque nous effectuons toujours la prévision pour une période fixe de la journée cible (6-30 h), comme précédemment. Ce sont les situations candidates qui, elles, deviennent 4 fois plus nombreuses (Figure 8.1).

La logique voudrait a priori que nous ne retenions qu'une tranche horaire, la meilleure, par date candidate. C'est-à-dire, si pour la date cible du 15 novembre 2006 (0-24 h), la meilleure analogue est le 5 décembre 1988 (12-36 h), alors, très certainement les périodes les plus proches (5 décembre 6-30 h et 18-42 h) sont aussi des analogues, certes inférieures en qualité, mais acceptables. La question se pose alors de les prendre ou de les rejeter. Une exclusion des mêmes dates a été testée de deux manières différentes :

- par exclusion des moins bonnes analogues dans une période de ± 24 h ;
- par exclusion des moins bonnes analogues avec la même date.

Après plusieurs essais, il s'est avéré que n'imposer aucune restriction menait à de meilleures compétences, et ceci de manière significative et récurrente. Dans la suite de cette analyse, aucune de ces contraintes ne sera donc imposée.

8.2.1 Conséquences de la réduction de l'archive sur la compétence

La première étape consiste à évaluer la perte de compétence due à la simple réduction en durée de l'archive pour la méthode standard (donc avec des analogues 0-24 h fixes) lorsque l'on passe de 47 ans (1961-2008) à 25 ans (1982-2007). Les paramètres sont calibrés pour les méthodes R1 et R2 (Tables 8.1 et 8.2) sur l'archive originale et sont conservés pour la suite des calculs.

Table 8.1 – Paramètres retenus pour l'analogie sur le géopotentiel à 500 hPa et 1000 hPa, et compétence de la méthode standard R1 sur l'archive complète.

Station	**Lon min**	**Taille lon**	**Lat min**	**Taille lat**	$\mathbf{N_1}$	**CRPSS (%)**
Ulrichen	0	17.5	42.5	5	40	30.73
Zermatt	0	20	37.5	12.5	35	23.87
Visp	-2.5	22.5	40	7.5	30	25.11
Montana	-2.5	20	40	7.5	40	32.55
Sion	-2.5	20	40	7.5	40	26.23
Aigle	-5	22.5	40	10	50	30.59

Table 8.2 – Paramètres pour l'humidité et compétence de la méthode standard R2 sur l'archive complète. Les paramètres de circulation de la Table 8.1 sont également valables pour cette méthode, exception faite du nombre d'analogues du premier niveau d'analogie dont les nouvelles valeurs sont données dans la 6^{e} colonne du présent tableau (N_1). La 7^{e} colonne (N_2) est ici le nombre d'analogues du deuxième niveau.

Station	**Lon min**	**Taille lon**	**Lat min**	**Taille lat**	$\mathbf{N_1}$	$\mathbf{N_2}$	**CRPSS (%)**
Ulrichen	5	5	45	2.5	60	25	34.31
Zermatt	5	5	45	2.5	55	25	28.28
Vis	5	5	45	2.5	45	25	28.85
Montana	5	2.5	45	2.5	55	30	36.11
Sion	5	5	45	2.5	90	30	31.16
Aigle	7.5	0	45	2.5	100	35	35.82

Table 8.3 – Influence de la réduction de l'archive sur la compétence en CRPS. Les résultats sont présentés pour les deux méthodes R1 et R2, et les différences sont exprimées en valeur absolue, ainsi que relativement au score de la période 1961-2008.

Station	**CRPSS (%) R1**				**CRPSS (%) R2**			
	périodes		**Δ**	**Gain**	**périodes**		**Δ**	**Gain**
	61-08	**82-07**			**61-08**	**82-07**		
Ulrichen	30.73	29.37	-1.36	**-4.42**	34.31	33.24	-1.08	**-3.13**
Zermatt	23.87	22.20	-1.67	**-7.01**	28.28	26.95	-1.32	**-4.68**
Visp	25.11	23.23	-1.89	**-7.51**	28.85	27.77	-1.08	**-3.74**
Montana	32.55	30.79	-1.76	**-5.42**	36.11	34.77	-1.34	**-3.71**
Sion	26.23	24.78	-1.45	**-5.52**	31.16	29.36	-1.80	**-5.77**
Aigle	30.59	30.57	-0.01	**-0.05**	35.82	35.95	0.13	**0.35**

L'impact du changement de la période de l'archive est résumé dans la Table 8.3 pour les méthodes R1 et R2. Comme attendu, une perte de compétence peut être observée pour chaque station, excepté pour celle d'Aigle, qui semble relativement indifférente à ce changement. Cette perte est significative, avec un maximum pour la méthode R1 de -1.89 points à Visp, soit une perte de 7.51 %, et pour la méthode R2 de -1.80 points à Sion, soit -5.77 %. Malgré cette diminution, les scores restent acceptables et constitueront la référence en fenêtre d'analogie fixe (0-24 h).

8.2.2 Influence de la fenêtre glissante sur les critères d'analogie

8.2.2.1 Changements du critère du premier niveau d'analogie

La recherche d'analogues sur les champs de géopotentiel de la méthode R1 a donc à présent 4 fois plus de candidats possibles qu'auparavant, ce qui permet évidemment de trouver de meilleures analogues.

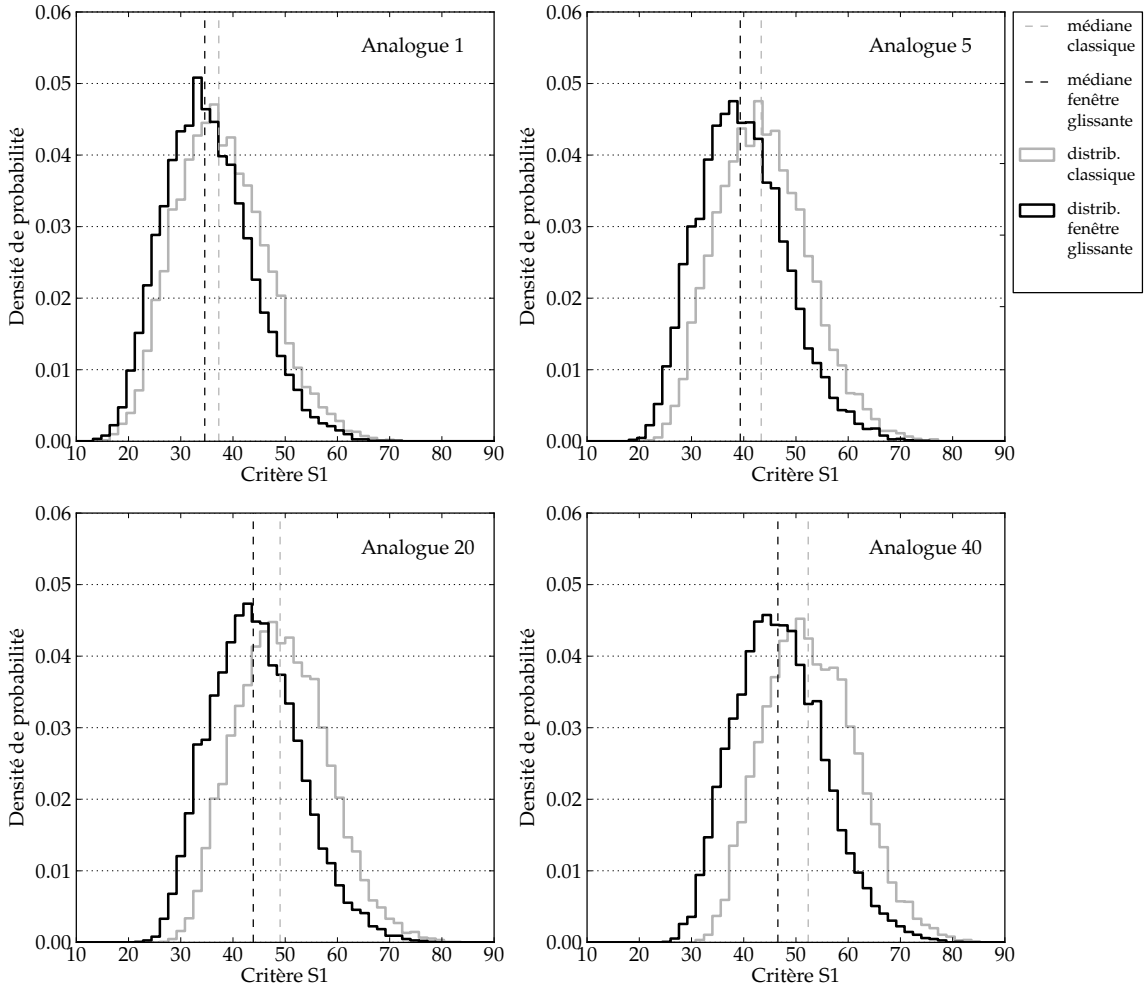


Figure 8.2 – Changements dans les distributions du critère S1 de certaines analogues (la 1re, la 5e, la 20e et la 40e), à la station d'Ulrichen, dû à la fenêtre temporelle glissante.

La Figure 8.2 présente les changements dans les distributions du critère S1 pour la 1re, la 5e, la 20e et la 40e analogue à la station d'Ulrichen, avec une période cible de précipitations correspondant à celle d'origine, soit centrée sur 18 h UTC (de 6 h UTC à 6 h UTC le lendemain). Les formes des distributions de l'approche classique et de la fenêtre temporelle glissante sont semblables, mais les valeurs du critère d'analogie sont réduites, donc meilleures. Une augmentation de la différence entre fenêtre fixe et fenêtre glissante de la première à la dernière analogue est identifiable, ce qui signifie que nous améliorons davantage les dernières analogues. Ce dernier effet est dû à l'accumulation des améliorations apportées par les nouvelles analogues dans la sélection.

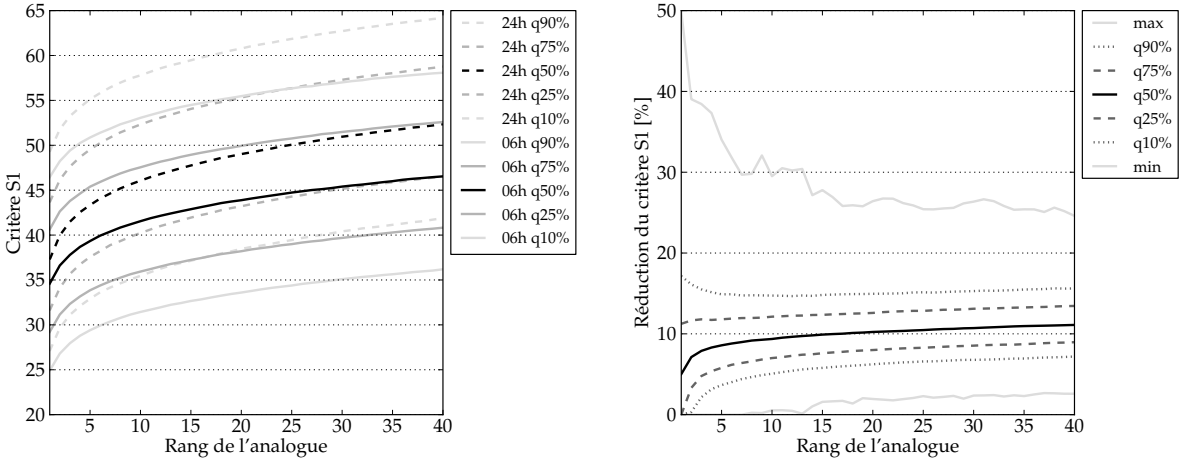


Figure 8.3 – Synthèse du gain sur le critère S1 à la station d'Ulrichen, pour les différentes analogues, dû à la fenêtre temporelle glissante. (gauche) Quantiles de la distribution des valeurs de S1 avec (06h) et sans (24h) la fenêtre glissante. (droite) Quantiles des gains sur le critère S1 par l'utilisation de la fenêtre glissante.

Ces gains sont synthétisés dans la Figure 8.3, qui illustre les valeurs, pour S1, des quantiles pour toutes les analogues avec et sans la fenêtre glissante, ainsi que la distribution des gains réalisés pour l'ensemble des dates. Cela confirme que tous les quantiles semblent réduits de manière semblable (les distributions de S1 conservent leur forme) et que ce gain augmente constamment de la première à la dernière analogue (Figure 8.3 gauche).

Les statistiques des gains pour chaque date (Figure 8.3 droite) présentent une médiane de la réduction qui démarre approximativement à 5 % pour les premières analogues et termine à plus de 10 % pour les dernières. Cette tendance à l'augmentation du gain sur le critère S1 avec le rang de l'analogue peut être expliquée par le fait que chaque gain effectué sur les premières analogues se répercute sur les suivantes. Inversement, le gain maximal décroît de 50 % à 25 %. Le gain minimal part de 0 pour atteindre une valeur située entre 2 % et 3 %, signifiant que tous les critères ont été améliorés. Les dates sélectionnées précédemment étant toujours disponibles, le critère S1 ne peut en effet que s'améliorer ou rester identique, mais en aucun cas se détériorer. Toutes les autres stations présentent une amélioration du critère S1 très proche, tant pour la forme des distributions que pour leur amplitude.

8.2.2.2 Influence du dynamisme de la situation atmosphérique

Nous pouvons supposer que des circulations peu dynamiques, telles que les fréquentes situations anticycloniques, ne seront pas radicalement améliorées par l'approche de la fenêtre temporelle glissante. À l'opposé, les situations dynamiques, telles que le passage d'une perturbation, ont une évolution temporelle bien marquée. En effet, la position des centres actifs et des courants évoluent de manière significative durant une journée. Nous pouvons donc nous attendre à améliorer ces journées-ci en autorisant la fenêtre d'analogie à glisser pour mieux correspondre à la situation cible.

Nous allons chercher à vérifier cette assertion, mais nous ne pouvons pas aisément quantifier le « dynamisme » de la circulation atmosphérique d'une journée. Nous faisons donc l'hypothèse que plus un jour est pluvieux, plus la situation est dynamique. Les résultats de cette approche sont synthétisés dans la Figure 8.4 par les médianes de la réduction du critère S1 pour les jours avec une pluviométrie comprise entre deux seuils. Le nombre d'analogues étant réduit, les courbes ne sont pas aussi lisses que lors des analyses précédentes. Il en ressort néanmoins que le gain tend à augmenter pour les jours à plus forte pluviométrie. Cette observation est valable pour toutes nos stations et cela confirme notre intuition.

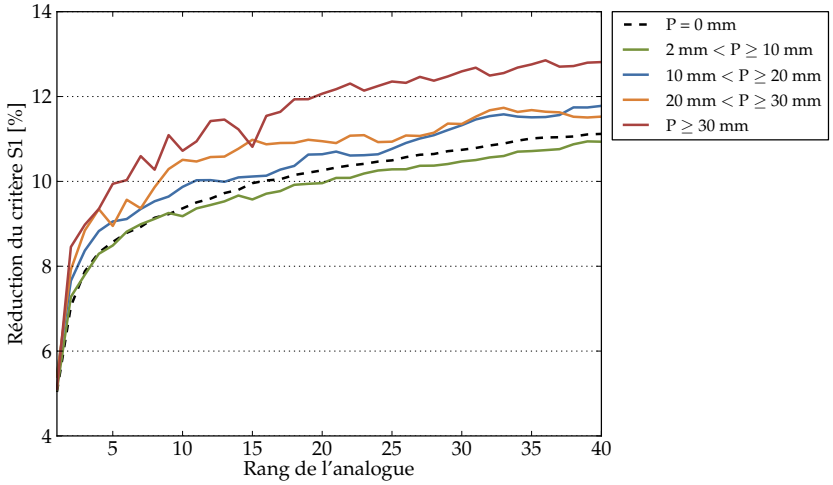


Figure 8.4 – Distribution des gains sur la médiane du critère S1, dus à la fenêtre temporelle glissante, en fonction de seuils de précipitations à la station d'Ulrichen.

8.2.2.3 Effet saisonnier

La dynamique atmosphérique varie fortement d'une saison à l'autre, ce qui rejaillit sur les performances de la méthode des analogues, généralement moindres entre juin et août (Bliefernicht, 2010). Il fait donc sens de vérifier l'effet de l'introduction de la fenêtre temporelle glissante de manière distincte par saison.

Un effet saisonnier peut être observé autant sur les distributions des critères que sur leurs gains (Figure 8.5). Les gains sont plus importants pour l'hiver que pour l'été. Une hypothèse est que les effets diurnes des mois d'été ont une influence notable sur la circulation atmosphérique, du moins dans les basses couches. Cet effet est donc calé sur le cycle journalier et nous trouvons déjà de bonnes analogues aux mêmes heures.

Cette hypothèse a été vérifiée et est confirmée par la Figure 8.6 qui démontre que le choix des différentes tranches horaires pour les mois d'hiver est relativement équilibré, ce qui change la sélection de 75 % des dates analogues par rapport au 0-24 h initial, augmentant ainsi l'amélioration du critère S1.

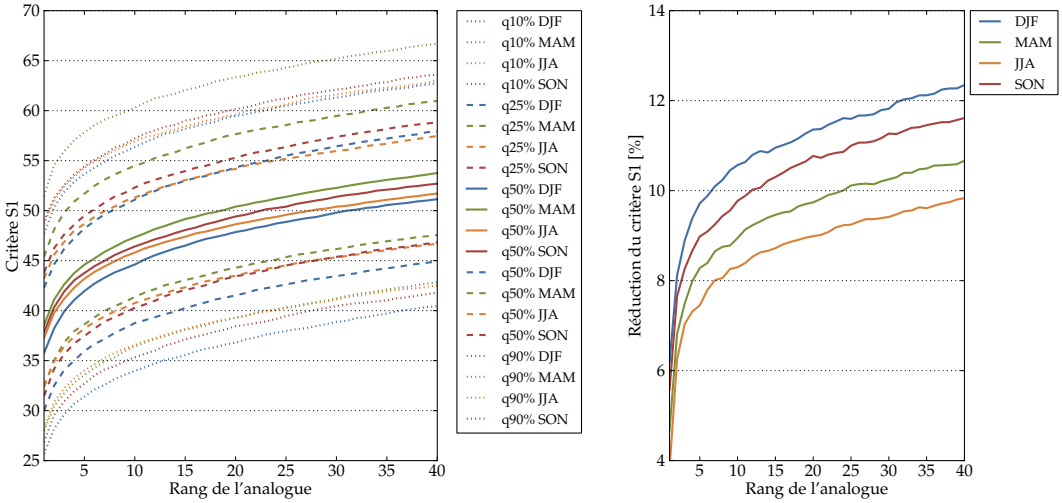


Figure 8.5 – Effet saisonnier sur le critère S1 original pour la station d'Ulrichen et son gain dû à la fenêtre temporelle glissante. DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne. (gauche) Quantiles de la distribution des valeurs de S1 pour les différentes saisons avec la fenêtre temporelle originale de 24 h. (droite) Médianes des gains sur le critère S1 par l'utilisation de la fenêtre glissante pour les différentes saisons.

Au contraire, les mois d'été ont une préférence pour la tranche horaire initiale (hgt 500 24h & hgt 1000 12h), dû aux effets diurnes plus marqués, ce qui diminue le potentiel d'amélioration des critères. Les autres saisons se situent entre ces deux extrêmes, de manière cohérente avec leurs gains observés (Figure 8.5). Cet effet saisonnier a pu être observé pour chaque station de manière très similaire et généralement encore plus marquée que pour Ulrichen.

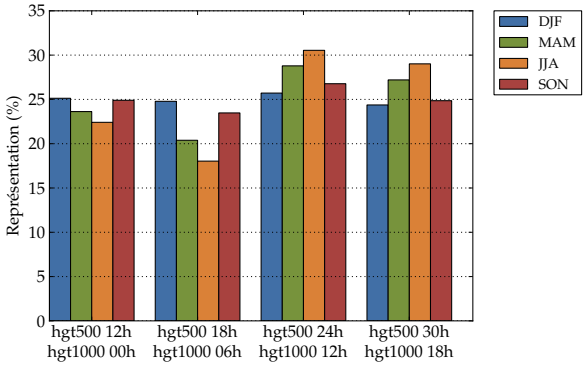


Figure 8.6 – Répartition des tranches horaires dans les dates analogues en fonction de la saison pour la station d'Ulrichen.

8.2.2.4 Changements du critère du second niveau d'analogie

Lorsque nous considérons le second niveau d'analogie de la méthode R2, les situations candidates retenues ne sont pas plus nombreuses, mais les dates peuvent avoir changé. Ainsi, une réduction, mais également une augmentation du critère RMSE sont possibles. La Figure 8.7, pour la station d'Ulrichen, présente une très légère amélioration du critère de manière globale. Contrairement au critère S1, les quantiles des gains du RMSE sont répartis de manière relativement symétrique autour de zéro, ce qui révèle l'occurrence de pertes. À nouveau, les résultats des autres stations sont proches, avec un gain médian à zéro pour les premières analogues et croissant par la suite, mais jamais négatif.

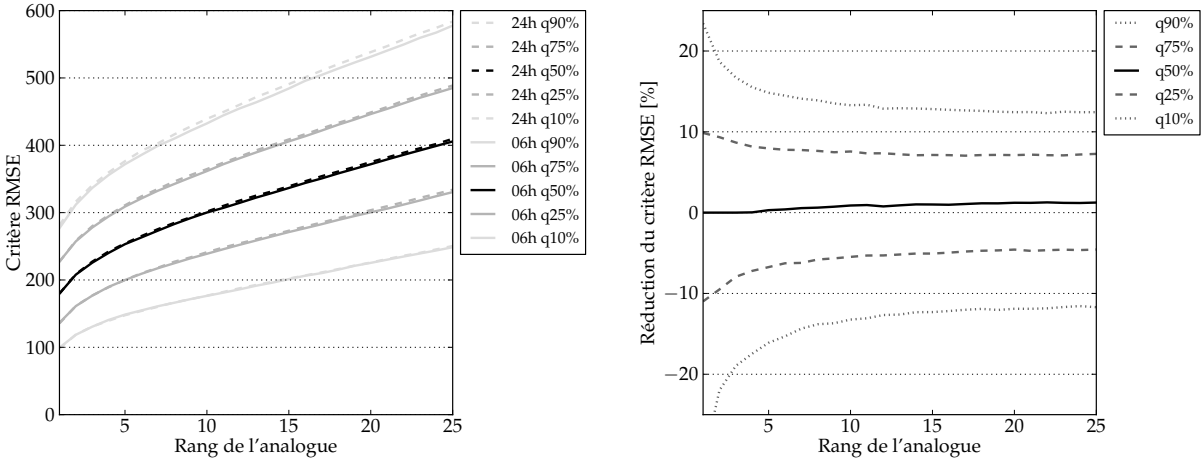


Figure 8.7 – Synthèse des changements sur le critère RMSE à la station d'Ulrichen, pour les différentes analogues du second niveau d'analogie, dû à la fenêtre temporelle glissante. (gauche) Quantiles de la distribution des valeurs de RMSE avec (06h) et sans (24h) la fenêtre glissante. (droite) Quantiles des gains sur le critère RMSE par l'utilisation de la fenêtre glissante.

8.2.3 Conséquences sur les scores de performance

Nous avons pu observer précédemment un gain systématique sur le critère d'analogie S1. Il nous reste donc à évaluer la conséquence de l'introduction de la fenêtre temporelle glissante sur les scores de performance de la nouvelle distribution de pluie prévue. Nous utilisons donc des séries temporelles de précipitations créées à cet effet. Celles-ci ont été établies par une moyenne mobile sur une durée de 24 h avec un pas de temps de 6 h. En conservant toujours les mêmes paramètres que précédemment (même domaine et même nombre d'analogues), ces valeurs sont attribuées à chaque date analogue. La série des dates cibles reste inchangée, puisque nous conservons la tranche horaire d'origine (6 h UTC - 6 h UTC le lendemain).

Les CRPSS étant calculés sur la base de la même climatologie que précédemment, ils peuvent être comparés directement. Les gains en performance ainsi obtenus (Table 8.4) s'étalent de 2.31 % à 9.31 % pour le premier niveau d'analogie. Lorsque nous considérons le second niveau d'analogie, les gains sont globalement un peu supérieurs. Nous n'avons pas trouvé de relation entre l'amélioration du score et les gains du critère S1, ni avec la saison.

Table 8.4 – Gain en compétence du CRPS sur les deux niveaux d'analogie dû à l'introduction de la fenêtre temporelle glissante.

Station	CRPSS (%) R1				CRPSS (%) R2			
	fenêtre temp		Δ	Gain	fenêtre temp		Δ	Gain
	std	gliss.			std	gliss.		
Ulrichen	29.37	31.12	1.74	**5.93**	33.24	35.44	2.20	**6.63**
Zermatt	22.20	24.34	2.14	**9.64**	26.95	28.92	1.97	**7.31**
Visp	23.23	24.39	1.16	**5.00**	27.77	29.42	1.64	**5.92**
Montana	30.79	31.59	0.80	**2.60**	34.77	36.30	1.53	**4.39**
Sion	24.78	25.35	0.57	**2.31**	29.36	31.07	1.71	**5.82**
Aigle	30.57	31.78	1.21	**3.95**	35.95	38.11	2.16	**6.00**

8.2.3.1 Amélioration de différentes gammes de précipitations

Nous avions observé dans la section 8.2.2.2 une amélioration du critère S1 pour les situations plus dynamiques, soit avec des valeurs de précipitations supérieures. Nous allons à présent mettre en relation les gains en CRPSS et les cumuls précipités.

La Figure 8.8 synthétise ces gains pour la station d'Ulrichen, les autres stations se comportant de la même manière. Un étalement de la distribution avec l'augmentation du seuil de précipitations peut être observé. Cet effet s'explique en premier lieu par le fait que la valeur du CRPS est dépendante des quantités de précipitations des journées cibles.

Un résultat plus intéressant est la tendance positive croissante de toute la distribution avec l'augmentation du seuil des précipitations. À partir du seuil de 10 mm, la moyenne et les quantiles du gain en CRPSS tendent à augmenter de manière significative. Il semble donc que nous améliorons les scores de performance des événements davantage pluvieux, en plus de leurs critères d'analogie. Le fait que les jours non pluvieux et les petits cumuls ne sont pas améliorés semble expliquer le gain peu probant lorsque nous considérons l'ensemble de la période.

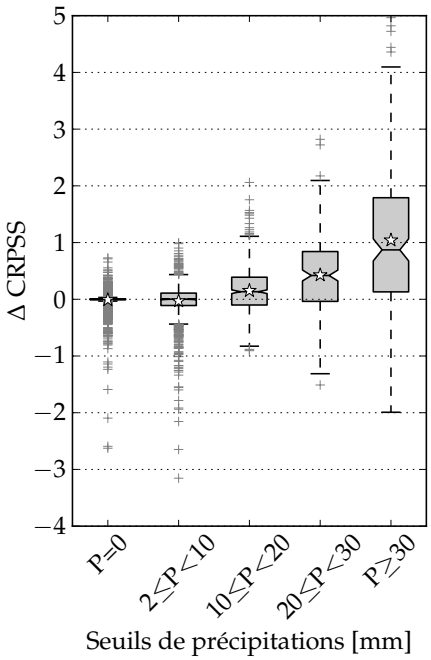


Figure 8.8 – Distribution des différences sur le score CRPSS dues à l'introduction de la fenêtre temporelle glissante en fonction de seuils de précipitations à la station d'Ulrichen. Les étoiles sont les moyennes des distributions.

8.2.3.2 Recalibration des paramètres

L'évaluation précédente du gain en score de performance a été établie avec les paramètres originaux. Nous pouvons néanmoins supposer que l'introduction de la fenêtre temporelle glissante modifie peut-être le choix optimal de la position et de la taille de la fenêtre spatiale idéale et change le nombre d'analogues comparativement à la méthode standard. La calibration a donc été effectuée à nouveau.

Table 8.5 – Paramètres pour les champs de géopotentiel à 500 hPa et 1000 hPa et compétence de la méthode R1 après calibration pour la fenêtre temporelle glissante.

Station	**Lon min**	**Taille lon**	**Lat min**	**Taille lat**	$\mathbf{N_1}$	**CRPSS (%)**	**Δ**	**Gain (%)**
Ulrichen	0	17.5	42.5	7.5	50	31.58	2.20	**7.50**
Zermatt	0	17.5	40	10	55	24.71	2.51	**11.32**
Visp	-2.5	22.5	40	10	55	25.08	1.85	**7.96**
Montana	-2.5	17.5	42.5	5	55	32.22	1.43	**4.65**
Sion	-2.5	17.5	37.5	12.5	55	26.07	1.29	**5.19**
Aigle	-2.5	17.5	40	10	75	32.21	1.64	**5.36**

Table 8.6 – Paramètres pour l'humidité et compétence de la méthode R2 après calibration pour la fenêtre temporelle glissante. Le nombre d'analogues du premier niveau d'analogie est donné dans la 6e colonne (N_1) et celui du second niveau dans la 7e colonne (N_2).

Station	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_1	N_2	CRPSS (%)	Δ	Gain (%)
Ulrichen	5	5	45	2.5	110	35	35.72	2.48	**7.46**
Zermatt	7.5	0	45	2.5	80	30	29.63	2.68	**9.94**
Visp	7.5	0	45	2.5	135	35	30.29	2.52	**9.07**
Montana	5	2.5	45	0	110	40	37.15	2.38	**6.85**
Sion	5	5	45	2.5	140	50	31.68	2.32	**7.91**
Aigle	5	2.5	45	0	135	45	38.50	2.55	**7.10**

Des changements dans les paramètres optimaux des méthodes R1 (Table 8.5) et R2 (Table 8.6) peuvent être observés. Parmi ceux-ci, la dimension ouest-est des fenêtres spatiales du premier niveau tend à diminuer, les autres paramètres variant de diverses manières. Une constance est l'augmentation du nombre d'analogues après introduction de la fenêtre glissante, qui croît de 25 % à 83 % pour la méthode R1, et de 20 % à 67 % pour la méthode R2. Le nombre d'analogues du premier niveau de la méthode R2 atteint même le triple de sa valeur précédente pour la station de Visp. Le fait de pouvoir sélectionner des analogues de la même journée explique que nous sommes conduits à augmenter le nombre optimal d'analogues. La Figure 8.3 nous a révélé que l'amélioration du critère d'analogie est croissante avec le rang des analogues. Nous accroissons donc le nombre de bonnes analogues de manière globale, tout en conservant certaines analogues dont le rang a augmenté.

Cette augmentation du nombre d'analogues a un léger effet sur les performances des différentes classes de précipitations. L'analyse par classes (section 8.2.3.1) a été effectuée à nouveau sur les analogues après recalibration. Les résultats sont globalement très semblables, mais nous pouvons distinguer une légère augmentation des performances des petites pluies au détriment des précipitations plus importantes. L'accroissement du nombre d'analogues est vraisemblablement responsable de cette différence dans la répartition des gains.

Les valeurs des scores des méthodes R1 (Table 8.5) et R2 (Table 8.6) ont significativement augmenté après la recalibration. Avec l'introduction de la fenêtre temporelle glissante, nous regagnons en performance ce que nous avions alors perdu par la réduction de la longueur de l'archive. Dans notre cas, cette amélioration correspond approximativement à un doublement de la taille de l'archive.

8.2.3.3 Décomposition du score en finesse et justesse

Le score CRPS pouvant être décomposé en deux composantes, à savoir la finesse et la justesse, nous allons analyser l'effet de la fenêtre temporelle glissante sur chacune d'elles. Les résultats de la Table 8.7 étant exprimés par rapport au CRPS total, un changement de la finesse est donc quantifié par rapport à la somme de la finesse et de la justesse. En effet, ces deux composantes n'ont pas les mêmes gammes de valeurs, la justesse étant dans notre cas presque deux fois supérieure à la finesse. Puisque nous travaillons ici sur le CRPS et non le CRPSS, une amélioration de la prévision se traduit par une baisse du score.

Table 8.7 – Changements en finesse (Fin.) et en justesse (Just.) relatifs au CRPS total, dus à l'introduction de la fenêtre temporelle glissante. Les changements sont présentés pour les méthodes R1 et R2, et pour les résultats sans et avec recalibration des paramètres.

	Fenêtre glissante sans recalibration				**Fenêtre glissante avec recalibration**			
	R1		**R2**		**R1**		**R2**	
	Fin. (%)	**Just.** (%)	**Fin.** (%)	**Just.** (%)	**Fin.** (%)	**Just.** (%)	**Fin.** (%)	**Just.** (%)
Ulrichen	2.82	-5.29	1.00	-4.30	1.44	-4.56	-0.37	-3.34
Zermatt	2.26	-5.01	0.88	-3.58	0.80	-4.03	0.75	-4.42
Visp	3.66	-5.18	2.67	-4.94	1.53	-3.94	1.47	-4.96
Montana	1.62	-2.78	0.57	-2.91	-0.27	-1.80	0.06	-3.71
Sion	2.02	-2.78	0.33	-2.75	0.95	-2.66	-0.10	-3.19
Aigle	0.52	-2.26	-1.20	-2.17	-0.35	-2.01	-2.08	-1.90

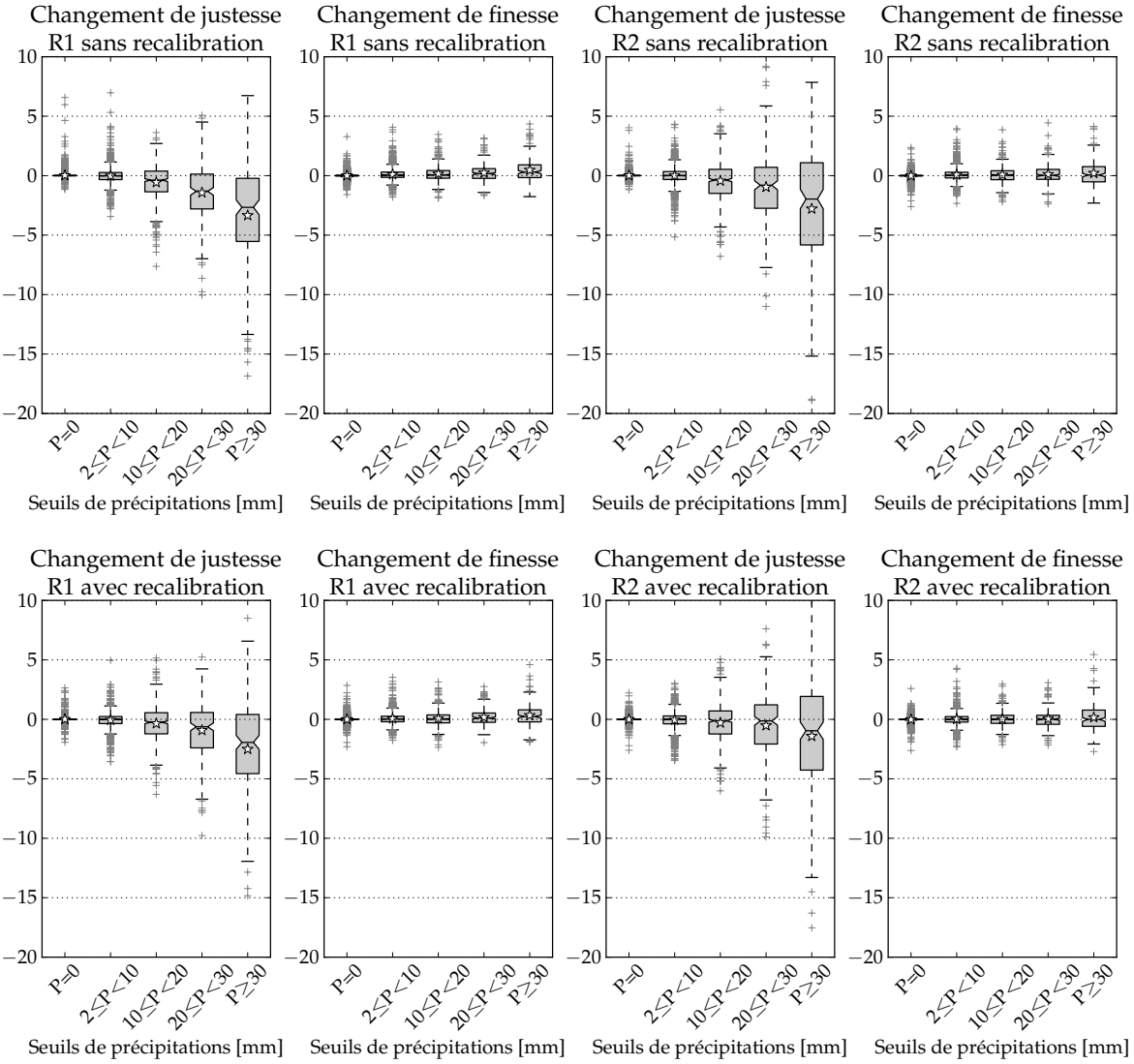


Figure 8.9 – Influence de la fenêtre temporelle glissante sur les composantes du CRPS (justesse et finesse), pour les méthodes R1 et R2. Les résultats sont présentés pour (haut) les paramètres originaux et (bas) recalibrés. Une amélioration de la prévision se traduit par une baisse du score.

Il apparaît que la finesse est moins bonne avec la fenêtre temporelle glissante, au profit de la justesse, et ceci pour les mêmes paramètres que la méthode standard, alors qu'elle décroît avec l'augmentation du nombre d'analogues après recalibration. La Figure 8.9, illustrant les changements en finesse et justesse pour différentes gammes de précipitations à la station d'Ulrichen, présente cette même tendance. Nous y voyons également que le plus grand gain en justesse concerne les gammes de précipitations les plus importantes, que ce soit pour R1 ou R2. La fenêtre temporelle glissante ne permet donc pas d'améliorer la finesse, mais l'amélioration de la justesse est significative, et ceci notamment pour les jours de fortes précipitations. Cela signifie donc que le quantile 50 % de la distribution prévue se rapproche des cumuls observés, mais que la distribution n'est pas plus condensée que précédemment.

8.2.4 Tentatives d'application à l'archive complète

L'amélioration apportée par la fenêtre temporelle glissante est intéressante, il serait donc profitable de pouvoir l'appliquer à notre archive complète. Malheureusement, il n'existe pas de données horaires avant 1982 nous permettant de disposer d'une archive compatible et correcte. Nous allons donc chercher à répartir les cumuls précipités sur la journée par une simple moyenne mobile ou en utilisant la chronologie d'un prédicteur lié à l'humidité en tant que proxy.

8.2.4.1 Série par moyenne mobile

La moyenne mobile est certainement la répartition la plus simple que nous pouvons effectuer. Elle consiste à distribuer les précipitations journalières concernées de manière proportionnelle dans les différentes tranches de la série 24 heures glissée (Figure 8.10). Les résultats présentés dans la Table 8.8 montrent clairement qu'une telle archive ne présente aucun intérêt, puisque les performances sont même inférieures à la méthode classique sans fenêtre temporelle glissante (Table 8.4). Nous perdons le gain d'une sélection plus fine des situations analogues du fait d'une archive pluviométrique de qualité médiocre.

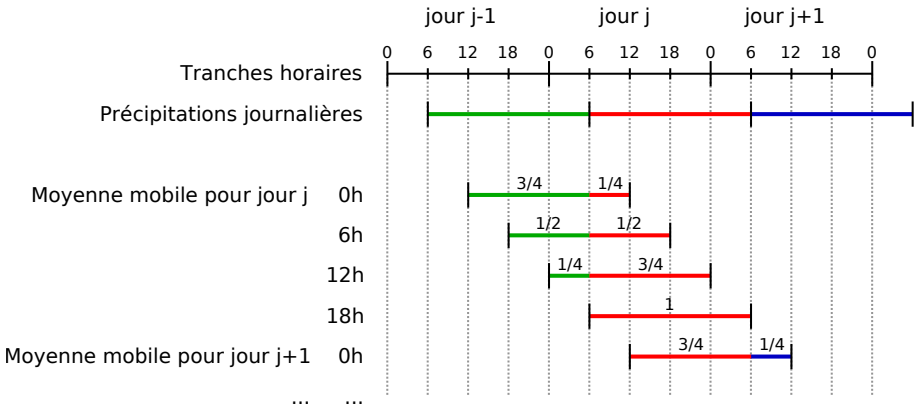


Figure 8.10 – Illustration de la création de séries de cumuls sur 24h glissés par moyenne mobile.

Table 8.8 – Performances de la fenêtre temporelle glissante avec une archive pluviométrique générée par moyenne mobile. Les résultats sont présentés pour les paramètres initiaux, ainsi que ceux issus de la recalibration de la section 8.2.3.2

Station	Fenêtre glissante		Avec recalibration	
	R1	R2	R1	R2
Ulrichen	29.13 %	33.15 %	29.61 %	33.45 %
Zermatt	22.17 %	26.72 %	22.80 %	27.43 %
Visp	22.32 %	27.01 %	22.89 %	28.04 %
Montana	29.41 %	33.83 %	30.24 %	34.55 %
Sion	22.98 %	28.57 %	23.41 %	29.15 %
Aigle	29.07 %	34.66 %	29.46 %	35.09 %

8.2.4.2 Utilisation d'un proxy pour reconstituer la chronologie

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, une série de précipitations reconstituée de manière simpliste nous fait perdre tout le gain de performance de la fenêtre temporelle glissante et ne présente alors aucun intérêt. Nous devons donc trouver un moyen de nous approcher de la chronologie réelle, pour une période (1961-1981) où nous ne disposons d'aucune série de précipitations continue avec une résolution plus fine. Il nous faut donc extraire de l'information de la répartition intrajournalière des pluies à partir d'une autre source de données. Un modèle de prévision météorologique régional serait en mesure d'apporter de l'information permettant de générer des séries de précipitations plus pertinentes. Malheureusement, de tels résultats ne sont pas disponibles sous forme de longues archives. Une alternative aux modèles régionaux est donnée par les réanalyses. Bien que celles-ci ont une résolution plus faible et n'intègrent que grossièrement les processus locaux, nous allons évaluer si elles rendent possible la transposition de la fenêtre temporelle glissante sur toute l'archive.

La première étape consiste à déterminer quelle variable, de l'eau précipitable ou de l'humidité relative, est la plus corrélée avec la série de précipitations sur la période 1982-2007, et en quel point. Nous considérons les niveaux 1000 hPa, 925 hPa et 850 hPa pour l'humidité relative, et les points les plus proches du bassin (5° - 7.5° de longitude et 45° - 47.5° de latitude). Finalement, les points de grille des réanalyses étant relativement éloignés de nos stations, il est pertinent de rechercher la présence probable d'un décalage temporel entre les séries.

Le point le plus pertinent ne sera probablement pas le même pour toutes les stations, puisque nous pouvons nous attendre à trouver l'optimum dans la direction des apports d'humidité principaux pour la station. Cette recherche doit donc être effectuée pour chacune de nos stations. Nous illustrons le principe avec la station de Zermatt.

Afin de déterminer quelle variable météorologique considérer, en quel point, et avec quel décalage horaire, chacune des séries générées doit être comparée à la série réelle. La Table 8.9 présente les coefficients de détermination sur les valeurs non nulles entre les nouvelles séries

Table 8.9 – Valeur du coefficient de détermination entre les séries reconstituées à l'aide d'un proxy et la série réelle à pas de temps de 6 h. Les proxys évalués sont l'eau précipitable et l'humidité relative à différents niveaux atmosphériques, en 4 points proches du bassin. Le coefficient de détermination le plus élevé est indiqué en gras.

	Position		**Décalage temporel**				
	Lon	**Lat**	**-12h**	**-6h**	**0h**	**+6h**	**+12h**
RHum 1000 hPa	5.0	47.5	0.668	0.669	0.684	0.683	0.670
	5.0	45.0	0.669	0.669	0.683	0.681	0.669
	7.5	47.5	0.662	0.673	0.691	0.682	0.673
	7.5	45.0	0.666	0.671	0.688	0.681	0.668
RHum 925 hPa	5.0	47.5	0.672	0.673	0.684	0.684	0.675
	5.0	45.0	0.674	0.674	0.683	0.682	0.672
	7.5	47.5	0.662	0.673	0.691	0.682	0.673
	7.5	45.0	0.666	0.671	0.689	0.681	0.668
RHum 850 hPa	5.0	47.5	0.675	0.675	0.679	0.678	0.671
	5.0	45.0	0.681	0.690	0.691	0.677	0.664
	7.5	47.5	0.665	0.680	0.693	0.683	0.675
	7.5	45.0	0.675	0.694	0.706	0.681	0.659
Eau precipitable	5.0	47.5	0.688	0.687	0.667	0.655	0.652
	5.0	45.0	0.697	0.699	0.669	0.644	0.644
	7.5	47.5	0.686	0.708	0.689	0.655	0.648
	7.5	45.0	0.696	**0.721**	0.696	0.643	0.636

Table 8.10 – Valeurs des scores CRPSS pour Zermatt avec la série glissée reconstituée à l'aide d'un proxy météorologique. Les résultats sont présentés pour les deux périodes 1982-2007 et 1961-2008, pour les paramètres sans et avec recalibration, ainsi que pour les deux méthodes R1 et R2.

Période	**Sans recalibration**		**Avec recalibration**	
	R1	**R2**	**R1**	**R2**
1982-2007	22.57 %	27.11 %	23.14 %	27.71 %
1961-2008	23.81 %	28.42 %	24.38 %	28.86 %

reconstituées à l'aide du proxy et la série réelle de la station de Zermatt à pas de temps de 6 h sur la période 1982-2007. Le meilleur proxy est l'eau précipitable à 45° de latitude et 7.5° de longitude, avec un décalage temporel de -6 h ; cela signifie que nous devons retarder de 6 h la chronologie du prédicteur afin de l'appliquer aux précipitations. Le coefficient de détermination de 0.721 est supérieur à celui de la série par moyenne mobile (0.698), ce qui nous confirme que nous avons ajouté un peu d'information à la série de précipitations, sans toutefois savoir si celle-ci est suffisante.

La Table 8.10 présente les scores CRPSS obtenus par la série reconstituée à l'aide du proxy de l'eau précipitable au point optimal (Table 8.9). Nous observons une légère amélioration par rapport aux résultats obtenus avec la série de moyennes mobiles (Table 8.8), mais celle-ci est toujours relativement petite, et la plus grande partie du gain de la fenêtre temporelle glissante est perdue.

Ces tentatives de transposition de la fenêtre temporelle glissante sur l'archive totale mettent en évidence l'importance de la temporalité réelle des précipitations. La fenêtre glissante est un gain, à condition que les séries de précipitations soient proches de l'observé. Sans information sur la chronologie des précipitations, il n'est pas pertinent d'appliquer cette modification à la méthode. Nous pouvons espérer que, dans le futur, des reprévisions par des modèles régionaux seront en mesure de nous apporter une chronologie des précipitations s'approchant de la réalité.

8.2.5 Conclusions sur la fenêtre temporelle glissante

Comme Finet et al. (2008) l'avaient déjà été montré précédemment, nous gagnons en analogie synoptique en introduisant la fenêtre temporelle glissante. Pour ce qui est de la prévision des précipitations, nous regagnons en fenêtre glissante sur période réduite ce que nous avions perdu par rapport à la fenêtre fixe en raison de la réduction de l'archive. Dans notre cas, ce gain correspond au doublement de la taille de l'archive.

Nous avons également démontré l'importance de la qualité de l'archive pluviométrique : nous gagnons en prévision des précipitations pour autant que la chronologie des pluies y soit proche de la réalité. Pour une archive reconstituée de manière grossière, les gains en performances de la fenêtre glissante ne se répercutent pas sur la prévision des pluies, bien que l'analogie synoptique soit meilleure. Il conviendra donc de maintenir l'objectif qui consiste à reconstruire des séries de précipitations passées de manière la plus réaliste possible, par exemple à l'aide d'un modèle météorologique régional. Lorsque de telles archives pluviométriques seront disponibles, l'ajout d'une fenêtre temporelle glissante en prévision par analogie montrera tout son intérêt.

8.3 Prévisions infrajournalières

Dans la section précédente, nous avons montré l'intérêt d'une fenêtre temporelle glissante en utilisant des séries de cumuls de précipitations sur 24 h glissés. Nous allons ici évaluer la méthode des analogues sur des cumuls de 6 h, et donc par une prévision cette fois-ci entièrement infrajournalière. Ainsi, nous produisons 4 prévisions par jour cible. L'intérêt de cette modification est de fournir une répartition des précipitations prévues à l'intérieur d'une journée cible. Comme pour la fenêtre temporelle glissante, nous devons travailler sur la période de disponibilité des données horaires, c'est-à-dire de 1982 à 2007. Toutefois, nous bénéficions également de plus de candidats pour l'analogie synoptique, puisque nous ne sommes pas limités à une fenêtre temporelle fixe, comme c'est le cas dans la méthode standard avec des séries journalières.

Les méthodes de référence R1 et R2 ont été calibrées avec un pas de temps de 6 h pour les 7 stations pour lesquelles nous possédons des données infrajournalières. Par rapport aux paramètres optimaux sur la série journalière, les fenêtres spatiales de l'analogie de circulation ont tendance à être réduites sur leur face ouest en moyenne de 2.5° (détails non présentés).

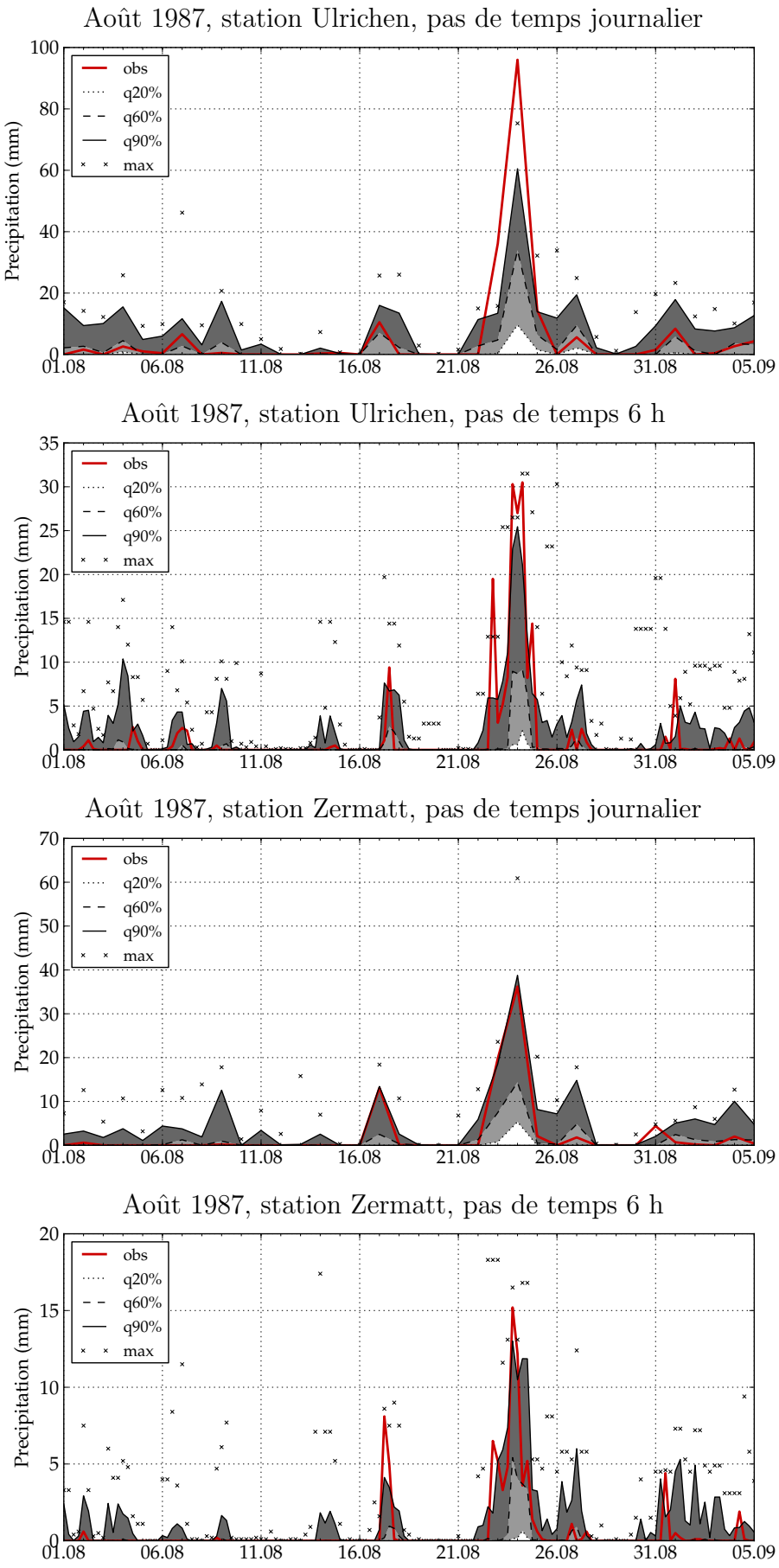


Figure 8.11 – Graphique de la prévision journalière et à pas de temps de 6 h avec la méthode de référence R2 pour l'événement d'août 1987 aux stations de Ulrichen et Zermatt.

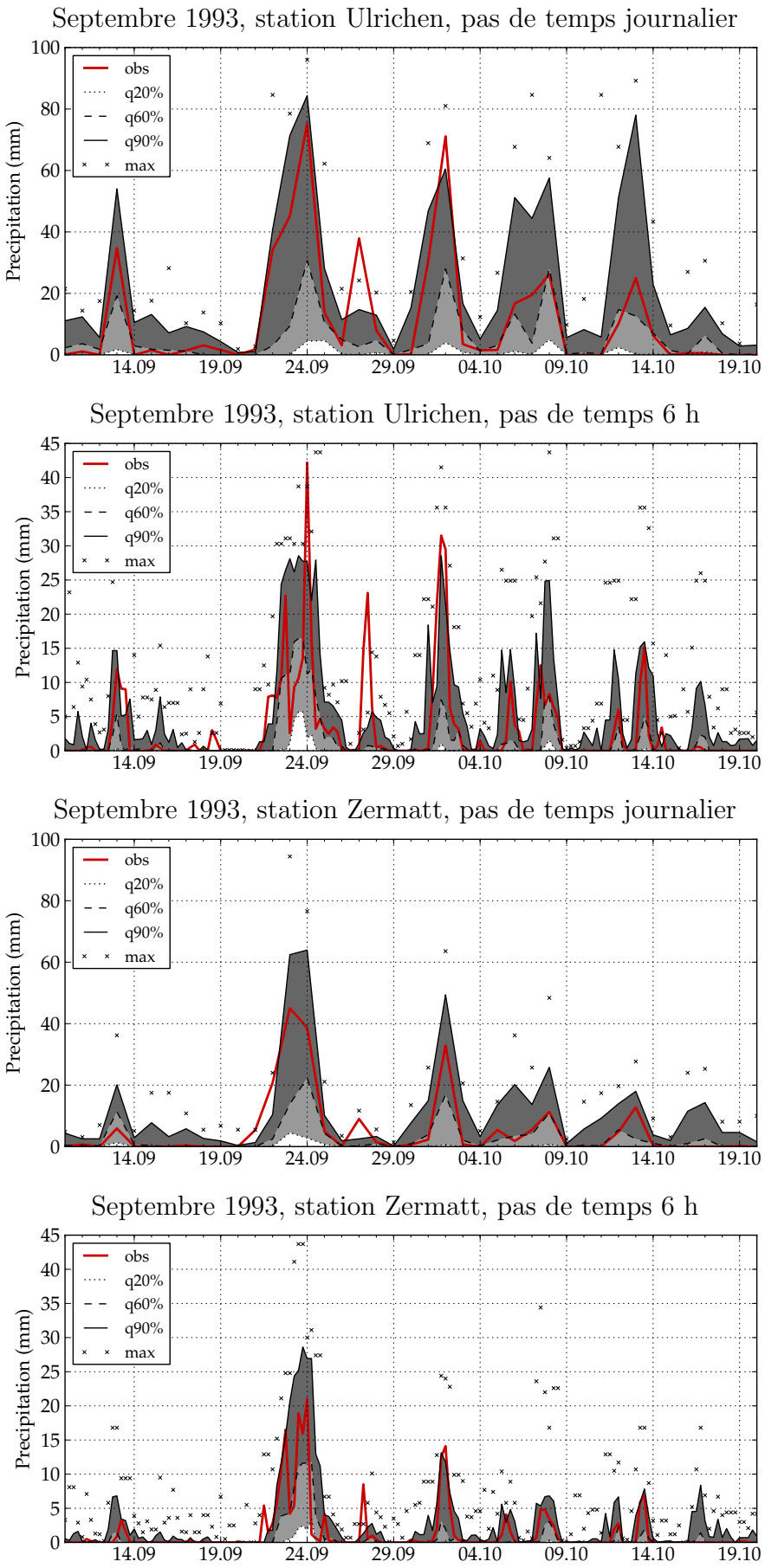


Figure 8.12 – Graphique de la prévision journalière et à pas de temps de 6 h avec la méthode de référence R2 pour l'événement de septembre 1993 aux stations de Ulrichen et Zermatt.

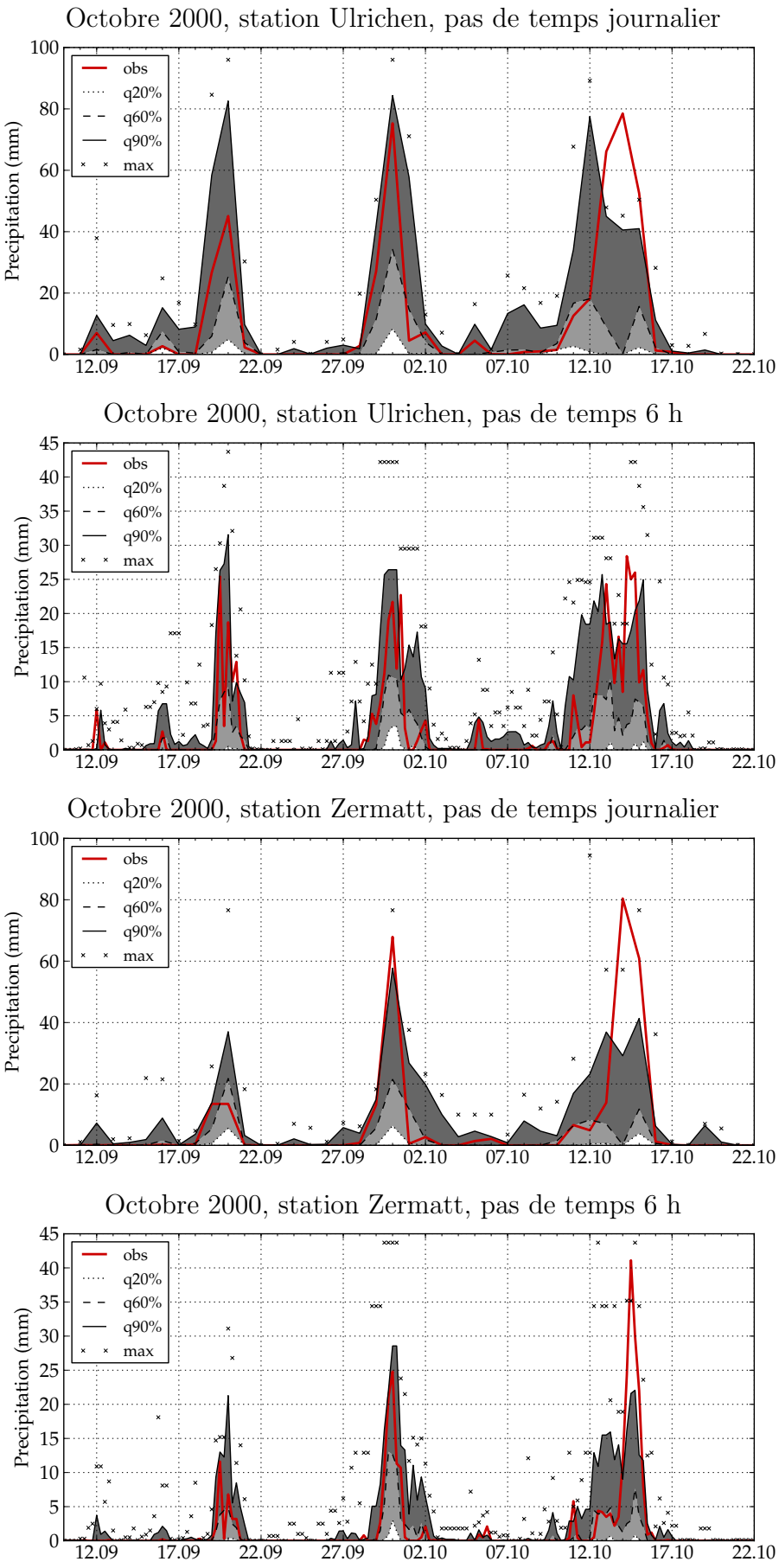


Figure 8.13 – Graphique de la prévision journalière et à pas de temps de 6 h avec la méthode de référence R2 pour l'événement d'octobre 2000 aux stations de Ulrichen et Zermatt.

Table 8.11 – Scores CRPSS des méthodes R1 et R2 à un pas de temps journalier et à un pas de temps de 6 h, avec une archive sur la période 1982 - 2007.

	méthode R1				**méthode R2**			
	Δt **= 24 h**		Δt **= 6 h**		Δt **= 24 h**		Δt **= 6 h**	
	calib. (%)	**valid.** (%)	**calib.** (%)	**valid.** (%)	**calib.** (%)	**valid.** (%)	**calib.** (%)	**valid.** (%)
Ulrichen	28.55	29.31	21.91	22.19	32.48	34.13	25.71	25.92
Zermatt	22.00	24.01	16.24	18.81	26.07	28.39	20.26	22.69
Visp	22.24	23.28	16.76	16.69	27.07	27.14	21.73	21.62
Montana	29.71	34.66	23.06	27.46	33.95	38.73	27.24	31.97
Sion	24.34	31.57	17.47	25.39	29.04	36.78	22.57	31.03
Gd St-Bernard	33.49	40.18	26.65	31.40	37.29	43.64	30.49	35.02
Aigle	30.37	31.35	21.47	20.44	36.01	36.87	26.84	26.92

Ce changement est cohérent, puisqu'avec un pas de temps réduit, il n'est pas nécessaire de chercher l'information des influences atmosphériques aussi loin que précédemment. Les fenêtres spatiales ne changent en revanche pas souvent dans leur extension méridienne. Le nombre d'analogues de la méthode R1 a en moyenne doublé lors du passage en infrajournalier. Le nombre optimal d'analogues du premier niveau de la méthode R2 a doublé, voire triplé, et celui du second niveau a augmenté d'environ 50 %.

Les scores CRPSS sont passablement moins bons en infrajournalier (voir Table 8.11). Ceci est dû à la plus grande variabilité dans les séries infrajournalières, ainsi qu'à la plus grande difficulté d'être correct d'un point de vue temporel. Nous ne pouvons donc pas comparer les scores des méthodes journalières et infrajournalières.

Nous avons illustré le passage en infrajournalier sur 3 événements importants, soit août 1987 (Figure 8.11), septembre 1993 (Figure 8.12) et octobre 2000 (Figure 8.13). Nous présentons les séries temporelles aux stations automatiques les plus proches de la région des forts cumuls, c'est-à-dire Ulrichen et Zermatt.

De manière générale, il apparaît que le quantile 90 % explique mieux ces forts cumuls, comme l'ont démontré Djerboua (2001) et Marty (2010). Toutefois, les événements de 1993 et de 2000 ne sont ici pas prévus de manière satisfaisante par la méthode de référence R2, puisque les cumuls, mais surtout les répartitions temporelles prévues ne correspondent pas aux observations. Ce problème peut avoir différentes origines :

- L'analogie de circulation de cette méthode n'est pas satisfaisante, et nous devons l'améliorer.
- Les variables d'humidité contiennent des erreurs ou des imprécisions qui faussent l'estimation des cumuls.
- Cette analyse est effectuée sur la base d'une archive réduite (1982 - 2007), et les performances sont moindres que lors de l'utilisation de la période complète.

On peut constater qu'un pas de temps plus fin permet de mieux caractériser l'événement. Toutefois, certaines répartitions temporelles prévues sont moins pertinentes, comme c'est le cas à la station d'Ulrichen pour l'événement de septembre 1993 (Figure 8.12) ou celui

d'octobre 2000 (Figure 8.13). Nous pensons tout de même que cette information est utile en opérationnel et devrait être considérée parallèlement aux prévisions journalières. De plus, la prévision infrajournalière peut identifier de meilleures analogues, puisqu'elle n'est pas limitée à une fenêtre temporelle fixe dans la journée. Toutefois, à l'instar de la fenêtre temporelle glissante, nous devons utiliser une base de données de précipitations d'une taille réduite par rapport à la méthode journalière. À nouveau, la création de réanalyses de précipitations infrajournalières serait très intéressante pour cette application. D'ici là, cette méthode peut être utilisée en parallèle aux prévisions journalières.

8.4 Amélioration de la prévision de l'occurrence

Nous n'optimisons généralement qu'une fonction objective à la fois. En conséquence, un modèle optimisé pour la prévision quantitative des précipitations n'est pas forcément optimal pour la prévision d'occurrence des pluies. Il existe toutefois des modèles élaborés spécifiquement pour la prévision de cette occurrence (voir p.ex. Mezghani, 2009; Mezghani et Hingray, 2009). Il peut donc être intéressant de combiner ces méthodes afin d'améliorer la prévision globale. Notre approche consistera à remplacer la fréquence des pluies nulles proposée par la méthode des analogues par les résultats d'un autre modèle optimisé à cette fin (voir Figure 8.14), tout en gardant la partie positive de la distribution des pluies proposée – et préférentiellement optimisée – par les analogues.

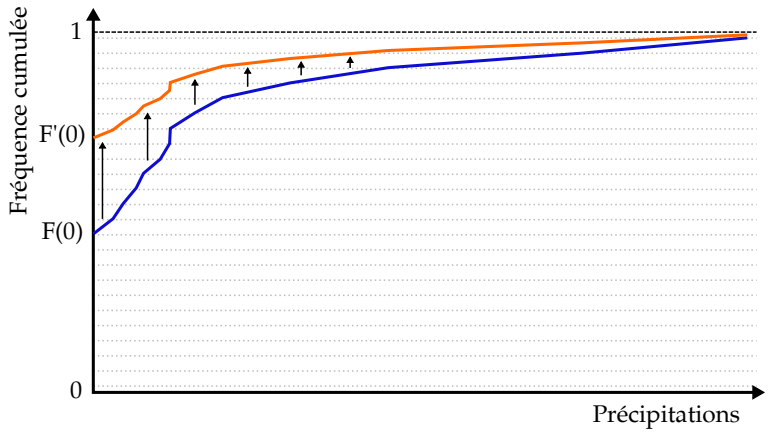


Figure 8.14 – Illustration du changement de la fréquence de la pluie nulle dans la distribution des précipitations de la méthode des analogues.

En effet, la distribution des précipitations prévues peut être décomposée en une addition des fréquences des pluies nulles et de celles des valeurs non nulles :

$$F(x) = F(0) + (1 - F(0))\, F_+(x) \tag{8.1}$$

Lorsque la fréquence des pluies nulles est modifiée dans la distribution des précipitations prévues, les fréquences des valeurs non nulles doivent alors être ajustées de la manière suivante pour respecter une distribution globale entre 0 et 1 :

$$F'(x) = F'(0) + (F(x) - F(0)) \left(\frac{1 - F'(0)}{1 - F(0)} \right) \tag{8.2}$$

où $F'(x)$ est la fréquence dans la distribution modifiée pour une pluie x, $F(x)$ est la fréquence correspondante dans la distribution d'origine, et $F'(0)$ et $F(0)$ sont les fréquences de la pluie nulle dans chacune des distributions.

8.4.1 Prévision d'occurrence par un modèle linéaire généralisé

Des séries temporelles de probabilités d'occurrence des précipitations résultant des travaux de Mezghani (2003, 2009) nous ont été fournies par l'auteur pour la période 1982-2001. Ces séries ont été créées par un modèle linéaire généralisé (GLM, Nelder et Wedderburn, 1972), élaboré avec différentes variables météorologiques (voir également Mezghani et Hingray, 2009). Elles ont été établies pour les stations de Zermatt, Visp, Montana et Sion. Il s'agit de séries obtenues en calibration de ce modèle. Pour chaque journée de la période 1982-2001, nous disposons, pour chaque station, de la probabilité de pluie estimée par le modèle GLM.

Une analyse statistique préliminaire a été effectuée sur ces données ainsi que sur les fréquences des pluies nulles telles qu'elles sont prévues par la méthode des analogues (Table 8.12). Les coefficients de détermination sont calculés entre les séries des fréquences des pluies nulles selon chacun des deux modèles et la fréquence observée obtenue par transformation en série binaire des précipitations observées. Le seuil de précipitations choisi est celui qui a

Table 8.12 – Statistiques des fréquences d'occurrence des précipitations selon le modèle des analogues, le modèle GLM et les valeurs observées, coefficients de détermination et score de Brier (par rapport aux observations) des séries résultant des 2 modèles.

	Observations		**Fréq. pluie analogues**				**Fréq. pluie GLM**			
	moy	**var**	**moy**	**var**	R^2	**BS**	**moy**	**var**	R^2	**BS**
Zermatt	0.330	0.221	0.374	0.075	0.393	0.137	0.365	0.088	0.351	0.145
Visp	0.302	0.211	0.336	0.074	0.391	0.130	0.428	0.099	0.299	0.168
Montana	0.394	0.239	0.433	0.097	0.446	0.134	0.425	0.098	0.384	0.148
Sion	0.308	0.213	0.337	0.082	0.416	0.125	0.336	0.085	0.351	0.140

Table 8.13 – Scores CRPSS pour la méthode standard R1, ainsi que pour la version modifiée par la fréquence des pluies nulles selon un modèle GLM.

	Standard	**Avec** $F'(0)_{GLM}$
Zermatt	24.92 %	22.12 %
Visp	25.83 %	16.44 %
Montana	33.09 %	30.80 %
Sion	26.58 %	23.01 %

été utilisé pour calibrer le modèle GLM, soit $P > 0.1$ mm/j. De même, le score de Brier, qui se prête bien à une telle évaluation, a été calculé sur ces séries. Cette simple analyse nous montre que les fréquences données par la méthode des analogues sont meilleures que celles résultant du modèle GLM utilisé, car les coefficients de détermination sont systématiquement supérieurs et les scores de Brier inférieurs.

Les séries du modèle GLM nous fournissent les fréquences des pluies nulles utilisées pour ajuster la distribution, comme nous l'avons expliqué précédemment. Au vu de l'analyse précédente, il n'est pas surprenant que l'utilisation dans la distribution globale des fréquences selon le modèle GLM dégrade significativement la qualité de la prévision (Table 8.13).

La série de pluies nulles élaborée avec ce modèle GLM ne permet donc pas d'améliorer les prévisions, puisque sa qualité est inférieure aux fréquences des précipitations nulles calculées par les analogues. Cette différence est peut-être due à la nature plus rigide d'une estimation par une relation linéaire, unique pour l'ensemble de la population, par rapport au conditionnement plus souple des analogues.

8.4.2 Exploitation des catalogues de types de temps

Dans le but de trouver une approche différente des analogues capable d'apporter de l'information pour la prévision de l'occurrence des précipitations, nous avons évalué la pertinence d'un catalogue de classifications en types de temps. L'idée sous-jacente est que, entre la rigidité d'une relation unique pour toutes les journées et la flexibilité « extrême » d'une estimation non paramétrique pour chaque journée par les analogues, un optimum possible consisterait en une relation unique pour chaque type de temps. Les 5076 séries du catalogue Cost733cat (voir section 4.4) ont donc été comparées de la manière suivante :

1. Pour chaque type de circulation de chaque catalogue, le taux d'occurrence des précipitations a été calculé par le ratio des jours pluvieux ($P > 0.1$ mm/j) sur le nombre de jours correspondant à ce type.
2. Ces valeurs d'occurrence ont ensuite été introduites dans les séries temporelles.
3. Le coefficient de détermination a finalement été calculé entre ces séries et les occurrences observées sur la période 1982-2001.

Les 5 méthodes de classification expliquant le mieux l'occurrence de la pluie sont présentées dans la Table 8.14 pour chaque station. Des variations entre les stations peuvent être observées, mais 3 méthodes reviennent fréquemment, soit P27 (*Kruizinga empirical orthogonal function types*, Kruizinga, 1979), PCACA (*k-means by seeds from hierarchical cluster analysis of principals components*, Yarnal, 1993) et SANDRA (*Simulated annealing and diversified randomization clustering*, Philipp et al., 2007), correspondant à des méthodes basées sur une analyse en composantes principales ou une optimisation (voir section 4.4).

Table 8.14 – Méthodes de classification en types de temps expliquant le mieux l'occurrence des précipitations aux stations. N_c est le nombre de classes de la méthode, D est le domaine spatial, R^2 est le coefficient de détermination de la série d'occurrence des précipitations élaborée à l'aide du catalogue en question avec les occurrences observées sur la période 1982-2001.

	Méthode	N_c	**Données**	D	R^2
Zermatt					
1	P27	27	SLP, Th500-850	9	0.2271
2	P27	27	SLP, Z500, V500, Th500-850	6	0.2266
3	LUND	27	SLP, Z500, V500, Th500-850	6	0.2225
4	PCACA	27	SLP, Z500, V500, Th500-850	6	0.2218
5	SANDRA	27	SLP, Z500, V500, Th500-850	6	0.2180
Visp					
1	P27	27	SLP, Z500, V500, Th500-850	6	0.2166
2	SANDRA	27	SLP, Th500-850	6	0.2145
3	SANDRA	27	SLP, V500	6	0.2145
4	PCACA	27	SLP, Z500, V500, Th500-850	6	0.2143
5	PCACA	27	SLP	6	0.2133
Montana					
1	P27	27	SLP, Z500, V500, Th500-850	6	0.2615
2	PCACA	27	SLP, Z500, V500, Th500-850	6	0.2562
3	PCACA	27	SLP	6	0.2538
4	ERPICUM (original)	27	SLP	6	0.2529
5	PERRET (original)	27	SLP	0	0.2525
Sion					
1	SANDRA	27	SLP, Th500-850	6	0.2383
2	PCACA	27	SLP	6	0.2382
3	P27	27	SLP, V500	6	0.2354
4	PCACA	27	SLP, V500	6	0.2349
5	SANDRA	27	SLP	6	0.2348

Schiemann et Frei (2010) ont également observé que les méthodes PCACA et SANDRA, entre autres, sont parmi les meilleures pour expliquer les précipitations de manière globale sur la région alpine. Cependant, la méthode P27 n'est pas pertinente selon leur évaluation sur l'ensemble des Alpes, ce qui n'exclut pas qu'elle le soit pour une sous-région.

Le nombre optimal de classes est systématiquement de 27, ce qui peut révéler un optimum de l'échantillon établi par Philipp et al. (2010) pour la discrimination des jours pluvieux à nos stations. En effet, la pertinence d'une classification par rapport à une variable du temps sensible semble être très dépendante du nombre de classes (Philipp et al., 2010; Huth, 2010). Il se peut que si les méthodes les plus adaptées disposaient d'un nombre supérieur de classes, la prévision d'occurrence des pluies s'en trouverait améliorée. Schiemann et Frei (2010) ont démontré que les classifications avec un nombre supérieur de types présentaient une meilleure capacité prévisionnelle des précipitations dans la région alpine.

Le choix des données d'entrée de la méthode varie d'une station à une autre. Ainsi, l'information de l'épaisseur de la couche 500-850 hPa semble importante pour la station de Zermatt, alors qu'elle ne l'est pas pour Sion. Le domaine numéro 6, soit celui des Alpes, est

systématiquement meilleur, excepté une fois pour la station de Zermatt, pour laquelle un domaine situé davantage au sud-ouest (centré sur la Péninsule Ibérique) est optimal pour une des méthodes, et une fois pour la station de Montana, où la classification de Perret (Perret, 1987) est effectuée sur un plus large domaine.

Finalement, les coefficients de détermination résultant de cette analyse (Table 8.14) sont significativement moins bons que ceux des analogues, et des modèles linéaires généralisés (Table 8.13). Il n'est donc pas possible, avec cette approche, d'améliorer la prévision d'occurrence des pluies de la méthode des analogues à l'aide des types de temps.

8.4.3 Calibration d'un modèle analogue de prévision d'occurrence

Au vu de la meilleure performance de la méthode des analogues par rapport à un modèle GLM ou à une classification en types de temps pour la prévision des fréquences des pluies nulles, nous avons cherché à améliorer cette composante de la prévision en l'optimisant de manière indépendante, mais en utilisant la méthode des analogues.

Les variables météorologiques utilisées sont celles de la méthode de référence R1, à savoir les champs de géopotentiel à 500 et 1000 hPa. La calibration optimale pour la prévision de la fréquence des pluies nulles résulte en des fenêtres spatiales très proches de celles obtenues pour la prévision quantitative, et nous ne gagnons donc rien sur le score final. Cette analyse révèle ainsi que les paramètres calibrés pour la prévision quantitative sont quasi-optimaux pour ce qui est de la prévision de l'occurrence des précipitations, du moins en gardant les variables météorologiques utilisées pour la distribution complète. Il nous semble a priori peu probable que d'autres variables météorologiques puissent être plus pertinentes que les champs de pression pour la prévision de l'occurrence des pluies.

8.4.4 Analyse des quantiles de la distribution

Nous avons ensuite évalué si un des quantiles de la distribution des analogues permet de clarifier le signal de la pluie nulle. À cette fin, les séries temporelles de chaque quantile (avec un pas de 5 %) ont été transformées en séries binaires d'occurrence (avec le même seuil de pluie que précédemment, et sur la même période). Ceci a été réalisé de la manière suivante : pour chaque jour de la série, nous extrayons la valeur de précipitations du quantile choisi, puis classifions chacune de ces journées en pluvieux si leur valeur dépasse le seuil de 0.1 mm/j, ou en non pluvieux, autrement. Finalement, les coefficients de détermination ont été calculés pour chaque série.

La Figure 8.15 met en évidence les quantiles optimaux pour la détermination de l'occurrence des précipitations aux différentes stations. Le meilleur quantile correspond à environ 50 % (variant entre 45 % et 55 % selon les stations) et les courbes présentent un optimum bien marqué, que ce soit pour les coefficients de détermination ou pour les scores de Brier. Ce résultat est cohérent avec les analyses réalisées par Marty (2010). Toutefois, cette information ne permet pas d'améliorer les prévisions, puisque les valeurs de ces scores demeurent de qualité inférieure à ceux de la méthode originale.

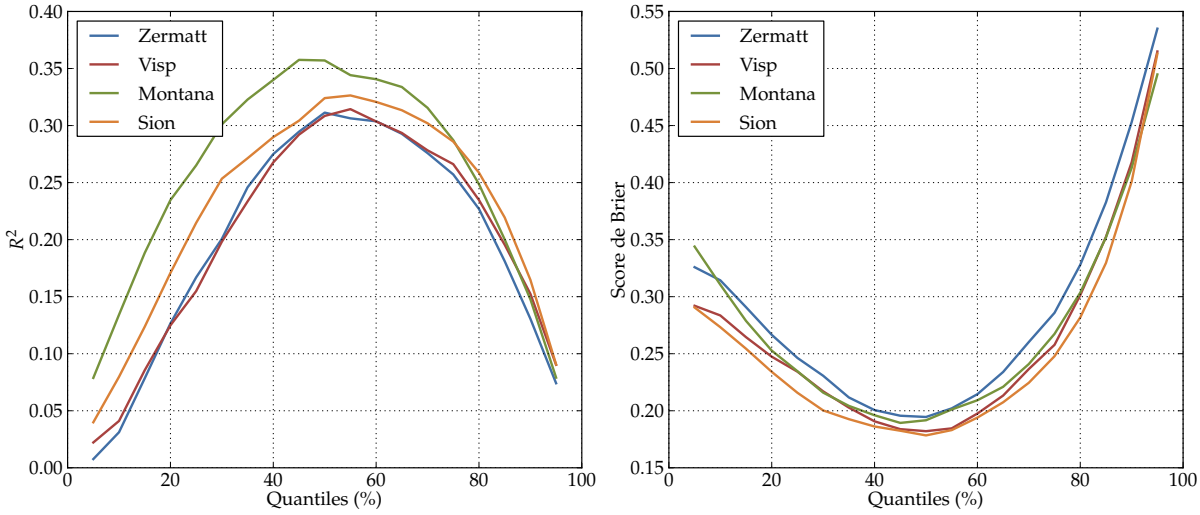


Figure 8.15 – (gauche) Coefficient de détermination et (droite) score de Brier des séries constituées sur la base des quantiles de la distribution des précipitations données par les analogues.

8.4.5 Exploitation des prévisions d'ensemble du modèle GFS

Une approche récemment développée à EDF (Électricité de France) est de considérer les précipitations fournies par la prévision d'ensemble du modèle global, et si celles-ci sont nulles, de ramener à zéro les cumuls prévus par la méthode des analogues (comm. pers. T. Mathevet et J. Gailhard). L'idée sous-jacente est que les analogues peuvent proposer une certaine proportion de pluies non nulles à cause de la « richesse » limitée de l'archive météorologique. Ainsi, pour une situation certainement non pluvieuse (telle que la voit le modèle GFS en ayant 15 traces nulles en précipitations), la recherche de 30 ou 50 analogues peut conduire, pour les dernières (les moins semblables), à retenir des situations faiblement précipitantes qu'il vaudrait mieux censurer.

En s'inspirant de cette approche, nous avons considéré l'occurrence prévue en premier lieu par la trace déterministe (le modèle de contrôle) puis par les ensembles en moyennant les occurrences des 15 membres. Nous avons utilisé les reprévisions (*reforecast*) du modèle GFS (section 4.3.3) sur la période 1982-2001.

La Figure 8.16 présente les résultats de cette analyse pour la station de Zermatt. Les graphiques des autres stations ne sont pas présentés, car très similaires. Les prévisions ont été considérées en 6 points de grille (45° à 47.5° de latitude et 5° à 10° de longitude), ainsi que de manière globale sur l'ensemble de ces points. Il en résulte que l'assemblage des prévisions sur l'ensemble des 6 points est systématiquement meilleur que chacun des points considérés séparément. D'autres combinaisons ont été testées, telles que des sélections de points à l'ouest ou au sud, mais n'ont pas donné de meilleurs résultats. Les deux stations situées à l'est (10° de longitude) présentent systématiquement des performances moindres, ce qui n'est pas une surprise au vu de leur emplacement. Le point le plus performant est généralement au sud pour Zermatt, à l'ouest pour Sion et Montana et un mélange pour Visp, ce qui est cohérent avec les principales influences atmosphériques de ces régions.

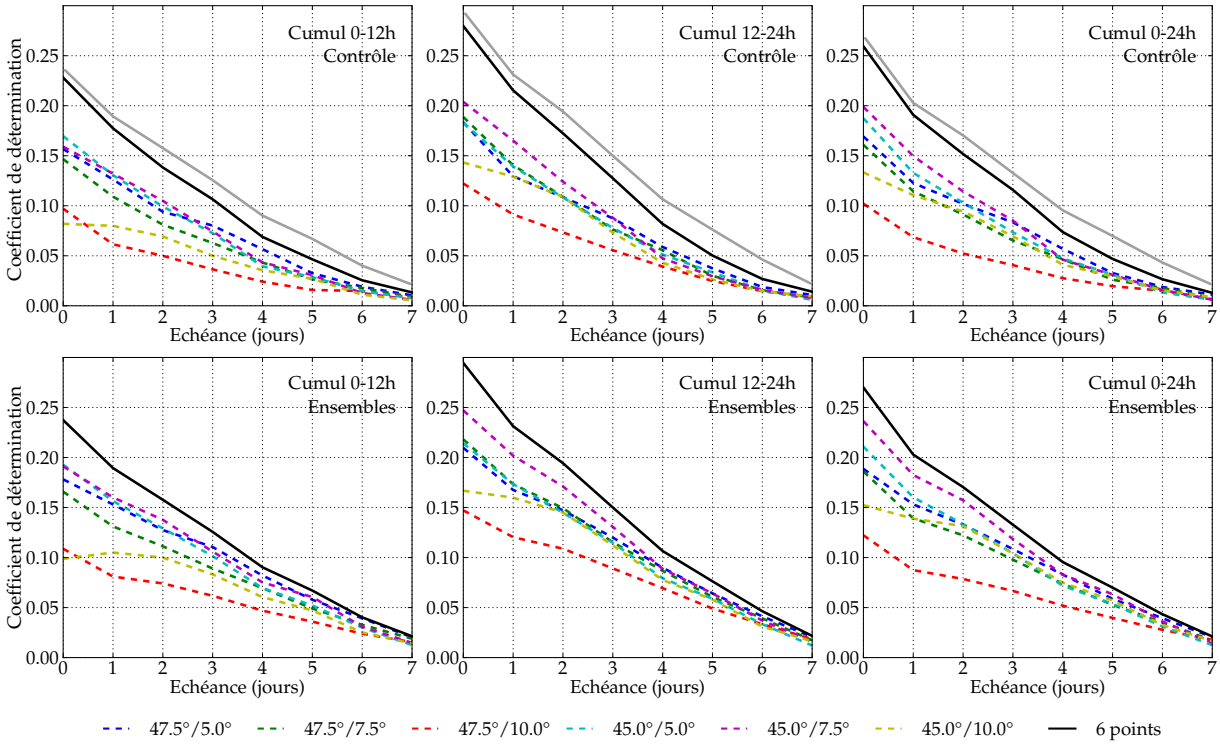


Figure 8.16 – Coefficients de détermination entre les occurrences de précipitations résultant des prévisions du modèle GFS à différents points et la série observée à Zermatt, en fonction de l'échéance. Les graphiques présentés correspondent (haut) à la prévision de contrôle, et (bas) à la prévision des ensembles, pour les cumuls de précipitations (gauche) sur la période 0-12 h, (centre) 12-24 h et (droite) 0-24 h. Afin de faciliter la comparaison, la courbe correspondant aux 6 points de la prévision d'ensemble a été ajoutée en gris dans les graphiques supérieurs.

Table 8.15 – Coefficients de détermination entre les occurrences de pluie prévues par les ensembles du modèle GFS (F_{GFS}) et la série observée en fonction de l'échéance. Les coefficients de détermination des occurrences de pluie prévues par la méthode des analogues sont donnés pour comparaison (F_{AN}). L'échéance 0 correspond au jour où la prévision est calculée.

	Prévi parfaite	**Prévi opérationnelle**							
Stations	R^2 F_{AN}	R^2 F_{GFS} **pour les différentes échéances (en jours)**							
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Zermatt	0.393	0.295	0.231	0.194	0.150	0.107	0.076	0.046	0.022
Visp	0.391	0.259	0.206	0.178	0.138	0.099	0.069	0.041	0.020
Montana	0.446	0.339	0.277	0.243	0.189	0.140	0.098	0.058	0.032
Sion	0.416	0.269	0.211	0.178	0.139	0.101	0.073	0.040	0.017

Les prévisions d'ensemble en occurrence de pluie sont systématiquement meilleures comparées aux prévisions de contrôle, pour chaque station. De même, le cumul 12-24 h présente toujours un coefficient de détermination supérieur. Ceci peut être dû au décalage des périodes considérées. En effet, la série de précipitations observées est un cumul de 6 h à 6 h le lendemain, alors que les cumuls des reprévisions débutent à minuit. Ainsi, la première tranche 0-12 h se situe à cheval entre deux pas de temps de la série observée, ce qui peut facilement expliquer une corrélation réduite, alors que le cumul 12-24 h est positionné au centre de la période d'observation.

