



HAL
open science

Climatologie des pluies de relief en région méditerranéenne

Mélody Ollagnier

► **To cite this version:**

Mélody Ollagnier. Climatologie des pluies de relief en région méditerranéenne. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. <dumas-01653096>

HAL Id: dumas-01653096

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01653096v1>

Submitted on 6 Jan 2022

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.



HAL Authorization

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de
l'ENGEES

CLIMATOLOGIE DES PLUIES DE RELIEF EN RÉGION MÉDITERRANÉENNE



Maître de stage : Sandrine Anquetin ⁽¹⁾

Encadrants de stage : Etienne Leblois ⁽²⁾, Sandrine Anquetin ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), Université de Grenoble (CNRS, UJF, IRD, G-INP), Grenoble, France

⁽²⁾ Institut national de Recherche en Science et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA), UR Hydrologie-Hydraulique, Lyon, France



Mélody OLLAGNIER

**Promotion HERAULT
2010/2013**

Remerciements

J'ai eu le plaisir de réaliser mon Travail de Fin d'Etudes, d'une part dans le cadre de ma formation d'ingénieur de l'ENGEES, et d'autre part dans le cadre de mon double diplôme de Master 2 Recherche Science de la Terre et de l'Environnement – spécialité Eau, Climat, Environnement (Université Joseph Fourier, Grenoble).

Pendant ces cinq derniers mois de stage, de nombreuses personnes m'ont donc épaulée dans mon travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier ma maître de stage, Sandrine Anquetin, de m'avoir accueillie au sein de l'équipe HMCI (HydroMétéorologie, Climat et Impacts) du LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement) à Grenoble. Merci aussi pour son soutien et pour son aide dans l'élaboration de ce rapport.

De plus je remercie vivement le premier encadrant de ce stage, Etienne Leblois, pour la patience dont il a fait preuve et pour tout le temps qu'il m'a consacré. Merci de m'avoir invitée quelques semaines à L'IRSTEA Lyon dans l'équipe Hydrologie-Hydraulique.

Merci également à toutes les personnes du LTHE et de l'IRSTEA pour leur aide dans mon apprentissage du langage de programmation R.

Enfin, merci à Mme MONTERO et à Mme BERNARD de l'ENGEES d'avoir su me guider tout au long de ce stage. Merci à l'ENGEES de m'avoir laissée découvrir cette année le monde de la recherche.

Résumé

Climatologie des pluies de relief en région méditerranéenne

Le régime pluviométrique d'une région est associé à une circulation atmosphérique qui conduit à des apports pluviométriques saisonniers et répartis de façon hétérogène sur la région. La région Cévennes-Vivarais est particulièrement touchée par des pluies cévenoles en automne provoquant des crues éclair dévastatrices. Le régime pluviométrique de cette région diffère si on est en montagne ou non. C'est une région dite « hétérogène ». Dans ce projet nous proposons une démarche scientifique visant à reproduire le régime pluviométrique de la région Cévennes-Vivarais en prenant en compte l'hétérogénéité de cette région. Pour ce faire nous nous appuyons sur la classification de Kohonen afin d'obtenir 16 classes d'atmosphère et de pluie. Les liens entre les types de temps et les pluies sont étudiés sur la région Cévennes-Vivarais. Par ailleurs, cette région a été divisée en trois zones homogènes (plaine, piémont, montagne). La construction d'une classification de consensus à partir des classifications de pluie réalisées sur ces trois zones (approche de Condorcet), a permis de réaliser une simulation du régime pluviométrique d'une région hétérogène (la région Cévennes-Vivarais), respectant les régimes pluviométriques des trois zones. De plus, grâce à la classification de consensus, les classifications locales de pluie sur les trois zones sont raccrochées à une classification d'atmosphère tout en préservant les liens entre les classifications locales de pluie.

Mots-clés : Climat régional, Méditerranée, Pluies cévenoles, Classification, Contingence

Abstract

Climatology of rainy precipitations in mountainous areas of the Mediterranean region

The rainfall in a region is dependent on atmospheric circulation that leads to a specific rainfall over a region. The Cévennes-Vivarais region is particularly affected by the intense rainfall events causing devastating flash floods. The rainfall in this region is different if you are in the mountains or not. Therefore it is "called" as a heterogeneous region. In this work we propose a scientific approach to reproduce the rainfall regime in the Cévennes-Vivarais region that depends on the heterogeneity of the region. This work is based on the Kohonen classification in order to obtain 16 classes of atmosphere and rain. The links between weather types and rain types are studied on the Cévennes-Vivarais region. In addition, this region was divided into three homogeneous areas (plain, piedmont and mountain). The classification of consensus is built from the classification of rain made on these three areas (Condorcet approach) we performed a simulation of rainfall over a heterogeneous region (Cévennes-Vivarais region) respecting the rainfall of the three zones. Moreover, thanks to the classification of consensus, local classifications of rain on three areas have been hung up in classification atmosphere while maintaining links between local classifications of rain.

Key words: Regional Climate, Mediterranean, Cévennes-Vivarais region, heavy precipitation, Classification, Contingency

Table des matières

1	Introduction	19
2	Contexte de l'étude	21
2.1	Région et Climat	21
2.1.1	La Situation Géographique	21
2.1.2	Le Climat.....	21
2.2	Données pluviométriques	24
2.3	Données atmosphériques.....	26
3	Méthodes et outils.....	31
3.1	La classification de Kohonen.....	31
3.2	Modèle de Markov Caché.....	33
3.3	Analyse de la contingence.....	34
3.3.1	Test du χ^2	34
3.3.2	Entropie de Shannon	35
3.3.3	Analyse Factorielle des Correspondances (AFC).....	36
3.3.4	Analyse des Correspondances Multiples (ACM)	36
3.4	Construction d'une classification de Consensus	37
4	Résultats	41
4.1	Description des résultats	41
4.1.1	Classifications des données pluviométriques	41
4.1.2	Classifications des données atmosphériques.....	42
4.1.2.1	La Grille atmosphérique de 25 points	42
4.1.2.2	Le « Radiosondage 45 »	44
4.2	Etude de la contingence entre l'Atmosphère et la Pluie de la région « CV »	46
4.3	Etude d'évènements catastrophiques provoqués par des pluies cévenoles dans la région Cévennes-Vivarais.....	48
4.4	Résultats du Modèle de Markov Caché sur la pluie de la région « CV »	50
4.5	Vers une simulation du régime pluviométrique de la région Cévennes-Vivarais respectant l'hétérogénéité de cette région.....	54
5	Discussion et conclusion.....	57
6	Références.....	59
7	Annexes	63