La meilleure prévision pour chaque station est donc donnée par les ensembles sur la période 12-24 h et sur la combinaison des 6 points du domaine analysé (Table 8.15). Il est délicat de comparer les performances de la prévision GFS avec notre évaluation par les analogues, puisque cette dernière a été établie en condition de prévision parfaite, et ne comprend donc pas d'incertitude liée à la prévision. Pour être en mesure d'effectuer une comparaison équitable, il faudrait appliquer les analogues aux reprévisions, qui contiennent cette incertitude. Ceci n'a pas pu être réalisé dans le présent travail. Cependant, il apparaît que la qualité de la prévision chute rapidement avec les échéances.

Une application intéressante de cette approche serait de considérer les occurrences prévues par les ensembles d'un modèle régional, tel que COSMO-LEPS (Marsigli et al., 2005), sur la période correspondant aux mesures de précipitations, soit de 6 h à 6 h le lendemain. Toutefois, il n'existe pas de reprévision avec ce modèle nous permettant de quantifier cette approche.

Nous avons effectué une analyse visant à forcer les fréquences d'occurrence des pluies des analogues à zéro lorsque tous les ensembles sont nuls. Les coefficients de détermination résultant de cette combinaison ne sont pas meilleurs que les résultats de l'étude précédente.

8.4.6 Conclusions sur la prévision de l'occurrence

Nous avons utilisé différentes méthodes pour tenter d'améliorer la prévision de l'occurrence des précipitations, espérant ainsi améliorer la prévision quantitative globale des précipitations, mais aucune n'a présenté de performance équivalente à la prévision de l'occurrence intrinsèque à la méthode des analogues. Les modèles GLM et les classifications en types de temps doivent présenter une rigidité nuisible à la qualité des prévisions, alors que la méthode des analogues semble bénéficier d'une souplesse lui permettant de mieux s'adapter aux différentes conditions atmosphériques déterminantes pour la génération des précipitations. Il peut toutefois être intéressant de disposer de ces autres sources d'information en opérationnel.

Ces tentatives infructueuses ne signifient pas qu'il est impossible d'améliorer la prévision de l'occurrence des précipitations de la méthode des analogues, mais qu'il est nécessaire de disposer d'un modèle très performant à cette fin, et qui, a priori, ne se base pas sur les mêmes variables météorologiques, puisque la méthode des analogues existante semble déjà les exploiter de manière performante.

Finalement, il est difficile de juger la pertinence des fréquences d'occurrence déduites des ensembles du modèle GFS, en raison des incertitudes de la prévision. Toutefois, une combinaison avec les résultats d'un modèle régional peut être une piste intéressante, d'autant plus que ce dernier intégrera la grande variabilité spatiale des précipitations dans le milieu alpin de manière plus réaliste.

8.5 Amélioration du choix des variables d'analogie

Dans la section 7.2.1, nous avions identifié certaines variables pouvant compléter des niveaux d'analogie déjà présents dans les méthodes de référence. Nous allons donc chercher à intégrer ces éléments dans une nouvelle paramétrisation de la méthode des analogues.

8.5.1 Amélioration de l'analogie de circulation

L'analogie de circulation semble ne pas être suffisante dans la méthode de référence R1, basée sur les niveaux 500 et 1000 hPa (voir section 7.2.1.6). Nous avons donc cherché à intégrer des niveaux supplémentaires en nous basant sur les résultats de l'exploration des variables des réanalyses. Les meilleurs compléments de l'analogie de circulation souvent présents dans les résultats sont les niveaux 700 et 850 hPa. Nous avons évalué quelques variantes d'une nouvelle analogie de circulation en intégrant ces niveaux, dans un premier temps pour les régions du Chablais, de la vallée du Trient, et des crêtes du sud-est.

Ces résultats sont présentés dans la Table 8.16. L'ajout des deux niveaux 700 hPa à 12 h UTC et 850 hPa à 24 h UTC présente les meilleurs scores en calibration et en validation. Le choix des fenêtres temporelles est significatif. Cette analyse rapide a été effectuée sans remettre en question les niveaux 500 et 1000 hPa, et sans évaluer chaque combinaison possible de fenêtres temporelles. Une telle évaluation fera l'objet d'une optimisation automatique (voir chapitre 10). Les critères calculés pour les différents niveaux sont ici moyennés avec des poids identiques, ce qui sera aussi remis en question lors de l'optimisation. Nous avons également tenté d'intégrer ces 4 niveaux conjointement à 6 et 24 h UTC, ou à 12 et 24 h UTC, comme dans la méthode R0, mais les gains n'ont pas été confirmés en validation.

De la même manière que dans la section 6.3, nous avons appliqué une étape d'homogénéisation sur les paramètres des différents groupements afin d'en réduire la variabilité. Celle-ci consiste à croiser les jeux de paramètres entre tous les groupements, et à assembler ceux pour lesquels l'éventuelle perte en performance est acceptable.

Table 8.16 – Résultats (CRPSS) de l'ajout de niveaux atmosphériques pour l'analogie de circulation aux groupements du Chablais, de la vallée du Trient, et des crêtes du sud-est. Les meilleurs scores sont indiqués en gras. Voir Table 8.18 pour une comparaison avec les méthodes de référence.

Niveaux atmosphériques				**Chablais**		**Trient**		**Crêtes SE**	
500	**700**	**850**	**1000**	**calib.** (%)	**valid.** (%)	**calib.** (%)	**valid.** (%)	**calib.** (%)	**valid.** (%)
24 h	12 h	-	12 h	35.97	35.05	34.30	32.94	33.98	37.69
24 h	24 h	-	12 h	36.07	34.95	34.48	33.01	33.04	37.01
24 h	-	12 h	12 h	35.33	34.46	33.35	32.16	32.18	36.34
24 h	-	24 h	12 h	37.25	35.63	34.86	33.32	32.74	36.38
24 h	12 h	24 h	12 h	**37.87**	**36.63**	**35.77**	**33.85**	**34.77**	**38.54**
24 h	24 h	12 h	12 h	36.13	35.18	34.62	33.32	33.12	37.30

Table 8.17 – Paramètres des régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la nouvelle méthode M6 avec une analogie de circulation améliorée.

Régions	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_1	Groupements
A	0	15	42.5	5	30	2,3,4,5,6,9,10
B	5	10	42.5	5	25	8
C	2.5	15	42.5	5	25	7
D	0	12.5	42.5	5	35	1

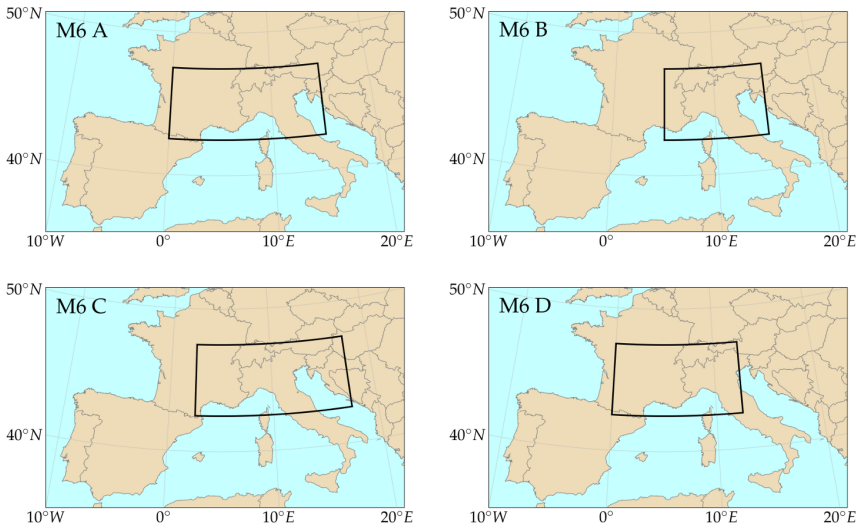
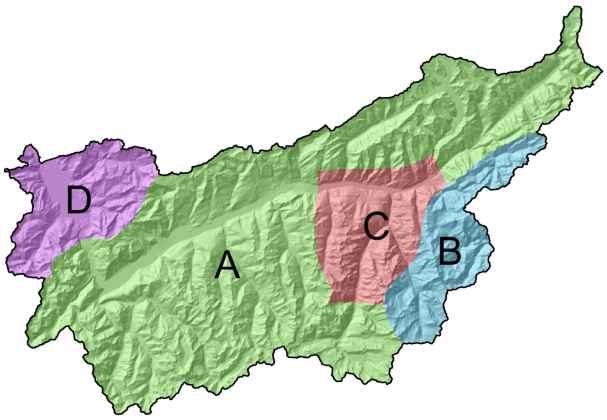


Figure 8.17 – Fenêtres spatiales des différentes régions pour la nouvelle méthode M6 avec une analogie de circulation améliorée. Les lettres correspondent aux régions définies dans la Table 8.17 et illustrées dans Figure 8.18.

Cette procédure aboutit à 4 régions distinctes illustrées dans la Figure 8.18. Nous avons appelé cette méthode M6, dans la continuité de la numérotation des méthodes de référence. Les niveaux et les fenêtres temporelles sont les suivants :

- 500 hPa à 24 h UTC ;
- 700 hPa à 12 h UTC ;
- 850 hPa à 24 h UTC ;
- 1000 hPa à 12 h UTC.

Les scores CRPSS de la nouvelle méthode M6 sont donnés dans la Table 8.18. Les gains sont substantiels par rapport aux deux méthodes de référence basées sur l'analogie de circulation (R0 et R1). Ceux-ci concernent autant la période de calibration que la période de validation, et justifient la considération de l'information supplémentaire apportée par les niveaux 700 et 850 hPa. Cette modification améliore tous les groupements, quelle que soit leur influence atmosphérique dominante. Il est ainsi fort probable que de tels gains puissent être apportés par cette modification de l'analogie de circulation dans d'autres régions que dans notre zone d'étude.



A Partie principale du bassin
B Crêtes du sud-est
C Vallée du Rhône amont
D Chablais

Figure 8.18 – Régions résultant de la procédure d'homogénéisation pour la nouvelle méthode M6 avec une analogie de circulation améliorée. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

Table 8.18 – Score CRPSS de la méthode M6 pour les différents groupements, et gains par rapport à R0 et à R1.

	Calibration			**Validation**		
	M6 (%)	**G(R0)** (%)	**G(R1)** (%)	**M6** (%)	**G(R0)** (%)	**G(R1)** (%)
Chablais	37.87	2.52	6.77	36.63	3.39	6.44
Vallée du Trient	35.73	3.54	6.52	34.06	4.37	5.21
Alpes bernoises ouest	35.23	5.71	6.97	33.30	9.22	7.53
Vallée du Rhône aval	29.01	3.09	5.60	29.22	5.09	5.69
Vallées latérales gauches	32.34	2.54	6.87	35.40	2.86	5.01
Crêtes du sud	35.16	3.89	6.61	38.73	1.95	4.21
Vallée du Rhône amont	27.49	8.67	10.83	29.39	8.35	6.55
Crêtes du sud-est	34.77	7.82	9.85	38.54	8.68	5.65
Alpes bernoises est	31.50	5.92	7.95	29.45	8.08	6.25
Vallée de Conches	38.12	7.58	7.08	38.80	2.53	4.34

8.5.2 Amélioration de l'analogie d'humidité

À l'instar de l'analogie de circulation, l'analogie sur l'humidité de la méthode de référence R2 semble ne pas être optimale (voir section 7.2.1.6). Nous avions également fait ce constat à la section 6.3.4, où le flux d'humidité à 700 hPa s'était avéré plus pertinent. Nous avons ici évalué l'indice d'humidité (humidité relative · eau précipitable) et le flux d'humidité (multiplication par la vitesse du vent) aux niveaux 600, 700, 850 et 925 hPa. Nous avons considéré les niveaux de manière indépendante, ainsi que toutes les combinaisons possibles de ceux-ci (résultats non présentés). Les résultats ne sont pas complètement homogènes d'un groupement à un autre, mais des tendances sont clairement identifiables. Il en ressort par exemple que les flux d'humidité sont généralement meilleurs que l'humidité sans la composante du vent. Les meilleurs prédicteurs sont soit le flux d'humidité à 700 hPa uniquement, soit la prise en compte des 4 niveaux atmosphériques (voir Table 8.19).

Les scores CRPSS de la sélection de l'ensemble des niveaux sont en moyenne légèrement meilleurs que pour le 700 hPa uniquement, bien qu'ils soient plutôt proches (voir Table 8.19). Les deux solutions semblent acceptables, mais la prise en compte de 4 niveaux étant significativement plus intensive en calculs, elle ne se justifie pas forcément. Nous préférons donc considérer le flux d'humidité à 700 hPa uniquement, afin de garder une méthode un peu plus simple.

De plus, lors de la procédure d'homogénéisation, la version basée sur les 4 niveaux a été très difficile à simplifier sans perte notable termes de compétence, alors que la version basée sur le niveau 700 hPa a même gagné en validation, la rendant encore plus intéressante.

Lors de la procédure d'homogénéisation, nous avons identifié les mêmes régions que précédemment (voir Table 8.17), avec les mêmes paramètres pour l'analogie de circulation. Les paramètres du flux d'humidité à 700 hPa de cette nouvelle méthode, que nous appellerons M7, sont donnés dans la Table 8.20.

Les gains de la méthode M7 par rapport aux autres méthodes basées sur une analogie d'humidité (R2, R3 et R4) sont donnés dans la Table 8.21. La nouvelle méthode est systématiquement meilleure que les méthodes de référence, que ce soit en calibration ou en validation. En termes de validation, la méthode la plus proche est R3e, que nous avions déjà modifiée par rapport à la méthode de référence originale R3. Les gains par rapport à R2 sont substantiels.

Table 8.19 – Score CRPSS d'une analogie d'humidité consécutive à celle sur la circulation de la méthode M6. Deux approches sont comparées, soit le flux d'humidité à 700 hPa, ou celui moyenné sur 4 niveaux atmosphériques.

	Calibration (%)		**Validation (%)**	
	700 hPa	**4 niveaux**	**700 hPa**	**4 niveaux**
Chablais	42.82	43.07	43.54	43.99
Vallée du Trient	41.20	41.26	40.70	41.24
Alpes bernoises ouest	40.39	40.61	39.30	38.74
Vallée du Rhône aval	34.50	34.76	36.26	36.68
Vallées latérales gauches	36.48	36.47	40.89	41.20
Crêtes du sud	38.81	39.15	43.06	43.68
Vallée du Rhône amont	30.74	30.91	33.56	33.05
Crêtes du sud-est	37.21	37.15	41.09	41.27
Alpes bernoises est	36.81	36.91	35.72	35.78
Vallée de Conches	41.43	41.54	42.30	43.23

Table 8.20 – Fenêtres spatiales de l'analogie du flux d'humidité résultant de la procédure d'homogénéisation pour la nouvelle méthode M7, ainsi que nombre d'analogues du premier et second niveau.

Régions	**Lon min**	**Taille lon**	**Lat min**	**Taille lat**	$\mathbf{N_1}$	$\mathbf{N_2}$	**Groupements**
A	5	5	45	2.5	60	20	2,3,4,5,6,9,10
B	7.5	2.5	45	2.5	25	15	8
C	5	7.5	45	2.5	45	20	7
D	5	2.5	45	2.5	60	20	1

Table 8.21 – Score CRPSS de la méthode M7 pour les différents groupements, et gains par rapport à R2, R3 et R4.

	Calibration				Validation			
	M7 (%)	**G(R2)** (%)	**G(R3)** (%)	**G(R4)** (%)	**M7** (%)	**G(R2)** (%)	**G(R3)** (%)	**G(R4)** (%)
Chablais	42.82	4.47	2.89	0.93	43.54	8.81	2.24	2.24
Vallée du Trient	41.07	7.28	1.53	4.19	41.06	10.16	0.16	4.70
Alpes bernoises ouest	40.39	9.47	2.34	5.59	39.30	12.07	2.60	5.56
Vallée du Rhône aval	34.45	7.24	1.14	2.99	36.42	10.94	0.61	4.49
Vallées latérales gauches	36.34	5.18	1.83	0.11	41.35	9.77	0.81	3.49
Crêtes du sud	39.12	6.39	1.53	1.55	43.51	6.74	0.13	4.08
Vallée du Rhône amont	30.74	7.50	3.75	1.41	33.56	9.12	0.94	4.03
Crêtes du sud-est	37.21	8.05	4.26	2.48	41.09	6.59	1.59	2.21
Alpes bernoises est	36.80	8.98	2.60	4.17	35.87	10.74	2.41	5.56
Vallée de Conches	41.17	8.73	3.95	4.98	42.84	9.22	2.71	7.00

8.5.3 Autres variables prédicteurs en troisième niveau d'analogie

Nous avons ensuite réévalué d'autres variables ayant précédemment montré une certaine capacité prévisionnelle, mais cette fois sur la base de la méthode M7. De plus, certaines nouvelles variables élaborées ont également été évaluées. Les résultats de cette étude sont regroupés selon l'intérêt qu'ils peuvent représenter. Il faut déjà préciser qu'aucune variable évaluée n'a pu apporter d'améliorations substantielles, seuls d'éventuels petits gains (par la suite : Gc pour la période de calibration et Gv pour celle de validation) ont été identifiés. Les variables n'apportant aucune amélioration de la méthode des analogues sont les suivantes :

- toute utilisation de l'humidité spécifique (p.ex. dans l'analogie du flux d'humidité) ;
- la vitesse verticale proche de la surface et à différents niveaux de pression, quand elle est comparée avec le critère RMSE ;
- la vitesse du vent à tous les niveaux de pression ;
- tout gradient d'humidité ; le rôle du gradient d'humidité observé par Rotunno et Ferretti (2001) est clairement un processus sous-maille au regard de la résolution des réanalyses ;
- la température du sol, qui précédemment présentait un intérêt, n'en a maintenant plus.

Les variables présentant un intérêt uniquement pour les crêtes du sud-est sont :

- le flux incident du rayonnement thermique ($Gc = 0.6$ % et $Gv = 2.9$ %) ;
- la température de l'air à 700 et 850 hPa, comparée à l'aide du critère RMSE, mais également S1 ($Gc = 0.1$-0.5 % et $Gv = 1.8$-3.5 %) ;
- la température potentielle* ($Gc = 0.7$ % et $Gv = 4.0$ %) ;
- la vitesse verticale proche de la surface avec le critère S1 ($Gc = 1.9$ % et $Gv = 1.6$ %) ;
- les épaisseurs, surtout entre les niveaux 1000 et 850 hPa ($Gc = 0.6$ % et $Gv = 4.8$ %) ;

∗. Température que prendrait une particule d'air si elle était amenée, selon un processus adiabatique sec, à une pression de 1000 hPa. (EUMETCAL, 2012)

Finalement, les plus intéressantes pour l'ensemble du bassin sont listées ci-dessous :

- le rayonnement net en grandes longueurs d'onde (Gc = 0.8-1.0 % et Gv = 0.9-3.3 %) ;
- la température de l'air proche de la surface, ainsi que la température potentielle proche de la surface, comparées à l'aide du critère S1 (Gc = 0.4-1.8 % et Gv = 0.4-2.6 %) ; l'utilisation du critère basé sur les gradients pourrait ici renseigner sur la position des fronts ;
- la différence de température entre les niveaux 1000 et 500 hPa, les autres combinaisons n'étant pas intéressantes (Gc = 0.3-0.6 % et Gv = 0.6-2.3 %). Par cette variable, nous avons cherché à résumer de manière très grossière le profil thermique de l'atmosphère, avec l'objectif d'inclure une notion de stabilité ou d'instabilité conditionnelle de la masse d'air.

Nous n'avons pas identifié de gain majeur lors de cette dernière exploration des variables des réanalyses. Toutefois, certaines variables de température (avec une robustesse acceptable) et d'autres variables de rayonnement (non robustes) peuvent amener une légère amélioration à la méthode, du moins en prévision parfaite. Une amélioration est donc possible dans la prise en compte de l'énergie thermique ou de la stabilité de l'atmosphère. De plus, certaines de ces variables peuvent s'avérer utiles pour l'interprétation de la situation en opérationnel.

Chapitre 9

Évaluation de méthodes d'optimisation

Notre objectif consiste ici à améliorer la méthode de façon plus globale. Pour cela, nous évaluons deux techniques d'optimisation pour la calibration automatique de la méthode des analogues. Ces techniques doivent fournir des paramètres objectifs et optimaux lorsque nous les considérons conjointement, ce qui n'est pas le cas de la calibration classique. Une méthode d'optimisation permet également de s'affranchir des comparaisons (choix des niveaux atmosphériques et des fenêtres temporelles) jusqu'alors effectuées manuellement.

Des recommandations d'utilisation d'une optimisation à l'aide d'algorithmes génétiques sont données afin de permettre leur utilisation dans un autre contexte.

9.1 Introduction du chapitre

Nous allons ici évaluer les performances de deux méthodes différentes d'optimisation automatique. La première est la méthode de Nelder-Mead, qui est une recherche de solutions locales, et la seconde est une optimisation globale par les algorithmes génétiques. Nous conclurons sur quelques recommandations.

9.2 Quel intérêt à une optimisation automatique ?

Nous avons pu observer, lors de la calibration de la méthode des analogues, que les paramètres optimaux variaient en fonction des choix initiaux effectués. De plus, les différents niveaux d'analogie sont toujours calibrés séquentiellement, et nous ne pouvons pas être certain qu'il n'existe pas de dépendances entre ceux-ci, qui pourraient nous mener à choisir d'autres paramètres si nous les considérons conjointement. Une calibration simultanée de tous les paramètres n'a jamais été entreprise et nous ne connaissons donc pas ce potentiel, a priori.

Bontron (2004), lors de la calibration de la méthode, était conscient de la problématique des dépendances entre paramètres : « *On perçoit ici l'aspect combinatoire de notre problématique : variables et fenêtres d'analogie ne sont pas indépendantes. Nous présenterons nos résultats en recherchant d'abord la meilleure variable sur une fenêtre imposée, puis la meilleure fenêtre pour la variable retenue. Cependant, même en réitérant le processus, est-on sûr d'avoir trouvé la combinaison optimale ?* ». Et plus loin dans son travail : « *Notre démarche, qui consiste à nouveau à faire varier les différents paramètres un à un, les autres restant fixés de façon plus ou moins arbitraire, peut donc ne pas nous conduire exactement à la solution optimale...* ». Bliefernicht (2010) s'est également trouvé confronté à la combinatoire des paramètres de la méthode et admet qu'il faut être un expert pour connaître l'influence respective des différents paramètres, leur sensibilité et leurs interactions non linéaires.

Lors de la calibration de la méthode avec de nouveaux prédicteurs ou pour une nouvelle région, les utilisateurs n'évitent pas l'évaluation systématique des combinaisons des niveaux atmosphériques et des fenêtres temporelles, car aucune méthode automatisée ne le permet. Cette évaluation est habituellement entreprise sur des fenêtres spatiales de taille fixe, ce qui n'est pas idéal, car la recherche de la fenêtre optimale pour chacune de ces combinaisons serait trop exigeante en termes de ressources. Ceci est d'autant plus vrai pour les méthodes combinant plusieurs niveaux atmosphériques, comme cela est habituellement le cas. Ben Daoud (2010), en calibrant la méthode, laisse entendre que « *la combinatoire liée à cette optimisation s'est révélée trop importante pour que tous les paramètres optimaux soient ajustés simultanément* ».

Notre ambition est donc d'évaluer la faisabilité de la calibration automatique de la méthode des analogues par différentes techniques d'optimisation. Il serait en effet très intéressant de trouver une approche permettant de considérer tous les paramètres de manière

simultanée, et donc capable d'identifier l'optimum global dans l'espace des paramètres. De plus, nous pourrions nous affranchir des évaluations manuelles systématiques de certains paramètres, tel que les niveaux atmosphériques et les fenêtres temporelles. Les objectifs de cette étude consistent donc :

1. à évaluer deux techniques d'optimisation (Nelder-Mead et les algorithmes génétiques) afin de déterminer si celles-ci sont capables de calibrer la méthode des analogues ;
2. à déterminer quels paramètres de ces algorithmes fonctionnent le mieux dans notre application, et quels sont les éléments déterminants pour l'optimisation ;
3. et finalement à tenter d'améliorer la méthode des analogues en augmentant le nombre de degrés de liberté.

9.3 Contexte d'évaluation des méthodes d'optimisation

Nous allons, dans un premier temps, évaluer les techniques d'optimisation afin de connaître leur capacité à paramétrer la méthode des analogues. Pour ce faire, de nombreuses optimisations sont effectuées dans le but de qualifier les performances des optimiseurs. Nous attendons donc des paramètres qu'ils soient tout aussi bons, voire meilleurs, que ceux de la calibration classique.

Les bornes des paramètres à optimiser sont données dans la Table 9.1. Les niveaux atmosphériques considérés sont les classiques 500 et 1000 hPa de la méthode R1, mais les fenêtres spatiales ne sont pas forcément recouvrantes. Nous effectuons donc, dans un premier temps, certains choix basés sur l'optimisation de la méthode R1, car il est peu probable qu'une technique d'optimisation incapable de calibrer un modèle relativement simple soit adaptée pour calibrer un modèle de même nature mais plus complexe. En revanche, le choix des fenêtres temporelles est laissé à l'algorithme d'optimisation. Nous avons donc 11 paramètres à optimiser.

Puisque nous cherchons dans un premier temps à comparer les performances des techniques d'optimisation et de leur paramétrisation, le résultat même de l'optimisation nous intéresse peu : nous pouvons donc considérablement réduire le nombre de jours cibles, les situations candidates étant toujours recherchées dans l'archive complète.

Table 9.1 – Gammes des valeurs de paramètres de la méthode de référence R1 pour l'évaluation des techniques d'optimisation.

Paramètre	**min**	**max**
Nombre d'analogues	5	100
Fenêtre temporelle	0	24
Longitude minimale de la fenêtre spatiale	-20	15
Taille de la fenêtre spatiale en longitude	2.5	40
Latitude minimale de la fenêtre spatiale	25	50
Taille de la fenêtre spatiale en latitude	2.5	40

Lors de l'analyse de sensibilité des paramètres (section 5.7), nous avons démontré que, pour la petite période de calibration de 1998 à 2002, les nuages de points de la méthode de Monte-Carlo (Figure 5.9) étaient semblables à ceux réalisés sur la période complète de l'archive (Figure 5.8). Puisque la surface de réponse dans l'espace des paramètres est très proche pour ces deux périodes, nous pouvons donc supposer que les techniques les plus performantes sur la petite période le seront également sur l'archive complète. La procédure d'évaluation sera donc effectuée sur la période de calibration de 1998 à 2002 avec une archive de situations candidates complète (1961 - 2008).

9.4 Évaluation de la méthode de Nelder-Mead

L'algorithme du simplexe de Nelder-Mead (Nelder et Mead, 1965) figure parmi les méthodes les plus utilisées pour une optimisation non linéaire (Lagarias et al., 1998). Il fait partie des méthodes dites de « recherche directe », car seule la valeur de la fonction objective doit être connue, sans information sur la dérivée de celle-ci. Les méthodes de recherche du minimum, dont l'algorithme Nelder-Mead fait partie, fonctionnent toutes sur le même principe consistant à réduire la fonction de coûts, ou à maximiser la fonction objective, par des mouvements successifs dans la direction du minimum ou maximum (Haupt et Haupt, 2004). Elles diffèrent par le choix de la direction et de l'amplitude des mouvements. Chaque variante de ces approches apporte de la vitesse ou de la robustesse, mais aucune n'améliore la capacité à trouver le minimum global au lieu de minimums locaux (Haupt et Haupt, 2004). L'algorithme de Nelder-Mead peut en effet être piégé par des minimums locaux et ne trouve pas toujours l'optimum global. De multiples essais avec différents départs aléatoires peuvent nous indiquer si l'algorithme converge systématiquement vers le même point ou s'il s'égare dans différentes solutions secondaires.

La méthode de Nelder-Mead est basée sur le concept du simplexe, qui est une approche très utilisée depuis les années 1960 pour la résolution de problèmes linéaires (Haupt et Haupt, 2004). Un simplexe est la forme géométrique fermée la plus simple dans un espace de dimension n, elle est donc constituée de $n + 1$ points. Cette méthode ne requiert pas le calcul des dérivées ni de la courbure de la fonction à optimiser, comme le fait par exemple la descente du gradient (Nelder et Mead, 1965). Elle est reconnue pour offrir une certaine robustesse (Haupt et Haupt, 2004), ainsi que pour être économe en ce qui concerne le nombre d'évaluations de la fonction objective (Lagarias et al., 1998).

9.4.1 Structure et opérations

L'objectif de l'algorithme de Nelder-Mead est de minimiser la valeur de la fonction objective (cette description est présentée sous un angle de minimisation ; pour une maximisation, les comparaisons sont juste inversées) par différents mouvements géométriques dans l'espace des paramètres.

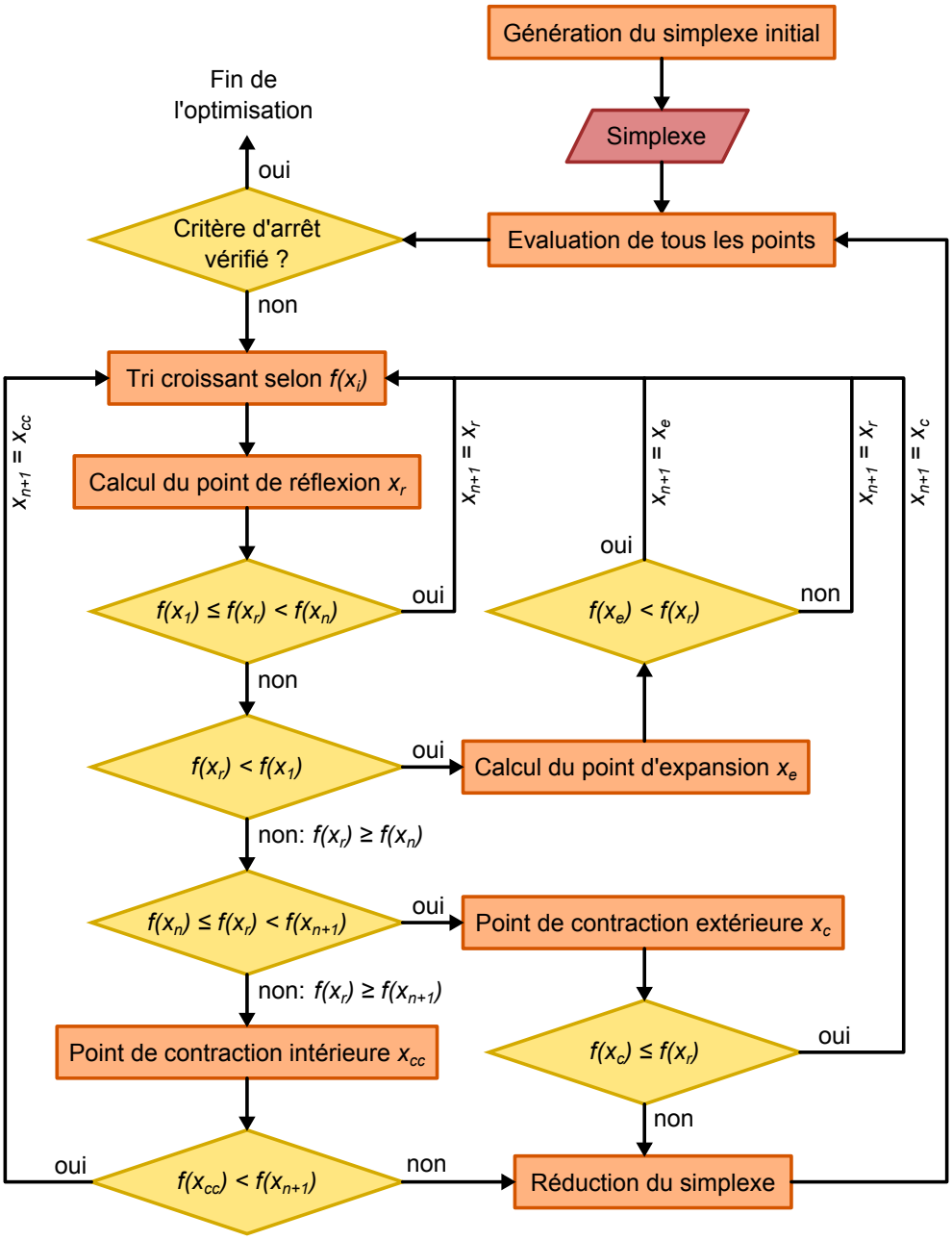


Figure 9.1 – Organigramme de la technique d'optimisation de Nelder-Mead. Voir le texte pour le détail des calculs.

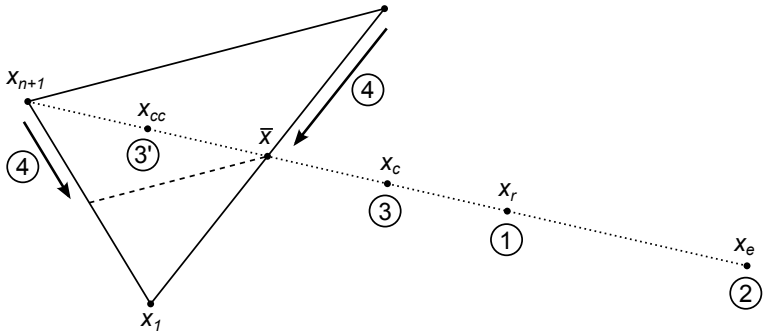


Figure 9.2 – Illustration des opérations possibles sur un simplexe dans un espace à deux dimensions. Le triangle continu représente le simplexe de base, les différents points sont les déplacements possibles du plus mauvais point, et la ligne discontinue illustre la réduction du simplexe. Adapté de Lagarias et al. (1998).

Le principe est de générer un simplexe initial (habituellement de manière aléatoire) dans notre espace de paramètres à optimiser, puis de déplacer successivement le plus mauvais point. Lorsque le simplexe entoure le minimum et qu'il n'y a plus de déplacement favorable, il se contracte. Ces opérations sont répétées jusqu'à ce que l'erreur soit considérée comme acceptable, selon une tolérance définie par l'utilisateur. Le simplexe s'adapte donc au paysage local de la fonction objective en s'allongeant favorablement dans la direction d'une longue pente et en changeant de direction avec celle-ci (Nelder et Mead, 1965).

Les étapes de la méthode sont illustrées dans la Figure 9.1 et les opérations de transformation du simplexe sont les suivantes (Nelder et Mead, 1965; Lagarias et al., 1998) :

1. **Réflexion** : Le plus mauvais point du simplexe (x_{n+1}) est réfléchi par rapport à la moyenne des autres points $\overline{x}$. Le point de réflexion est donné par :

$$x_r = \overline{x} + \rho(\overline{x} - x_{n+1}) \tag{9.1}$$

   où $\overline{x}$ est la moyenne des n meilleurs points (tous les points à part x_{n+1}), $\rho > 0$ est le coefficient de réflexion, habituellement $\rho = 1$. Si le nouveau point est inférieur (donc meilleur) au deuxième moins bon, mais n'est pas inférieur au meilleur, il est conservé. S'il est inférieur au meilleur, nous calculons le point d'expansion (2), s'il est supérieur au moins bon, nous calculons le point de contraction intérieure (3'), et finalement, s'il se situe entre le moins bon et le second moins bon, nous calculons le point de contraction extérieure (3).

2. **Expansion** : Le point transformé par expansion est donné par :

$$x_e = \overline{x} + \chi(x_r - \overline{x}) = \overline{x} + \rho\chi(\overline{x} - x_{n+1}) \tag{9.2}$$

   où $\chi > 1$ est le coefficient d'expansion, habituellement $\chi = 2$. Le point d'expansion est comparé au point de réflexion et le meilleur est conservé.

3. **Contraction** : La contraction peut être extérieure ou intérieure. La première est donnée par :

$$x_c = \overline{x} + \gamma(x_r - \overline{x}) = \overline{x} + \rho\gamma(\overline{x} - x_{n+1}) \tag{9.3}$$

et la seconde par :

$$x_{cc} = \overline{x} - \gamma(\overline{x} - x_{n+1}) \tag{9.4}$$

où $0 < \gamma < 1$ est le coefficient de contraction, habituellement $\gamma = 0.5$. Si le point de contraction extérieure est meilleur que le point de réflexion, nous le gardons, sinon nous procédons à la réduction (4). Si le point de contraction intérieure est meilleur que le moins bon, alors nous le conservons, sinon, nous procédons également à la réduction (4).

4. **Réduction** : Finalement, la réduction s'applique à tous les points, à part le meilleur (x_1) :

$$x_i = x_1 + \sigma(x_i - x_1) \qquad \forall i \in [2; n+1] \tag{9.5}$$

où $0 < \sigma < 1$ est le coefficient de réduction, habituellement $\sigma = 0.5$.

Ces opérations sont illustrées dans la Figure 9.2. Excepté pour la réduction, les nouveaux points sont toujours situés sur la droite passant par le point à déplacer et le centre de gravité du simplexe. Cet algorithme est un des seuls, parmi les méthodes utilisant un simplexe, à faire évoluer la forme de celui-ci de manière à ce qu'elle soit adaptée au paysage local évalué (Lagarias et al., 1998).

Les 11 paramètres de la méthode des analogues considérés pour cette évaluation sont discrets (heure des prédicteurs et points de grille géographique) ou sont des nombres entiers (nombre d'analogues). Notre critère d'arrêt est donc l'identification de la fin de l'évolution du simplexe. Celui-ci ne peut en effet plus progresser lorsque les différents points sont situés à une distance maximale devenue égale à la résolution des paramètres discontinus.

9.4.2 Évaluation

Nous avons effectué 100 optimisations à l'aide de l'algorithme de Nelder-Mead sur la petite période de calibration (voir section 9.3). La Figure 9.3 présente les scores CRPSS des jeux de paramètres optimisés par rapport à la performance de la calibration classique.

L'optimisation parvient dans une certaine mesure à calibrer la méthode avec des paramètres produisant des performances comparables, voire meilleures, que celles de la calibration classique. La médiane et la moyenne des scores résultant des optimisations sont légèrement supérieures, mais la distribution est relativement étalée, ce qui nous informe que l'algorithme n'a pas souvent convergé. Ce gain en performance peut être dû à une meilleure calibration

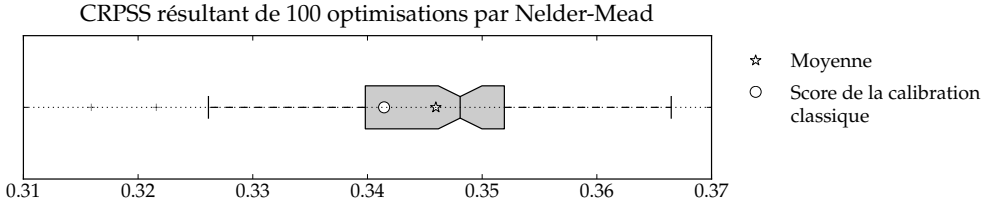


Figure 9.3 – Valeurs des scores CRPSS de 100 optimisations avec l'algorithme de Nelder-Mead. La valeur du score obtenu à l'aide de la calibration classique est donnée en référence.

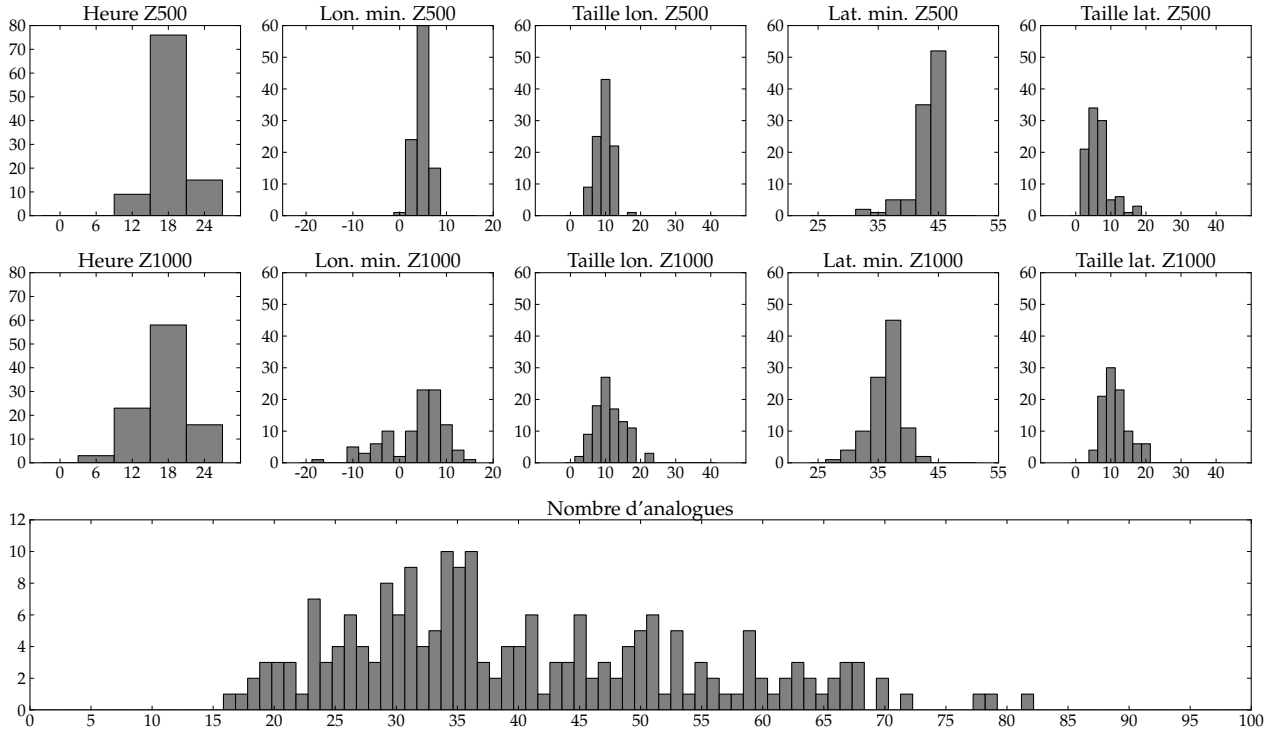


Figure 9.4 – Distribution des valeurs des paramètres résultant des 100 optimisations avec l'algorithme de Nelder-Mead.

de tous les paramètres conjointement, mais également à une exploitation du nouveau degré de liberté de la méthode, à savoir la non-nécessité de recouvrement des fenêtres spatiales entre les deux champs de géopotentiel proposés.

La Figure 9.4 illustre les fréquences des valeurs des paramètres finaux optimisés par l'algorithme de Nelder-Mead. Il apparaît alors clairement que l'algorithme n'a pas systématiquement convergé vers un jeu de paramètres unique. Des tendances sont marquées, mais une dispersion significative est présente pour tous les paramètres, et particulièrement pour le nombre d'analogues. Il est donc manifeste que la méthode parvient à cibler une gamme de valeurs plausibles, mais ne réussit pas à converger vers la solution globale.

La dispersion est plus importante pour le niveau atmosphérique 1000 hPa que pour le niveau 500 hPa. Nous avons observé dans les détails des simulations, que l'optimisation donne une priorité au niveau 500 hPa, et que l'autre peut donc converger parallèlement vers des valeurs qui ne sont pas réellement significatives. Ceci s'explique par le fait que quelques dimensions de l'espace des paramètres dirigent l'évolution du simplexe, et que celle-ci peut donc se faire de manière inadéquate dans les autres dimensions.

Nous avons brièvement tenté de laisser l'algorithme choisir le niveau atmosphérique, mais au vu des résultats peu concluants, cette piste a rapidement été abandonnée.

9.4.3 Conclusion

L'application de l'algorithme de Nelder-Mead n'a pas été un grand succès. Si les paramètres finaux se situent dans une gamme plausible entourant l'optimum, ce dernier ne semble pas être atteint. Nous n'obtenons en effet pas deux fois le même meilleur jeu de paramètres, ce qui confirme que l'algorithme ne converge pas. Cette non-convergence peut trouver son origine dans une ou plusieurs des raisons suivantes :

- La méthode des analogues est trop complexe pour ce type d'algorithme. La structure de la méthode est trop séquentielle et les interactions entre les paramètres créent de multiples optimums locaux. Ceux-ci piègent souvent l'algorithme qui peine alors à en ressortir.
- L'algorithme de Nelder-Mead fait partie des méthodes conçues pour traiter des problèmes pouvant être décrits par des fonctions différentiables, c'est-à-dire des fonctions dont la dérivée existe en chaque point de son domaine. Ces méthodes sont soumises à 3 hypothèses importantes, à savoir les hypothèses de continuité, de différentiabilité et de déterminisme (Bierlaire, 2006). L'hypothèse de continuité exige de travailler avec des fonctions continues des variables de décision, ce qui exclut les nombres entiers. La méthode des analogues ne respecte donc pas l'hypothèse de continuité et donc pas non-plus l'hypothèse de différentiabilité.
- La simplification adoptée pour forcer l'utilisation des nombres entiers ou discrets consiste à arrondir les paramètres résultant de l'optimiseur. Cette approche ne fonctionne généralement pas bien (Bierlaire, 2006).

Il existe des méthodes d'optimisation en nombres entiers dérivés de l'optimisation linéaire (voir Williams, 1993) ou de recherche par combinaisons de simplexes (voir Azadivar, 1992) pouvant être plus adaptées que Nelder-Mead à notre application. Celles-ci ne seront pas testées, car, à notre avis, la linéarité exigée par toute cette famille de techniques est plus contraignante encore que le problème d'arrondis. Le fonctionnement de la méthode des analogues est de type « boîte noire » pour une technique d'optimisation, ce qui nous incite à plutôt rechercher une méthode d'optimisation globale capable de traiter un problème non continu et complexe dont les paramètres sont interdépendants.

L'algorithme de Nelder-Mead s'est montré très efficace en termes de temps de calcul. Puisqu'il ne converge pas vers l'optimum global, il ne peut pas être utilisé pour finement calibrer la méthode des analogues. Toutefois, au vu de sa vitesse et des gammes plausibles des paramètres obtenus, il peut éventuellement être considéré pour une évaluation rapide de prédicteurs.

9.5 Évaluation des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AGs) sont une technique issue du monde de l'optimisation stochastique, plus spécifiquement des approches métaheuristiques. Celles-ci sont des algorithmes stochastiques itératifs qui se comportent comme des algorithmes de recherche en exploitant les caractéristiques d'un problème dans le but d'en trouver une meilleure solution. Les algorithmes génétiques font partie de la famille des algorithmes évolutionnistes (*evolutionary algorithm*, Bäck et Schwefel, 1993; Schwefel, 1993) qui utilisent certains mécanismes inspirés de l'évolution biologique, tels que la reproduction, les mutations génétiques, les croisements chromosomiques, et la sélection naturelle. Cette famille fait partie de la classe plus générale des calculs évolutionnistes (*evolutionary computation*), un sous-domaine de l'intelligence artificielle. Les algorithmes génétiques sont les outils les plus utilisés parmi les algorithmes évolutionnistes (Bäck, 1993), et ils sont en constante amélioration (Haupt et Haupt, 2004). Toutefois, avec le temps, les différentes méthodes des algorithmes évolutionnistes tendent à se ressembler et partagent beaucoup de points communs (Bäck, 1996; Haupt et Haupt, 2004).

La méthode a été développée par Holland (1992a) durant les années 1960 à 1970 et a été popularisée plus tard par Goldberg (1989). Contrairement à une optimisation locale, ou différentiable, les AGs recherchent l'optimum global sur une surface complexe, théoriquement sans aucune restriction.

9.5.1 Concepts de base

9.5.1.1 Analogie avec le milieu vivant

Un organisme vivant est défini par son code génétique, stocké dans son ADN (acide désoxyribonucléique). Il est caractérisé par plusieurs paires de chromosomes constitués de gènes, unité élémentaire de l'hérédité. Lors de la reproduction, les descendants héritent de caractéristiques des deux parents par croisement chromosomique. Dans le milieu naturel, les individus les plus adaptés tendent à survivre plus longtemps et à se reproduire plus facilement (Haupt et Haupt, 2004). Après une longue période, la population d'organismes se révèle bien adaptée à son environnement. L'Homme a utilisé des techniques de sélection et de croisement depuis des millénaires pour obtenir des cultures plus résistantes ou des chevaux de course plus rapides. Dans ces processus, les croisements chromosomiques constituent une part très importante de l'évolution.

L'objectif des différents opérateurs composant les AGs est de combiner et de cumuler les améliorations apportées aux individus au fil des générations, tout en conservant suffisamment de variété pour ne pas converger trop rapidement vers un optimum local. Les gènes des individus les plus adaptés vont donc être transmis à un nombre croissant d'individus à chaque génération. La combinaison des caractéristiques fortes de parents bien adaptés peut générer des descendants encore mieux adaptés (Beasley et Chu, 1996). La combinaison des gènes forts est en théorie le mécanisme de fonctionnement le plus important des AGs classiques (Holland,

1992b; Bäck et Schwefel, 1993). Toutefois, de nombreuses études identifient les processus de mutation en tant qu'opérateurs principaux, et les croisements comme secondaires (voir p.ex. Bäck, 1992a; Bäck et Schütz, 1996; Bäck, 1996; Smith et Fogarty, 1997; Deb et Beyer, 1999; Haupt et Haupt, 2004; Costa et al., 2005, 2007).

Dans le milieu vivant, les mutations sont des changements soudains et souvent spontanés dans l'ADN des cellules. Elles résultent soit de facteurs externes tels que des radiations ou des substances mutagènes, soit de phénomènes internes à l'organisme, par une induction volontaire ou l'occurrence d'erreurs lors de la réplication de l'ADN. Les mutations peuvent être nocives, neutres ou bénéficiaires (plus rarement). Les organismes sont munis de systèmes de réparation de l'ADN pour prévenir les mutations. Il y a un taux naturel de mutation, dit d'arrière-plan, par-dessus lequel viennent s'ajouter les mutations provoquées par des agents mutagènes, ou l'induction volontaire de l'organisme. Une induction volontaire est, par exemple, « l'hypermutation somatique », un mécanisme cellulaire ayant pour but l'adaptation du système immunitaire à de nouveaux éléments auxquels il se retrouve confronté (Harris et al., 1999). Lorsqu'une induction volontaire est activée, le taux de mutation est alors beaucoup plus important que le taux d'arrière-plan.

9.5.1.2 Quand utiliser des algorithmes génétiques

Les applications des AGs sont très diversifiées : traitement d'image, contrôle de systèmes industriels, design de turbines d'avions de ligne, optimisation de fonctions numériques complexes ou de divers réseaux (communications, eau, gaz, ...), etc (Bäck et Schwefel, 1993; Holland, 1992b; Magnin, 2006). Haupt et Haupt (2004) listent certains avantages des AGs :

- Une optimisation est possible avec des variables continues ou discrètes.
- La fonction objective ne doit pas nécessairement être différentiable.
- On peut traiter un grand nombre de variables.
- Les calculs peuvent êtres parallélisés.
- Une optimisation de variables avec des surfaces de coûts très complexes est possible (peut sortir des minimums locaux).
- Ils peuvent travailler avec des variables encodées.
- Ils peuvent fonctionner avec des données résultant de modèles numériques ou d'expériences, ou avec des fonctions analytiques.

Les AGs, à l'instar d'autres algorithmes évolutionnistes, sont capables de trouver de bonnes approximations, même pour des problèmes multimodaux, non différentiables, discontinus, ou bruités (Bäck et Schwefel, 1993). Les AGs sont particulièrement utilisés lorsque le problème à optimiser est constitué de nombreux paramètres (Magnin, 2006). Ceux-ci peuvent être de natures diverses, tels que des nombres entiers (Joines et al., 1996), des nombres réels, des valeurs binaires, etc. L'utilisateur doit néanmoins choisir quels sont les paramètres importants, car s'ils sont trop nombreux, les performances de l'algorithme sont réduites (Haupt et Haupt, 2004). De plus, afin de travailler dans un espace de recherche fini avec des paramètres réalistes, l'utilisateur doit fixer les bornes de la gamme de valeurs possibles (Magnin, 2006).

Les problèmes contenant des variables dépendantes peuvent être traités à l'aide des AGs (Haupt et Haupt, 2004). La dépendance intervariable est appelée « épistasie » dans la littérature, terme faisant référence aux interactions entre les gènes. Lorsque l'épistasie est très petite ou inexistante, les algorithmes de recherche de minimums sont les plus efficaces. Au contraire, lorsqu'elle est très élevée, les algorithmes de recherche purement aléatoire sont plus appropriés. Les AGs fonctionnent remarquablement bien lorsque l'épistasie est moyenne à élevée (Haupt et Haupt, 2004).

À l'aide des processus de reproduction et de sélection, les AGs se concentrent sur les régions les plus prometteuses de l'espace des paramètres (Holland, 1992b). Les points (jeux de paramètres) sont densifiés dans ces régions, car les traits forts des meilleurs individus se propagent de génération en génération.

Tout comme la calibration classique, l'objectif des AG consiste à améliorer la fonction objective, communément appelée fonction d'adaptation (*fitness function*) dans ce domaine. Cette fonction peut être de différents types (fonction mathématique, expérimentale, ou modélisation numérique) ; seule sa réponse est utilisée pour l'optimisation, ces algorithmes ne nécessitant aucune connaissance du problème. Les algorithmes sont également capables de résoudre des problèmes à objectifs multiples (voir p.ex. Fonseca et Fleming, 1993; Zitzler et al., 2004).

9.5.1.3 Vers l'optimum global

Deux conditions de la technique des AGs garantissent la convergence vers l'optimum global, à savoir (Zitzler et al., 2004) :

1. Des mutations de paramètres (dans notre cas, de la méthode des analogues) selon une distribution permettant de couvrir l'ensemble de l'espace des variables, ce qui garantit que n'importe quelle valeur peut être atteinte avec une probabilité non nulle.
2. Une règle d'élitisme assurant qu'une solution optimale ne peut pas être perdue, ni détériorée. Ainsi, le meilleur jeu de paramètres ne peut pas être perdu.

Les AGs permettent de s'approcher rapidement de solutions satisfaisantes, mais ils ne permettent pas de trouver la solution optimale à coup sûr (Zitzler et al., 2004; Magnin, 2006). Différentes solutions acceptables peuvent donc résulter d'une optimisation (Holland, 1992b). Ceci est une force et une faiblesse des AGs simples : ils sont très performants pour explorer des espaces complexes de solutions et identifier les régions les plus prometteuses, mais ils ne vont pas forcément trouver la meilleure solution avec les valeurs optimales de tous les paramètres (Holland, 1992b). Parfois, de petits changements dans les paramètres optimisés permettent d'améliorer encore la qualité du résultat. En réalité, il est fort probable que les AGs puissent trouver ces variations par eux-mêmes, mais après un très grand nombre de générations. En effet, plus les algorithmes convergent vers la solution, plus les générations sont nombreuses avant d'identifier de nouvelles améliorations, et la partie de l'ajustement final des paramètres est très gourmande en temps (Bäck, 1993). Ainsi, il est souvent recommandé de finir l'optimisation à l'aide d'autres méthodes classiques, plus rapides pour identifier les minimums locaux (Holland, 1992b).

9.5.1.4 Représentation des variables

Les variables ont été pendant longtemps codées sous forme binaire et assemblées sous forme de chaînes, à la manière des gènes dans un chromosome (Goldberg, 1989). Dans les AGs, un individu est habituellement constitué d'un chromosome composé de plusieurs gènes (les variables à optimiser), étant eux-mêmes décomposables sous forme de chaînes de bits (Figure 9.5). Des étapes de codage et de décodage sont donc nécessaires pour transformer la variable de sa valeur réelle en sa représentation binaire, et inversement. Lors du codage, une étape de quantification (approximation à des valeurs discrètes) des paramètres continus est nécessaire. La résolution de celle-ci dépend du nombre de bits que nous choisissons pour représenter le gène, ce qui va influencer l'erreur de quantification (Haupt et Haupt, 2004). Plus le nombre de bits est élevé, plus l'erreur est faible.

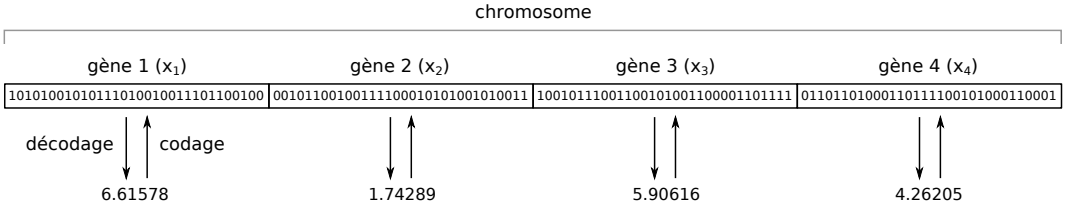


Figure 9.5 – Représentation binaire 32 bits des variables dans les AGs sous la forme d'un chromosome et de ses gènes.

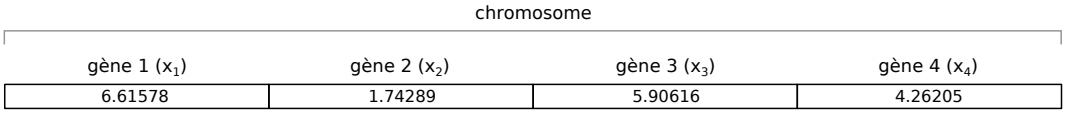


Figure 9.6 – Représentation réelle des variables dans les AGs sous la forme d'un chromosome et de ses gènes.

Le codage binaire, ou sa variante en code de Gray, a été utilisé dès les origines des AGs. Il résulte des travaux de Holland (1992a), qui suppose qu'un codage des variables sur un alphabet (une base) très court (binaire) améliore l'optimisation des AGs. Son théorème des schémas explique que l'accumulation de bouts de chromosomes utiles, appelés briques (*building blocks*), est maximisée par un alphabet le plus petit possible (Goldberg, 1990; Bäck, 1993). Néanmoins, de plus en plus d'applications utilisent des variables réelles, ce qui permet d'échapper aux étapes de codage et décodage des variables, aux erreurs de quantification (Haupt et Haupt, 2004), ainsi qu'aux artefacts de mutation des chaînes binaires. De plus, les performances sont souvent améliorées (Goldberg, 1990). Ainsi, lorsque les variables sont de nature discrète, l'encodage binaire peut être approprié, mais pour des variables continues, une représentation en nombres réels est plus adaptée (Herrera et al., 1998; Haupt et Haupt, 2004; Bäck, 1996; Gaffney et al., 2010). Après des comparaisons intensives entre codage binaire et réel, Michalewicz (1996) conclut que « *la représentation en virgule flottante est plus rapide, plus consistante de simulation en simulation, et fournit une plus grande précision*

(particulièrement avec des larges domaines où le codage binaire nécessiterait de longues représentations) ». Ce qui semble important, ce sont les algorithmes choisis pour implémenter les opérateurs génétiques, et ceux-ci varient d'un codage à l'autre (Gaffney et al., 2010).

9.5.2 Structure et opérateurs

Il existe une quantité très importante de variantes d'implémentation des AGs, souvent optimales pour un problème donné (Hart et Belew, 1991; Schraudolph et Belew, 1992). La structure générale (Figure 9.7), résultant des travaux de Holland (1992a), reste toutefois commune à la plupart des applications, à de petites différences près, telles que l'application de la sélection naturelle avant ou après la reproduction, différences qui n'ont qu'un rôle marginal (Bäck et Schwefel, 1993). Tous les opérateurs utilisés et leurs options, s'appliquant à un codage réel, sont décrits dans les sections suivantes.

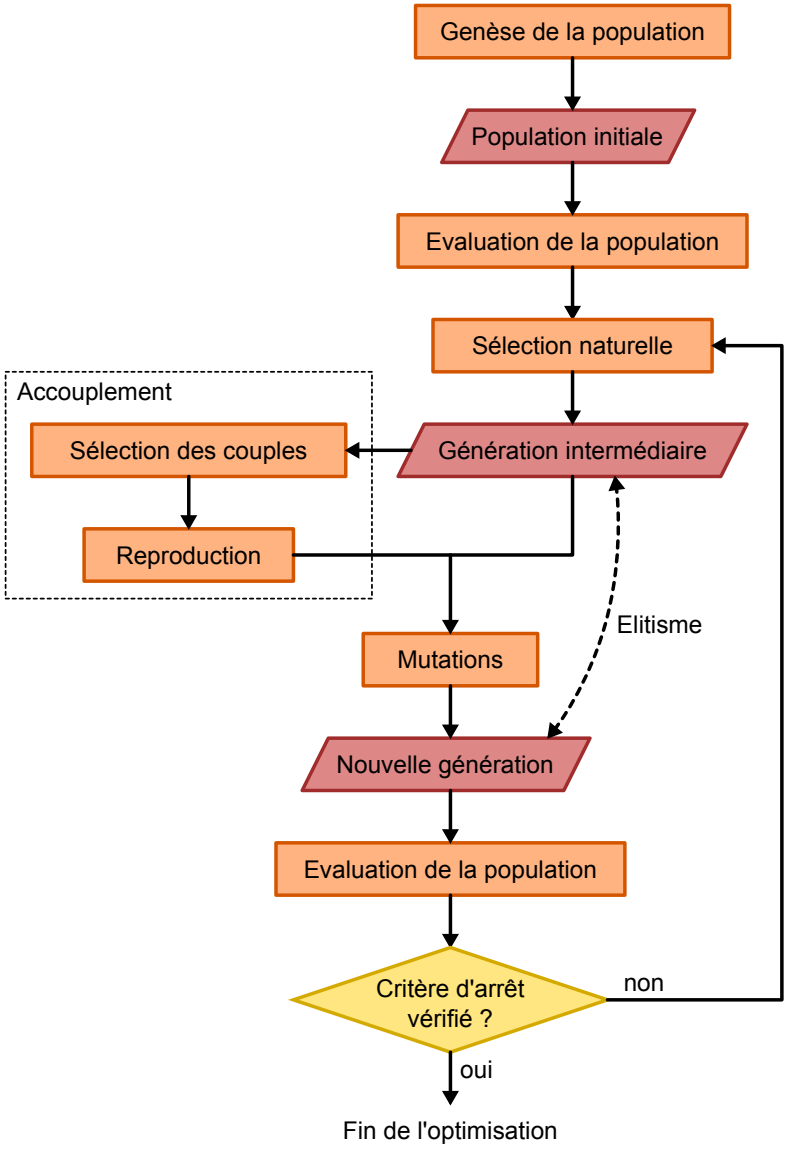


Figure 9.7 – Organigramme de fonctionnement des algorithmes génétiques.

9.5.2.1 Genèse de la population

La première étape consiste à générer la population initiale. Une population est un ensemble de N individus (dont chacun représente un point de recherche dans l'espace des solutions potentielles, soit, dans notre application, un jeu de paramètres de la méthode des analogues) que nous allons faire évoluer. Une génération est la population à un instant donné.

Une initialisation aléatoire selon une distribution uniforme est la version la plus courante, car simple à réaliser. La taille N de la population est un compromis entre le temps de calcul et la qualité de la solution (Magnin, 2006). N doit permettre de suffisamment échantillonner le domaine des solutions (Beasley et Chu, 1996), et devrait donc varier en fonction de la taille des chromosomes (c.-à-d. du nombre de paramètres à optimiser).

9.5.2.2 Évaluation de la population

Chaque membre de la population est évalué en calculant sa valeur de la fonction objective, soit le score du modèle des analogues défini par ses propres paramètres. Cette phase est la plus longue en termes de temps de calcul.

9.5.2.3 Sélection naturelle

La sélection naturelle est effectuée sur la base des valeurs de la fonction objective. Le test de la sélection permet de ne garder qu'une certaine partie (génération intermédiaire avec N_{gi} membres) de la population, généralement la moitié ($N/2$), pouvant accéder à la génération intermédiaire (*mating pool*). Si cette valeur est trop élevée, le taux de reproduction est trop faible, alors que si elle est trop petite, les traits positifs des individus n'ont pas la possibilité de s'accumuler dans un même chromosome (Haupt et Haupt, 2004). Il existe plusieurs techniques de sélection, dont les suivantes :

- N_{gi}**-élitisme** (Michalewicz, 1996) : la population est triée selon la valeur de la fonction objective et seule la meilleure moitié est conservée. Magnin (2006) a constaté que cette technique induit une convergence prématurée de l'optimisation, la pression de sélection étant trop forte. Cette convergence rapide se fait au détriment de la diversité génétique, réduisant ainsi le champ des possibilités à explorer.
- **Sélection par tournoi** (Michalewicz, 1996; Zitzler et al., 2004) : deux individus sont tirés au hasard et combattent. Celui qui a le meilleur score est sélectionné avec une probabilité permettant de réduire la pression de sélection. Cette procédure est répétée

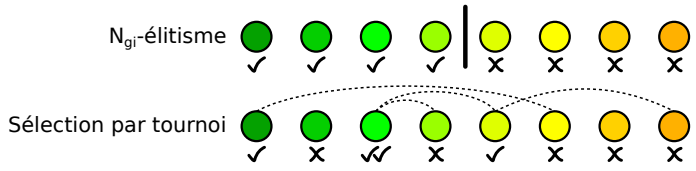


Figure 9.8 – Illustration des différents opérateurs de sélection naturelle implémentés dans les AGs.

jusqu'à ce que la génération intermédiaire soit pleine. Le tirage est effectué avec remise, les individus peuvent donc être tirés plusieurs fois, et ainsi être représentés plusieurs fois dans la génération intermédiaire (Magnin, 2006).

9.5.2.4 Sélection des couples

Les individus de la génération intermédiaire peuvent se reproduire. La première étape de l'accouplement est la sélection des couples, soit la sélection de deux individus. Les techniques implémentées dans ce travail sont listées ci-dessous :

- **Répartition par rang** : les individus sont assemblés par paires selon le rang. Nous parcourons donc la liste classée selon la performance et assemblons les individus consécutivement. Les rangs impairs sont associés aux rangs pairs. Cette approche est facile à réaliser, mais ne ressemble pas à un processus naturel. Si la population ne peut pas être entièrement complétée par ce procédé, des couples sont aléatoirement formés.
- **Répartition aléatoire** (*random pairing*) : deux individus sont aléatoirement tirés pour former un couple, selon une loi uniforme.
- **Roulette pondérée** (*roulette wheel weighting*) : la technique de la roulette fait référence aux jeux de hasard. Mais au contraire de la roulette du casino, celle-ci est biaisée. Chaque individu est associé à un secteur de la roue avec un certain angle d'ouverture, qui est sa probabilité. La probabilité assignée aux individus est proportionnelle à leur adaptation de manière à ce que les individus les plus adaptés aient la plus grande probabilité de reproduction. Il y a deux techniques de pondération des N_{gi} individus de la population intermédiaire : la pondération par le rang ou par la valeur de la fonction objective.
  - Pondération par le rang (*roulette wheel weighting on rank*) : la probabilité de chaque individu est fonction de son rang n :

$$p_n = \frac{N_{gi} - n + 1}{\sum_{n=1}^{N_{gi}} n} \tag{9.6}$$

  - Pondération par l'adaptation (*roulette wheel weighting on fitness*) : la probabilité de sélection est calculée en fonction de la valeur de la fonction objective. La probabilité p_n de chaque élément est alors calculée par l'équation 9.7 :

$$p_n = \frac{score_n - score_{N_{gi}}}{\sum_{n=1}^{N_{gi}} (score_n - score_{N_{gi}})} \tag{9.7}$$

    Cette pondération donne plus de poids aux meilleurs individus lorsque la répartition des scores est large, alors que les poids sont presque similaires lorsque tous les individus ont approximativement les mêmes scores (Haupt et Haupt, 2004). Dans notre application, le dernier individu (N_{gi}) a une probabilité nulle d'être sélectionné.

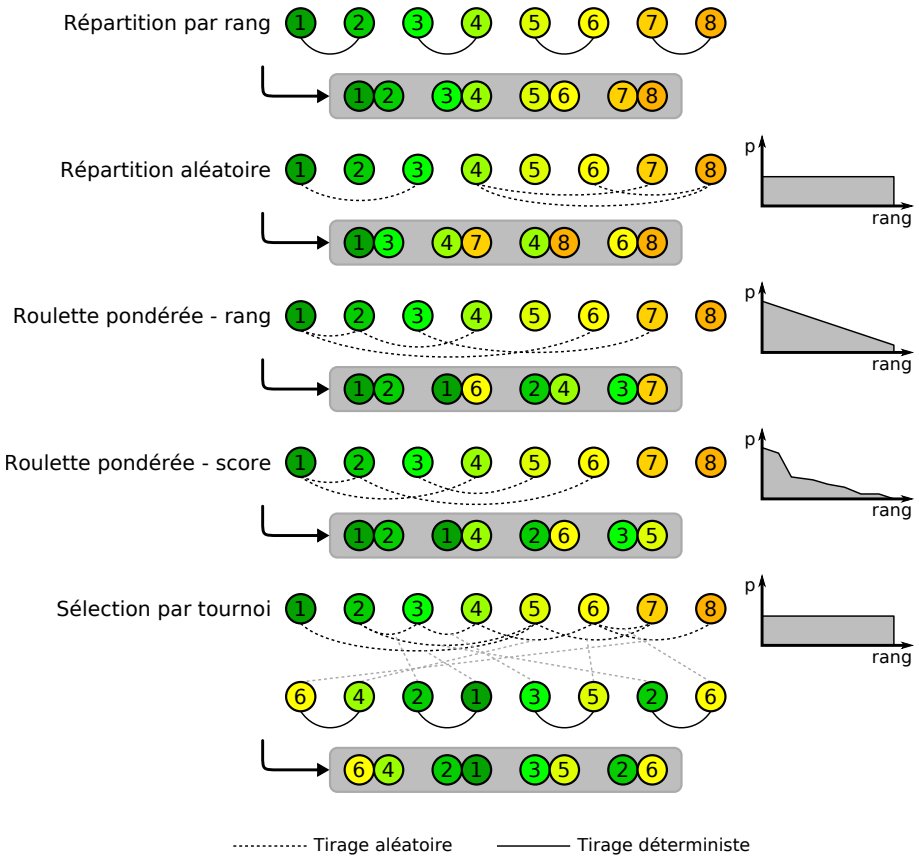


Figure 9.9 – Illustration des différents opérateurs de sélection des couples implémentés dans les AGs. Les distributions à droite illustrent la probabilité de sélection en fonction du rang de l'individu.

– **Sélection par tournoi** (*tournament selection*) : cette technique est semblable à celle utilisée dans la sélection naturelle, mais est appliquée ici pour la sélection successive de chacun des parents. Pour sélectionner un parent, un certain nombre d'individus (2 ou 3) sont tirés aléatoirement et le meilleur est conservé. Cette opération est donc effectuée deux fois, soit pour chaque partenaire. Cette approche imite bien la compétition de reproduction dans la nature (Haupt et Haupt, 2004).

La majorité de ces techniques sont de nature stochastique avec remise, ce qui rend possible la sélection de deux fois le même individu lors de la formation d'un couple. Dans de tels cas, nous avons choisi de recommencer la procédure de sélection jusqu'à ce que les individus soient bien distincts.

9.5.2.5 Reproduction

Une fois les deux individus parents sélectionnés pour la reproduction, ceux-ci combinent leurs chromosomes et génèrent deux enfants, ramenant le nombre d'individus de la population de N_{gi} (souvent $N/2$) à N (Haupt et Haupt, 2004). La combinaison des chromosomes est effectuée à l'aide d'un opérateur de croisement, de manière à générer deux descendants ayant des caractéristiques issues de leurs deux parents. Le croisement des chromosomes permet d'élargir l'espace de recherche et favorise la combinaison de gènes forts, ou mutés, pouvant

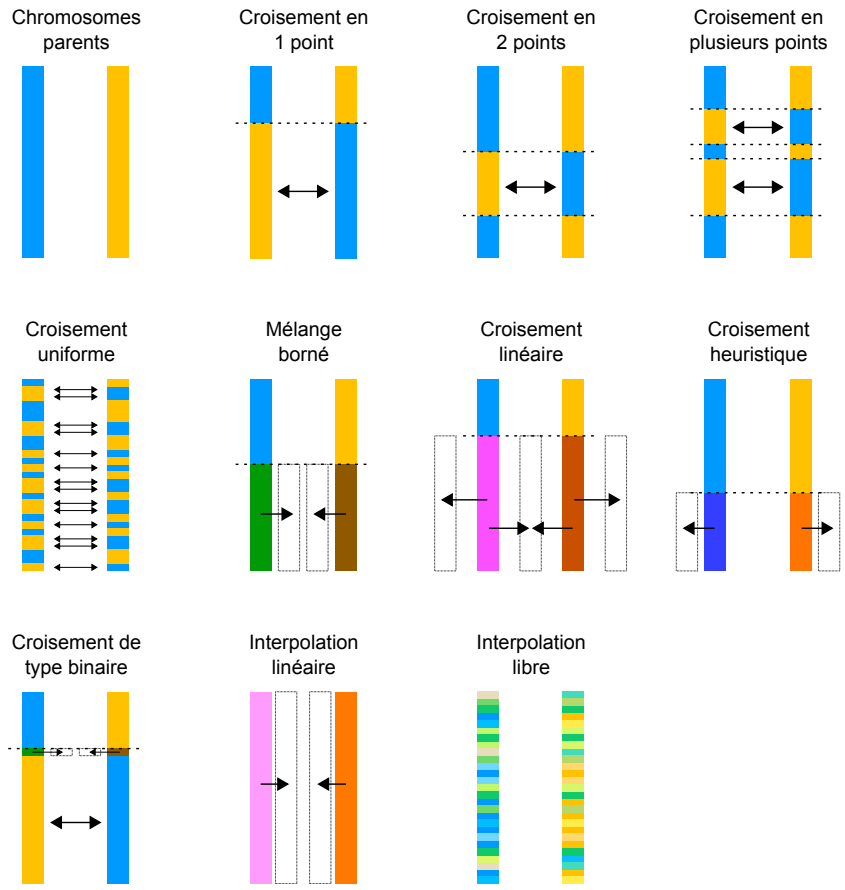


Figure 9.10 – Illustration des différents opérateurs de croisement implémentés dans les AGs.

ainsi former des enfants plus adaptés (Magnin, 2006). Cette opération permet un brassage des gènes et une accumulation des mutations positives (Magnin, 2006). Ces enfants viennent donc compléter la population qui va former la génération suivante.

Les opérateurs de croisement (ou enjambement) s'inspirent directement des propriétés naturelles de l'ADN et des processus de croisement des chromosomes. Les possibilités implémentées sont les suivantes :

- **Croisement en un point** (*single-point crossover*) : un point de croisement est choisi aléatoirement pour le couple. Les chromosomes s'échangent les gènes d'un côté et de l'autre de ce point. Dans le cas d'un codage binaire, le croisement s'effectue au niveau des bits, donc peut-être à l'intérieur même d'un gène, alors que dans le codage réel, le croisement s'effectue entre les gènes.

- **Croisement en deux points** (*two-point crossover*) : le croisement en deux points fonctionne comme celui en un point, mais il y a deux croisements autour desquels les gènes sont échangés. Si un point de croisement est sélectionné deux fois, un autre point est tiré à sa place. Cette approche, qui étend largement l'espace possible pour les enfants, est considérée comme plus efficace que la précédente (Beasley et al., 1993; Haupt et Haupt, 2004).

– **Croisement en plusieurs points** (*multiple-point crossover*, De Jong, 1975) : le croisement en plusieurs points est une généralisation des précédents, avec un nombre de croisements pouvant aller jusqu'au nombre de gènes.

– **Croisement uniforme** (*uniform crossover*, Syswerda, 1989) : pour chaque gène du chromosome, il est choisi aléatoirement d'inverser ou non les valeurs entre les parents. Dans les premières générations, les individus générés sont très différents, alors que dans les générations avancées, les variations deviennent de plus en plus limitées.

– **Mélange borné** (*blending method*, Radcliffe, 1991) : le croisement chromosomique sur un codage binaire peut générer de nouvelles valeurs pour les variables situées aux points d'intersection, puisque les croisements sont appliqués au niveau des bits. Ceci n'est pas le cas pour le codage en nombres réels, puisque le croisement est effectué entre les variables. Afin de reproduire le comportement présent dans les algorithmes originaux, qui introduit de la nouvelle information, des méthodes de mélange sont proposées. L'opération pour un gène consiste à combiner les deux valeurs des parents dans une nouvelle variable, par une combinaison linéaire (Radcliffe, 1991; Haupt et Haupt, 2004) :

$$\begin{cases} g_{e1,n} = \beta g_{p1,n} + (1-\beta) g_{p2,n} \\ g_{e2,n} = (1-\beta) g_{p1,n} + \beta g_{p2,n} \end{cases} \tag{9.8}$$

où $g_{e1,n}$ et $g_{e2,n}$ sont les n-ième gènes des deux enfants, $g_{p1,n}$ et $g_{p2,n}$ ceux des parents, et β est un nombre aléatoire entre 0 et 1. Pour $\beta = 0.5$, on obtient la moyenne pour cette variable.
Michalewicz (1996) a montré que cette méthode fonctionne bien pour différentes applications. Le choix des variables à mélanger peut être fait de différentes manières, par exemple toutes les variables à droite ou à gauche du point de croisement (Haupt et Haupt, 2004). Les croisements peuvent également être multiples. Les gènes des chromosomes sont alors mélangés en conservant le même β, ou en le changeant pour chaque gène. Ces méthodes produisent des enfants ayant des variables comprises entre les valeurs des parents, sans sortir de cet intervalle.

– **Croisement linéaire** (Wright, 1991, *linear crossover*) : afin de permettre aux variables de prendre des valeurs en dehors de l'intervalle défini par les parents, une méthode d'extrapolation est nécessaire. Trois enfants sont alors générés à partir des deux parents, selon l'équation 9.9. Il y a donc moins de couples sélectionnés pour compléter la population.

$$\begin{cases} g_{e1,n} = 0.5 g_{p1,n} + 0.5 g_{p2,n} \\ g_{e2,n} = 1.5 g_{p1,n} - 0.5 g_{p2,n} \\ g_{e3,n} = -0.5 g_{p1,n} + 1.5 g_{p2,n} \end{cases} \tag{9.9}$$

– **Croisement heuristique** (*heuristic crossover*, Michalewicz, 1996) : le croisement heuristique est une variation de ces dernières méthodes, qui calcule les valeurs des nouveaux gènes selon l'équation suivante :

$$\begin{cases} g_{e1,n} = \beta(g_{p1,n} - g_{p2,n}) + g_{p1,n} \\ g_{e2,n} = \beta(g_{p2,n} - g_{p1,n}) + g_{p2,n} \end{cases} \tag{9.10}$$

– **Croisement de type binaire** (Haupt et Haupt, 2004) : l'implémentation la plus proche de ce qui est effectué avec un codage binaire est une combinaison d'une méthode d'interpolation et de croisement simple. Les gènes situés après un point de croisement sont échangés, mais le gène situé à l'emplacement du croisement est modifié de la manière suivante :

$$\begin{cases} g_{e1,n} = g_{p1,n} - \beta(g_{p1,n} - g_{p2,n}) \\ g_{e2,n} = g_{p2,n} + \beta(g_{p1,n} - g_{p2,n}) \end{cases} \tag{9.11}$$

où β est une valeur aléatoire entre 0 et 1.

– **Interpolation linéaire** (*linear interpolation*) : au contraire des techniques précédentes, nous ne faisons plus de croisement, mais une interpolation linéaire sur tous les gènes du couple. Les enfants sont donc situés sur une ligne connectant les deux parents.

$$\begin{cases} ind_{e1} = ind_{p1} - \beta(ind_{p1} - ind_{p2}) \\ ind_{e2} = ind_{p2} + \beta(ind_{p1} - ind_{p2}) \end{cases} \tag{9.12}$$

où ind_{e1} et ind_{e2} sont les individus enfants, ind_{p1} et ind_{p2} les parents, et β est une valeur aléatoire entre 0 et 1. β est le même pour chaque variable.

– **Interpolation libre** (*free interpolation*) : cette technique effectue une interpolation sur chaque gène, tout comme la précédente ; mais dans ce cas, le facteur de pondération change pour chaque gène :

$$\begin{cases} ind_{e1} = ind_{p1} - [\beta_1(g_{p1,1} - g_{p2,1}), \beta_2(g_{p1,2} - g_{p2,2}), ..., \beta_{Ng}(g_{p1,N_g} - g_{p2,N_g})] \\ ind_{e2} = ind_{p2} + [\beta_1(g_{p1,1} - g_{p2,1}), \beta_2(g_{p1,2} - g_{p2,2}), ..., \beta_{Ng}(g_{p1,N_g} - g_{p2,N_g})] \end{cases} \tag{9.13}$$

où ind_{e1} et ind_{e2} sont les individus enfants, ind_{p1} et ind_{p2} les parents, N_g le nombre de gènes, et β_n sont des valeurs aléatoires (entre 0 et 1) indépendantes.

De multiples autres méthodes ou variantes existent, combinant les avantages de différentes approches. La performance des variantes étant liée au problème à traiter, nous ne pouvons pas identifier a priori la meilleure technique pour notre étude.

9.5.2.6 Mutation

La mutation est une modification directe des gènes. Dans un codage binaire, elle est mise en œuvre par l'inversion d'un bit dans un chromosome, alors que dans un codage réel, elle est effectuée par la modification de la valeur d'un gène. Les mutations apportent de la variété à la population et l'empêchent d'être victime d'une dérive génétique ou de se figer, ce qui rend la convergence vers l'optimum global théoriquement possible (Beasley et al., 1993). Elles permettent donc d'empêcher l'algorithme de converger trop rapidement vers un optimum local et apportent de nouvelles caractéristiques qui n'étaient pas encore présentes dans la population originelle (Haupt et Haupt, 2004). L'augmentation de la fréquence des mutations donne davantage de libertés à l'algorithme pour explorer au-delà de la région actuelle de l'espace des variables. Là aussi, il existe différentes techniques pour provoquer des mutations :

- **Mutation uniforme constante** (*uniform mutation*) : Le taux de mutation est constant et égal pour tous les gènes de tous les individus. Chaque gène a donc la même probabilité de muter. Lorsqu'un gène est sélectionné pour muter, une nouvelle valeur tirée aléatoirement selon une loi uniforme lui est attribuée.

- **Mutation uniforme variable** (Fogarty, 1989) : un taux de mutation variable au fil des générations a été en premier lieu suggéré par Holland (1992b), puis évalué par Fogarty (1989). Ce dernier a adapté le taux de mutation de différentes manières, ce qui a permis de largement améliorer les performances des AGs. Dans la plupart des applications, le taux de mutation décroît avec le temps de manière déterministe et globale (pour tous les individus) (Bäck, 1992b). Sa valeur optimale dépend de la taille des chromosomes, des propriétés de la fonction objective et de sa valeur courante, et de la taille de la population (Bäck, 1992b). Au contraire, Haupt et Haupt (2004) n'ont pas observé d'amélioration notable avec un taux de mutation variable.
  Nous avons implémenté cet opérateur de la manière suivante :

$$p_{n,G} = p_{G_0} + \left(\frac{p_{G_0} - p_{G_{m,p}}}{G_{m,p}} \right) min \left\{ G, G_{m,p} \right\} \tag{9.14}$$

  où $p_{n,G}$ est le taux de mutation du gène n à la génération G, G étant le numéro de la génération actuelle, $G_{m,p}$ le nombre maximum de générations durant lesquelles le taux de mutation varie. p_{G_0} est la probabilité de départ, $p_{G_{m,p}}$ est la probabilité finale. p_{G_0}, $p_{G_{m,p}}$ et $G_{m,p}$ sont les trois paramètres de la méthode. L'évolution du taux de mutation est ici effectuée de manière linéaire.

- **Mutation normale constante** : beaucoup d'utilisateurs ont recours à une distribution normale pour générer de nouvelles variables. Le gène, qui valait g, devient alors :

$$g' = N(g, \sigma^2) \tag{9.15}$$

  où σ est l'écart type de la distribution. Le désavantage de cette technique est qu'une bonne valeur de σ doit être choisie (Haupt et Haupt, 2004).

– **Mutation normale variable** : selon la même logique que la mutation uniforme variable, nous avons établi un opérateur de mutation utilisant une distribution normale avec un taux de mutation et un écart-type variables. Le taux de mutation est calculé par l'équation 9.14. Sur ce même principe, nous faisons varier linéairement (diminution avec le nombre de générations) l'écart-type au fil des générations :

$$\sigma_{n,G} = \sigma_{G_0} + \left(\frac{\sigma_{G_0} - \sigma_{G_{m,sdev}}}{G_{m,sdev}} \right) min \left\{ G, G_{m,sdev} \right\} \tag{9.16}$$

où $\sigma_{n,G}$ est l'écart type du gène n à la génération G, σ_{G_0} est l'écart type de départ, $\sigma_{G_{m,sdev}}$ est l'écart type final, $G_{m,sdev}$ le nombre maximum de générations durant lesquelles l'écart type varie. p_{G_0}, $p_{G_{m,p}}$, $G_{m,p}$, σ_{G_0}, $\sigma_{G_{m,sdev}}$ et $G_{m,sdev}$ sont les six paramètres de la méthode.

– **Mutation non uniforme** (*non-uniform mutation*, Michalewicz, 1996) : lorsqu'un gène est sélectionné pour muter, un déplacement aléatoire lui est appliqué selon les lois suivantes. Deux nombres aléatoires, r_1 déterminant la direction du déplacement et r_2 sa magnitude, sont tirés selon une loi uniforme dans le domaine [0,1]. La nouvelle valeur du gène est donnée par l'équation suivante :

$$g_n^{'} = \begin{cases} g_n + (b_n - g_n)\, r_2 \left(1 - \dfrac{G}{G_{max}} \right)^2 & si\ r_1 < 0.5 \\ g_n - (g_n - a_n)\, r_2 \left(1 - \dfrac{G}{G_{max}} \right)^2 & si\ r_1 \geq 0.5 \end{cases} \tag{9.17}$$

où a_n est la borne inférieure du n-ième gène, b_n sa borne supérieure, G la génération actuelle, G_{max} le nombre maximum de générations.
Nous avons adapté cet opérateur à notre application, qui ne se base pas sur un nombre de générations prédéfini :

$$g_n^{'} = \begin{cases} g_n + (b_n - g_n)\, r_2 \left(1 - \min \left\{ \dfrac{G}{G_{m,r}}, 1 \right\} (1 - \omega) \right)^2 & si\ r_1 < 0.5 \\ g_n - (g_n - a_n)\, r_2 \left(1 - \min \left\{ \dfrac{G}{G_{m,r}}, 1 \right\} (1 - \omega) \right)^2 & si\ r_1 \geq 0.5 \end{cases} \tag{9.18}$$

où $G_{m,r}$ est le nombre maximum de générations durant lesquelles l'amplitude de la recherche varie, et ω un seuil choisi par l'utilisateur afin de conserver un rayon de recherche minimum lorsque $G > G_{m,r}$.
Lors des premières générations, le domaine d'exploration couvre tout l'espace des paramètres. En revanche, ce domaine se réduit au fil des générations, permettant une exploitation des solutions locales.