Liste des Figures

Figure 1: cartes de la région Cévennes-Vivarais : a) Situation en France; b) Départements (encadré rouge); c) Topographie.....	21
Figure 2: Formation de pluies orographiques (source : www.prim.net).....	22
Figure 3: Cartes des précipitations centennales d'automne (en couleur) a) en 1h et b) en 24h. Le relief est représenté par les niveaux de gris (Extraite de Molinié et al., 2012)	22
Figure 4: Localisation des pluviomètres journaliers OHMCV par des points verts sur le bassin du Rhône (HydroDem, Leblois)	24
Figure 5: Disponibilité des données pluviométriques quotidiennes en fonction des mois.....	24
Figure 6: a) Localisation de la région « CV » et b) détails géographiques de la région : relief (couleur), principales rivières (linéaire bleu), principales villes (carrés), principaux bassins (linéaire noir et nom du cours d'eau en bleu). La région « CV » sera dans la suite « découpée » en trois zones : montagne (3), piémont (2) et plaine (1) délimités par les traits rouges (Godart, 2009)	25
Figure 7: Résolution horizontale de la grille gaussienne réduite N80 des ERA40 pour l'hémisphère nord.....	26
Figure 8: localisation du « Radiosondage 45 » (Google Earth) en a). Grille atmosphérique de 25 points (de A à Y) centrée sur le point M 45.0N ; 5.0E (ERA 40) en b)	27
Figure 9: Représentation de la variance pour les 10 premiers axes factoriels du bloc Z en a) ; du bloc T en b) ; et du bloc Hr en c)	29
Figure 10 : Cartes des noyaux des 16 classes de pluie de la région « CV » : la dispersion de la pluie $m(ind)$, la moyenne des pluies totale $m(ptot)$ en mm, la moyenne des pluies non nulles $m(pnn)$ en mm, l'écart type relatif $cv(pnn)$	41
Figure 11: Pourcentage d'individus dans chaque classe de la région « CV »	42
Figure 12 : Représentation des noyaux des 16 classes de la Grille atmosphérique à 850 hPa. En a) Température en °C ; en b) Humidité relative en % ; en c) Géopotential en hPa ..	43
Figure 13 : Cartes des noyaux à 850 hPa des 16 classes du « Radiosondage 45 » : a) la température (°C) ; b) Humidité Relative (%) ; c) l'eau précipitable (mm) ; d) l'angle de direction du vent $teta$ (°) : angle de direction du vent selon les normes de météorologie (0° : vent du Nord ; 90° : vent d'est ; 180° : vent du sud, 270° : vent d'ouest); e) la force du vent (m/s)	44
Figure 14 : Emagrammes de la classe atmosphérique A15 en a) et de la classe A8 en b) ..	45
Figure 15 : Pourcentage des classes de pluie engendrées par les classes d'atmosphère ...	47

Figure 16 : AFC réalisée sur le tableau de contingence « Radiosondage 45 / Pluie CV ». Représentation sur le premier plan factoriel (91,7 % de variance).	47
Figure 17 : Pourcentage de dates d'évènements catastrophiques dans chaque classe a) pour le « Radiosondage 45 » ; b) pour la pluie sur la région « CV ».....	48
Figure 18 : Représentation de la saisonnalité de la classe de pluie P13 en a), de la classe de pluie P14 en b) et de la classe d'atmosphère A15 en c).....	49
Figure 19 : Pourcentage des classes de pluie engendrées par les classes d'atmosphère pour les évènements catastrophiques.....	49
Figure 20 : Caractérisation des 4 EC. En a) m(ind) (entre 0 et 1) ; en b) m(pnn) (mm).....	51
Figure 21 : Saisonnalité de l'EC3 en a) et de l'EC4 en b)	51
Figure 22 : Pourcentage des EC de pluies engendrés par les classes d'atmosphère	52
Figure 23 : AFC réalisée sur le tableau de contingence des classes du « Radiosondage 45 » et des EC des Pluie de la région « CV». Représentation sur le premier plan factoriel (96,3 % de variance).....	52
Figure 24 : Hyétogrammes au pas de temps journalier issus d'une simulation du régime pluviométrique annuel sur la région Cévennes Vivarais (Leblois).....	53
Figure 25 : ACM réalisée sur les calendriers des classes de pluie sur la zone a) « plaine », b) « piémont », c) « montagne ». Représentation sur le premier plan factoriel.....	54
Figure 26 : ACM sur les calendriers des 3 zones (v1 = plaine, v2 = piémont, v3 = montagne) décrits par les 17 classes (m1 à m17) et la classification de consensus (C1 à C16). Représentation sur le premier plan factoriel (10% de variance).	55
Figure 27 : Pourcentage des classes de consensus engendrées par les classes d'atmosphère.....	55
Figure 28 : Hyétogrammes au pas de temps journalier issus d'une simulation du régime pluviométrique annuel coordonnée sur les trois zones : a) en « plaine », b) en « piémont », c) en « montagne » (Leblois).....	56

Liste des Tableaux

Tableau 1 : nombre de pluviomètres au sein de chaque zone d'étude.	25
Tableau 2 : Représentation de la proportion de variance et de la proportion de la variance cumulée sur les 5 premiers axes factoriels (PC) pour le bloc Z en a) ; le bloc T en b) ; et le bloc Hr en c)	28
Tableau 3 : exemple de calcul d'entropie sur le début d'un tableau de contingence. En a) Tableau de contingence en effectifs ; en b) Tableau de contingence en probabilité sur les lignes ; en c) Calcul de des entropies par lignes.	36
Tableau 4 : Approche par consensus de Condorcet appliquée aux 10 premiers jours des calendriers sur les zones « plaine », « piémont, « montagne »	37
Tableau 5 : Tableau de contingence entre la classification de consensus et les classifications sur les zones a) « Plaine », b) « Piémont » et c) « Montagne »	38
Tableau 6 : entropies calculées sur a) les classes de pluie sachant les classes d'atmosphère de la Grille ;b) les classes de pluie sachant les classes d'atmosphère du Radiosondage 45 ; c) les classes d'atmosphère sachant les classes de pluie.	46
Tableau 7 : matrice d'expression Ψ reclassée par ordre croissant de moyenne des pluies non nulles (en probabilités) de la pluie sur le domaine « Ouest ».....	50
Tableau 8 : matrice de transition exprimée en probabilités sur les lignes	51

Liste des Annexes

Annexe 1 : Organigramme du LTHE	63
Annexe 2 : Calculs des descripteurs statistiques de pluie pour chacune des dates	63
Annexe 3 : Noyaux des classes de pluie sur la région « CV »	67
Annexe 4 : Emagrammes qualifiant les 16 classes du « Radiosondage 45 »	69
Annexe 5 : Liste des évènements catastrophiques provoqués par des pluies cévenoles en France (23 jours) et classes de pluie (région « CV ») et d'atmosphère (« radiosondage 45 ») pour chaque date.	71
Annexe 6 : Extrait du calendrier des 17 classes de pluie sur la région « CV » et du calendrier des Etats cachés (EC) correspondant (10 premiers jours)	73
Annexe 7 : Noyaux des classes de pluie sur les zones « Plaine », « Piémont » et « Montagne »	75
Annexe 8 : Tableaux de contingence entre la classification de consensus et les classifications sur les zones « plaine », « piémont », « montagne »	77

Liste des Acronymes

ACM	Analyse des Correspondances Multiples
ACP	Analyse en Composante Principale
AFC	Analyse Factorielle des Correspondances
CV	Cévennes-Vivarais
EC	Etat Caché
GIEC	Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HMM	Hidden Markov's Models
OHMCV	Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes Vivarais
SCM	Système Convectifs de Meso-échelle
SOM	Self-Organizing Map

1 Introduction

J'ai réalisé mon Travail de Fin d'Etudes au LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement) de Grenoble sous la tutelle de Sandrine Anquetin, Chef de l'équipe HMCI (HydroMétéorologie, Climat et Impacts). Le LTHE est un laboratoire de 120 personnes (Organigramme en *Annexe 1*) consacré à la recherche sur le cycle de l'eau et ses liens avec le climat et l'environnement.

Le régime pluviométrique d'un territoire est associé à des circulations atmosphériques qualifiées par des types de temps. L'ensemble de ces types de temps conduisent à des structures spatiales et temporelles de précipitations qui vont donc définir le régime pluviométrique. Ce dernier a un impact à la fois sur la ressource en eau et sur les risques hydrologiques.

La région méditerranéenne du sud-est de la France est touchée par des pluies cévenoles (précipitations atteignant plus de 200 mm en moins de 24 heures), le plus souvent en automne (Nuissier et al., 2008 ; Ducrocq et al., 2008 ; Artigue et al., 2010 ; Nuissier et al., 2012). Ces pluies conduisent parfois à des crues éclairs dévastatrices. Les inondations de Vaison la Romaine (22 septembre 1992), de l'Aude (12-13 novembre 1999), du Gard (8-9 Septembre 2002), ou plus récemment du Var (15 juin 2010) sont quelques exemples de ce type de situation. Ces inondations peuvent malheureusement parfois tuer et ont un fort impact sur l'économie de la région Cévennes-Vivarais (coûts de dommages supérieurs à un milliard de dollars) (Ruin et al., 2008).

Les crues éclairs sont le résultat d'une concomitance d'un aléa pluviométrique et d'un territoire propice à la concentration des écoulements, comme la région Cévennes-Vivarais, qui est une région montagneuse. Les résultats de Molinié et al. (2012) montrent que les pluies fortes s'organisent de façon particulière sur la région Cévennes-Vivarais en fonction du pas de temps auquel on regarde ces pluies. Ce résultat met en évidence que cette région impose un régime pluviométrique différent selon si on se trouve en montagne ou en plaine. C'est une région dite « hétérogène ».

L'objectif de mon stage est de **proposer une démarche scientifique visant à reproduire le régime pluviométrique sur la région Cévennes-Vivarais, en prenant en compte l'hétérogénéité de cette région**. Nous nous sommes appuyés sur des outils de classification afin de pouvoir alimenter un simulateur stochastique de pluie (Leblois et Creutin, 2013). Ce simulateur permet de restituer l'enchaînement ordinaire de la pluie par un modèle probabiliste et de mettre au point une méthode de gestion de l'aléa pluviométrique.

Cette démarche scientifique a été bâtie sur le temps présent afin de mettre en évidence les liens entre les types de temps et les pluies qui en découlent. A plus long terme, cette démarche pourra être utilisée pour déterminer l'évolution du régime pluviométrique de la région Cévennes-Vivarais, dans un contexte de changement climatique. En effet, selon l'évaluation du GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), dans son dernier rapport (GIEC, 2007), le réchauffement climatique induira une accentuation de la fréquence des pluies intenses ce qui pourrait conduire à une augmentation des crues éclair dans cette région.

Après une présentation du contexte de l'étude, du climat de la région Cévennes-Vivarais, des données atmosphériques et pluviométriques en section 2, nous abordons dans la section 3, les différentes méthodes et outils employés lors de cette étude. La section 4 est consacrée à la présentation des résultats. Nous concluons ce travail par une discussion sur la démarche scientifique proposée et une conclusion générale en section 5.