– **Taux de mutation adaptatif individuel** (*adaptative mutation rate*, Bäck, 1992a) : s'inspirant des techniques de stratégies d'évolution (*Evolution Strategies*, voir Rechenberg, 1973; Schwefel, 1981), Bäck (1992a) introduit une notion d'auto-adaptation aux algorithmes génétiques. Le principe est de distribuer des paramètres de contrôle de l'optimisation dans les individus eux-mêmes, et donc de décentraliser partiellement le

contrôle de l'évolution, ce qui a pour but de réduire la paramétrisation des AGs et de permettre aux algorithmes de s'autogérer. Pour ce faire, la première méthode consiste en l'introduction d'un taux de mutation par individu. Lors de chaque mutation, le taux lui-même mute selon sa propre probabilité (Bäck, 1992a). Puis l'éventuel nouveau taux est utilisé pour muter individuellement les gènes de l'individu. Ainsi, lorsque ce taux diminue, il aura moins de chance d'être lui-même muté. Les mutations sont effectuées selon une distribution uniforme constante. Nous avons choisi ici de ne pas altérer ce taux de mutation lors des opérations de reproduction.
Cette approche est proche des phénomènes naturels d'adaptation. Une population moins bien adaptée à son environnement évolue en effet plus rapidement qu'une population mieux adaptée. Ainsi, dans notre application, un individu mal adapté ayant une probabilité de mutation trop faible sera vite dépassé par les autres membres de la population et tendrait à disparaître. Au contraire, lorsque la population commence à converger, un taux de mutation trop important est néfaste, et l'individu concerné risque de se dégrader rapidement.
Les taux de mutation initiaux sont tirés aléatoirement (Bäck, 1992a) et la méthode n'a aucun paramètre. D'autres approches existent pour introduire une auto-adaptation (voir p.ex. Smith et Fogarty, 1997; Deb et Beyer, 1999, 2001).

– **Rayon de recherche adaptatif individuel** : en nous inspirant de la mutation non uniforme, nous introduisons un rayon de recherche dans l'approche du taux de mutation adaptatif individuel. Ce rayon de recherche r_a, borné entre 0 et 1, est également adaptatif et se comporte de manière similaire au taux de mutation adaptatif. Dans le but de dissocier son évolution de celle du taux de mutation, sa propre valeur est considérée dans un premier temps comme taux d'auto-mutation pour éventuellement muter avant d'être utilisée comme rayon de recherche normalisé. La valeur d'un gène après mutation est donnée par la formule suivante, qui est une simplification de la mutation non uniforme :

$$g_n^{'} = \begin{cases} g_n + (b_n - g_n)\, r_2 r_a & si\ r_1 < 0.5 \\ g_n - (g_n - a_n)\, r_2 r_a & si\ r_1 \geq 0.5 \end{cases} \tag{9.19}$$

où r_1 et r_2 sont tirés aléatoirement, de la même manière que pour la mutation non uniforme. Aucun paramètre externe n'est donc nécessaire.

– **Chromosome de taux de mutation adaptatifs** (*n adaptative mutation rate*, Bäck, 1992a) : de manière analogue au taux de mutation adaptatif individuel, cette approche laisse le contrôle de la vitesse d'évolution aux individus eux-mêmes. La différence est ici que chaque gène a un taux de mutation propre. Le principal avantage est que le réglage de la mutation peut se faire beaucoup plus finement (Smith et Fogarty, 1997). Nous considérons donc un second chromosome contenant les taux de mutation correspondant à chaque gène du chromosome de base. Nous choisissons l'approche de Magnin (2006), qui est de considérer les chromosomes en parallèle plutôt que de les concaténer.

Le fonctionnement de la mutation et de l'auto-mutation est similaire au cas du taux de mutation adaptatif individuel, mais de manière distribuée dans le chromosome. Une autre différence est que nous appliquons ici les mêmes opérations de croisement que celles que subissent les gènes du chromosome de base, et ceci pour les mêmes points de croisement. Ainsi, lors d'un échange de gènes, les enfants héritent également des taux de mutation propres à chacun de ces gènes.

- **Chromosome de rayons de recherche adaptatifs** : cet opérateur combine les fonctionnements du chromosome de taux de mutation adaptatifs et du rayon de recherche adaptatif. De manière analogue, l'individu possède 3 chromosomes, le premier contenant les valeurs à optimiser, le second les taux de mutation distribués, et le dernier les rayons de recherche distribués. À nouveau, aucun paramètre externe n'est requis.
- **Mutation multi-échelles** : en nous inspirant de la mutation non uniforme, nous proposons une approche également basée sur un rayon de recherche, celui-ci n'étant cependant pas décroissant avec le temps. Il est en effet difficile d'anticiper la vitesse de convergence et donc de paramétrer la mutation non uniforme. Le rayon de recherche r_a de l'équation 9.19 est ici tiré aléatoirement, pour chaque individu, entre 4 valeurs équiprobables : 1, 0.5, 0.1, 0.02. Ainsi, l'évolution des individus est un mélange d'exploration et d'exploitation au lieu d'être une transition de l'un à l'autre. Le seul paramètre externe est le taux de mutation qui est fixe.

Lorsque le gène à muter est représenté par une liste d'éléments distincts (p.ex. variable ou niveau atmosphérique, ou critère d'analogie), un tirage d'une nouvelle valeur selon une distribution uniforme est toujours utilisé. Il ne fait en effet pas sens d'utiliser des opérateurs fonctionnant sur des principes de proximité lorsque celle-ci n'existe pas.

9.5.2.7 Élitisme

Nous avons introduit une procédure d'élitisme sur la sélection naturelle ainsi que sur les mutations. Cette procédure garantit la survie du meilleur individu, afin que nous ne perdions pas une meilleure solution. Cette approche est très courante dans le domaine des AGs (Haupt et Haupt, 2004). Lors de la sélection naturelle, si le meilleur individu n'a pas été sélectionné, il est copié dans la génération intermédiaire à la place d'un individu tiré aléatoirement. Lors de la mutation, si l'individu le plus adapté a muté et que sa nouvelle version est moins performante que l'originale, cette dernière est réinsérée à la place d'un individu choisi aléatoirement.

D'autres implémentations de l'élitisme existent, par exemple le maintien d'une population secondaire, appelée archive, contenant les individus les plus prometteurs de chaque génération (Zitzler et al., 2004). Cette approche ne sera pas évaluée dans le cadre du présent travail.

9.5.2.8 Fin de l'optimisation

Le contrôle de convergence définit si la solution est acceptable et si l'algorithme peut s'arrêter. Les critères d'arrêt sont un aspect flou de l'utilisation des AGs (Haupt et Haupt, 2004). Nous avons choisi de stopper l'optimisation si le meilleur individu ne change pas pendant x générations. Cette valeur ne doit pas être trop faible afin de permettre à l'algorithme de sortir d'un minimum local s'il y est bloqué. De plus, le taux d'améliorations diminuant avec la progression de l'AG, il est normal que le meilleur individu n'évolue pas sur plusieurs générations lorsque nous nous rapprochons de la solution globale.

La plupart des implémentations des AGs affichent des courbes de l'évolution de la moyenne des scores de la population, ainsi que celle du meilleur individu. Le nombre de générations ainsi que le nombre d'évaluations de la fonction objective sont des informations utiles pour évaluer l'efficience des algorithmes.

9.5.3 Implémentation

Il nous a fallu gérer certaines contraintes liées aux différents paramètres lors de l'implémentation. Par exemple, lorsqu'un opérateur de croisement ou de mutation attribue à un gène une valeur en dehors des bornes autorisées ou ne respectant pas la discrétisation des données, ce gène est ramené à la valeur possible la plus proche.

Les AGs sont très gourmands en temps de calcul, car ils nécessitent de nombreuses évaluations de la fonction objective. Ces évaluations sont très longues dans notre application, puisqu'il s'agit de calculer et d'évaluer les prévisions pour toute la période de calibration, pour chaque jeu de paramètres. Il est possible de réduire le temps de calcul en évitant de recalculer le score d'un individu qui a été préalablement évalué et qui n'a pas changé. Nous conservons donc le score de chaque individu demeurant dans la sélection jusqu'à ce que celui-ci subisse une mutation.

L'évaluation de chaque membre de la population d'une génération est entièrement indépendante et peut donc être effectuée en parallèle sur les différents processeurs d'un ordinateur (Haupt et Haupt, 2004; Alliot et Durand, 2005). Nous avons implémenté cette technique, et le gain de temps en résultant a été très important.

9.5.4 Paramétrisation

Le choix des paramètres des AGs, tel que le taux de mutation, la taille de la population, ou les différents opérateurs, est difficile au vu du nombre élevé de variantes existantes, chacune ayant été développée pour un problème spécifique (Haupt et Haupt, 2004; Costa et al., 2007). Ces paramètres sont dépendants de la fonction objective, des variantes d'implémentation, des limites des variables à optimiser, et des indicateurs de performance. Ainsi, différentes études aboutissent à différentes propositions de paramétrisation.

Un élément important de la paramétrisation des AGs consiste trouver le bon équilibre entre exploration et exploitation (Bäck, 1992a; Smith et Fogarty, 1997). L'exploration est

caractérisée par une probabilité relativement forte d'évaluer des régions de l'espace des paramètres n'ayant pas encore été visitées. Celle-ci doit être suffisamment importante au début de l'optimisation, afin que l'algorithme soit capable d'identifier la région où se situe l'optimum global. L'exploitation est caractérisée par une recherche locale dans une région d'intérêt, et effectue généralement de petits déplacements. Cette dernière est intéressante pour affiner les variables en fin d'optimisation.

9.5.4.1 Valeurs de paramètres dans la littérature

De Jong (1975) a comparé différentes implémentations et paramétrisations des AGs sur des fonctions de complexité variable. Il a pu observer qu'une population de petite taille améliore les performances initiales, alors qu'une grande population améliore les performances à long terme ; la taille de la population devrait être choisie entre 50 et 100. Il propose un taux de mutation de 0.001 pour un codage binaire de 32 bits et une population intermédiaire N_{gi} d'environ 60 % de la population totale.

Il est généralement considéré qu'un taux de mutation très bas peut mener à une dérive génétique, et qu'un taux de reproduction trop important peut mener à une convergence prématurée.

Grefenstette (1986) a effectué d'autres tests paramétriques sur les mêmes fonctions et propose une taille de population de 80 individus, une population intermédiaire de 45 % et un taux de mutation de 0.01 pour un codage binaire. Ses essais ont montré que s'il est possible d'optimiser les paramètres de contrôle des AGs, de très bonnes performances peuvent être obtenues sur une gamme de valeurs de ceux-ci.

Bäck (1993) suggère un taux de mutation de $1/L_c$, où L_c est la taille du chromosome encodé en binaire (voir également Bäck, 1996).

Haupt et Haupt (2004) ont travaillé sur la paramétrisation des AGs continus et ont trouvé, pour des problèmes choisis, un taux de mutation entre 0.05 et 0.2 et une population inférieure à 16.

Nous pouvons finalement synthétiser quelques principes :

- Les croisements ont un rôle dans l'exploitation des régions prometteuses de l'espace des variables par la combinaison des traits forts (Haupt et Haupt, 2004).
- Les opérations de mutation sont parfois considérées comme secondaires. Pourtant, il semblerait que des probabilités de mutation supérieures aux gammes habituellement considérées soient plus optimales au début de l'optimisation, permettant ainsi une plus grande exploration (Bäck et Schütz, 1996).
- Des approches progressives avec un taux de mutation variable sont certainement plus optimales (voir p.ex. Bäck et Schütz, 1996; Bäck, 1996), mais plus complexes à mettre en œuvre.
- Le passage à un autre algorithme d'optimisation (par exemple descente de gradient), une fois la région optimale identifiée, est plus efficace que la multiplication des itérations des algorithmes génétiques (Haupt et Haupt, 2004).

– Dans le but de trouver une solution correcte avec un minimum d'évaluations de la fonction objective, l'opérateur de sélection des couples et le type de croisement n'ont pas beaucoup d'importance, alors que la taille de la population et le taux de mutation ont un impact significatif (Haupt et Haupt, 2004). Traditionnellement, de grandes populations sont utilisées pour explorer des fonctions complexes, alors qu'une population de taille réduite peut trouver une solution plus rapidement (Bäck et Schütz, 1996). La combinaison d'une population de petite taille et d'un taux de mutation élevé fonctionne mieux pour les premières générations (De Jong, 1975; Haupt et Haupt, 2004).

9.5.5 Évaluation

Les AGs étant constitués de nombreuses variantes et options, il nous faut en évaluer un certain nombre avant de déterminer si cette technique est effectivement applicable à la méthode des analogues. Lors des premiers essais pour l'établissement de recommandations, nous avons pu remarquer que la méthode a un potentiel de succès intéressant. Sur les 10'080 premières optimisations détaillées dans la section suivante, une seule présente un score inférieur aux résultats de la calibration classique.

La Figure 9.11 révèle qu'autant une paramétrisation considérée comme performante (droite) qu'une autre considérée comme médiocre (gauche) dépassent rapidement les résultats de la calibration classique (trait horizontal inférieur). Après environ 5 générations,

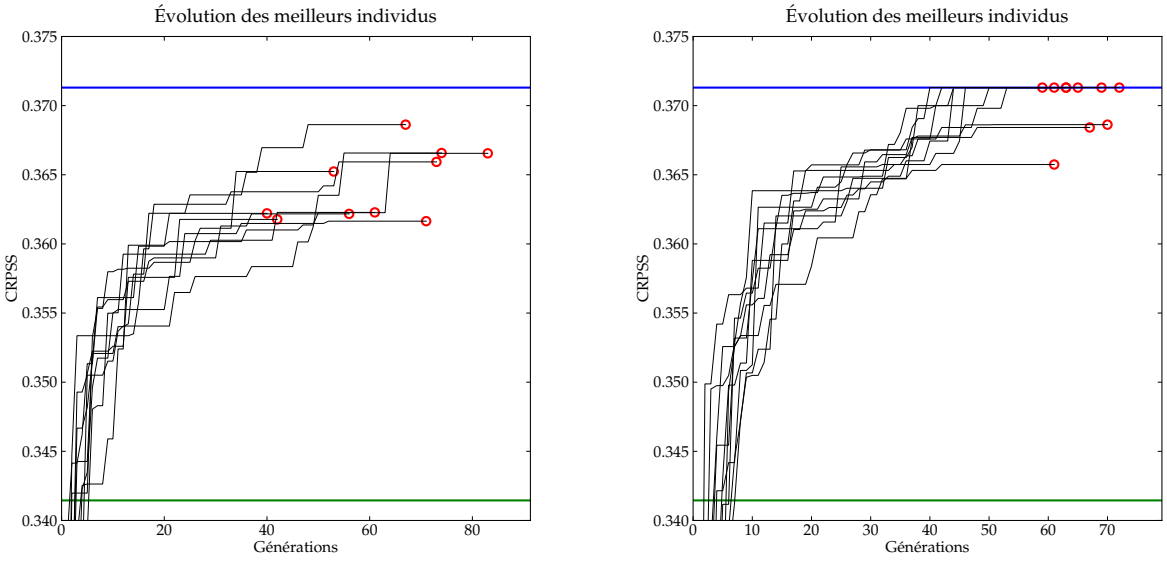


Figure 9.11 – Exemple d'évolution des scores des meilleurs individus (jeux de paramètres de la méthode des analogues) de 10 optimisations pour les crêtes du sud-est. Les graphiques sont établis pour (gauche) une paramétrisation que nous considérons comme mauvaise, et (droite) une autre que nous jugeons performante. Le trait inférieur de couleur verte indique la valeur des résultats de la calibration classique, et le trait supérieur de couleur bleue, la valeur de ce que nous considérons comme optimum global.

ce seuil est déjà dépassé pour le groupement des crêtes du sud-est. Il apparaît que certaines paramétrisations convergent, et d'autres non, ce qui est l'objet de la prochaine section.

Cette méthode d'optimisation est donc plus adaptée que celle de Nelder-Mead, car les performances sont systématiquement supérieures et l'algorithme peut converger vers un optimum global supposé.

9.5.6 Recommandations de paramétrisation

Un de nos objectifs étant de faire des recommandations de paramétrisation de l'optimisation, nous allons donc procéder de manière systématique. La démarche et les résultats obtenus sont synthétisés ci-dessous, et les détails se trouvent en Annexe E.

9.5.6.1 Démarche de comparaison des opérateurs

Une méthode parfois utilisée pour l'analyse comparative de différentes paramétrisations des AGs est le design factoriel (*factorial design*, voir p.ex. Costa et al., 2005, 2007; Mariano et al., 2010). Cette approche permet d'identifier les paramètres de la technique d'optimisation responsables des plus grands gains. N'étant pas vraiment adaptée à notre démarche, nous ne l'appliquons pas directement, mais en empruntons quelques concepts pour quantifier l'effet respectif des opérateurs.

Au vu du nombre important d'opérateurs et d'options de la méthode, il n'est pas possible d'évaluer systématiquement chaque combinaison. Nous allons donc procéder en premier lieu à la comparaison des opérateurs d'accouplement, c-à-d. de sélection des couples et de reproduction. Puis les opérateurs de mutation seront comparés, et, finalement, quelques autres options de la méthode seront testées. Lors de chaque comparaison exhaustive d'un type d'opérateur, deux variantes très différentes des autres opérateurs sont considérées afin de tenir compte d'effets indirects.

Pour évaluer une combinaison d'opérateurs/options, nous effectuons 10 optimisations avec des valeurs de paramètres initiaux aléatoires différents. Les optimisations sont arrêtées lorsque le meilleur individu n'a pas pu être amélioré pendant 20 générations. Les performances des opérateurs sont caractérisées par 4 indicateurs :

- **score final moyen** : la moyenne des scores des 10 optimisations ;
- **convergence** : nombre d'optimisations ayant convergé vers un optimum global supposé ;
- **nombre de générations** : caractérisation de la vitesse de convergence de l'algorithme ;
- **nombre d'évaluations de la fonction objective** : caractérisation du temps de calcul nécessaire (plus réaliste que le nombre de générations).

Cette étude requiert des moyens informatiques plus importants qu'un ordinateur personnel. Les calculs ont donc été effectués sur un cluster de l'Université de Lausanne (*Intel Xeon based HPC cluster* à 96 processeurs fonctionnant sous la distribution Linux RedHat). La comparaison des opérateurs, détaillée en Annexe E, est synthétisée dans les sections suivantes.

9.5.6.2 Opérateurs d'accouplement

Nous avons considéré 6 variantes des opérateurs de sélection des couples et 21 variantes des opérateurs de croisement chromosomique. Les optimisations ont été effectuées pour chaque combinaison de ces opérateurs, ainsi que pour deux tailles de population, deux opérateurs de sélection naturelle et deux opérateurs de mutation. Il en résulte 1'008 combinaisons pour lesquelles nous devons effectuer 10 optimisations, ce qui fait donc au total 10'080 optimisations. Le temps nécessaire à cette évaluation a été d'un peu plus de 90'000 h/cpu.

Les performances des opérateurs de sélection des couples sont relativement proches, autant en termes de score, de convergence, que de nombre d'évaluations. Globalement, nous observons que la répartition aléatoire constitue le moins bon opérateur et que la sélection par tournois avec 3 candidats est légèrement supérieure aux autres. L'influence sur le nombre d'évaluations est intéressante, puisque nous observons que les opérateurs fournissant les moins bons scores sont également ceux qui nécessitent le nombre d'évaluations le plus important. Ils ne présentent donc aucun intérêt. Cette analyse nous incite donc à rejeter la répartition par rang et la répartition aléatoire, et de considérer les sélections par roulette pondérée et par tournois, ces derniers étant sensiblement plus performants en termes de convergence et de nombre d'évaluations nécessaires.

L'analyse des opérateurs de croisement révèle quelques options légèrement supérieures à l'ensemble, quelques mauvaises, et beaucoup de moyennes. Au rang des mauvais opérateurs, nous trouvons tout d'abord le croisement heuristique, qui est également plus exigeant en nombre d'évaluations, ainsi que le croisement linéaire. Les croisements de type binaire (surtout avec 2 points de croisement, peu importe si β est partagé ou non) sont sensiblement meilleurs que les autres, surtout en termes de convergence. Le croisement en deux points en est relativement proche. L'analyse des détails (Annexe F) confirme ces tendances. Les autres opérateurs peuvent être considérés comme utilisables.

Pour ce qui est des autres options, nous avons pu constater les éléments suivants :

- L'opérateur de la mutation non uniforme est largement préférable à la mutation uniforme constante. L'impact de l'opérateur de mutation semble très important.
- Nous avons également observé qu'une plus grande population a une influence positive sur les scores et sur la convergence, mais requiert un temps de calcul plus important. Il convient donc de trouver un équilibre et il peut être pertinent d'effectuer davantage d'optimisations avec une population réduite plutôt que de considérer une très grande population. Nous supposons que la taille minimale pour obtenir des résultats satisfaisants dépend de la complexité du problème à traiter, c-à-d. du nombre de paramètres à optimiser et de la forme de la surface de réponse de la fonction objective.
- La sélection naturelle ne semble pas avoir beaucoup d'importance.
- La taille de la population intermédiaire ne doit pas être trop grande, une valeur de 50 % de la population totale semble être un choix satisfaisant.

9.5.6.3 Opérateurs de mutation

Après avoir analysé en détail les opérateurs d'accouplement, nous reconsidérons les opérateurs de mutation. Chacun des 10 opérateurs (voir section 9.5.2.6) est testé avec différentes options, amenant le nombre de variantes des opérateurs de mutation à 110. En analysant les résultats synthétisés par opérateur de mutation (Figure E.6) ou plus particulièrement les résultats détaillés (Annexe G), nous observons que les opérateurs de mutation ont un rôle très important sur les performances des optimisations, et que les opérateurs de reproduction semblent de seconde importance. Cette observation rejoint notre analyse de la section précédente ainsi que les travaux de Bäck (1996), lequel argumente en faveur de l'importance de la mutation sur l'accouplement. Il va même jusqu'à suggérer, en opposition avec la théorie de Holland (1992a), que les croisements chromosomiques ont principalement un rôle correctif des opérations de mutation. Différentes études ont également identifié l'importance de l'opérateur de mutation par rapport à celui de la reproduction (voir p.ex. Bäck, 1992a; Bäck et Schütz, 1996; Smith et Fogarty, 1997; Deb et Beyer, 1999; Haupt et Haupt, 2004; Costa et al., 2005, 2007).

Les opérateurs de mutation à loi normale variable et uniforme variable sont très mauvais et difficilement paramétrables. Nous observons ensuite un paquet d'opérateurs présentant plus ou moins les mêmes scores et requérant une quantité variable d'évaluations. L'analyse de la convergence nous permet de mettre en avant 3 opérateurs :

- **Mutation non uniforme** : cet opérateur est clairement le meilleur en termes de convergence, mais le nombre d'évaluations requises peut toutefois être relativement conséquent. Le principal désavantage de la mutation non uniforme est le nombre de paramètres qu'il est difficile d'estimer a priori. Ces paramètres doivent être bien choisis pour être en phase avec la vitesse d'évolution de la population, et sont donc dépendants du problème traité. En analysant les détails de cette étude (cf. Annexe G), il semblerait que le coefficient ω n'influence pas les performances. Le rôle de G_{max} est plutôt difficile à juger, mais ne semble pas primordial. Ce qui est évident, c'est l'importance du taux de mutation, qui, en étant ici plus élevé, améliore le score et la convergence, mais augmente le nombre d'évaluations.

- **Chromosome de rayons de recherche adaptatifs** : au contraire du précédent, cet opérateur est très robuste, puisqu'il ne nécessite aucun paramètre et s'autogère. Il est ici un peu moins performant, mais ne nécessite pas de paramétrisation, ce qui est un avantage important. Il est intéressant de constater que notre insertion d'un chromosome supplémentaire représentant le rayon de recherche donne de meilleures performances que les autres opérateurs auto-adaptatifs (tel que, p.ex., le chromosome de taux de mutation adaptatifs).

- **Mutation multi-échelles** : finalement, notre mutation multi-échelles peut également être considérée comme plutôt robuste, puisqu'elle ne nécessite qu'un seul paramètre, à savoir le taux de mutation. Les détails de cette étude (cf. Annexe G) révèlent qu'un taux de mutation élevé est ici préférable.

Lors d'une optimisation par les algorithmes génétiques, il peut être prudent de considérer ces trois opérateurs en parallèle, et donc d'obtenir des paramètres résultant d'algorithmes étant soit très performants, soit très robustes. Il est intéressant de relever que les trois meilleures techniques intègrent une notion de distance de mutation. Il est vraisemblable que cette notion soit la clé de ces algorithmes et leur permette dans un premier temps d'explorer, puis de converger. Le rayon de recherche incarne en effet directement la notion de la transition entre exploration et exploitation, à notre avis davantage qu'une éventuelle évolution du taux de mutation. Avec une telle approche, les algorithmes génétiques deviennent capables d'identifier l'optimum global plus facilement.

Une étude plus poussée de la paramétrisation des trois meilleurs opérateurs de mutation a ensuite été effectuée. Pour une méthode assez simple (la méthode de référence R1), la mutation non uniforme est meilleure en termes de score et de convergence, mais nécessite davantage de temps de calcul. La mutation multi-échelles montre des performances variables, mais qui sont ici systématiquement inférieures à la méthode non uniforme. Finalement, le chromosome de rayons de recherche adaptatifs affiche de meilleures performances que l'approche multi-échelles, mais celles-ci restent ici inférieures à celles de la mutation non uniforme. Cette dernière est efficace pour la méthode R1, sous la condition qu'elle soit bien paramétrée pour la fonction objective.

Ensuite, nous avons renouvelé l'exercice sur un autre groupement pluviométrique, à savoir celui du Chablais. Les performances des opérateurs de mutation sont ici davantage similaires, et les taux de mutation optimaux sont plus bas que précédemment. Cette différence illustre bien le problème de la paramétrisation de cet opérateur, qui influence notablement les performances. Il semble donc difficile de généraliser un taux de mutation pour l'optimisation de toute méthode des analogues. Dans cette perspective, le chromosome de rayons de recherche adaptatif est intéressant, puisqu'il devrait s'adapter au problème de manière automatique. Ses performances sont d'ailleurs remarquables pour ce cas d'étude, où il est dans les meilleures options, avec un nombre d'évaluations minimal.

9.5.6.4 Sélection automatique du niveau atmosphérique

Jusqu'à présent, nous avons fixé les niveaux atmosphériques de la méthode de référence R1. Nous désirons maintenant donner ce degré de liberté supplémentaire à l'optimiseur, afin qu'il propose d'éventuelles améliorations. Ce paramètre doit être optimisé de manière un peu différente des autres, puisqu'il ne peut pas être vraiment considéré comme continu, mais représente plutôt une liste de valeurs. L'algorithme choisit donc un indice de cette liste et utilise la valeur associée, mais ne travaille pas directement avec les valeurs. Cette différence a pour conséquence qu'il n'y a pas de réelle notion de distance entre les niveaux, et que, en conséquence, les opérateurs de mutation basés sur une telle notion ne peuvent pas l'exploiter et sont réduits à un tirage aléatoire uniforme. Cet aspect est similaire lors de l'optimisation du choix de la variable d'analogie, dont les possibilités sont données là aussi sous forme de liste.

Les résultats montrent que la convergence vers une solution unique a significativement diminué. La perte de notion de distance entre les valeurs à optimiser a certainement un impact négatif sur les performances des opérateurs de mutation exploitant cette propriété. Il est possible que l'optimisation soit trop rapide sur les autres paramètres pour que le niveau atmosphérique converge systématiquement. Les autres opérateurs pourraient à nouveau être évalués à cette fin dans le cadre d'une autre étude.

Toutefois, si la convergence peut-être discutable, les résultats sont tout de même de bonne qualité. Les niveaux retenus sont des solutions possibles donnant des résultats satisfaisants et souvent très proches. Cette application est intéressante, puisque nous optimisons ici simultanément les niveaux atmosphériques, les fenêtres temporelles et spatiales et le nombre d'analogues ! Une évaluation de tous ces paramètres exige de multiples évaluations de toutes les combinaisons possibles lors des démarches habituelles de calibration. De plus, ces études sont souvent effectuées avec une fenêtre spatiale de taille fixe et un nombre d'analogues déterminé. Nous avons donc bon espoir de trouver des solutions d'aussi bonne qualité, voire meilleures, mais de manière automatisée.

9.5.6.5 Méthodes à plusieurs niveaux d'analogie

La méthode des analogues étant constituée habituellement de plus d'un niveau d'analogie, nous avons ensuite évalué l'optimisation pour la méthode de référence R2, constituée d'une première analogie sur la circulation, et d'une seconde sur l'humidité. Nous observons que les options de mutation suivantes donnent des performances semblables : le chromosome de rayons de recherche adaptatifs, la mutation non uniforme avec une faible probabilité de mutation, la mutation multi-échelles, avec des taux de mutation identiques.

Finalement, nous considérons une méthode encore plus complexe, à savoir la méthode R4, qui intègre une présélection sur la température. Chaque paramètre de la présélection (niveaux atmosphériques, fenêtres spatiales et temporelles, nombre d'analogues) doit également être optimisé conjointement avec les autres niveaux d'analogie. Les paramètres résultant de cette optimisation sont plus réalistes que ceux proposés par la calibration classique. À nouveau, bien que des scores satisfaisants soient atteints, la convergence n'est pas garantie, en raison de l'optimisation des niveaux atmosphériques. La comparaison des opérateurs de mutation confirme nos conclusions précédentes.

9.5.6.6 Conclusions

Nous avons évalué l'optimisation par les algorithmes génétiques sur des méthodes de difficulté variable. Cet outil présente un très grand intérêt en raison de la qualité des résultats obtenus et de l'économie effectuée sur les démarches fastidieuses de comparaison de niveaux atmosphériques et de fenêtres temporelles. De plus, les paramètres obtenus sont le résultat d'une démarche objective, sans les effets pervers observés lors d'une approche classique (par exemple entre le nombre d'analogues prédéfini et la fenêtre spatiale), effets que nous ne maîtrisons pas.

Nous avons évalué un grand nombre de combinaisons d'opérateurs afin d'être en mesure de faire des recommandations pour l'optimisation de la méthode des analogues. Nos conclusions sont les suivantes :

- L'optimisation ne converge pas systématiquement vers l'optimum global (mais quand même souvent dans son entourage), et il est donc recommandé d'effectuer **plusieurs optimisations** (par exemple 10) et de comparer les résultats pour en analyser la convergence et en conserver les meilleurs.
- Une **taille de population** plus importante améliore les résultats, mais nécessite davantage de temps de calcul. Nous recommandons une population de 50 membres pour la calibration de R1, de 100 pour la méthode R2, et de 100 à 200 pour des méthodes encore plus complexes.
- Il ne semble pas que le ratio de la **population intermédiaire** soit déterminant. Une valeur de 50 % semble tout à fait adaptée.
- Le ratio-élitisme est légèrement préférable aux tournois pour l'**opérateur de sélection naturelle**.
- Les performances des **opérateurs de sélection des couples** sont relativement proches. Les sélections par roulette pondérée et par tournois sont sensiblement plus performantes en termes de convergence et de nombre d'évaluations nécessaires.
- La plupart des **opérateurs de croisement** ont des performances relativement proches. Les croisements de type binaire, surtout avec 2 points de croisement, sont sensiblement meilleurs que les autres, surtout pour la convergence.
- Les **opérateurs de mutation** ont une influence clairement dominante. Trois opérateurs de mutation sortent du lot, dont deux que nous avons élaborés :
  - Mutation non uniforme : cet opérateur présente potentiellement le meilleur taux de convergence, pour autant qu'il soit bien paramétré. En revanche, si l'évolution de la population n'a pas été correctement estimée au préalable, et que nous choisissons une mauvaise valeur parmi ses trois paramètres, l'optimisation peut être médiocre. Son potentiel est donc prometteur, mais l'opérateur est difficile à maîtriser, car les paramètres sont nombreux et leur valeur dépend du problème à optimiser.
  - Chromosome de rayons de recherche adaptatifs : nous avons élaboré le chromosome de rayons de recherche adaptatifs en nous inspirant du chromosome de taux de mutation adaptatifs. Notre version est plus performante, car elle intègre une notion de distance dans l'espace des paramètres, qui décroît avec l'évolution de la population, améliorant ainsi la convergence. Une grande force de cet opérateur est qu'il ne nécessite aucun paramètre, il s'autocontrôle et évolue avec la population, ce qui le rend très robuste.
  - Mutation multi-échelles : la mutation multi-échelles est une nouvelle approche qui ne cherche pas une évolution de l'opérateur de mutation, mais qui effectue des re-

cherches globales, régionales et locales en tout temps. Il est ainsi constamment en train d'explorer l'espace des paramètres complet et d'exploiter l'information locale, les deux aspects importants des algorithmes génétiques. Il ne nécessite qu'un seul paramètre, qui est le taux de mutation. Celui-ci doit cependant être bien choisi, et cette valeur change en fonction de la méthode à optimiser.

Lors d'une optimisation par les algorithmes génétiques, il peut être prudent de considérer ces trois opérateurs en parallèle, et donc d'obtenir des paramètres résultant d'algorithmes étant soit très performants, soit très robustes. Il semblerait que la mutation non uniforme soit préférable pour des méthodes simples, alors que les autres le deviennent lorsque la méthode à optimiser se complexifie. Nous proposons donc, au lieu d'effectuer plusieurs fois une optimisation avec les mêmes paramètres, de considérer l'ensemble suivant :

- 1x Mutation non uniforme, $p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
- 1x Mutation non uniforme, $p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$
- 1x Mutation non uniforme, $p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$
- 1x Mutation multi-échelles, $p_{mut} = 0.1$
- 1x Mutation multi-échelles, $p_{mut} = 0.2$
- 2x Chromosome de rayons de recherche adaptatifs

Le choix automatique du niveau atmosphérique aboutit à des paramètres acceptables, mais pouvant légèrement varier d'une optimisation à l'autre. Ceci est dû à une autre représentation de ce paramètre, que les opérateurs de mutation ne peuvent pas faire évoluer à la manière des autres. De nouvelles évaluations de l'effet de tous les opérateurs sur le choix du niveau atmosphérique pourraient faire l'objet d'une étude future.

Chapitre 10

Optimisation automatique des paramètres de la méthode des analogues

Les outils d'optimisation automatique présentés au chapitre précédent sont ici appliqués à la méthode des analogues sur la période de calibration complète et pour tous les groupements pluviométriques. Plusieurs paramétrisations sont considérées successivement, par complexité croissante.

Nous pouvons ainsi principalement retravailler l'analogie de circulation en y ajoutant des degrés de liberté supplémentaires que nous ne pourrions calibrer que difficilement autrement.

L'analogie d'humidité est encore brièvement réévaluée.

10.1 Introduction du chapitre

Ce chapitre présente les résultats de l'application des algorithmes génétiques pour l'optimisation automatique de la méthode des analogues. Nous allons tout d'abord chercher à améliorer l'analogie de circulation de manière indépendante, puis nous la considérerons conjointement avec celle sur l'humidité. Nous conclurons sur les performances de cette optimisation, et sur les gains obtenus dans la méthode des analogues.

10.2 Application des algorithmes génétiques

Nous avons précédemment évalué une approche d'optimisation automatique à l'aide des algorithmes génétiques (AGs), qui s'est avérée intéressante. Nous désirons à présent utiliser cette technique pour chercher à améliorer la paramétrisation des méthodes de référence. Nous nous basons donc sur les recommandations suggérées dans la section précédente pour optimiser les méthodes sur la période de calibration complète (nous travaillions précédemment sur une très petite période de 5 ans). L'archive complète s'étend de 1961 à 2008, et elle est divisée en une période de calibration et une période de validation indépendante (voir section 4.2.6). Si rien n'est précisé, nous effectuons 7 optimisations par groupement, avec les options suivantes des AGs :

- taille de la population : 150 ou 200 ;
- ratio de la population intermédiaire : 50 % ;
- sélection naturelle : ratio-élitisme ;
- sélection des couples : roulette pondérée par le rang ;
- croisement chromosomique : de type binaire en 2 points (avec partage de β) ;
- options de mutation :
  - 1x mutation non uniforme, $p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$;
  - 1x mutation non uniforme, $p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$;
  - 1x mutation non uniforme, $p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$;
  - 1x mutation multi-échelles, $p_{mut} = 0.1$;
  - 1x mutation multi-échelles, $p_{mut} = 0.2$;
  - 2x chromosome de rayons de recherche adaptatifs.

Lorsque les optimisations sont terminées, nous procédons à une homogénéisation des paramètres, c'est-à-dire à une réduction de leur variabilité entre groupements. Lors de cette étape, nous donnons une grande importance à la validation et acceptons de perdre en score de calibration si nous gagnons significativement en validation, de manière à mieux équilibrer la compétence sur les deux périodes. Nous gagnons ainsi en robustesse de la méthode.

Ces optimisations ont été réalisées sur un cluster de l'Université de Lausanne (*Intel Xeon based HPC cluster* à 96 processeurs fonctionnant sous la distribution Linux *RedHat*). Afin de pouvoir exploiter au maximum les ressources du cluster, les runs ne doivent pas durer plus de 24 h. Nous avons donc parfois dû limiter le nombre de degrés de liberté pour tenir dans ce créneau temporel.

10.3 Amélioration de l'analogie de circulation

Nous allons tenter d'améliorer en premier lieu l'analogie de circulation de manière indépendante par rapport à celle sur l'humidité. Notre démarche consiste à donner toujours plus de liberté à l'algorithme d'optimisation afin d'être en mesure d'identifier les degrés de liberté ayant un intérêt particulier, ainsi que les interdépendances entre certains paramètres. Ainsi, les paramétrisations proposées dans les sections suivantes évoluent en complexité de manière itérative et ne devraient pas toutes être implémentées en prévision opérationnelle.

10.3.1 Optimisation des fenêtres spatiales et temporelles

Nous considérons en premier lieu la méthode R1 et optimisons les fenêtres spatiales sur les deux niveaux, à savoir 500 et 1000 hPa (sans contrainte de recouvrement), ainsi que les fenêtres temporelles. Ces dernières ne pouvaient pas être optimisées de manière automatique par la calibration classique, mais elles devaient être évaluées systématiquement. Or, si cela est relativement facile lorsque nous travaillons avec 2 niveaux atmosphériques, le nombre de combinaisons augmente rapidement si nous considérons davantage de niveaux. Il y a donc deux éléments nouveaux ici, pour lesquels une optimisation globale est nécessaire :

- le choix de fenêtres spatiales distinctes par niveau atmosphérique, et optimales de manière conjointe ;
- le choix automatique des fenêtres temporelles, optimales pour les fenêtres spatiales choisies.

Les paramètres résultant de l'optimisation et de l'homogénéisation (voir Table 10.1) présentent des différences comparativement aux paramètres de la méthode R1. Les fenêtres temporelles sont passées de 12 et 24 h UTC à deux fois 18 h UTC, et les fenêtres spatiales des deux niveaux atmosphériques sont différentes et ne sont pas complètement recouvrantes (voir Figure 10.1). Une disposition plutôt méridienne peut être observée pour les fenêtres à 500 hPa, et zonale pour les fenêtres à 1000 hPa. La région A, constituée de 5 groupements pluviométriques, a une fenêtre spatiale très étendue au sud sur le champ 500 hPa. Les gains associés à ce jeu de paramètres sont confirmés en validation (voir Table 10.2), et de multiples

Table 10.1 – Paramètres de la méthode R1 optimisés par les AGs.

Région	Niveau atmo.	H	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_1	Groupements
A	500	18	0	15	25	27.5	33	1,2,3,4,5
	1000	18	-5	22.5	40	7.5		
B	500	18	5	7.5	42.5	7.5	30	7,8,9
	1000	18	-2.5	20	37.5	10		
C	500	18	2.5	10	42.5	7.5	35	6
	1000	18	-2.5	20	40	7.5		
D	500	18	2.5	10	42.5	7.5	32	10
	1000	18	0	17.5	40	7.5		

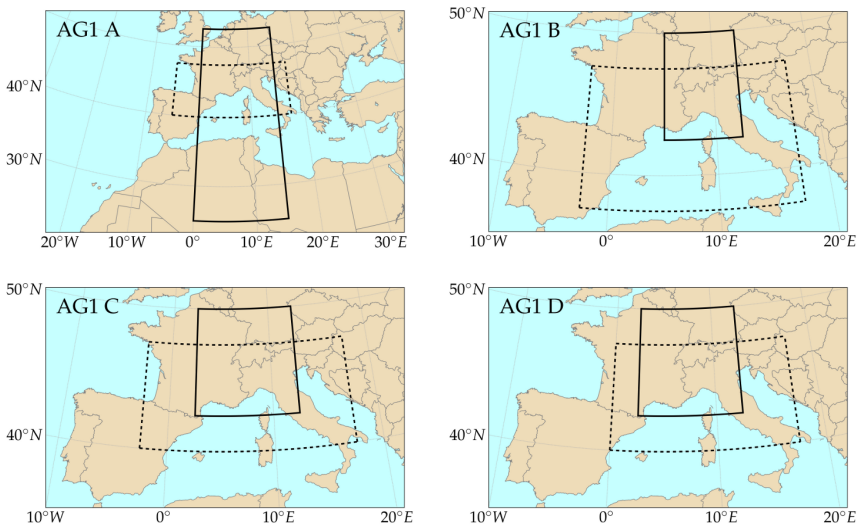


Figure 10.1 – Fenêtres spatiales de la méthode R1 optimisées par les AGs. Les traits continus concernent le niveau 500 hPa, et les traits discontinus, le niveau 1000 hPa. Les lettres correspondent aux régions définies dans la Table 10.1.

Table 10.2 – Scores CRPSS des paramètres optimisés par les AGs et gains par rapport à la méthode de référence R1.

Groupements		**Calibration**			**Validation**		
		CRPSS (%)	**Δ**	**Gain (%)**	**CRPSS (%)**	**Δ**	**Gain (%)**
1	Chablais	36.55	1.080	**3.05**	35.90	1.489	**4.33**
2	Vallée du Trient	34.08	0.538	**1.60**	32.56	0.179	**0.55**
3	Alpes bernoises ouest	33.33	0.395	**1.20**	31.41	0.447	**1.44**
4	Vallée du Rhône aval	28.23	0.766	**2.79**	28.31	0.673	**2.43**
5	Vallées latérales gauches	30.95	0.685	**2.26**	34.27	0.562	**1.67**
6	Crêtes du sud	34.03	1.050	**3.18**	37.44	0.272	**0.73**
7	Vallée du Rhône amont	27.36	2.554	**10.30**	29.12	1.536	**5.57**
8	Crêtes du sud-est	34.06	2.407	**7.61**	38.09	1.614	**4.42**
9	Alpes bernoises est	30.10	0.920	**3.15**	27.96	0.249	**0.90**
10	Vallée de Conches	37.23	1.633	**4.59**	38.09	0.904	**2.43**

essais de réduction de cette fenêtre ont abouti à des pertes de compétence en calibration et en validation. Cette fenêtre est difficilement explicable, d'autant plus qu'elle est optimale pour des groupements sensibles à des flux d'ouest et non du sud. Nous porterons un réel intérêt à cette paramétrisation uniquement dans le cas où elle demeure par la suite, lors de l'ajout de degrés de liberté.

Ces changements amènent des gains très variables (de 0.5 % à 10 %) entre les groupements. Les gains les plus importants concernent la vallée du Rhône amont ainsi que les crêtes du sud-est. Quelques essais nous ont indiqué que les gains sont dus aux deux changements des fenêtres spatiales et temporelles. Le changement des fenêtres temporelles améliore sensiblement le score de tous les groupements, mais les plus gros gains sont dus aux fenêtres spatiales différenciées.

10.3.2 Optimisation des niveaux atmosphériques

Nous désirons à présent donner un degré de liberté supplémentaire aux AGs en optimisant le choix des niveaux atmosphériques, conjointement aux autres paramètres. L'évaluation des niveaux atmosphériques est également un procédé non automatisé dans la calibration classique. Les valeurs à choix sont les suivantes : 300, 400, 500, 600, 700, 850, 925, et 1000 hPa. Nous avons pu constater lors de l'optimisation, que ce degré de liberté diminue le nombre de simulations qui convergent vers une solution unique. Cet aspect avait déjà été relevé lors de l'évaluation des AGs (voir section 9.5.5), et suggère que de nouveaux tests sur les options des AGs devraient être effectués pour améliorer la convergence du choix des niveaux atmosphériques. Toutefois, cette variabilité n'est pas extrême, et les différentes paramétrisations proposées sont de bonne qualité et ont des paramètres sensés.

Table 10.3 – Paramètres de l'analogie de circulation avec optimisation des niveaux atmosphériques.

Région	Niveau atmo.	H	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	N_1	Groupements
A	700	12	-2.5	15	42.5	10	32	1
	1000	24	0	17.5	40	10		
B	700	24	2.5	10	42.5	5	33	2,3,4,9
	1000	12	-5	22.5	40	7.5		
C	700	12	0	15	42.5	5	43	5
	1000	24	0	17.5	37.5	10		
D	700	12	2.5	10	42.5	7.5	30	6
	925	24	0	17.5	40	7.5		
E	500	18	5	7.5	42.5	7.5	31	7
	1000	18	-2.5	20	37.5	10		
F	500	18	2.5	12.5	45	2.5	25	8
	925	12	0	17.5	37.5	12.5		
G	500	18	2.5	10	42.5	7.5	32	10
	1000	18	0	17.5	40	7.5		

Table 10.4 – Scores CRPSS des paramètres de l'analogie de circulation avec optimisation des niveaux atmosphériques par les AGs et gains par rapport à la méthode de référence R1.

Groupements		Calibration			Validation		
		CRPSS (%)	Δ	Gain (%)	CRPSS (%)	Δ	Gain (%)
1	Chablais	37.26	1.79	**5.06**	35.82	1.41	**4.11**
2	Vallée du Trient	35.02	1.48	**4.41**	33.19	0.81	**2.50**
3	Alpes bernoises ouest	34.57	1.64	**4.97**	33.00	2.03	**6.56**
4	Vallée du Rhône aval	28.63	1.16	**4.22**	29.14	1.50	**5.43**
5	Vallées latérales gauches	31.65	1.39	**4.59**	34.03	0.32	**0.94**
6	Crêtes du sud	34.39	1.42	**4.29**	37.60	0.43	**1.17**
7	Vallée du Rhône amont	27.38	2.57	**10.36**	28.99	1.40	**5.09**
8	Crêtes du sud-est	34.65	3.00	**9.48**	38.14	1.67	**4.57**
9	Alpes bernoises est	30.44	1.26	**4.32**	29.20	1.49	**5.38**
10	Vallée de Conches	37.23	1.63	**4.59**	38.09	0.90	**2.43**

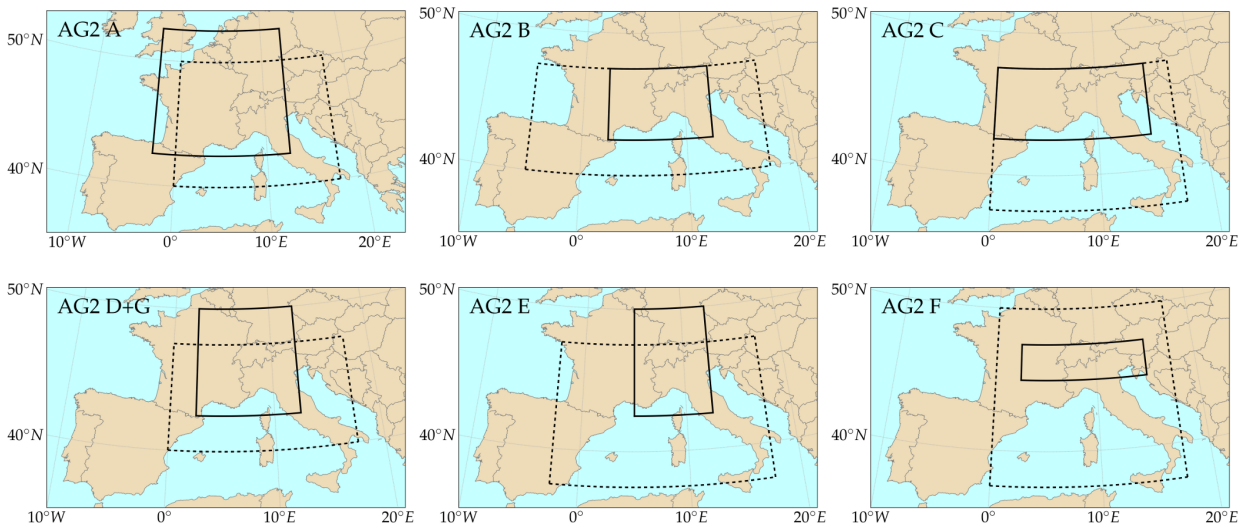


Figure 10.2 – Fenêtres spatiales de l'analogie de circulation avec optimisation des niveaux atmosphériques. Les traits continus concernent les niveaux supérieurs, et les traits discontinus, les niveaux inférieurs.

Les niveaux optimaux ne sont pas toujours les 500 et 1000 hPa des méthodes de référence (voir Table 10.3). Seuls les groupements de la vallée du Rhône amont et de la vallée de Conches n'ont pas changé le choix des niveaux atmosphériques et présentent donc la même paramétrisation que précédemment. Une grande variété de combinaisons de niveaux atmosphériques et de fenêtres temporelles peut être observée. Ces dernières ne sont d'ailleurs plus toutes alignées à 18 h UTC, mais se répartissent entre 12 et 24 h UTC. Il est intéressant de constater que les niveaux supérieurs à 500 hPa n'ont été sélectionnés par aucun groupement.

L'optimisation nous a fourni de multiples paramétrisations très différentes d'un groupement à l'autre, qu'il nous a été difficile d'homogénéiser. Nous n'avons en réalité été capables de regrouper que 4 groupements sans engendrer des pertes notables en performances.

La fenêtre spatiale très étendue au sud présente dans la Figure 10.1 a maintenant disparu (voir Figure 10.2). Tous les groupements pour lesquels cette paramétrisation était optimale préfèrent maintenant une fenêtre plus réduite, mais sur le géopotentiel à 700 hPa au lieu de 500 hPa.

Les tailles et positions des fenêtres spatiales varient d'un groupement à l'autre. De manière générale, la taille de la fenêtre pour le niveau atmosphérique supérieur (500 ou 700 hPa) est plus petite que celle proche de la surface (925 ou 1000 hPa). La fenêtre à 500 hPa pour le groupement des crêtes du sud-est (région F dans la Figure 10.2) peut surprendre avec son orientation selon les longitudes et sa très faible taille en latitude. Comme nous le supposions précédemment, il se pourrait que cette orientation permette de bien intégrer l'information des gradients proches du groupement, sans perturbation provenant de la variabilité de la courbure du flux plus au sud.

À part les groupements de la vallée du Rhône amont et de la vallée de Conches qui ont la même paramétrisation que précédemment (section 10.3), les valeurs de CRPSS ont augmenté pour chaque groupement (voir Table 10.4), et de manière significative. Un changement

de niveaux atmosphériques semble donc nécessaire pour la plupart des groupements. Toutefois, nous n'avons trouvé aucune sélection de deux niveaux satisfaisante pour l'ensemble des groupements. Ne désirant pas proposer une méthode composée de diverses combinaisons de niveaux atmosphériques, nous avons alors cherché à combiner davantage de niveaux afin d'intégrer suffisamment d'information pour satisfaire l'ensemble des groupements, sans toutefois noyer celle qui leur est réellement déterminante.

10.3.3 Ajout d'un troisième niveau atmosphérique

Afin de compléter l'analogie de circulation et de considérer des niveaux atmosphériques qui puissent être partagés entre les différents groupements, nous avons ajouté un troisième niveau dans la méthode à optimiser. Une amélioration des scores CPRSS en calibration et en validation apparaît (résultats non présentés), nous confirmant que cette information supplémentaire est bénéfique pour la qualité de la prévision. Les niveaux automatiquement sélectionnés sont le 1000 hPa pour l'analogie proche du sol (de manière systématique par tous les groupements), un niveau intermédiaire qui est soit 700 hPa, soit 850 hPa, et un niveau supérieur entre 300 et 600 hPa (résultats non présentés). Au niveau inférieur correspond une fenêtre temporelle à 6 ou 12 h UTC, celle-ci est à 24 h UTC pour le niveau intermédiaire, et à 12 ou 18 h UTC pour le niveau supérieur. Ces paramètres issus de l'optimisation font sens et présentent des tendances similaires d'un groupement à l'autre. Toutefois, les tentatives d'homogénéisation n'ont pas donné de résultats satisfaisants pour l'ensemble des groupements.

Il est intéressant de relever qu'un niveau atmosphérique n'a jamais été sélectionné deux fois dans la même analogie de circulation, alors même que l'optimiseur en avait la liberté. Cela aurait permis de donner davantage d'importance à un niveau par rapport à un autre, ou d'intégrer différentes fenêtres temporelles sur un même niveau. Ceci n'a jamais été observé, et l'optimisation semble répartir les niveaux atmosphériques afin de bien couvrir en tout cas la moitié inférieure de l'atmosphère. De même, lorsque nous considérons plus de deux niveaux, les fenêtres temporelles se répartissent dans la journée.

Après quelques analyses comparatives, nous avons tenté d'optimiser les paramètres de la méthode en fixant les niveaux à 500, 850 et 1000 hPa, ainsi qu'à 300, 700 et 1000 hPa. Toutefois, les groupements sont plus ou moins favorables à l'une ou l'autre de ces sélections, ce qui nous empêche à nouveau d'homogénéiser totalement la méthode.

10.3.4 Pondération de tous les niveaux atmosphériques

À la suite de tentatives infructueuses d'homogénéisation de l'analogie de circulation sur 2 ou 3 niveaux atmosphériques optimisés, nous avons considéré le problème différemment, et avons ajouté les 8 niveaux (300, 400, 500, 600, 700, 850, 925, et 1000 hPa), de manière à inclure l'ensemble des possibilités. Toutefois, nous avons ajouté une pondération des niveaux atmosphériques, elle aussi optimisée, afin que chaque groupement puisse donner plus ou moins d'importance aux différents niveaux.

La pondération intervient dans la combinaison des critères S1 par niveau, qui étaient auparavant moyennés à poids égal. L'optimiseur ne choisit donc pas ici les niveaux eux-mêmes, car ceux-ci sont fixés, mais il leur donne plus ou moins d'importance.

Une pondération des niveaux atmosphériques permet en premier lieu de tenir compte des changements de variabilité du géopotentiel avec l'altitude. En effet, les gradients sont plus irréguliers dans les basses couches que dans la partie supérieure de la troposphère, où les grandes formes de la circulation générale sont caractérisées par des vitesses généralement plus importantes. Cette pondération donne également un degré de liberté supplémentaire à l'optimiseur qui peut alors donner plus de poids aux niveaux présentant une plus grande capacité prévisionnelle.

Le premier problème que nous avons rencontré est le temps nécessaire pour cette optimisation, qui ne tient pas facilement dans le créneau de calcul de 24 h. De plus, les résultats (non présentés) sont alors très complexes, car composés de 8 fenêtres spatiales différentes – une par niveau – et d'autant de valeurs de la pondération. L'optimisation n'a pas éliminé de niveau, en attribuant des poids nuls, mais chaque niveau participe dans une plus ou moins grande mesure à l'analogie de circulation. Cette complexité permet à l'optimiseur de gagner sur les scores en calibration, mais les paramètres ne sont pas robustes, car la validation ne confirme pas ces gains.

Nous avons alors cherché à simplifier le problème en supprimant quelques niveaux qui semblaient moins importants (400, 600 et 925 hPa), pour n'en considérer que 5, toujours intégrés de manière fixe : 300, 500, 700, 850, et 1000 hPa. Les paramètres semblent alors plus robustes, mais pas encore optimaux.

10.3.5 Analogie de circulation sur 4 niveaux atmosphériques

Nous avons donc tenté d'optimiser différentes sélections de niveaux atmosphériques, et le nombre optimum de niveaux semble être de 4. Au-delà de ce nombre, les gains en calibration ne sont plus substantiels, alors que ceux de la validation replongent. Différentes combinaisons de niveaux ont été optimisées, avec et sans pondération. Au final, la meilleure combinaison est celle que nous avions identifiée précédemment dans la méthode M6 (voir section 8.5.1), soit les niveaux 500, 700, 850 et 1000 hPa, mais en considérant une pondération entre ceux-ci. Ces résultats nous confortent dans la pertinence de la méthode M6, qui semble optimale pour tous les groupements, et donc dans son potentiel d'amélioration de l'analogie de circulation, également dans d'autres régions. Bien que nous n'ayons pas pu tester une sélection automatique de 4 niveaux avec pondération pour des raisons de dépassement du créneau temporel, nous sommes plutôt confiants dans cette sélection, car les autres combinaisons évaluées sont toujours défavorables à certains groupements.

Les différences retenues avec la méthode M6 sont les suivantes :

- Les fenêtres temporelles sont optimisées.
- Une pondération entre les différents niveaux atmosphériques est introduite.
- Les fenêtres spatiales ne sont pas forcément recouvrantes entre les différents niveaux.
- Le nombre d'analogues est optimisé conjointement.

Table 10.5 – Paramètres de l'analogie de circulation avec pondération des 4 niveaux atmosphériques.

Région	Niveau atmo.	H	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	Poids	N_1	Groupements
A	500	12	0	10	45	2.5	0.22	33	1
	700	18	2.5	10	42.5	5	0.14		
	850	24	0	12.5	40	7.5	0.41		
	1000	6	-2.5	15	42.5	5	0.23		
B	500	12	0	10	45	2.5	0.23	33	2,4,5
	700	18	5	7.5	42.5	5	0.21		
	850	24	0	12.5	42.5	2.5	0.31		
	1000	6	-5	17.5	42.5	2.5	0.25		
C	500	12	2.5	7.5	45	2.5	0.18	33	3
	700	18	2.5	10	42.5	5	0.26		
	850	24	0	12.5	42.5	2.5	0.28		
	1000	6	-5	17.5	42.5	5	0.28		
D	500	12	2.5	7.5	45	2.5	0.20	27	6
	700	18	7.5	5	45	2.5	0.19		
	850	24	-2.5	15	40	5	0.35		
	1000	6	0	12.5	40	7.5	0.26		
E	500	12	5	5	45	2.5	0.25	25	7
	700	18	7.5	5	45	2.5	0.26		
	850	24	2.5	10	42.5	2.5	0.23		
	1000	6	-5	17.5	37.5	7.5	0.26		
F	500	12	2.5	7.5	45	2.5	0.25	23	8
	700	18	7.5	5	45	2.5	0.32		
	850	24	-2.5	15	40	5	0.20		
	1000	6	0	12.5	37.5	7.5	0.23		
G	500	12	2.5	7.5	45	2.5	0.19	28	9,10
	700	18	7.5	5	42.5	5	0.25		
	850	24	0	12.5	40	7.5	0.32		
	1000	6	-2.5	15	42.5	5	0.24		

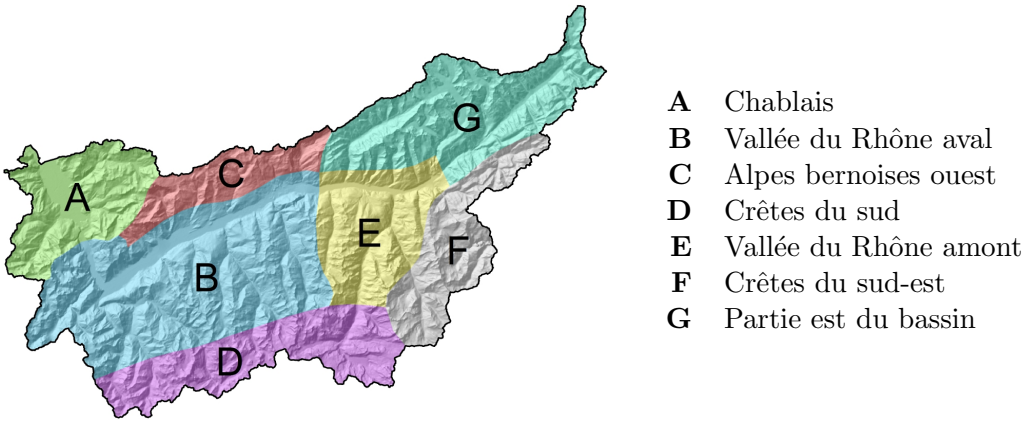


Figure 10.3 – Régions pour l'analogie de circulation avec pondération des 4 niveaux atmosphériques. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

La sélection des fenêtres temporelles pour chaque niveau est identique pour la plupart des stations. Il y a 3 groupements (Alpes bernoises ouest, vallée du Rhône amont, et crêtes du sud-est) pour lesquels l'optimiseur n'a pas choisi les mêmes heures. Dans un souci d'homogénéité, nous avons recommencé de nouvelles optimisations sur ces groupements en fixant les heures à des valeurs identiques aux autres. Les scores résultants sont très semblables aux valeurs précédentes et les fenêtres temporelles de chacun de ces niveaux peuvent donc être homogénéisées.

Les niveaux et les fenêtres temporelles proposés sont les suivants :

- 500 hPa à 12 h UTC ;
- 700 hPa à 18 h UTC ;
- 850 hPa à 24 h UTC ;
- 1000 hPa à 06 h UTC.

Nous avons donc pu homogénéiser le choix des niveaux atmosphériques et des fenêtres temporelles. En revanche, les fenêtres spatiales et les pondérations par groupement demeurent assez variables, et nous n'avons pu en assembler que quelques-uns (voir Table 10.5 et Figure 10.3). Cette multitude de paramètres n'est certes pas idéale, mais nous n'avons pas pu les simplifier sans perdre sur les scores de calibration et de validation. Ces paramètres ne sont évidemment pas transposables à d'autres régions.

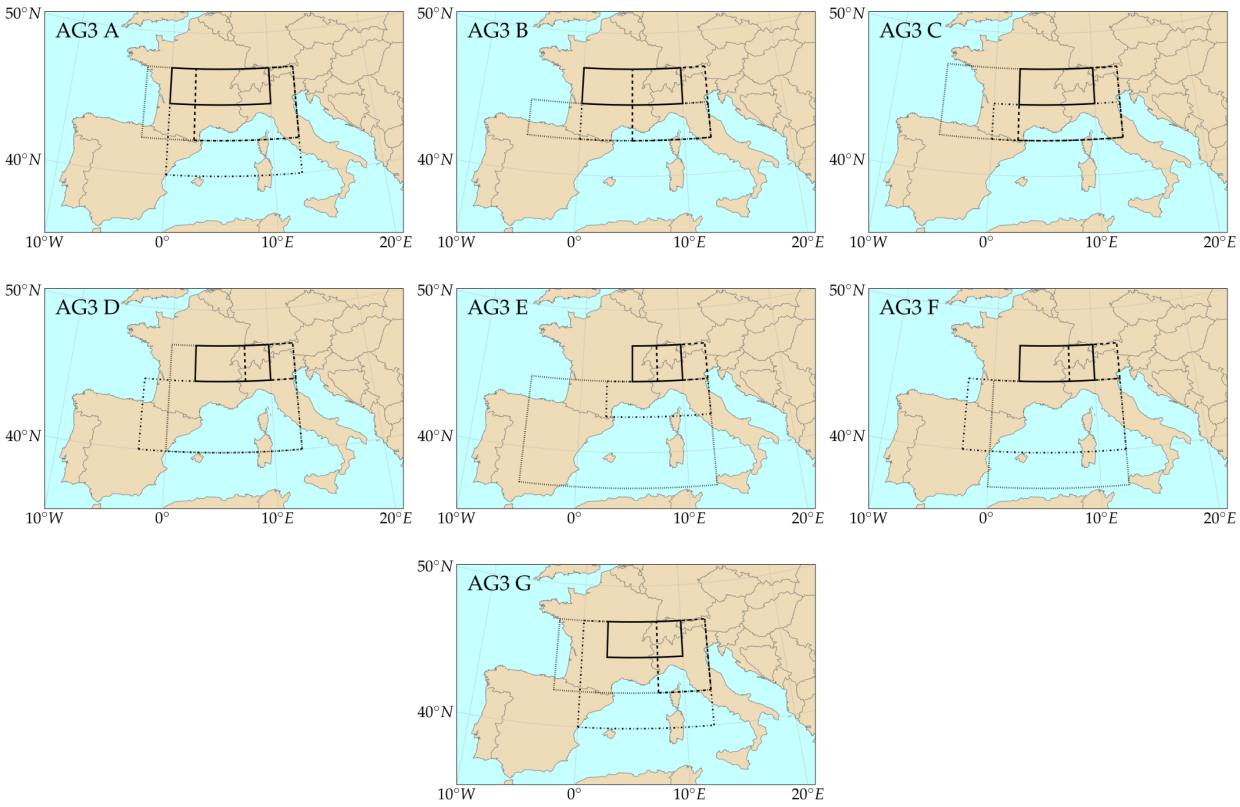


Figure 10.4 – Fenêtres spatiales de l'analogie de circulation avec pondération des 4 niveaux atmosphériques. Les traits continus concernent le niveau 500 hPa, les traits discontinus, le niveau 700 hPa, les traits-points, le niveau 850 hPa, et les pointillés, le niveau 1000 hPa.

Les fenêtres spatiales, illustrées dans la Figure 10.4, peuvent paraître de prime abord surprenantes, mais en les analysant, des tendances claires et une cohérence entre les groupements peuvent être observées. Nos observations sont les suivantes :

- Les fenêtres optimales au niveau 500 hPa sont relativement similaires entre les différents groupements. Elles sont juste plus ou moins étendues en direction de l'ouest.
- Au niveau 700 hPa, les fenêtres ont grossièrement deux formes et positions. La première est une fenêtre de taille moyenne plus ou moins centrée sur la Suisse et un peu décalée au sud. Celle-ci est présente pour les régions A, B, et C. Pour les autres régions, la fenêtre est très petite et se situe sur l'est de la Suisse.
- Les fenêtres sur les niveaux 850 et 1000 hPa semblent orientées dans la direction des influences principales. Ainsi, pour les groupements sensibles aux perturbations d'ouest, elles seront dirigées dans cette direction, alors que pour les groupements plus sensibles aux flux de sud, les fenêtres ont tendance à largement s'ouvrir sur la Méditerranée.
- Les fenêtres des régions A, B et C partagent beaucoup de similarités.
- Les fenêtres des crêtes du sud (D) et des crêtes du sud-est (F) sont quasiment identiques, seule la position de celle du niveau 1000 hPa change légèrement

Par intuition, nous aurions attendu des fenêtres plus grandes aux niveaux supérieurs par rapport aux niveaux inférieurs, car la vitesse du flux est plus importante. Toutefois, les résultats aux différents groupements montrent systématiquement la tendance inverse. Cette observation avait également été faite lors de l'optimisation de deux niveaux atmosphériques. Après analyse de ces résultats, nous émettons l'hypothèse suivante : les fenêtres sont systématiquement plus petites pour le niveau 500 hPa, car seule l'information de la vitesse et de la direction du flux juste au-dessus du bassin importe, et non sa provenance, alors que pour les basses couches (surtout à 1000 hPa), la structure de la circulation a plus d'importance, car elle renseigne sur le chemin qu'a parcouru la masse d'air éventuellement chargée en humidité avant d'arriver sur la zone d'intérêt.

Table 10.6 – Scores CRPSS des paramètres de l'analogie de circulation optimisée par les AGs et gains par rapport à la méthode de référence R1, ainsi que la méthode M6.

Groupements		**Calibration**			**Validation**		
		CRPSS (%)	**G(R1)** (%)	**G(M6)** (%)	**CRPSS** (%)	**G(R1)** (%)	**G(M6)** (%)
1	Chablais	38.86	9.55	2.61	37.57	9.17	2.57
2	Vallée du Trient	36.71	9.44	2.73	35.08	8.35	2.98
3	Alpes bernoises ouest	36.15	9.78	2.62	33.92	9.53	1.85
4	Vallée du Rhône aval	30.39	10.63	4.76	30.29	9.58	3.68
5	Vallées latérales gauches	33.41	10.38	3.28	36.48	8.23	3.07
6	Crêtes du sud	36.26	9.96	3.14	40.02	7.68	3.34
7	Vallée du Rhône amont	28.77	15.98	4.64	29.76	7.89	1.26
8	Crêtes du sud-est	36.33	14.80	4.50	39.60	8.57	2.77
9	Alpes bernoises est	32.48	11.29	3.09	30.39	9.65	3.20
10	Vallée de Conches	39.08	9.78	2.52	39.61	6.51	2.07

Les scores CRPSS ainsi que les gains par rapport à la méthode de référence R1 et notre méthode M6 sont donnés dans la Table 10.6. Les gains par rapport à R1 sont très importants, puisqu'ils sont de 9.5 à 16 % en calibration et de 6.5 à 9.5 % en validation. Cette différence entre les valeurs de calibration et de validation révèle que les paramètres optimaux pour la calibration ne le sont pas forcément pour la période de validation. La seule manière de parer à ce problème serait de procéder à une validation croisée et de considérer le jeu de paramètres le plus optimal pour toutes les périodes. Les gains par rapport à la méthode M6 sont moindres, celle-ci étant déjà une amélioration de l'analogie de circulation, mais ils ne sont tout de même pas négligeables. Au vu de ces résultats, cette méthode doit être conservée, bien qu'elle soit très (voire trop) complexe.

Nous avons cherché à identifier quelle part du gain est attribuable à quel nouveau degré de liberté par rapport à la méthode M6. De manière générale, nous avons remarqué qu'il y a une forte dépendance entre ces paramètres (fenêtres spatiales, fenêtres temporelles et pondération des niveaux atmosphériques), et qu'il n'est pas recommandable de les considérer séparément. Par exemple, l'introduction des poids (non réoptimisés) dans les paramètres de la méthode M6 a un effet en moyenne nul, mais peut engendrer des pertes non négligeables sur les scores de certains groupements. Lorsque nous les introduisons successivement, les nouveaux paramètres se répartissent les gains en moyenne de la manière suivante (valeurs relatives par rapport au gain obtenu) :

- optimisation du nombre d'analogues : gain quasiment nul ;
- optimisation des fenêtres temporelles : 26 % en calibration et 22 % en validation ;
- optimisation des fenêtres spatiales non recouvrantes : 47 % des gains en calibration et 38 % en validation ;
- ajout de la pondération par niveau : 27 % des gains en calibration et 40 % en validation.

Nous ne pouvons donc pas réduire le nombre de degrés de liberté sans perdre sur les scores en calibration et en validation.

10.4 Amélioration de l'analogie d'humidité

Nous avons ensuite procédé à l'amélioration de l'analogie d'humidité de la méthode M7. Nous optimisons donc le flux d'humidité à 700 hPa. Cette variable étant une variable composée, l'optimisation du niveau atmosphérique ainsi que de la fenêtre temporelle n'est malheureusement pas encore implémentée. Cela s'explique par le fait qu'il y a des contraintes sur les niveaux atmosphériques ou les fenêtres temporelles propres à chaque variable composée (indice d'humidité, flux d'humidité, ou autres combinaisons, p.ex.), afin que le calcul conserve tout son sens. Nous voulons donc éviter de multiplier l'humidité relative à 925 hPa à 18 h UTC avec le vent à 600 hPa à 06 h UTC, ou, pire encore, de calculer un vent à partir de composantes à différents niveaux. Ces contraintes ne sont pas triviales à gérer de manière universelle dans une méthode d'optimisation, et cet aspect n'est donc pas encore implémenté.

Ainsi, nous ne pouvons pas optimiser automatiquement le niveau et la fenêtre temporelle de l'analogie sur le flux d'humidité, mais nous pouvons en optimiser la fenêtre spatiale et le nombre d'analogues.

10.4.1 Optimisation du flux d'humidité uniquement

Notre première approche consiste à reprendre les résultats de l'optimisation précédente sur l'analogie de circulation et de figer ce niveau d'analogie (niveaux atmosphériques, fenêtres spatiales et temporelles, et pondération) pour optimiser cette fois les nombres d'analogues des deux niveaux d'analogie ainsi que la fenêtre spatiale du flux d'humidité.

Table 10.7 – Scores CRPSS des paramètres de l'analogie d'humidité optimisée par les AGs et gains par rapport à la méthode de référence R2, ainsi que la méthode M7.

Groupements		**Calibration**			**Validation**		
		CRPSS (%)	**G(R2)** (%)	**G(M7)** (%)	**CRPSS** (%)	**G(R2)** (%)	**G(M7)** (%)
1	Chablais	43.38	5.86	1.33	43.87	9.63	0.75
2	Vallée du Trient	41.69	8.89	1.50	41.70	11.87	1.55
3	Alpes bernoises ouest	40.77	10.51	0.95	38.75	10.52	-1.38
4	Vallée du Rhône aval	35.23	9.68	2.27	37.17	13.21	2.05
5	Vallées latérales gauches	36.89	6.76	1.50	40.91	8.59	-1.07
6	Crêtes du sud	39.80	8.22	1.72	43.74	7.31	0.53
7	Vallée du Rhône amont	32.17	12.48	4.63	34.61	12.53	3.13
8	Crêtes du sud-est	38.80	12.66	4.26	42.45	10.13	3.32
9	Alpes bernoises est	37.40	10.74	1.62	35.73	10.31	-0.39
10	Vallée de Conches	41.79	10.37	1.51	42.51	8.38	-0.77

Les résultats, présentés dans la Table 10.7, affichent un gain systématique et important par rapport à la méthode R2, ainsi qu'un gain moindre par rapport à la méthode M7, où nous perdons même en validation pour 4 groupements. Cette optimisation du flux d'humidité de manière isolée semble donc ne pas être idéale. La raison pourrait être que l'analogie de circulation optimisée précédemment n'est plus paramétrée de manière optimale lorsque nous considérons le flux d'humidité, ou que le niveau atmosphérique et la fenêtre temporelle de ce dernier devraient être différents. Comme expliqué précédemment, nous ne sommes en mesure d'évaluer que la première hypothèse, ce qui est le sujet de la section suivante.

10.4.2 Optimisation des deux niveaux d'analogie conjointement

À la suite des résultats mitigés de l'optimisation du flux d'humidité de manière isolée, nous avons procédé à une optimisation conjointe de l'analogie de circulation et de celle sur l'humidité. Toutefois, en raison des contraintes expliquées précédemment, le niveau atmosphérique et la fenêtre temporelle du flux d'humidité ne sont pas optimisés.

Ces optimisations ont mené à des paramétrisations différentes de l'analogie de circulation par rapport à précédemment. Il existe donc bien des relations entre les paramètres des différents niveaux d'analogie, soit entre la circulation atmosphérique et le flux d'humidité. Ainsi, en connaissance de l'information du flux d'humidité, la méthode préférera une représentation différente de la circulation. Cet aspect n'a encore jamais été mis en évidence, car les outils habituels de calibration ne le permettent pas.

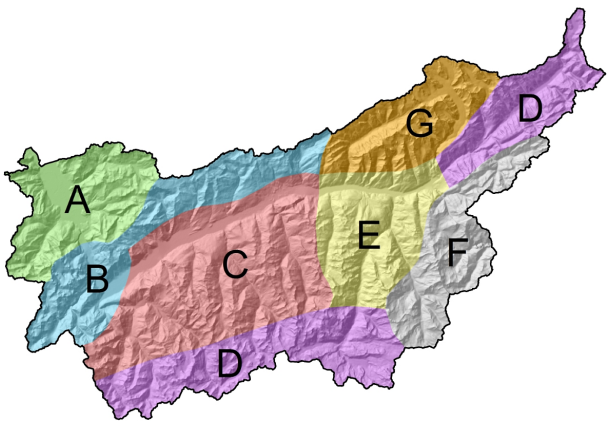
Pour tenir compte des dépendances entre les paramètres des différents niveaux d'analogie, il est nécessaire d'utiliser une méthode d'optimisation globale telle que les AGs. Les différences des fenêtres temporelles concernent les niveaux 700 et 1000 hPa :

- 500 hPa à 12 h UTC ;
- 700 hPa à 24 h UTC ;
- 850 hPa à 24 h UTC ;
- 1000 hPa à 12 h UTC.

À nouveau, il a été difficile d'homogénéiser les paramètres entre les groupements, et nous considérons au final 7 régions (voir Figure 10.5). Dans les détails des paramètres (voir Table 10.8), il apparaît que le nombre d'analogues du second niveau d'analogie n'est pas très différent de celui de la méthode élaborée uniquement sur l'analogie de circulation (voir Table 10.5). En revanche, le nombre d'analogues à retenir au premier niveau a largement augmenté, offrant une plus grande diversité de situations de la circulation. Cette tendance est identique à celle que nous observons lors du passage de la méthode R1 à R2 (voir section 6.3.3).

Les pondérations des niveaux atmosphériques varient d'un groupement à l'autre, et il est difficile d'en tirer une tendance. Toutefois, des optimisations indépendantes pour un même groupement convergent approximativement vers les mêmes valeurs, ce qui suggère qu'elles sont informatives. Elles sont certainement dépendantes des fenêtres spatiales considérées.

Les fenêtres spatiales (voir Figure 10.6) ont changé par rapport à l'analogie sur la circulation, seule. Elles ont tendance à être plus grandes, et plusieurs fenêtres descendent davantage au sud. Il est ici difficile d'identifier des tendances, d'autant plus que la variabilité est grande.



A Chablais
B Trient et Alpes bernoises ouest
C Vallée du Rhône aval
D Crêtes du sud et vallée de Conches
E Vallée du Rhône amont
F Crêtes du sud-est
G Alpes bernoises est

Figure 10.5 – Régions pour la méthode optimisée conjointement sur la circulation et le flux d'humidité. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

Table 10.8 – Paramètres détaillés de la méthode optimisée conjointement sur la circulation et le flux d'humidité.

Région	Niveau atmo.	H	Lon min	Taille lon	Lat min	Taille lat	Poids	N_1, N_2	Groupements
	analogie circulation								
	500	12	2.5	10	45	2.5	0.25		
	700	24	0	10	35	10	0.19		
A	850	24	-2.5	12.5	42.5	5	0.36	78	1
	1000	12	2.5	7.5	40	7.5	0.20		
	analogie flux d'humidité								
	700	12+24	5	5	45	0		26	
	analogie circulation								
	500	12	0	12.5	42.5	7.5	0.31		
	700	24	0	10	42.5	5	0.22		
B	850	24	-2.5	15	40	5	0.30	78	2,3
	1000	12	-2.5	12.5	35	12.5	0.17		
	analogie flux d'humidité								
	700	12+24	5	5	45	0		24	
	analogie circulation								
	500	12	5	5	45	2.5	0.24		
	700	24	-2.5	15	35	10	0.29		
C	850	24	0	12.5	42.5	5	0.26	93	4,5
	1000	12	-5	15	37.5	7.5	0.21		
	analogie flux d'humidité								
	700	12+24	5	5	45	0		25	
	analogie circulation								
	500	12	2.5	10	42.5	7.5	0.28		
	700	24	7.5	5	45	5	0.18		
D	850	24	-2.5	15	37.5	7.5	0.33	63	6,10
	1000	12	0	12.5	40	7.5	0.21		
	analogie flux d'humidité								
	700	12+24	5	5	45	0		23	
	analogie circulation								
	500	12	5	7.5	42.5	5	0.39		
	700	24	7.5	5	42.5	7.5	0.29		
E	850	24	0	12.5	37.5	7.5	0.17	50	7
	1000	12	-2.5	7.5	37.5	10	0.15		
	analogie flux d'humidité								
	700	12+24	5	5	45	0		23	
	analogie circulation								
	500	12	5	7.5	45	2.5	0.43		
	700	24	7.5	5	45	5	0.28		
F	850	24	-2.5	12.5	35	7.5	0.18	49	8
	1000	12	-2.5	12.5	37.5	7.5	0.11		
	analogie flux d'humidité								
	700	12+24	7.5	2.5	45	0		21	
	analogie circulation								
	500	12	5	7.5	42.5	5	0.35		
	700	24	5	7.5	42.5	7.5	0.19		
G	850	24	0	12.5	35	12.5	0.36	91	9
	1000	12	0	10	42.5	5	0.10		
	analogie flux d'humidité								
	700	12+24	5	5	45	0		26	

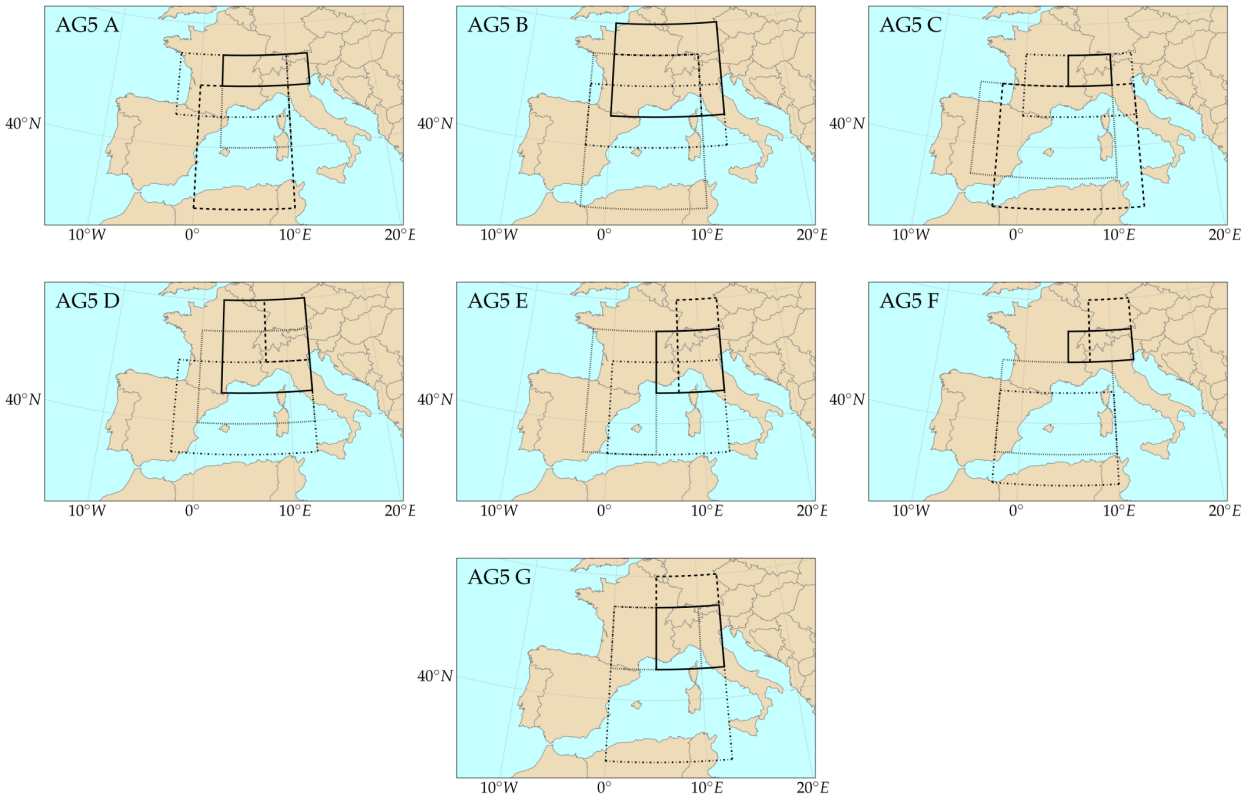


Figure 10.6 – Fenêtres spatiales de la méthode optimisée conjointement sur la circulation et le flux d'humidité. Les traits continus concernent le niveau 500 hPa, les traits discontinus, le niveau 700 hPa, les traits-points, le niveau 850 hPa, et les pointillés, le niveau 1000 hPa.

Table 10.9 – Scores CRPSS de la méthode optimisée conjointement sur la circulation et le flux d'humidité et gains par rapport à la méthode de référence R2, ainsi que la méthode M7.

Groupements		**Calibration**			**Validation**		
		CRPSS (%)	**G(R2)** (%)	**G(M7)** (%)	**CRPSS** (%)	**G(R2)** (%)	**G(M7)** (%)
1	Chablais	43.79	6.86	2.28	44.10	10.20	1.28
2	Vallée du Trient	42.51	11.03	3.50	42.18	13.17	2.73
3	Alpes bernoises ouest	41.05	11.26	1.64	39.36	12.24	0.15
4	Vallée du Rhône aval	35.88	11.69	4.15	37.30	13.61	2.41
5	Vallées latérales gauches	37.32	8.01	2.70	41.90	11.24	1.34
6	Crêtes du sud	40.26	9.48	2.91	44.32	8.72	1.85
7	Vallée du Rhône amont	32.65	14.15	6.19	34.96	13.67	4.17
8	Crêtes du sud-est	39.23	13.91	5.42	42.99	11.52	4.62
9	Alpes bernoises est	37.88	12.19	2.94	36.38	12.31	1.42
10	Vallée de Conches	41.75	10.29	1.43	43.26	10.28	0.97

Ceci est certainement dû au fait que l'analogie du flux d'humidité intègre une partie de l'information de la circulation atmosphérique par l'utilisation de la vitesse du vent. L'analogie de circulation s'adapte donc pour compléter au mieux l'information déjà présente. Nous supposons donc que ces fenêtres sont difficilement interprétables en raison du caractère partiel de l'information qu'elles représentent, mais que ces résultats n'invalident pas notre analyse de la section 10.3.5.

La fenêtre spatiale du flux d'humidité est toujours la même entre les différentes régions, excepté pour les crêtes du sud-est, où elle exclut un point à l'ouest. Autrement, elle est constituée de 3 points sur les longitudes, et 1 point sur les latitudes.

Finalement, les scores présentés dans la Table 10.9 montrent que cette méthode apporte des gains considérables par rapport à la méthode de référence R2. De plus, cette fois-ci, les scores sont meilleurs que ceux de la méthode M7 en calibration et en validation.

10.5 Conclusions

Nous avons utilisé les AGs pour optimiser la méthode des analogues. Ceci a été entrepris par étapes successives en libérant toujours plus de degrés de liberté à optimiser et en complexifiant la méthode. Cette démarche nous a permis de différencier les contributions aux gains en performance, ainsi que d'identifier d'éventuelles tendances à la surparamétrisation. Les principaux gains pour tous les groupements sont dus aux éléments suivants :

- La considération de **4 niveaux atmosphériques** pour l'analogie de circulation : nous avons pu mettre en évidence qu'il semble y avoir un nombre optimal – soit quatre – de niveaux atmosphériques à considérer dans l'analogie de circulation, au-delà duquel les performances en validation redescendent. Le passage de 2 à 4 niveaux apporte cependant un gain considérable, autant en calibration qu'en validation.