2 Contexte de l'étude

2.1 Région et Climat

2.1.1 La Situation Géographique

La région Cévennes-Vivarais est située sur le flanc sud-est du Massif Central (*Figure 1.a*). Elle est délimitée à l'est par la vallée du Rhône, à l'ouest par le méridien passant par Millau, au nord par le parallèle passant par Saint Etienne et au sud par la mer Méditerranée. Elle comprend les départements de l'Ardèche, de la Lozère, du Gard, de l'Hérault et de l'Aude (*Figure 1.b*). Elle s'étend ainsi sur environ 150km d'est en ouest et 200km du nord au sud, soit une surface totale d'environ 30000km². La région Cévennes-Vivarais est parcourue par de nombreux cours d'eau affluents du Rhône ou se jetant directement dans la mer Méditerranée. Cinq principaux bassins versants sont délimités: l'Hérault (2550km² à son exutoire à la mer); le Vidourle (800km²); le Gard (2000km²); la Cèze (1360km²) et l'Ardèche (2500km² à la confluence avec le Rhône). L'altitude du domaine varie du niveau de la mer à 1699m (Mont Lozère) sur 30km en allant vers le nord-ouest (d'où une pente d'environ 5%). La ligne de crête principale est orientée sud-ouest/nord-est. Elle est formée par les montagnes cévenoles (*Figure 1.c*).

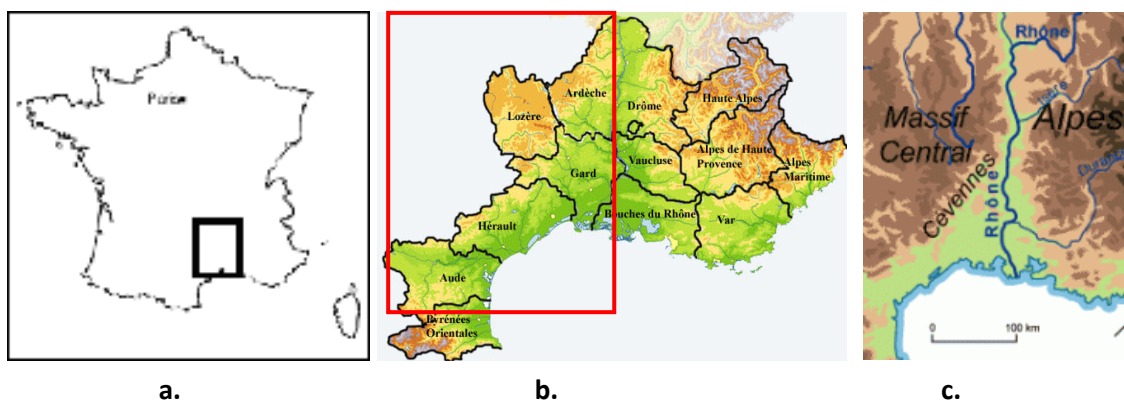


Figure 1: cartes de la région Cévennes-Vivarais : a) Situation en France; b) Départements (encadré rouge); c) Topographie

2.1.2 Le Climat

Le climat de la région Cévennes-Vivarais est un climat méditerranéen qui peut s'avérer excessif provoquant des épisodes cévenols en automne le plus souvent (Ducrocq et al., 2003) . A cette période, la Mer Méditerranée, encore chaude en automne fournit une grande quantité d'humidité à l'atmosphère. Le caractère montagneux impose également sa

signature sur le régime pluviométrique. Les « précipitations orographiques » sont des pluies déclenchées par l'ascendance d'une masse d'air humide au-dessus du relief ou renforcées par ce relief (*Figure 2*).

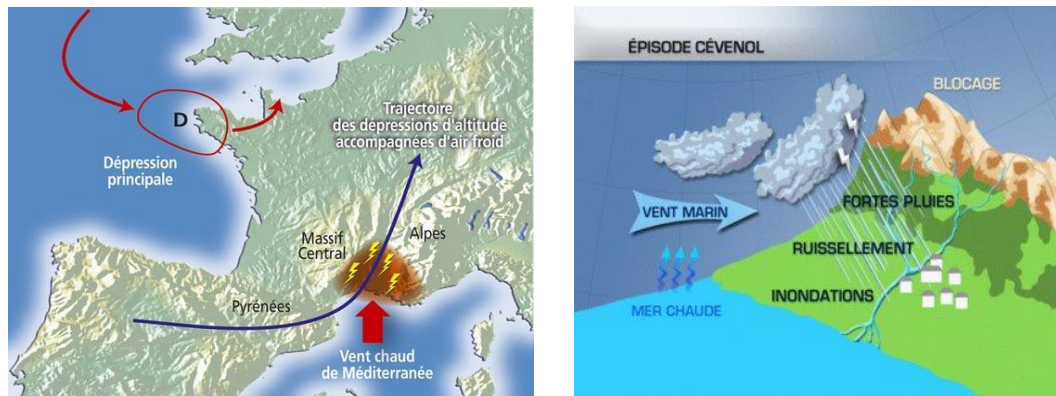


Figure 2: Formation de pluies orographiques (source : www.prim.net)

En somme, le relief joue le rôle de catalyseur de la formation de la pluie. Il freine les masses d'air, canalise l'humidité, le vent et la chaleur en certaines zones et de ce fait, déclenche ou renforce les mécanismes de convection, condensation et précipitation. (Godart, 2009). Dans la région Cévennes-Vivarais, le relief joue un rôle important dans la distribution spatiale et la quantité des précipitations (Molinié et al., 2012). En effet, la *Figure 3* montre que les plus fortes précipitations journalières (de période de retour 100 ans) sont localisées au-dessus du relief tandis que pour les précipitations horaires la signature du relief est moins visible.

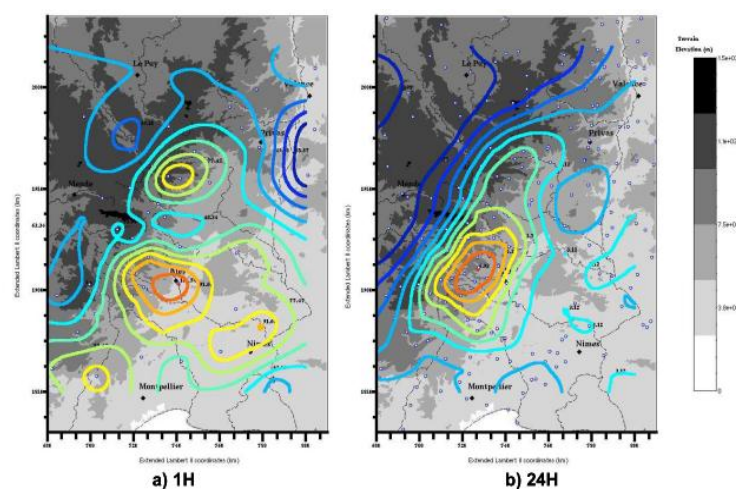


Figure 3: Cartes des précipitations centennales d'automne (en couleur) a) en 1h et b) en 24h. Le relief est représenté par les niveaux de gris (Extraite de Molinié et al., 2012)

Les fortes précipitations, dans la région Cévennes-Vivarais, sont associées à deux types de systèmes convectifs.