- L'**optimisation automatique et conjointe** du nombre d'analogues, des niveaux atmosphériques, des fenêtres temporelles et des fenêtres spatiales : ces paramètres sont très interdépendants, et la nécessité de les calibrer ensemble de manière à identifier les combinaisons optimales a déjà été relevée par Bontron (2004) et Ben Daoud (2010). Le nombre de combinaisons devient cependant très important dès que nous considérons plus de 2 niveaux atmosphériques. Ainsi, la calibration classique n'est pas en mesure d'attaquer cette problématique de manière satisfaisante, car le choix des fenêtres temporelles et des niveaux doit être effectué manuellement, et le nombre d'analogues fixé a priori.

- L'introduction de **fenêtres spatiales distinctes** par niveau atmosphérique : les grandes formes de la circulation générale ont des échelles très différentes en fonction du niveau atmosphérique, et l'information importante pour la prévision des précipitations ne se situe pas forcément dans la même région d'un niveau à l'autre. Il n'y a donc rien, mis-à-part une simplification des paramètres, qui justifie le fait de considérer des fenêtres spatiales recouvrantes entre les différents niveaux. Cet aspect a été confirmé par l'optimisation, qui propose de petites fenêtres pour les niveaux supérieurs, et de grandes fenêtres pour les altitudes proches du sol. Notre hypothèse est que l'information des gradients des couches supérieures au-dessus du bassin suffit à résumer l'orientation et la vitesse des masses d'air d'intérêt, qui sont potentiellement liées à un forçage par-dessus la barrière orographique. De manière complémentaire, les fenêtres plus étendues pour les basses couches cherchent à intégrer la structure de la circulation,

car celle-ci renseigne sur les centres actifs et sur le chemin qu'a parcouru la masse d'air éventuellement chargée en humidité avant d'arriver sur la zone d'intérêt.

- La **pondération des critères d'analogie** entre les différents niveaux atmosphériques : en raison de la variabilité du géopotentiel avec l'altitude, les critères S1 n'ont pas forcément les mêmes valeurs d'un niveau à un autre. De plus, certains niveaux sont certainement plus informatifs que d'autres pour un groupement donné. L'introduction d'une pondération sur la valeur du critère S1 par niveau permet donc de donner davantage de liberté à l'algorithme. Cette pondération a permis de gagner un peu sur les scores de performance, mais cette approche ne peut être entreprise de manière objective que par un algorithme d'optimisation.
- L'**optimisation conjointe des analogies de circulation et d'humidité** : habituellement, nous calibrons la méthode des analogues de manière successive, un niveau d'analogie après l'autre. Toutefois, nous avons observé qu'il existe une dépendance entre les niveaux d'analogie, et que pour se rapprocher des paramètres optimaux, nous devons les considérer conjointement.

Les AGs s'avèrent très utiles pour l'optimisation conjointe du nombre d'analogues, des fenêtres spatiales et temporelles, ainsi que, éventuellement, pour le choix des niveaux atmosphériques. Toutefois, il peut s'avérer dangereux d'ajouter trop de paramètres à optimiser. En effet, l'optimiseur pourra probablement les utiliser pour améliorer le score en calibration, et il le fera au mieux, mais le contrôle en validation demeure très important pour déterminer si nous sommes effectivement en train d'améliorer la méthode, ou si nous sommes en train de la surparamétriser. Il a été intéressant d'obtenir parfois plusieurs jeux de paramètres quasi optimaux, mais présentant quelques nuances. Ces différentes paramétrisations affichent alors des scores très proches en calibration, mais ces derniers peuvent être significativement différents en validation.

Ainsi, lors de ces nombreuses optimisations, nous avons réalisé que l'écart entre le jeu de paramètres optimal en calibration et celui optimal pour la validation est largement plus important que les petites itérations parfois manquantes de l'optimiseur. Il n'est donc pas nécessaire de garantir une convergence vers l'optimum global qui soit exacte en calibration, puisque celui-ci sera certainement différent en validation. Pour parer à ce problème, nous suggérons de procéder à une approche de validation croisée, et de confronter les jeux de paramètres obtenus sur les différentes périodes.

Toute modification manuelle des paramètres, par exemple dans un but d'homogénéisation, engendre une perte du score de calibration. Nous pouvons toutefois être gagnants en validation. Ainsi, nous recommandons après une optimisation, de retravailler un peu les résultats, dans le but de simplifier la diversité des paramètres entre groupements. Cet aspect n'est pas propre aux AGs. Nous avions déjà remarqué avec la calibration classique que nous pouvions gagner sur les scores en cherchant à homogénéiser les paramètres. À la différence des AGs, nous trouvions alors également de meilleures solutions en calibration.

Nous avons essayé d'optimiser la période de recherche des analogues (la fenêtre des 4 mois) conjointement aux paramètres des méthodes de référence, mais n'avons pas obtenu d'amélioration. Ce paramètre semblait tendre vers la valeur de 4 mois, et aucun gain n'a été constaté.

Les AGs sont relativement lourds à mettre en place et demandent une infrastructure informatique en mesure d'effectuer de nombreuses heures de calculs. Toutefois, ils permettent d'optimiser automatiquement tous les paramètres de la méthode des analogues, ce que la calibration classique ne permet pas. Le fait de pouvoir optimiser les paramètres conjointement s'est révélé important au vu des nombreuses dépendances entre paramètres et entre niveaux d'analogie. De plus, ces outils permettent également de sélectionner les fenêtres temporelles et les niveaux atmosphériques optimaux de manière automatique, ce qui n'était pas possible au préalable. Dans cette perspective, le temps investi dans les calculs doit certainement se révéler rentable, car nous évitons une évaluation manuelle de toutes les combinaisons possibles. Un autre élément important est la possibilité d'introduire de nouveaux degrés de liberté qui n'étaient pas accessibles jusqu'ici. Finalement, les AGs, tels qu'ils ont été implémentés, sont également en mesure de choisir les variables prédicteurs d'intérêt. Si nous n'avons plus vraiment de doute sur le choix des variables pour la prévision des précipitations, en raison des multiples travaux réalisés sur ce sujet, nous ne connaissons pas a priori les variables qui seraient les plus informatives pour prévoir un autre prédictand, comme la température, la grêle ou le vent. Ces outils d'optimisation peuvent alors explorer les variables et nous proposer les meilleures combinaisons. Toutefois, l'automatisation de variables composées (par exemple le flux d'humidité) présentera toujours quelques limites.

Troisième partie

Bilan de la prévision opérationnelle et conclusions

Chapitre 11

Retour d'expérience de la prévision opérationnelle

Deux méthodes de référence ont été exploitées en prévision opérationnelle pendant quelques mois. Nous revenons ici sur les performances générales de ces méthodes, qui s'avèrent satisfaisantes, ainsi que sur leur pertinence pour la prévision d'événements spécifiques. Ces événements sont décrits de manière détaillée, tant concernant les situations synoptiques responsables des cumuls observés, que les prévisions des différents instituts météorologiques. Nous présentons également l'évolution des prévisions par analogie avec l'échéance, telles que nous en disposions en opérationnel.

Cet exercice de la prévision opérationnelle nous a permis de nous plonger dans les conditions réelles des opérateurs de la méthode, avec parfois les difficultés de l'interprétation des résultats. Toutefois, en raison de la courte période de test, nos conclusions ne peuvent être que préliminaires.

11.1 Introduction du chapitre

La méthode ayant été exploitée opérationnellement pendant quelques mois, nous en analysons les performances générales obtenues en conditions réelles. Puis nous nous intéresserons particulièrement à 3 événements potentiellement critiques pour notre bassin. Finalement, nous conclurons en donnant quelques pistes de réflexion pour faciliter l'interprétation des résultats.

11.2 Performances des méthodes implémentées

Les deux méthodes de référence R1 et R2 sont opérationnelles depuis début octobre 2011. À l'heure où ces lignes sont écrites, nous disposons de 10 mois de prévisions pour lesquels nous avons également les séries observées.

Avant de se focaliser sur des événements précis, nous présentons les performances générales de la méthode R2 sur cette période, à 5 stations réparties dans le bassin : Binn (Figure 11.1), Zermatt (Figure 11.2), Sierre (Figure 11.3), Les Diablerets (Figure 11.4), et Les Marécottes (Figure 11.5). Nous avons donc extrait de nos archives de prévision les pluies prévues pour le lendemain. Cette analyse porte donc sur les prévisions à J-1 (nous présenterons d'autres échéances pour des événements spécifiques). Puisque nous effectuons 4 prévisions par jour (de nouvelles sorties du modèle global GFS (voir section 4.3.2) étant disponibles toutes les 6 h), nous avons ici moyenné les 4 quantiles correspondants.

Nous présentons les résultats de la paramétrisation de la méthode R2 (analogie sur la circulation et l'humidité), qui présentent de légères différences avec ceux de la méthode R1 (non présentés), bien que les tendances générales soient très semblables. Les différences concernent uniquement les cumuls de certains événements, le signal global étant similaire. De manière générale, l'analogie d'humidité améliore un peu les prévisions, mais elle peut également en détériorer certaines. Nous pouvons relever les points suivants :

- Pour les crêtes du sud-est, l'analogie d'humidité améliore la prévision de la plupart des événements, excepté pour le 5 janvier, dont elle accentue la sous-estimation. Elle surestime également un peu plus le non-événement du 20 mai.
- À Zermatt et à Sierre, R2 est toujours légèrement meilleure que R1.
- Aux stations des Diablerets et des Marécottes, la prévision est améliorée par la prise en compte de l'humidité, excepté pour l'événement de mi-décembre, qui est sous-estimé, et pour les cumuls du mois de juin, qui sont légèrement surestimés.

De manière générale, le signal donné par ces différentes prévisions est relativement bon. Les séries prévues contiennent indiscutablement de l'information sur les cumuls précipités. Nous pouvons même observer plusieurs événements pour lesquels les cumuls précipités sont très proches du quantile 60 % prévu. Certains autres ne correspondent toutefois pas aussi bien.

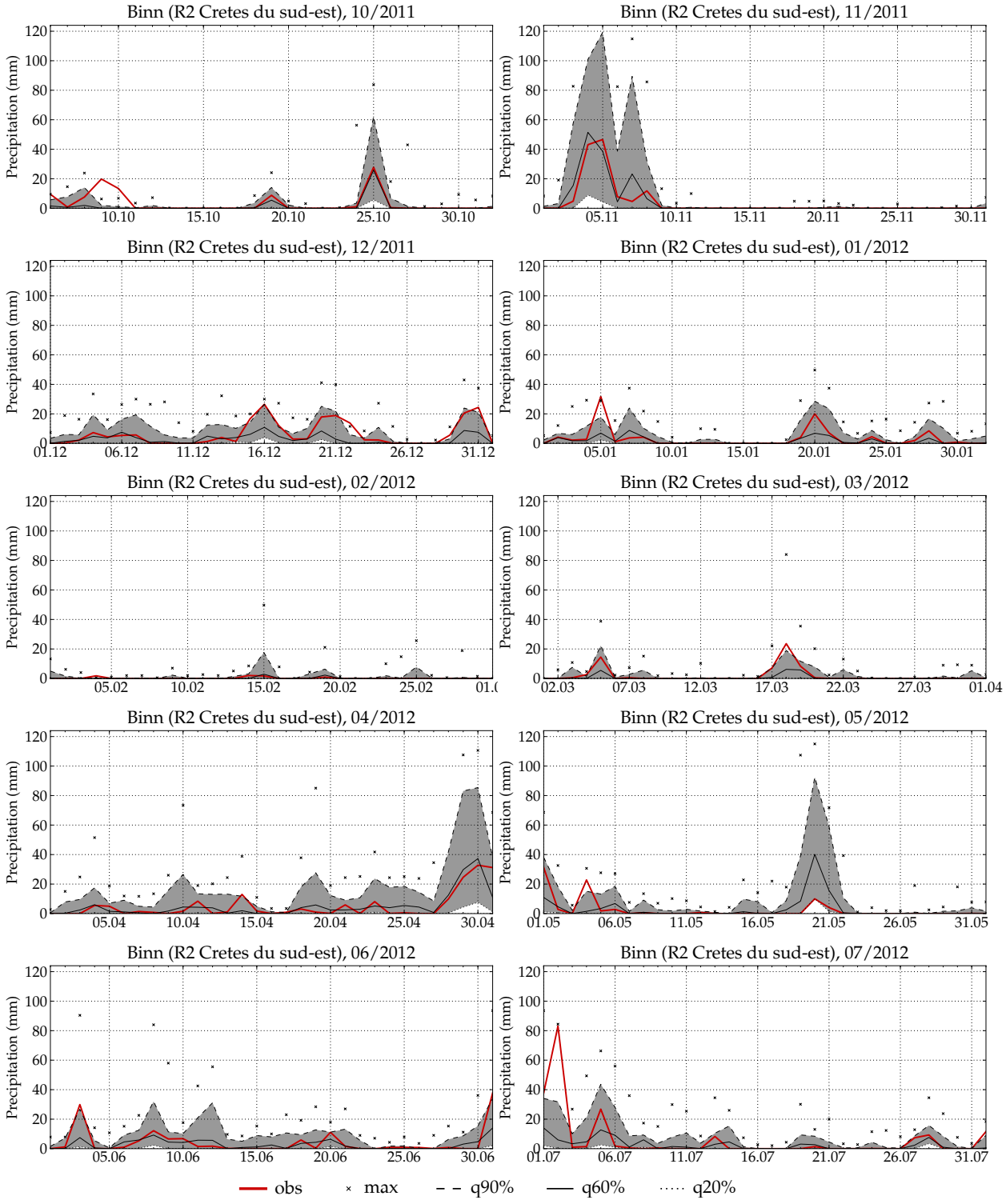


Figure 11.1 – Graphiques mensuels des prévisions et des observations des précipitations journalières à la station de Binn pour la période d'octobre 2011 à juillet 2012. Les prévisions sont synthétisées par les quantiles 90 %, 60 % et 20 %, et la valeur maximale.

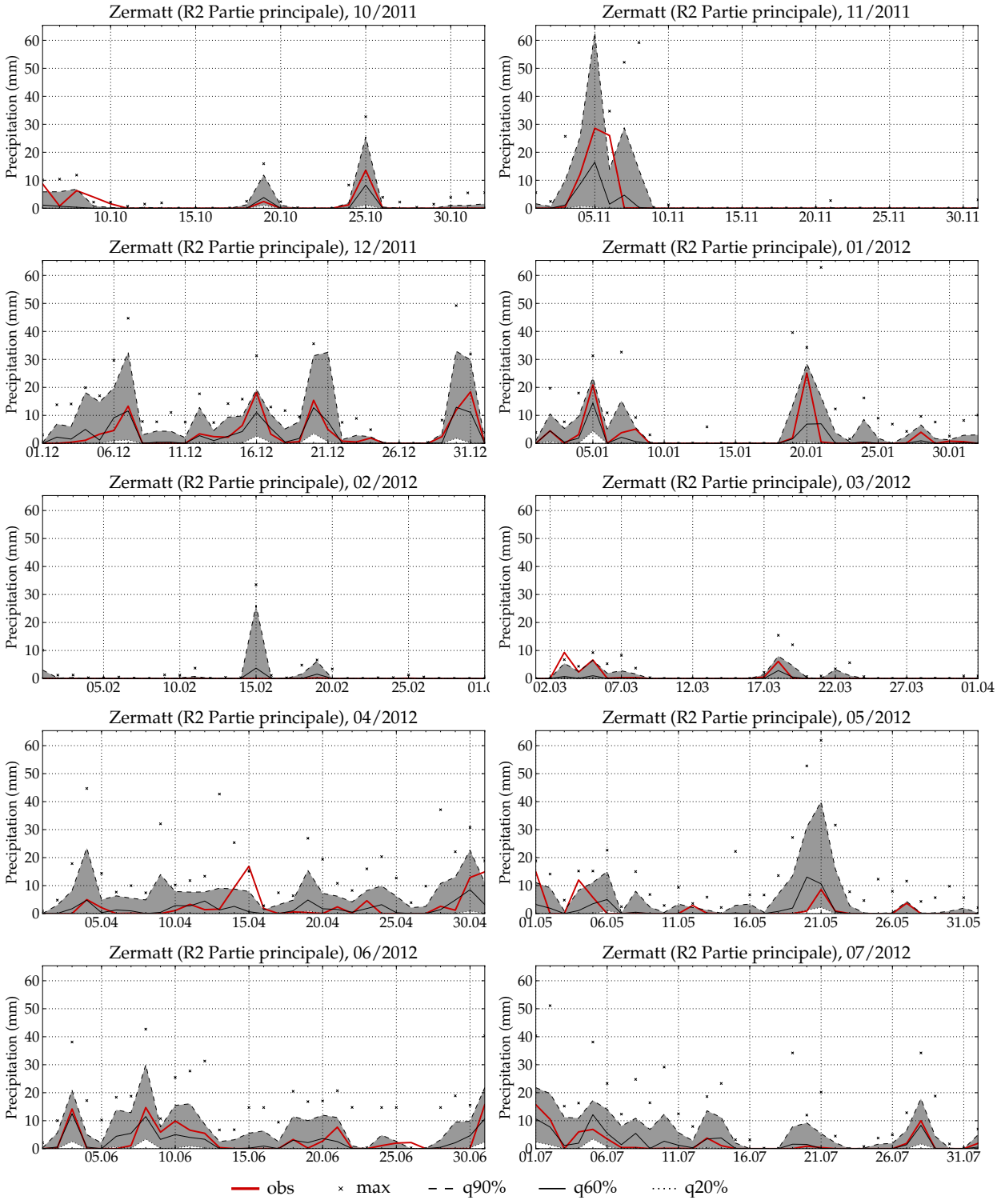


Figure 11.2 – Graphiques mensuels des prévisions et des observations des précipitations journalières à la station de Zermatt pour la période d'octobre 2011 à juillet 2012. Les prévisions sont synthétisées par les quantiles 90 %, 60 % et 20 %, et la valeur maximale.

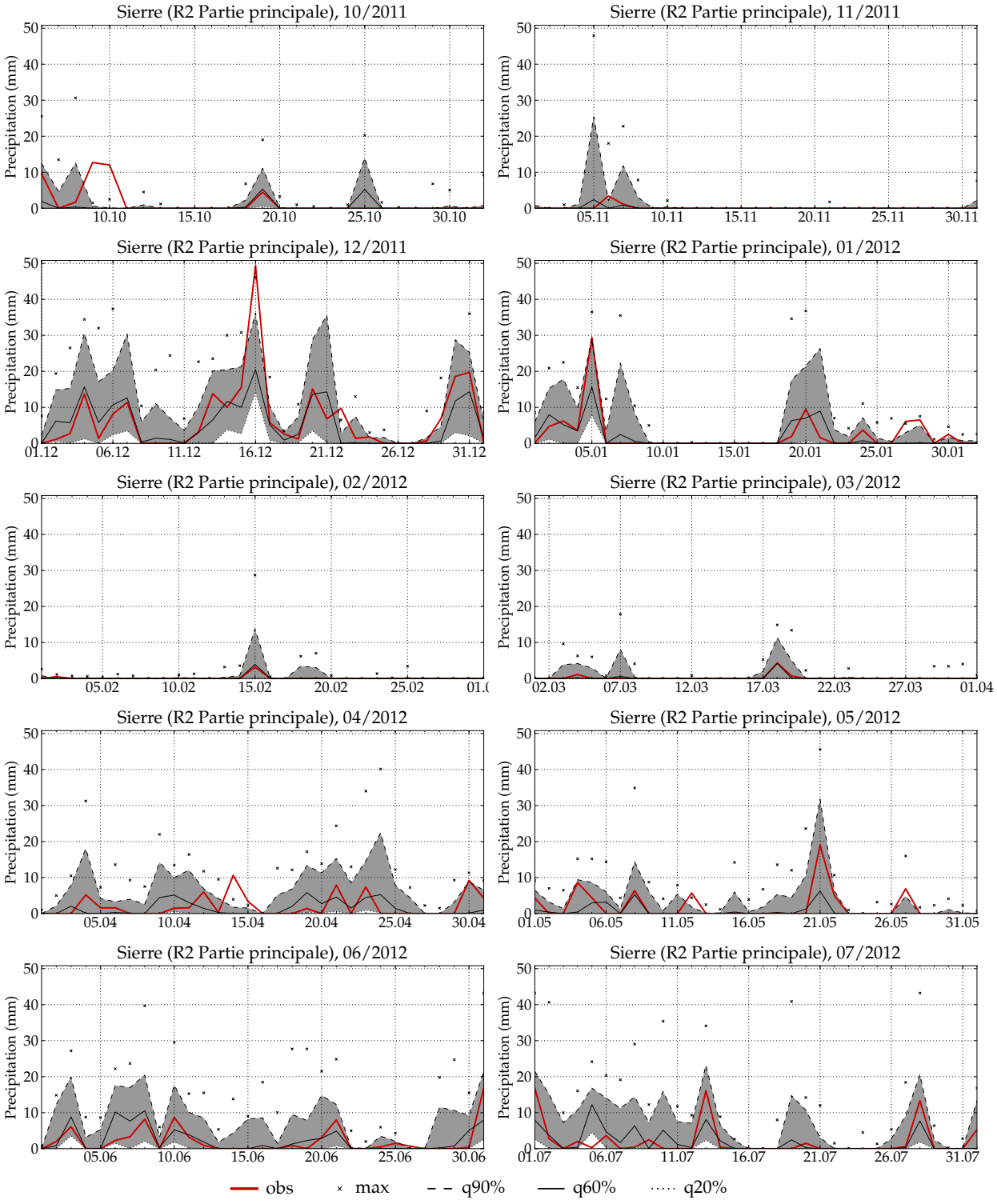


Figure 11.3 – Graphiques mensuels des prévisions et des observations des précipitations journalières à la station de Sierre pour la période d'octobre 2011 à juillet 2012. Les prévisions sont synthétisées par les quantiles 90 %, 60 % et 20 %, et la valeur maximale.

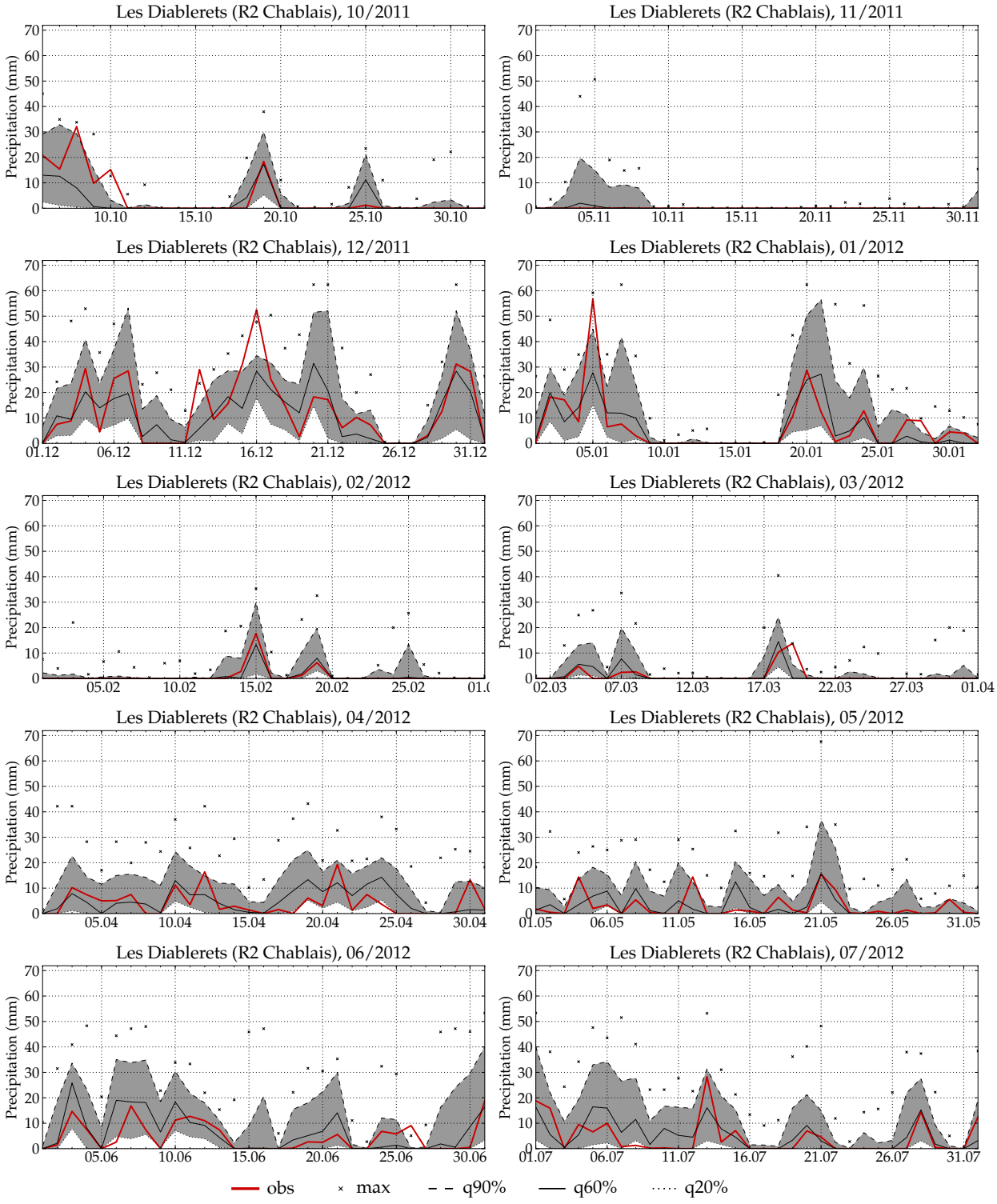


Figure 11.4 – Graphiques mensuels des prévisions et des observations des précipitations journalières à la station des Diablerets pour la période d'octobre 2011 à juillet 2012. Les prévisions sont synthétisées par les quantiles 90 %, 60 % et 20 %, et la valeur maximale.

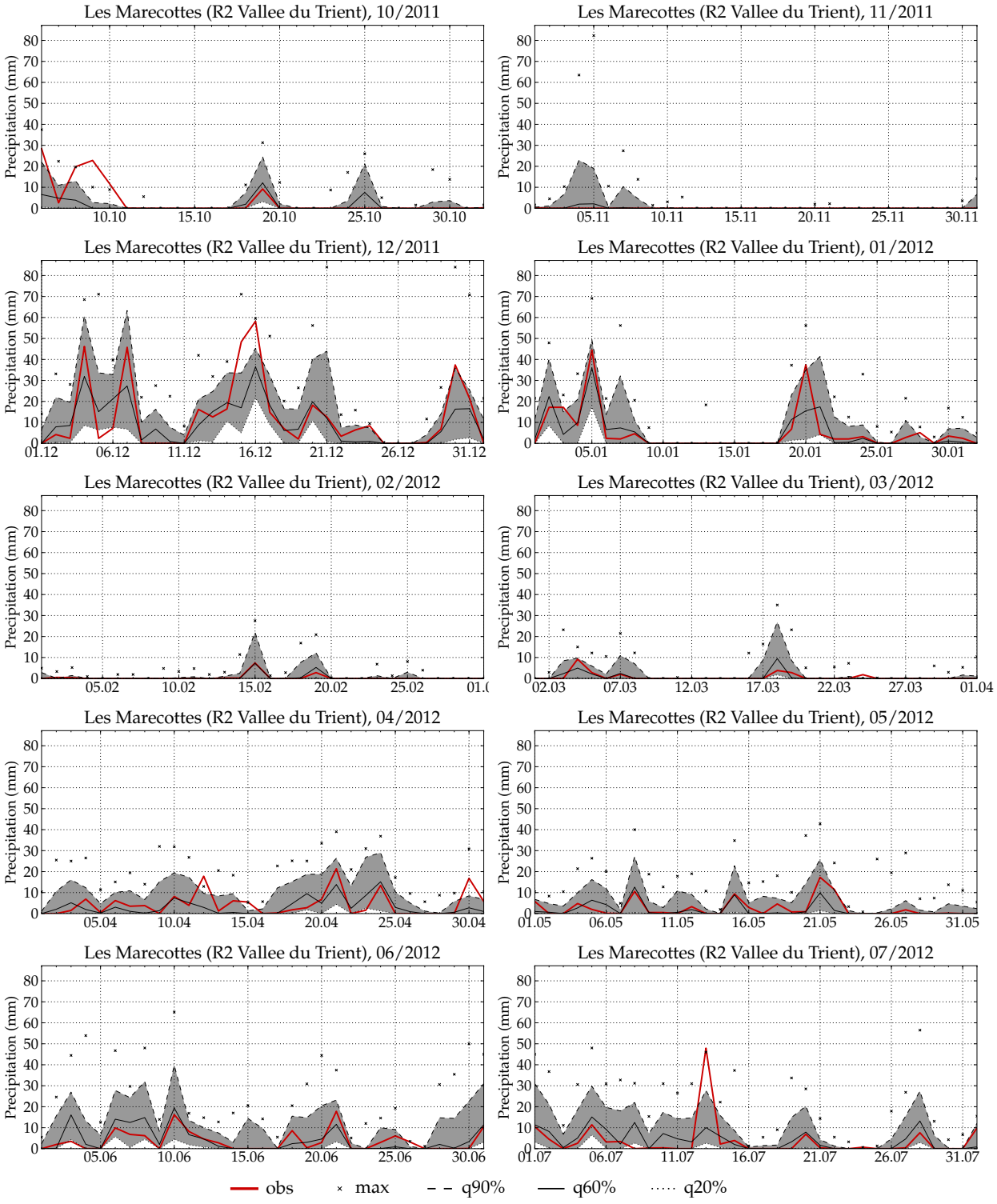


Figure 11.5 – Graphiques mensuels des prévisions et des observations des précipitations journalières à la station des Marécottes pour la période d'octobre 2011 à juillet 2012. Les prévisions sont synthétisées par les quantiles 90 %, 60 % et 20 %, et la valeur maximale.

Pour les événements un peu plus importants, les cumuls observés ont tendance à se situer au-dessus du quantile 60 %, ce qui rejoint les observations de Djerboua (2001) et Marty (2010). Certains dépassent même le quantile 90 %.

Pour la région des crêtes du sud-est, la méthode a bien prévu l'événement de début novembre 2011 et celui de fin avril 2012. Nous avons une fausse alerte le 20 mai 2012, et un événement manqué le 2 juillet 2012. Nous reviendrons en détail sur ces dates dans la section suivante.

Pour les autres régions, ce sont les mois de décembre 2011 et de janvier 2012 qui ont subi les plus gros cumuls. La série temporelle des cumuls journaliers est toujours cohérente, mais les quantités n'ont pas été systématiquement bien prévues. Par exemple, pour la station des Diablerets, nous avons prévu de manière relativement satisfaisante la plupart des cumuls, excepté les deux plus importants que nous sous-estimons. Il faut cependant insister sur le fait que ces prévisions ont été fournies par la méthode de référence R2. Nous avons significativement amélioré cette méthode durant le présent travail, et il aurait été intéressant de connaître les prévisions que les nouvelles méthodes auraient fournies. Il est évident que leur implémentation en opérationnel est vivement recommandée.

Ces graphiques révèlent encore que la cohérence spatiale est bonne, puisque les événements prévus sont bien localisés dans les régions où ils ont été observés, et ne débordent pas significativement dans les autres régions. Cette caractéristique est due aux processus responsables des précipitations qui sont similaires dans les analogues retenues.

11.3 Retour sur quelques événements

Durant la période des prévisions opérationnelles, des situations potentiellement critiques ont eu lieu. Nous allons ici revenir sur 3 situations : le 25 octobre 2011, les 4-5 novembre 2011, et les 1-2 juillet 2012. Les résultats présentés sont ceux du modèle R2.

Dans la section précédente, nous avions également relevé un événement bien prévu le 30 avril 2012, et un événement surestimé le 20 mai 2012, que nous n'analyserons pas en détail. Cependant, après analyse des prévisions à plusieurs stations, il apparaît que l'événement de fin avril est prévu de manière satisfaisante pour la plupart des stations, mais certaines stations sous-estiment les cumuls précipités (voir par exemple la Figure 11.4 pour les Diablerets, la Figure 11.2 pour Zermatt, et la Figure 11.3 pour Sierre).

Au contraire, l'événement du 20 mai 2012 est surestimé dans la région des crêtes du sud-est, où les observations correspondent souvent au quantile 20 %, alors qu'il est bien prévu à Zermatt (Figure 11.2) et aux Diablerets (Figure 11.4), et sous-estimé à Sierre (Figure 11.3).

Des crues ont également été observées au Lötschental début octobre 2011. La Lonza a gonflé en raison de fortes précipitations, mais surtout à cause d'une très importante fonte de la neige accumulée les jours précédents. Nous n'allons pas étudier cet événement, puisque nous ne disposons pas d'observation pour cette région.

11.3.1 Événement de fin octobre 2011

Le 25 octobre 2011, une circulation du sud-ouest s'est installée sur le nord de la Méditerranée (voir les bulletins météorologiques en Annexe H). Les régions de Toscane et de Ligurie ont été touchées par de très fortes précipitations engendrant des crues remarquables sur la côte italienne. L'intensité des précipitations a été estimée à plus de 500 mm en 12 heures en certains endroits (Davolio et al., 2012). Plusieurs personnes ont trouvé la mort. Toutefois, cet événement n'a pas atteint le bassin du Rhône.

La Figure 11.6 présente la situation synoptique, caractérisée par une dépression située à l'ouest de l'Irlande, qui est responsable d'un flux de sud-ouest sur les Alpes. Nous pouvons toutefois relever que le talweg sur l'ouest de l'Europe n'est pas aussi prononcé que lors des événements les plus importants pour le bassin du Rhône (voir section 1.3.3), et que le flux a une composante zonale plus importante.

La Figure 11.7 présente l'évolution de la prévision avec l'échéance pour la station de Binn. Le quantile 60 % quantifie extrêmement bien l'événement 3 jours avant. Le quantile 90 % est plus de deux fois supérieur, mais n'atteint pas des valeurs critiques pour cette région. La spatialisation des précipitations donnée par Atmoswing le 23 pour le 25 est illustrée dans la Figure 11.8. Les zones concernées par de potentielles précipitations peuvent être clairement identifiées.

Les prévisions de MétéoSuisse et de Meteocentrale ont été relevées de leurs sites Internet respectifs et sont données ci-dessous ainsi que nos propres communications à l'équipe en charge de la gestion des crues en Valais.

21 octobre

– Notre communication : « *Mardi, ça risque de pas mal pleuvoir sur le Tessin, mais le débordement est plutôt modéré du côté valaisan. C'est encore un peu tôt pour être sûr de ce qu'il va se passer, mais je ne m'inquiéterai pas...* »

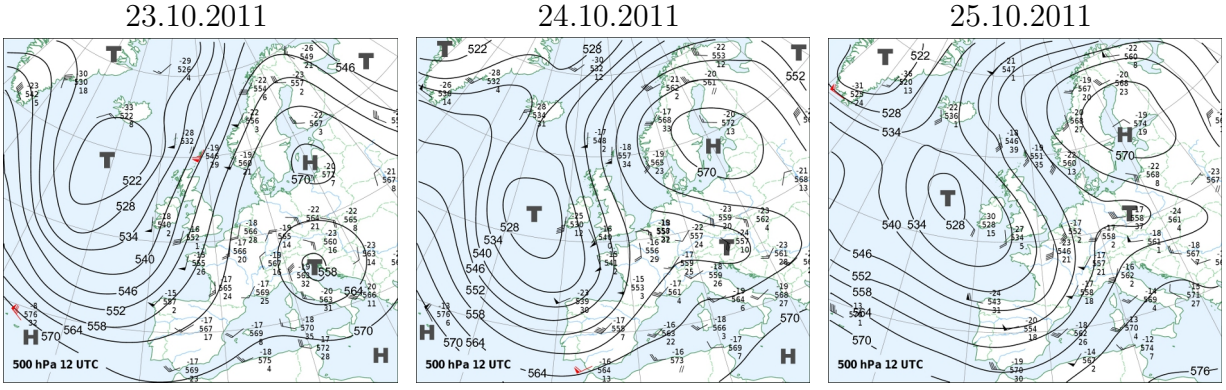


Figure 11.6 – Évolution de la situation synoptique à 500 hPa pour la période du 23 au 25 octobre 2011 (source : MétéoSuisse).

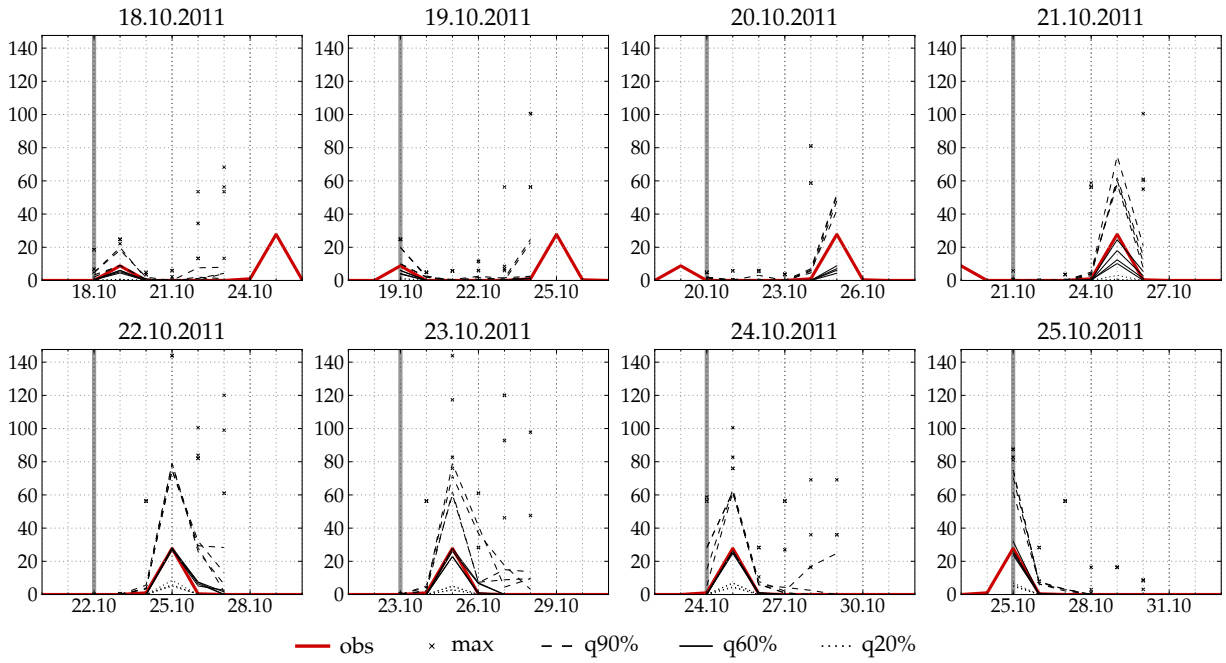


Figure 11.7 – Graphiques de l'évolution avec l'échéance des prévisions de précipitations journalières à la station de Binn pour l'événement de fin octobre 2011. Les prévisions sont synthétisées par les quantiles 90 %, 60 % et 20 %, et la valeur maximale. L'ordonnée maximale des graphiques correspond à la valeur de la pluie décennale.

22 octobre

– Notre communication : « *Pour les analogues, la tendance se confirme, à savoir de fortes précipitations sur le Tessin mardi, avec un débordement modéré dans le bassin du Rhône. Tous les jeux de paramètres disent la même chose (avec et sans les variables d'humidité), c'est peu sensible à la paramétrisation. Il reste encore quelques jours d'ici là, et les prévis des variables prédicteurs peuvent changer. La situation peut encore largement évoluer dans un sens ou l'autre.* »

23 octobre

– MétéoSuisse publie une pré-alerte pour le 25 en raison de fortes chutes de neige attendues dans la région du sud des Alpes et du Simplon.

24 octobre

– Les prévisionnistes de MétéoSuisse avertissent des risques liés au foehn, mais ne parlent pas particulièrement des précipitations.

– Les prévisionnistes de Meteocentrale publient dans l'après-midi une alerte de niveau 2 sur 5 pour de fortes pluies et chutes de neige au Tessin et dans la région du Simplon le lendemain, alerte qui passe au niveau 3 en fin de soirée et qui demeure le lendemain.

– Notre communication : « *Les analogues persistent et signent pour une grosse pluie sur le Tessin demain... Ce qu'il y a de nouveau toutefois, c'est que le modèle avec humidité (R2) gagne en crédibilité puisque l'échéance diminue. Et ce modèle R2 est un petit peu plus optimiste que R1.* »

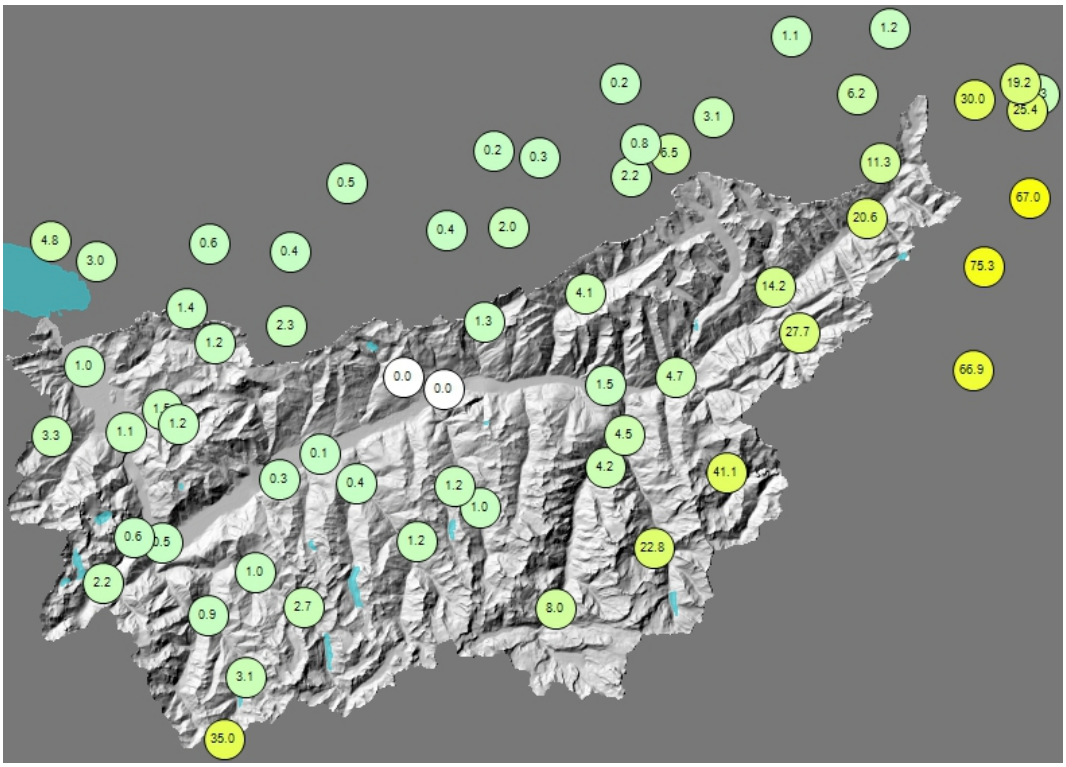


Figure 11.8 – Spatialisation donnée le 23 octobre par Atmoswing pour le quantile 60 % de la pluie prévue pour le 25. La couleur est proportionnelle au cumul prévu normalisé par la pluie décennale de la station, et s'étend du vert pour des petits cumuls au rouge pour la pluie décennale, en passant par le jaune. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

Cet événement n'a pas été important pour le bassin du Rhône, et nous pouvons être plutôt satisfaits de notre prévision et de notre interprétation. Les cumuls étaient effectivement plus importants au Tessin, et nous les avons relativement bien prévus, bien que légèrement surestimés (résultats non présentés).

11.3.2 Événement de début novembre 2011

Le 4 novembre, soit un peu plus d'une semaine après les dernières crues, la Ligurie, le Piémont et le sud de la France sont à nouveau fortement touchés (cette fois-ci encore, des morts sont à déplorer) par des précipitations très intenses atteignant par endroits environ 500 mm en 6 h (Parodi et al., 2012). Une puissante dépression s'est installée à l'ouest de l'Irlande, accompagnée d'un talweg, puis d'une goutte froide (dépression d'altitude coupée du courant principal) sur l'ouest de la Méditerranée (voir Figure 11.9 et Annexe H).

La configuration typique d'une situation de barrage du sud critique pour le bassin supérieur du Rhône était en place, en tout cas d'un point de vue de la circulation atmosphérique (voir section 1.3.3.1). Toutefois, le débit du Rhône n'a été que peu influencé par les précipitations ; seuls quelques cours d'eau latéraux ont un peu gonflé (CREALP, 2011). La localisation des précipitations sur la Ligurie est peut-être due à une ligne de convergence entre le flux de sud et de l'air froid descendant la plaine du Pô (Davolio et al., 2012).

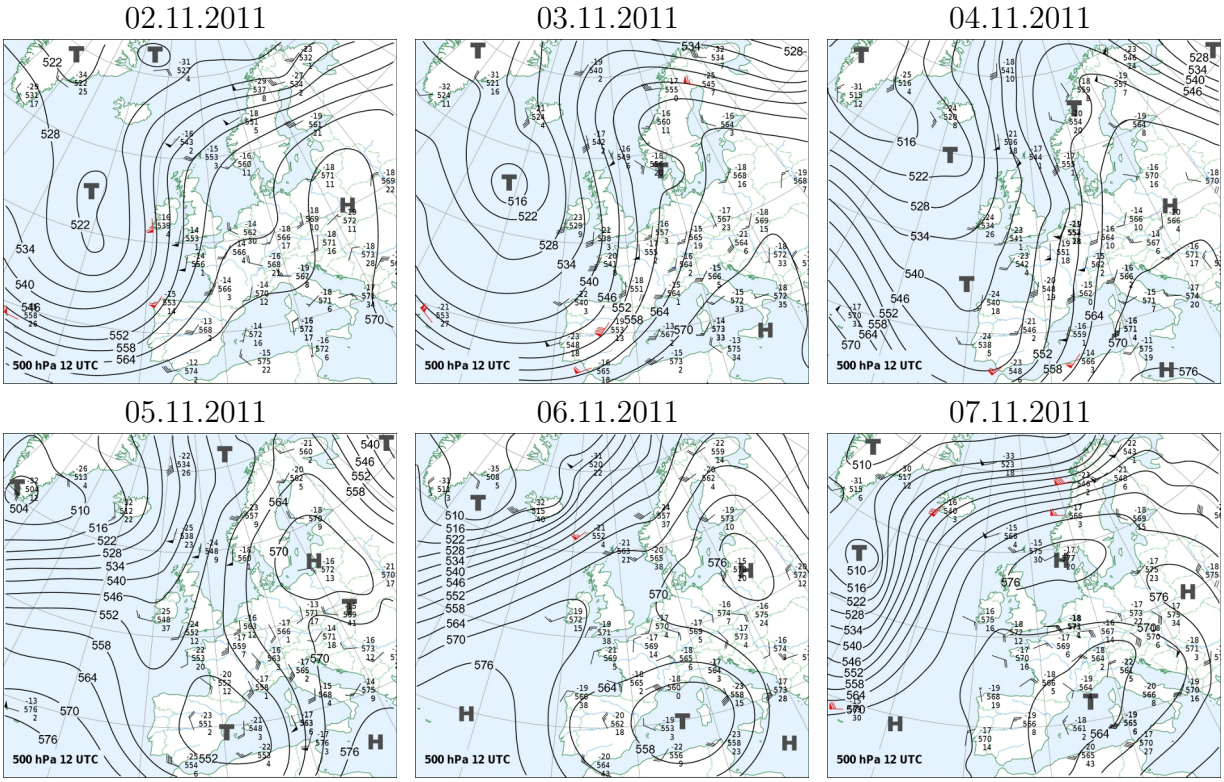


Figure 11.9 – Évolution de la situation synoptique à 500 hPa pour la période du 2 au 7 novembre 2011 (source : MétéoSuisse).

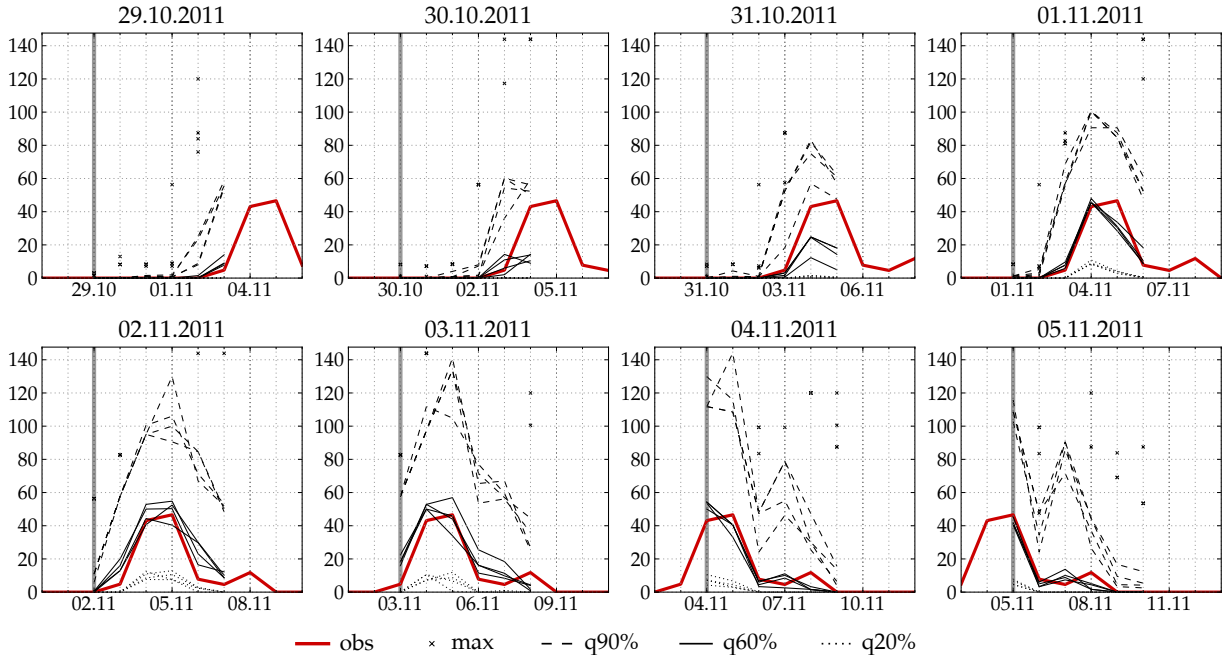


Figure 11.10 – Graphiques de l'évolution avec l'échéance des prévisions de précipitations journalières à la station de Binn pour l'événement de début novembre 2011. Les prévisions sont synthétisées par les quantiles 90 %, 60 % et 20 %, et la valeur maximale. L'ordonnée maximale des graphiques correspond à la valeur de la pluie décennale.

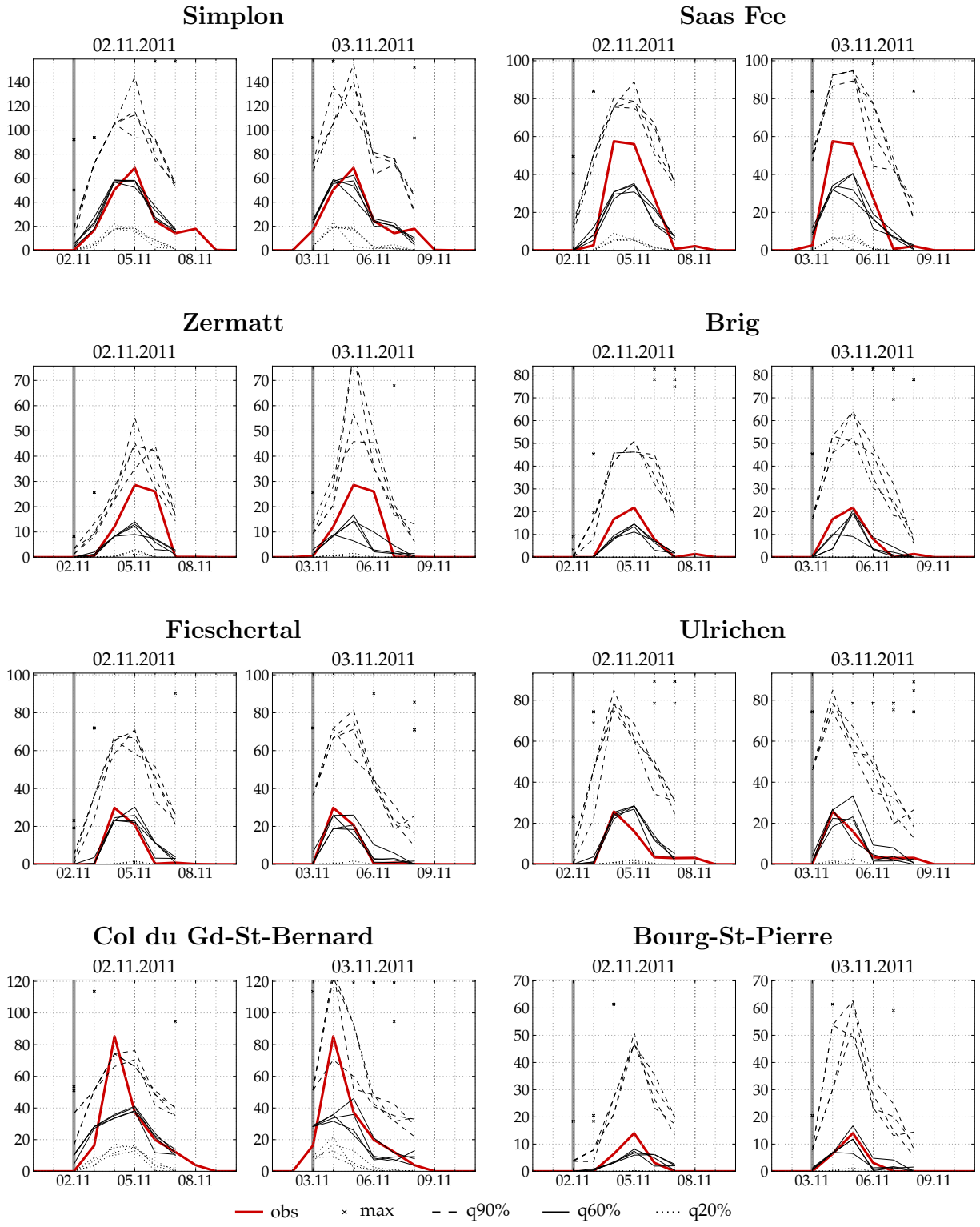


Figure 11.11 – Graphiques de deux échéances des prévisions de précipitations journalières à plusieurs stations d'intérêt pour l'événement de début novembre 2011. Les prévisions sont synthétisées par les quantiles 90 %, 60 % et 20 %, et la valeur maximale. L'ordonnée maximale des graphiques correspond à la valeur de la pluie décennale.

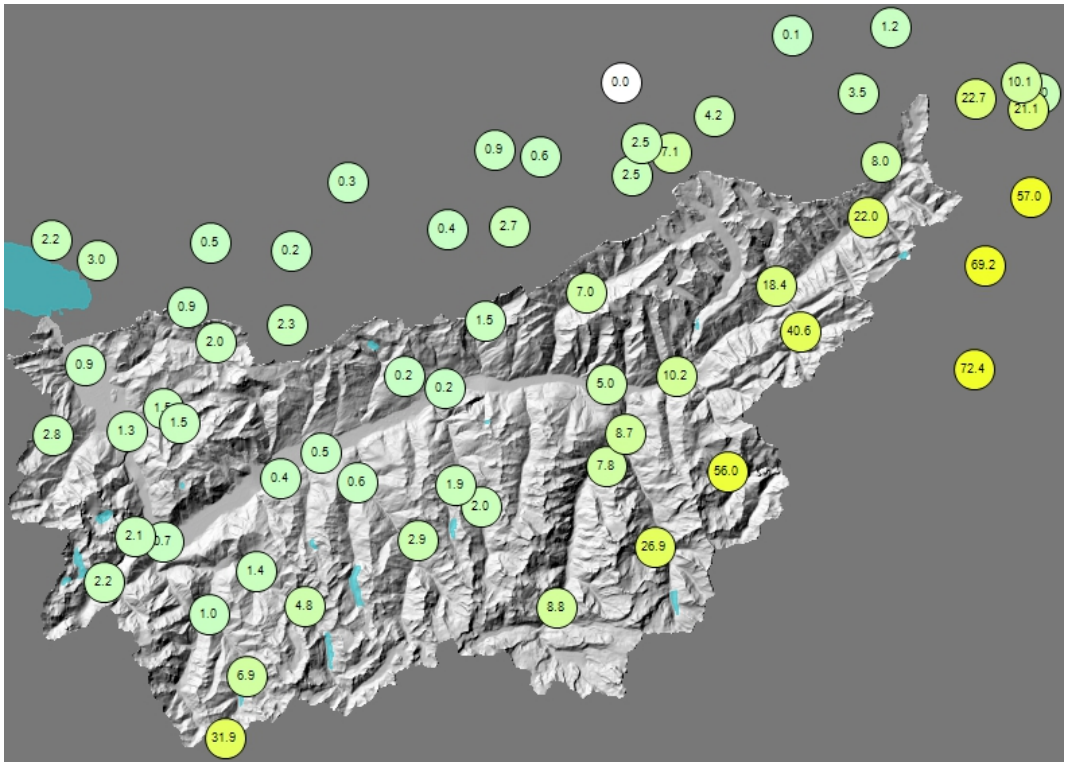


Figure 11.12 – Spatialisation donnée le 2 novembre par Atmoswing pour le quantile 60 % de la pluie prévue pour le 4. La couleur est proportionnelle au cumul prévu normalisé par la pluie décennale de la station, et s'étend du vert pour des petits cumuls au rouge pour la pluie décennale, en passant par le jaune. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

Ce système synoptique était situé aux États-Unis fin octobre, où il est responsable de fortes chutes de neige et de crues rapides qui ont tué 13 personnes (Parodi et al., 2012). Puis il a traversé l'Atlantique où il s'est renforcé en se combinant avec les restes d'une autre tempête tropicale, augmentant ainsi considérablement son contenu en eau précipitable (Silvestro et al., 2012). Il a également fait 5 victimes en France avant d'atteindre la région de la Ligurie (Parodi et al., 2012). Les précipitations les plus importantes provenaient d'un système méso-échelle convectif (Silvestro et al., 2012). Celui-ci a généré des bandes de pluie intense qui sont restées stationnaires sur les régions touchées pendant plusieurs heures (Silvestro et al., 2012).

L'évolution synoptique est illustrée dans la Figure 11.9. Nous y voyons le creusement du talweg le 4 novembre, avec une amplitude plus importante que le 25 octobre, engendrant des courants davantage orientés méridiennement. La goutte froide s'est produite le 5, ce qui a provoqué un basculement des vents au sud-est. Le bassin du Rhône était directement dans le flux d'air intense provenant de la Méditerranée. Nous avons rassemblé les prévisions des différents instituts (tels que publiés sur leur site Internet), ainsi que nos propres communications à l'équipe en charge de la gestion des crues en Valais.

1er novembre

– MétéoSuisse émet un préavis de niveau 3 pour les 4 et 5 novembre pour la région sud des Alpes, le Simplon et la vallée de Conches. Les plus fortes pluies sont surtout attendues au Tessin, le 5 novembre.

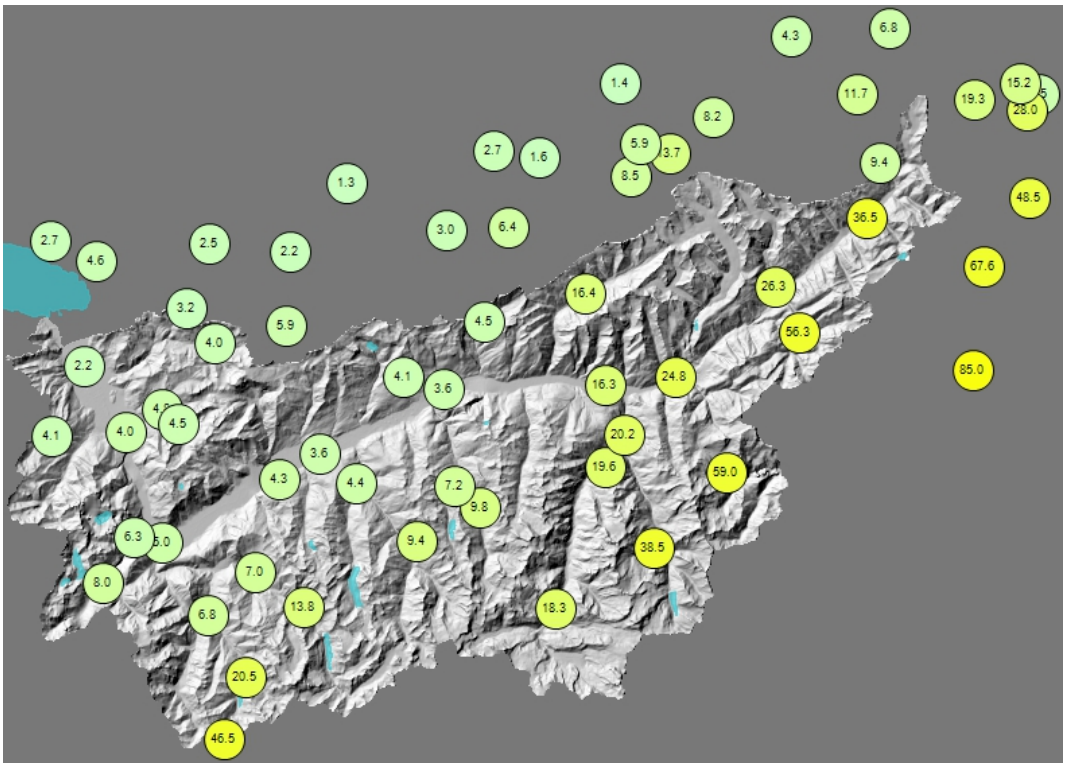


Figure 11.13 – Spatialisation donnée le 3 novembre par Atmoswing pour le quantile 60 % de la pluie prévue pour le 5. Mêmes conventions que la Figure 11.12. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

– Nos communications : « *Je ne veux pas être encore trop alarmiste, mais il faudra être vigilant du 4 au 6 novembre, soit de vendredi à dimanche. Je ne peux pas encore donner des quantités de pluie, car les modèles avec et sans humidité divergent encore fortement. Par contre, ce qui semble assez sûr, c'est qu'on a une situation de remontées du sud qui va s'installer pendant plusieurs jours et qui risque de générer des précipitations de manière intense et continue sur 2-3 jours. Je ne sais pas si on aura des cumuls journaliers très importants (certains modèles disent que oui), mais on aura certainement un cumul significatif sur ces 2-3 jours. Et ça semble aussi concerner Binn-Simplon, ainsi que Mattmark. Les prévis sont encore bien plus pessimistes que pour le 25 octobre, surtout par rapport au débordement en Valais...* »

2 novembre

– MétéoSuisse : les prévisions changent légèrement, car de forts cumuls sont prévus le 4 au Tessin, mais également dans le bassin du Rhône par débordement. Les pré-alertes de niveau 3 demeurent identiques.

– Nos communications : « *[Le modèle avec les humidités] diminue l'importance de quelques extrêmes qui étaient les meilleures analogues en termes de circulation. Il n'en reste pas moins que les cumuls sur toute la période semblent importants... ça va démarrer tranquillement demain (peut-être le soir...), mais je ne pense pas qu'il y aura des cumuls très significatifs.*

Puis ça s'intensifie le 4 et le plus gros semble pour le 5, avant de redescendre un peu le 6. Néanmoins, les intensités semblent conséquentes entre le 4 et le 6, soit sur 3 jours. C'est encore un peu tôt pour regarder les cumuls en détail, mais pour donner une fourchette des cumuls qui me semble plausible sur toute la période, je dirais :

- *Saas-Fee : 100-200 mm ;*
- *Binn : 150-300 mm ;*
- *Col du Grand-Saint-Bernard : 120-200 mm.*

Ces quantités sont très approximatives, pour donner une idée de ce qu'il me semble plausible. Donc, ça peut être moins, mais ça peut aussi être plus. J'informerai au fur et à mesure de l'événement, car le modèle avec humidité va devenir plus pertinent avec le temps... »

3 novembre

- MétéoSuisse : la prévision des débordements dans le bassin du Rhône est un peu retardée dans le temps, pour les 5 et 6 novembre. Un préavis de niveau 3 à 4 est émis pour la période du 4 au 6 novembre pour la région du Haut-Valais et des Alpes valaisannes. En fin d'après-midi, ce préavis est formalisé en avis de niveau 3 pour le Tessin, toutes les vallées latérales de la rive gauche du Rhône et le Haut-Valais, donc sur approximativement une moitié du bassin. Des cumuls supérieurs à 80 mm sont attendus pour la plupart des zones concernées, et ceux-ci dépassent les 160 mm pour la région des crêtes du sud-est (vallée de Conches, Binn, Simplon, Saas-Fee, et Zermatt). Pour le Tessin, des cumuls supérieurs à 160, voire 240 mm sont prévus. Le soir, la région des crêtes du sud-est passe en alerte de niveau 4 sur 5 avec des cumuls prévus supérieurs à 200 mm (voire Figure 11.14 gauche).

  Les prévisions de MétéoSuisse se basent sur les résultats du modèle COSMO-7, qui a fourni des valeurs de précipitations supérieures au modèle européen, ce qui est plutôt habituel (MétéoSuisse, 2011). Le modèle a proposé des cumuls très importants pour le versant nord de la crête des Alpes valaisannes.

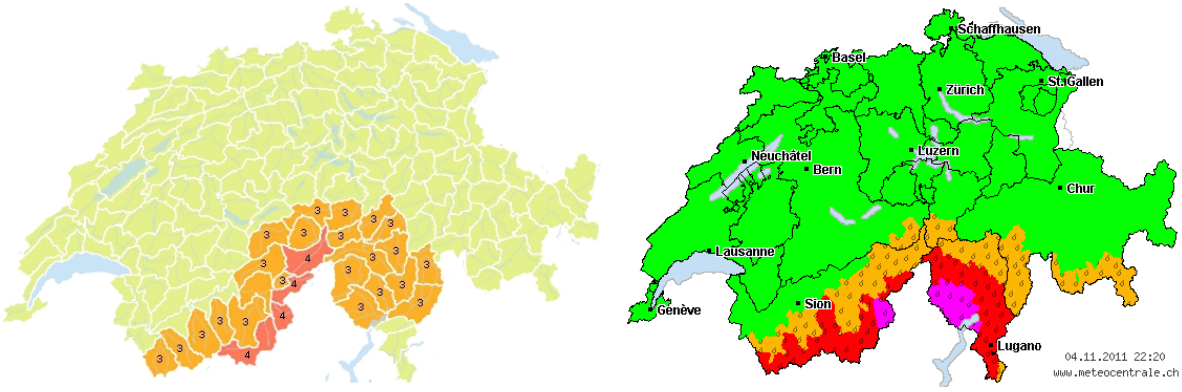


Figure 11.14 – Cartes des alertes (gauche) de MétéoSuisse et (droite) de Meteocentrale pour l'événement de novembre 2011. La couleur orange correspond à une alerte de niveau 3, le rouge à un niveau 4, et le violet à un niveau 5 (source : www.meteosuisse.ch et www.meteocentrale.ch).

De plus, cette prévision a été prévue « *par la quasi-totalité des modèles consultés [...], avec des prévisions très stables d'un run à l'autre.* » (MétéoSuisse, 2011).

- Les prévisionnistes de Meteocentrale ont quant à eux émis dès le 3 novembre une alerte de niveau 4 sur 5 pour le Tessin et la région des crêtes du sud-est, avec même une partie du Tessin et la région du Simplon en alerte maximale.
- Le bulletin hydrologique de l'Office fédéral de l'environnement averti qu'une « *hausse des débits est attendue dans le Haut-Valais ainsi qu'au sud des Alpes. En particulier, les cours d'eau de petite et moyenne taille situés à basse altitude, sous la limite des chutes de neige, pourraient fortement monter.* » Ils émettent un avis de danger de crue de niveau 2 sur 5 pour le Rhône et de niveau 4 pour la Vispa et la Saltina (CREALP, 2011).

4 novembre

- MétéoSuisse : les mêmes alertes que le jour précédent sont émises. Ils constatent que « *COSMO-7 maintient une version très pessimiste des débordements, laquelle s'avérera au final largement surestimée* » (MétéoSuisse, 2011).
- Meteocentrale : le matin, la zone en alerte de niveau 4 s'étend à toutes les crêtes du sud et quelques vallées latérales (voire Figure 11.14 droite).

5-6 novembre

- MétéoSuisse : les mêmes alertes subsistent du 4 au 6 novembre, avant d'être retirées en fin de journée le 6. Au vu des prévisions de COSMO-7, l'alerte de niveau 4 pour certaines régions semble se justifier. En revanche, « *le maintien du degré 3 pour les autres régions peut être remis en question compte tenu du fait que les modèles s'étaient déjà largement trompés jusque-là* » (MétéoSuisse, 2011). Mais la période la plus intense étant encore à venir avec le pivotement des vents au sud-est, ils ont maintenu l'avis, « *ceci d'autant plus que lors de l'événement d'octobre 2000, c'est précisément au moment où la goutte froide s'est formée et que les vents ont pivoté que les débordements les plus massifs se sont produits* » (MétéoSuisse, 2011).

7 novembre

- MétéoSuisse : une nouvelle alerte de niveau 2 a été émise pour la région des crêtes du sud-est, pour le jour même.

Les précipitations furent très abondantes au Tessin, au Simplon et dans la vallée de Conches. Mais les débordements sur les versants nord des Alpes valaisannes n'ont pas eu lieu dans la même mesure que celle où ils étaient attendus. MétéoSuisse (2011) en conclut : « *Sur l'ensemble de l'événement, on mesure bien à quel point les débordements prévus par le modèle COSMO étaient exagérés (stations de Saltina, Evolène, Mattsand, Visp, etc...). On relèvera toutefois que le modèle a sous-estimé les précipitations au Grand-Saint-Bernard. Les débordements prévus par COSMO-7 dans les Alpes valaisannes ne se produisirent pas, et les cumuls prévus dans le Saastal furent également très surestimés. Les valeurs attendues au sud du col du Simplon furent nettement plus proches de la réalité, bien qu'également*

surévaluées ». Ils relèvent encore que les résultats de COSMO-2 ne furent pas meilleurs que ceux de COSMO-7, et que le modèle européen fut bon pour le sud des Alpes et pour la région de la Saltina, mais qu'il a également surestimé les précipitations pour les Alpes valaisannes centrales et pour les vallées des Drances. Malgré les avancées dans la modélisation numérique, la prévision de ce type d'événement est encore problématique (Davolio et al., 2012). Silvestro et al. (2012) avancent même que ce genre d'événement peut être très difficilement prévu par les modèles numériques de prévision, et que l'utilisation de méthodes de descente d'échelles est essentielle.

MétéoSuisse explique que la différence entre les cumuls observés en Ligurie et ceux ayant atteint le Tessin est entre autres due à des orages violents sur la côte italienne, qui ont provoqué des crues éclair. Ainsi, « *l'air très humide de la Méditerranée a buté contre les premiers reliefs des Apennins, des Alpes maritimes et des Cévennes où l'on a relevé jusqu'à 658 mm de précipitations en 48 heures. Cependant, les vents du sud en altitude n'ont pas été assez forts pour pousser toute cette humidité vers la chaîne principale des Alpes. Ainsi, les lames d'eau recueillies au Tessin restèrent nettement plus faibles que le long de la côte méditerranéenne.* » (MétéoSuisse)

La Figure 11.10 présente l'évolution avec l'échéance des précipitations prévues par la méthode R2 pour la station de Binn. Les cumuls du 4 novembre sont très bien prévus par le quantile 60 % 3 jours à l'avance, puis ceux du 5 également 3 jours à l'avance. Ce quantile explique l'événement de manière très satisfaisante pour la station de Binn. Les courbes du quantile 90 % montent de manière plus importante que pour le 25 octobre, et se rapprochent de la valeur de la pluie décennale. Ce quantile, en raison de son amplitude, nous a rendu vigilant et un peu pessimiste pour cet événement.

L'évolution des prévisions à d'autres stations d'intérêt est donnée dans la Figure 11.11 pour les 2 à 3 jours avant l'événement, soit la période où des décisions doivent être prises pour la gestion des aménagements à accumulation dans le bassin du Rhône. Le quantile 60 % explique très bien les cumuls observés à la station du Simplon, de Brig, de Fieschertal, d'Ulrichen et de Bourg-Saint-Pierre. Ce quantile sous-estime en revanche les cumuls à Saas-Fee, Zermatt, et au col du Grand-Saint-Bernard. Pour Saas-Fee et Zermatt, les cumuls observés se situent toujours entre les quantiles 60 et 90 %. En revanche, pour le col du Grand-Saint-Bernard, nous sous-estimons les précipitations selon la prévision du 2 novembre, alors que le quantile supérieur augmente largement dans la prévision du 3, permettant de mieux cerner l'événement. Les spatialisations des précipitations des journées du 4 et du 5 novembre, données par Atmoswing 2 jours avant les échéances, sont présentées dans les Figures 11.12 et 11.13. La localisation des précipitations est bien identifiable, avec un débordement un peu plus important pour la journée du 5.

Nous pouvons constater a posteriori que les interprétations de nos prévisions transmises avant l'événement étaient un peu pessimistes, comme celles des autres instituts de météorologie. Cela provient du fait que notre interprétation se basait sur la partie supérieure de la distribution, entre les quantiles 60 et 90 %.

Si nous revenons sur les cumuls estimés avant l'événement, les prévisions sont plutôt bonnes pour Saas-Fee et le col du Grand-Saint-Bernard, mais surestimées pour Binn :

- Saas-Fee : 100-200 mm prévus, 146.5 mm observés ;
- Binn : 150-300 mm prévus, 118.7 mm observés ;
- Col du Grand-Saint-Bernard : 120-200 mm prévus, 175 mm observés.

Lors de cette interprétation, plusieurs éléments ont soulevé des questions auxquelles il était difficile de répondre sur le moment. Les points principaux sont énumérés ci-dessous :

- Quand regarder le quantile 90 % et quand regarder le 60 % ? Le quantile 90 % n'a que 10 % de chance d'être dépassé. Il semble donc très peu probable qu'il puisse être atteint plusieurs jours consécutivement. On ne peut pas non plus se fixer que sur le quantile 60 %, puisque celui-ci peut relativement facilement être dépassé pour au moins un des jours de l'événement.
- Les meilleures analogues ont des valeurs variant fortement, dont passablement de valeurs faibles. Comment interpréter cela ? Certaines distributions des meilleures analogues étaient révélatrices du fait que l'ensemble de la distribution risquait de surestimer les quantités, puisque les 10 meilleures analogues étaient inférieures. Toutefois, avec une des meilleures analogues représentant la valeur maximale, il était difficile de l'affirmer en prévision.

MétéoSuisse (2011) a comparé cet événement à celui d'octobre 2000 en raison d'une évolution similaire de la situation. Dans les deux cas, un profond talweg s'installe sur l'ouest de l'Europe et est suivi d'une goutte froide sur la Méditerranée. Cette configuration génère un courant de secteur sud durable avec un pivotement des vents du sud-ouest au sud-est.

Toutefois, quelques différences de cet événement par rapport à celui d'octobre 2000 ont été relevées (MétéoSuisse, 2011) :

- En octobre 2000, la situation était plus dynamique avec un talweg descendant davantage au sud et dont l'axe se trouvait plus proche des Alpes.
- Le courant de sud-est dura deux jours en 2000, contre un seul en 2011.
- La vitesse du vent était significativement plus faible pour l'événement de 2011.
- La limite des chutes de neige était plus basse, car la masse d'air était plus froide.
- Il est probable que la température de la Méditerranée (surtout dans le golfe de Gênes) était plus chaude en octobre 2000 que lors de cet événement. La température de surface de la mer a une influence sur les basses couches, lesquelles peuvent alors emmagasiner plus ou moins d'humidité. Silvestro et al. (2012) présentent pour leur part une Méditerranée plutôt chaude en 2011, avec une anomalie de température de surface de 1 à 1.5°.
- En 2000, le point de rosée à la station de Robiei (Tessin) fut nettement plus élevé qu'en 2011. Les masses d'air transportaient donc davantage d'humidité.

Comme nous l'avons suggéré, cette situation réunissait toutes les conditions pour être critique, et il était très difficile de prévoir si un débordement dans la vallée du Rhône était possible ou non. Sans argument fondé, cela n'aurait pas été une attitude responsable, de la part des services hydrométéorologiques, de ne pas émettre d'avis. En effet, si ce système complexe n'avait pas provoqué des précipitations si intenses près des côtes, il est possible que les masses d'air atteignant le bassin du Rhône aient été beaucoup plus humides, et les précipitations en résultant, beaucoup plus soutenues. Un élément clé pourrait donc être la ligne de convergence décrite par Davolio et al. (2012), présente lors des deux événements d'octobre et de novembre 2011, qui est probablement responsable du déclenchement de la convection, si tôt, sur le tracé des masses d'air. Or ce phénomène de méso-échelle est certainement très difficile à prévoir plusieurs jours à l'avance.

11.3.3 Événement de début juillet 2012

Les 1er et 2 juillet, de fortes précipitations ont touché le bassin du Rhône, principalement dans la région des crêtes du sud-est, faisant passer le débit du Rhône à la Porte du Scex de 450 à 850 m^3/s. Selon l'Office fédéral de l'environnement, la crue du Rhône était trentenale à Reckingen, décennale à Brig, à Branson et à la Porte du Scex, et bisannuelle à Sion (CREALP, 2012). Ce sont les affluents du Rhône entre Gletsch et Visp qui ont majoritairement contribué à la crue du Rhône. Cet événement a surpris les instituts de prévision météorologique et hydrologique. MétéoSuisse n'a émis un avis (de 2 sur 5) pour la vallée de Conches et les crêtes du sud-est que dans l'après-midi du 2 juillet, alors que l'événement était déjà en cours et que le pic de crue du Rhône à Brig était déjà passé (CREALP, 2012). Les personnes en service à l'Office fédéral de l'environnement avaient, pour leur part, émis un avis de crue pour le Rhône de niveau 2 sur 5 le 1er juillet, lequel est passé à 3 dans le courant de la journée du 2 juillet.

La situation à partir du 1er juillet au soir était un courant de sud/sud-ouest, associé à un talweg sur l'Europe de l'Ouest, amenant de l'air doux et humide sur les Alpes (voir Figure 11.15, et les bulletins météorologiques en Annexe H). Une perturbation quasi stationnaire a donné des précipitations importantes, mais pas extrêmes (MétéoSuisse).

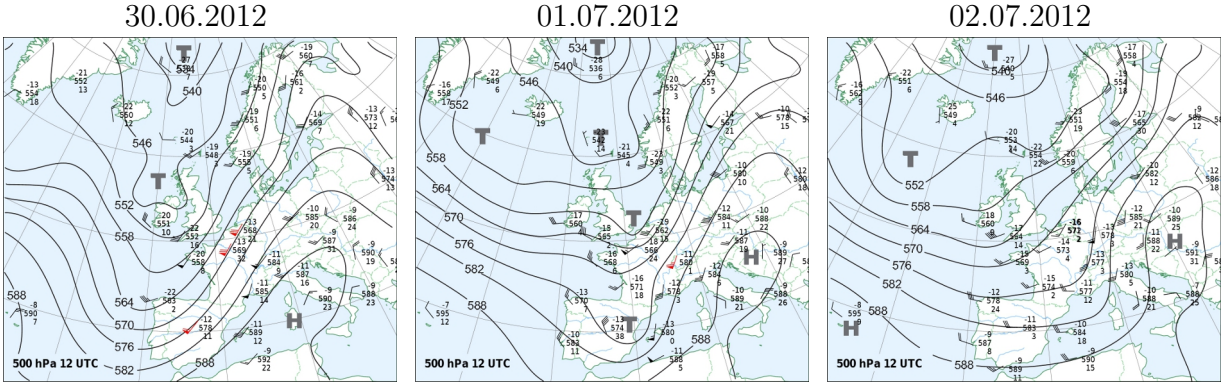


Figure 11.15 – Évolution de la situation synoptique à 500 hPa pour la période du 30 juin au 2 juillet 2012 (source : MétéoSuisse).

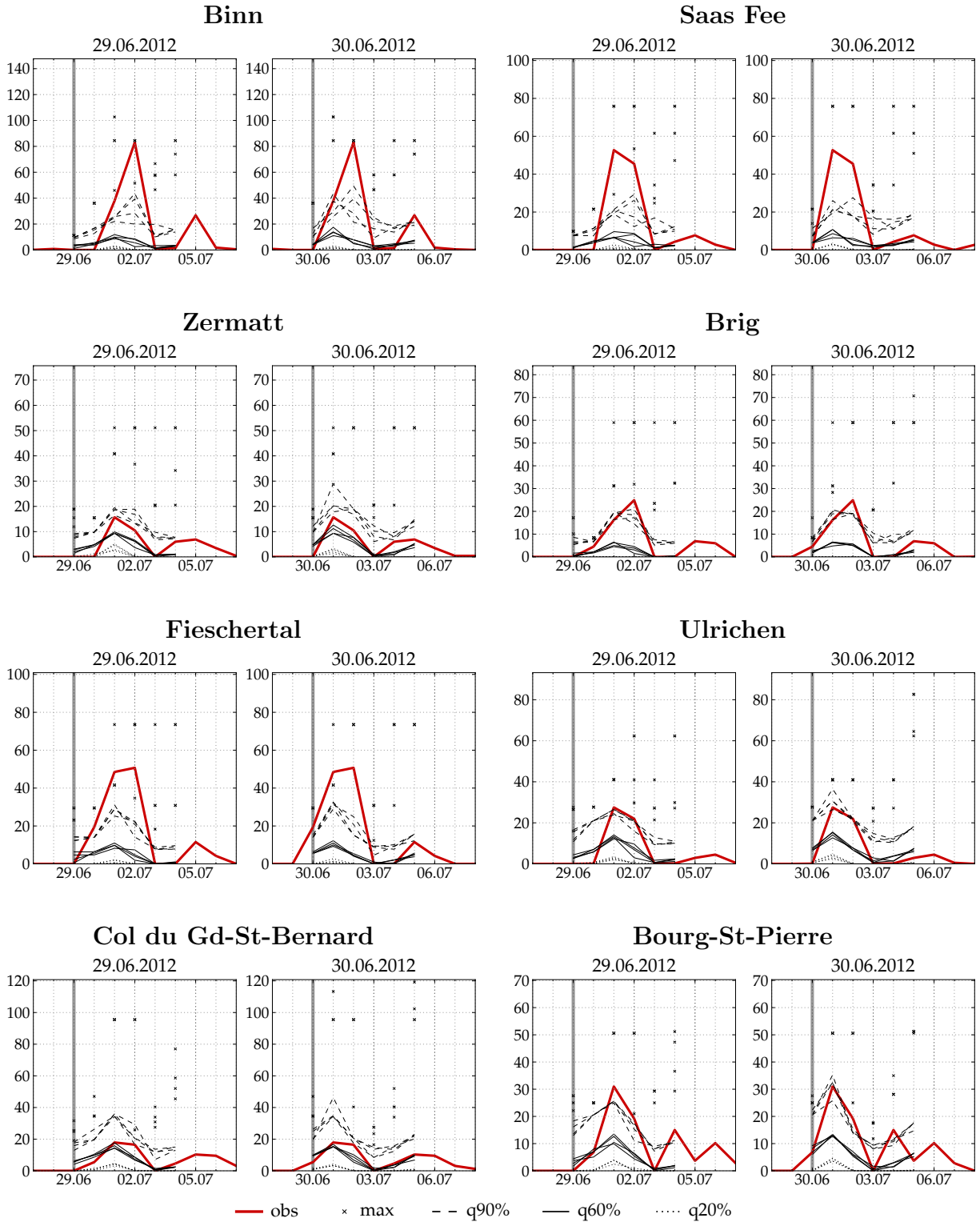


Figure 11.16 – Graphiques de deux échéances des prévisions de précipitations journalières à plusieurs stations d'intérêt pour l'événement de début juillet 2012. Les prévisions sont synthétisées par les quantiles 90 %, 60 % et 20 %, et la valeur maximale. L'ordonnée maximale des graphiques correspond à la valeur de la pluie décennale.

Un élément important est que ces précipitations, issues d'une série d'épisodes orageux, sont tombées sous forme liquide jusqu'à 3800 m sur les versants sud et nord des Alpes valaisannes (CREALP, 2012). De plus, le manteau neigeux était encore important, et sa fonte rapide provoquée par les températures caniculaires des jours précédents et par la pluie à sa surface a fortement contribué au volume d'eau dans les rivières (MétéoSuisse, CREALP, 2012).

Les modèles COSMO-7 et COSMO-2 n'ont pas été en mesure de prévoir correctement cet événement. La répartition géographique des précipitations prévues était très variable entre les simulations et s'est avérée très différente de celle qui a finalement été observée ; de même, les cumuls ont été largement sous-estimés (CREALP, 2012). La nature de ces précipitations issues d'un système organisé en cellules orageuses a rendu la prévision de cet événement très difficile pour les modèles numériques. La température des eaux de surface dans le golfe de Gênes était légèrement supérieure à la moyenne saisonnière (CREALP, 2012), ce qui a pu contribuer aux conditions propices à de violents orages.

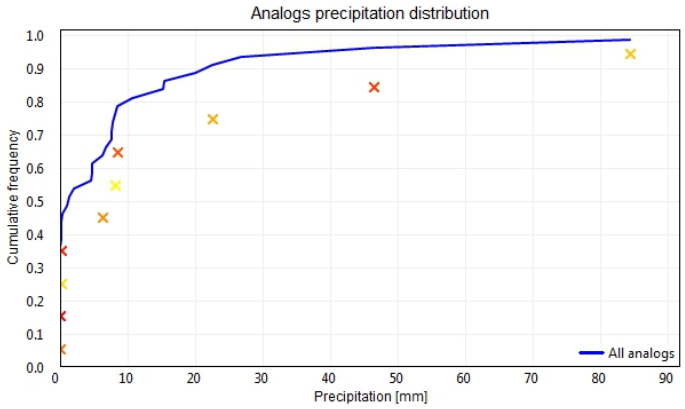


Figure 11.17 – Distribution (prévue le 30 juin) de toutes les analogues (ligne bleue) ainsi que des 10 meilleures (croix) pour le 2 juillet 2012.