Il s'agit, d'une part, des **Système Convectifs de Meso-échelle (SCM)** provoquant des mouvements de convection fortement développés (Ducrocq et al., 2003 ; Ducrocq et al., 2008). Les précipitations associées aux SCM ont une extension spatiale de quelques centaines de kilomètres et ont une durée de vie de quelques heures.

D'autre part, on explique également des cumuls importants par des **systèmes convectifs peu développés** (Miniscloux et al, 2001) où l'épaisseur du nuage ne dépasse pas quelques kilomètres (3-4km). Les précipitations associées à ces systèmes convectifs sont de plus faibles intensités mais durent plus longtemps. Ils s'organisent en bandes, c'est-à-dire avec une alternance zones pluvieuses, zones non pluvieuses.

Les ingrédients synoptiques nécessaires à la formation de ces systèmes convectifs (échelle supérieure à 1000 km) sont (Nuissier et al., 2008 ; Ducrocq et al., 2008):

- une circulation d'altitude très dynamique (diffluence prononcée du flux d'altitude et zone de forte divergence en haute troposphère ; développement d'un système en V caractéristique des systèmes convectifs)
- un profil de vent favorable (flux de composante sud sur les couches moyennes et hautes de la troposphère)
- une humidité atmosphérique élevée
- une atmosphère conditionnellement instable (forte valeur de CAPE, Convective Available Potential Energy, énergie potentielle stockée dans l'atmosphère $\approx 1\ 000$ et $1\ 500\ J/kg$).

Des facteurs de méso-échelle (échelle plus locale : 100-1000km) contribuent aussi à la formation et à la stationnarité des systèmes convectifs (Nuissier et al., 2008 ; Ducrocq et al., 2008):

- une advection d'air chaud et humide de basses couches (le fort vent du sud-est en basses couches favorise l'extension de cette langue vers le nord et alimente le système en air humide)
- un forçage de basses couches (puissant jet de basses couches (LLJ))
- une advection d'air froid et sec dans les couches moyennes (propice à l'évaporation des précipitations car bloque l'air chaud et humide et pousse la convection profonde vers le haut (=Low level cold pool (LLCP))
- une modification de l'environnement par la convection (fort gradient de température et de vent)

- la topographie favorable de la région
- l'influence de la mer (mer à température de surface assez élevée sur laquelle a circulé un air comparativement plus froid)

2.2 Données pluviométriques

Les données pluviométriques sont extraites de la base de données de l'OHMCV¹ (Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes Vivarais). Nous disposons de données journalières enregistrées sur 524 pluviomètres (*Figure 4*) du 01/01/1958-07h au 31/12/2000-07h (43 ans) soit **15 705 individus**. La *Figure 5* montre que les données pluviométriques sont disponibles de manière uniforme sur toute l'année avec une légère baisse en été.

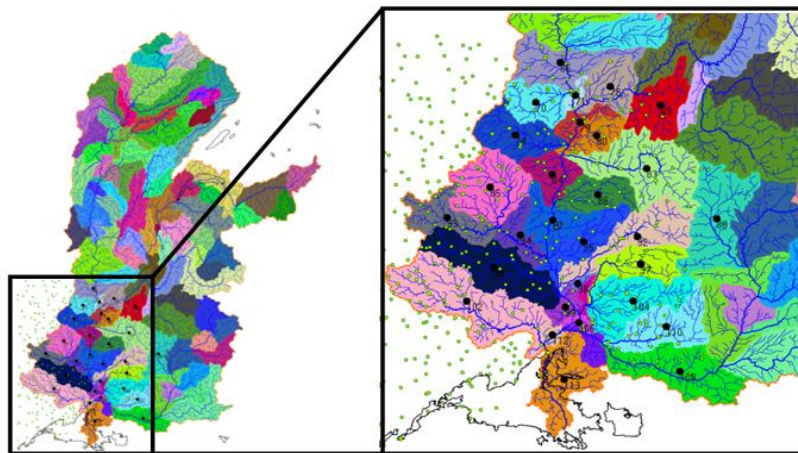


Figure 4: Localisation des pluviomètres journaliers OHMCV par des points verts sur le bassin du Rhône (HydroDem, Leblois)

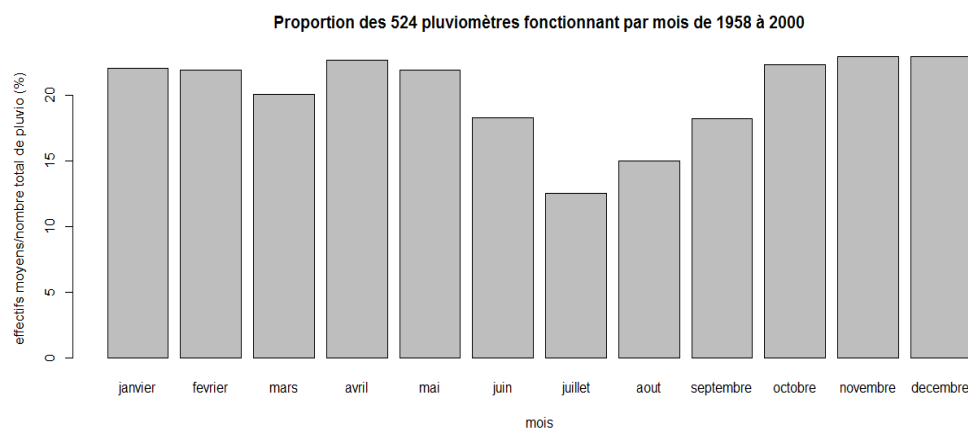


Figure 5: Disponibilité des données pluviométriques quotidiennes en fonction des mois

¹ www.ohmcv.fr

Plusieurs zones d'études sont proposées sélectionnant ainsi une partie des pluviomètres. Dans un premier temps, nous avons sélectionné les pluviomètres se trouvant à l'ouest du Rhône (région Cévennes-Vivarais, appelée **région « CV »** dans la suite ; rectangle noir sur la *Figure 6.a*). Puis la région « CV », qualifiée comme hétérogène, a été divisée en 3 zones homogènes: i) zone « **Plaine** » (zone 1 sur la *Figure 6.b*) ; ii) zone « **Piémont** » (zone 2 sur la *Figure 6.b*) ; iii) zone « **Montagne** » (zone 3 sur la *Figure 6.b*). La zone « plaine » correspond à la terrasse autour de Nîmes, avec des altitudes essentiellement inférieures à 200m. La zone « piémont » correspondant à une zone d'altitude principalement comprise entre 200 et 500m. La zone « montagne » correspondant à la zone d'altitude supérieure à 500m. Le nombre de pluviomètres au sein de chaque zone est indiqué dans le *Tableau 1*.

Zones	CV	Plaine	Piémont	Montagne
Nombre de pluviomètres	132	11	50	71

Tableau 1: nombre de pluviomètres au sein de chaque zone d'étude.

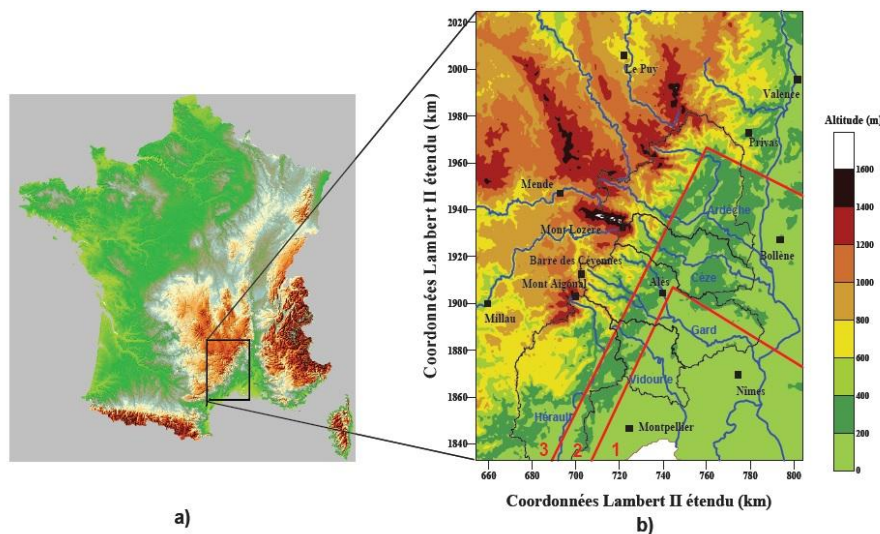


Figure 6: a) Localisation de la région « CV » et b) détails géographiques de la région : relief (couleur), principales rivières (linéaire bleu), principales villes (carrés), principaux bassins (linéaire noir et nom du cours d'eau en bleu). La région « CV » sera dans la suite « découpée » en trois zones : montagne (3), piémont (2) et plaine (1) délimités par les traits rouges (Godart, 2009)

Nous avons calculé une série de 4 descripteurs statistiques résumant les intensités fournies par chaque pluviomètre pour chaque date. Ces descripteurs sont: i) la moyenne de l'indicatrice **m(ind)** (ou la fréquence des pluies) qui détermine la proportion des stations où il pleut (entre 0 et 1); ii) la moyenne des intensités des pluies sur tous les pluviomètres **m(ptot)** ; iii) la moyenne des intensités des pluies non nulles **m(pnn)** (en mm) ; iv) le

coefficient de variation des pluies non nulles **cv(pnn)**, qui permet de décrire l'écart-type relatif, plus efficace pour comparer des séries statistiques qui n'ont pas le même ordre de grandeur. Le détail du calcul de ces descripteurs statistiques figure en *Annexe 2*. Ces calculs sont réalisés pour chacune des quatre zones définies précédemment.

2.3 Données atmosphériques

Les données atmosphériques sont extraites de la réanalyse ERA40 du 01/09/1957-00h au 31/08/2002-18h au pas de temps de 6h (00, 06, 12 et 18h TU), soit **65 744 individus**.

Le principe d'une réanalyse est le suivant : dans un premier temps, toutes les observations atmosphériques disponibles sont réunies sur la plus longue période possible (mesures au sol, radiosondages, images satellites, images radar,...). Dans un deuxième temps, ces observations sont analysées toutes ensemble avec un modèle météorologique unique (ou toute technique permettant de rendre l'ensemble cohérent) sur la période considérée. Cette analyse permet d'interpoler les données (en des points appelés « d'analyse » par opposition aux points « d'observation » pour lesquels les données sont disponibles) en respectant les lois physiques qui régissent les phénomènes atmosphériques. L'analyse est effectuée a posteriori. Elle prend donc en compte non seulement la cohérence spatiale des données mais aussi leur cohérence temporelle. Une réanalyse est donc une sortie de modèle météorologique contrainte par les observations (Uppala et al., 2005). Les réanalyses ERA40 couvrent l'ensemble du globe à une résolution d'un point tous les 2.5° (*Figure 7*) (Kalnay et al., 1996 ; Uppala et al., 2005). Le projet ERA40 a succédé aux réanalyses ERA15 et a été mis en place par le Centre Européen de la Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT).



Figure 7: Résolution horizontale de la grille gaussienne réduite N80 des ERA40 pour l'hémisphère nord

Deux séries de données atmosphériques ont été étudiées :

- **Une colonne atmosphérique** (désignée dans la suite par « radiosondage ») a été extraite des réanalyses ERA40 aux coordonnées **45.0N ; 5.0E** (au niveau de Valence, *Figure 8.a*) : nommé dans la suite « **Radiosondage 45** ». Ce radiosondage est décrit par 8 variables d'état de l'atmosphère : l'eau précipitable **Prec** en mm intégrée sur toute la colonne atmosphérique, le géopotential **Z** en hPa, la température **T** en °C, la température de rosée **Td** en °C, l'humidité relative **Hr** en %, le vent zonal **U** (est-ouest) en $m.s^{-1}$, le vent méridien **V** (nord-sud) en $m.s^{-1}$ et la force du vent **FF** en $m.s^{-1}$. Ces 7 dernières variables sont extraites sur 9 niveaux d'altitude (de 1000 hPa à 300 hPa). Ainsi, le radiosondage est qualifié par 64 descripteurs atmosphériques. La **description verticale de l'atmosphère** est ici privilégiée.