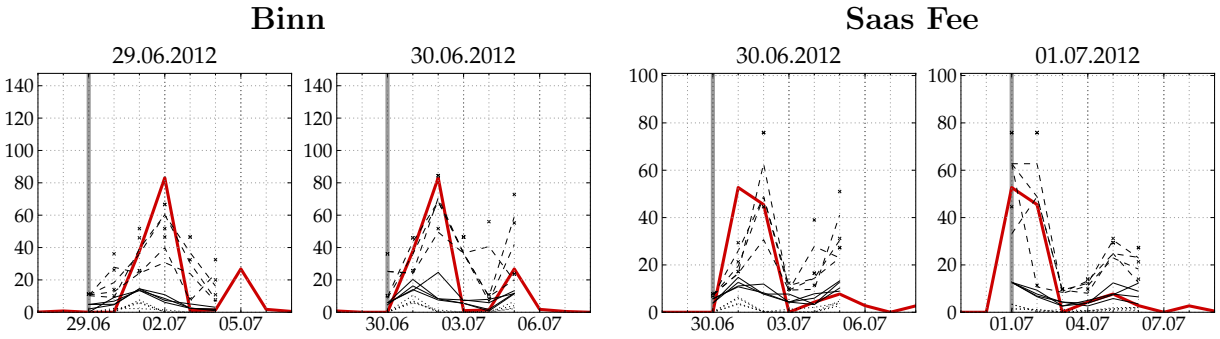


Figure 11.18 – Graphiques de deux échéances des prévisions de précipitations journalières à Binn et Saas-Fee pour l'événement de début juillet 2012. Les quantiles prévus sont ici calculés sur la base des 10 meilleures analogues.

La Figure 11.16 présente les prévisions de la méthode R2 pour différentes stations d'intérêt. Les cumuls ont été systématiquement sous-estimés, et même le quantile 90 % ne parvient pas souvent à englober la série observée. La méthode par analogie R2 a donc manqué cet événement. Rappelons que la méthode est calibrée sur toute l'année, toutes saisons confondues. Or, les précipitations étant moins fréquentes en été comparées aux autres saisons, celles-ci ont moins de poids dans le choix des paramètres. Il en résulte un modèle moins performant en été. De plus, Bliefernicht (2010) avait déjà relevé que la méthode des analogues présentait les moins bonnes performances en été, en raison du rôle de la convection.

Nous avons entrepris des tests avec les réanalyses produites consécutivement à cet événement pour identifier dans quelle mesure l'incertitude de la prévision des prédicteurs a joué un rôle. Même avec des prédicteurs a posteriori « parfaits », nous ne sommes pas en mesure de mieux représenter l'événement (résultats non présentés). La raison de cet échec est soit le caractère exceptionnel des cumuls observés pour ces conditions synoptiques, soit une paramétrisation inadéquate pour correctement prévoir les précipitations. Il aurait été intéressant de disposer des prévisions des nouvelles méthodes développées, mais celles-ci n'étaient pas encore implémentées en opérationnel.

Une information connue des opérateurs de la méthode des analogues est la distribution des 10 meilleures analogues. En effet, si celle-ci diverge de la distribution générale, cela peut être un signe que nous risquons de sous-estimer ou de surestimer les cumuls. Ces distributions, issues des prévisions du 30 juin pour le 2 juillet, sont présentées pour la station de Binn dans la Figure 11.17. Nous pouvons effectivement constater une certaine dérive vers des cumuls plus importants de la distribution des meilleures analogues par rapport à l'ensemble. Toutefois, cet écart est trop faible pour être réellement alarmant. Les graphiques des séries temporelles prévues par les 10 meilleures analogues (pour toutes les échéances) sont présentées dans la Figure 11.18. Les cumuls prévus sont alors un peu supérieurs, mais toujours sous-estimés.

11.4 Conclusions

Les quelques mois d'utilisation des méthodes de référence R1 et R2 en opérationnel prouvent que les analogues apportent de l'information sur les événements à venir. De manière générale, le quantile 60 % cerne plutôt bien les cumuls de précipitations journalières observés. Il y a une prévision claire du signal, mais certains événements ne sont pas reproduits de manière satisfaisante. Nous avons pu observer que la prévision quantitative devient plus difficile lorsque les événements sont plus importants. Djerboua (2001) et Marty (2010) ont mis en évidence que le quantile 90 % est plus représentatif des événements à fort cumul. Toutefois, les distributions sont généralement larges, et les cumuls entre le quantile 60 et 90 % passent du simple au double. En opérationnel, il n'est pas toujours évident de se prononcer sur une quantification des précipitations à venir, en raison de cet étalement des distributions.

Un élément pouvant apporter de l'information est la distribution des 10 meilleures analogues. Si un décalage existe entre cette distribution et celle élaborée sur l'ensemble des analogues, cela peut être un indicateur du fait que nous risquons de sous-estimer ou de surestimer les cumuls. Il est donc important, lorsqu'un événement potentiel se présente, d'analyser le détail des analogues.

Il nous semble nécessaire de poursuivre les recherches dans l'approche par analogie, spécifiquement pour les événements de fortes précipitations, afin d'être en mesure de bien les caractériser. L'identification d'indicateurs objectifs serait une grande aide pour les opérateurs. De plus, l'élaboration de modèles spécialisés pour les extrêmes nous semble intéressante. Nous avons effectué quelques tentatives (non présentées) dans cette direction en optimisant les paramètres exclusivement pour les événements rares. Les paramétrisations résultantes sont plus à même de prévoir les extrêmes, mais sont alors moins bonnes sur l'ensemble des autres situations. Un problème se pose alors en opérationnel, qui est de savoir quand regarder le modèle spécifique pour les extrêmes.

Finalement, il faut rappeler que les modèles actuellement implémentés sont basés sur les méthodes de référence R1 et R2, alors que nous avons élaboré de nouvelles méthodes significativement meilleures dans le cadre de ce travail, qui ne sont pas encore implémentées en opérationnel. On ne minimisera cependant pas l'intérêt de cet exercice opérationnel, qui nous a mis en situation réelle d'application de la méthode, et nous a permis de percevoir et d'affronter les incertitudes auxquelles le prévisionniste doit faire face.

Chapitre 12

Conclusions et perspectives

12.1 Conclusions

Ce travail s'est articulé en deux grandes phases. Dans la première, en réponse aux besoins du projet MINERVE, nous nous sommes attachés à prendre en main la méthode des analogues et à en faire une analyse critique en vue de son transfert dans notre zone d'étude, caractérisée par une très forte influence des reliefs sur les précipitations. Des outils ont été développés pour implémenter la méthode en opérationnel et pour en visualiser les résultats. Cette étape a nécessité une écriture intégrale de tous les algorithmes de la méthode et constitue une masse de codes respectable (89'700 lignes de code personnel en C++, 5'200 en Matlab®, et 17'300 en Python, soit 2'736 pages à ce format, ou encore un peu plus de 6 fois le présent document incluant les annexes). Il a également fallu traiter et compléter les séries de mesures de précipitations et en constituer des archives pluviométriques. Après une phase de tests approfondis, le logiciel développé Atmoswing a pu être implémenté en opérationnel et fonctionne depuis mi-2011. Cette période nous a permis d'acquérir un début d'expérience en tant qu'opérateurs en conditions réelles. Lors de cette première phase, nous avons pu identifier des sources potentielles d'amélioration, et collecter auprès des autres utilisateurs de la méthode des idées ou suggestions qu'eux-mêmes n'avaient pas pu tester.

Ces pistes d'améliorations ont fait l'objet de la seconde phase de notre travail, et ont conduit soit à des succès, soit à des impasses. Mais surtout, notre contribution la plus importante et la plus originale consiste à introduire une technique d'optimisation globale de la méthode. Nous avons démontré la capacité des algorithmes génétiques à optimiser de manière satisfaisante la méthode des analogues, après avoir adapté les calculs à nos contraintes, conçu de nouveaux opérateurs, et effectué de nombreuses et intenses évaluations (pour un total de 229'539 h sur le cluster de l'Unil, soit 26.2 ans de calculs/cpu). Nous en avons proposé une paramétrisation robuste, capable d'être appliquée à d'autres cas d'études.

Nous allons dans un premier temps résumer ces différentes avancées et réalisations, avant d'évoquer les perspectives et quelques-unes des pistes restant à explorer.

12.1.1 Optimisation automatique

Une analyse préliminaire nous a permis de caractériser la sensibilité des paramètres de la méthode des analogues. Cette analyse, ainsi que nos multiples calibrations, ont montré qu'il existait de fortes dépendances entre les paramètres de la méthode, et que les choix de paramètres a priori auraient probablement un impact sur les valeurs optimales des autres. Ainsi, la calibration classique, où le nombre d'analogues initial est choisi a priori, et où les différents niveaux d'analogie sont calibrés successivement, peut ne pas aboutir à la combinaison optimale des paramètres.

Nous avons donc cherché et évalué des méthodes d'optimisation, et retenu les algorithmes génétiques (AGs), capables de travailler sur tous les paramètres et sur tous les niveaux d'analogie de manière conjointe. Au vu du nombre important d'opérateurs existants, nous avons dû en premier lieu rechercher quelles étaient les options qui avaient un effet sur la performance de l'optimiseur.

Nous avons ainsi identifié que l'opérateur de mutation est un élément clé pour notre application, et avons pu élaborer quelques recommandations. Nous proposons finalement une sélection de plusieurs opérateurs, dont certains que nous avons élaborés, qui devraient permettre d'optimiser efficacement différentes implémentations de la méthode des analogues.

Les AGs fournissent des paramétrisations de la méthode des analogues qui surpassent en performance les résultats de la calibration classique. De plus, ils permettent de sélectionner les niveaux atmosphériques et les fenêtres temporelles de manière automatique, ce qui n'était pas possible avec les outils traditionnels, et ce qui peut engendrer un gain de temps considérable. Un grand avantage d'une optimisation globale est sa capacité à s'approcher ou à atteindre des valeurs de paramètres optimales lorsque ceux-ci sont considérés de manière conjointe. Nous avons ainsi pu identifier qu'il existe une dépendance paramétrique entre l'analogie de circulation et celle du flux d'humidité. En considérant les deux niveaux ensemble, les paramètres optimaux de l'analogie de circulation sont différents. Or une telle complexité ne peut être exploitée de manière convenable que par des méthodes d'optimisation globale.

Il semble y avoir un optimum du nombre de niveaux atmosphériques à considérer dans l'analogie de circulation, soit quatre, avant que les gains en validation ne redescendent. Nous avons également pu améliorer l'analogie de circulation en introduisant une pondération entre les niveaux atmosphériques, et en considérant des fenêtres spatiales indépendantes entre niveaux.

Il y a toutefois un risque de surparamétrisation avec ce type d'approche. Il est donc important de toujours évaluer les paramètres proposés sur une période de validation indépendante. Il semble même qu'une approche de validation croisée serait prudente.

12.1.2 Nouvelles paramétrisations proposées

Toutes les variables du jeu de données des réanalyses ont été évaluées en premier, second et troisième niveau d'analogie. Comme Bontron (2004) l'avait identifié, nous confirmons pour notre région alpine la pertinence des variables de circulation en premier niveau d'analogie, et de celles d'humidité en second niveau. D'autres variables peuvent ensuite apporter de petits gains en troisième niveau, mais uniquement de manière marginale.

Nous avons identifié de nouvelles paramétrisations de la méthode des analogues par une démarche d'exploration des données ainsi que par l'optimisation globale. Nous proposons finalement 2 analogies de circulation et 2 analogies intégrant un flux d'humidité, que nous formulons en tant que nouvelles méthodes de référence, comme nous l'avions fait à la section 3.3. Ainsi, nous appelons **R6** la nouvelle méthode basée sur la circulation avec 4 niveaux atmosphériques (voir Table 12.1). Toujours à l'aide des algorithmes génétiques, nous avons optimisé cette méthode en y ajoutant des fenêtres indépendantes par niveau atmosphérique et une pondération entre niveaux. Toutefois, la sélection des niveaux atmosphériques étant identique à R6, nous l'appellerons **R6*** (voir Table 12.2).

Puis nous avons intégré un niveau d'analogie supplémentaire par la considération du flux d'humidité à 700 hPa. Cette analogie n'est pas nouvelle, mais nous en avons modifié le niveau atmosphérique et la fenêtre temporelle, et l'avons combinée à notre amélioration de l'analogie

Table 12.1 – Paramètres de la nouvelle méthode R6.

Niveau	Variable	Heure	Critère
présélection	±60 jours autour de la date cible		
1	géopotentiel à 500 hPa	24 h	S1
	géopotentiel à 700 hPa	12 h	
	géopotentiel à 850 hPa	24 h	
	géopotentiel à 1000 hPa	12 h	

Table 12.2 – Paramètres de la nouvelle méthode optimisée R6*. Changement des fenêtres temporelles par rapport à R6, et ajout d'une pondération entre les niveaux atmosphériques, ainsi que des fenêtres spatiales indépendantes.

Niveau	Variable	Heure	Critère
présélection	±60 jours autour de la date cible		
1	géopotentiel à 500 hPa pondéré	12 h	S1
	géopotentiel à 700 hPa pondéré	18 h	
	géopotentiel à 850 hPa pondéré	24 h	
	géopotentiel à 1000 hPa pondéré	06 h	

Table 12.3 – Paramètres de la nouvelle méthode R7.

Niveau	Variable	Heure	Critère
présélection	±60 jours autour de la date cible		
1	géopotentiel à 500 hPa	24 h	S1
	géopotentiel à 700 hPa	12 h	
	géopotentiel à 850 hPa	24 h	
	géopotentiel à 1000 hPa	12 h	
2	V 700 hPa * eau préc. * humidité rel. 700 hPa	12, 24 h	RMSE

Table 12.4 – Paramètres de la nouvelle méthode optimisée R7*. Changement des fenêtres temporelles par rapport à R7, et ajout d'une pondération entre les niveaux atmosphériques, ainsi que des fenêtres spatiales indépendantes.

Niveau	Variable	Heure	Critère
présélection	±60 jours autour de la date cible		
1	géopotentiel à 500 hPa pondéré	12 h	S1
	géopotentiel à 700 hPa pondéré	24 h	
	géopotentiel à 850 hPa pondéré	24 h	
	géopotentiel à 1000 hPa pondéré	12 h	
2	V 700 hPa * eau préc. * humidité rel. 700 hPa	12, 24 h	RMSE

Table 12.5 – Liste des groupements pluviométriques.

	Nom région
1.	Chablais
2.	Vallée du Trient
3.	Alpes bernoises ouest
4.	Vallée du Rhône aval
5.	Vallées latérales gauches
6.	Crêtes du sud
7.	Vallée du Rhône amont
8.	Crêtes du sud-est
9.	Alpes bernoises est
10.	Vallée de Conches

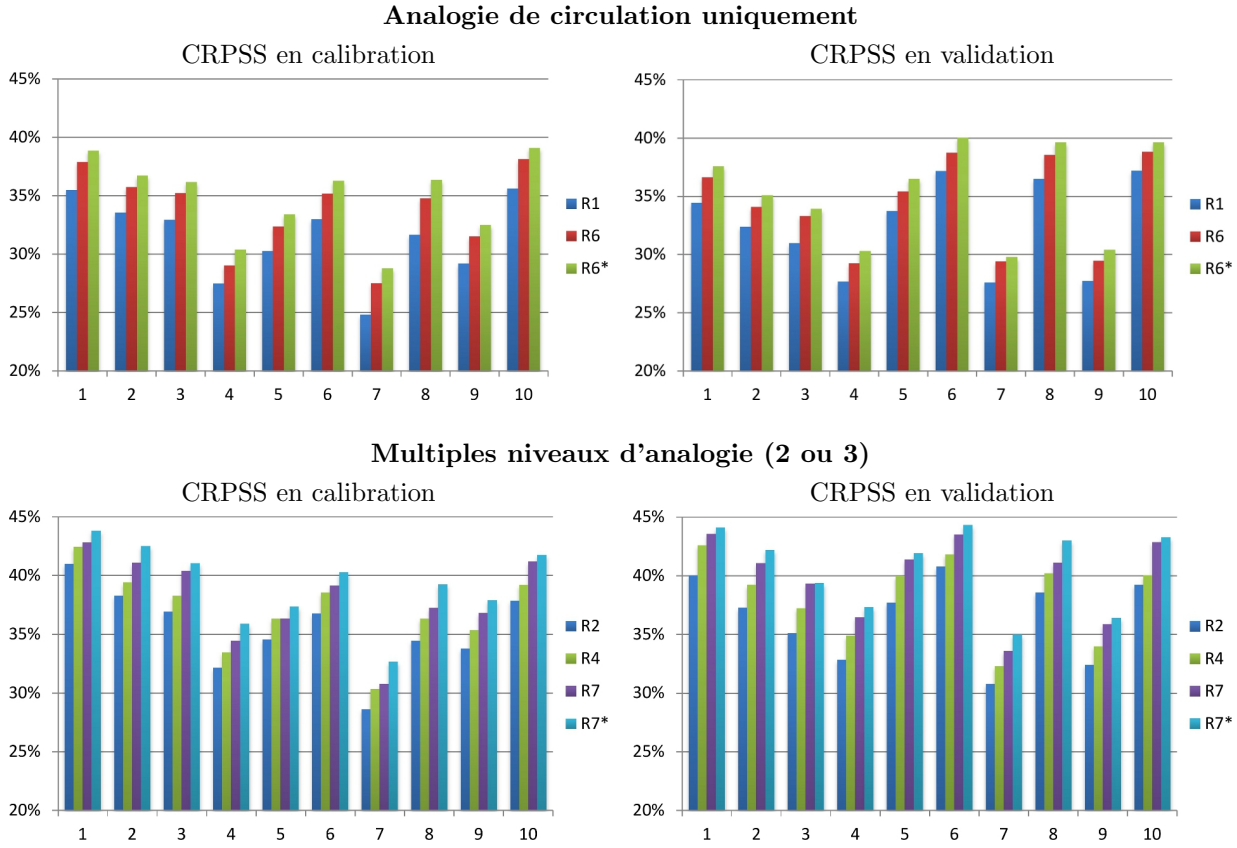


Figure 12.1 – Comparaison des performances (en calibration et validation) des méthodes développées par rapport aux méthodes de référence. Les numéros en abscisse correspondent aux groupements listés dans la Table 12.5.

de circulation. Nous proposons d'appeler cette méthode **R7** (voir Table 12.3). À nouveau, à l'aide de l'optimisation globale, nous avons reconsidéré les paramètres des deux niveaux d'analogie de manière conjointe, et avons introduit des fenêtres spatiales indépendantes et une pondération par niveau atmosphérique. Il en résulte une méthode proche du point de vue des variables considérées, mais avec davantage de degrés de liberté. Nous l'appellerons **R7*** (voir Table 12.4).

Les performances des méthodes développées sont illustrées dans la Figure 12.1. Les scores CRPSS sont systématiquement meilleurs en calibration et en validation que les méthodes de référence, que ce soit sur l'analogie de circulation uniquement, ou après intégration d'autres niveaux d'analogie (p.ex. le flux d'humidité). Puisque nous avons travaillé sur des séries pluviométriques sans le traitement par la racine carrée, les valeurs des scores ne peuvent pas être directement comparées avec d'autres travaux. Par acquis de conscience, nous avons calculé les scores CRPSS des mêmes méthodes pour les séries de précipitations transformées par la racine carrée, et les résultats (non présentés) sont très similaires de manière relative entre les méthodes, mais les valeurs absolues sont plus élevées.

12.1.3 Autres modifications de la méthode

Habituellement, nous recherchons des analogues à des heures fixes de la journée en raison de l'utilisation d'archives pluviométriques à résolution journalière. Toutefois, la meilleure correspondance entre deux situations synoptiques n'a pas forcément lieu au même moment de la journée. Ainsi, nous avons introduit une fenêtre temporelle glissante pour nous autoriser à rechercher des analogies synoptiques aux 4 pas de temps journaliers du jeu de données des réanalyses. Nous avons alors constaté une accumulation de meilleures analogues dans les distributions de chaque jour cible.

Cette modification apporte un gain certain en analogie synoptique, particulièrement pour les jours avec de fortes précipitations, où la situation est a priori plus dynamique. Nous avons également évalué l'effet saisonnier : la fenêtre temporelle glissante améliore un peu moins l'analogie en été qu'en hiver, en raison d'un cycle journalier davantage prononcé. L'effet diurne en été est donc calé sur le cycle journalier et nous trouvons déjà de bonnes analogues aux mêmes heures. L'automne et le printemps affichent des améliorations intermédiaires.

Afin de quantifier le gain de performance en prévision de précipitations, nous avons considéré une série de précipitations sous la forme d'un cumul sur 24 h, mais glissant sur 6 h. Outre le cumul 06 h UTC à 06 h UTC le lendemain, nous constituons l'archive 12 h UTC - 12 h UTC, 18 h UTC - 18 h UTC, et 24 h UTC - 24 h UTC. Pour ce faire, nous avons utilisé les données des stations automatiques effectuant des relevés à pas de temps infrajournaliers. Toutefois, ces données ne sont disponibles que depuis 1982, et nous perdons donc 21 ans de longueur d'archive, ce qui engendre une perte en compétence des méthodes de référence. Mais avec l'introduction de la fenêtre temporelle glissante, nous regagnons en moyenne ce que nous avions alors perdu. Cette technique de la fenêtre glissante équivaut donc, dans notre cas, approximativement à un doublement de la taille de l'archive. Si l'intérêt est aujourd'hui limité en raison de la réduction de la richesse des situations candidates, la création de réanalyses infrajournalières de précipitations permettrait alors d'exploiter tout le potentiel de cette amélioration.

Nous avons ensuite cherché à améliorer la prévision de l'occurrence des précipitations de manière indépendante des cumuls, car un modèle optimal pour la prévision quantitative des précipitations ne l'est pas forcément pour la prévision de l'occurrence. Dans ce cas, il pouvait être intéressant de combiner deux approches différentes en une même prévision. Ceci peut

être réalisé dans la méthode des analogues en remplaçant la fréquence des pluies nulles dans les distributions prévues. Nous avons alors évalué les approches suivantes pour la prévision de l'occurrence des précipitations :

- séries générées par un modèle linéaire généralisé ;
- fréquences des pluies nulles observées par type de temps (avec de nombreux catalogues) ;
- calibration d'un modèle analogue pour la seule prévision d'occurrence des pluies ;
- recherche du quantile, dans les distributions des analogues, le plus explicatif pour l'occurrence des pluies ;
- exploitation, pour prévoir l'occurrence, des prévisions d'ensemble du modèle global utilisé en prévision.

Toutes les variantes évaluées présentent de moins bons résultats que la méthode de base des analogues. Celle-ci affiche systématiquement une meilleure prévision de l'occurrence des pluies, sans que nous l'ayons calibrée particulièrement à cette fin. La méthode des analogues prévoit donc l'occurrence des précipitations de manière performante, et il faudrait un modèle significativement plus élaboré pour la surpasser. Cette évaluation ayant été réalisée en prévision parfaite, nous ne pouvons pas comparer directement les résultats obtenus avec les prévisions d'ensemble du modèle numérique global, car celui-ci est entaché de plus grandes incertitudes de prévision que les données des réanalyses.

Nous avons encore implémenté et évalué la prévision des précipitations à un pas de temps de 6 h. Cette plus grande résolution temporelle est un défi pour la calibration (les scores étant inférieurs à ceux obtenus pour la série journalière), mais l'information plus précise de la chronologie des événements la rend très intéressante en opérationnel.

12.1.4 Performances en opérationnel

Nous avons dans un premier temps montré l'intérêt de travailler en calibration sur des groupements pluviométriques plutôt qu'à l'échelle de la station, car deux événements très similaires d'un point de vue synoptique contiennent toujours une variabilité régionale de la répartition spatiale des cumuls de précipitations. Ainsi, avec des groupements, nous cherchons à homogénéiser les précipitations d'une région ayant une même réponse aux diverses influences atmosphériques. Nous avons mis en évidence l'intérêt d'une archive de réanalyses des précipitations, qui permet de représenter des cumuls plus proches des vraies pluies de bassins que des moyennes pondérées par la méthode de Thiessen.

Différentes propositions ont été faites sur la base d'expertises et d'une analyse de la cohérence spatiale entre les paramètres de la méthode des analogues dans le but d'élaborer des groupements les plus homogènes possible en termes d'influences atmosphériques, de taille, et de nombre de stations agrégées. Nous avons retenu au final 10 groupements pour lesquels toutes les méthodes de référence ont été calibrées.

Un logiciel, appelé Atmoswing (*Analog Technique MOdel for Statistical Weather forecastING*) a été développé pour calculer les prévisions en opérationnel, ainsi que pour les visualiser à l'aide de cartes et de graphiques. L'outil de prévision peut être automatisé sur

un serveur et calcule 4 prévisions par jour, c'est-à-dire à chaque fois que de nouvelles prévisions synoptiques sont disponibles. L'implémentation de la méthode des analogues a été faite de manière très modulable pour rendre possible l'application de toute structure (nombre de niveaux d'analogie et nombre de variables prédicteurs) et paramétrisation de la méthode. Le cœur du calcul de la prévision a été optimisé pour réduire le temps d'exécution, et est régulièrement soumis à une liste de tests afin de vérifier l'exactitude des résultats. L'outil de visualisation offre un aperçu synthétique de toutes les échéances, mais permet également d'analyser les détails des distributions et des analogues pour chaque station.

Les prévisions opérationnelles (méthodes R1 et R2) considérées sur une période de 10 mois peuvent être qualifiées de satisfaisantes de manière générale. Le quantile 60 % reproduit bien une partie conséquente des cumuls journaliers. Toutefois, il y a également des événements surévalués, et d'autres manqués. Une difficulté en opérationnel est l'interprétation des très larges distributions proposées par les analogues. Il existe toutefois des indicateurs, tels que la distribution des 10 meilleures analogues, qui peuvent parfois aider à interpréter les résultats. Nous avons pu aussi vérifier la bonne mise en alerte précoce, due au fait que les analogues reposent sur des prédicteurs synoptiques robustes en prévision (les champs de géopotentiel).

12.2 Le contexte du changement climatique

Il est légitime de se poser la question de la pertinence d'une approche se basant sur des archives de mesures, telle que la méthode des analogues, dans un contexte de changements climatiques. Une augmentation récente des températures en Europe a été démontrée par plusieurs études (Jones et Moberg, 2003; Moberg et al., 2006), et une augmentation de la fréquence des fortes précipitations a déjà été observée (Frei et al., 2000; Frei et Schär, 2001; Schmidli et Frei, 2005; Fallot, 2000). Frei et Schär (2001) ont identifié une augmentation significative des précipitations intenses (période de retour de 30 ans) sur la période 1901-1994, pour les mois d'automne et d'hiver. En revanche, ces derniers n'ont pas pu mettre en évidence une tendance pour les événements extrêmes (période de retour de 100 ans) qui soit statistiquement significative, excepté pour certaines stations.

Le premier élément potentiellement nuisible à la méthode des analogues est l'impact du changement climatique sur la circulation atmosphérique. Philipp et al. (2007) ont identifié des tendances dans la répartition des fréquences de certains types de circulation en Europe, de 1851 à 2003. Les changements, mis en évidence par une classification établie à l'aide d'une méthode d'optimisation, sont les suivants (Philipp et al., 2007) :

- Hiver : augmentation de la circulation zonale dirigée par l'activité cyclonique au nord des Iles Britanniques (créant de l'advection d'air maritime chaud sur le continent européen), et diminution de la fréquence des hautes pressions sur la Russie, associées à une dépression dans l'Atlantique nord.
- Printemps : augmentation des situations de blocages anticycloniques et diminution des dépressions sur l'est de la Scandinavie.

– Été : changements dans les directions et intensités de l'extension sur l'Europe de l'anticyclone des Açores.
– Automne : changement dans la répartition du système de hautes pressions sur la Russie, avec une diminution de la fréquence des systèmes étendus à l'ouest au profit de ceux situés davantage au sud.

Cette analyse présente certaines tendances modérées dans la répartition de la circulation, mais les situations les plus critiques pour le bassin alpin du Rhône ne semblent pas augmenter. La méthode des analogues, qui se base en premier lieu sur l'information de la circulation, n'est donc pas significativement affectée par ces changements, car les lois de base régissant l'atmosphère ne vont pas être transformées (Hewitson et Crane, 1996). L'hypothèse est qu'une grande part du changement de climat local découlera de changements dans l'intensité, la fréquence et la persistance de variables synoptiques, mais dont les autres caractéristiques sont essentiellement semblables à la situation du présent (Hewitson et Crane, 1996). Ainsi, si l'archive des situations météorologiques est suffisamment longue, il est raisonnable de supposer qu'une grande partie des situations futures y est déjà représentée, même celles dont la fréquence va changer sous des conditions climatiques différentes (Wetterhall, 2005). De plus, les changements climatiques sont relativement lents, et par la mise à jour continue de l'archive, la méthode intégrera la nouvelle information au fur et à mesure, sans présenter de discontinuité.

12.3 Perspectives

Même si nous pensons avoir fait significativement progresser l'approche de prévision par analogie, notamment en proposant une technique d'optimisation globale, il serait présomptueux d'affirmer en avoir exploité tous les aspects. Un espoir important repose sur la disponibilité future de nouvelles données de prédicteurs (variables synoptiques) et de prédictands (séries de précipitations), avec une meilleure résolution spatiale et temporelle et une plus grande longueur d'archive.

Un grand défi, peu exploré à ce jour, consistera à réoptimiser la méthode selon des échéances visées (de 1 à 10 jours) et selon le modèle météorologique global considéré. Des approches multimodèles peuvent également s'avérer intéressantes. La prise en compte de prévisions d'ensemble nous semble être une étape indispensable pour l'exploitation de la méthode en opérationnel.

12.3.1 Améliorations de la méthode

La méthode des analogues est habituellement calibrée sur toute l'année, et la paramétrisation est identique pour chaque saison. Or les influences principales peuvent changer d'une saison à l'autre, et nous pourrions imaginer que les paramètres optimaux pour une période de l'année ne le soient pas pour une autre. Ainsi, une calibration par saison mérite d'être explorée. Cela amène néanmoins quelques difficultés dans les périodes de transition entre

saisons, où nous pourrions ne pas être optimaux. De plus, nous pouvons parfois rencontrer des épisodes caractéristiques d'une certaine saison dans une autre.

Il nous semble nécessaire de poursuivre les recherches dans l'approche par analogie, spécifiquement pour les événements de fortes précipitations, afin d'être en mesure de bien les caractériser. L'élaboration de paramétrisations de la méthode des analogues optimisées pour les extrêmes nous semble intéressante, tant que celles-ci sont considérées en parallèle de méthodes optimales pour l'ensemble des situations.

Les méthodes que nous proposons, ainsi que les méthodes de référence, décrivent en premier lieu l'information de la circulation atmosphérique, puis en second, celle de l'humidité. Après les événements de 2011 en Ligurie, nous estimons qu'il serait intéressant d'ajouter un troisième niveau d'analogie pour caractériser le déclenchement des précipitations, et donc pour déterminer si les forts cumuls sont plus probables à proximité des côtes en raison d'une très forte convection, ou si les masses d'air humides sont en mesure d'atteindre le bassin du Rhône. Ben Daoud (2010) intègre les mouvements verticaux dans la recherche d'analogie, mais nous avons vu que cette variable n'est pas pertinente pour notre région. Des variables de nature thermique semblaient pouvoir améliorer la prévision dans le bassin supérieur du Rhône, particulièrement pour les crêtes du sud-est.

Nous avons travaillé ici avec des fenêtres spatiales rectangulaires, où tous les points ont le même poids. Bliefernicht (2010) avait introduit une pondération des points de grille en adaptant des formes elliptiques sur les champs des variables synoptiques. La méthode des analogues qu'il a considérée étant différente de notre version, le succès de cette démarche n'est pas garanti. Toutefois, il serait intéressant de l'évaluer sur les différents niveaux d'analogie. De même, nous pourrions imaginer calculer les gradients réels en tenant compte des distances horizontales. Ceci pourrait permettre de tenir compte de la déformation de la grille, laquelle s'accentue lorsque l'on s'éloigne de l'équateur.

Les outils d'optimisation globale permettent d'explorer automatiquement des jeux de données pour en extraire les variables les plus pertinentes. Il devient ainsi possible de chercher à prévoir un autre prédictand, par exemple la température, la limite des chutes de neige, l'occurrence de grêle, ou le vent, en laissant les algorithmes choisir les meilleures variables et les paramètres associés.

Il semble que la méthode des analogues doive être adaptée spécifiquement à chaque région, et que cela n'est pas un défaut, mais est lié à une réalité physique. Ainsi, plusieurs études proposent des paramétrisations différentes en lien avec les processus météorologiques propres au lieu où elles ont été appliquées :

- Dans les Cévennes, Marty (2010) a identifié le niveau 925 hPa comme étant optimal pour l'analogie d'humidité. Les masses d'air arrivant dans cette région par un flux de sud viennent en effet de se charger en humidité sur la Méditerranée, et cette humidité est vraisemblablement encore située dans les basses couches.

- Dans les grandes plaines de l'est de la France, Ben Daoud (2010) a au contraire trouvé que le niveau 700 hPa est préférable. Cette humidité provient de l'Atlantique et se trouve effectivement transportée à cette altitude par la circulation générale.

– Nous avons également identifié le niveau 700 hPa comme étant optimal pour la comparaison du flux d'humidité dans le bassin alpin du Rhône. Cette humidité, même si elle peut provenir en partie de la Méditerranée, doit franchir la barrière des Alpes pour être efficace en termes de précipitations. Le niveau 700 hPa doit donc correspondre à une certaine réalité liée à l'altitude moyenne des bassins versants affectés et aux observations des radiosondages réanalysées par le modèle numérique global.

De même, la taille optimale des bassins cibles dépend de leur environnement topographique, ainsi que des principales influences météorologiques. Ainsi, l'optimum semble se situer entre 200 et 400 km^2 pour les Cévennes (Bontron, 2004), et entre 3000 et 6000 km^2 pour les grandes plaines de l'est de la France (Ben Daoud, 2010). De même, certaines variables prédicteurs (p.ex. la vitesse verticale) n'ont un sens que pour ces grands bassins, en raison, entre autres, de leur résolution (2.5°). La vitesse verticale ne présente pas d'intérêt dans le bassin du Rhône en Suisse, en raison de sa petite taille relativement aux données synoptiques, et en raison du rôle dominant joué par la topographie. Il restera donc toujours des adaptations locales à faire pour utiliser la méthode dans une nouvelle région.

12.3.2 Prévision opérationnelle et interprétation des prévisions

La première priorité pour la prévision opérationnelle est évidemment l'implémentation des nouvelles méthodes développées dans le présent travail. Celles-ci sont certainement meilleures que les méthodes de référence actuellement implémentées. Nous conseillons toutefois de conserver les méthodes de référence en opérationnel, car celles-ci ont été rodées par différents instituts et pendant de nombreuses années. Il est également important d'introduire la technique de correction du biais développée par Marty (2010). De plus, il serait encore prudent de réoptimiser au moins le nombre d'analogues en fonction de l'échéance. En effet, celui-ci a été approximé sur la base de travaux réalisés dans un contexte différent.

Nous recommandons de continuer les recherches sur les situations responsables des précipitations extrêmes dans le bassin du Rhône, particulièrement lors des conditions de barrage du flux de sud. Si des indicateurs existent permettant de faire la différence entre un événement fort et un événement extrême, ceux-ci constitueront une grande aide lors de l'interprétation des prévisions. Quelques pistes à explorer (certaines l'ont déjà été dans d'autres contextes) sont par exemple :

– influence des indices climatiques (de type NAO, ENSO, ...) ;
– analyse statistique de l'influence réelle de la température de surface de certaines régions de la Méditerranée ;
– identification des processus menant à la convection et indicateurs de la localisation des plus gros cumuls ;
– calculs des trajectoires inverses et identification en temps réel des sources d'humidité (jusque dans l'Atlantique) des masses d'air arrivant sur le bassin, par exemple à l'aide de la méthodologie utilisée par Turato et al. (2004).

Pour ce qui est de la méthode des analogues, des indicateurs issus des détails de la prévision, par exemple l'identification automatique d'une différence entre la distribution globale et celle des meilleures analogues, pourraient s'avérer utiles. Une autre information possible serait une interprétation semi-automatique proposant le quantile de la distribution qu'il est conseillé de considérer.

Une désagrégation temporelle des précipitations journalières serait nécessaire pour l'alimentation d'un modèle hydrologique. Il existe différentes techniques permettant de réaliser une série temporelle infrajournalière, dont celle présentée par Marty (2010), qui a l'avantage de se rapprocher de la chronologie attendue de l'événement. Nous pourrions également imaginer utiliser les cumuls prévus par les analogues pour mettre à l'échelle les grilles issues des prévisions du modèle COSMO-2, tout en exploitant leur cohérence spatiale.

12.4 Le mot de la fin

La méthode des analogues nous semble être une approche qui apporte de l'information utile en opérationnel, et permet de mettre en alerte ou de rassurer le prévisionniste. Elle ne prétend cependant pas remplacer les modèles numériques régionaux, mais doit être considérée en parallèle de ceux-ci. Elle peut alors constituer un outil d'alerte intéressant avant une crise, ainsi qu'un complément utile pendant celle-ci. De plus, elle ne nécessite pas de ressource informatique particulière pour calculer les prévisions en temps réel, ce qui la met à portée de tous.

Même si certains prédisent régulièrement sa disparition avec l'amélioration des modèles numériques de prévision, nous avons vu qu'elle avait elle aussi encore un potentiel d'amélioration substantiel. Les nouvelles versions des réanalyses à venir vont certainement apporter un gain de performances. De plus, les techniques d'optimisation globale, telles que celles mises en œuvre dans ce travail, ouvrent de nouvelles perspectives en termes d'exploration de données et de paramètres.

Bibliographie

Alliot J.M. et Durand N. Algorithmes génétiques. Centre d'Etudes de la Navigation Aérienne, 2005.

Andersson E. et Thépaut J.N. ECMWF's 4D-Var data assimilation system - the genesis and ten years in operations. *ECMWF Newsletter*, 115:8–12, 2008.

Antolik M.S. An overview of the National Weather Service's centralized statistical quantitative precipitation forecasts. *Journal of Hydrology*, 239(1-4):306–337, 2000.

Atger F. Verification of intense precipitation forecasts from single models and ensemble prediction systems. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 8(6):401–417, 2001.

Attinger S. et Fallot J.M. Fréquence des intempéries et des précipitations abondantes en Valais (Alpes Suisses occidentales) durant le 20ème siècle. *Publications de l'AIC*, 15:1–8, 2003.

Aubert C. Fréquence annuelle des orages. Atlas climatologique de la Suisse, 1991.

Austin G.L. et Bellon A. The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 100(426):658–664, 1974.

Azadivar F. A tutorial on simulation optimization. In *Proceedings of the 24th conference on Winter simulation*, pages 198–204. ACM, 1992.

Bäck T. Self-adaptation in genetic algorithms. In *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*, pages 263–271. Massachusetts, USA, 1992a.

Bäck T. The interaction of mutation rate, selection, and self-adaptation within a genetic algorithm. *Parallel Problem Solving from Nature*, 2:85–94, 1992b.

Bäck T. Optimal Mutation Rates in Genetic Search. In *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*, pages 2–8. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993.

Bäck T. Evolution Strategies: An Alternative Evolutionary Algorithm. In *Artificial Evolution*, pages 3–20. Springer-Verlag, 1996.

Bäck T. et Schwefel H.P. An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization. *Evolutionary Computation*, 1(1):1–23, 1993.

Bäck T. et Schütz M. Intelligent mutation rate control in canonical genetic algorithms. In *Foundation of Intelligent Systems 9th International Symposium*, volume 1079, pages 158–167. Springer, 1996.

Bárdossy A. Stochastic Downscaling Methods to Assess the Hydrological Impacts of Climate Change on River Basin Hydrology. In *Climate Scenarios for Water-Related and Coastal Impacts. Proceedings of the EU Concerted Action Initiative ECLAT-2 Workshop 3. KNMI, Netherlands, May 10-12th 2000, Climatic Research Unit, Norwich*, pages 18–34, 2000.

Barnett T.P. et Preisendorfer R.W. Multifield Analog Prediction of Short-Term Climate Fluctuations Using a Climate State vector. *Journal of Atmospheric Sciences*, 35:1771–1787, 1978.

Bauer P., Lopez P., Geer A., et Salmond D. The assimilation of cloud and rain observations from space. *ECMWF Newsletter*, 110:12–19, 2007.

Beasley D., Bull D.R., et Martin R.R. An overview of genetic algorithms: Part 2, research topics. *University Computing*, 15(4):170–181, 1993.

Beasley J.E. et Chu P.C. A genetic algorithm for the set covering problem. *European Journal of Operational Research*, 94(2):392–404, 1996.

Beck C. *Zirkulationsdynamische Variabilität im Bereich Nordatlantik-Europa seit 1780*. Wurzburger Geographische Arbeiten 95, 2000.

Ben Daoud A. *Amélioratıons et développements d'une méthode de prévision probabiliste des pluies par analogie.* Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.

Ben Daoud A., Bontron G., Sauquet E., Obled Ch., et Lang M. La prévision des précipitations par recherche d'analogues : état de l'art et perspectives. In *Prévisions hydrométéorologiques, SHF, Lyon*, 2008.

Ben Daoud A., Sauquet E., Lang M., Obled C., et Bontron G. La prévision des précipitations par recherche d'analogues: état de l'art et perspectives. *La Houille Blanche*, 6:60–65, 2009.

Bergen R.E. et Harnack R.P. Long-range temperature prediction using a simple analog approach. *Monthly Weather Review*, 110:1083–1099, 1982.

Bierlaire M. *Introduction à l'optimisation différentiable.* PPUR presses polytechniques et universitaires romandes, 2006.

Binder P. et Schär C. MAP design proposal. Available from MAP Project Office, MeteoSwiss, Switzerland, 1996.

Blair D. The Kirchhofer technique of synoptic typing revisited. *International Journal of Climatology*, 18(14):1625–1635, 1998.

Bliefernicht J. *Probability forecasts of daily areal precipitation for small river basins.* Thèse de doctorat, Universität Stuttgart, 2010.

Bliefernicht J. et Bárdossy A. Probabilistic forecast of daily areal precipitation focusing on extreme events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(2):263–269, 2007.

Boillat J.L. L'influence des retenues valaisannes sur les crues - Le projet MINERVE. *Communication du Laboratoire de Constructions Hydrauliques*, 21:87–101, 2005.

Bois P., Obled C., et Thalamy J. Etude des liaisons entre champs de pression et températures sur l'Europe avec la durée d'insolation: Application à la possibilité de la prévision d'insolation. In *C.R. du colloque Météorologie de l'énergie solaire, PIRDES-CNRS, Toulouse*, pages 145–177, 1981.

Bois P., Obled C., et Zin I. Introduction au traitement de données en hydrologie. Cours polycopié, Institut National Polytechnique de Grenoble, E.N.S. d'Hydraulique et Mécanique de Grenoble (ENSHMG), 2007.

Bolognesi R. Premiers développements d'un modèle hybride pour le diagnostic spatial des risques d'avalanches. *La Houille Blanche*, 8:551–553, 1993.

Bontron G. *Prévision quantitative des précipitations: Adaptation probabiliste par recherche d'analogues. Utilisation des Réanalyses NCEP/NCAR et application aux précipitations du Sud-Est de la France.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004.

Bontron G. et Obled C. L'adaptation probabiliste des prévisions météorologiques pour la prévision hydrologique. *La Houille Blanche*, 1:23–28, 2005.

Bougeault P., Binder P., Buzzi A., Dirks R., Houze R., Kuettner J., Smith R.B., Steinacker R., et Volkert H. The MAP special observing period. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(3):433–462, 2001.

Bousquet O. et Smull B.F. Comparative study of two orographic precipitation events exhibiting significant upstream blocking during MAP. *MAP Newsletter*, 15:76–79, 2001.

Bousquet O. et Smull B.F. Observations and impacts of upstream blocking during a widespread orographic precipitation event. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129(588): 391–409, 2003.

Brauchli T. An analysis of critical meteorological conditions related to floods in Canton Valais. Travail de master, ETHZ, 2009.

Brier G.W. Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Monthly Weather Review*, 78(1):1–3, 1950.

Brown T.A. Admissible Scoring Systems for Continuous Distributions. The Rand Corporation, Santa Monica, CA, 1974.

Buizza R., Richardson D.S., et Palmer T.N. Benefits of increased resolution in the ECMWF ensemble system and comparison with poor-man's ensembles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129(589):1269–1288, 2003.

Buzzi A., d'Isidoro M., et Davolio S. A case-study of an orographic cyclone south of the Alps during the MAP SOP. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129(591):1795–1818, 2003.

Buzzi A. et Foschini L. Mesoscale meteorological features associated with heavy precipitation in the southern Alpine region. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 72(2):131–146, 2000.

Buzzi A., Tartaglione N., et Malguzzi P. Numerical simulations of the 1994 Piedmont flood: Role of orography and moist processes. *Monthly Weather Review*, 126(9):2369–2383, 1998.

Caplan P., Derber J., Gemmill W., Hong S.Y., Pan H.L., et Parrish D. Changes to the 1995 NCEP operational medium-range forecast model analysis-forecast system. *Weather and Forecasting*, 12 (3):581–594, 1997.

Casati B., Wilson L.J., Stephenson D.B., Nurmi P., Ghelli A., Pocernich M., Damrath U., Ebert E.E., Brown B.G., et Mason S. Forecast verification: current status and future directions. *Meteorological Applications*, 15(1):3–18, 2008.

Consuegra D., Niggli M., et Musy A. Concepts méthodologiques pour le calcul des crues, application au bassin versant supérieur du Rhône. *Wasser Energie Luft – Eau Energie Air*, 9(10):223–231, 1998.

Costa C.B.B., Rivera E.A.C., Ferreira Rezende M.C.A., et Wolf Maciel M.R. Prior detection of genetic algorithm significant parameters: Coupling factorial design technique to genetic algorithm. *Chemical Engineering Science*, 62(17):4780–4801, 2007.

Costa C.B.B., Rivera E.A.C., Ferreira Rezende M.C.A., Wolf Maciel M.R., et Filho R.M. Factorial design technique applied to genetic algorithm parameters in a batch cooling crystallization optimisation. *Computers & Chemical Engineering*, 29(10):2229–2241, 2005.

CREALP . Evénement de précipitations du 3 au 9 novembre 2011, Rapport de la Cellule de crise cantonale CERISE, 2011.

CREALP . Analyse hydro-météorologique de la crue du Rhône du 2 juillet 2012, 2012.

Creutin J.D. et Obled C. Elimination de variables et optimisation de réseaux de mesures. *Data Analysis and Informatics*, pages 759–775, 1980.

Cunnane C. Unbiased plotting positions - A review. *Journal of Hydrology*, 37(3-4):205–222, 1978.

Daley R. *Atmospheric Data Analysis*, volume 2. Cambridge University Press, 1993.

Danielsen E.F. Trajectories: Isobaric, Isentropic and Actual. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 18(4):479–486, 1961.

Danielsen E.F., Hipskind R.S., Gaines S.E., Sachse G.W., Gregory G.L., et Hill G.F. Three-dimensional analysis of potential vorticity associated with tropopause folds and observed variations of ozone and carbon monoxide. *Journal of Geophysical Research*, 92(D2):2103–2111, 1987.

Davis R.E. et Walker D.R. An Upper-Air Synoptic Climatology of the Western United States. *Journal of Climate*, 5(12):1449–1467, 1992.

Davolio S., Buzzi A., Malguzzi P., Mastrangelo D., Laviola S., Levizzani V., Lighezzolo A., et Munoz E. Analyses of heavy precipitation events over Ligurian region. 6th HyMeX Workshop, Primosten, Croatia, 2012.

De Jong K.A. *Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems.* Thèse de doctorat, University of Michigan, 1975.

Deb K. et Beyer H.G. Self-adaptation in real-parameter genetic algorithms with simulated binary crossover. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO), Orlanda, USA*, pages 172–179, 1999.

Deb K. et Beyer H.G. Self-adaptive genetic algorithms with simulated binary crossover. *Evolutionary Computation*, 9(2):197–221, 2001.

Deidda R. Multifractal analysis and simulation of rainfall fields in space. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2):73–78, 1999.

Desaint B., Nogues P., Perret C., et Garçon R. La Prévision Hydrométéorologique Opérationnelle: l'Expérience d'Eléctricité de France. In *Prévisions hydrométéorologiques, SHF, Lyon*, 2008.

Dirmeyer P.A. et Brubaker K.L. Contrasting evaporative moisture sources during the drought of 1988 and the flood of 1993. *Journal of Geophysical Research*, 104:19, 1999.

Dittmann E., Barth S., Lang J., et Müller-Westermeier G. *Objektive Wetterlagenklassifikation.* Ber. Dt. Wetterd. 197, Offenbach a. M., Germany, 1995.

Dixon M. et Wiener G. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting - A Radar-based Methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10(6):785–797, 1993.

Djerboua A. *Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les Alpes franco-italiennes - Prévision quantitative des pluies journalières par la méthode des Analogues.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.

Doswell III C.A., Ramis C., Romero R., et Alonso S. A diagnostic study of three heavy precipitation episodes in the western Mediterranean region. *Weather and Forecasting*, 13(1):102–124, 1998.

Drosdowsky W. et Zhang H. *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science*, chapter Verification of Spatial Fields, pages 121–136. Wiley, 2003.

Duband D. *Reconnaissance dynamique de la forme des situations météorologiques. Application à la prévision quantitative des précipitations.* Thèse de doctorat, Thèse de 3ème cycle de la faculté des sciences de Paris., 1970.

Duband D. Reconnaissance dynamique de la forme des situations météorologiques, application à la prévision numérique des précipitations journalières. In *Congrès de la Société Hydrotechnique de France, XIIIèmes journées de I'Hydraulique, Paris*, 1974.

Duband D. Prévision spatiale des hauteurs de précipitations journalières. *La Houille Blanche*, 7-8: 497–512, 1981.

Enke W. et Spekat A. Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression. *Climate Research*, 8(97):195–207, 1997.

Epstein E.S. A Scoring System for Probability Forecasts of Ranked Categories. *Journal of Applied Meteorology*, 8(6):985–987, 1969.

Erpicum M., Mabille G., et Fettweis X. Automatic synoptic weather circulation types classification based on the 850 hPa geopotential height. *Book of Abstracts COST 733 Mid-term Conference, Advances in Weather and Circulation Type Classifications & Applications, 22–25 October 2008 Krakow, Poland*, page 33, 2008.

Esteban P., Jones P.D., Martín-Vide J., et Mases M. Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 25(3):319–329, 2005.

Esteban P., Martin-Vide J., et Mases M. Daily atmospheric circulation catalogue for western Europe using multivariate techniques. *International Journal of Climatology*, 26(11):1501–1515, 2006.

EUMETCAL . EUROMET Courses. www.eumetcal.org.uk/eurometcourses/, 2012.

Fallot J.-M. Evolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Suisse durant le 20ème siècle. *Publications de l'AIC*, 13:567, 2000.

Fehlmann R. et Quadri C. Predictability Issues of Heavy Alpine South-Side Precipitation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 72:223–231, 2000.

Fehlmann R., Quadri C., et Davies H.C. An Alpine Rainstorm: Sensitivity to the Mesoscale Upper-Level Structure. *Weather and Forecasting*, 15(1):4–28, 2000.

Ferraris L., Reale O., et Turato B. Synoptic and hydrological analysis of a flood event. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(9):655–661, 2001.

Finet T., Marty R., Zin I., et Obled C. Developing and transferring the ANALOG approach for PQPF's from French OHMCV catchments to quick responding catchments in Venetia and Romania. Technical report, LTHE & CNRS, Grenoble, France, 2008.

Finley J. Tornado prediction. *American Meteorological Journal*, 1:85–88, 1884.

Fogarty T.C. Varying the probability of mutation in the genetic algorithm. In *Proceedings of the third international conference on Genetic algorithms*, pages 104–109. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1989.

Fonseca C.M. et Fleming P.J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. In *Proceedings of the fifth international conference on genetic algorithms*, volume 1, page 416. Citeseer, 1993.

Fortin V., Favre A., et Saïd M. Probabilistic forecasting from ensemble prediction systems: Improving upon the best-member method by using a different weight and dressing kernel for each member. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(617):1349–1369, 2006.

Fraedrich K., Raible C.C., et Sielmann F. Analog ensemble forecasts of tropical cyclone tracks in the Australian region. *Weather and Forecasting*, 18(1):3–11, 2003.

Frei C., Davies H.C., Gurtz J., et Schär C. Climate dynamics and extreme precipitation and flood events in Central Europe. *Integrated Assessment*, 1(4):281–300, 2000.

Frei C. et Schär C. A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology*, 18(8):873–900, 1998.

Frei C. et Schär C. Detection Probability of Trends in Rare Events: Theory and Application to Heavy Precipitation in the Alpine Region. *Journal of Climate*, 14(7):1568–1584, 2001.

Fritsch J.M., Houze R.A.Jr., Adler R., Bluestein H., Bosart L., Brown J., Carr F., Davis C., Johnson R.H., et Junker N. Quantitative precipitation forecasting: Report of the eighth prospectus development team, US Weather Research Program. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(2):285–299, 1998.

Gaffney J., Pearce C., et Green D. Binary versus real coding for genetic algorithms: A false dichotomy ? *ANZIAM Journal*, 51:C347–C359, 2010.

Gandin L.S. *Objective analysis of meteorological fields.* National Technical Information Service, 1965.

Garavaglia F., Gailhard J., Paquet E., Lang M., Garçon R., et Bernardara P. Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14:951–964, 2010.

García Hernández J. *Flood management in a complex river basin with a real-time decision support system based on hydrological forecasts.* Thèse de doctorat, EPFL, 2011.

García Hernández J., Boillat J.L., Jordan F., et Hingray B. La prévision hydrométéorologique sur le bassin versant du Rhône en amont du Léman. *La Houille Blanche*, 5:61–70, 2009a.

García Hernández J., Horton P., Tobin C., et Boillat J.L. MINERVE 2010: Prévision Hydrométéorologique et Gestion de Crues sur le Rhône Alpin. *Wasser Energie Luft – Eau Energie Air*, 4: 297–302, 2009b.

García Hernández J., Jordan F., Dubois J., et Boillat J.L. Routing System II, Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques, 2007.

Germann U., Galli G., Boscacci M., et Bolliger M. Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132:1669–1692, 2006.

Germann U. et Zawadzki I. Scale-Dependence of the Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part I: Description of the Methodology. *Monthly Weather Review*, 130(12): 2859–2873, 2002.

Germann U. et Zawadzki I. Scale Dependence of the Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part II: Probability Forecasts. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1):74–89, 2004.

Gibergans-Báguena J. et Llasat M.C. Improvement of the analog forecasting method by using local thermodynamic data. Application to autumn precipitation in Catalonia. *Atmospheric Research*, 86(3-4):173–193, 2007.

Gilbert G.K. Finley's tornado predictions. *American Meteorological Journal*, 1:166–172, 1884.

Glahn H.R. et Lowry D.A. The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting. *Journal of Applied Meteorology*, 11(8):1203–1211, 1972.

Glenser G.A. Situation de vent d'est. Atlas climatologique de la Suisse, 1995a.

Glenser G.A. Situation de vent d'ouest. Atlas climatologique de la Suisse, 1995b.

Glenser G.A. Situation de vent du nord. Atlas climatologique de la Suisse, 1995c.

Glenser G.A. Situation de vent du sud. Atlas climatologique de la Suisse, 1995d.

Glenser G.A. Situation dépresionnaire. Atlas climatologique de la Suisse, 1995e.

Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.

Goldberg D.E. Real-coded genetic algorithms, virtual alphabets, and blocking. *Urbana*, 51:61801, 1990.

Golding B.W. Quantitative precipitation forecasting in the UK. *Journal of Hydrology*, 239(1–4): 286–305, 2000.

Goodess C.M. Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions: STARDEX. *The eggs*, 6:25–29, 2003.

Gordon N.D. Statistical very short-range forecasting via analogues. *European Space Agency Special Publication*, pages 307–312, 1987.

Gottardi F. *Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français.* Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.

Gottardi F., Obled C., Gailhard J., et Paquet E. Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *Journal of Hydrology*, 432:154–167, 2012.

Grazzini F. Predictability of a large-scale flow conducive to extreme precipitation over the western Alps. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 95:123–138, 2007.

Grebner D. *Hochwasserwarnungen für das Wallis ; Vorstudie: Meteorologische und hydrologische Grundlagen. Teilbericht zur Gesamtstudie CONSECRU. Im Autrag des Bundesamtes für Wasserwirtschaft.*, chapter Potentielle atmosphärische Starkniederschlagsentwicklung für das Wallis, pages 32–38. Geographisches Institut ETHZ, 1995.

Grefenstette J.J. Optimization of control parameters for genetic algorithms. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 16(1):122–128, 1986.

Griffith C.G., Woodley W.L., Grube P.G., Martin D.W., Stout J., et Sikdar D.N. Rain estimation from geosynchronous satellite imagery-visible and infrared studies. *Monthly Weather Review*, 106(8):1153–1171, 1978.

Guennebaud G. et Jacob B. Eigen v3. eigen.tuxfamily.org, 2010.

Guilbaud S. Développements de la méthode de prévision quantitative des précipitations SENALOG: exploitation des champs 700 et 1000 mb et utilisation de l'analyse discriminante. Travail de master, Rapport de DEA, Université Joseph Fourier, Grenoble-France, 1994.

Guilbaud S. *Prévision quantitative des précipitations journalières par une méthode statistico-dynamique des recherche d'analogues - Application à des bassins du pourtour méditerranéen.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997.

Guilbaud S. et Obled C. Prévision quantitative des précipitations journalières par une technique de recherche de journées antérieures analogues: optimisation du critère d'analogie. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series II, A-Earth and Planetary Science*, 327(3):181–188, 1998.

Hamill T.M. et Colucci S.J. Evaluation of Eta-RSM ensemble probabilistic precipitation forecasts. *Monthly Weather Review*, 126(3):711–724, 1998.

Hamill T.M., Whitaker J.S., et Mullen S.L. Reforecasts: An Important Dataset for Improving Weather Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(1):33–46, 2006.

Hamill T.M., Whitaker J.S., et Wei X. Ensemble reforecasting: Improving medium-range forecast skill using retrospective forecasts. *Monthly Weather Review*, 132(6):1434–1447, 2004.

Harris R.S., Kong Q., et Maizels N. Somatic hypermutation and the three R's: repair, replication and recombination. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 436(2):157–178, 1999.

Hart W.E. et Belew R.K. Optimizing an arbitrary function is hard for the genetic algorithm. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, pages 190–195. Citeseer, 1991.

Hartigan J.A. *Clustering Algorithms*. Wiley Series in Probability and Mathematics Statistics, New York. John Wiley & Sons, 1975.

Haupt R.L. et Haupt S.E. *Practical genetic algorithms (2nd ed.)*. Wiley-Interscience, 2004.

Heidke P. Berechnung des Erfolges und der Güte der Windstärkevorhersagen im Sturmwarnungsdienst. *Geografiska annaler*, 8:301–349, 1926.

Hering A.M., Germann U., Boscacci M., et Sénési S. Operational thunderstorm nowcasting in the Alpine region using 3D-radar severe weather parameters and lightning data. In *ERAD 2006. Barcelona.*, 2006.

Hering A.M., Morel C., Galli G., Senesi S., Ambrosetti P., et Boscacci M. Nowcasting thunderstorms in the Alpine region using a radar based adaptive thresholding scheme. In *ERAD 2004. Visby, Island of Gotland, Sweden.*, pages 206–211, 2004.

Hering A.M., Sénési S., Ambrosetti P., et Bernard-Bouissières I. Nowcasting thunderstorms in complex cases using radar data. In *WWRP Symbosium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting. Toulouse.*, page 7, 2005.

Herrera F., Lozano M., et Verdegay J.L. Tackling Real-Coded Genetic Algorithms: Operators and Tools for Behavioural Analysis. *Artificial Intelligence Review*, 12(4):265–319, 1998.

Hersbach H. Decomposition of the Continuous Ranked Probability Score for Ensemble Prediction Systems. *Weather and Forecasting*, 15(5):559–570, 2000.

Hess P. et Brezowsky H. *Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-1976).* Deutscher Wetterdienst, 1977.

Hewitson B.C. et Crane R.G. Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research*, 7:85–95, 1996.

Hirano R. S1 Score Verification. October 1975 - December 1987. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, National Meteorological Center, USA, 1988.

Hoare C.A.R. Quicksort. *The Computer Journal*, 5(1):10–16, 1962.

Holland J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence.* The MIT press, 1992a.

Holland J.H. Genetic algorithms. *Scientific American*, 267(1):66–72, 1992b.

Horton P., Jaboyedoff M., Metzger R., Obled C., et Marty R. Spatial relationship between the atmospheric circulation and the precipitation measured in the western Swiss Alps by means of the analogue method. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12:777–784, 2012.

Houze R.A. Jr, James C.N., et Medina S. Radar observations of precipitation and airflow on the Mediterranean side of the Alps: Autumn 1998 and 1999. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(578):2537–2558, 2001.

Huth R. An example of using obliquely rotated principal components to detect circulation types over Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 2(6):285–293, 1993.

Huth R. Synoptic-climatological applicability of circulation classifications from the COST733 collection: first results. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(9-12):388–394, 2010.

Huth R. et Kyselý J. Constructing Site-Specific Climate Change Scenarios on a Monthly Scale Using Statistical Downscaling. *Theoretical and Applied Climatology*, 66(1):13–27, 2000.

Iguchi T., Meneghini R., Awaka J., Kozu T., et Okamoto K. Rain profiling algorithm for TRMM Precipitation Radar data. *Advances in Space Research*, 25(5):973–976, 2000.

James P.M. Second Generation Lamb Weather Types. A new generic classification method with evenly tempered type frequencies. In *Proceedings of the 6th Annual Meeting of the European Meteorological Society/6th European Conference on Applied Climatology (ECAC), EMS2006A00441, Ljubljana, Slovenia*, 2006.

James P.M. An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 88(1):17–42, 2007.

Joe P. et Falla M. Radar Visualization in the NinJo Project. In *ERAD. Visby, Island of Gotland, Sweden.*, pages 550–555, Visby, Island of Gotland, Sweden, 2004.

Joines J.A., Culbreth C.T., et King E.K. Manufacturing Cell Design: An Integer Programming Model Employing Genetic Algorithms. *IIE Transactions*, 28(1):69–85, 1996.

Jolliffe I.T. et Stephenson D.B. *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science.* Wiley, 2003.

Joly A. De l'Incertidude des Prévisions... à la Prévision de l'Incertitude. In *Prévisions hydrométéorologiques, SHF, Lyon*, 2008.

Jones P.D. et Moberg A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate*, 16(2):206–223, 2003.

Jordan F., Boillat J.L., et Schleiss A. Prévision et gestion des crues du Rhône supérieur par l'exploitation optimale des retenues alpines. *La Houille Blanche*, 5:91–102, 2010.

Kalnay E. *Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability.* Cambridge University Press, 2003.

Kalnay E., Kanamitsu M., et Baker W.E. Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71(10):1410–1428, 1990.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., et Woollen J. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3):437–471, 1996.

Kanamitsu M. Description of the NMC global data assimilation and forecast system. *Weather and Forecasting*, 4:335–342, 1989.

Kanamitsu M., Alpert J.C., Campana K.A., Caplan P.M., Deaven D.G., Iredell M., Katz B., Pan H.L., Sela J., et White G.H. Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. *Weather and Forecasting*, 6(3):425–435, 1991.

Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.K., Hnilo J.J., Fiorino M., et Potter G.L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(11):1631–1643, 2002.

Kawanishi T., Kuroiwa H., Kojima M., Oikawa K., Kozu T., Kumagai H., Okamoto K., Okumura M., Nakatsuka H., et Nishikawa K. TRMM precipitation radar. *Advances in Space Research*, 25 (5):969–972, 2000.

Keenan T.D. et Woodcock F. Objective Tropical Cyclone Movement Forecasts Using Synoptic and Track Analogue Information. Technical report, Bureau of Meteorology, 1981.

Kirkpatrick S., Gelatt C.D.Jr., Vecchi M.P., et McCoy A. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598):671–679, 1983.

Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., et Kousky V. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(2):247–268, 2001.

Klein W.H. Specification of precipitation from the 700-mb circulation. *Monthly Weather Review*, 91(10):527–536, 1963.

Klein W.H., Lewis B.M., et Enger I. Objective prediction of five-day mean temperatures during winter. *Journal of Atmospheric Sciences*, 16:672–682, 1959.

Krichak S.O. et Alpert P. Role of large scale moist dynamics in November 1–5, 1994, hazardous Mediterranean weather. *Journal of Geophysical Research*, 103(D16):19453–19, 1998.

Kruizinga S. Objective classification of daily 500 mbar patterns. In *Sixth Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences, Banff, Alberta, Canada*, pages 126–129, 1979.

Kruizinga S. et Murphy A.H. Use of an Analogue Procedure to Formulate Objective Probabilistic Temperature Forecasts in The Netherlands. *Monthly Weather Review*, 111(11):2244–2254, 1983.

Krzysztofowicz R. Probabilistic hydrometeorological forecasts: Toward a new era in operational forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(2):243–251, 1998.

Krzysztofowicz R. Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model. *Water Resources Research*, 35(9):2739–2750, 1999.

Krzysztofowicz R. The case for probabilistic forecasting in hydrology. *Journal of Hydrology*, 249 (1):2–9, 2001.

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

Kuo Y.H., Skumanich M., Haagenson P.L., et Chang J.S. The Accuracy of Trajectory Models as Revealed by the Observing System Simulation Experiments. *Monthly Weather Review*, 113(11): 1852–1867, 1985.

Lagarias J.C., Reeds J.A., Wright M.H., et Wright P.E. Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions. *Siam journal of optimization*, 9:112–147, 1998.

Lalaurette F. et Grijn G. van der. Ensemble forecasts: can they provide useful early warnings ? *ECMWF Newsletter*, 96:10–18, 2003.

Lauscher F. *Klimatologische Synoptik Österreichs mittels der ostalpinen Wetterlagenklassifikation.* Zentralanst. für Meteorologie u. Geodynamik, 1985.

Leutbecher M. et Palmer T.N. Ensemble forecasting. *Journal of Computational Physics*, 227(7): 3515–3539, 2008.

Lin Y.L., Chiao S., Wang T.A., Kaplan M.L., et Weglarz R.P. Some common ingredients for heavy orographic rainfall. *Weather and Forecasting*, 16(6):633–660, 2001.

Lityński J. A numerical classification of circulation patterns and weather types in Poland. *Prace Panstwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego*, 97:3–15, 1969.

Livezey R.E. et Barnston A.G. An operational multifield analog/antianalog prediction system for United States seasonal temperatures. 1. system design and winter experiments. *Journal of Geophysical Research*, 93(D9):10953–10974, 1988.

Lorenz E.N. Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction. Technical report, Massachusetts Institute of Technology, Department of Meteorology, Cambridge, Massachusetts, 1956.

Lorenz E.N. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2):130–141, 1963.

Lorenz E.N. Atmospheric Predictability as Revealed by Naturally Occuring Analogues. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26:636–646, 1969.

Lorenz E.N. *The Essence of Chaos*. University of Washington Press, 1993.

Lund I.A. Map-Pattern Classification by Statistical Methods. *Journal of Applied Meteorology*, 2 (1):56–65, 1963.

Magnin V. Optimisation et algorithmes génétiques. Polytech Lille, France, 2006.

Maheras P., Anagnostopoulou C., et Tolika K. Contribution to D12 (AUTH, APRA-SMR, FIC and UEA) Downscaling of extreme indices in Greece. Technical report, STARDEX project, 2005.

Malardel S. *Fondamentaux de météorologie: à l'école du temps*. Cépaduès, 2005.

Mandon S. Comparaison d'épisodes pluvieux intenses sur le Sud-Est de la France et de situations analogues au sens de la circulation générale. Recherche de variables discriminantes. Travail de master, Rapport de stage de fin d'études de l'Ecole de la Météorologie Nationale, 1985.

Mariano A.P., Costa C.B.B., Angelis D.F. de, Pires Atala D.I., Maugeri Filho F., Wolf Maciel M.R., et Maciel Filho R. Genetic Algorithms (Binary and Real Codes) for the Optimisation of a Fermentation Process for Butanol Production. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 8(8):101, 2010.

Mariotti A., Struglia M.V., Zeng N., et Lau K.M. The hydrological cycle in the Mediterranean region and implications for the water budget of the Mediterranean Sea. *Journal of Climate*, 15 (13):1674–1690, 2002.

Marsigli C., Boccanera F., Montani A., et Paccagnella T. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12 (4):527–536, 05 2005.

Martius O., Schwierz C., et Davies H.C. Far-upstream precursors of heavy precipitation events on the Alpine south-side. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134(631):417–428, 2008.

Martius O., Zenklusen E., Schwierz C., et Davies H.C. Episodes of alpine heavy precipitation with an overlying elongated stratospheric intrusion: a climatology. *International Journal of Climatology*, 26(9):1149–1164, 2006.

Marty R. *Prévision hydrologique d'ensemble adaptée aux bassins à crue rapide. Elaboration de prévisions probabilistes de précipitations à 12 et 24 h. Désagrégation horaire conditionnelle pour la modélisation hydrologique. Application à des bassins de la région Cévennes Vivarais.* Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.

Marty R., Zin I., Obled C., Bontron G., et Djerboua A. Towards Real-Time Daily PQPF by an Analog Sorting Approach. Application to Flash Flood Catchments. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(3):505–520, 2012.

Mason I. A model for assessment of weather forecasts. *Australian Meteorological Magazine*, 30(4): 291–303, 1982.

Mason I. B. *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science*, chapter Binary Events, pages 37–76. Wiley, 2003.

Massacand A.C., Wernli H., et Davies H.C. Heavy precipitation on the alpine southside: An upper-level precursor. *Geophysical Research Letters*, 25(9):1435–1438, 1998.

Massacand A.C., Wernli H., et Davies H.C. Influence of upstream diabatic heating upon an Alpine event of heavy precipitation. *Monthly Weather Review*, 129(11):2822–2828, 2001.

Matheson J.E. et Winkler R.L. Scoring Rules for Continuous Probability Distributions. *Management Science*, 22:1087–1096, 1976.

Matulla C., Zhang X., Wang X.L., Wang J., Zorita E., Wagner S., et Storch H. von. Influence of similarity measures on the performance of the analog method for downscaling daily precipitation. *Climate Dynamics*, 30(2):133–144, 2008.

Medina S. et Houze R.A. Air motions and precipitation growth in Alpine storms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129(588):345–371, 2003.

MétéoSuisse . SwissMetNet: un réseau de mesures pour le futur ! Technical report, Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse, 2010.

MétéoSuisse . Rapport d'intempéries: Fortes Précipitations du 4 au 6 novembre 2011, 2011.

Mezghani A. Modélisation des précipitations journalières à partir des variables atmosphériques de circulation générale. Cycle postgrade en hydrologie et gestion des ressources en eau, EPFL, 2003.

Mezghani A. *Génération multi-sites de variables météorologiques horaires en zone alpine.* Thèse de doctorat, EPFL, Lausanne, 2009.

Mezghani A. et Hingray B. A combined downscaling-disaggregation weather generator for stochastic generation of multisite hourly weather variables over complex terrain: Development and multi-scale validation for the Upper Rhone River basin. *Journal of Hydrology*, 377(3):245–260, 2009.

Michaelides S.C., Pattichis C.S., et Kleovoulou G. Classification of rainfall variability by using artificial neural networks. *International Journal of Climatology*, 21(11):1401–1414, 2001.

Michalewicz Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer-Verlag, 3rd edition edition, 1996.

Moberg A., Jones P.D., Lister D., Walther A., Brunet M., Jacobeit J., Alexander L.V., Della-Marta P.M., Luterbacher J., et Yiou P. Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901–2000. *Journal of Geophysical Research*, 111(D22):D22106, 2006.

Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., et Petroliagis T. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122(529): 73–119, 1996.

Montani A., Capaldo M., Cesari D., Marsigli C., Modigliani U., Nerozzi F., Paccagnella T., Patruno P., et Tibaldi S. Operational limited-area ensemble forecasts based on the Lokal Modell. *ECMWF Newsletter*, 98:2–7, 2003.

Moorthi S. The GFS Atmospheric Model. www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html, 2003.

Mullen S.L. et Buizza R. The impact of horizontal resolution and ensemble size on probabilistic forecasts of precipitation by the ECMWF Ensemble Prediction System. *Weather and Forecasting*, 17(2):173–191, 2002.

Murray R. Indicators of monthly mean temperature and rainfall for England and Wales based on antecedent monthly pressure anomalies over the Northern hemisphere. *The Meteorological Magazine*, 103:70, 1974.

Nap J.L., Dool H.M. van den, et Oerlemans J. A verification of monthly weather forecasts in the seventies. *Monthly Weather Review*, 109:306–312, 1981.

Nelder J.A. et Mead R. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7 (4):308, 1965.

Nelder J.A. et Wedderburn R.W.M. Generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 135:370–384, 1972.

NOAA . The Global Forecast System (GFS) - Global Spectral Model (GSM). emc.ncep.noaa.gov, 2011.

Obled C., Bontron G., et Garçon R. Quantitative precipitation forecasts: a statistical adaptation of model outputs through an analogues sorting approach. *Atmospheric Research*, 63(3-4):303–324, 2002.

Obled C. et Good W. Recent developments of avalanche forecasting by discriminant analysis techniques: a methodological review and some applications to the Parsenn area (Davos, Switzerland). *Journal of Glaciology*, 25:315–346, 1980.

OHM-CV . Prévision des précipitations par la méthode des analogues. www.ohmcv.fr, 2012.

Olsson J., Uvo C.B., et Jinno K. Statistical atmospheric downscaling of short-term extreme rainfall by neural networks. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(9):695–700, 2001.

Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5):527–530, 1975.

Paegle J.N. Prediction of Precipitation Probability Based on 500-Mb Flow Types. *Journal of Applied Meteorology*, 13(2):213–220, 1974.

Paegle J.N. et Kierulff L.P. Synoptic Climatology of 500-mb Winter Flow Types. *Journal of Applied Meteorology*, 13(2):205–212, 1974.

Paegle J.N. et Wright R.P. Forecast of Precipitation Probability Based on a Pattern Recognition Algorithm. *Journal of Applied Meteorology*, 14(2):180–188, 1975.

Palmer T., Buizza R., Hagedorn R., Lawrence A., Leutbecher M., et Smith L. Ensemble prediction: A pedagogical perspective. *ECMWF Newsletter*, 106:10–17, 2006.

Panziera L., Germann U., Gabella M., et Mandapaka P.V. NORA - Nowcasting of Orographic Rainfall by means of Analogues. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137 (661):2106–2123, 2011.

Park Y.Y., Buizza R., et Leutbecher M. TIGGE: Preliminary results on comparing and combining ensembles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134(637):2029–2050, 2008.

Parodi A., Boni G., Ferraris L., Siccardi F., Pagliara P., Trovatore E., Foufoula-Georgiou E., et Kranzlmueller D. The "perfect storm": From across the Atlantic to the hills of Genoa. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 93(24):225, 2012.

Péczely G. *Grosswetterlagen in Ungarn*. Országos Meterológiai Intézet, 1958.

Peirce C.S. The numerical measure of the success of predictions. *Science*, 4(93):453–454, 1884.

Perret R. *Une classification des situations météorologiques à l'usage de la prévision*. Institut suisse de météorologie, 1987.

Petisco S.E., Martín J.M., et Gil D. Método de estima de precipitación mediante "downscaling". *Nota técnica no. 11 del Servicio de Variabilidad y Predicción del Clima, INM, Madrid, Spain*, 11, 2005.

Petrascheck A. et Hegg C. Hochwasser 2000. Ereignisanalyse/Fallbeispiele. - Les crues 2000. Analyse des événements / Cas exemplaires. Technical report, Federal Office for Water and Geology, 2002.

Philipp A., Bartholy J., Beck C., Erpicum M., Esteban P., Fettweis X., Huth R., James P., Jourdain S., Kreienkamp F., Lykoudis S., Krennert T., Michalides S.C., Pianko-Kluczynska K., Post P., Álvarez D.R., Schiemann R., Spekat A., et Tymvios F.S. Cost733cat – A database of weather and circulation type classifications. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35:360–373, 2010.

Philipp A., Della-Marta P.M., Jacobeit J., Fereday D.R., Jones P.D., Moberg A., et Wanner H. Long-Term Variability of Daily North Atlantic-European Pressure Patterns since 1850 Classified by Simulated Annealing Clustering. *Journal of Climate*, 20(16):4065–4095, 2007.

Plaut G., Schuepbach E., et Doctor M. Heavy precipitation events over a few Alpine sub-regions and the links with large-scale circulation, 1971-1995. *Climate Research*, 17(3):285–302, 2001.

Potts J. *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science*, chapter Basic concepts, pages 137–163. Wiley, 2003.

Radcliffe N.J. Forma Analysis and Random Respectful Recombination. In *Proceedings of the fourth international conference on genetic algorithms*, pages 222–229. San Marco CA: Morgan Kaufmann, 1991.

Radinovic D. An Analogue Method for Weather Forecasting Using the 500/1000 mb Relative Topography. *Monthly Weather Review*, 103(7):639–649, 1975.

Raftery A.E., Gneiting T., Balabdaoui F., et Polakowski M. Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Monthly Weather Review*, 133(5):1155–1174, 2005.

Reale O., Feudale L., et Turato B. Evaporative moisture sources during a sequence of floods in the Mediterranean region. *Geophysical Research Letters*, 28(10):2085–2088, 2001.

Rechenberg I. *Evolutionsstrategie: Optimierung technisher Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Frommann-Holzboog, 1973.

Rew R. et Davis G. NetCDF: an interface for scientific data access. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 10(4):76–82, 1990.

Rew R.K. et Hartnett E. Merging NetCDF and HDF5. In *20th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology*, 2004.

Reynolds R.W. What's New in Version 2. Technical report, NOAA, 2009.

Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., et Wang W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15(13):1609–1625, 2002.

Reynolds R.W. et Smith T.M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *Journal of Climate*, 7(6):929–948, 1994.

Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., et Schlax M.G. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 20(22):5473–5496, 2007.

Richardson D. *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science*, chapter Economic value and skill, pages 137–163. Wiley, 2003.

Rodwell M.J. Comparing and combining deterministic and ensemble forecasts: How to predict rainfall occurrence better. *ECMWF Newsletter*, 106:17–23, 2006.

Rodwell M.J., Haiden T., et Richardson D.S. Developments in precipitation verification. *ECMWF Newsletter*, 128:12–16, 2011.

Rodwell M.J., Richardson D.S., Hewson T.D., et Haiden T. A new equitable score suitable for verifying precipitation in numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(650):1344–1363, 2010.

Roe G.H. Orographic Precipitation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33:645–671, 2005.

Rotunno R. et Ferretti R. Mechanisms of intense Alpine rainfall. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58(13):1732–1749, 2001.

Rotunno R. et Houze R.A. Lessons on orographic precipitation from the Mesoscale Alpine Programme. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133(625):811–830, 2007.

Rutledge G.K., Alpert J., et Ebisuzaki W. NOMADS: A Climate and Weather Model Archive at the National Oceanic and Atmospheric Administration. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(3):327–341, 2006.

Schaake J.C., Hamill T.M., Buizza R., et Clark M. HEPEX: The Hydrological Ensemble Prediction Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88:1541, 2007.

Schaefli B., Hingray B., Niggli M., et Musy A. A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(1):95–109, 2005.

Schiemann R. et Frei C. How to quantify the resolution of surface climate by circulation types: An example for Alpine precipitation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(9): 403–410, 2010.

Schmidli J. et Frei C. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology*, 25(6):753–771, 2005.

Schmidli J., Goodess C.M., Frei C., Haylock M.R., Hundecha Y., Ribalaygua J., et Schmith T. Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *Journal of Geophysical Research*, 112(10.1029):D04105, 2007.

Schneidereit M. et Schär C. Idealised Numerical Experiments of Alpine Flow Regimes and Southside Precipitation Events. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 72(2):233–250, 2000.

Schraudolph N.N. et Belew R.K. Dynamic parameter encoding for genetic algorithms. *Machine Learning*, 9(1):9–21, 1992.

Schüepp M. *Witterungsklimatologie – Klimatologie der Schweiz III.* Beihefte zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt 1978, 1979.

Schwefel H.P. *Numerical optimization of computer models.* John Wiley & Sons, Inc., 1981.

Schwefel H.P. *Evolution and Optimum Seeking.* John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1993.

Shabbar A. et Knox J. Monthly prediction by the analogue method. In *Proceedings of the first WMO workshop on the diagnosis and prediction of monthly and seasonal atmospheric variations over the globe, Longe range forecasting Res. Rep. Ser. 6, Vol II, Tech. Doc. WMO/TD87*, pages 672–681, 1986.

Shuttleworth W.J. *Terrestrial hydrometeorology.* Wiley-Blackwell, 2012.

Siccardi F., Boni G., Ferraris L., et Rudari R. A hydrometeorological approach for probabilistic flood forecast. *Journal of Geophysical Research*, 110(D5):D05101, 2005.

Sievers O., Fraedrich K., et Raible C.C. Self-adapting analog ensemble predictions of tropical cyclone tracks. *Weather and Forecasting*, 15(5):623–629, 2000.

Silvestro F., Gabellani S., Giannoni F., Parodi A., Rebora N., Rudari R., et Siccardi F. A hydrological analysis of the 4 November 2011 event in Genoa. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12:2743–2752, 2012.

Simmons A.J. et Hollingsworth A. Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128(580):647–677, 2002.

Smart J., Hock K., et Csomor S. *Cross-Platform GUI Programming with wxWidgets.* Prentice Hall, 2006.

Smith J.E. et Fogarty T.C. Operator and parameter adaptation in genetic algorithms. *Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, 1(2):81–87, 1997.

Smith R.B. The influence of mountains on the atmosphere. *Advances in Geophysics*, 21:87–230, 1979.

Solman S.A. et Nuñez M.N. Local estimates of global climate change: a statistical downscaling approach. *International Journal of Climatology*, 19(8):835–861, 1999.

STARDEX . STARDEX, Downscaling climate extremes. Technical report, STARDEX consortium, 2005.

Stehlík J. et Bárdossy A. Multivariate stochastic downscaling model for generating daily precipitation series based on atmospheric circulation. *Journal of Hydrology*, 256(1-2):120–141, 2002.

Steiner M., Bousquet O., Houze R.A.Jr., Smull B.F., et Mancini M. Airflow within major Alpine river valleys under heavy rainfall. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129 (588):411–431, 2003.

Steppeler J., Doms G., Schättler U., Bitzer H.W., Gassmann A., Damrath U., et Gregoric G. Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82(1):75–96, 2003.

Syswerda G. Uniform Crossover in Genetic Algorithms. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms*, pages 2–9. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1989.

Tapia A., Smith J.A., et Dixon M. Estimation of convective rainfall from lightning observations. *Journal of Applied Meteorology*, 37(11):1497–1509, 1998.

Teweles S. et Wobus H.B. Verification of prognostic charts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 35:455–463, 1954.

Thevenot N. Prévision quantitative des précipitations: Adaptation par une méthode d'Analogie de la prévision d'ensemble du CEPMMT. Aspects opérationnels. Travail de master, INP Grenoble, 2004.

Thielen J., Bartholmes J., Ramos M.H., et Roo A. The European Flood Alert System- Part 1: Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2):125–140, 2009.

Tobin C., Nicotina L., Parlange M.B., Berne A., et Rinaldo A. Improved interpolation of meteorological forcings for hydrologic applications in a Swiss Alpine region. *Journal of Hydrology*, 401 (1-2):77–89, 2011.

Toth Z. Long-Range Weather Forecasting Using an Analog Approach. *Journal of Climate*, 2: 594–607, 1989.

Toth Z., Talagrand O., Candille G., et Zhu Y. *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science*, chapter Binary Events, pages 137–162. Wiley, 2003.

Turato B., Reale O., et Siccardi F. Water vapor sources of the October 2000 Piedmont flood. *Journal of Hydrometeorology*, 5(4):693–712, 2004.

Uppala S., Gibson J.K., Fiorino M., Hernandez A., Kallberg P., Li X., Onogi K., et Saarinen S. ECMWF second generation reanalysis: ERA40. In Organisation Météorologique Mondiale Genève, editor, *2nd International conference of Reanalyses*, Reading, England, 23-27 Aug. 1999 1999.

Vallée J.L. Précipitations sur le Sud-Ouest du Massif Central et l'Est des Pyrénées. Optimisation du modèle EDF/DTG de prévision par recherche d'analogues. Travail de master, Rapport de stage de fin d'études de l'Ecole de la Météorologie Nationale, 1986.

Van Den Dool H.M. Searching for analogues, how long must we wait ? *Tellus*, 46A(3):314–324, 1994.

Vicente G.A., Scofield R.A., et Menzel W.P. The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(9):1883–1898, 1998.

Von Storch H. et Zwiers F.W. *Statistical analysis in climate research*. Cambridge Univ Pr, 1999.

Warner T.T., Peterson R.A., et Treadon R.E. A tutorial on lateral boundary conditions as a basic and potentially serious limitation to regional numerical weather prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(11):2599–2618, 1997.

Weigel A.P., Liniger M.A., et Appenzeller C. Can multi-model combination really enhance the prediction skill of probabilistic ensemble forecasts ? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134(630):241–260, 2008.

Wetterhall F. *Statistical Downscaling of Precipitation from Large-scale Atmospheric Circulation: Comparison of Methods and Climate Regions*. Thèse de doctorat, Uppsala University, 2005.

Wetterhall F., Halldin S., et Xu C.Y. Seasonality properties of four statistical-downscaling methods in central Sweden. *Theoretical and Applied Climatology*, 87(1):123–137, 2007.

Wilby R.L., Hassan H., et Hanaki K. Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. *Journal of Hydrology*, 205(1-2):1–19, 1998.

Wilby R.L. et Wigley T.M.L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21(4):530–548, 1997.

Wild M., Ohmura A., Gilgen H., Morcrette J.J., et Slingo A. Evaluation of downward longwave radiation in general circulation models. *Journal of Climate*, 14(15):3227–3239, 2001.

Wilks D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction. 2nd edition.* Elsevier, 2006.

Williams H.P. *Model solving in mathematical programming.* Wiley, 1993.

Wilson J.W., Crook N.A., Mueller C.K., Sun J., et Dixon M. Nowcasting thunderstorms: A status report. *Bulletin of the american Meteorological Society*, 79(10):2079–2099, 1998.

Wilson L.J. et Vallée M. The Canadian updateable model output statistics (UMOS) system: Design and development tests. *Weather and Forecasting*, 17(2):206–222, 2002.

Wilson L.J. et Yacowar N. Statistical weather element forecasting in the Canadian Weather Service. In *Proc. WMO Symp. on Probabilistic and Statistical Methods in Weather Forecasting, Nice*, pages 40–406, 1980.

Woodcock F. On the Use of Analogues to Improve Regression Forecasts. *Monthly Weather Review*, 108(3):292–297, 1980.

Wright A.H. Genetic algorithms for real parameter optimization. *Foundations of Genetic Algorithms*, 1:205–218, 1991.

Wüest M., Frei C., Altenhoff A., Hagen M., Litschi M., et Schär C. A gridded hourly precipitation dataset for Switzerland using rain-gauge analysis and radar-based disaggregation. *International Journal of Climatology*, 30(12):1764–1775, 2010.

Xu C.Y. From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 23(2):229–249, 1999.

Yacowar N. Probability forecast using finely tuned analogs. In *Preprints 4th Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences*, pages 49–50, 1975.

Yarnal B. *Synoptic Climatology in Environmental Analysis: A Primer.* Belhaven Press, London, UK, 1993.

Zappa M., Jaun S., Germann U., Walser A., et Fundel F. Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmospheric Research*, 100(2–3):246–262, 2011.

Zappa M., Rotach M.W., Arpagaus M., Dorninger M., Hegg C., Montani A., Ranzi R., Ament F., Germann U., et Grossi G. MAP D-PHASE: real-time demonstration of hydrological ensemble prediction systems. *Atmospheric Science Letters*, 9(2):80–87, 2008.

Zhang F. Vertical Resolution and Coordinates. atmo.tamu.edu, 2002.

Zitzler E., Laumanns M., et Bleuler S. A tutorial on evolutionary multiobjective optimization. *Metaheuristics for Multiobjective Optimisation*, pages 3–37, 2004.

Zorita E. et Storch H. von. The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison with More Complicated Methods. *Journal of Climate*, 12(8):2474–2489, 1999.

Annexes

Annexe A

Détails de la reconstitution des séries pluviométriques

Lors de la reconstitution des séries de précipitations partielles de certaines stations, des régressions linéaires (Table A.1) ont été établies pour les jours où les précipitations sont nulles à la station de référence. La régression linéaire est forcée par l'origine, afin de réduire le biais sur les petits cumuls précipités.

Table A.1 – Stations reconstituées sur la base d'une régression linéaire avec d'autres stations. La station cible est la station à reconstituer, et les stations de références sont les stations dont les séries ont été utilisées pour la reconstitution. Le facteur d'échelle est la pente de la régression forcée par zéro, dont le coefficient de détermination est donné. La régression a été établie sur les jours à précipitations non nulles à la station de référence, sur le nombre d'années donné en dernière colonne.

Station cible	**Nb journées recomposées**	**Station de référence**	**Facteur d'échelle**	**Coeff. de détermination**	**Nb années communes**
CH4060	2922	CH4080	1.0058	0.87525	40.03
		CH4040	0.96588	0.88924	40.03
CH5110	150	CH5130	0.83757	0.83783	47.62
		CH5170	1.0912	0.87658	47.62
		CH5150	0.90723	0.85703	47.62
CH5290	61	CH5230	0.8981	0.82322	47.87
		CH5270	0.87042	0.85958	47.87
CH5350	30	CH5588	0.86892	0.82555	27.85
		CH5570	0.73476	0.82832	47.95
CH7130	30	CH7255	1.0649	0.8546	28.94
CH7360	15	CH7380	0.67529	0.87719	47.99
		CH7520	0.99137	0.85955	47.99
CH7400	4383	CH7410	0.93667	0.86078	36.02
CH7470	212	CH7520	1.0518	0.87776	47.45
CH7570	2463	CH7520	0.91834	0.91856	41.28
CH7585	8857	CH7580	0.97252	0.9155	5.76
CH7670	2922	CH7590	0.86597	0.83544	40.03
CH7710	7124	CH7700	1.0179	0.91117	9.17
CH7750	2924	CH7730	0.61875	0.86703	4.42
		CH7700	1.2214	0.86102	20.68
		CH7770	0.78756	0.83472	40.02
CH7820	2133	CH7800	1.03	0.91807	42.19
CH7950	4017	CH7958	1.0328	0.87024	20.01
		CH7940	1.0356	0.85029	37.03
CH8010	4748	CH8020	1.1725	0.88179	31.93
CH8040	30	CH8080	0.897	0.82531	47.95
		CH8010	0.70059	0.81967	34.94
CH9295	10962	CH9030	1.1665	0.88111	18
		CH9340	1.0828	0.89605	18

Lorsque la reconstitution n'a pas pu être effectuée à l'aide d'une simple régression linéaire, nous avons procédé à un assemblage manuel plus complexe (Table A.2) impliquant différentes stations et plusieurs régressions.

Finalement, le cas le plus simple est lorsque la station a été déplacée (Table A.3). Les deux stations peuvent être assemblées, pour autant que la distance et la différence d'altitude soient minimes.

Table A.2 – Stations ayant nécessité une reconstitution manuelle plus complexe. La station cible est la station à reconstituer, et les stations de référence sont les stations dont les séries ont été utilisées pour la reconstitution.

Station cible	**Période de mesure**	**Station de référence**	**Période de mesure**
CH7040	1981-...	CH7020	1952-2002
		CH7050	1940-1981
CH7068	1999-...	CH7070	1940-1991
		CH7080	1967-1999
CH7161	1994-...	CH7165	1940-1968
		CH7160	1967-1994
		CH7220	1940-...
CH7255	1963-...	CH7250	1940-1982
		CH7260	1940-1971
CH7270	1974-...	CH7268	2001-...
		CH7280	1940-1974
		CH7255	1963-...
CH7464	1987-...	CH7465	1979-2005
		CH7440	1956-1985
		CH7400	1973-2007
		CH7410	1940-2007
CH7585	1996-...	CH7580	1972-2001
		CH7440	1956-1985
CH7880	1974-...	CH7890	1944-1974
		CH7860	1940-...

Table A.3 – Stations ayant été déplacées et dont les séries ont pu être assemblées sans transformation. La station cible est la station à reconstituer, et les stations de référence sont les stations dont les séries ont été utilisées pour la reconstitution.

Station cible	**Altitude**	**Période de mesure**	**Station de référence**	**Altitude**	**Période de mesure**
CH5588	1045	1981-...	CH5590	1008	1947-1981
CH7970	381	1981-...	CH7980	380	1940-1984

Annexe B

Cumuls de précipitations pour différents temps de retour

Les cumuls de précipitations correspondant aux temps de retour typiques ont été calculés à l'aide d'un ajustement de Gumbel pour chaque station de notre base de données de travail. Les lames d'eau sont données dans la Table B.1.

Table B.1 – Cumuls de précipitations (mm/j) correspondant à différents temps de retour pour chaque station. Les valeurs ont été calculées à l'aide d'un ajustement de Gumbel.

Station	**P2**	**P5**	**P10**	**P20**	**P50**	**P100**	**P200**	**P300**	**P500**
Gütsch ob Andermatt	71.6	93.9	108.7	122.9	141.2	155.0	168.7	176.7	186.8
Andermatt	72.0	94.7	109.7	124.2	142.9	156.9	170.8	179.0	189.3
Göscheneralp	76.0	99.1	114.5	129.2	148.2	162.5	176.7	185.0	195.4
Göschenen	68.2	87.8	100.7	113.1	129.1	141.2	153.1	160.1	168.9
Grimsel, Hospiz	71.1	88.1	99.3	110.0	123.9	134.3	144.7	150.8	158.4
Guttannen	64.3	80.6	91.4	101.8	115.2	125.3	135.3	141.1	148.5
Gadmen	65.2	80.9	91.4	101.4	114.3	124.1	133.7	139.4	146.5
Meiringen	51.7	63.6	71.4	79.0	88.7	96.1	103.4	107.6	113.0
Grindelwald	56.2	72.5	83.3	93.6	107.0	117.0	127.0	132.9	140.2
Kleine Scheidegg	56.6	72.6	83.1	93.2	106.3	116.2	125.9	131.7	138.9
Mürren	52.4	69.1	80.1	90.7	104.5	114.8	125.0	131.0	138.5
Lauterbrunnen	47.1	58.9	66.7	74.1	83.8	91.0	98.3	102.5	107.8
Interlaken	49.9	63.4	72.3	80.9	92.0	100.3	108.6	113.4	119.5
Kandersteg	45.4	59.3	68.4	77.3	88.7	97.2	105.7	110.7	117.0
Adelboden	49.6	61.9	70.1	77.9	87.9	95.5	103.1	107.5	113.0
Frutigen	45.3	57.2	65.1	72.7	82.5	89.9	97.2	101.5	106.8
Kiental	48.8	64.6	75.1	85.2	98.2	108.0	117.7	123.4	130.6
Zweisimmen	47.6	59.0	66.6	73.9	83.3	90.4	97.4	101.5	106.7
Gsteig bei Gstaad	61.8	78.9	90.2	101.0	115.0	125.6	136.0	142.1	149.8
Gstaad	50.3	61.9	69.7	77.0	86.6	93.8	100.9	105.1	110.3
Château-d'Oex	48.2	60.6	68.8	76.6	86.8	94.4	102.0	106.4	112.0
Ulrichen	64.9	81.9	93.2	104.0	118.0	128.5	139.0	145.1	152.8
Fieschertal	65.6	86.9	100.9	114.4	131.9	144.9	158.0	165.6	175.2
Binn	88.3	124.0	147.6	170.3	199.6	221.6	243.5	256.3	272.4
Brig	54.8	72.4	83.9	95.1	109.5	120.3	131.0	137.3	145.2
Saas-Fee	64.6	86.4	100.9	114.8	132.8	146.2	159.6	167.5	177.4
Zermatt	49.8	65.4	75.7	85.6	98.4	108.0	117.6	123.2	130.2
Grächen	47.4	68.8	83.0	96.6	114.2	127.4	140.5	148.2	157.8
Ackersand (Stalden)	47.8	67.0	79.6	91.8	107.5	119.3	131.1	137.9	146.6
Visp	49.4	66.7	78.2	89.2	103.5	114.1	124.8	131.0	138.8
Ried (Lötschen)	53.3	72.0	84.3	96.1	111.4	122.9	134.3	141.0	149.4
Leukerbad	53.5	67.1	76.2	84.8	96.0	104.4	112.8	117.7	123.9
Sierre	41.1	50.8	57.2	63.4	71.3	77.3	83.2	86.7	91.1
Montana	47.7	63.2	73.5	83.3	96.1	105.7	115.2	120.8	127.8
Mottec	39.8	50.8	58.2	65.2	74.3	81.2	88.0	91.9	96.9
Grimentz	41.7	53.0	60.5	67.7	77.0	84.0	90.9	95.0	100.1
Evolène, Villa	36.7	47.1	54.0	60.6	69.2	75.6	82.0	85.8	90.5
Hérémence	42.0	51.8	58.3	64.5	72.5	78.6	84.6	88.1	92.5
Sion	37.5	47.2	53.5	59.7	67.6	73.5	79.5	82.9	87.3
Fey	34.1	42.6	48.3	53.7	60.7	66.0	71.3	74.3	78.2
Fionnay	49.3	62.9	71.9	80.6	91.7	100.1	108.5	113.4	119.5
Montagnier, Bagnes	41.6	51.5	58.1	64.3	72.5	78.6	84.7	88.2	92.7
Grand-St-Bernard	81.3	105.1	120.8	135.9	155.4	170.0	184.6	193.1	203.8

Suite de la Table B.1

Station	**P2**	**P5**	**P10**	**P20**	**P50**	**P100**	**P200**	**P300**	**P500**
Bourg-St-Pierre	43.8	59.7	70.3	80.4	93.5	103.3	113.1	118.8	126.0
Orsières	40.7	51.4	58.4	65.2	73.9	80.5	87.0	90.8	95.6
Martigny, La Bâtiaz	44.6	56.8	64.9	72.6	82.6	90.1	97.6	102.0	107.5
Le Châtelard	53.9	68.0	77.3	86.2	97.7	106.4	115.0	120.0	126.4
Les Marécottes	65.7	87.2	101.4	115.0	132.7	145.9	159.1	166.8	176.5
Gryon	50.0	60.9	68.1	75.0	83.9	90.5	97.2	101.1	106.0
Les Plans-sur-Bex	53.7	68.5	78.4	87.8	100.0	109.2	118.3	123.6	130.3
Bex	41.5	49.4	54.7	59.7	66.2	71.0	75.9	78.7	82.3
Morgins	64.4	79.6	89.7	99.4	112.0	121.4	130.8	136.2	143.1
Les Diablerets	55.9	71.9	82.5	92.7	105.8	115.7	125.5	131.3	138.5
Col des Mosses	67.6	91.3	106.9	122.0	141.4	156.0	170.5	179.0	189.6
Aigle	44.3	54.6	61.4	67.9	76.4	82.8	89.1	92.8	97.4
Les Avants	61.6	78.3	89.4	100.0	113.7	124.0	134.2	140.2	147.8
Vevey	53.3	64.7	72.3	79.6	89.0	96.0	103.0	107.1	112.3
Airolo	97.0	125.9	145.0	163.3	187.0	204.7	222.4	232.8	245.8
Robièi	122.8	154.8	176.0	196.3	222.7	242.4	262.0	273.5	287.9
Bosco/Gurin	119.2	158.1	183.9	208.6	240.5	264.5	288.4	302.3	319.9
Simplon-Dorf	94.7	133.5	159.2	183.8	215.6	239.5	263.3	277.2	294.7

Annexe C

Analyse de corrélation des séries de précipitations

Afin de procéder à un groupement de stations pluviométriques, les corrélations des séries temporelles observées ont été analysées. Chaque station a fait l'objet d'une corrélation croisée, sur les valeurs non nulles, avec les autres stations, pour autant qu'une période commune d'une année était disponible. Il en résulte une matrice contenant les coefficients de corrélation (Figure C.1). Celle-ci ayant été construite sur des séries de longueurs différentes, elle est à mettre en relation avec cette longueur. Une matrice des longueurs communes est présentée dans la Figure C.2.

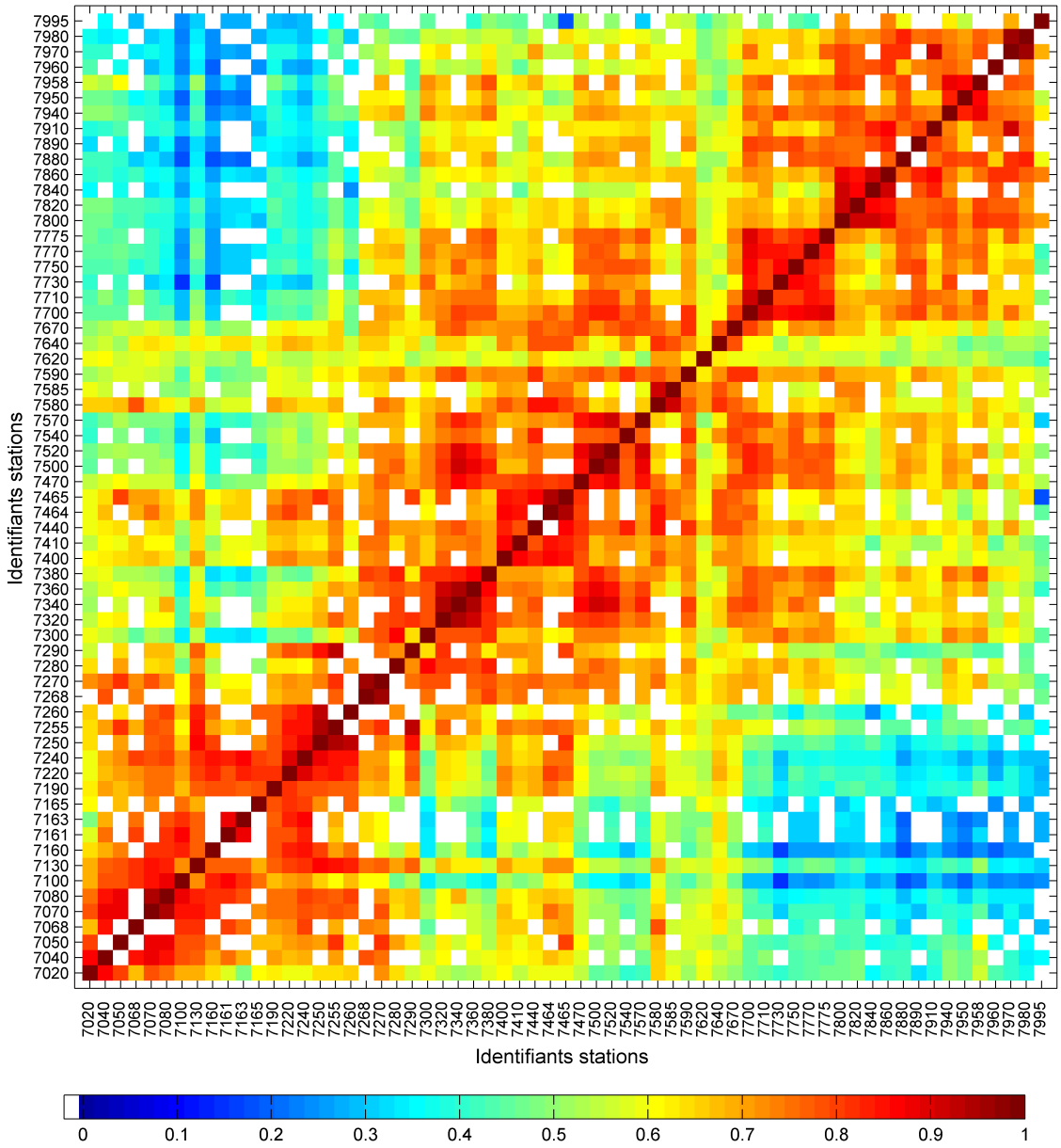


Figure C.1 – Matrice des coefficients de corrélation entre chaque station. La couleur est représentative de la valeur du coefficient. Plus le pixel est rouge, plus la corrélation est forte.

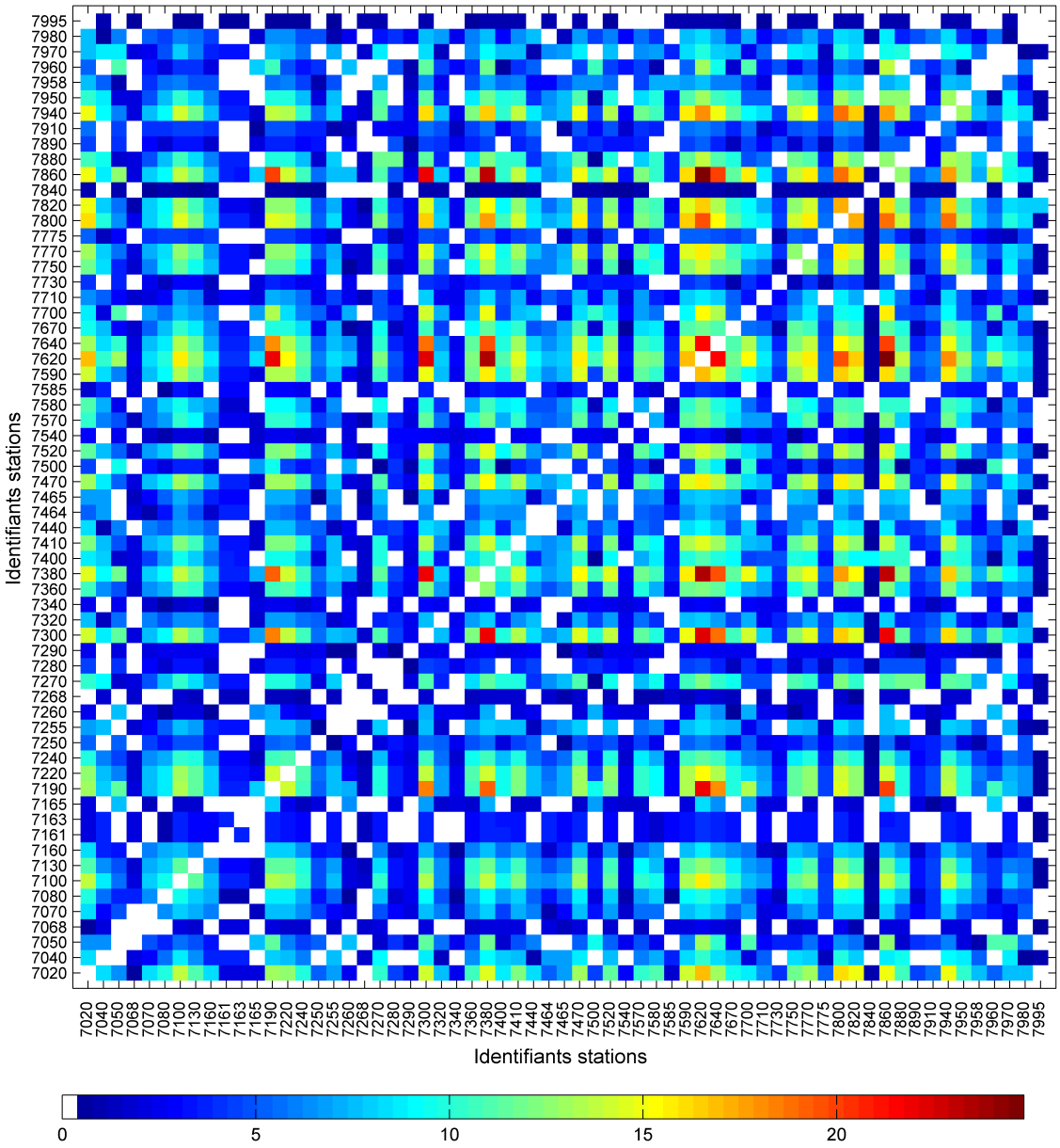


Figure C.2 – Matrice représentant la longueur de l'archive (en années) commune disponible utilisée pour calculer les coefficients de corrélation. La couleur est représentative de la longueur de l'archive commune. Plus le pixel est rouge, plus l'archive commune est longue.

En mettant en parallèle ces informations, il apparaît par exemple que la station du Bouveret (7995) est faiblement corrélée aux autres séries, mais que la période de comparaison de cette station est particulièrement courte. Il serait donc imprudent d'en tirer des conclusions. Par contre, la corrélation de la station du col du Grand-Saint-Bernard (7620) est également faible (voir également la Figure C.4), mais dans ce cas la série est suffisamment longue.

La Figure C.1 présente des discontinuités entre différentes régions du bassin. Ceci est certainement dû en partie aux processus responsables des précipitations, mais aussi à un effet de proximité.

Afin de procéder à un regroupement, des cartes affichant les corrélations de manière spatiale ont été produites pour chacune des stations (voir par exemple les Figures C.3 et C.4).

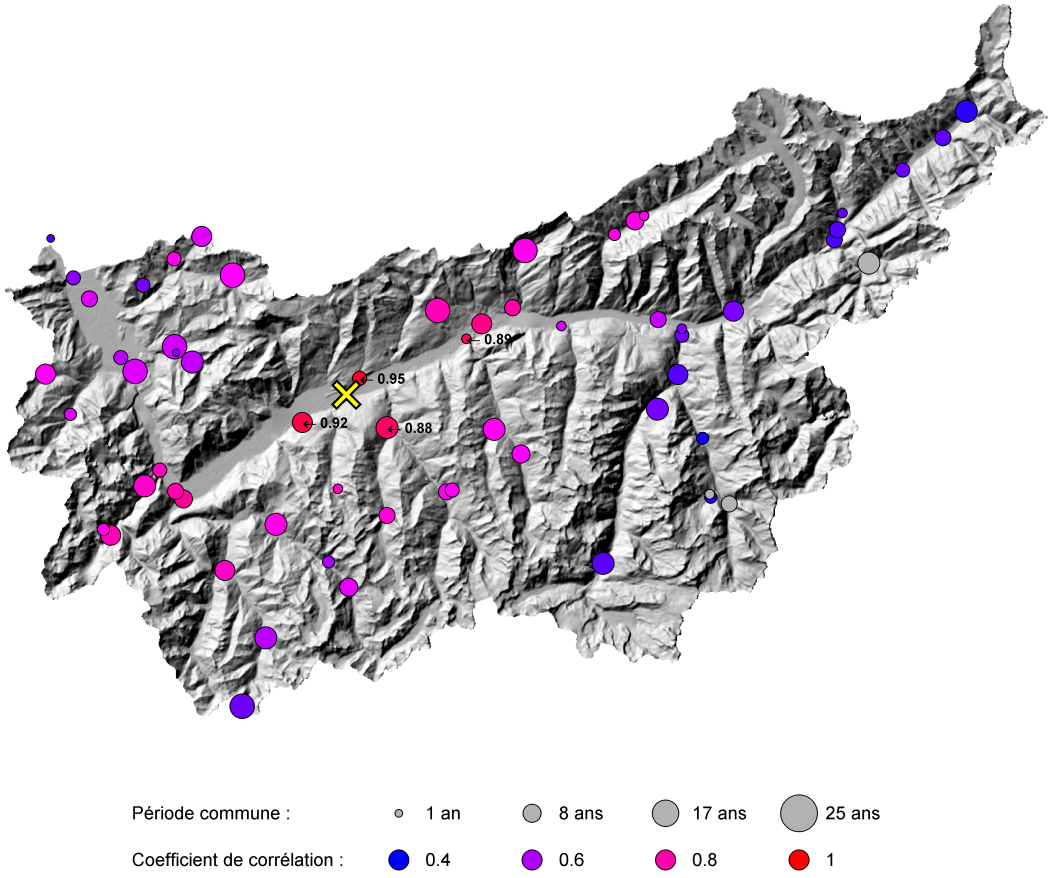


Figure C.3 – Exemple de carte de corrélations pour la station de Sion. La station considérée est représentée par la croix jaune. Les couleurs symbolisent les valeurs du coefficient de corrélation et la taille, la longueur de la période commune. Les ronds grisés sont des stations avec un coefficient de corrélation inférieur à 0.4. Le coefficient de corrélation est indiqué pour des valeurs supérieures à 0.85. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

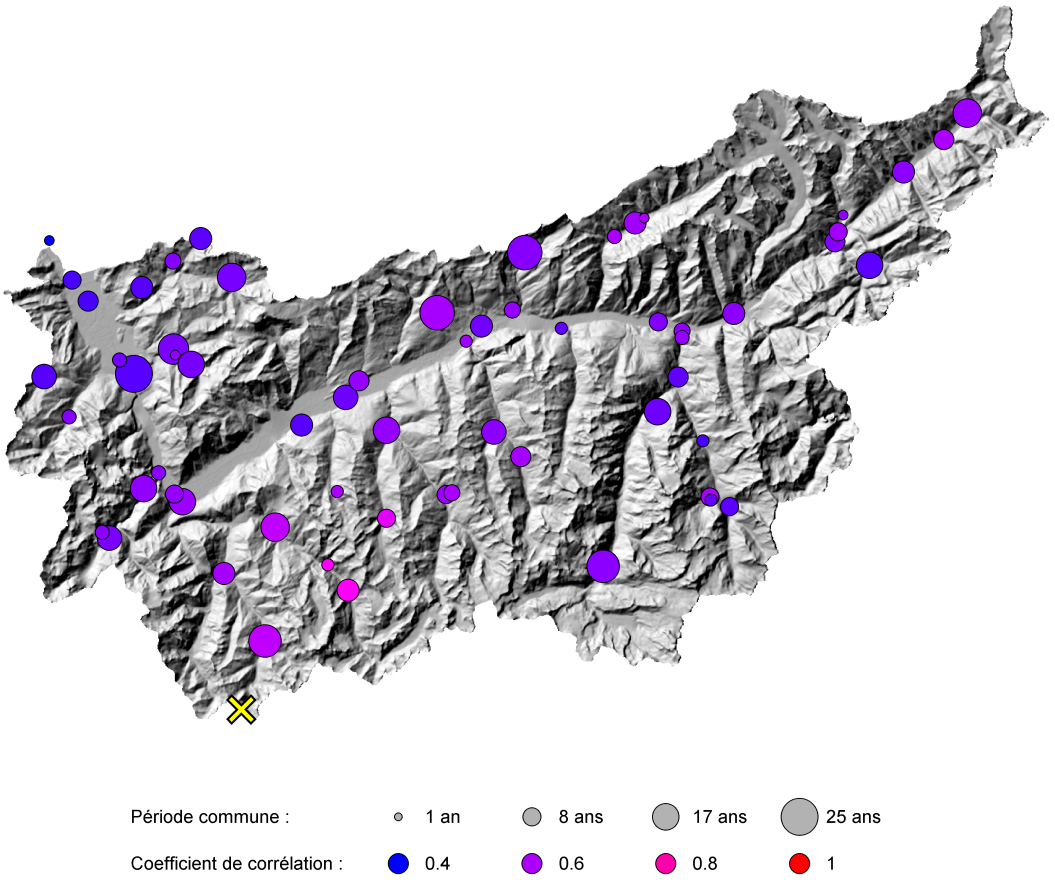


Figure C.4 – Exemple de carte de corrélations pour la station du col du Grand-Saint-Bernard. Mêmes conventions que la Figure C.3. (Géodonnées © swisstopo – DV084371)

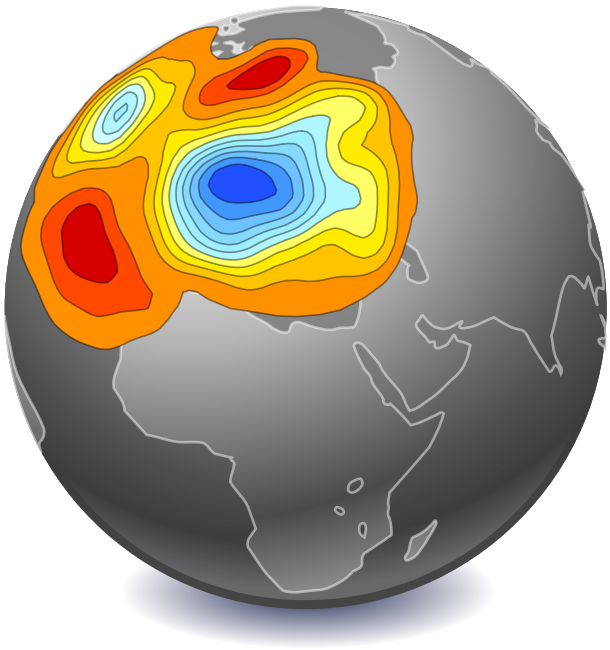
Annexe D

Manuel utilisateur d'Atmoswing

UNIL | Université de Lausanne

Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque

ATMOSWING
Analog Technique MOdel for Statistical Weather forecastING



Manuel utilisateur pour la version 1.0.2

Pascal Horton

Sous la supervision de Michel Jaboyedoff et Charles Obled

Lausanne, novembre 2011

D.1 Introduction

Atmoswing implémente la prévision par la méthode des analogues en temps réel et permet de visualiser les résultats à l'aide de cartes et de graphiques. Il est constitué de deux outils distincts, soit le logiciel de prévision et celui pour la visualisation (Figure D.1). Cette séparation des tâches offre la possibilité d'automatiser les prévisions p.ex. sur un serveur et de les visualiser localement.

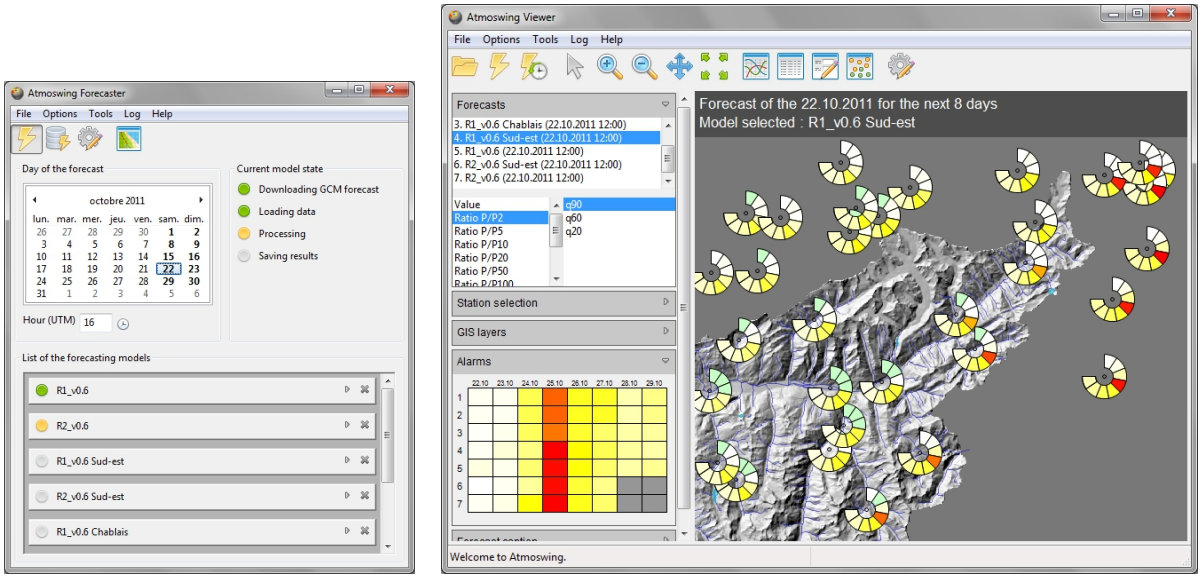


Figure D.1 – Interfaces graphiques des outils (gauche) de prévision et (droite) de visualisation.

Les logiciels sont écrits en C++ à l'aide du framework wxWidgets (www.wxwidgets.org), permettant une compilation sur la majorité des plateformes existantes. Atmoswing est actuellement compilé pour Ubuntu 64 bits et Windows 32 bits.

D.2 Installation et configuration

D.2.1 Installation

Le logiciel peut être copié sur un ordinateur compatible et exécuté directement. Une configuration automatique ayant lieu lors de la première exécution, il faut donc placer les fichiers dans leur répertoire final avant de les exécuter. Pour une configuration plus rapide, il est conseillé de conserver l'arborescence originale (avec sous-dossiers *data* et *config*). Si l'utilisateur préfère placer ces fichiers dans un autre répertoire, il sera alors nécessaire de spécifier ces chemins lors de la configuration (définition des préférences).

Lors de la première utilisation, il est également nécessaire de restaurer la liste des modèles à évaluer, si une telle liste est disponible. La marche-à-suivre est la suivante :

1. Menu *File / Load models list*
2. Sélectionner le fichiers *DefaultForecastingModelsList.xml* (dans le répertoire *config*)
3. Menu *File / Save models list as default*

D.2.2 Configuration

La configuration de Atmoswing est principalement automatique. La seule étape recommandée est la définition de quelques préférences, principalement la configuration du proxy internet (si nécessaire), et les répertoires utilisés par le logiciel.

L'interface commune de définition des préférences est accessible par le menu *Options / Préférences* des deux logiciels. Les options ainsi définies sont valables pour chacun d'eux. Celles-ci sont enregistrées dans un fichier .ini placé dans le dossier de l'utilisateur (p.ex. sous Windows 7 : C :\Users\MonNom\AppData\Roaming\).

Il n'est nécessaire de définir que le contenu des deux premiers onglets (Général et Chemins), les autres éléments ont des valeurs par défaut convenables.

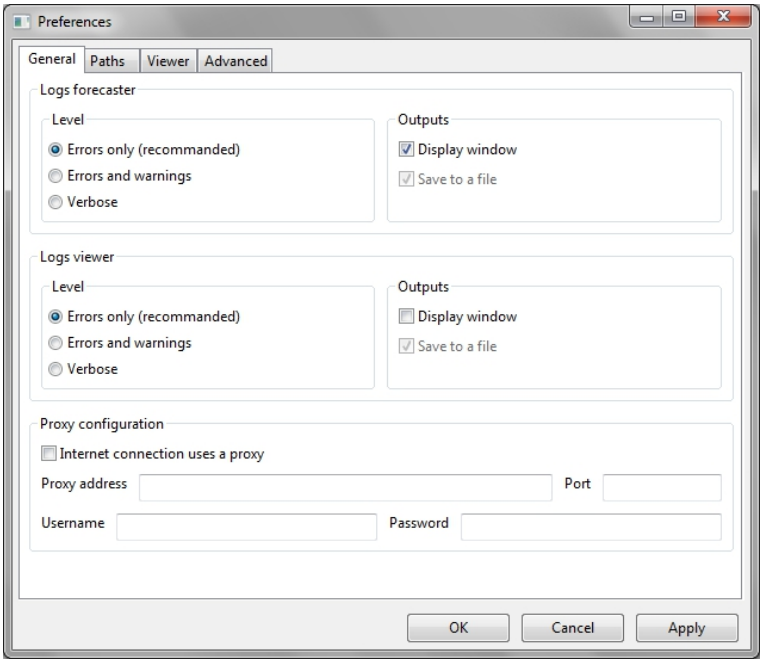


Figure D.2 – Interface de définition des préférences.

D.2.2.1 Onglet Général

Les options présentes concernent le journal des logs et l'utilisation d'un proxy pour la connexion à Internet.

Journal des logs : les préférences des logs sont propres à chaque outil. Elles définissent l'affichage de la fenêtre des logs ainsi que le niveau de log rapporté :

1. Seulement les erreurs - recommandé tant que tout se passe comme prévu.
2. Erreurs et avertissements - certains avertissements aident à être vigilant en cas de problème. Il y a toutefois des avertissements même lors d'un fonctionnement normal.
3. Tous les messages - toutes les opérations sont reportées, ce qui constitue une masse d'information inutile en cas de fonctionnement normal. Ceci a pour conséquence que les messages importants sont noyés dans le flux du fonctionnement standard, le programme est ralenti et son utilisation en mémoire augmente. Cette option est utile pour identifier la source d'une erreur en cas d'échec de la prévision.

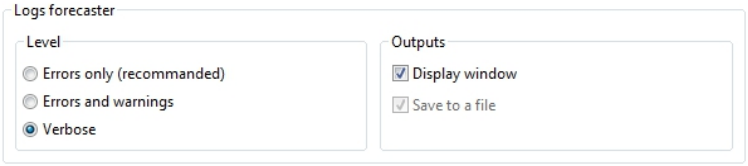


Figure D.3 – Options du journal des logs.

Proxy internet : La configuration du proxy contient les éléments suivants :

- Activation du proxy - si nécessaire.
- Propriétés du proxy - donner son adresse, le port, le nom d'utilisateur et le mot de passe.

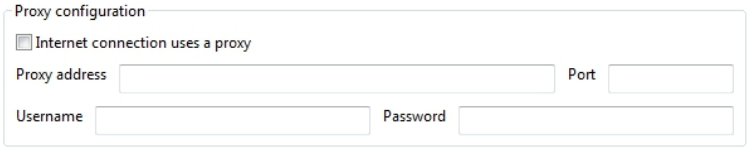


Figure D.4 – Options pour le proxy Internet.

D.2.2.2 Onglet Chemins

Le choix des chemins permet de configurer les répertoires utilisés pour la prévision en temps réel. Il peut être utile de changer, par exemple, le dossier dans lequel enregistrer les résultats.

Chemins des deux logiciels : Indication du chemin des deux outils. Utilisé lors du passage rapide de l'un à l'autre, ainsi que pour lancer les prévisions depuis le visualisateur.

Figure D.5 – Définition du chemin des exécutables.

Chemins pour la prévision : Différents répertoires doivent être indiqués pour la prévision en temps réel :

- Répertoire contenant les fichiers de paramètres de la prévision - contient les fichiers xml (p.ex. ParametersForecast_R1_CretesSudEst.xml) définissant les paramètres de la méthode
- Répertoire contenant les archives des prédicteurs.
- Répertoire pour l'enregistrement des prédicteurs téléchargés - un archivage de ces données est recommandé pour être en mesure de resimuler des événements. Des sous-répertoires sont automatiquement créés pour chaque date selon l'arborescence Année/Mois/Jour.
- Répertoire pour l'enregistrement des résultats des prévisions - emplacement de stockage de ces résultats. Des sous-répertoires sont également générés pour chaque date.
- Répertoire contenant la base de données des précipitations - cette base de données est un fichier NetCDF (p.ex. StationsDailyPrec.nc).

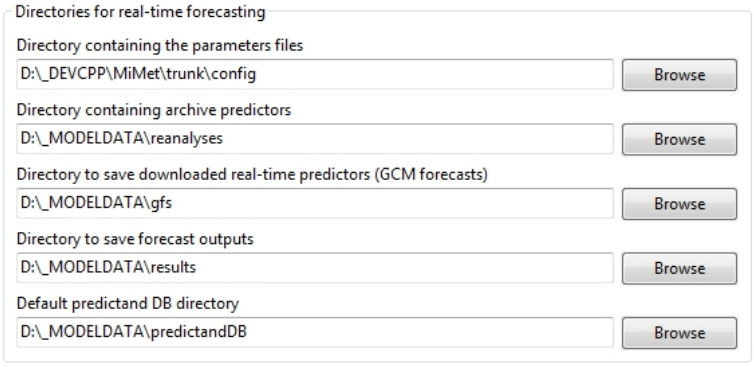


Figure D.6 – Définition des chemins pour la prévision en temps réel.

D.2.2.3 Onglet Visualisateur

Les options de visualisation sont automatiquement configurées et si les données SIG n'ont pas été déplacées, il n'y a rien besoin de changer.

Options d'affichage des prévisions : options pour la visualisation des résultats de la prévision.

Figure D.7 – Définitions des options de la gamme de couleurs et des prévisions antérieures.

La valeur maximale de précipitations pour la gamme des couleurs définit la valeur pour laquelle le rouge est attribué lorsque les couleurs ne sont pas normalisées. La seconde option est le nombre de jours de prévisions antérieures à afficher en tant que traces dans les graphiques de l'évolution temporelle des précipitations à une station. 3 jours sont ici conseillés afin de limiter le nombre d'anciennes traces moins pertinentes.

Options du panneau des alarmes : le panneau des alarmes affiche la valeur la plus élevée de toutes les stations par échéance et par modèle. Les options sont le temps de retour pour la normalisation et le quantile à afficher. Un temps de retour de 10 ans est conseillé pour ne pas trop vite tomber dans le rouge. Le quantile 0.9 permet de rester vigilant quant à l'occurrence possible d'événements importants.

Figure D.8 – Définitions des options du panneau des alarmes.

Couches SIG : Options de représentation des couches ouvertes par défaut. Les couches automatiquement ouvertes sont :

- L'ombrage du terrain (Hillshade).
- Les bassins versants (Catchments).
- L'hydrographie (Hydrography).
- Les lacs (Lakes).
- Une carte de fond (Basemap).

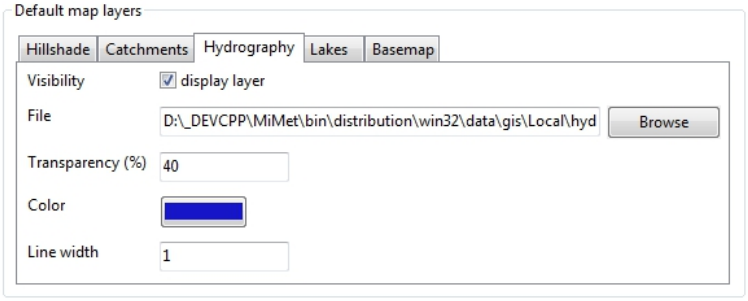


Figure D.9 – Options d'affichage par défaut des couches SIG de la carte des prévisions.

Pour ces différentes couches, il est possible de changer les propriétés suivantes, pour autant qu'elles existent :

- La visibilité - si la couche est visible ou non par défaut.
- Le fichier - le chemin vers les shapefiles (présents dans data/gis/Rhone).
- La transparence - 0 % est opaque et 100 % est entièrement transparent.
- La couleur - est appliquée aux lignes ou à la surface.
- L'épaisseur de la ligne - pour les lignes ou les pourtours de polygones.

D.2.2.4 Onglet Avancé

Les options avancées sont automatiquement configurées et n'ont pas besoin d'être changées par l'utilisateur, à part en cas de problème.

Options de l'interface graphique (GUI) : Ajuste le comportement de l'interface et de ses moyens de communication avec l'utilisateur. Permet de gagner en temps de calcul en désactivant les boîtes de dialogues. Les choix sont :

- Silencieux - aucune boîte de dialogue ne s'affiche. L'utilisateur doit donc garder un oeil sur la fenêtre du journal des logs pour détecter d'éventuelles erreurs. Cette option n'est utile que pour les calculs très intensifs, mais n'est pas recommandée pour un utilisateur non initié.
- Standard - recommandé pour une utilisation habituelle de l'outil.
- Bavard - pas très différent de standard, ne présente pas beaucoup d'intérêt.

Figure D.10 – Choix du comportement des notifications à l'utilisateur.

Téléchargement des prédicteurs : Options pour le téléchargement automatique des prédicteurs. Les choix sont :

- Nombre de tentatives sur des données antérieures si les données désirées ne peuvent être téléchargées ; ce nombre doit être supérieur à 2 pour assurer un bon fonctionnement de l'outil de prévision. En effet, les derniers résultats des modèles ne sont jamais accessibles instantanément, mais après un délai de plusieurs heures. Dans ce cas, nous devons prendre les données les plus récentes à disposition.
- Nombre de téléchargements parallèles - les requêtes parallèles diminuent les temps de téléchargement. Attention toutefois à ne pas mettre un chiffre trop important (4 étant suffisant), au risque de se voir exclure du serveur de données. Il est actuellement conseillé de ne faire qu'un téléchargement à la fois (mettre 1 dans le champ).

Figure D.11 – Options de téléchargement des prédicteurs.

Options avancées : Différentes options spécifiques au comportement du logiciel :

- Activer ou désactiver la réactivité de l'interface graphique. Cette option doit toujours être activée pour une utilisation standard.
- Permettre de multiples instances du logiciel de prévision.

– Permettre de multiples instances du logiciel de visualisation.

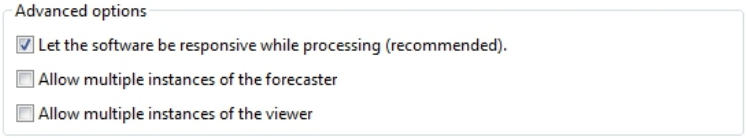


Figure D.12 – Option de réactivité de l'interface graphique.

Multithreading : options communes pour l'utilisation de threads. Les options sont :

– Activation - permet un gain en performance dans les calculs, mais peut devenir instable sur Windows (donc déconseillé).
– Nombre de threads - à choisir en fonction du processeur de l'ordinateur. Le nombre optimal de threads pour l'ordinateur utilisé est proposé automatiquement par le logiciel.
– La priorité des threads - permet de définir quelles sont les ressources que les threads peuvent disposer en concurrence avec les autres processus en cours.

Figure D.13 – Options de calcul en parallèle.

Options de calcul : Ces options influencent le coeur du calcul de la recherche d'analogie. Elles ne changent pas le résultat, mais le temps de calcul. Les choix sont les suivants :

– Multithreaded - pour autant que l'ordinateur possède au moins deux processeurs. C'est clairement la version la plus rapide, et elle l'est d'autant plus que l'ordinateur a de processeurs. Mais, comme il l'a été dit ci-dessus, les calculs peuvent devenir instable sur Windows et cette option est donc déconseillée pour Windows.
– Insertion dans le tableau des dates - cette option est la deuxième plus rapide et est parfaitement stable (donc recommandée). L'approche est de limiter la taille du vecteur des dates au nombre d'analogues désiré et d'y insérer des nouvelles dates pour autant que le score d'analogie soit meilleur que celles déjà présentes.
– Découpage du tableau des dates - cette approche est considérablement plus lente que les autres et est donc déconseillée. Elle consiste à garder toutes les dates ordonnées par leur critère d'analogie et de couper le tableau au nombre désiré.

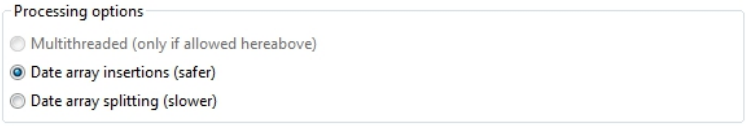


Figure D.14 – Méthodes disponibles de calcul.

Options d'algèbre linéaire : Ces options influencent la performance de certains calculs, dont le critère d'analogie. Les choix sont les suivants :

- Accès direct aux coefficients - approche par boucles en C++ standard (recommandé).
- Accès direct aux coefficients avec minimisation de la déclaration de variables - approche par boucles en C++ standard en limitant le nombre de variables au strict minimum.
- Algèbre linéaire avec Eigen - utilisation de la librairie d'algèbre linéaire Eigen.
- Algèbre linéaire avec Eigen - utilisation de la librairie d'algèbre linéaire Eigen en limitant le nombre de variables au strict minimum.

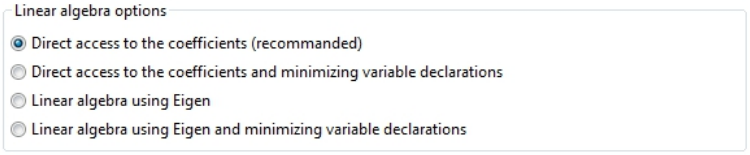


Figure D.15 – Options d'algèbre linéaire.

Répertoires de travail : Répertoire pour (éventuellement) enregistrer des fichiers intermédiaires de la prévision - indiquer un dossier temporaire.

Figure D.16 – Répertoires de travail.

Chemins de l'utilisateur en cours : Indication de certains chemins utilisés et automatiquement définis selon l'OS : répertoire de travail, journaux des logs des logiciels de prévision et de visualisation, fichiers des préférences des logiciels de prévision et de visualisation.

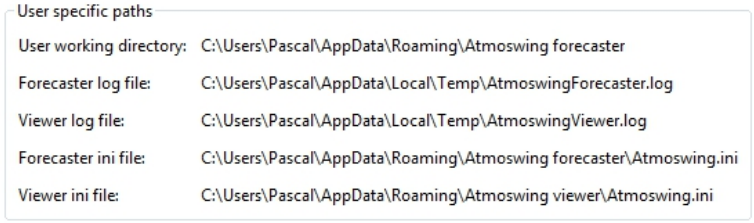


Figure D.17 – Affichage des chemins propres à l'utilisateur.

Catalogues : Indication des chemins des trois catalogues
- Catalogue des prédicteurs en temps réel.
- Catalogue des prédicteurs archives.
- Catalogue des prédictands (précipitations).

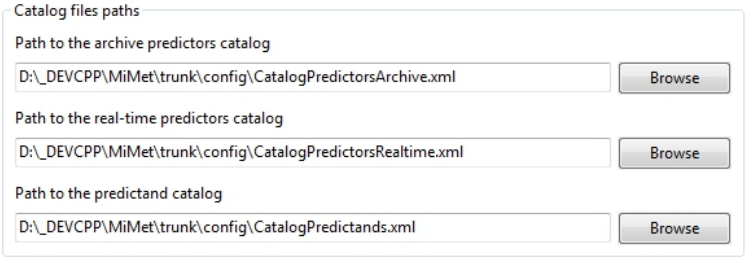


Figure D.18 – Définition des chemins vers les catalogues.

D.3 Gestion des données

Trois types de données sont utilisées par Atmoswing : les archives de prédicteurs, les prédicteurs prévus par le modèle global et les prédictands (précipitations). La gestion de ces données diffère d'un type à l'autre, mais chacune est décrite par un fichier catalogue.

D.3.1 Les catalogues

Les catalogues sont des fichiers xml contenant quelques méta-données sur les prédictands et prédicteurs utilisés. Ces informations n'ont pas à être modifiées, à part en cas de changement dans les données utilisées. Ces catalogues sont des fichiers xml, qu'il est préférable d'ouvrir avec un éditeur de texte à coloration syntaxique (p.ex. Notepad++, SciTe, ...).

Il n'existe qu'un seul catalogue par type de données, référençant plusieurs jeux de données. Lors de l'ajout de données, il convient de compléter les fichiers existants et non d'en créer de nouveaux. Il y a donc trois catalogues :
- *CatalogPredictorsArchive.xml* pour les archives des prédicteurs (Réanalyses NCEP), soit les données auxquelles les variables prévues seront comparées ;
- *CatalogPredictorsRealtime.xml* pour les prédicteurs du modèle global (GFS) utilisés comme prédicteurs cibles. Ces données sont téléchargées automatiquement lors des calculs de prévision ;
- *CatalogPredictands.xml* pour les prédictands (précipitations). Il contient une liste des stations intégrées à la base de données. Ce fichier n'est utilisé que lors de la création de la base de données des prédictands. La base de données est ensuite autonome.

D.3.2 Archives de prédicteurs

Ces données sont les archives des variables synoptiques. Elles permettent de rechercher une situation analogue dans le passé. Cette base de données est donc statique et ne devrait pas changer, à part pour des mise-à-jours occasionnelles. Elle est décrite par le fichier catalogue *CatalogPredictorsArchive.xml*, par exemple :

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>

<AtmoswingFile version="0.3">
   <Header description="List of preditor archive datasets" date="18.03.2009"
      author="Pascal Horton"></Header>
   <DataSet id="NCEP_R1" enable="1" name="NCEP/NCAR Reanalysis 1"
      description="NCEP/NCAR Reanalysis 1, first Data set">
      <TimeZoneHours>0</TimeZoneHours>
      <Start>01/01/1948 00:00</Start>
      <End>31/12/2008 23:59</End>
      <TimeStepHours>6</TimeStepHours>
      <FirstTimeStepHour>0</FirstTimeStepHour>
      <FormatRaw>netcdf</FormatRaw>
      <FormatStorage>netcdf</FormatStorage>
      <Path>/media/METEODATA/_METEODATA/NCEP Reanalysis</Path>
      <Website>http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis</Website>
      <Ftp>ftp://ftp.cdc.noaa.gov/DataSets/ncep.reanalysis</Ftp>
      <NaN>32767</NaN>
      <NaN>9360000000000000000000000000000000</NaN>
      <CoordinateSys>WGS84</CoordinateSys>
      <DataList>
         <Data id="hgt" name="Geopotential Height" enable="1">
            <SubFolder>pressure</SubFolder>
            <FileLength>Year</FileLength>
            <FileName>hgt.[YYYY].nc</FileName>
            <FileVarName>hgt</FileVarName>
            <Parameter>GeopotentialHeight</Parameter>
            <Unit>m</Unit>
            <UaxisStep>2.5</UaxisStep>
            <VaxisStep>2.5</VaxisStep>
         </Data>
         ...
      </DataList>
   </DataSet>
   <DataSet id="NCEP_R1_subset" enable="1" name="NCEP/NCAR Reanalysis 1,
       subset" description="NCEP/NCAR Reanalysis 1, subset">
      <TimeZoneHours>0</TimeZoneHours>
      <Start>01/01/1961 00:00</Start>
      <End>31/12/2008 23:59</End>
      <TimeStepHours>6</TimeStepHours>
      <FirstTimeStepHour>0</FirstTimeStepHour>
      <FormatRaw>netcdf</FormatRaw>
      <FormatStorage>netcdf</FormatStorage>
      <Path>D:\_MODELDATA\reanalyses</Path>
      <Website>http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis</Website>
      <Ftp>ftp://ftp.cdc.noaa.gov/DataSets/ncep.reanalysis</Ftp>
      <NaN>32767</NaN>
      <NaN>9360000000000000000000000000000000</NaN>
      <CoordinateSys>WGS84</CoordinateSys>
      <DataList>
         <Data id="rhum" name="Relative humidity" enable="1">
            <SubFolder></SubFolder>
            <FileLength>Total</FileLength>
            <FileName>rhum.nc</FileName>
            <FileVarName>rhum</FileVarName>
            <Parameter>RelativeHumidity</Parameter>
            <Unit>percent</Unit>
```

```
            <UaxisStep>2.5</UaxisStep>
            <VaxisStep>2.5</VaxisStep>
         </Data>
         ...
      </DataList>
   </DataSet>
</AtmoswingFile>
```

Le catalogue liste les différents jeux de données (*DataSet*) à disposition. Ceux-ci sont définis par les champs suivants :

- *id* : un identifiant qui doit être unique. Il n'y a pas de restriction sur le nom du jeu de données.
- *enable* : active ou désactive l'autorisation d'utilisation du jeu de données.
- *name* : son nom (actuellement non utilisé dans le logiciel)
- *description* : une petite description (actuellement non utilisé dans le logiciel)

Les propriétés du jeu de données sont listées dans les balises suivantes. Elles sont :

TimeZoneHours : décalage horaire des données par rapport à l'heure universelle.

Start : Début des données (JJ/MM/AAAA hh:mm)

End : Fin des données (JJ/MM/AAAA hh:mm)

TimeStepHours : Pas de temps en heures

FirstTimeStepHour : Heure (UTC) du premier pas de temps journalier

FormatRaw : Format des fichiers de données brutes (actuellement non utilisé dans le logiciel). Doit être dans la liste suivante :

- *dat* : format de séries temporelles basé sur des fichiers ascii
- *asc* : fichiers ascii
- *txt* : fichiers textes standards (ascii)
- *netcdf* : format binaire NetCDF
- *grib* : format binaire GRIB
- *grib2* : format binaire GRIB2
- *xml* : format xml

FormatStorage : Format des fichiers de stockage des données. La liste des possibilités est la même que pour les données brutes.

Path : Le chemin du répertoire à la base du jeu de données. N'est utilisé en prévision que si le chemin complet n'est pas donné dans les préférences.

Website : Le site web pour l'acquisition de ces données. Informatif, n'est pas utilisé dans les logiciels.

Ftp : L'adresse FTP pour l'acquisition de ces données. Informatif, n'est pas utilisé dans les logiciels.

NaN : Le format des vides (Not a Number). Il peut y en avoir plusieurs. Il faut donc créer une balise NaN par valeur que nous désirons ajouter.

CoordinateSys : Le système de coordonnées utilisé. Doit être dans la liste suivante :
- *WGS84* : latitudes-longitudes selon le Système géodésique mondial de 1984
- *CH1903* : projection suisse de 1903
- *CH1903p* : nouvelle projection suisse (1903+)

DataList : La liste des variables à disposition dans le jeu de données. Pour chaque variable, un nouveau bloc *Data* doit être créé. Ceux-ci sont décrits ci-dessous.

Les variables (*Data*) sont décrites par les champs suivants :
- *id* : un identifiant qui doit être unique.
- *enable* : active ou désactive l'autorisation d'utilisation de la variable.
- *name* : son nom (actuellement non utilisé dans le logiciel)

Les propriétés des variables sont listées dans les balises suivantes :

SubFolder : le sous-dossier dans lequel se situent les variables, si besoin.

FileLength : la longueur d'un fichier de données. Peut être une des possibilités suivantes :
- *Total* ou T : Toute la série temporelle est contenue dans un seul fichier
- *Year* ou Y : La série temporelle est découpée en plusieurs fichiers annuels.

FileName : Le nom du/des fichiers. En cas de série temporelle découpée par année, un tag ([YYYY] ou [YY]) peut être ajouté et sera remplacé par l'année correspondante lors du chargement. Ainsi, *hgt.[YYYY].nc* devient p.ex. *hgt.1986.nc*, *hgt.1987.nc*, ...

FileVarName : Le nom de la variable dans le fichier

Parameter : Le type de données. Doit être listé dans la liste suivante :
- *Precipitation* : précipitations
- *AirTemperature* : température de l'air
- *GeopotentialHeight* : hauteur du géopotentiel
- *PrecipitableWater* : eau précipitable
- *RelativeHumidity* : humidité relative
- *SpecificHumidity* : humidité spécifique
- *Omega* : vitesse verticale
- *Uwind* : composante zonale du vent (ouest-est)
- *Vwind* : composante méridienne du vent (sud-nord)
- *SurfaceLiftedIndex* : indice de soulèvement à la surface
- *PotentialTemperature* : température potentielle
- *Pressure* : pression
- *PotentialEvaporation* : évaporation potentielle
- *SurfaceTemperature* : température de surface
- *ConvectivePrecipitation* : précipitations convectives
- *LongwaveRadiation* : rayonnement en grandes longueurs d'ondes
- *ShortwaveRadiation* : rayonnement en courtes longueurs d'ondes

– *SolarRadiation* : rayonnement solaire
– *GroundHeatFlux* : flux de chaleur au sol
– *LatentHeatFlux* : flux de chaleur latente
– *NearIRFlux* : flux du proche IR
– *SensibleHeatFlux* : flux de chaleur sensible

Unit : L'unité des données. Doit être listé dans la liste suivante :
– *mm*
– *m*
– *percent*
– *degC* (°C)
– *degK* (°K)
– *Pascals*
– *PascalsPerSec* (Pa/s)
– *kgPerKg* (kg/kg)
– *mPerSec* (m/s)
– *WPerm2* (W/m^2)
– *kgPerm2Pers* ($kg/m^2/s$)

UaxisStep : Taille de la maille de la grille est-ouest

VaxisStep : Taille de la maille de la grille nord-sud

D.3.3 Prédicteurs en temps réel

Ces données sont les variables synoptiques prévues par le modèle de circulation générale. Elles permettent de connaître la situation de l'atmosphère pour le jour cible à venir. Les fichiers sont automatiquement téléchargés avant les calculs de prévision. Les variables météorologiques et les commandes pour le téléchargement sont décrites dans le fichier catalogue *CatalogPredictorsRealtime.xml*, par exemple :

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>

<AtmoswingFile version="0.3">
   <Header description="List of preditor realtime datasets" date="18.03.2009"
        author="Pascal Horton"></Header>
   <DataSet id="GFS_F2" enable="1" name="GFS Forecast version grib2"
       description="GFS Forecast version grib2">
      <TimeZoneHours>0</TimeZoneHours>
      <ForecastLeadTimeStart>0</ForecastLeadTimeStart>
      <ForecastLeadTimeEnd>192</ForecastLeadTimeEnd>
      <ForecastLeadTimeStep>6</ForecastLeadTimeStep>
      <RunHourStart>0</RunHourStart>
      <RunUpdate>6</RunUpdate>
      <Start></Start>
      <End></End>
      <TimeStepHours></TimeStepHours>
      <FirstTimeStepHour>0</FirstTimeStepHour>
      <FormatRaw>grib2</FormatRaw>
      <FormatStorage>netcdf</FormatStorage>
      <Website>http://nomads.ncep.noaa.gov/</Website>
      <NaN></NaN>
```

```
      <CoordinateSys>WGS84</CoordinateSys>
      <DataList>
         <Data id="hgt" name="Geopotential height" enable="1">
            <FileLength>Instantaneous</FileLength>
            <FileVarName>HGT</FileVarName>
            <CommandDownload>http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter_gfs.
                pl?file=gfs.t[CURRENTDATE-hh]z.pgrbf[LEADTIME-hh].grib2&amp;
                lev_200_mb=on&amp;lev_300_mb=on&amp;lev_400_mb=on&amp;
                lev_500_mb=on&amp;lev_600_mb=on&amp;lev_700_mb=on&amp;
                lev_850_mb=on&amp;lev_925_mb=on&amp;lev_1000_mb=on&amp;var_HGT
                =on&amp;subregion=&amp;leftlon=-20&amp;rightlon=30&amp;toplat
                =60&amp;bottomlat=30&amp;dir=%2Fgfs.[CURRENTDATE-YYYYMMDDhh]
            </CommandDownload>
            <Parameter>GeopotentialHeight</Parameter>
            <Unit>m</Unit>
            <UaxisStep>1.0</UaxisStep>
            <VaxisStep>1.0</VaxisStep>
         </Data>
         <Data id="pwat" name="Precipitable water" enable="1">
            <FileLength>Instantaneous</FileLength>
            <FileVarName>PWAT</FileVarName>
            <CommandDownload>http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter_gfs.
                pl?file=gfs.t[CURRENTDATE-hh]z.pgrbf[LEADTIME-hh].grib2&amp;
                lev_entire_atmosphere_%5C%28considered_as_a_single_layer%5C
                %29=on&amp;var_PWAT=on&amp;subregion=&amp;leftlon=-20&amp;
                rightlon=30&amp;toplat=60&amp;bottomlat=30&amp;dir=%2Fgfs.[
                CURRENTDATE-YYYYMMDDhh]
            </CommandDownload>
            <Parameter>PrecipitableWater</Parameter>
            <Unit>mm</Unit>
            <UaxisStep>1.0</UaxisStep>
            <VaxisStep>1.0</VaxisStep>
         </Data>
         ...
      </DataList>
   </DataSet>
</AtmoswingFile>
```

La majorité du contenu de ce catalogue étant semblable à celui des archives (Section D.3.2), ne seront détaillées que les balises supplémentaires :

ForecastLeadTimeStart : Première échéance disponible en heures

ForecastLeadTimeEnd : Dernière échéance disponible en heures

ForecastLeadTimeStep : Pas de temps des échéances disponibles en heures

RunHourStart : Heure (UTC) de la journée correspondant au premier run du modèle global

RunUpdate : Pas de temps des mise-à-jour des prévisions du modèle global

CommandDownload : Commande à exécuter pour télécharger les données du modèle global qui nous intéressent. La commande contient le choix des données, des niveaux atmosphériques et du domaine désiré. En cas de changement du côté des serveurs fournissant les prévisions, il sera nécessaire de mettre à jour ces commandes.

D.3.4 Prédictands

Ces données sont les séries de précipitations utilisées pour la prévision. Ce catalogue n'est utilisé que pour la création de la base de données des prédictands, qui contient ensuite toutes les informations nécessaires à la prévision. Les propriétés des stations et des séries sont décrites dans le fichier catalogue *CatalogPredictands.xml*, par exemple :

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>

<AtmoswingFile version="0.3">
   <Header description="List of predictand properties" date="28.06.2011"
       author="Pascal Horton"></Header>
   <DataSet id="MCHDP" enable="1" name="MeteoSwiss daily precipitation
       measurements" description="precipitation measurements made by
       MeteoSwiss at a daily timestep">
      <IncludeinDB>StationsDailyPrec</IncludeinDB>
      <Parameter>Precipitation</Parameter>
      <Unit>mm</Unit>
      <TimeZoneHours>0</TimeZoneHours>
      <Start note="first value of all stations">01/01/1940</Start>
      <End note="last value of all stations">31/12/2009</End>
      <TimeStepHours>24</TimeStepHours>
      <FirstTimeStepHour>0</FirstTimeStepHour>
      <FormatRaw>dat</FormatRaw>
      <FormatStorage>netcdf</FormatStorage>
      <Path>/home/phorton/_PROJETS/MINERVE/MeteoSuisse/P jour/</Path>
      <NaN>32767</NaN>
      <CoordinateSys>CH1903</CoordinateSys>
      <DataList>
         <Data id="1" name="Guetsch ob Andermatt" enable="1">
            <LocalID>4020</LocalID>
            <XCoordinate>690140</XCoordinate>
            <YCoordinate>167590</YCoordinate>
            <Height>2287</Height>
            <FileName>CH4020.dat</FileName>
            <FilePattern>MeteoSwiss_Climap</FilePattern>
            <Start>01/01/1940</Start>
            <End>31/12/2009</End>
         </Data>
         <Data id="2" name="Andermatt" enable="1">
            <LocalID>4040</LocalID>
            <XCoordinate>688500</XCoordinate>
            <YCoordinate>165340</YCoordinate>
            <Height>1442</Height>
            <FileName>CH4040.dat</FileName>
            <FilePattern>MeteoSwiss_Climap</FilePattern>
            <Start>01/01/1940</Start>
            <End>31/12/2009</End>
         </Data>
         ...
      </DataList>
   </DataSet>
   <DataSet id="MCHDPG" enable="1" name="MeteoSwiss daily precipitation
       measurements at stations groupments" description="precip. measurements
       made by MeteoSwiss at a daily timestep at the groupments of stations">
      <IncludeinDB>RegionalDailyPrec</IncludeinDB>
      <Parameter>Precipitation</Parameter>
      <Unit>mm</Unit>
      <TimeZoneHours>0</TimeZoneHours>
      <Start note="first value of all stations">01/01/1961</Start>
      <End note="last value of all stations">31/12/2008</End>
      <TimeStepHours>24</TimeStepHours>
      <FirstTimeStepHour>0</FirstTimeStepHour>
      <FormatRaw>dat</FormatRaw>
```

```
      <FormatStorage>netcdf</FormatStorage>
      <Path>D:\_PROJETS\MINERVE (working dir)\201 Donnees stations\
          Groupements finaux</Path>
      <NaN>32767</NaN>
      <CoordinateSys>CH1903</CoordinateSys>
      <DataList>
         <Data id="1" name="Chablais" enable="1">
            <LocalID>7880,7970,7860,7800,7820,7940,7950</LocalID>
            <XCoordinate>566000</XCoordinate>
            <YCoordinate>126000</YCoordinate>
            <Height></Height>
            <FileName>groupement_1.dat</FileName>
            <FilePattern>Basic_daily</FilePattern>
            <Start>01/01/1961</Start>
            <End>31/12/2008</End>
         </Data>
         ...
      </DataList>
   </DataSet>
</AtmoswingFile>
```

Le catalogue liste les différents jeux de données (*DataSet*) à disposition. Ceux-ci sont définis par les champs suivants :

- *id* : un identifiant qui doit être unique. Il n'y a pas de restriction sur le nom du jeu de données.
- *enable* : active ou désactive l'autorisation d'utilisation du jeu de données.
- *name* : son nom (actuellement non utilisé dans le logiciel)
- *description* : une petite description (actuellement non utilisé dans le logiciel)

Les propriétés du jeu de données sont listées dans les balises suivantes :

IncludeinDB : La base de données dans laquelle intégrer ces données. Il peut y avoir plusieurs jeux de données dans une base de données. Nous utilisons la base de données *StationsDailyPrec*, mais les possibilités sont :

- *StationsDailyPrec* : séries journalières aux stations
- *Stations6HourlyPrec* : séries 6h aux stations
- *Stations6HourlyOfDailyPrec* : séries journalières glissantes à 6h aux stations
- *RegionalDailyPrec* : séries journalières régionales

Parameter : Le type de données (*Precipitation* dans notre cas).

Unit : Les unités (*mm* dans notre cas)

TimeZoneHours : décalage horaire des données par rapport à l'heure universelle.

Start : Début des données (JJ/MM/AAAA). La date la plus ancienne de toutes les stations !

End : Fin des données (JJ/MM/AAAA). La date la plus récente de toutes les stations !

TimeStepHours : Pas de temps en heures (24 heures dans notre cas)

FirstTimeStepHour : Heure (UTC) du premier pas de temps journalier

FormatRaw : Format des fichiers de données brutes. Doit être dans la liste suivante :

- *dat* : format de séries temporelles basé sur des fichiers ascii
- *asc* : fichiers ascii
- *txt* : fichiers textes standard (ascii)
- *netcdf* : format binaire NetCDF
- *grib* : format binaire GRIB
- *grib2* : format binaire GRIB2
- *xml* : format xml

FormatStorage : Format des fichiers de stockage des données. La liste des possibilités est la même que pour les données brutes.

Path : Le chemin du répertoire contenant les séries brutes des précipitations.

NaN : Le format des vides (Not a Number). Il peut y en avoir plusieurs. Il faut donc créer une balise NaN par valeur que nous désirons ajouter.

CoordinateSys : Le système de coordonnées utilisé (on ne peut pas mélanger plusieurs projections dans la même base de données). Doit être dans la liste suivante :
- *WGS84* : latitudes-longitues
- *CH1903* : projection suisse
- *CH1903p* : nouvelle projection suisse

DataList : La liste des stations à disposition dans le jeu de données. Pour chaque station, un nouveau bloc *Data* doit être créé. Ceux-ci sont décrits ci-dessous.

Les stations (*Data*) sont décrites par les champs suivants :
- *id* : un identifiant qui doit être unique.
- *name* : le nom de la station (ne supporte actuellement pas les accents !).
- *enable* : active ou désactive l'autorisation d'utilisation de la station.

Les propriétés des stations sont listées dans les balises suivantes. Elles sont :

LocalID : identifiant donné à la station par les services météorologiques locaux

XCoordinate : Coordonnée en X de la station dans le système de coordonnées donné.

YCoordinate : Coordonnée en Y de la station dans le système de coordonnées donné.

Height : Altitude de la station (affichage informatif).

FileName : Nom du fichier contenant la série.

FilePattern : Structure du fichier de la série (expliqué en Section D.3.5).

Start : Début de la série pour cette station (JJ/MM/AAAA).

End : Fin de la série pour cette station (JJ/MM/AAAA).

D.3.5 Création de la base de données des précipitations

La base de données des précipitations doit être générée à nouveau lors de l'ajout d'années de mesures. La génération de la base de données consiste à extraire les données des fichiers textes et à les combiner dans un fichier NetCDF.

Lors de ce traitement des données, des ajustements de Gumbel sont effectués de manière automatique afin de calculer les valeurs de précipitations correspondant à différents temps de retour.

L'interface pour la génération de la base de données des précipitations (D.19) est accessible par le menu Tools / Bluid predictand DB.

La première étape est le choix du type de base de données à générer. Les options sont les suivantes :

- *StationsDailyPrec* : séries journalières aux stations (option qui nous intéresse en opérationnel)
- *Stations6HourlyPrec* : séries 6h aux stations
- *Stations6HourlyOfDailyPrec* : séries journalières glissantes à 6h aux stations
- *RegionalDailyPrec* : séries journalières régionales

Le type de base de données choisi sera ensuite recherché dans le catalogue. C'est donc ce dernier qui détermine quel réseau et quelles stations intégrer dans la sélection. Le catalogue contient également les informations de positionnement de la station, ainsi que les périodes de mesure, comme il a été détaillé à la Section D.3.4. Finalement, les fichiers de données et leur structure sont également déterminés par ce même catalogue. Les fichiers seront cherchés dans le répertoire entré dans le premier champ (*Select the predictand data directory*). La structure définit la manière de lire les fichiers de données. Cette structure est décrite dans des fichiers, situés dans le dossier donné sous *Select the directory containing the file patterns description* (Plus de détails dans la Section suivante).

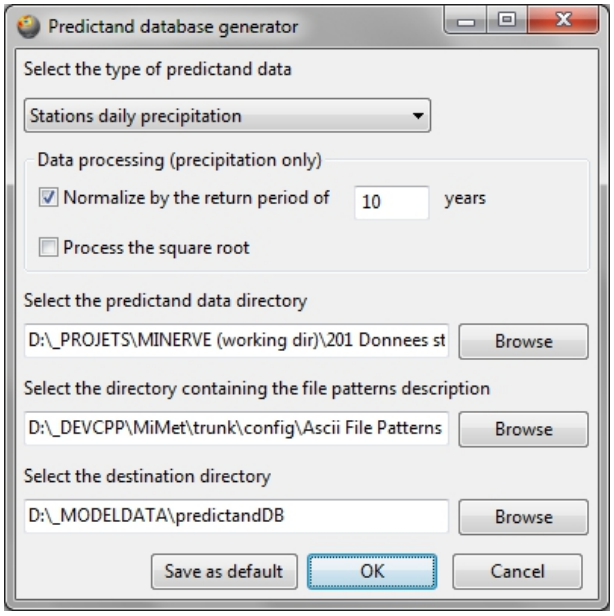


Figure D.19 – Interface du générateur de base de données des prédictands.

Après exécution, un fichier NetCDF contenant toutes les données nécessaires au logiciel est créé dans le répertoire choisi. Ce fichier comprend également les propriétés des stations et nous permet de se passer du catalogue des prédictands pour la suite des opérations.

D.3.5.1 Structure des fichiers de précipitations

Il a été choisi de ne pas forcer l'utilisateur à transformer ses données dans un format spécifique, mais de le laisser décrire la structure de ses fichiers. Ceci doit être effectué à l'aide de fichiers décrivant la structure de la série. Une restriction est toutefois imposée : un fichier de données ne doit contenir qu'une seule série temporelle (station unique).

Les fichiers peuvent être structurés dans deux modes courants :
– Délimités par des tabulations (*structtype = tabsdelimited*)
– A largeur de ligne constante (*structtype = constantwidth*)

Une option (*parsetime*) permet de lire les informations temporelles, ou de les ignorer. Lire ces informations permet un contrôle automatique de la bonne cohérence des dates entre ce que le logiciel croit lire et ce qu'il lit effectivement. Il est donc recommandé d'activer cette option (*parsetime = 1*).

Basic_daily

Ce type définit des fichiers structurés de manière très simple, soit avec les éléments de la date (année, mois, jour) et les données séparés par des tabulations (c.f. exemple ci-dessous). Les fichiers contiennent exactement 2 lignes d'en-tête.

```
Timeseries processed by Pascal Horton (Unil) for the MINERVE project.
reconstructed from station(s) : 8080 8010
1961  1  1  6.600000
1961  1  2  2.600000
1961  1  3  21.500000
1961  1  4  4.500000
1961  1  5  0.000000
1961  1  6  5.800000
1961  1  7  0.000000
1961  1  8  3.400000
1961  1  9  0.000000
1961  1  10 1.500000
```

La structure décrivant de tels fichiers de données est la suivante :

```
<pattern id="Basic_daily" name="Basic daily file structure with tabs">
   <structtype>tabsdelimited</structtype>
   <headerlines>2</headerlines>
   <parsetime>1</parsetime>
   <time>
      <block column="1">year</block>
      <block column="2">month</block>
      <block column="3">day</block>
   </time>
   <data>
      <block column="4">Precipitation</block>
   </data>
</pattern>
```

MeteoSwiss_Climap

Les fichiers Climap de MétéoSuisse (pour une seule station), à largeur de ligne fixe, sont structurés de la manière suivante :

```
   14:07:38   19.12.2010    Programm Climap    MeteoSchweiz
   Zeitangaben in UTC 0040 (UTC)  =  01:40 Uhr Winterzeit  =  02:40 Uhr ...
   Auswahlperiode: 01.01.1940 00:00  -  31.12.2009 23:50 UTC 32767 -> ...
   Anzahl Stationen  1
   257   Leukerbad               1400 m.?.M. 614530/ 136670
   Anzahl Parameter  1
   236  Niederschlag; Tagessumme 0540 - 0540 Folgetag  [mm]

   STA JAHR MO TG HH MM   236
   257 1940  1  1  0  0   0.0
   257 1940  1  2  0  0   1.4
   257 1940  1  3  0  0   0.0
   257 1940  1  4  0  0   0.0
   257 1940  1  5  0  0  14.5
   257 1940  1  6  0  0  47.2
   257 1940  1  7  0  0   0.0
   257 1940  1  8  0  0   0.0
   257 1940  1  9  0  0   0.0
   257 1940  1 10  0  0   0.0
```

Ceux-ci sont décrits par la structure suivante :

```
<pattern id="MeteoSwiss_Climap" name="MeteoSwiss pattern from Climap.net">
   <structtype>constantwidth</structtype>
   <headerlines>9</headerlines>
   <parsetime>1</parsetime>
   <time>
      <block charstart="7" charend="10">year</block>
      <block charstart="12" charend="13">month</block>
      <block charstart="15" charend="16">day</block>
      <block charstart="18" charend="19">hours</block>
      <block charstart="21" charend="22">minutes</block>
   </time>
   <data>
      <block charstart="24" charend="28">Precipitation</block>
   </data>
</pattern>
```

D.4 Fichiers de paramètres

Les fichiers de paramètres détaillent tous paramètres de la méthode. Ce sont des fichiers xml qui ont par exemple la structure générale suivante :

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<AtmoswingFile version="0.2">
   <ForecastSet>
      <General name="General">
         ...
      </General>
      <Process name="Analogs Dates">
```

```
        ...
      </Process>
      <Process name="Analogs Dates">
        ...
      </Process>
      <Process name="Analogs Values">
       <Options />
        <Data name="Predictand">
          <Params name="Database">
            <Predictand value="StationsDailyPrecipitation" />
          </Params>
        /Data>
      </Process>
   </ForecastSet>
</AtmoswingFile>
```

Le fichier contient en premier lieu un bloc de paramètres généraux :

```
      <General name="General">
        <Options />
        <Params name="LeadTime">
          <LeadTimeDays value="0,1,2,3,4,5" />
        </Params>
        <Params name="ArchivePeriod">
          <YearStart value="1961" />
          <YearEnd value="2008" />
        </Params>
        <Params name="Time Properties">
          <TimeStepHours value="24" />
        </Params>
        <Params name="Time Array Analogs">
          <TimeArrayMode value="DaysInterval" />
          <IntervalDays value="60" />
        </Params>
      </General>
```

Ces paramètres généraux sont les suivants :

LeadTime : Les échéances en jour à prévoir (0 pour aujourd'hui, 1 pour demain, ...). Les valeurs sont séparées par des virgules.

ArchivePeriod : L'année de début (*YearStart*) et de fin (*YearEnd*)

Time Properties : Le pas de temps utilisé dans la méthode.

Time Array Analogs : La série temporelle dans laquelle on recherche des analogues. L'option *TimeArrayMode* est à mettre en tant que *DaysInterval* pour une recherche dans un intervalle de jours autour de la date. L'option *IntervalDays* définit le nombre de jours de la recherche (p.ex. 60 signifie ±60, donc une période de 120 jours).

Suite à ce bloc général, nous pouvons ajouter une ou plusieurs étapes de recherche d'analogues, comme dans les 2 exemples ci-dessous :

```
<Process name="Analogs Dates">
   <Options />
   <Params name="Method Name">
      <MethodName value="Analogs" />
   </Params>
   <Params name="Analogs Number">
      <AnalogsNumber value="55,55,75,115,235,495" />
   </Params>
   <Data name="Predictor">
      <Options />
      <Params name="Data Realtime">
         <DatasetId value="GFS_F2" />
         <DataId value="hgt" />
      </Params>
      <Params name="Data Archive">
         <DatasetId value="NCEP_R1_subset" />
         <DataId value="hgt" />
      </Params>
      <Params name="Level">
         <Level value="500" />
      </Params>
      <Params name="Area">
         <GridType value="Regular" />
         <Umin value="5" />
         <Uptsnb value="6" />
         <Ustep value="2.5" />
         <Vmin value="40" />
         <Vptsnb value="5" />
         <Vstep value="2.5" />
      </Params>
      <Params name="Time frame">
         <DTimeHours value="24" />
      </Params>
      <Params name="Criteria">
         <Criteria value="S1" />
      </Params>
      <Params name="Weight">
         <Weight value="0.5" />
      </Params>
   </Data>
   <Data name="Predictor">
      <Options />
      <Params name="Data Realtime">
         <DatasetId value="GFS_F2" />
         <DataId value="hgt" />
      </Params>
      <Params name="Data Archive">
         <DatasetId value="NCEP_R1_subset" />
         <DataId value="hgt" />
      </Params>
      <Params name="Level">
         <Level value="1000" />
      </Params>
      <Params name="Area">
         <GridType value="Regular" />
         <Umin value="5" />
         <Uptsnb value="6" />
         <Ustep value="2.5" />
         <Vmin value="40" />
         <Vptsnb value="5" />
         <Vstep value="2.5" />
      </Params>
```

```
            <Params name="Time frame">
               <DTimeHours value="12" />
            </Params>
            <Params name="Criteria">
               <Criteria value="S1" />
            </Params>
            <Params name="Weight">
               <Weight value="0.5" />
            </Params>
         </Data>
      </Process>
```

Cet exemple illustre une implémentation en prévision d'une méthode ayant un premier niveau d'analogie sur la circulation atmosphérique (niveaux 500 et 1000 hPa), suivie par d'autres sous-échantillonnages qui ne sont pas détaillés. Le modèle va effectuer autant de niveaux d'analogie qu'il y a de blocs *Analogs Dates*, et il va utiliser autant de prédicteurs par niveau qu'il y a de blocs *Predictor* (selon la Figure 6.22). Ce type de fichier est le cœur de la méthode et décrit au modèle comment il doit l'implémenter. Le langage xml se prêtre bien à cette approche, puisqu'il permet de structurer des éléments de manière modulable.

Chaque implémentation de la méthode des analogues peut entrer dans ce schéma. Dans l'exemple précédent, les prédicteurs sont des variables simples, mais des variables combinées peuvent également être utilisées, à la manière de l'analogie sur l'humidité. Ceci implique l'appel d'une fonction de pré-traitement, par exemple de la manière suivante :

```
      <Process name="Analogs Dates">
         <Options />
         <Params name="Method Name">
            <MethodName value="Analogs" />
         </Params>
         <Params name="Analogs Number">
            <AnalogsNumber value="30,30,40,60,170,350" />
         </Params>
         <Data name="Predictor preprocessed">
            <Options />
            <Params name="Preprocessing">
               <Preprocess value="1" />
               <PreprocessMethod value="MergeCouplesAndMultiply" />
               <SubData>
                  <PreprocessRealtimeDatasetId value="GFS_F2" />
                  <PreprocessRealtimeDataId value="pwat" />
                  <PreprocessArchiveDatasetId value="NCEP_R1_subset" />
                  <PreprocessArchiveDataId value="pwat" />
                  <PreprocessLevel value="0" />
                  <PreprocessDTimeHours value="12" />
               </SubData>
               <SubData>
                  <PreprocessRealtimeDatasetId value="GFS_F2" />
                  <PreprocessRealtimeDataId value="pwat" />
                  <PreprocessArchiveDatasetId value="NCEP_R1_subset" />
                  <PreprocessArchiveDataId value="pwat" />
                  <PreprocessLevel value="0" />
                  <PreprocessDTimeHours value="24" />
               </SubData>
               <SubData>
                  <PreprocessRealtimeDatasetId value="GFS_F2" />
                  <PreprocessRealtimeDataId value="rhum" />
                  <PreprocessArchiveDatasetId value="NCEP_R1_subset" />
```

```
                <PreprocessArchiveDataId value="rhum" />
                <PreprocessLevel value="850" />
                <PreprocessDTimeHours value="12" />
             </SubData>
             <SubData>
                <PreprocessRealtimeDatasetId value="GFS_F2" />
                <PreprocessRealtimeDataId value="rhum" />
                <PreprocessArchiveDatasetId value="NCEP_R1_subset" />
                <PreprocessArchiveDataId value="rhum" />
                <PreprocessLevel value="850" />
                <PreprocessDTimeHours value="24" />
             </SubData>
          </Params>
          <Params name="Area">
             <GridType value="Regular" />
             <Umin value="7.5" />
             <Uptsnb value="2" />
             <Ustep value="2.5" />
             <Vmin value="45" />
             <Vptsnb value="2" />
             <Vstep value="2.5" />
          </Params>
          <Params name="Criteria">
             <Criteria value="RMSE" />
          </Params>
          <Params name="Weight">
             <Weight value="1" />
          </Params>
       </Data>
    </Process>
```

Différentes fonctions de pré-traitement sont implémentées, comme le calcul des flux d'humidité, des opérations de multiplication ou de pré-détermination des gradients.

Chacune de ces étapes est définie par un bloc *<Process name="Analogs Dates">*. Les paramètres caractérisant ces étapes sont les suivants :

Method Name : Ce champ n'accepte actuellement que l'option *Analogs*.

Analogs Number : Le nombre d'analogues par échéance. Le nombre d'arguments donnés doit être exactement celui du nombre d'échéances. Les valeurs sont séparées par des virgules.

Ensuite viennent les variables prédicteurs (*<Data name="Predictor">*). Le nombre de variables n'est pas limité. Chacune d'elles sera évaluée séparément et les différents critères moyennés. Les paramètres pour chacune de ces variables sont :

Data Realtime : Le choix des données prédicteurs résultant d'un modèle global et utilisées pour les jours cibles. Les options sont le choix du jeu de données (*DatasetId*) et de la variable (*DataId*).

Data Archive : Le choix des archives de prédicteurs utilisées pour les jours candidats. Les options sont le choix du jeu de données (*DatasetId*) et de la variable (*DataId*).

Level : Le niveau atmosphérique (hPa) auquel considérer la variable

Area : La fenêtre spatiale sur laquelle comparer les données. Elle est définie par le type de grille (*GridType*) qui est en général régulière (*Regular*), les longitudes et latitudes

minimales (*Umin*, *Vmin*), la taille en nombre de points sur les deux axes (*Uptsnb*, *Vptsnb*), ainsi que la taille des mailles de la grille (*Ustep*, *Vstep*).