- **Une grille de 25 points** centrée sur le point M de coordonnées 45.0N ; 5.0E (*Figure 8.b*) est également extraite. Chacun des 25 points est décrit par trois blocs de variables : i) le géopotential **Z** (hPa) ; ii) la température **T** (°C) ; iii) l'humidité relative **Hr** (%) ; à l'altitude 850 hPa, ce qui nous donne 75 variables. La **description horizontale de l'atmosphère** est privilégiée cette fois-ci.

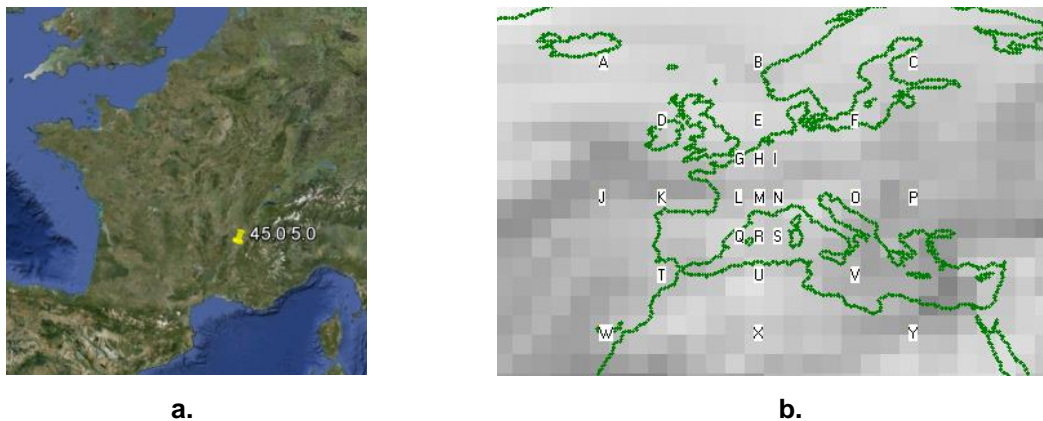


Figure 8: localisation du « Radiosondage 45 » (Google Earth) en a). Grille atmosphérique de 25 points (de A à Y) centrée sur le point M 45.0N ; 5.0E (ERA 40) en b)

La variabilité atmosphérique sur le plan horizontal est plus faible que la variabilité atmosphérique verticale. Nous avons donc choisi de réduire les 75 variables de la grille. Une Analyse en Composante Principale (ACP, Saporta, 2006) a été réalisée sur chacun des trois blocs de variables (Z, T et Hr).

L'ACP fait partie des méthodes descriptives multidimensionnelles linéaires et permet d'explorer la structure des données en tenant compte de leur caractère multidimensionnel. Soit notre ensemble de 65 744 individus caractérisés par 25 variables pour chacun des

blocs. L'ensemble des données est donc contenu dans une matrice de taille (65 744 x 25). Y a-t-il un espace de dimension inférieure à 25 dans lequel les 65 744 individus soient correctement représentés? Cela revient à chercher un espace de représentation des individus de taille plus petite mais pour lequel la perte d'information serait minimale, c'est-à-dire que la déformation de la distance entre les individus est minimale. L'ACP centre réduit les données et construit ce nouvel espace en remplaçant les variables initiales corrélées, par de nouvelles variables. Ces nouvelles variables sont les composantes principales, combinaisons linéaires des variables initiales, et sont non corrélées entre elles. Ces nouvelles variables sont construites en essayant de représenter le maximum de la variance initiale des données.

Nous avons choisi de garder les axes factoriels qui couvraient 90% de la variance pour le bloc Z et T (soit 3 axes chacun). En effet, à partir du 3ème axe factoriel, plus de 95 % de la proportion de la variance était couverte pour le bloc Z et 91 % pour le bloc T (*Tableau 2.a et 2.b*). De plus, la proportion de variance cumulée n'augmentait quasiment plus. Enfin, sur la *Figure 9.a et 9.b*, on voit que la majorité de la variance se situe sur les 3 premiers axes. En ce qui concerne le bloc Hr nous avons gardé les axes factoriels qui couvraient 60% de la variance, soit 4 axes (*Figure 9.c et Tableau 2.c*).

Au final, nous obtenons une matrice de 65 744 individus et de 10 axes factoriels (matrice 65744 x 10) décrivant le bloc Z, T et Hr en données centrées réduites.

a. Axes Factoriels (Z)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	...
Proportion de Variance	0,7534	0,1328	0,06703	0,01725	0,0121	...
Proportion de Variance Cumulée	0,7534	0,8862	0,95323	0,97049	0,9826	...

b. Axes Factoriels (T)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	...
Proportion de Variance	0,7992	0,06459	0,05116	0,02963	0,01406	...
Proportion de Variance Cumulée	0,7992	0,86381	0,91497	0,9446	0,95866	...

c. Axes Factoriels (Hr)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	...
Proportion de Variance	0,3623	0,143	0,08278	0,06087	0,04379	...
Proportion de Variance Cumulée	0,3623	0,5053	0,58809	0,64896	0,69276	...