Time frame : L'heure de la journée (*DTimeHours*) à laquelle on compare les prédicteurs.

Criteria : Le critère de comparaison

Weight : Offre la possibilité de pondérer la moyenne entre les variables.

Lorsqu'une opération doit être effectuée sur les variables originales, ou que celles-ci doivent être combinées, ce bloc *Data* peut prendre une autre forme (*<Data name="Predictor preprocessed">*) et des opérations seront donc effectuées avant la comparaison. Un nouveau bloc (*Preprocessing*) est introduit avec les paramètres suivants :

PreprocessMethod : L'opération à effectuer en preprocessing.

SubData : Les variables à assembler ou traiter sont décrites dans ces blocs. Elles contiennent les définitions suivantes, qui ne sont plus situées comme précédemment.

PreprocessRealtimeDatasetId : Le jeu de données des prédicteurs téléchargées.

PreprocessRealtimeDataId : La variable prédicteur cible.

PreprocessArchiveDatasetId : Le jeu de données des prédicteurs en archive.

PreprocessArchiveDataId : La variable prédicteur candidate

PreprocessLevel : Le niveau atmosphérique (hPa) des variables

PreprocessDTimeHours : L'heure de la journée à laquelle considérer la variable.

D.5 Logiciel de calcul (Forecaster)

Le logiciel de calcul a l'interface illustrée dans la Figure D.20. Cet outil permet de faire les actions suivantes :

- Calculer la prévision actuelle ou pour une date donnée
- Définir la liste des modèles à effectuer par défaut (également pour le mode en lignes de commandes)
- Générer la base de données des précipitations

La barre d'outils permet les actions suivantes :

Exécuter la prévision pour la date et l'heure choisie.

Ouvrir l'interface pour la génération de la base de données des prédictands.

Ouvrir l'interface de définition des préférences.

Ouvrir le logiciel de visualisation.

Le calcul de prévision en temps réel peut être effectué par un ordinateur standard, sans ressources particulières. La prévision peut être exécutée à la demande par l'interface graphique ou en lignes de commandes, ce qui permet de l'automatiser sur un serveur. Les deux aspects sont explicités ci-dessous.

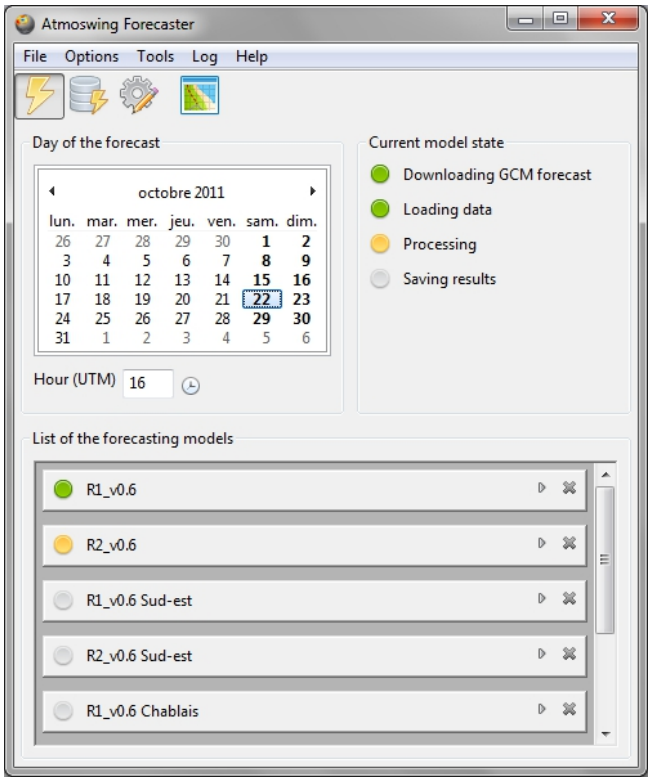


Figure D.20 – Interface graphique du logiciel de prévision.

D.5.1 Calculer une prévision à l'aide de l'interface graphique

Pour effectuer une prévision, il faut :

1. Choisir la date dans le calendrier et l'heure au-dessous. Lors du démarrage du logiciel, la date et l'heure sont les valeurs actuelles. L'icône permet par la suite d'actualiser aux valeurs courantes.
2. Exécuter la prévision en cliquant sur l'icône dans la barre d'outil.

Les modèles exécutés sont ceux listés sous *list of the forecasting models*. L'édition de cette liste est décrite dans la Section suivante. Les modèles sont exécutés les uns après les autres. Une icône signifie que le modèle est en calcul, que les calculs ont été exécutés avec succès et que la prévision a échoué pour ce modèle.

D.5.1.1 Définir la liste des modèles

La liste des modèles peut être complétée ou des modèles peuvent être supprimés. Un modèle est une paramétrisation spécifique optimale pour une échéance et une région. Il est représenté dans l'interface graphique par un choix de fichiers de paramètres et de base de données des prédictands. L'icône permet d'ouvrir le panneau du modèle et d'en éditer les propriétés par l'intermédiaire des différents champs présents (Figure D.21).

Un modèle est définit par les éléments suivants. Attention, aucun champ ne peut contenir d'accent (crée des problèmes dans le fichier xml) !

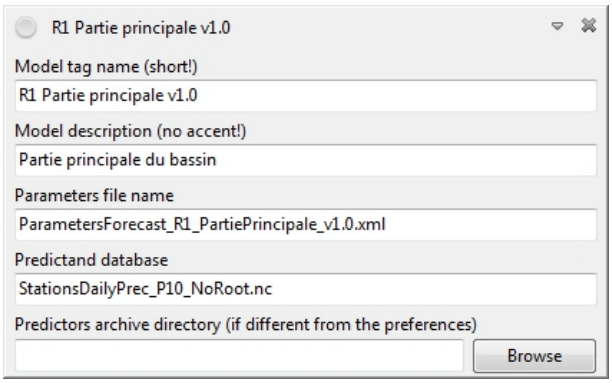


Figure D.21 – Edition d'un modèle.

- Un tag : un nom bref et unique utilisé par le logiciel de visualisation.
- Une description : permet à l'utilisateur de se souvenir de certaines propriétés du modèle.
- Nom du fichier de paramètres : fichier contenant tous les paramètres de la méthode (Section D.4) situé dans le répertoire indiqué dans les préférences.
- Nom du fichier de la base de données des prédictands : il est possible de changer de base de données des précipitations d'un modèle à l'autre. Le fichier doit être situé dans le répertoire indiqué dans les préférences.
- Répertoire des archives des prédicteurs : indiquer le chemin des archives des prédicteurs si celui-ci varie de ce qui a été entré dans les préférences.

Un modèle peut être supprimé par l'icône ✖. Il est également possible d'ajouter des modèles à l'aide de l'icône ✚ situé sous la liste.

Lorsque la liste des modèles a été modifiée et que nous désirons conserver celle-ci par défaut, il est nécessaire de l'enregistrer, sans quoi la liste sera réinitialisée par un redémarrage du logiciel. Pour ce faire, il faut utiliser l'entrée de menu *File / Save models list as default*. Cette action écrase la liste précédente de manière irréversible.

D.5.2 Calculer une prévision de manière automatique sur un serveur

Atmoswing peut être utilisé sans interface, en lignes de commandes. Ceci permet donc d'automatiser les prévisions sur un serveur. Les options sont les suivantes :

-h ou –**help** : Affiche l'aide des options de la ligne de commande

-v ou –**version** : Affiche la version du logiciel

-s ou –**silent** : Mode silencieux (le journal des logs est uniquement écrit dans le fichier temporaire). Equivalent à "-lt file".

-ll x ou –**loglevel=x** : Définit un niveau x de rapport des messages dans le journal des logs (0 = minumum, 1 = seulement les erreurs, 2 = erreurs et avertissements, 3 = tous les messages)

-lt x ou –**logtarget=x** : Définit la cible des logs (file = uniquement dans le fichier temporaire, screen = uniquement dans l'interpréteur de commande Windows ou le shell Linux, both = simultanément dans les deux cibles (par défaut))

-fn ou –**forecastnow** : Exécute la prévision actuelle

-fp x ou –**forecastpast=x** : Exécute la prévision pour les x derniers jours

-fd YYYYMMDDHH ou –**forecastdate=YYYYMMDDHH** : Exécute la prévision pour la date donnée

D.5.2.1 Automatiser les calculs de prévision sur un serveur Windows

Une tâche planifiée peut être ajoutée par l'interface à cette fin (Figure D.22).

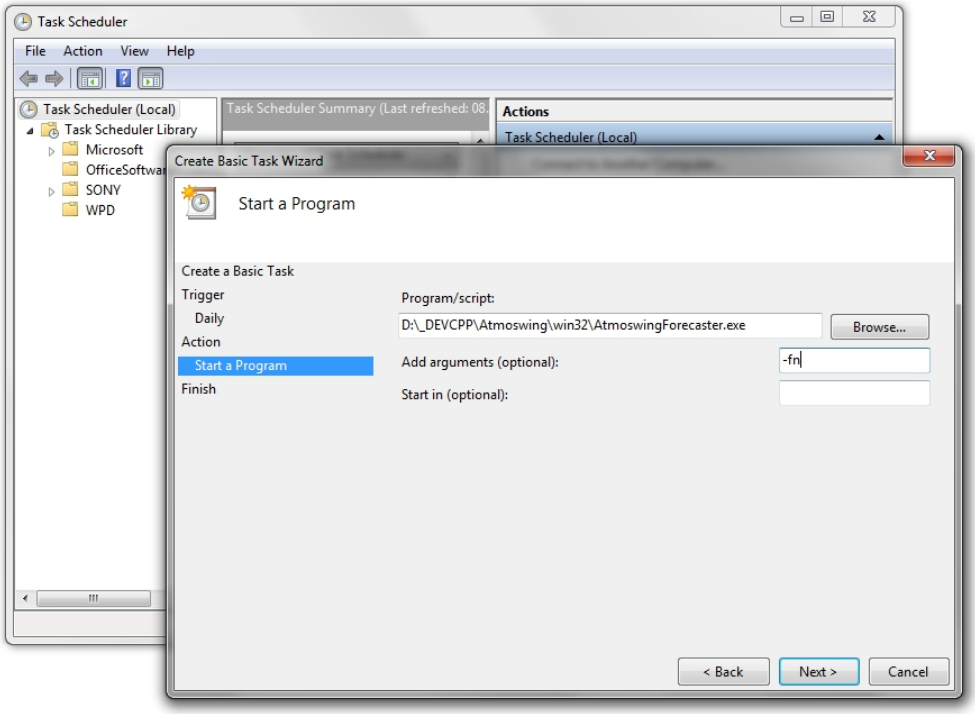


Figure D.22 – Ajout d'une tâche planifiée sous Windows 7.

D.5.2.2 Automatiser les calculs de prévision sur un serveur Linux

Il est possible de créer une tâche automatique (cron) par l'intermédiaire de crontab :

```
crontab -e
```

En y ajoutant la ligne suivante, qui va tenter une prévision 2 fois par heure, soit aux 25 et 55. Si la prévision a déjà été calculée précédemment, l'opération est annulée. Il n'y a donc pas d'utilisation inutile des ressources du serveur.

```
25,55 * * * * /home/phorton/_ATMOSWING/AtmoswingForecaster -fn
```

D.6 Logiciel de visualisation (Viewer)

Le logiciel de visualisation a l'interface illustrée dans la Figure D.23. Cet outil permet de visualiser les fichiers produits par le logiciel de calcul.

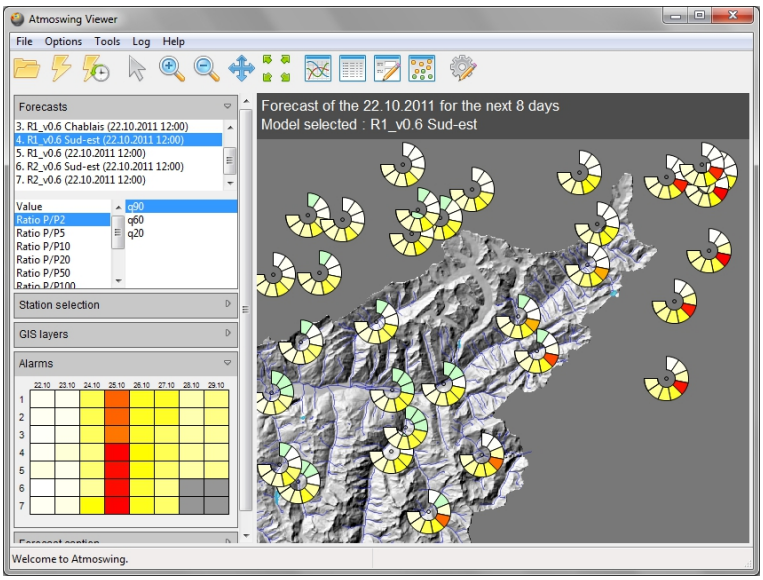


Figure D.23 – Interface graphique du logiciel de visualisation.

La barre d'outils permet les actions suivantes :

- Ouvrir un fichier de prévision
- Exécuter la prévision actuelle
- Exécuter les prévisions des quelques derniers jours
- Sélection d'une station sur la carte
- Zoom avant sur la carte
- Zoom arrière sur la carte
- Déplacer la carte
- Ajuster la carte à tous les éléments
- Ouvrir les graphiques de distributions
- Ouvrir la liste des analogues

Ouvrir le logiciel de calcul

Ouvrir la carte de détail des échéances

Ouvrir l'interface de définition des préférences

L'exploration des résultats est faite en premier lieu par l'interface principale, sur une carte. Différents graphiques sont ensuite disponibles permettant de visualiser davantage de détails.

Il est possible d'ouvrir plusieurs résultats de modèles, mais ceux-ci doivent avoir la même date de base. En cas de chargement de prévisions correspondant à une autre date (ou heure) que les fichiers déjà ouverts, ces derniers seront fermés.

D.6.1 Visualisation sur cartes

La première visualisation proposée à l'utilisateur lorsque celui-ci ouvre un fichier est une synthèse des prochaines échéances (Figure D.24). A l'emplacement de chaque station une bande circulaire est affichée avec un casier par échéance. Les couleurs attribuées à chaque casier sont proportionnelles à la valeur prévue pour l'échéance en question. Cette représentation permet un rapide aperçu des jours à venir et permet d'identifier facilement un éventuel événement.

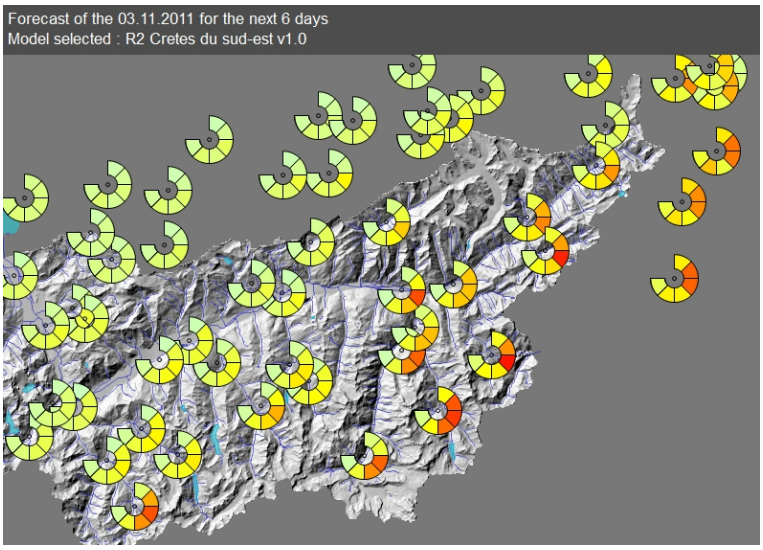


Figure D.24 – Affichage de toutes les échéances sur une même carte.

Une visualisation alternative de cette carte permet d'afficher les prévisions par échéance (Figure D.25). Cette représentation aide à mieux distinguer la spatialisation des précipitations, ainsi qu'à accéder rapidement aux valeurs de certains quantiles. Le choix de l'échéance est effectué à l'aide du curseur au-dessus de la carte.

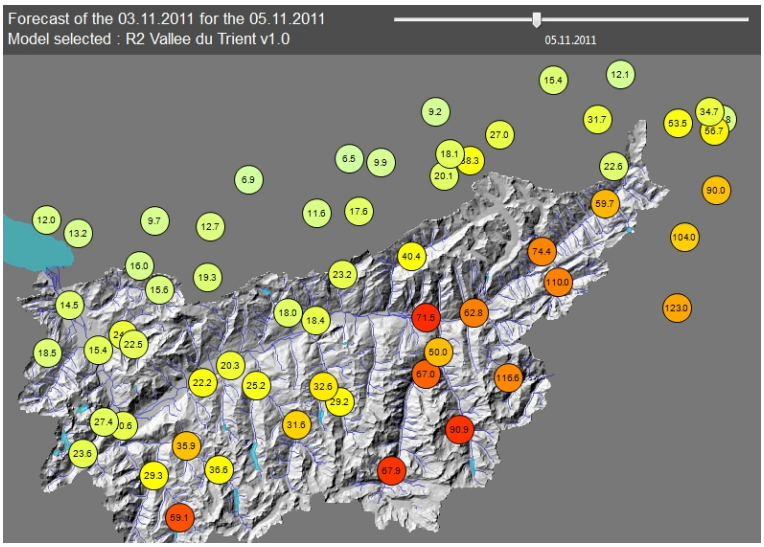


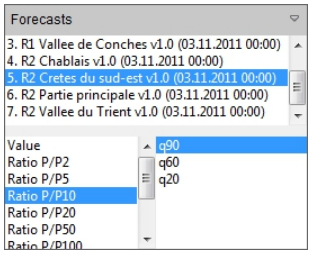
Figure D.25 – Affichage par échéance.

La navigation dans la carte est effectuée à l'aide des 5 outils suivants :

- Sélection d'une station sur la carte
- Zoom avant sur la carte
- Zoom arrière sur la carte
- Déplacer la carte
- Ajuster la carte à tous les éléments

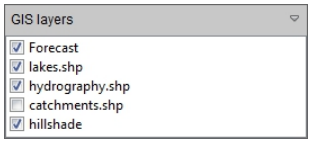
D.6.1.1 Barre latérale

A gauche de la carte se trouve une barre latérale permettant de contrôler l'affichage de la carte.

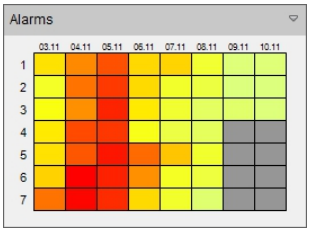


Choix du modèle et de l'affichage. Tous les modèles ouverts sont affichés dans la boîte supérieure. La boîte inférieure gauche change l'échelle des couleurs, et celle à droite est le choix du quantile à visualiser (20 %, 60 % ou 90 %).

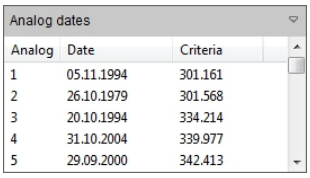
Choix de la station pour en afficher la série temporelle. Alternative à la sélection sur la carte.



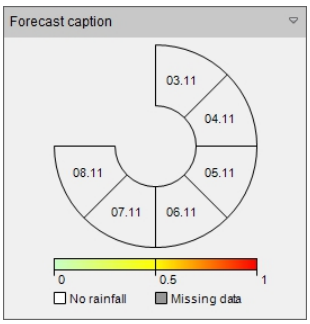
Choix de l'affichage des couches SIG ouvertes.



Situations potentiellement critiques. Les différentes lignes de la grille correspondent aux différents modèles ouverts et les colonnes aux échéances disponibles. Les couleurs affichées correspondent au ratio (valeur de pluie normalisée par la pluie d'un temps de retour choisi) le plus élevé de toutes les stations.



Liste des dates analogues et de la valeur du critère utilisé (p.ex. S1 ou RMSE).



Légende de la carte. Affichage des dates correspondant aux différents casiers des bandes circulaires, ainsi que de la barre des couleurs.

D.6.2 Visualisation de la série temporelle pour une station

Lorsqu'une station est sélectionnée (sur la carte ou dans la liste déroulante de la barre latérale), le graphique de la série temporelle prévue s'affiche (Figure D.26). Ce graphique correspond au modèle sélectionné au moment du clic sur la station. Les options d'affichages (dans le panneau supérieur à gauche) sont les suivantes :

- Les 3 quantiles classiques (20 %, 60 %, 90 %) sous forme de lignes bleues épaisses.
- Tous les dixièmes de quantiles en tant que surfaces grisées
- Toutes les analogues sous forme de petites croix grises

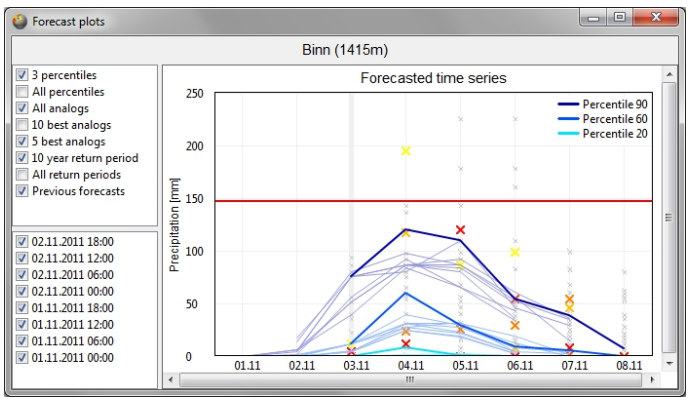


Figure D.26 – Graphique de l'évolution temporelle pour une station.

– Les 10 meilleures analogues en tant que croix jaunes - oranges - rouges. Les couleurs sont proportionnelles aux rangs des analogues. Le rouge est pour la meilleure analogue et le jaune pour la 10ème.
– Les 5 meilleures analogues selon le même principe.
– La valeur du temps de retour de 10 ans sous la forme d'un trait rouge.
– Les valeurs de différents temps de retour.
– Les traces des anciennes prévisions.

Le panneau inférieur gauche est la liste des anciennes prévisions. Celles-ci sont automatiquement importées avant l'affichage du graphique.

D.6.3 Visualisation des distributions

Les distributions des précipitations sont accessibles par le bouton de la barre d'outil. Celles-ci permettent de comparer la distribution de toutes les analogues et celle des 5 ou 10 meilleures (Figure D.27). Les options d'affichage sont semblables à celles des séries temporelles aux stations (section précédente). Le modèle, la station et l'échéance doivent être sélectionnés dans la partie supérieure de la fenêtre.

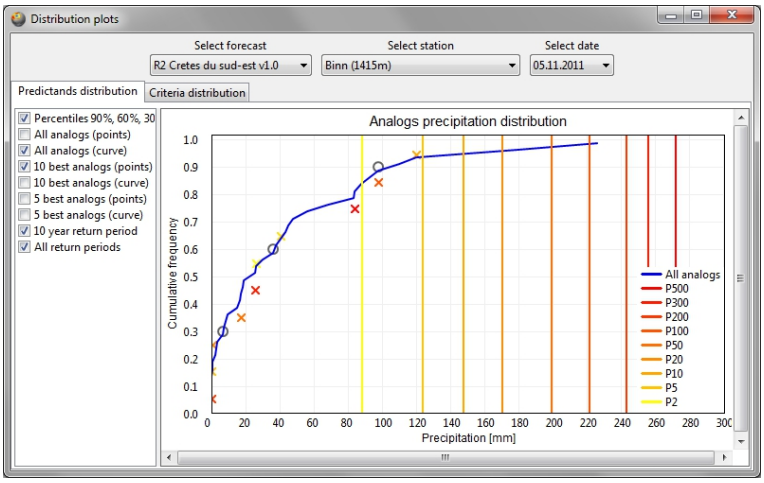


Figure D.27 – Graphique de la distribution des valeurs de précipitations des journées analogues.

La distribution du critère d'analogie est également disponible dans la même fenêtre par l'onglet situé au-dessus du graphique (Figure D.28). Cette distribution permet d'identifier d'éventuelles discontinuités dans les valeurs des critères et donc de porter plus de crédits aux meilleurs analogues.

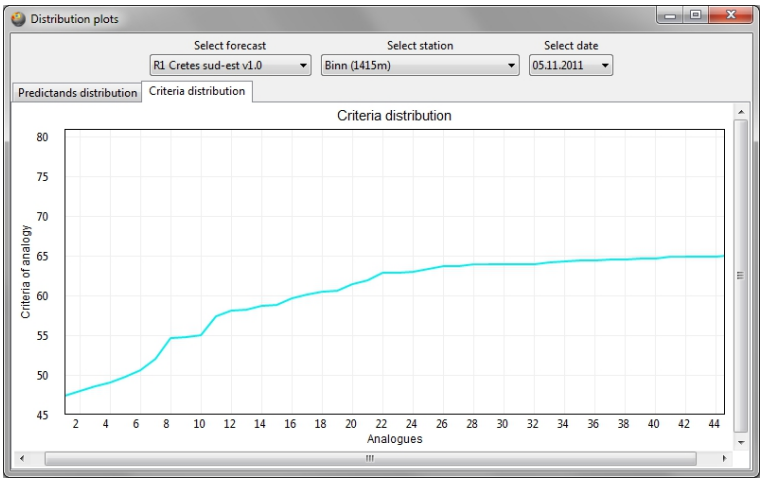
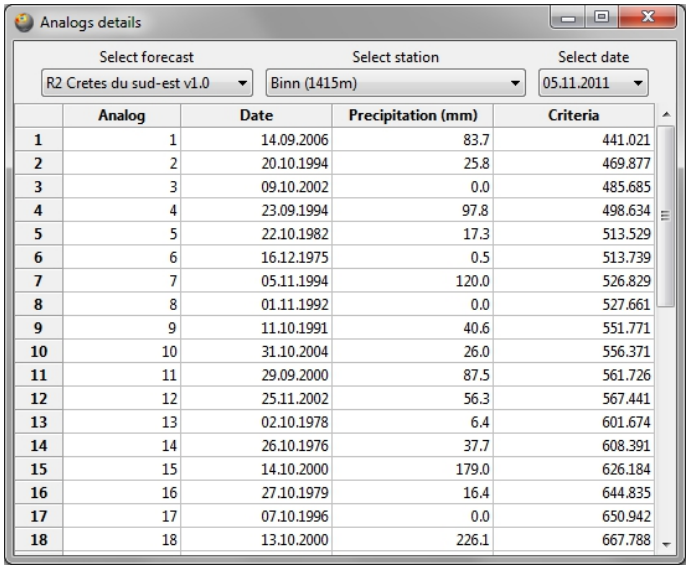


Figure D.28 – Graphique de la distribution du critère d'analogie des journées analogues.

D.6.4 Visualisation de la liste des analogues

Les détails des dates analogues et de leurs critères et précipitations associées sont disponibles par le bouton de la barre d'outil. Cet outil (Figure D.29) permet d'analyser les dates analogues et les précipitations ayant été mesurées. Le modèle, la station et l'échéance doivent être sélectionnés dans la partie supérieure de la fenêtre. Il est possible de trier la liste selon chacune des colonnes en cliquant sur celle-ci. Le premier clic classe les valeurs dans l'ordre croissant et le second dans l'ordre décroissant.



	Analog	Date	Precipitation (mm)	Criteria
1	1	14.09.2006	83.7	441.021
2	2	20.10.1994	25.8	469.877
3	3	09.10.2002	0.0	485.685
4	4	23.09.1994	97.8	498.634
5	5	22.10.1982	17.3	513.529
6	6	16.12.1975	0.5	513.739
7	7	05.11.1994	120.0	526.829
8	8	01.11.1992	0.0	527.661
9	9	11.10.1991	40.6	551.771
10	10	31.10.2004	26.0	556.371
11	11	29.09.2000	87.5	561.726
12	12	25.11.2002	56.3	567.441
13	13	02.10.1978	6.4	601.674
14	14	26.10.1976	37.7	608.391
15	15	14.10.2000	179.0	626.184
16	16	27.10.1979	16.4	644.835
17	17	07.10.1996	0.0	650.942
18	18	13.10.2000	226.1	667.788

Figure D.29 – Liste des journées analogues et de leurs précipitations associées.

Annexe E

Établissement de recommandations de paramétrisation des AGs

Ces pages présentent les détails de la démarche de comparaison des opérateurs et paramètres des AGs. Elles se réfèrent à la section 9.5.6.

E.1 Démarche de comparaison des opérateurs

Une méthode parfois utilisée pour l'analyse comparative de différentes paramétrisations des AGs est le design factoriel (*factorial design*, voir p.ex. Costa et al., 2005, 2007; Mariano et al., 2010). Cette approche permet d'identifier les paramètres de la technique d'optimisation responsables des plus grands gains. Toutefois, cette approche est conçue pour comparer deux variantes (opérateurs ou paramètres), et ne se prête donc pas bien, sous sa forme originale, à notre application en raison du nombre trop important d'options pour chaque opérateur. Nous allons toutefois emprunter certains concepts de cette méthode pour caractériser l'effet respectif des opérateurs. Ainsi, dans les figures suivantes, nous représentons la contribution de l'opérateur évalué, lorsqu'il est le seul élément variable, et que tous les autres opérateurs et options sont fixes. Nous évaluons le pourcentage d'amélioration/perte d'un critère de performance par rapport à la moyenne de ce critère sur toutes les optimisations comparables. Par exemple, pour évaluer la performance de l'opérateur de reproduction *croisement uniforme*, nous comparons certains indicateurs entre cet opérateur et la moyenne des opérateurs de croisement, tout en conservant la même taille de population, les mêmes opérateurs de mutation, de sélection naturelle, et de sélection des couples.

Au vu du nombre important d'opérateurs et d'options de la méthode, il n'est pas possible de calculer systématiquement chaque combinaison. Nous allons donc procéder en premier lieu à la comparaison des opérateurs d'accouplement, soit de sélection des couples et de reproduction. Chaque combinaison de ces opérateurs sera évaluée. Puis, les opérateurs de mutation seront comparés, et finalement, quelques autres options de la méthode seront testées. Lors de chaque comparaison exhaustive d'un type d'opérateur, deux variantes très différentes des autres opérateurs sont considérées afin de tenir compte d'effets indirects.

Pour évaluer une combinaison d'opérateurs/options, nous effectuons 10 optimisations avec des valeurs de paramètres initiaux aléatoires différents. Les optimisations sont arrêtées lorsque le meilleur individu n'a pas pu être amélioré pendant 20 générations. Les performances des opérateurs sont caractérisées par 4 indicateurs :

- **score final moyen** : nous effectuons la moyenne des scores des jeux de paramètres résultant des 10 optimisations.
- **convergence** : si de nombreuses optimisations convergent vers un optimum, que celui-ci n'est pas dépassé, et que la valeur du score est supérieure aux résultats des autres méthodes de calibration, nous faisons l'hypothèse que le jeu de paramètres correspondant peut être considéré comme l'optimum global. Celui-ci ne peut en effet pas être identifié autrement, une exploration intégrale de l'espace des paramètres n'étant pas réalisable. Nous nous intéressons donc au nombre d'optimisations ayant convergé vers cet optimum.

– **nombre de générations** : nous désirons que l'optimisation converge vers l'optimum global, mais nous désirons également qu'elle le fasse de manière efficace. Un nombre inférieur de générations est donc préférable. Nous soustrayons 19 générations aux valeurs observées, afin d'éliminer la part du contrôle de convergence, et donc de considérer la dernière génération contenant une amélioration (notre critère d'arrêt étant une non-évolution du meilleur individu sur 20 générations).

– **nombre d'évaluations de la fonction objective** : il est parfois plus pertinent de comparer le nombre d'évaluations de la fonction objective (prévision de la méthode des analogues évaluée à l'aide du score CRPSS) que le nombre de générations. En effet, lorsque la taille de la population augmente, le nombre de prévisions est plus important, et le temps nécessaire croît. De plus, certains individus ne sont pas réévalués s'ils n'ont pas été modifiés. Le nombre d'évaluations, ou de prévisions, est donc plus représentatif de la performance de la méthode d'optimisation.

Cette étude requiert des moyens informatiques plus importants qu'un ordinateur personnel. Les calculs ont donc été effectués sur un cluster de l'Université de Lausanne (*Intel Xeon based HPC cluster* à 96 processeurs fonctionnant sous la distribution Linux *RedHat*).

E.2 Opérateurs d'accouplement

Nous nous intéressons en premier lieu aux opérateurs d'accouplement, tout en considérant des variantes des autres opérateurs/options.

Table E.1 – Opérateurs de sélection des couples évalués.

	Opérateur	**Paramètres**
A	Répartition par rang	
B	Répartition aléatoire	
C	Roulette pondérée par le rang	
D	Roulette pondérée par le score	
E	Sélection par tournoi	3 candidats
F	Sélection par tournoi	4 candidats

Nous évaluons 6 options des opérateurs de sélection (Table E.1) et 21 options des opérateurs de croisement chromosomique (Table E.2). De plus, afin de tenir compte de l'effet potentiel d'autres options ou opérateurs, nous considérons les variantes suivantes :

– Taille de la population : 50 et 200 individus.
– Sélection naturelle : ratio élitisme et tournois (avec une probabilité de 0.9)
– Mutation : uniforme constante (probabilité de 0.2) et non uniforme (probabilité de 0.2, $G_{max} = 60$, $\omega = 0.2$)

Table E.2 – Opérateurs de croisement chromosomique évalués.

	Opérateur	**Paramètres**
1	Croisement en un point	
2	Croisement en deux points	
3	Croisement en plusieurs points	3 points
4	Croisement en plusieurs points	5 points
5	Croisement uniforme	
6	Mélange borné	2 points, β non partagé
7	Mélange borné	4 points, β non partagé
8	Mélange borné	2 points, β partagé
9	Mélange borné	4 points, β partagé
10	Croisement linéaire	2 points
11	Croisement linéaire	4 points
12	Croisement heuristique	2 points, β non partagé
13	Croisement heuristique	4 points, β non partagé
14	Croisement heuristique	2 points, β partagé
15	Croisement heuristique	4 points, β partagé
16	Croisement de type binaire	2 points, β non partagé
17	Croisement de type binaire	4 points, β non partagé
18	Croisement de type binaire	2 points, β partagé
19	Croisement de type binaire	4 points, β partagé
20	Interpolation linéaire	
21	Interpolation libre	

Il en résulte 1'008 combinaisons pour lesquelles nous devons effectuer 10 optimisations, ce qui fait donc au total 10'080 optimisations. Le temps nécessaire à cette évaluation a été d'un peu plus de 90'000 h/cpu (19'733 h pour la première moitié avec 50 individus et 70'310 h pour la seconde avec 200 individus).

Il apparaît tout d'abord que la taille de la population a une influence sur les scores résultant et sur la convergence (Figure E.1). Une population plus importante améliore donc l'optimisation, ce qui n'est pas surprenant. Par contre, le nombre de prévisions évaluées augmente également, et le temps nécessaire aux optimisations a été plus de 3.5 fois plus important pour la population de 200 individus que pour celle de 50 individus. Il semble donc logique que plus la population est grande, meilleure sera la convergence (certainement jusqu'à un certain plafond dépendant du problème optimisé), mais au dépens d'un temps de calculs plus important. Il convient en conséquence de trouver un équilibre, et celui-ci ne peut pas être formalisé de manière rigoureuse, car nous ne pouvons pas directement comparer la convergence et le nombre d'évaluations. Au vu des résultats déjà intéressants obtenus avec 50 individus, il peut être pertinent d'effectuer davantage d'optimisations avec une population réduite plutôt que de considérer une très grande population. Ces observations rejoignent les analyses effectuées par Haupt et Haupt (2004).

La comparaison des opérateurs de mutation montre une très claire préférence de la mutation non uniforme par rapport à la mutation uniforme constante (Figure E.2). En analysant

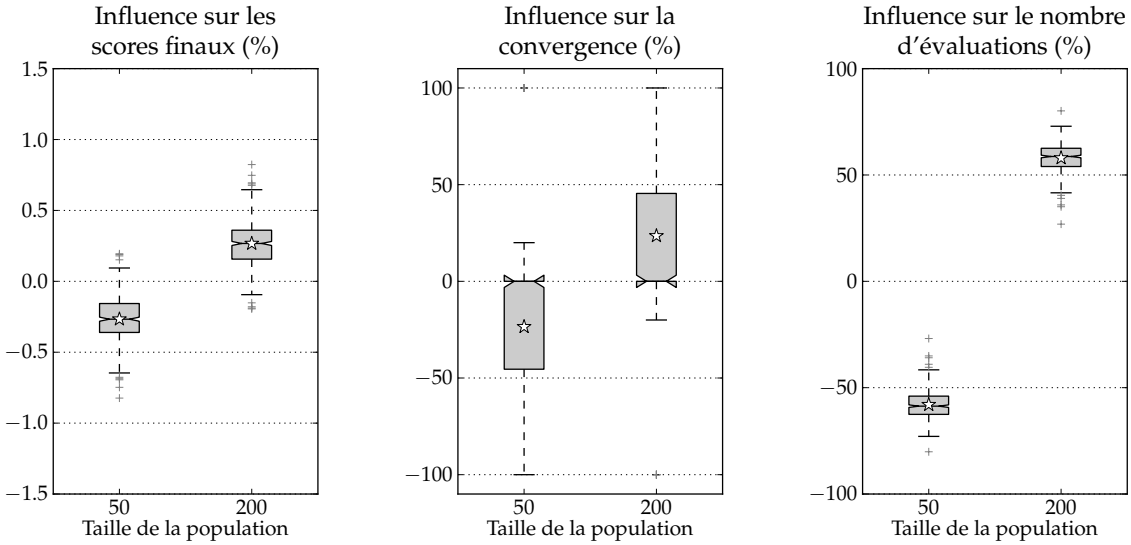


Figure E.1 – Influence de deux tailles de population (50 et 200) sur les performances de l'optimisation. L'étoile représente la moyenne.

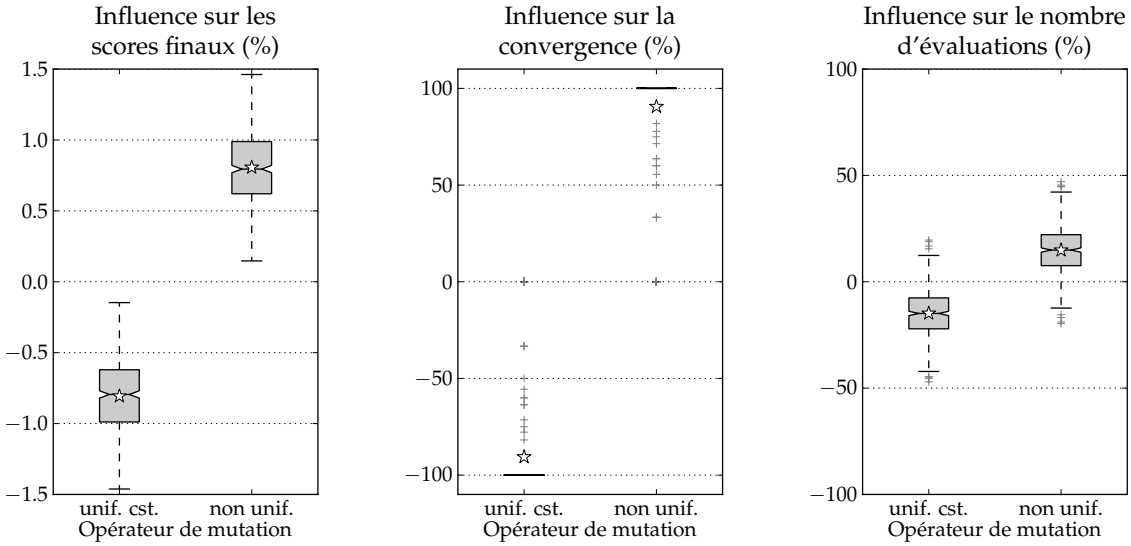


Figure E.2 – Influence de deux opérateurs de mutation (mutation uniforme constante et mutation non uniforme) sur les performances de l'optimisation. Mêmes conventions que Figure E.1.

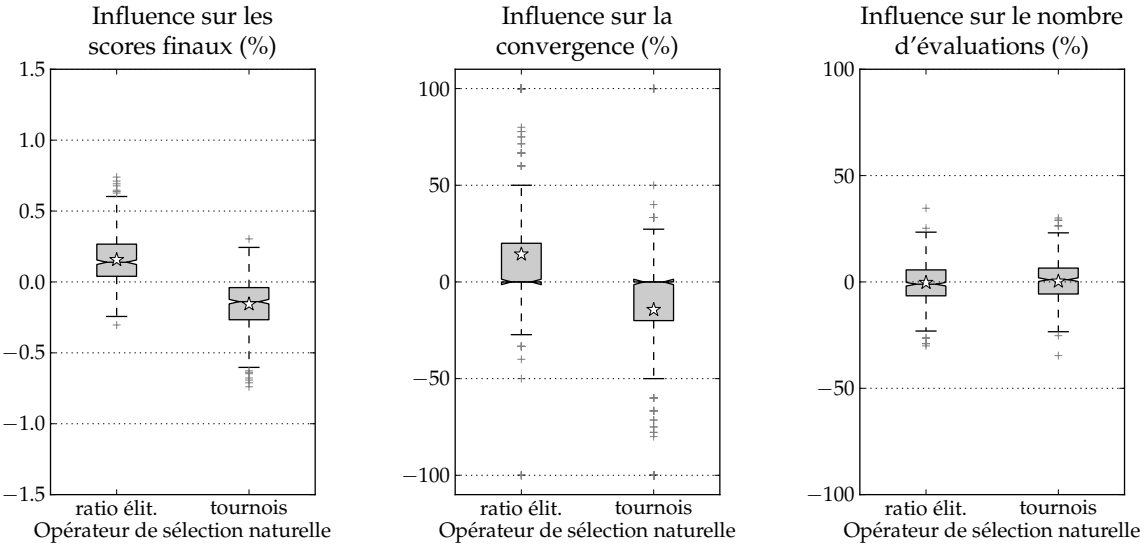


Figure E.3 – Influence de deux opérateurs de sélection naturelle (ratio élitisme et tournois) sur les performances de l'optimisation. Mêmes conventions que Figure E.1.

les résultats détaillés (Annexe G), nous constatons que la mutation uniforme constante est plutôt mauvaise et ne converge quasiment pas. Ceci se voit également sur la Figure E.2. Les scores finaux sont également significativement différents, et ceci quels que soient les autres opérateurs ou options. Si le nombre d'évaluations est un peu moins important pour la mutation uniforme constante, c'est qu'elle peine à améliorer les optimisations et que les calculs sont arrêtés, faute d'évolution. Nous constatons que l'opérateur de mutation peut avoir une grande influence sur l'évolution de la population, qui dépasse largement son rôle souvent considéré comme un "opérateur d'arrière-plan".

L'analyse de la sélection naturelle (Figure E.3) présente une petite préférence pour le ratio-élitisme par rapport à la sélection par tournois, mais celle-ci n'est pas vraiment significative. Par ailleurs, le nombre d'évaluations est semblable. Cet opérateur, ou du moins les deux versions implémentées ne semblent pas influencer significativement les performances des optimisations.

Finalement, nous pouvons analyser les contributions des opérateurs de sélection des couples et de reproduction. Au vu des très faibles performances de la mutation uniforme constante, nous ne retiendrons que les résultats obtenus avec l'opérateur de mutation non uniforme. Les tendances ne changent pas par rapport aux statistiques sur l'ensemble des résultats, mais les influences sont davantage visibles, car moins diluées par une moitié de résultats à qualité médiocre. Ce choix est visible principalement sur les résultats de la convergence, soit le nombre d'optimisations ayant convergé vers l'optimum global supposé, qui avait alors un nombre important de zéros.

Les performances des opérateurs de sélection des couples sont relativement proches, autant en termes de score que de nombre d'évaluations (Figure E.4). La convergence présente

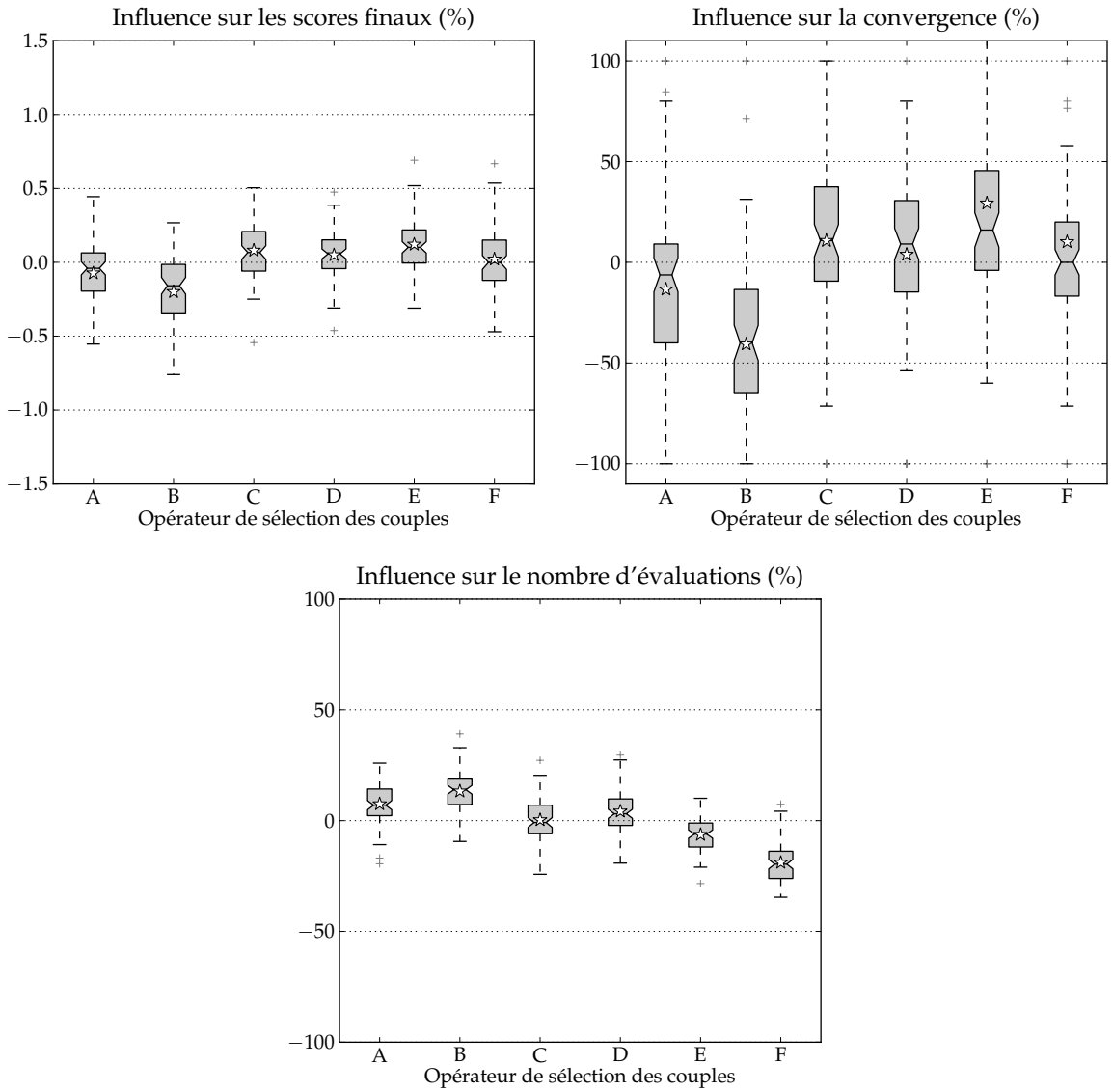


Figure E.4 – Influence des opérateurs de sélection des couples sur les performances de l'optimisation. Mêmes conventions que Figure E.1.

des tendances identiques à celles des scores moyens. Globalement, nous observons que la répartition aléatoire est le moins bon opérateur et que la sélection par tournois avec 3 candidats est légèrement supérieure aux autres. L'influence sur le nombre d'évaluations est intéressante, puisque nous observons que les opérateurs fournissant les moins bons scores sont également ceux qui nécessitent le nombre d'évaluations le plus important. Ils ne présentent donc aucun intérêt.

Cette analyse nous incite donc à rejeter la répartition par rang et la répartition aléatoire, et de considérer les sélections par roulette pondérée et par tournois, ces derniers étant sensiblement plus performants en termes de convergence et de nombre d'évaluations nécessaires.

L'analyse des opérateurs de croisement révèlent quelques options légèrement supérieures à l'ensemble, quelques mauvaises, et beaucoup de moyennes. Au rang des mauvais opérateurs, nous trouvons tout d'abord le croisement heuristique, qui est également plus exigeant

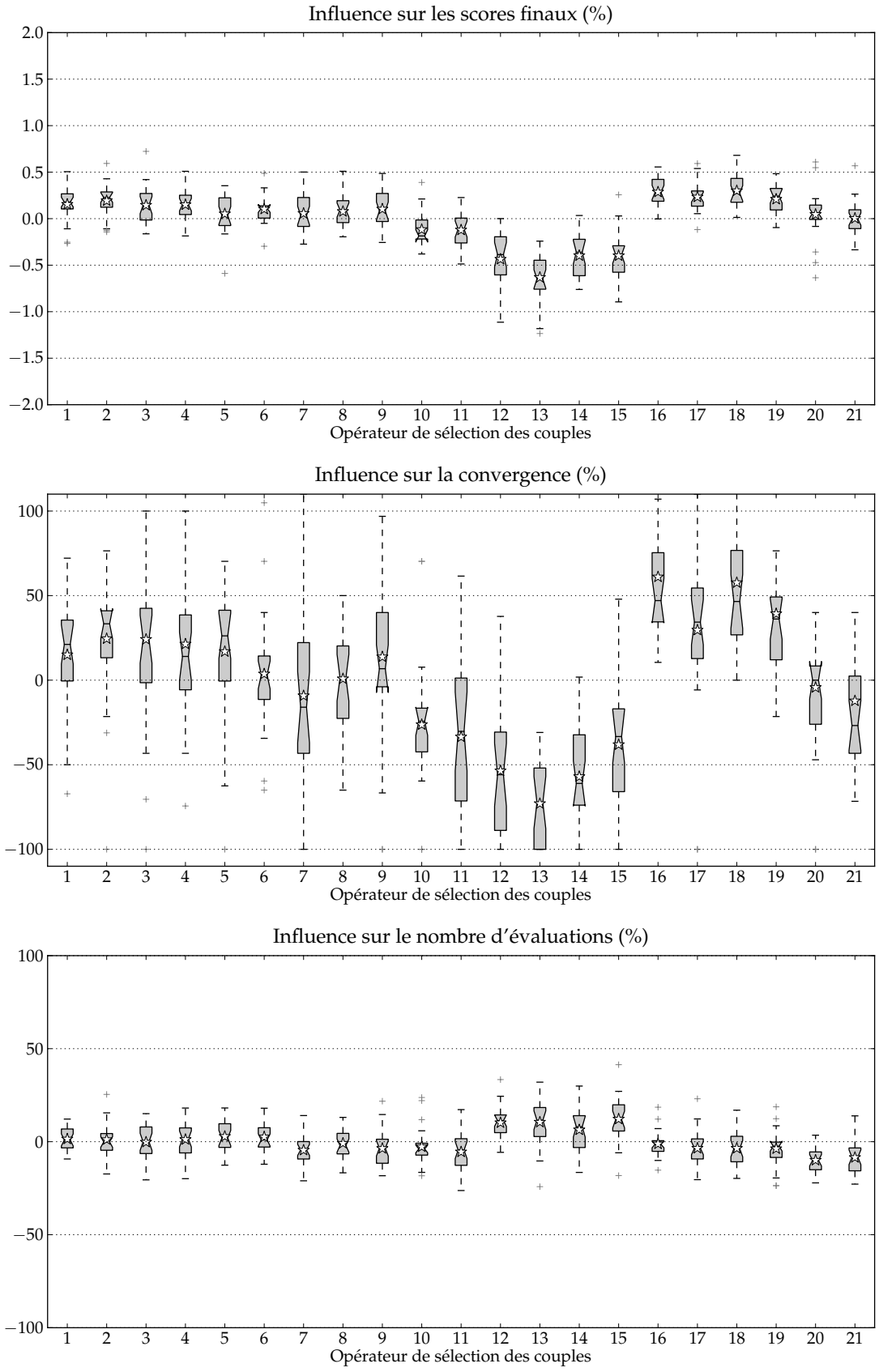


Figure E.5 – Influence des opérateurs de croisement sur les performances de l'optimisation. Mêmes conventions que Figure E.1.

en nombre d'évaluations, ainsi que le croisement linéaire. Les croisements de type binaire (surtout avec 2 points de croisement, peu importe si β est partagé ou non) sont sensiblement meilleurs que les autres, surtout en termes de convergence. Le croisement en deux points est également relativement proche. L'analyse des détails (Annexe F) confirme ces tendances. Les autres opérateurs peuvent être considérés comme utilisables.

E.3 Opérateurs de mutation

Après avoir analysé en détails les opérateurs d'accouplement, nous reconsidérons les opérateurs de mutation. Chacun des 10 opérateurs (voir section 9.5.2.6) est testé avec différentes options (voir Table E.3). Nous effectuons également quelques simulations sans aucune mutation en tant que référence. La taille de la population totale est de 50 individus, celle de la population intermédiaire est de 25. L'opérateur de sélection naturelle est le ratio-élitisme, et nous considérons plusieurs opérateurs de sélection des couples (pondération par le rang et tournois à 5) et de reproduction (croisement en 3 points, mélange borné avec 4 points de croisement, et croisement de type binaire en 2 points) afin de tenir compte d'éventuelles influences sur le choix des opérateurs de mutation. Nous avons donc évalué 660 combinaisons au total (donc 6'600 optimisations).

Table E.3 – Opérateurs de mutation évalués.

	Opérateur	**Paramètres**	**Nb combinaisons**
1	Mutation uniforme constante	$p_{mut} = 0.02/0.1/0.2$	3
2	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 50/100/150$ $p_{G_0} = 0.8/0.5/0.3$ $p_{G_{m,p}} = 0.2/0.1/0.02$	27
3	Mutation normale constante	$p_{mut} = 0.02/0.1/0.2$ $\sigma = 0.05/0.2/0.5$	9
4	Mutation normale variable	$\sigma_{G_0} = 0.8$ $p_{G_0} = 0.8$ $G_{m,p} = 50/100/150$ $G_{m,sdev} = 50/100/150$ $p_{G_{m,p}} = 0.02/0.2$ $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02/0.2$	36
5	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.02/0.1/0.2$ $G_{max} = 50/100/150$ $\omega = 0.02/0.1/0.2$	27
6	Taux de mutation adaptatif individuel		1
7	Rayon de recherche adaptatif individuel		1
8	Chromosome de taux de mutation adaptatifs		1
9	Chromosome de rayons de recherche adaptatifs		1
10	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.05/0.2/0.4$	3
11	Aucune mutation		1

En analysant les résultats synthétisés par opérateur de mutation (Figure E.6) ou plus particulièrement les résultats détaillés (Annexe G), nous observons que les opérateurs de mutation ont un rôle très important sur les performances des optimisations, et que les opérateurs de reproduction semblent de seconde importance. Cette observation rejoint notre analyse de la section précédente, ainsi que les travaux de Bäck (1996), qui argumente en faveur de l'importance de la mutation sur l'accouplement. Il va même jusqu'à suggérer, en opposition avec la théorie de Holland (1992a), que les croisements chromosomiques ont principalement un rôle correctif des opérations de mutation. Différentes études ont également identifié l'importance de l'opérateur de mutation par rapport à celui de la reproduction (voir p.ex. Bäck, 1992a; Bäck et Schütz, 1996; Smith et Fogarty, 1997; Deb et Beyer, 1999; Haupt et Haupt, 2004; Costa et al., 2005, 2007).

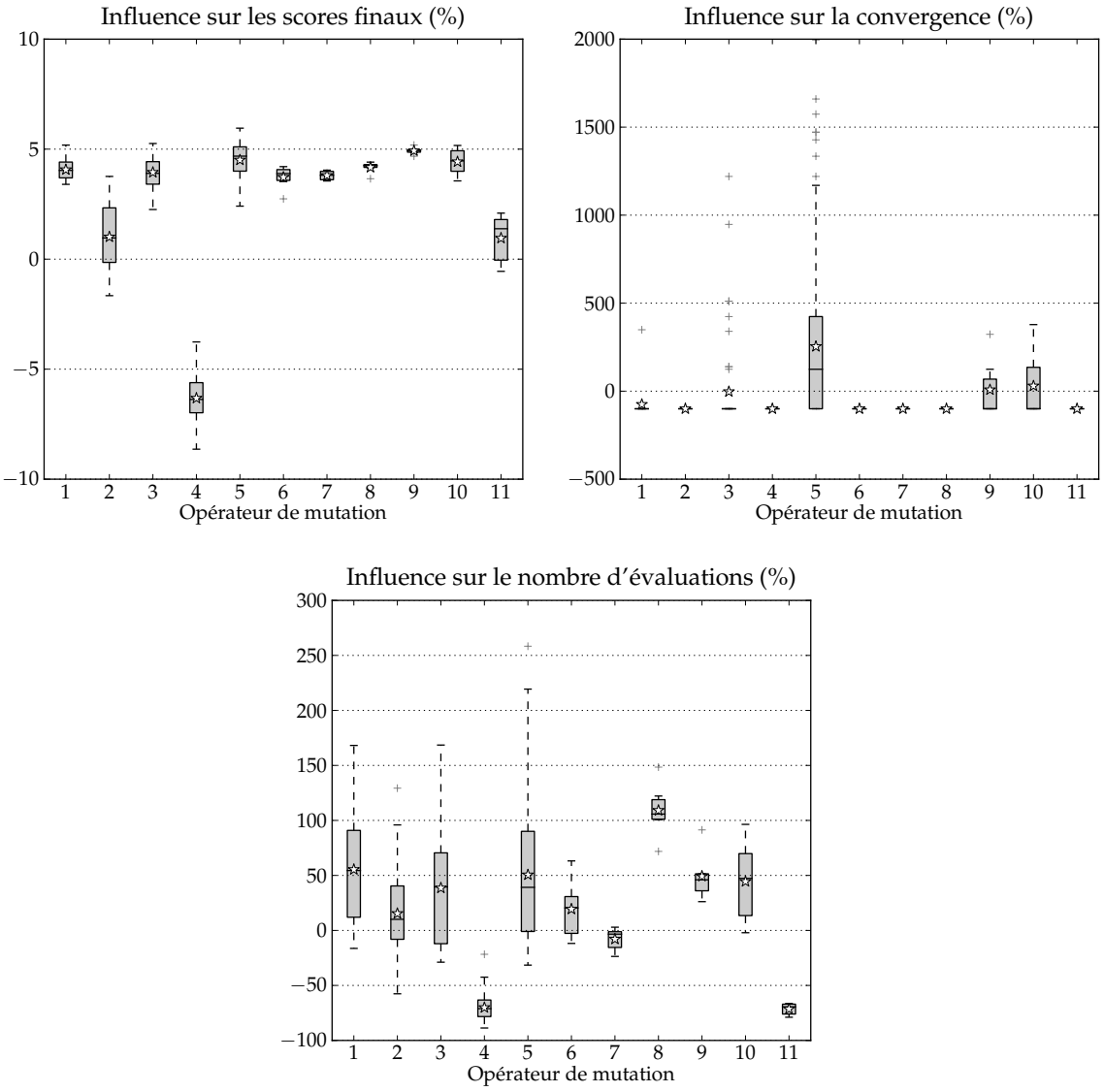


Figure E.6 – Influence du choix de l'opérateur de mutation sur les performances de l'optimisation. Mêmes conventions que Figure E.1.

La Figure E.6 nous révèle que l'opérateur de mutation à loi normale variable se distingue par ses mauvaises performances. En effet, son influence est négative, puisque les scores sont même inférieurs aux optimisations sans mutation. Nous pouvons remettre en question son implémentation ou les paramètres choisis, mais au vu du nombre élevé de ceux-ci, il nous paraît difficile de maîtriser la méthode, et nous suggérons donc de laisser de côté cette approche. Il en va de même pour la mutation uniforme variable, qui ne fait guère mieux que les optimisations sans mutation. Les détails de cette analyse (Annexe G) nous informe que cet opérateur est sensible à la probabilité de mutation initiale, qui ne doit pas être trop élevée. Étant difficile à paramétrer, il n'est donc pas intéressant.

Nous observons ensuite un paquet d'opérateurs présentant plus ou moins les mêmes scores et requérant une quantité variable d'évaluations. L'analyse de la convergence nous permet de mettre en avant 3 opérateurs :

- **Mutation non uniforme** : Cet opérateur est clairement le meilleur en termes de convergence. Le nombre d'évaluations requises peut toutefois être relativement conséquent. Le principal désavantage de la mutation non-uniforme est le nombre de paramètres qu'il est difficile d'estimer a priori. Ces paramètres doivent être bien choisis pour être en phase avec la vitesse d'évolution de la population, et sont donc dépendants du problème traité. En analysant les détails de cette étude (c.f. Annexe G), il semblerait que le coefficient ω n'influence pas les performances. Le rôle de G_{max} est plutôt difficile à juger, mais ne semble pas primordial. Ce qui est évident, c'est l'importance du taux de mutation, qui, en étant ici plus élevé, améliore le score et la convergence, mais augmente le nombre d'évaluations.
- **Chromosome de rayons de recherche adaptatifs** : Au contraire du précédent, cet opérateur est très robuste, puisqu'il ne nécessite aucun paramètre et s'auto-gère. Il est ici un peu moins performant, mais ne nécessite pas de paramétrisation, ce qui est un avantage important. Il est intéressant de constater que notre insertion d'un chromosome supplémentaire (paramètre différent pour chaque gène) représentant le rayon de recherche donne de meilleures performances que les autres opérateurs auto-adaptatifs (tel que p.ex. le chromosome de taux de mutation adaptatifs).
- **Mutation multi-échelles** : Finalement, notre mutation multi-échelle peut également être considérée comme robuste, puisqu'elle ne nécessite qu'un seul paramètre, le taux de mutation. Nous pouvons observer dans les détails de cette étude (c.f. Annexe G) qu'un taux de mutation élevé est ici préférable.

Lors d'une optimisation par les algorithmes génétiques, il peut être prudent de considérer ces trois opérateurs en parallèle, et donc d'obtenir des paramètres résultant d'algorithmes soit très performants, soit très robustes. Il est intéressant de relever que les trois meilleures techniques intègrent une notion de distance de mutation. Il est vraisemblable que cette notion soit la clé de ces algorithmes et leur permette dans un premier temps d'explorer, puis de converger.

Le rayon de recherche incarne en effet directement la notion de la transition entre exploration et exploitation, à notre avis davantage qu'une éventuelle évolution du taux de mutation. Avec une telle approche, les algorithmes génétiques deviennent capables d'identifier l'optimum global plus facilement. Les méthodes hybrides combinant les AGs avec un optimiseur local perdent donc de leur intérêt.

E.4 Autres options

Après avoir identifié les opérateurs de mutation les plus performants pour notre application, nous avons évalué plus finement leur paramétrisation (voir Table E.4), tout en faisant varier le ratio de la population intermédiaire. Les options de cette étude sont les suivantes :

- Taille de la population : 20, 50, ou 100
- Ratio de la population intermédiaire : 20 %, 50 %, ou 80 %
- Sélection naturelle : ratio élitisme
- Sélection des couples : tournois avec 5 individus
- Croisement chromosomique : de type binaire en 2 points et avec partage de β

Table E.4 – Opérateurs de mutation évalués.

	Opérateur	**Paramètres**
1	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
2	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.4$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
3	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.6$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
4	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.8$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
5	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 1.0$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
6	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.2$
7	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.4$
8	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.6$
9	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.8$
10	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 1.0$
11	Chromosome de rayons de recherche adaptatifs	

Comme nous l'avions déjà constaté au préalable, une plus grande population améliore les scores finaux, ainsi que la convergence, mais augmente significativement le nombre d'évaluations (voir Figure E.7). Il est donc nécessaire de considérer une population assez grande, sans toutefois la surdimensionner pour des raisons de temps de calculs. Nous supposons que la taille minimale pour obtenir des résultats satisfaisants dépend de la complexité du problème à traiter, soit du nombre de variables et de la forme de la surface de réponse de la fonction objective.

Nous avons également évalué l'influence de la taille de la population intermédiaire, soit du ratio (exprimé en pourcentage) de la population totale sélectionnée pour l'accouplement (Figure E.8). Il apparaît qu'une large sélection (80 %) n'est pas favorable à l'optimisation. Les performances avec des ratios de 20 % et 50 % sont relativement proches. Il ne semble

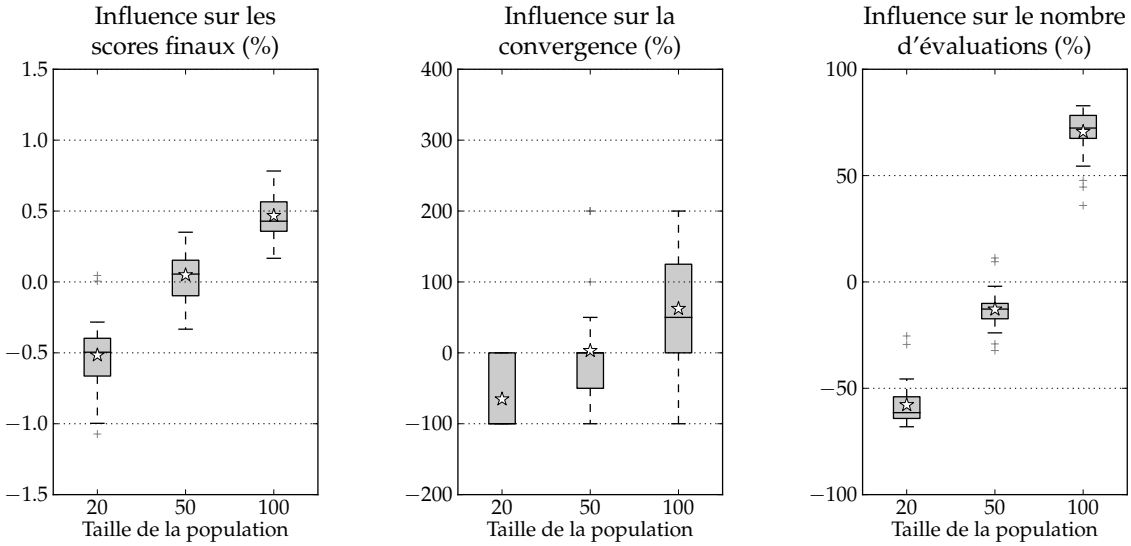


Figure E.7 – Influence de la taille de la population sur les performances de l'optimisation. Mêmes conventions que Figure E.1.

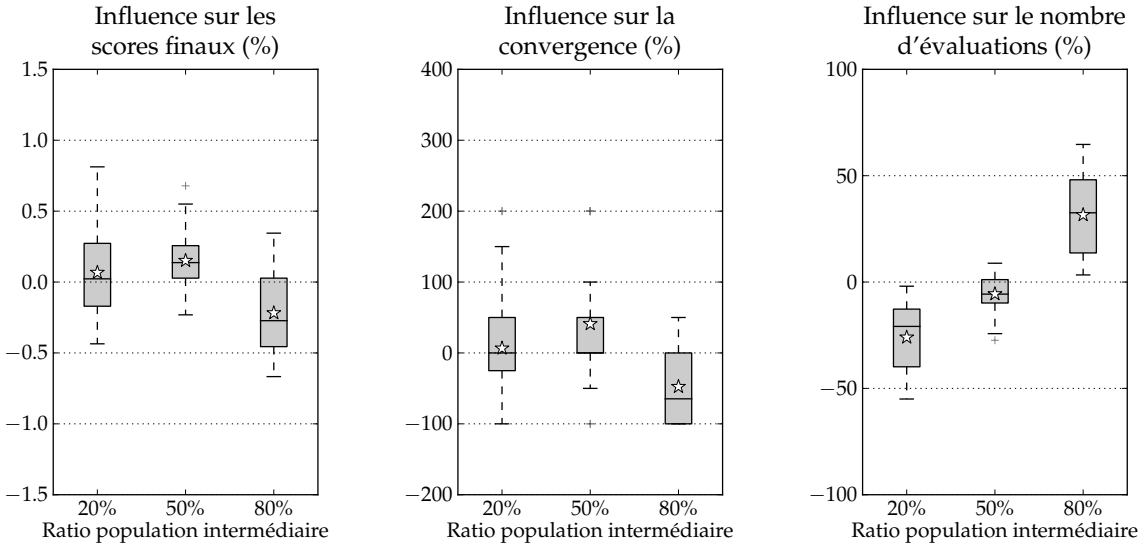


Figure E.8 – Influence du ratio de la population intermédiaire sur les performances de l'optimisation. Mêmes conventions que Figure E.1.

pas que ce paramètre soit déterminant pour la qualité des optimisations, pour autant qu'il ne soit pas trop grand. Une valeur de 50 % semble être un choix prudent.

Les diverses options évaluées de l'opérateur de mutation (voir Table E.4) présentent des tendances distinctes (voir Figure E.9). Comme précédemment, la mutation non uniforme est meilleure en termes de score et de convergence, mais nécessite davantage de temps de calculs. Un taux de mutation entre 0.4 et 0.6 semble être optimal pour cette méthode. La mutation multi-échelles montre des performances variables, mais ici systématiquement inférieures à la

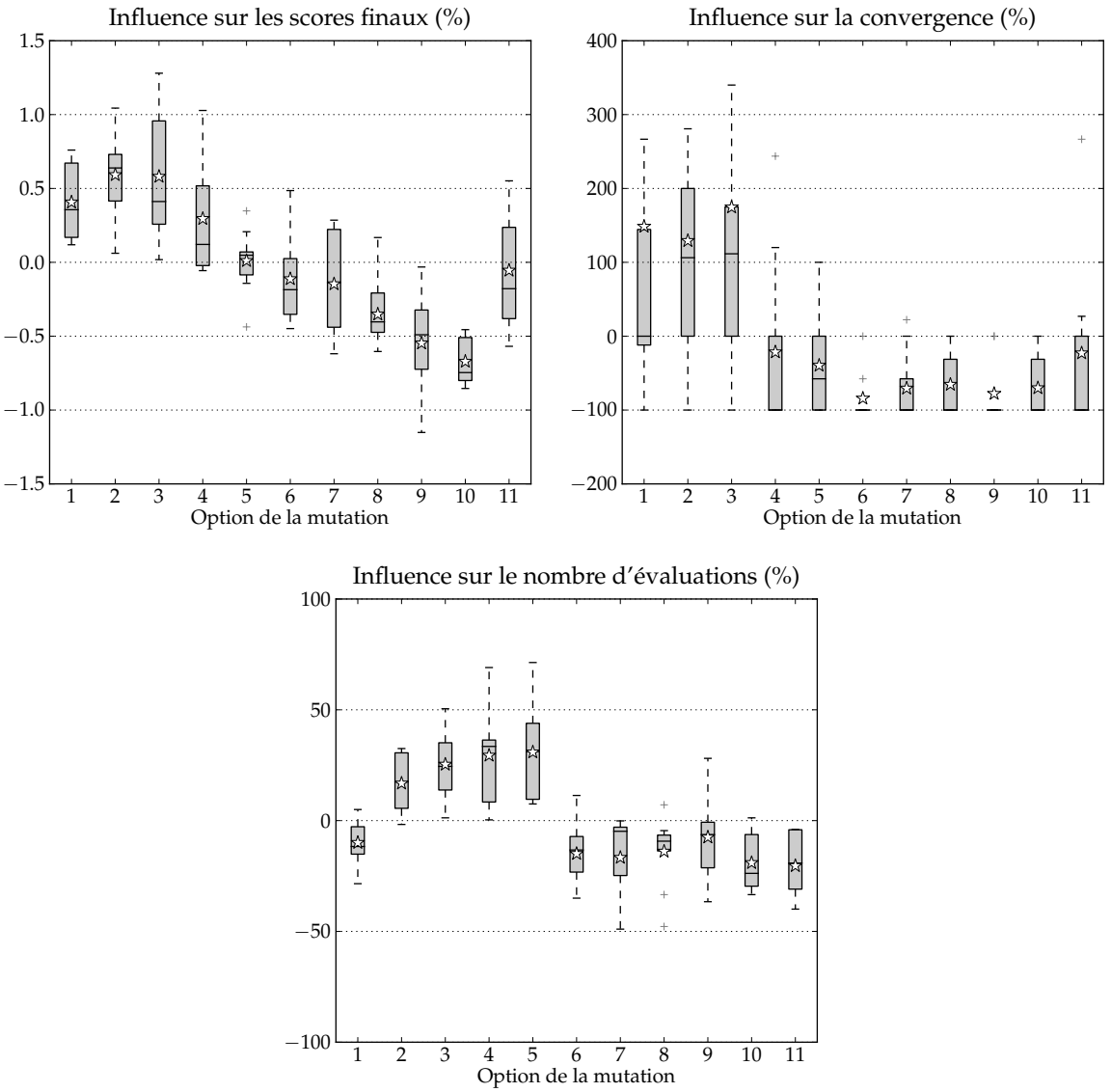


Figure E.9 – Influence des options de mutation sur les performances de l'optimisation. Mêmes conventions que Figure E.1.

méthode non uniforme, avec un taux de mutation acceptable entre 0.2 et 0.6. Finalement, le chromosome de rayons de recherche adaptatifs affiche de meilleures performances que l'approche multi-échelles, mais celles-ci restent ici inférieures à celles de la mutation non uniforme. Cette dernière est donc efficace, sous la condition qu'elle soit bien paramétrée pour la fonction objective.

E.5 Évaluation pour un autre groupement

Les analyses effectuées précédemment ont été menées pour un seul groupement pluviométrique (les crêtes du sud-est). Nous désirons donc confirmer ces analyses sur une autre région, soit le Chablais. Les opérateurs peuvent varier, puisque la surface de réponse de la fonction objective sera certainement différente.

Pour ce faire, nous considérons les mêmes opérateurs de mutation que lors de l'analyse précédente (Table E.4), ainsi que les options suivantes :

- Taille de la population : 50 ou 100
- Ratio de la population intermédiaire : 50 %
- Sélection naturelle : ratio élitisme
- Sélection des couples : tournois avec 5 individus, et roulette pondérée par le rang
- Croisement chromosomique : de type binaire en 2 points et sans partage de β, ainsi que le croisement uniforme.

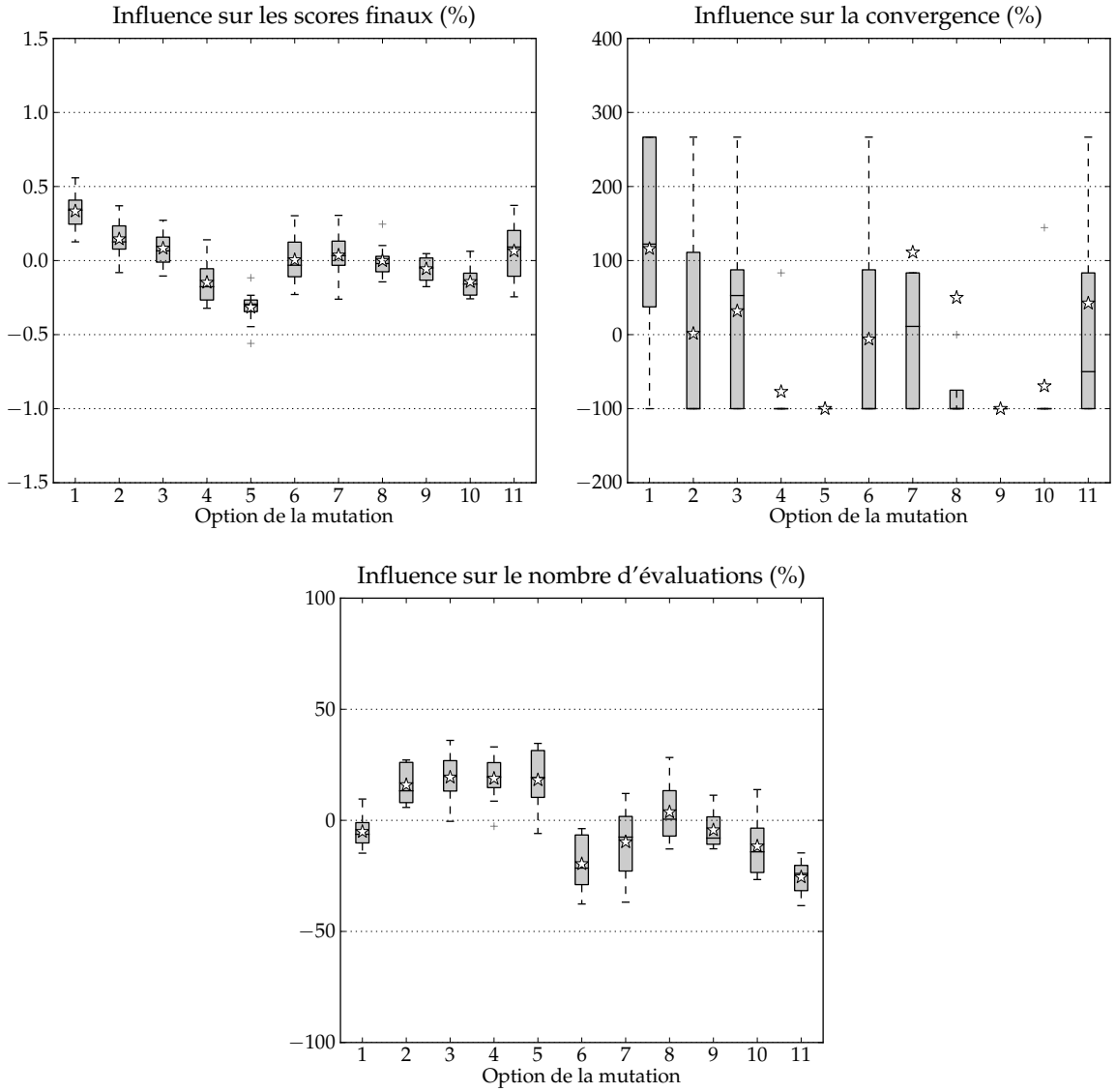


Figure E.10 – Influence des options de mutation sur les performances de l'optimisation. Mêmes conventions que Figure E.1.

L'influence de la taille de la population demeure semblable, à savoir qu'une plus grande population améliore les performances (figures non présentées). De même, nous n'avons pas observé d'influence significative des deux opérateurs de croisement évalués, ni de ceux de sélection des couples.

L'analyse de l'influence de l'opérateur de mutation révèle cependant des résultats un peu différents que pour la région des crêtes du sud-est. Les performances des opérateurs de mutation sont davantage similaires, et les taux de mutation optimaux sont plus bas que précédemment : 0.2 pour la mutation non uniforme et 0.2 à 0.4 pour la mutation multi-échelles. Cette différence illustre bien le problème de la paramétrisation de cet opérateur, qui influence notablement les performances. Il semble donc difficile de généraliser un taux de mutation pour l'optimisation de toute méthode des analogues. Dans cette perspective, le chromosome de rayons de recherche adaptatif est intéressant, puisqu'il devrait s'adapter au problème de manière automatique. Ses performance sont d'ailleurs remarquables pour ce cas d'étude, où il est dans les meilleures options, avec un nombre d'évaluations minimal.

E.6 Évaluation de la sélection du niveau atmosphérique

Jusqu'à présent, nous avons fixé les niveaux atmosphériques de la méthode de référence R1. Nous désirons maintenant donner ce degré de liberté supplémentaire à l'optimiseur, afin qu'il propose d'éventuelles améliorations. Pour ce faire, nous considérons différentes options de mutation (voir Table E.5), mais fixons les autres paramètres aux valeurs suivantes :

- Taille de la population : 100
- Ratio de la population intermédiaire : 50 %
- Sélection naturelle : ratio élitisme
- Sélection des couples : roulette pondérée par le rang
- Croisement chromosomique : de type binaire en 2 points et avec partage de β.

Table E.5 – Opérateurs de mutation évalués.

	Opérateur	**Paramètres**
1	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.01$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
2	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.05$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
3	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
4	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
5	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.4$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
6	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.01$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$
7	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.05$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$
8	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$
9	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$
10	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.4$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$
11	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.01$
12	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.05$
13	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.1$
14	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.2$
15	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.4$
16	Chromosome de rayons de recherche adaptatifs	

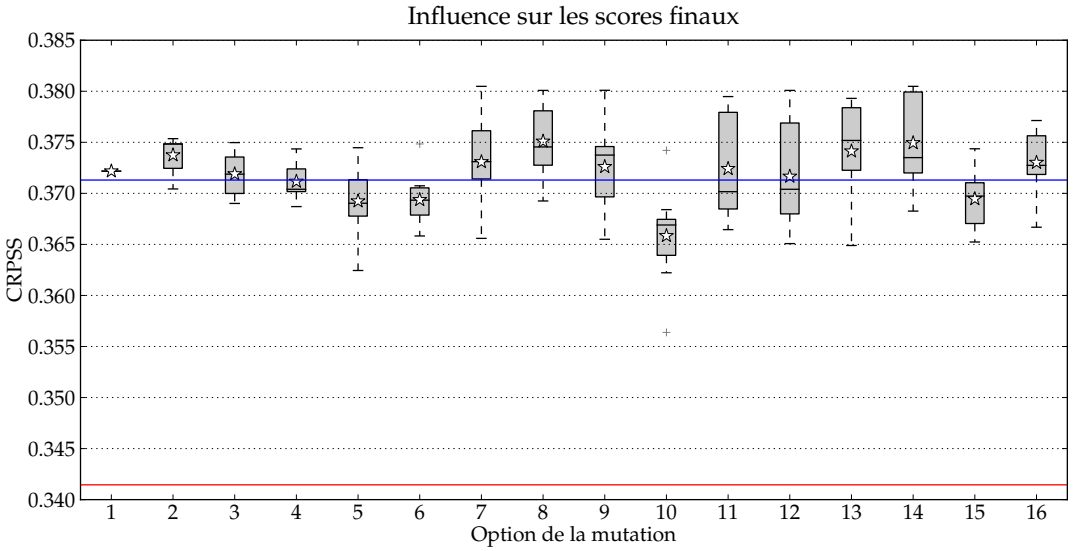


Figure E.11 – Influence des opérateurs de mutation sur la valeur du score final lors de l'optimisation des paramètres de la méthode de référence R1 pour le groupement des crêtes du sud-est, avec choix automatique des niveaux atmosphériques. L'étoile représente la moyenne, le trait inférieur rouge la valeur du score avec la calibration classique, et le trait supérieur bleu, la valeur du score sans choix automatique du niveau atmosphérique.

Les niveaux atmosphériques proposés sont les suivants : 300, 400, 500, 600, 700, 850, 925, 1000 hPa. Ce paramètre doit être optimisé de manière un peu différente des autres, puisqu'il ne peut pas être vraiment considéré comme continu, mais est plutôt géré sous la forme d'une liste de valeurs. L'algorithme choisit donc un indice de cette liste et utilise la valeur associée, mais ne travaille pas directement avec les valeurs. Cette différence a pour conséquence qu'il n'y a pas de réelle notion de distance entre les niveaux, et que donc les opérateurs de mutation basés sur une telle notion ne peuvent pas l'exploiter et sont réduits à un tirage aléatoire uniforme. Cet aspect est similaire lors de l'optimisation du choix de la variable d'analogie, dont les possibilités sont données là aussi sous forme de liste.

Les résultats de cette optimisation sont présentés dans la Figue E.11. La première constatation est que la convergence vers une solution unique a significativement diminué. Nous constatons dans le détail des résultats que le choix des niveaux peut varier d'une solution à l'autre (tout en restant acceptable), alors que les autres paramètres convergent plus facilement pour les niveaux choisis. Cet aspect peut être facilement attribué à la perte de notion de distance entre les valeurs à optimiser, et donc au fait que les opérateurs de mutation sont certainement moins performants sur ce paramètre. Il est possible que l'optimisation soit trop rapide sur les autres paramètres pour que le niveau atmosphérique converge. Il pourrait être pertinent de reprendre l'évaluation des autres opérateurs, car peut-être qu'un autre opérateur de croisement deviendrait alors plus adapté. Toutefois, cette évaluation très exigeante en temps ne sera pas reconduite dans le cadre de ce travail.

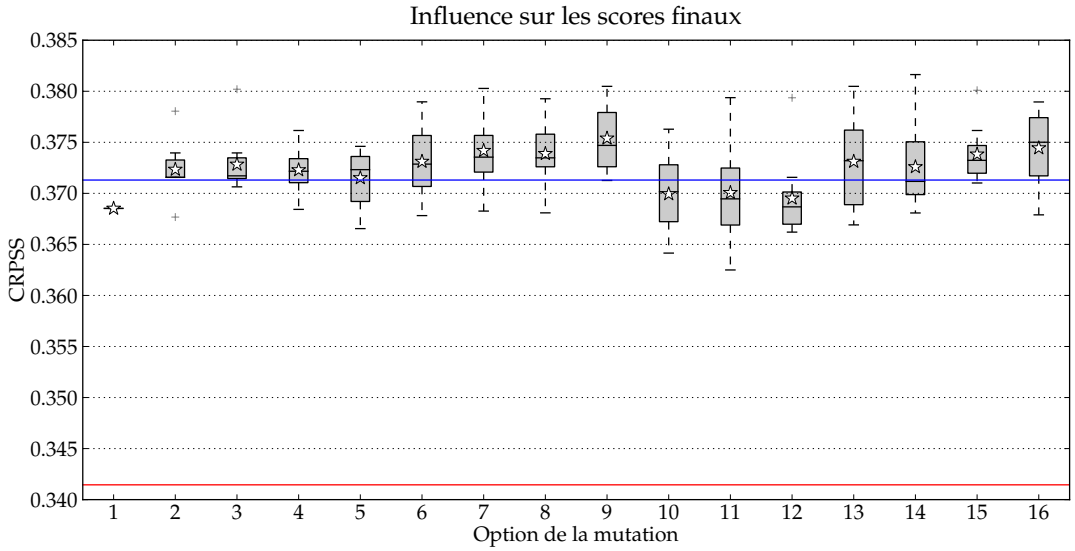


Figure E.12 – Même graphique que la Figure E.11, mais en introduisant une notion de distance sur le choix automatique des niveaux atmosphériques.

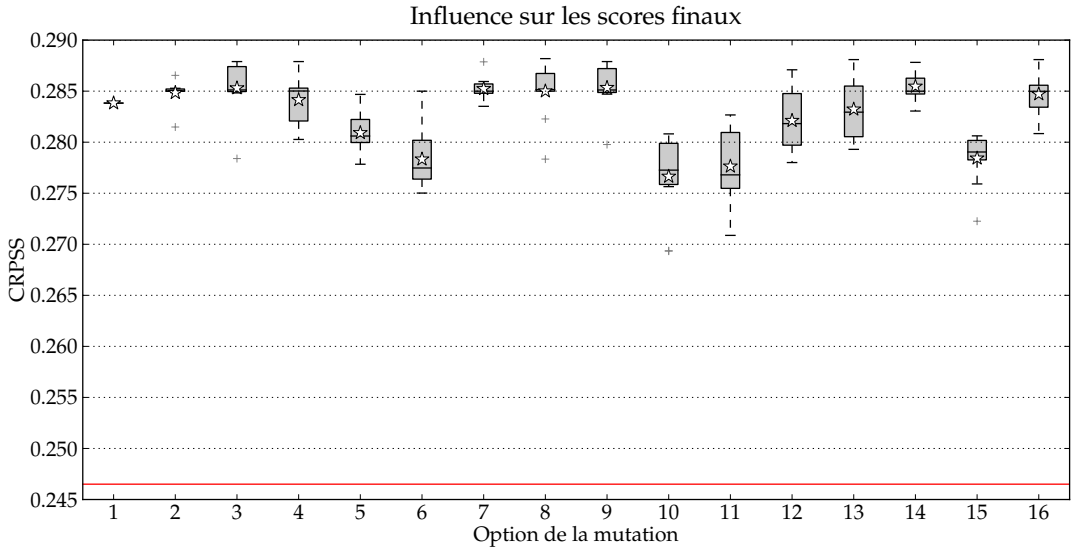


Figure E.13 – Même graphique que la Figure E.11, mais pour le groupement du Rhône amont (sans le trait supérieur bleu représentant la valeur du score sans choix automatique du niveau atmosphérique).

Nous avons alors tenté d'introduire une notion de distance sur le choix du niveau, en se basant sur les indices des listes. Les résultats en termes de scores sont présentés dans la Figure E.12. Si les tendances des différents opérateurs changent, il n'y a globalement pas d'amélioration notable. Nous préférons donc ne pas continuer avec cette approche, car elle ne représente pas une réalité des paramètres, et peut introduire une trop forte contrainte lorsqu'il n'y a pas assez de niveaux à choisir.

Finalement, nous avons encore évalué le comportement de l'optimisation pour un autre groupement, soit celui du Rhône amont. Les résultats, présentés dans la Figure E.13, sont relativement semblables à ceux du groupement des crêtes du sud-est. De manière générale, les meilleurs options de mutation sont la mutation non uniforme avec une probabilité de 0.1 ou 0.2 et une valeur de $G_{max} = 100$, la mutation multi-échelles, avec des mêmes taux de mutation, et le chromosome de rayons de recherche adaptatifs.

Si la convergence est peut-être discutable, les résultats sont tout de même de bonne qualité. Les niveaux retenus sont des solutions possibles donnant des résultats satisfaisants et souvent très proches. Ainsi, nous obtenons, pour le groupement des crêtes du sud-est, un score CRPSS de 38,05 %, contre 37,13 % précédemment sans optimiser le niveau (et 34,15 % par une approche de calibration classique). Le gain est donc clairement intéressant, d'autant plus que nous optimisons ici simultanément les niveaux atmosphériques, les fenêtres temporelles et spatiales et le nombre d'analogues ! Une évaluation de tous ces paramètres exige de multiples évaluations de toutes les combinaisons possibles lors des démarches habituelles de calibration. De plus ces études sont souvent effectuées avec une fenêtre spatiale de taille fixe et un nombre d'analogues déterminé. Nous avons donc bon espoir de trouver des solutions d'aussi bonne qualité voire meilleures, mais de manière automatisée.

E.7 Évaluation pour la méthode de référence R2

La méthode des analogues étant constituée habituellement de plus d'un niveau d'analogie, nous avons ensuite évalué l'optimisation pour la méthode de référence R2, constituée d'une première analogie sur la circulation, et d'une seconde sur l'humidité. Les options de mutation sont les mêmes que précédemment (voir Table E.5), mais nous utilisons ici deux tailles de population, à savoir 100 et 200.

Lors de cette analyse, nous laissons l'optimiseur choisir tous les paramètres du premier niveau d'analogie (2 niveaux atmosphériques, 2 fenêtres spatiales, 2 fenêtres temporelles, et nombre d'analogues du premier niveau), ainsi que le nombre d'analogues et la fenêtre spatiale du second. Le choix des fenêtres temporelles et du niveau atmosphérique est ici arrêté pour des raisons de mémoire et de temps de lecture des fichiers. Puisque cette comparaison est effectuée sur un cluster de calculs, nous devons limiter les accès disques, et le chargement en mémoire des combinaisons (niveaux atmosphériques et fenêtres temporelles) des variables d'humidité élaborées serait démesuré en raison de l'aspect hautement combinatoire des possibilités.

Nous observons les mêmes tendances que lors de l'analyse précédente, à savoir que les options de mutation suivantes donnent des performances semblables : la mutation non uniforme avec une probabilité de 0.1 ou 0.2, la mutation multi-échelles, avec des mêmes taux de mutation, et le chromosome de rayons de recherche adaptatifs. Nous ne nous attarderons pas sur la valeur des paramètres eux-mêmes.

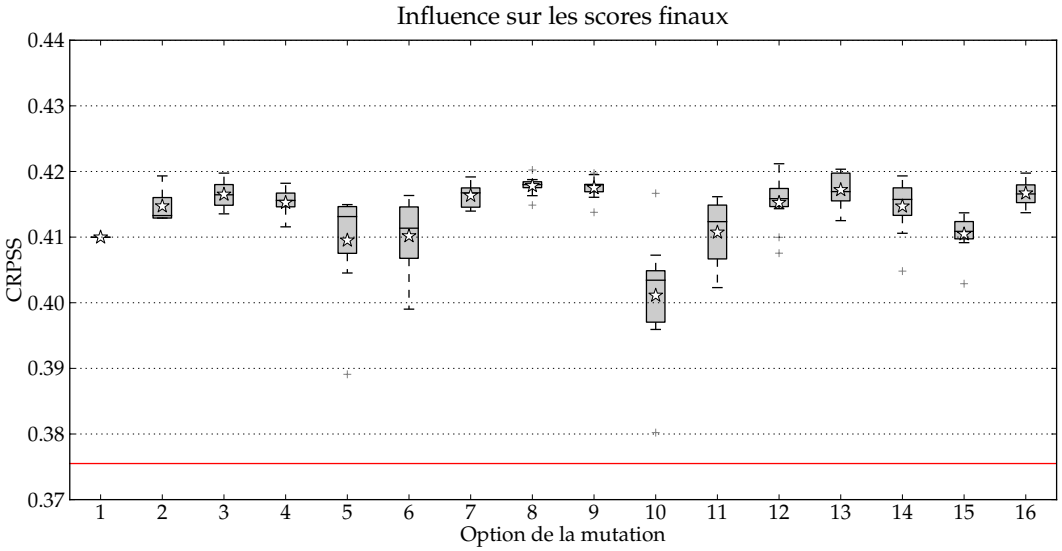


Figure E.14 – Influence des opérateurs de mutation sur la valeur du score final lors de l'optimisation des paramètres de la méthode de référence R2. Mêmes conventions que Figure E.11.

E.8 Évaluation pour la méthode de référence R4

Finalement, nous considérons une méthode encore plus complexe, qui intègre une présélection sur la température. Il y a ici 3 niveaux d'analogie. Nous utilisons toujours les mêmes options que précédemment, mais ici uniquement avec une population de 100 individus.

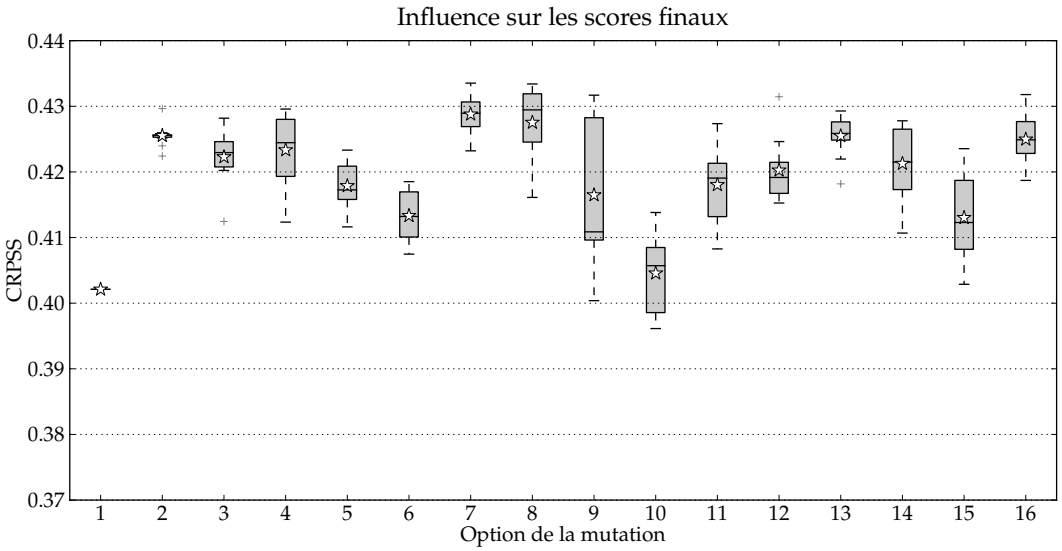


Figure E.15 – Influence des opérateurs de mutation sur la valeur du score final lors de l'optimisation des paramètres de la méthode de référence R4. Mêmes conventions que Figure E.1.

Chaque paramètre de la présélection (niveaux atmosphériques, fenêtres spatiales et temporelles, nombre d'analogues) doit également être optimisé conjointement avec les autres

niveaux d'analogie. Les paramètres résultant de cette optimisation sont plus réalistes que ceux proposés par la calibration classique, car la fenêtres d'analogie pour la présélection sur les températures est située proche du bassin (voir section 6.3.5). Les valeurs des paramètres ne seront pas discutés davantage, puisque nous travaillons ici sur une très courte période, et que les paramètres seront peut-être différents sur la période complète de calibration.

A nouveau, bien que des scores satisfaisants soient atteints, la convergence n'est pas garantie, en raison de l'optimisation des niveaux atmosphériques et d'une population peut-être en sous-effectif pour la complexité de la méthode. Pour ce qui est de la comparaison des opérateurs de mutation, nous confirmons nos conclusions précédentes.

Annexe F

Comparaison détaillée des opérateurs d'accouplement des AGs

Cette annexe présente les détails des évaluations des opérateurs de sélection des couples et de croisements chromosomiques des algorithmes génétiques. Les indicateurs considérés sont ici donnés pour chaque option de manière isolée. Ainsi, nous présentons les résultats pour les combinaisons des variantes suivantes :

- Taille de la population : 50 et 200 individus.
- Sélection naturelle : ratio élitisme et tournois (avec une probabilité de sélection de 0.9)
- Mutation : uniforme constante (probabilité de 0.2) et non uniforme (probabilité de 0.2, $G_{max} = 60$, $\omega = 0.2$)

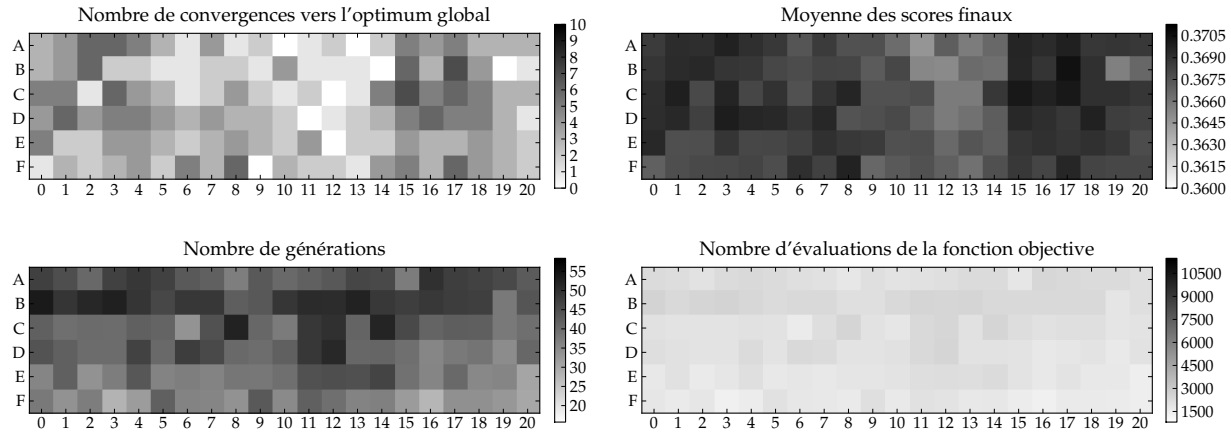


Figure F.1 – Comparaison des combinaisons des opérateurs d'accouplement pour une population de 50 individus, avec l'opérateur de sélection naturelle *ratio élitisme* et la *mutation non uniforme*. Croisements chromosomiques en abscisse et sélections des couples en ordonnée.

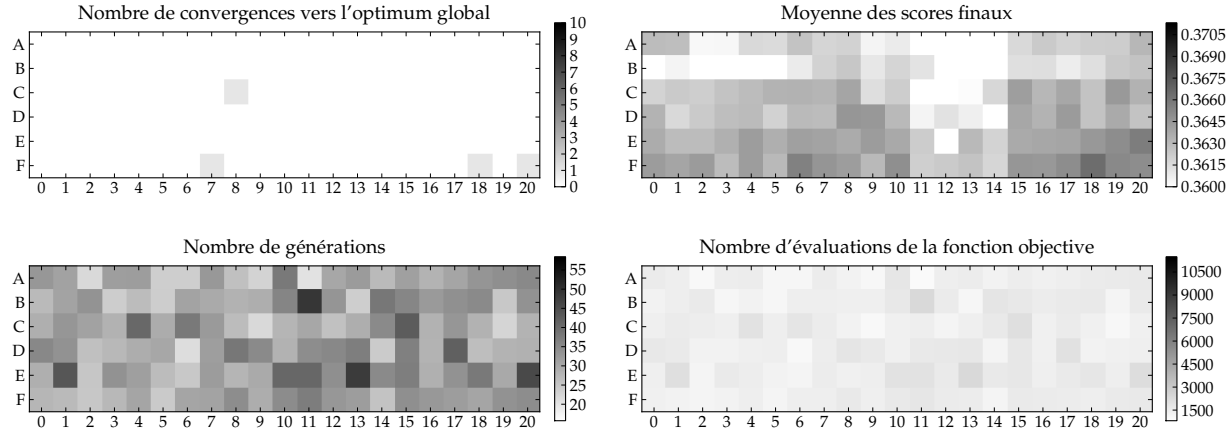


Figure F.2 – Comparaison des combinaisons des opérateurs d'accouplement pour une population de 50 individus, avec l'opérateur de sélection naturelle *ratio élitisme* et la *mutation uniforme constante*. Croisements chromosomiques en abscisse et sélections des couples en ordonnée.

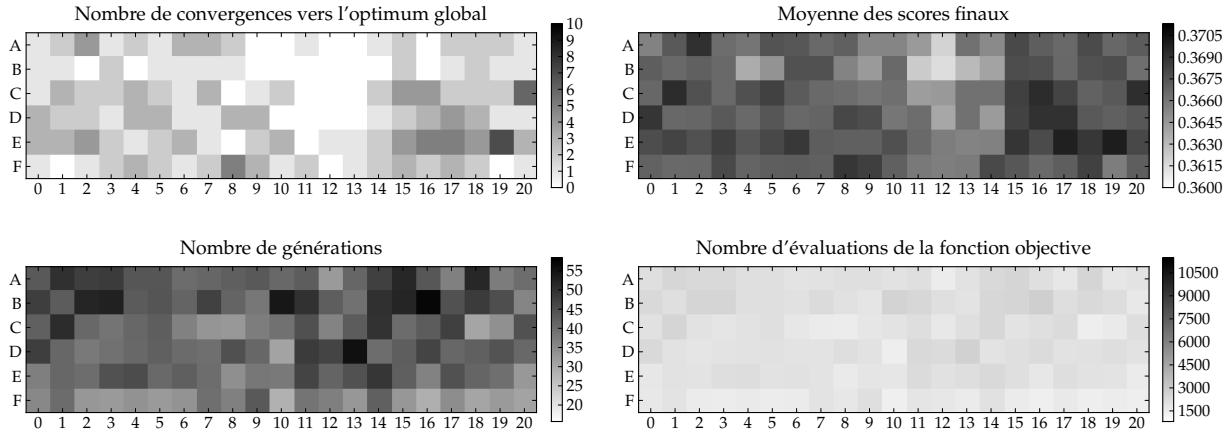


Figure F.3 – Comparaison des combinaisons des opérateurs d'accouplement pour une population de 50 individus, avec l'opérateur de sélection naturelle par *tournois* et la *mutation non uniforme*. Croisements chromosomiques en abscisse et sélections des couples en ordonnée.

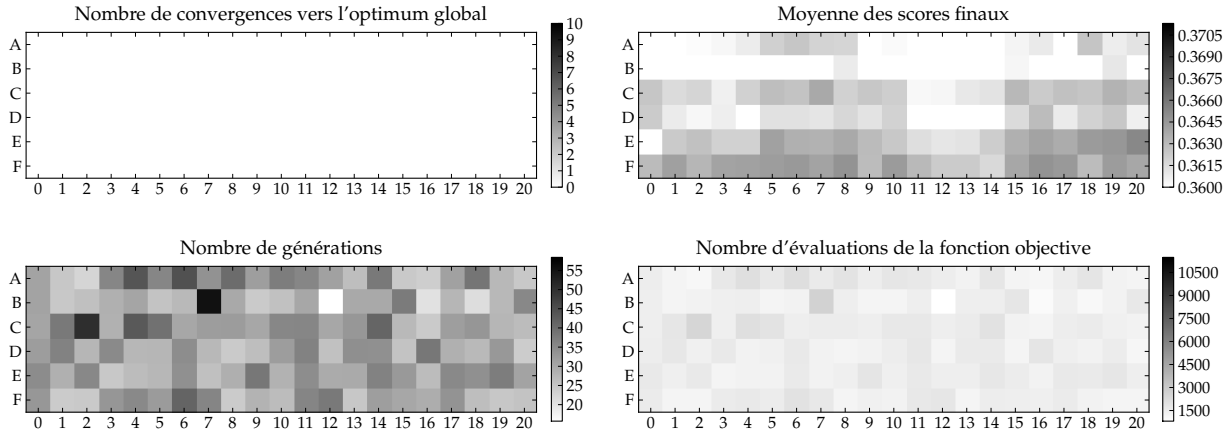


Figure F.4 – Comparaison des combinaisons des opérateurs d'accouplement pour une population de 50 individus, avec l'opérateur de sélection naturelle par *tournois* et la *mutation uniforme constante*. Croisements chromosomiques en abscisse et sélections des couples en ordonnée.

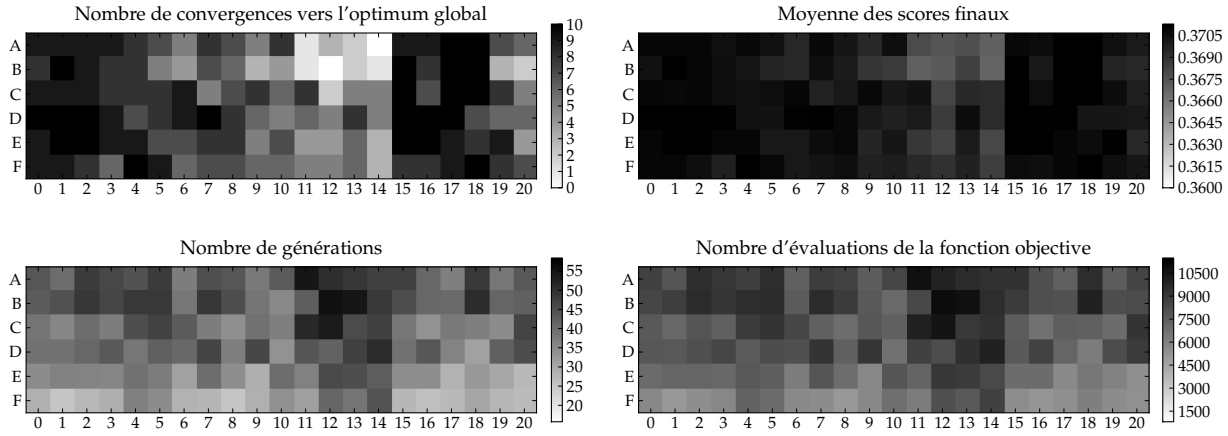


Figure F.5 – Comparaison des combinaisons des opérateurs d'accouplement pour une population de 200 individus, avec l'opérateur de sélection naturelle *ratio élitisme* et la *mutation non uniforme*. Croisements chromosomiques en abscisse et sélections des couples en ordonnée.

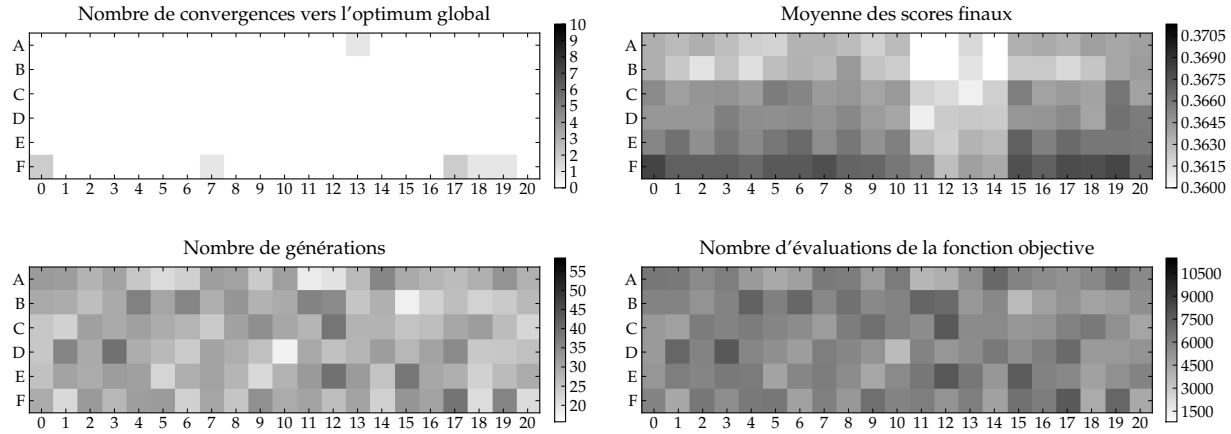


Figure F.6 – Comparaison des combinaisons des opérateurs d'accouplement pour une population de 200 individus, avec l'opérateur de sélection naturelle *ratio élitisme* et la *mutation uniforme constante*. Croisements chromosomiques en abscisse et sélections des couples en ordonnée.

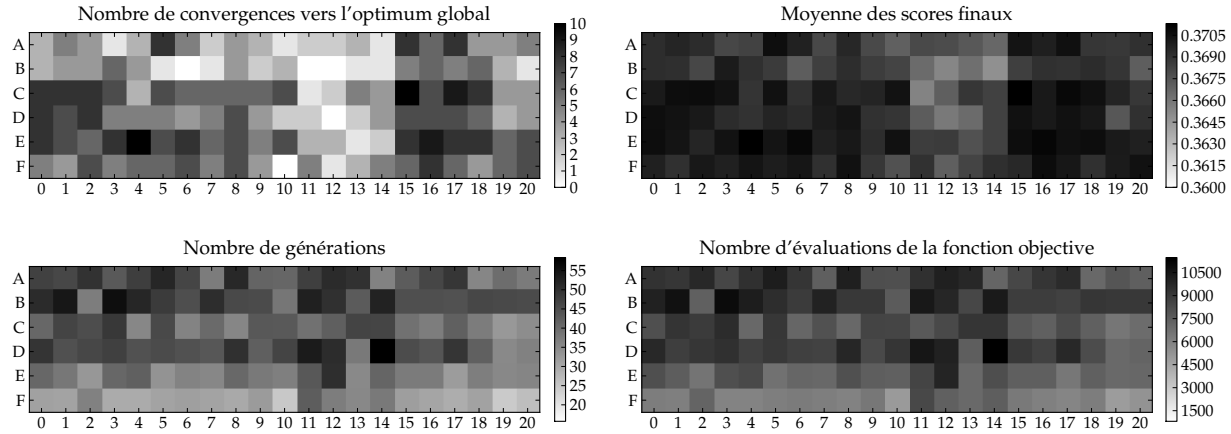


Figure F.7 – Comparaison des combinaisons des opérateurs d'accouplement pour une population de 200 individus, avec l'opérateur de sélection naturelle par *tournois* et la *mutation non uniforme*. Croisements chromosomiques en abscisse et sélections des couples en ordonnée.

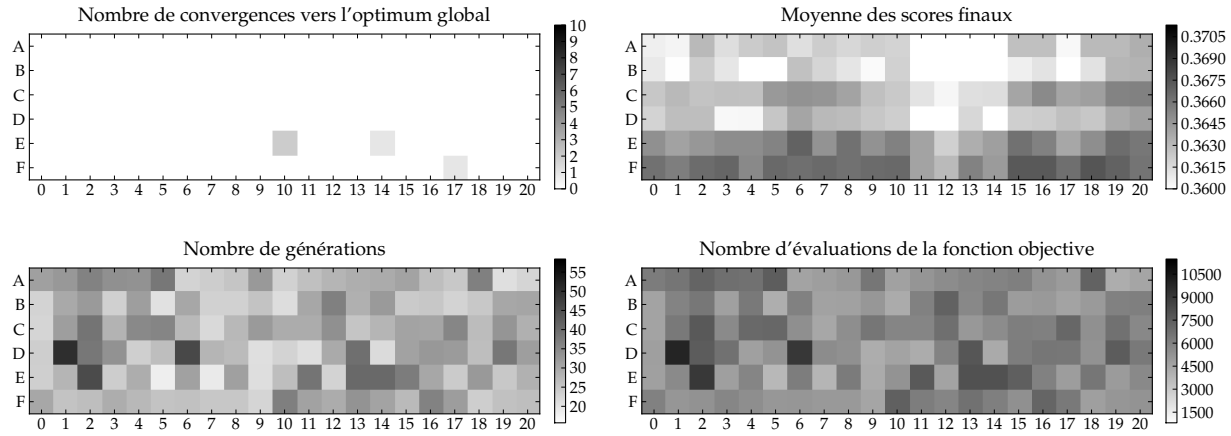


Figure F.8 – Comparaison des combinaisons des opérateurs d'accouplement pour une population de 200 individus, avec l'opérateur de sélection naturelle par *tournois* et la *mutation uniforme constante*. Croisements chromosomiques en abscisse et sélections des couples en ordonnée.

Annexe G

Comparaison détaillée des opérateurs de mutation des AGs

Ces pages présentent les détails de la comparaison des opérateurs de mutation. Chacun des 10 opérateurs (voir section 9.5.2.6) est testé avec différentes options (voir Table E.3). Nous effectuons également quelques simulations sans aucune mutation en tant que référence. La taille de la population totale est de 50 individus, celle de la population intermédiaire est de 25. L'opérateur de sélection naturelle est le ratio-élitisme, et nous considérons plusieurs opérateurs de sélection des couples (pondération par le rang et tournois à 5) et de reproduction (croisement en 3 points, mélange borné avec 4 points de croisement, et croisement de type binaire en 2 points) afin de tenir compte d'éventuelles influences sur le choix des opérateurs de mutation.

Table G.1 – Opérateurs de mutation uniforme évalués.

	Opérateur	**Paramètres**
1	Mutation uniforme constante	$p_{mut} = 0.02$
2	Mutation uniforme constante	$p_{mut} = 0.1$
3	Mutation uniforme constante	$p_{mut} = 0.2$
4	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 50$, $p_{G_0} = 0.8$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$
5	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 100$, $p_{G_0} = 0.8$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$
6	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 150$, $p_{G_0} = 0.8$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$
7	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 50$, $p_{G_0} = 0.5$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$
8	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 100$, $p_{G_0} = 0.5$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$
9	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 150$, $p_{G_0} = 0.5$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$
10	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 50$, $p_{G_0} = 0.3$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$
11	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 100$, $p_{G_0} = 0.3$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$
12	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 150$, $p_{G_0} = 0.3$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$
13	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 50$, $p_{G_0} = 0.8$, $p_{G_{m,p}} = 0.1$
14	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 100$, $p_{G_0} = 0.8$, $p_{G_{m,p}} = 0.1$
15	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 150$, $p_{G_0} = 0.8$, $p_{G_{m,p}} = 0.1$
16	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 50$, $p_{G_0} = 0.5$, $p_{G_{m,p}} = 0.1$
17	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 100$, $p_{G_0} = 0.5$, $p_{G_{m,p}} = 0.1$
18	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 150$, $p_{G_0} = 0.5$, $p_{G_{m,p}} = 0.1$
19	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 50$, $p_{G_0} = 0.3$, $p_{G_{m,p}} = 0.1$
20	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 100$, $p_{G_0} = 0.3$, $p_{G_{m,p}} = 0.1$
21	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 150$, $p_{G_0} = 0.3$, $p_{G_{m,p}} = 0.1$
22	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 50$, $p_{G_0} = 0.8$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$
23	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 100$, $p_{G_0} = 0.8$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$
24	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 150$, $p_{G_0} = 0.8$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$
25	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 50$, $p_{G_0} = 0.5$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$
26	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 100$, $p_{G_0} = 0.5$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$
27	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 150$, $p_{G_0} = 0.5$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$
28	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 50$, $p_{G_0} = 0.3$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$
29	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 100$, $p_{G_0} = 0.3$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$
30	Mutation uniforme variable	$G_{m,p} = 150$, $p_{G_0} = 0.3$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$

Table G.2 – Opérateurs de mutation normale évalués.

	Opérateur	**Paramètres**
31	Mutation normale constante	$p_{mut} = 0.02$, $\sigma = 0.05$
32	Mutation normale constante	$p_{mut} = 0.1$, $\sigma = 0.05$
33	Mutation normale constante	$p_{mut} = 0.2$, $\sigma = 0.05$
34	Mutation normale constante	$p_{mut} = 0.02$, $\sigma = 0.2$
35	Mutation normale constante	$p_{mut} = 0.1$, $\sigma = 0.2$
36	Mutation normale constante	$p_{mut} = 0.2$, $\sigma = 0.2$
37	Mutation normale constante	$p_{mut} = 0.02$, $\sigma = 0.5$
38	Mutation normale constante	$p_{mut} = 0.1$, $\sigma = 0.5$
39	Mutation normale constante	$p_{mut} = 0.2$, $\sigma = 0.5$
40	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
41	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
42	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
43	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 100$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
44	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 100$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
45	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
46	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
47	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
48	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
49	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
50	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
51	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
52	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 100$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
53	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 100$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
54	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
55	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
56	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
57	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.02$
58	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
59	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
60	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
61	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 100$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
62	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 100$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
63	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
64	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
65	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
66	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.02$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
67	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
68	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
69	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 50$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
70	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 100$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
71	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 100$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
72	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
73	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 50$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
74	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 100$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$
75	Mutation normale variable	$G_{m,p} = 150$, $G_{m,sdev} = 150$, $p_{G_{m,p}} = 0.2$, $\sigma_{G_{m,sdev}} = 0.2$

Table G.3 – Opérateurs de mutation non uniforme évalués.

	Opérateur	**Paramètres**
76	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.02$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.02$
77	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.02$
78	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.02$
79	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.02$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.02$
80	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.02$
81	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.02$
82	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.02$, $G_{max} = 150$, $\omega = 0.02$
83	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 150$, $\omega = 0.02$
84	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 150$, $\omega = 0.02$
85	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.02$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
86	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
87	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.1$
88	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.02$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$
89	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$
90	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.1$
91	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.02$, $G_{max} = 150$, $\omega = 0.1$
92	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 150$, $\omega = 0.1$
93	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 150$, $\omega = 0.1$
94	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.02$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.2$
95	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.2$
96	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 50$, $\omega = 0.2$
97	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.02$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.2$
98	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.2$
99	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 100$, $\omega = 0.2$
100	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.02$, $G_{max} = 150$, $\omega = 0.2$
101	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.1$, $G_{max} = 150$, $\omega = 0.2$
102	Mutation non uniforme	$p_{mut} = 0.2$, $G_{max} = 150$, $\omega = 0.2$

Table G.4 – Autres opérateurs de mutation.

	Opérateur	**Paramètres**
103	Taux de mutation adaptatif individuel	
104	Rayon de recherche adaptatif individuel	
105	Chromosome de taux de mutation adaptatifs	
106	Chromosome de rayons de recherche adaptatifs	
107	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.05$
108	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.2$
109	Mutation multi-échelles	$p_{mut} = 0.4$
110	Aucune mutation	

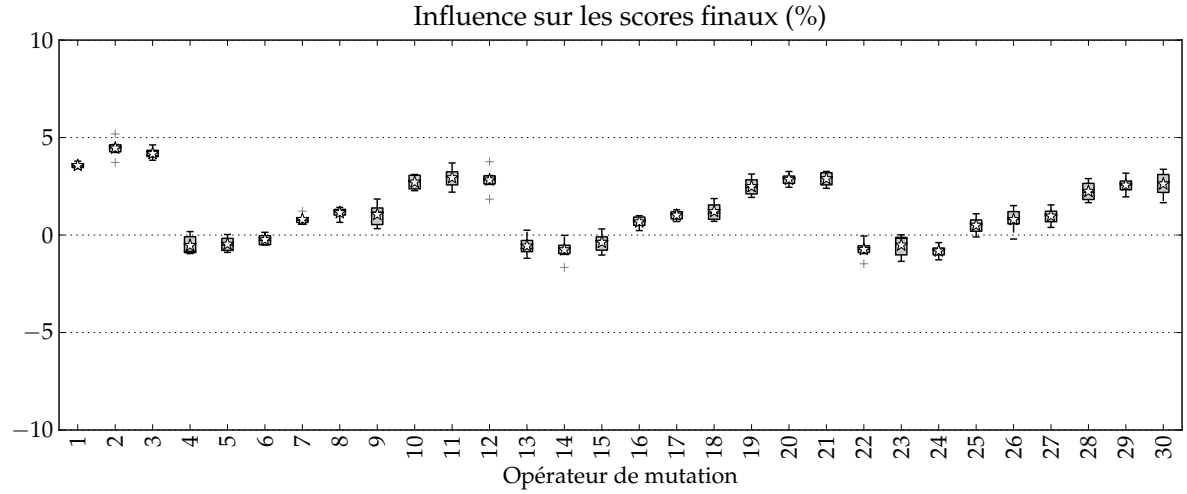


Figure G.1 – Comparaison des scores par opérateur de mutation uniforme (voir Table G.1).

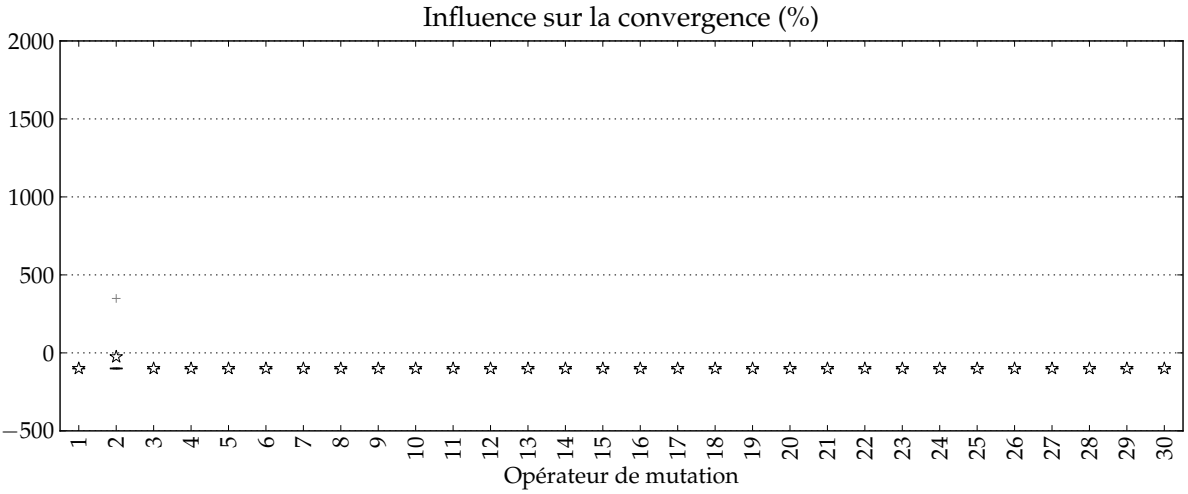


Figure G.2 – Comparaison de la convergence par opérateur de mutation uniforme (voir Table G.1).

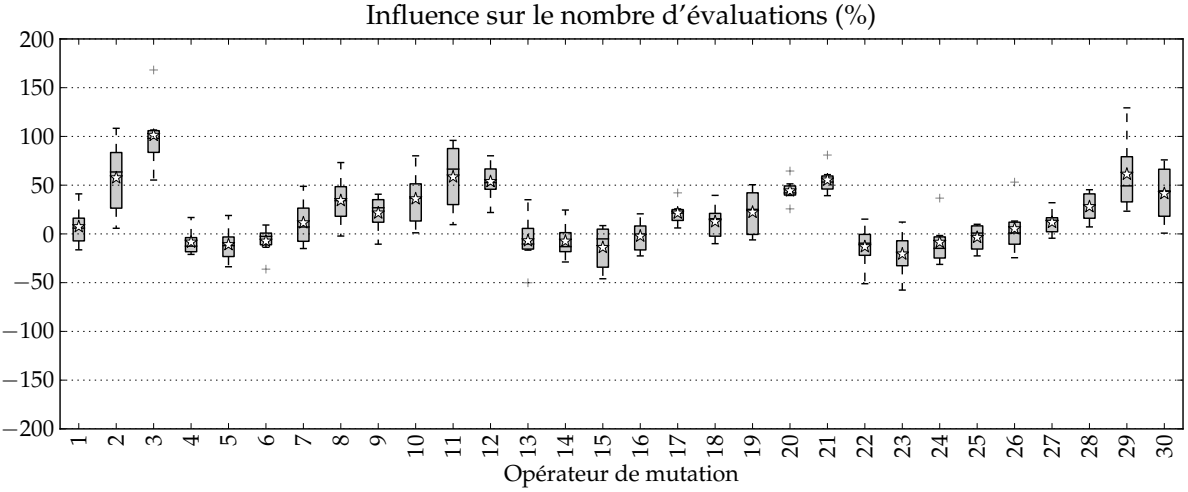


Figure G.3 – Comparaison du nombre d'évaluations par opérateur de mutation uniforme (voir Table G.1).

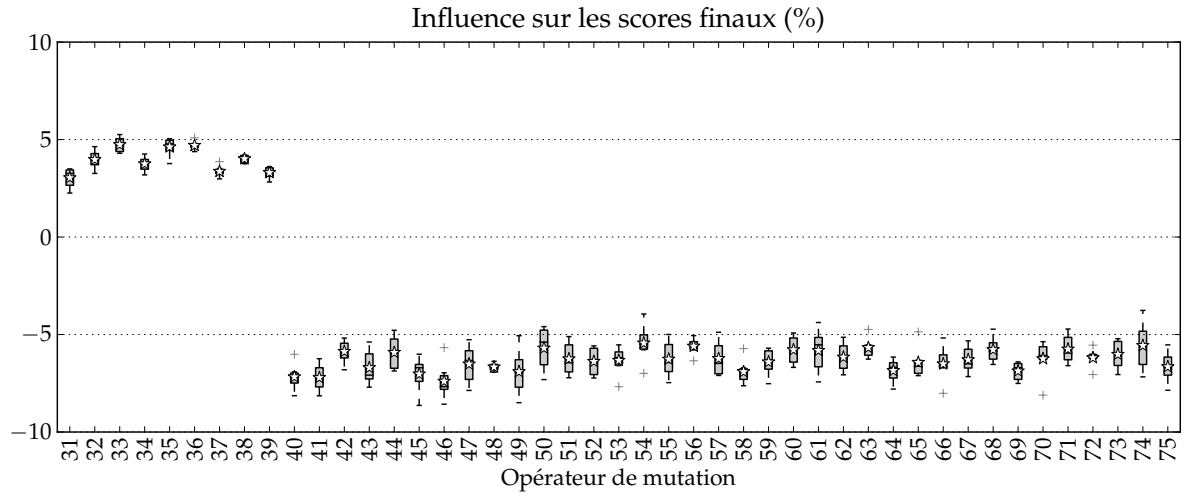


Figure G.4 – Comparaison des scores par opérateur de mutation normale (voir Table G.2).

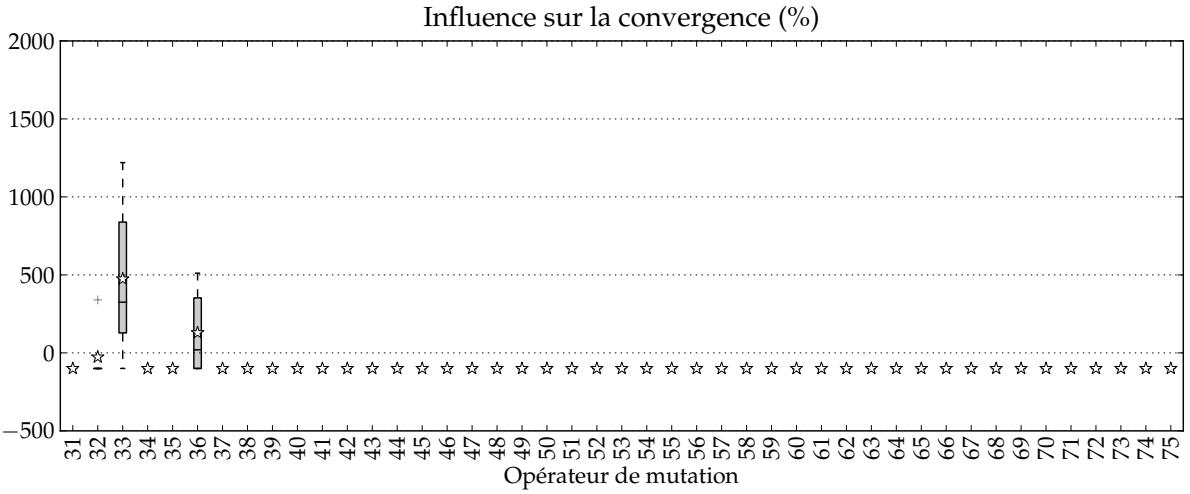


Figure G.5 – Comparaison de la convergence par opérateur de mutation normale (voir Table G.2).

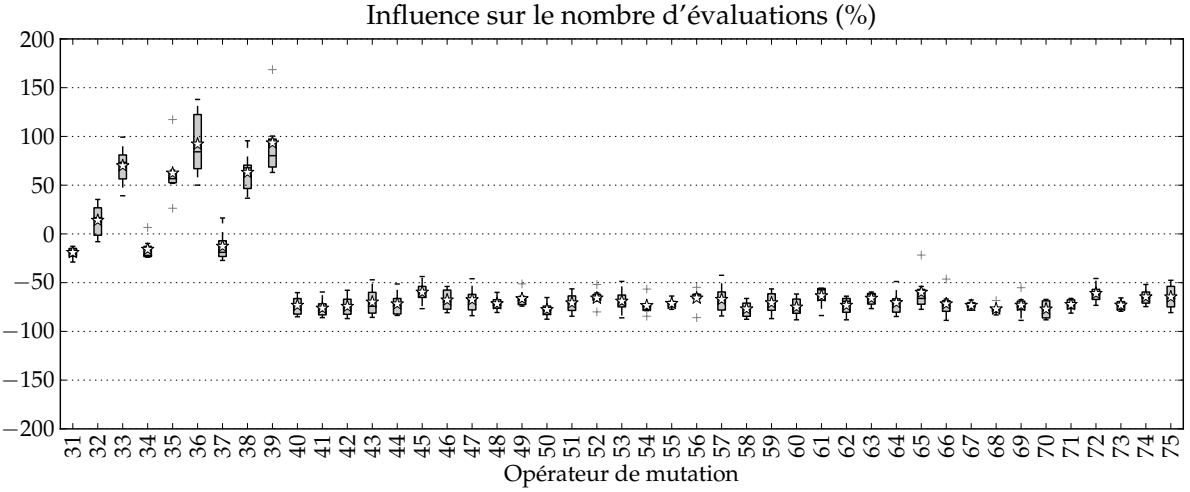


Figure G.6 – Comparaison du nombre d'évaluations par opérateur de mutation normale (voir Table G.2).

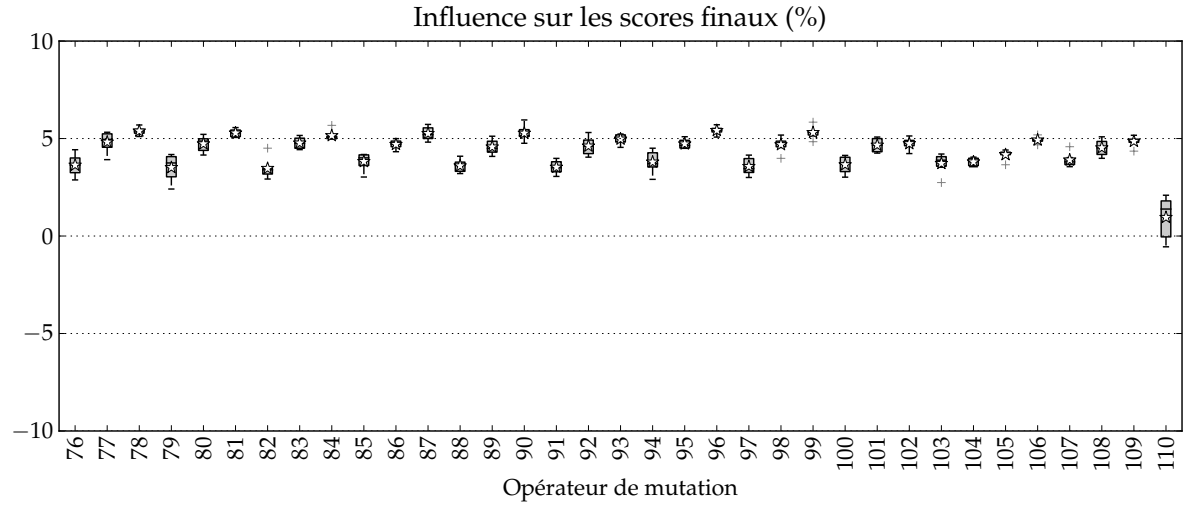


Figure G.7 – Comparaison des scores par opérateur de mutation non-uniforme et autres approches (voir Tables G.3 et G.4).

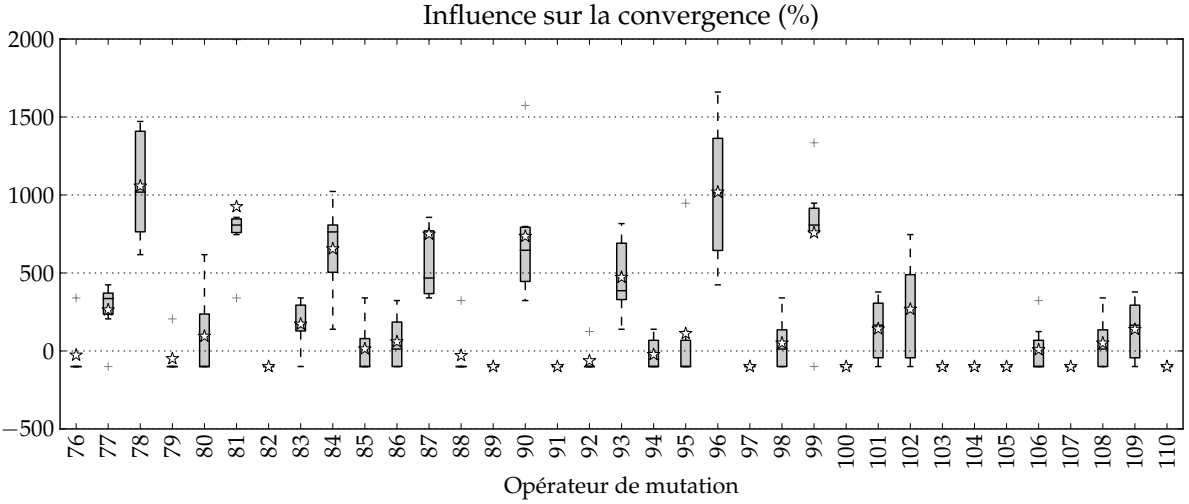


Figure G.8 – Comparaison de la convergence par opérateur de mutation non-uniforme et autres approches (voir Tables G.3 et G.4).

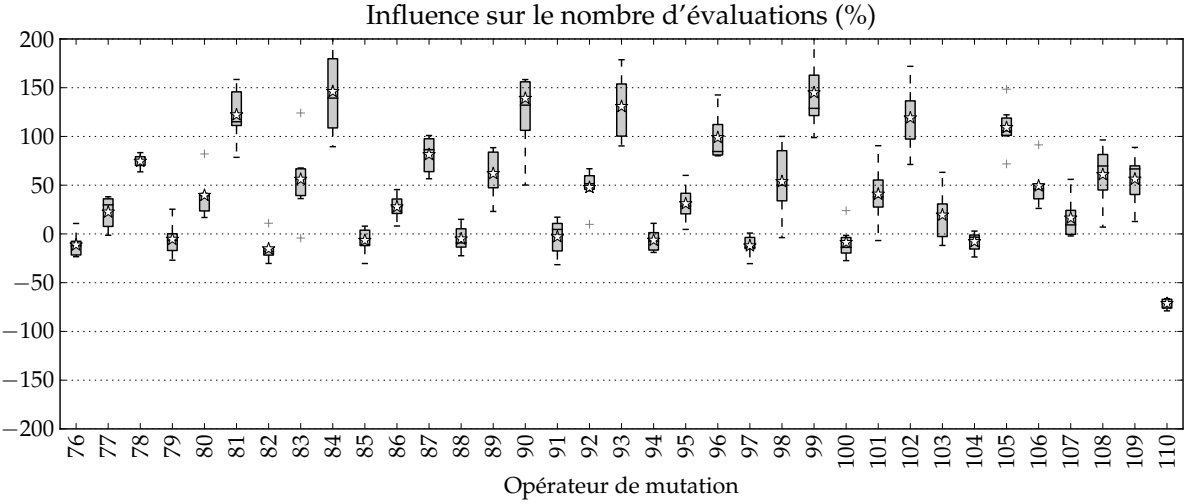
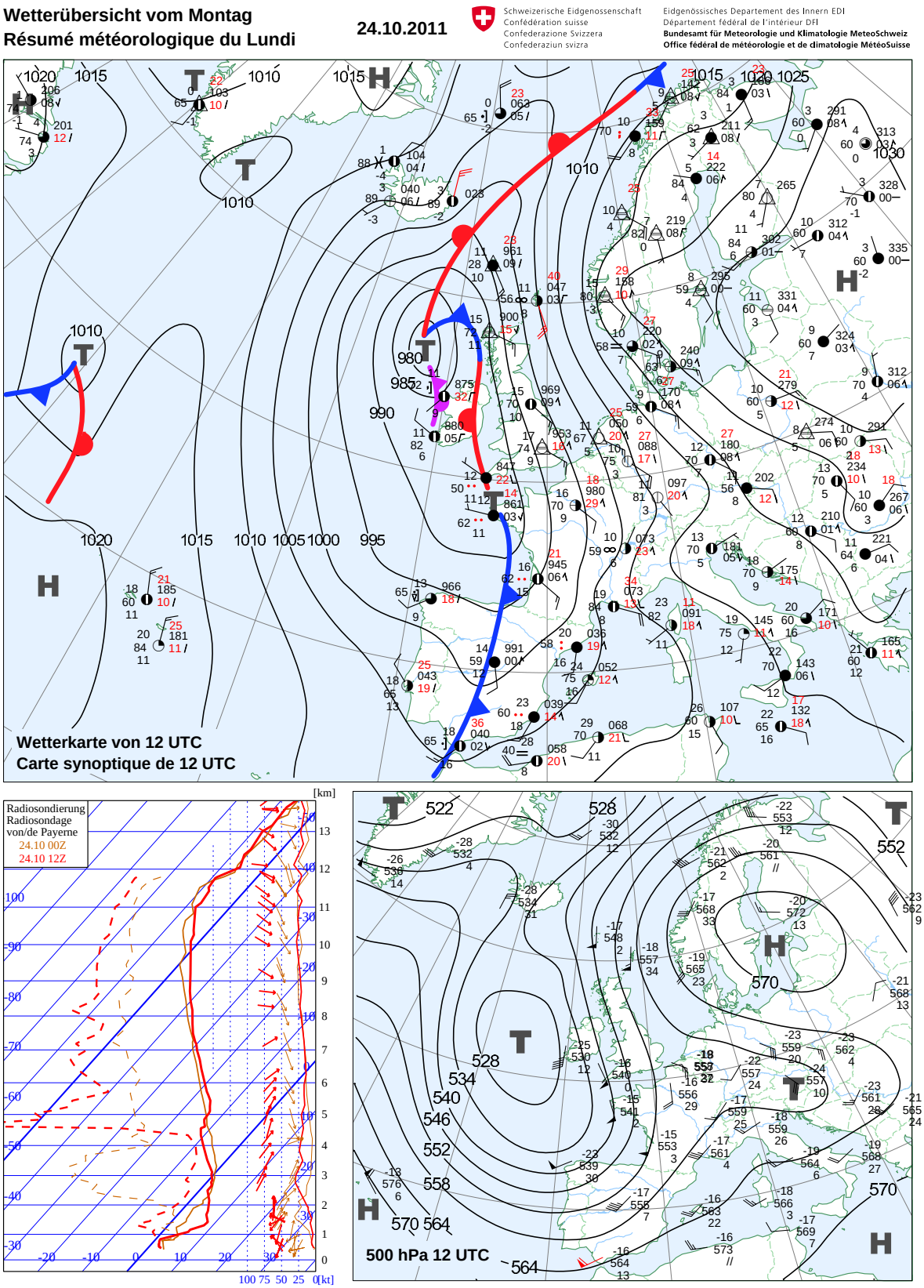


Figure G.9 – Comparaison du nombre d'évaluations par opérateur de mutation non-uniforme et autres approches (voir Tables G.3 et G.4).

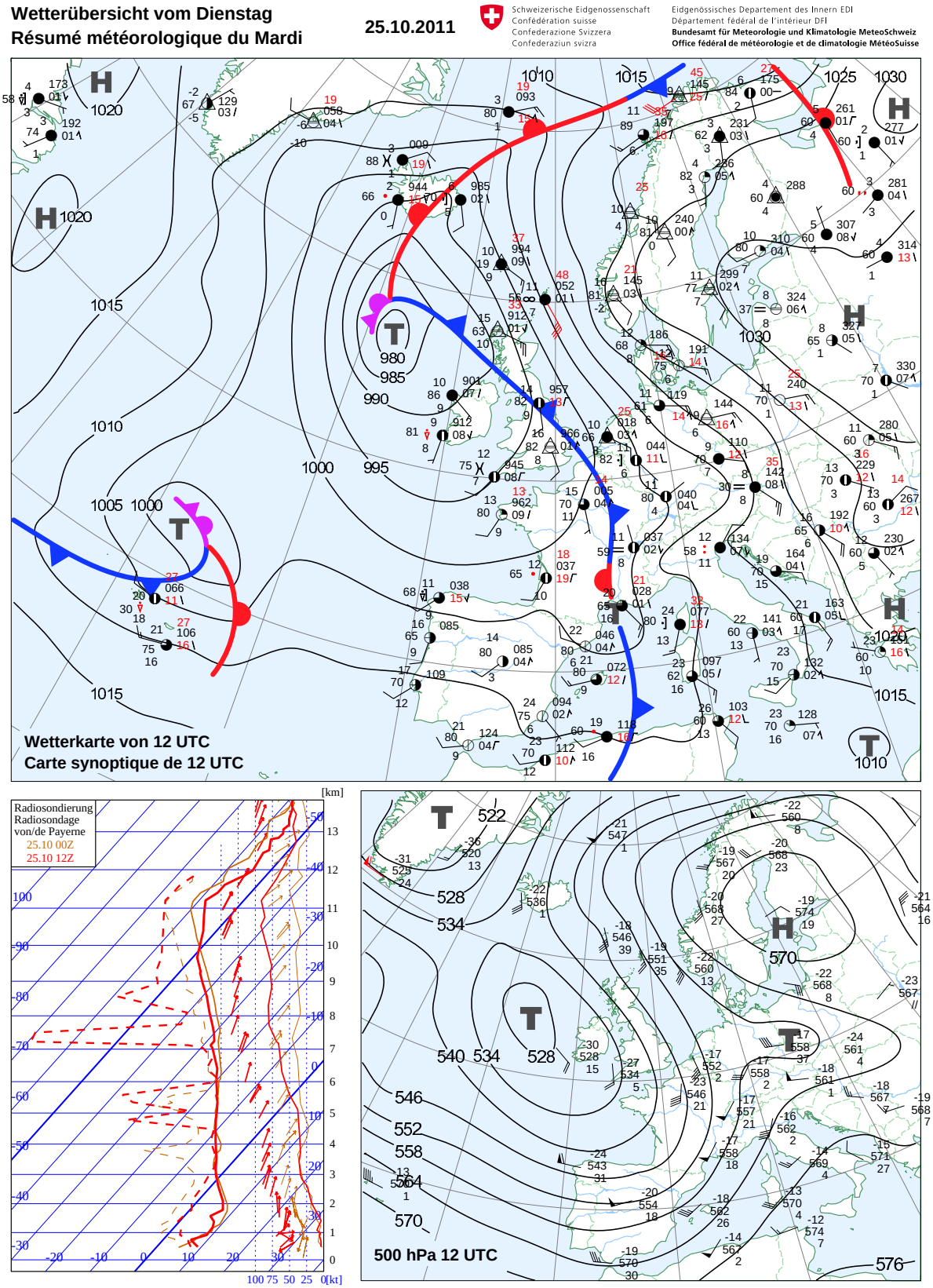
Annexe H

Bulletins météorologiques des situations d'intérêt lors de la période de prévision opérationnelle



Wetterübersicht mit Karten + Daten ab Telefax Polling / Bulletin météorologique (cartes et données) par télefax polling (Fr. 1.50 / Min.) 0900 162 244
Abonnement: MeteoSchweiz, F. Schacher, Postfach 514, 8044 Zürich

Figure H.1 – Bulletin météorologique du 24 octobre 2011 (source : MétéoSuisse).



Wetterübersicht mit Karten + Daten ab Telefax Polling / Bulletin météorologique (cartes et données) par télefax polling (Fr. 1.50 / Min.) 0900 162 244
Abonnement: MeteoSchweiz, F. Schacher, Postfach 514, 8044 Zürich

Figure H.2 – Bulletin météorologique du 25 octobre 2011 (source : MétéoSuisse).

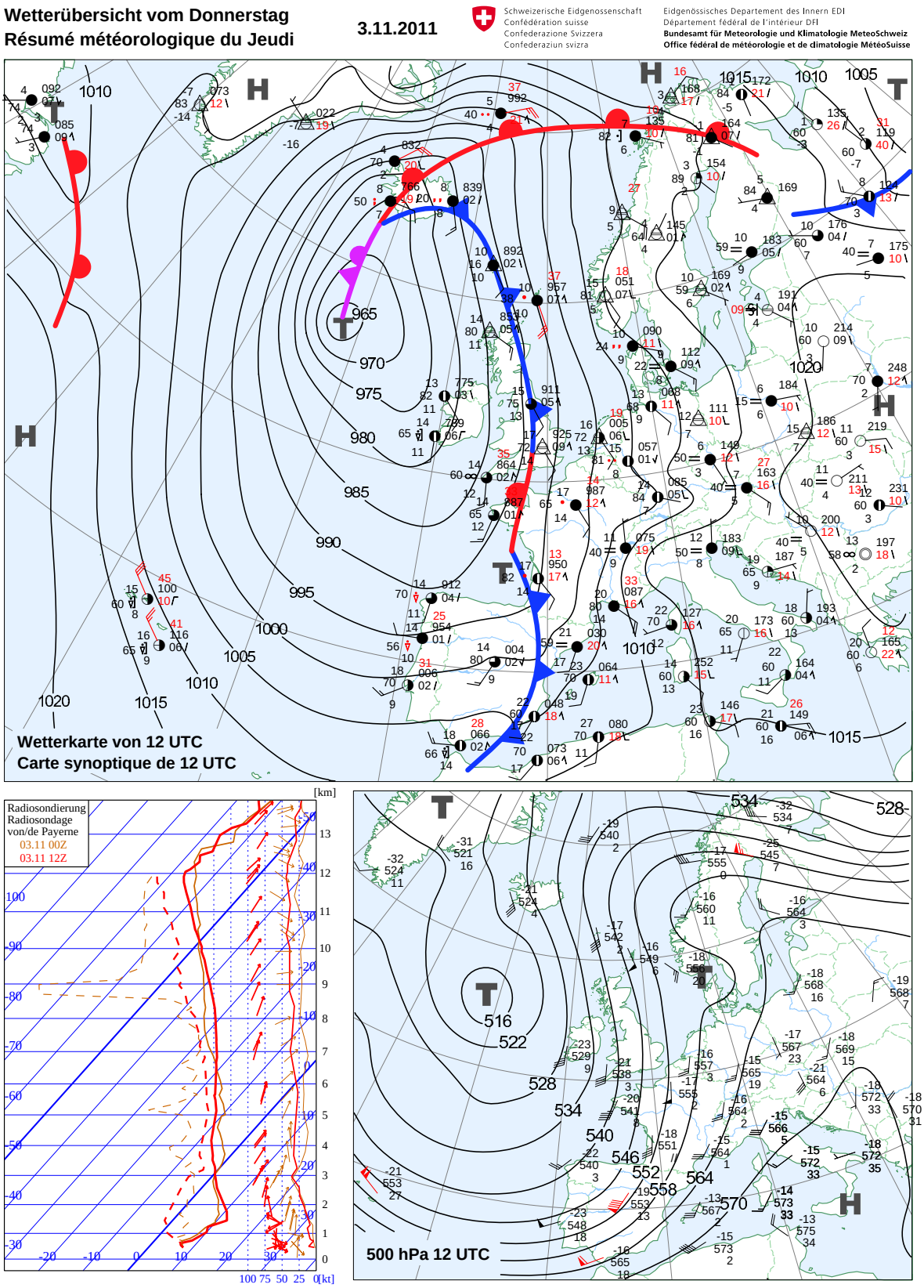
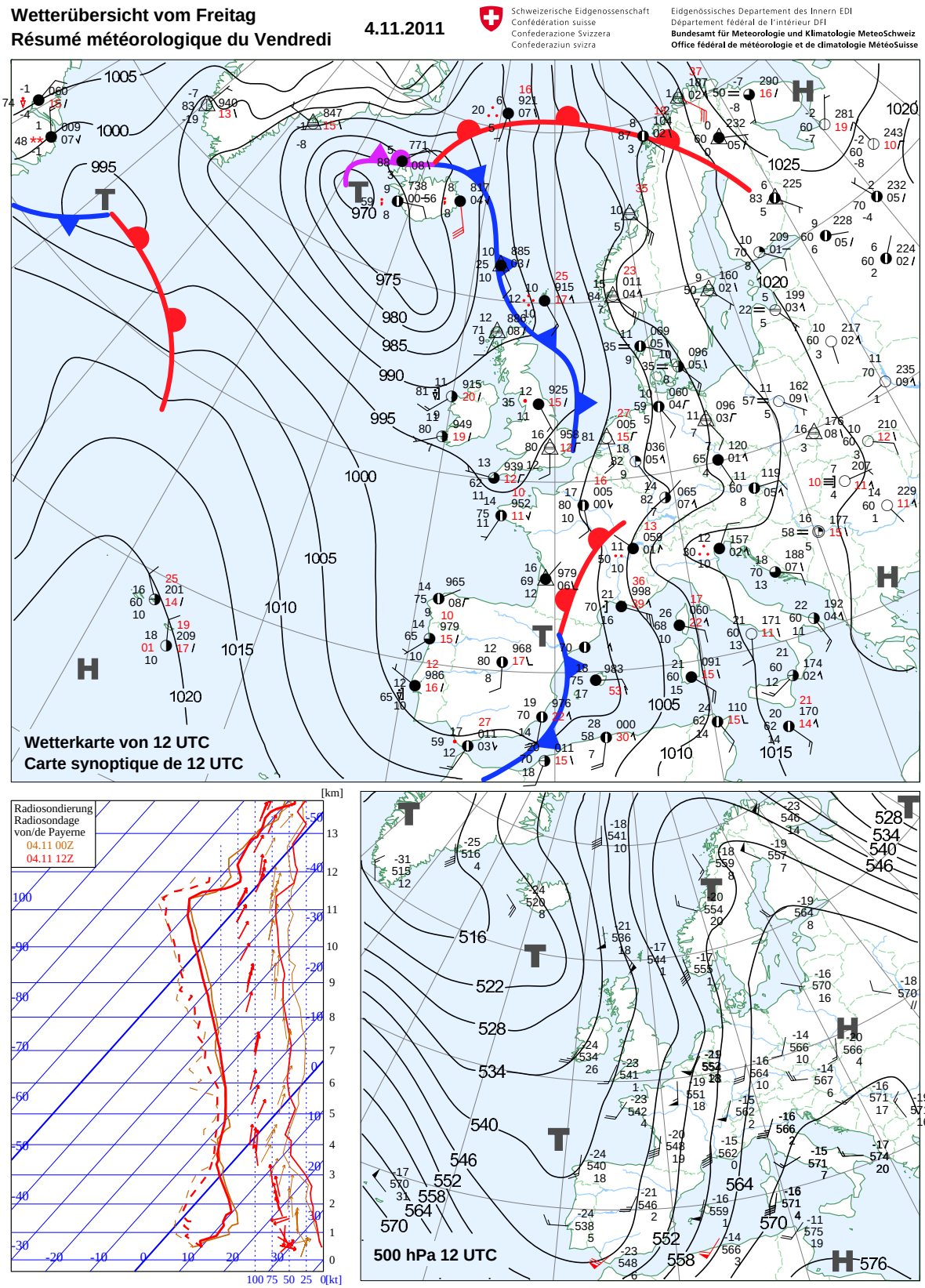
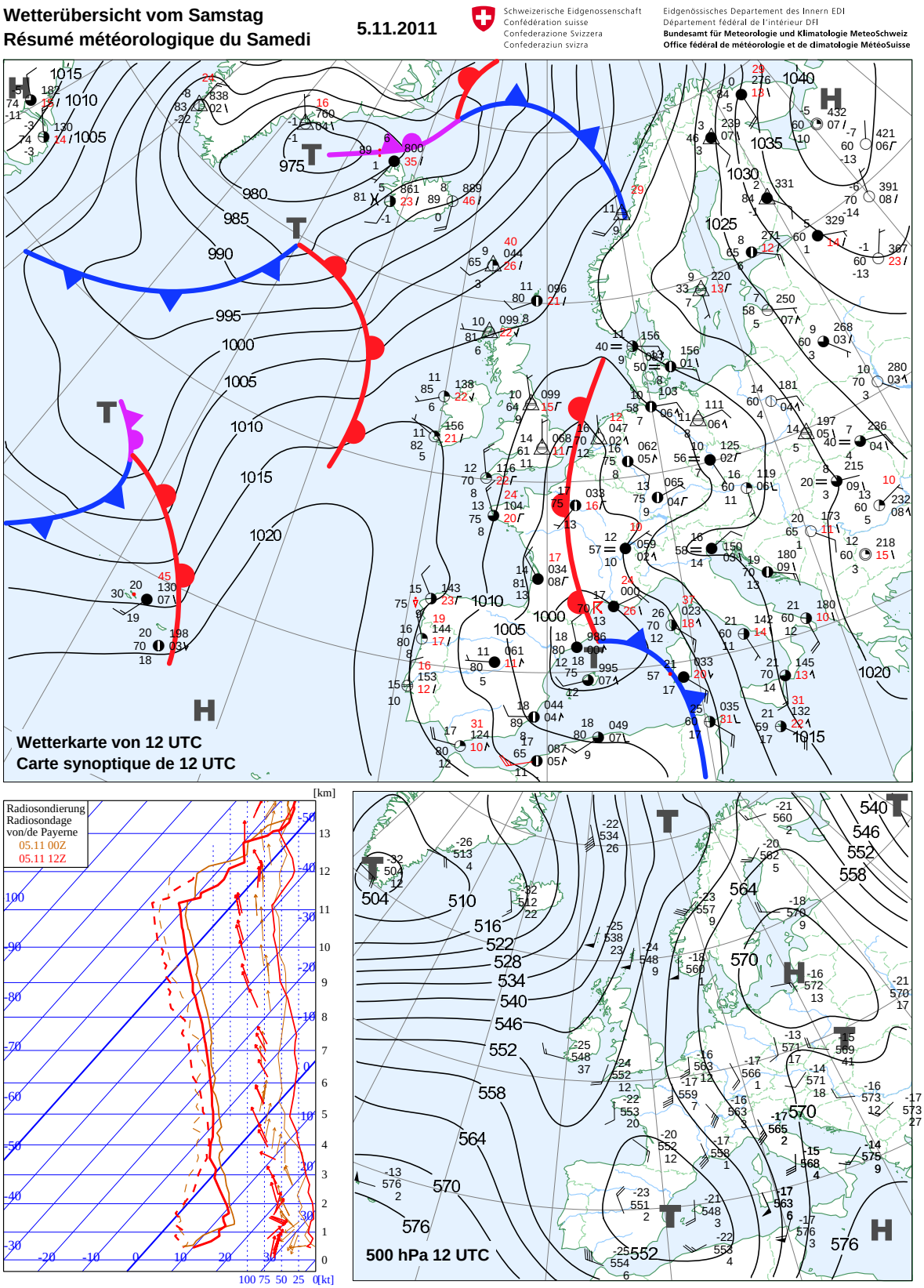


Figure H.3 – Bulletin météorologique du 3 novembre 2011 (source : MétéoSuisse).



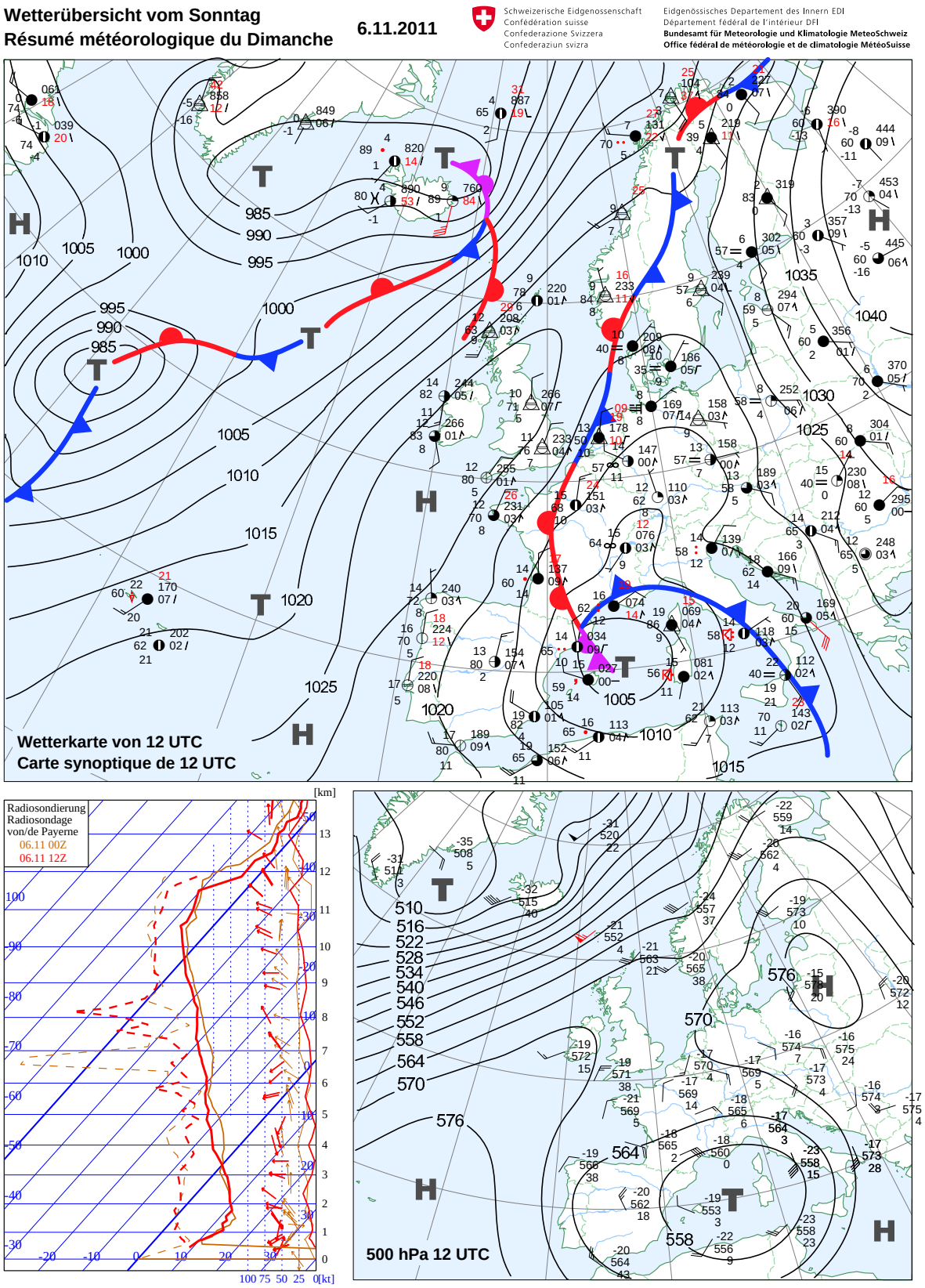
Wetterübersicht mit Karten + Daten ab Telefax Polling / Bulletin météorologique (cartes et données) par télefax polling (Fr. 1.50 / Min.) 0900 162 244
Abonnement: MeteoSchweiz, F. Schacher, Postfach 514, 8044 Zürich

Figure H.4 – Bulletin météorologique du 4 novembre 2011 (source : MétéoSuisse).



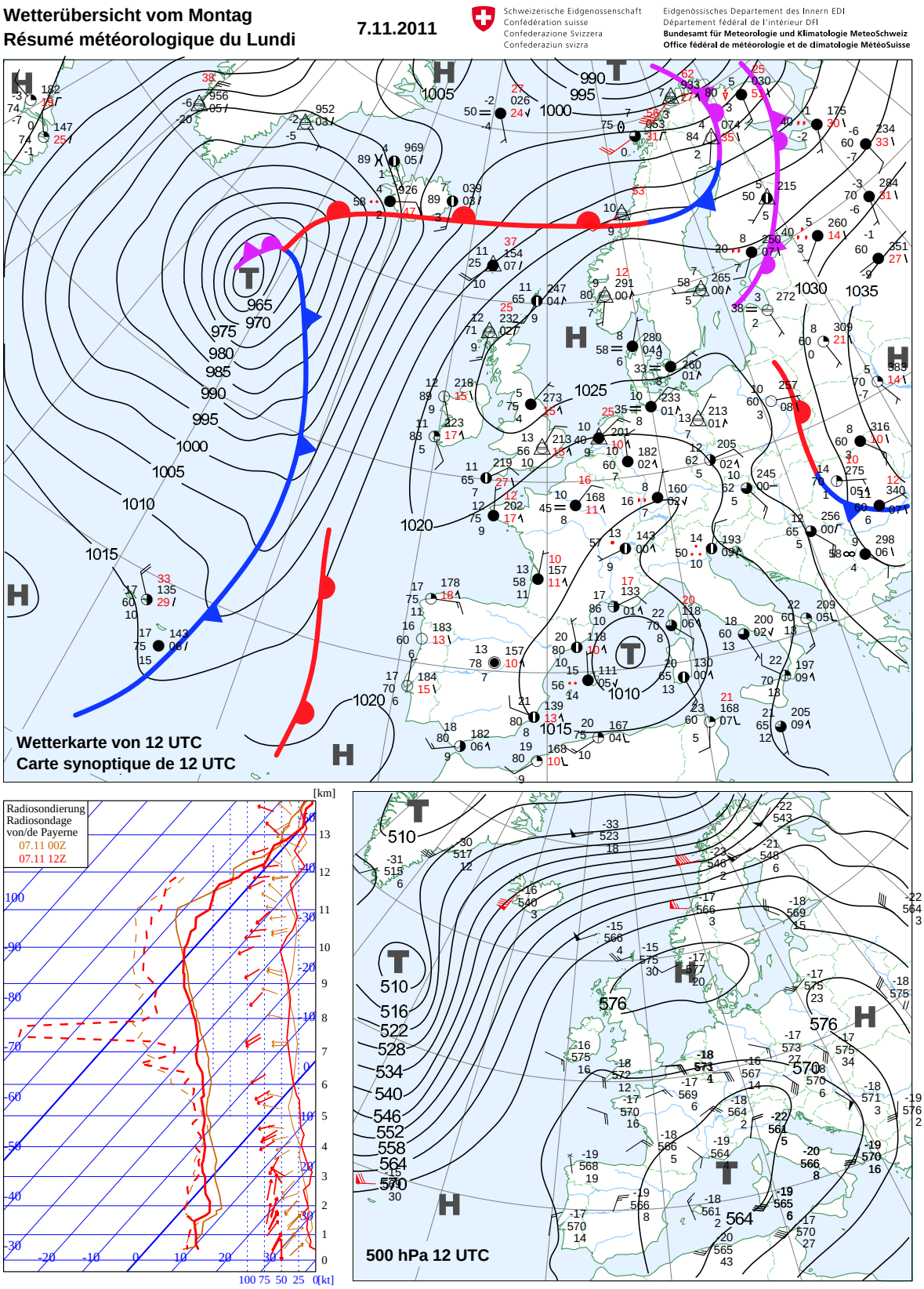
Wetterübersicht mit Karten + Daten ab Telefax Polling / Bulletin météorologique (cartes et données) par télefax polling (Fr. 1.50 / Min.) 0900 162 244
Abonnement: MeteoSchweiz, F. Schacher, Postfach 514, 8044 Zürich

Figure H.5 – Bulletin météorologique du 5 novembre 2011 (source : MétéoSuisse).



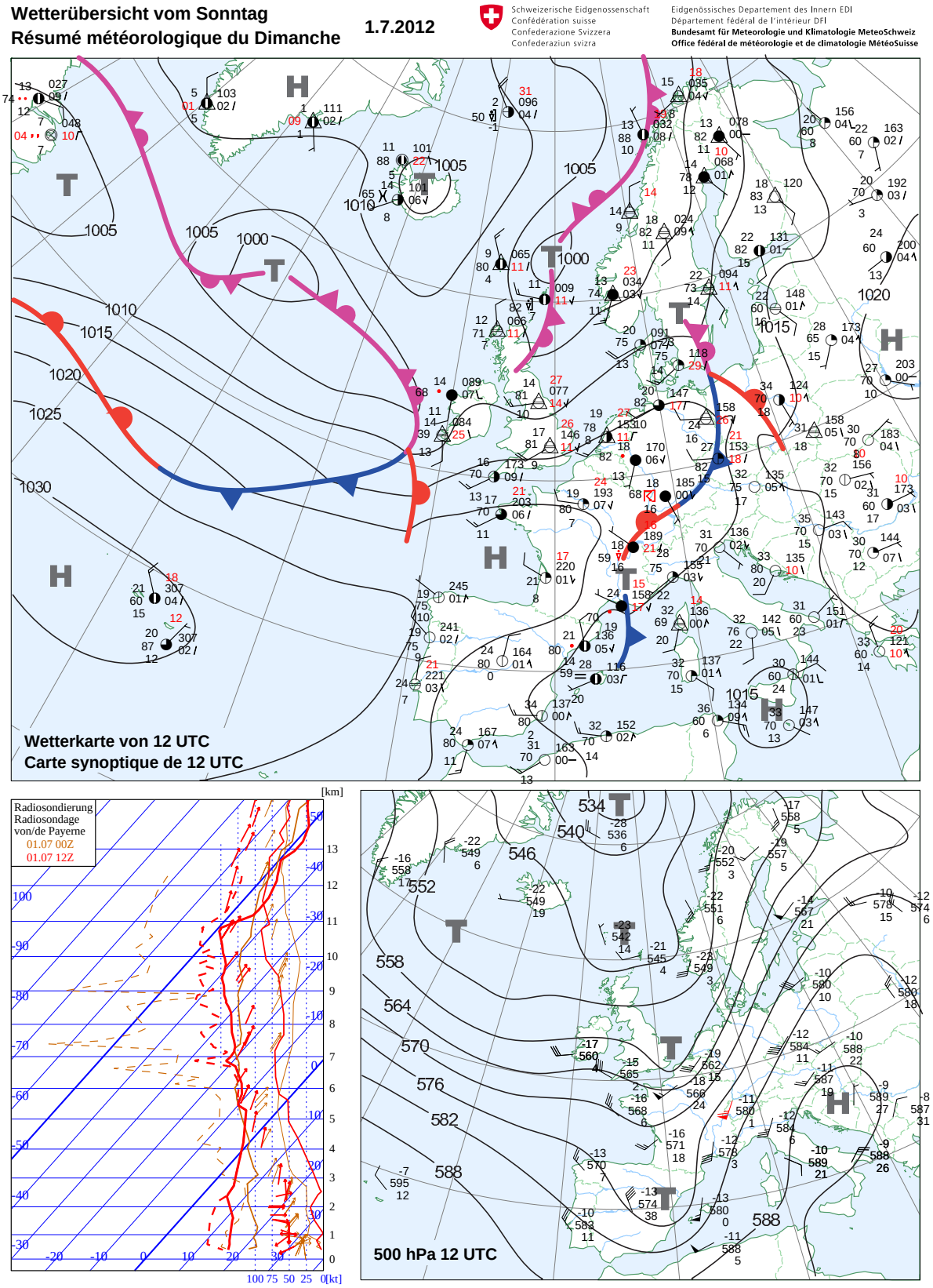
Wetterübersicht mit Karten + Daten ab Telefax Polling / Bulletin météorologique (cartes et données) par télefax polling (Fr. 1.50 / Min.) 0900 162 244
Abonnement: MeteoSchweiz, F. Schacher, Postfach 514, 8044 Zürich

Figure H.6 – Bulletin météorologique du 6 novembre 2011 (source : MétéoSuisse).



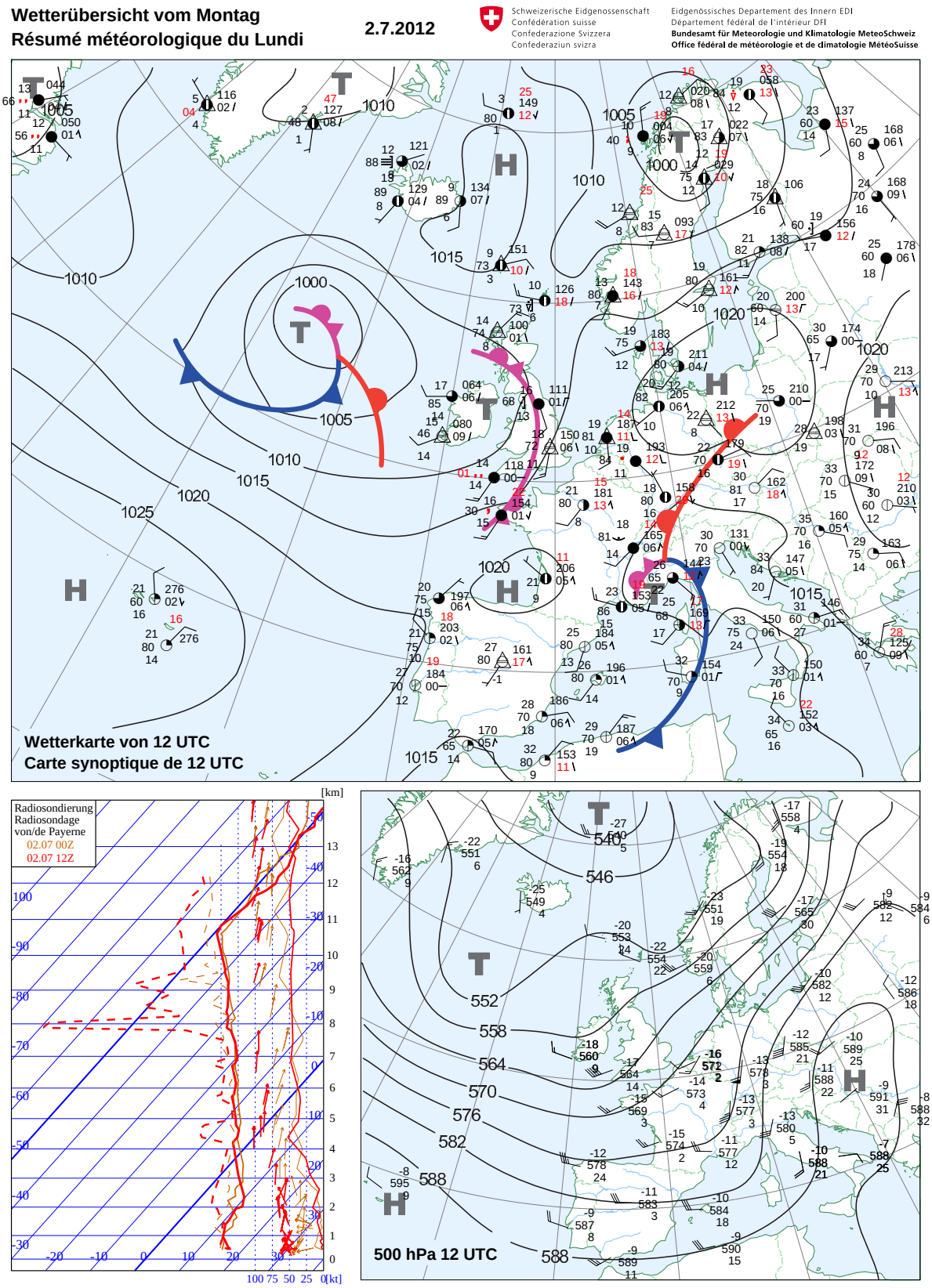
Wetterübersicht mit Karten + Daten ab Telefax Polling / Bulletin météorologique (cartes et données) par télefax polling (Fr. 1.50 / Min.) 0900 162 244
Abonnement: MeteoSchweiz, F. Schacher, Postfach 514, 8044 Zürich

Figure H.7 – Bulletin météorologique du 7 novembre 2011 (source : MétéoSuisse).



Wetterübersicht mit Karten + Daten ab Telefax Polling / Bulletin météorologique (cartes et données) par télefax polling (Fr. 1.50 / Min.) 0900 162 244
Abonnement: MeteoSchweiz, Postfach 514, 8044 Zürich

Figure H.8 – Bulletin météorologique du 1er juillet 2012 (source : MétéoSuisse).



Wetterübersicht mit Karten + Daten ab Telefax Polling / Bulletin météorologique (cartes et données) par télefax polling (Fr. 1.50 / Min.) 0900 162 244
Abonnement: MeteoSchweiz, Postfach 514, 8044 Zürich

Figure H.9 – Bulletin météorologique du 2 juillet 2012 (source : MétéoSuisse).