Tableau 2: Représentation de la proportion de variance et de la proportion de la variance cumulée sur les 5 premiers axes factoriels (PC) pour le bloc Z en a) ; le bloc T en b) ; et le bloc Hr en c)

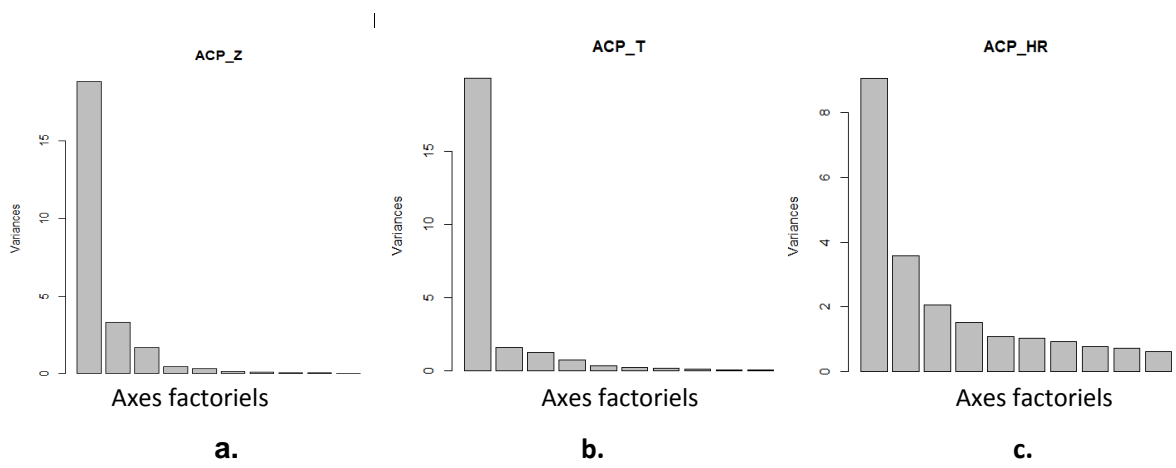


Figure 9: Représentation de la variance pour les 10 premiers axes factoriels du bloc Z en a) ; du bloc T en b) ; et du bloc Hr en c)

3 Méthodes et outils

L'environnement **R**, associant un langage de programmation et des bibliothèques implémentant la plupart des techniques statistiques usuelles, m'a permis d'élaborer les codes de calcul et de traitement de données. Le travail s'est articulé autour de deux axes d'étude.

- Dans un premier temps, nous nous sommes attachés aux **relations entre les forçages atmosphériques et les types de pluie** qui en découlent. Pour cela, la pluie non nulle sur la région « CV » et les deux séries de données atmosphériques (Grille et Radiosondage) ont été classées indépendamment en 16 classes homogènes grâce à la classification de Kohonen (plus une classe 17 de pluies nulles). Les 16 classes de pluie ont été ensuite réduites en 4 états cachés (EC) gouvernant la chronologie des classes de pluie à l'aide du Modèle de Markov caché. Enfin, les contingences entre les classes d'atmosphère et les classes de pluie sont étudiées ainsi que les contingences entre les classes d'atmosphère et les EC de la pluie.

- Dans un deuxième temps, nous avons cherché à **simuler le régime pluviométrique sur la région Cévennes-Vivarais** tout en préservant les caractéristiques pluviométriques des zones « plaine », « piémont » et « montagne ». Tout d'abord, la pluie non nulle a été classée en 16 classes grâce à la classification de Kohonen indépendamment sur ces trois zones (plus une classe 17 de pluies nulles). Ensuite, nous avons construit une classification de consensus, chaque classe décrivant la situation pluvieuse sur les trois zones. Grâce à cette classification de consensus, **les classifications locales de pluie** (« plaine », « piémont », « montagne ») **sont rattachées à une classification d'atmosphère** tout en préservant au mieux les liens entre les classifications de pluie locales.

3.1 La classification de Kohonen

La classification de Kohonen (ou cartes auto-organisatrices de Kohonen) fait partie des méthodes de fouille de données. La fouille de données (en anglais « data mining ») consiste à extraire un savoir à partir d'un grand nombre de données, par des méthodes automatiques ou semi-automatiques. Elle se situe à la croisée des méthodes statistiques, de l'intelligence artificielle et de la gestion de bases de données et réalise un compromis entre validité scientifique, facilité d'interprétation des résultats et facilité d'utilisation de ces résultats. Parmi les méthodes de fouille de données, il existe: les classifications, les arbres de décision, les

régressions (linéaire, linéaire multiple, logistique), l'analyse discriminante, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones, etc....

Nous avons cherché à classer indépendamment les données atmosphériques (Grille et Radiosondage), et les données pluviométriques non nulles (sur toutes les zones d'étude) en 16 classes homogènes. L'algorithme de **Kohonen** (self-organizing map - SOM) nous a permis de faire cette classification. Il a été défini par Teuvo Kohonen dans les années 1980 (Kohonen, 1997) et a été utilisé dans une grande variété d'études (Kohonen et al., 2000), notamment dans la classification d'atmosphère afin d'étudier les pluies locales (Sauter et Venema, 2011). La classification de Kohonen a l'avantage d'être non linéaire (Kalteh et al., 2008). Il faut noter que la classification se fait en privilégiant la continuité entre les classes. De plus, elle permet une réduction de donnée (Kohonen et al., 1996).

Avant de réaliser toute classification, il est indispensable de normaliser les données d'entrée (ramenées dans l'intervalle [0-1]), sauf pour les données de la Grille atmosphérique qui sont déjà centrées réduites, afin que la gamme de variation des données soit la même pour toutes, quelle que soit leur unité d'origine.

Dans ce travail, la classification de Kohonen a été réalisée en topologie **toroïdale**, la plus stable parmi la topologie rectangulaire ou hexagonale. En effet, la forme de tore favorise le bouclage dans les deux dimensions. Chaque individu a l'impression de se trouver au milieu avec un voisin à sa gauche, à sa droite, au-dessus ou en dessous de lui. Tous les individus ont donc une interaction entre eux. De plus, il n'y a pas d'effet de bord dans cette topologie.

Le **langage R** nous a permis de réaliser une telle classification, grâce à la bibliothèque de commandes « kohonen » (version 2.0.10) et à la commande « som() ». Les arguments renseignés au sein de cette commande ont été : i) les données d'entrée normalisées sous forme d'une matrice comptant autant de lignes que d'individus et autant de colonnes que de descripteurs (les 4 descripteurs statistiques pour la pluie ; les 64 descripteurs atmosphériques pour le « Radiosondage 45 » ; les 10 axes factoriels pour la Grille atmosphérique) ; ii) les dimensions de l'espace de restitution : $x=4$ et $y=4$ (classification à 16 classes) ; iii) le nombre de passage de l'ensemble de calage égal à 1000 (ce nombre assurant une bonne stabilisation de la classification) ; iv) le type de topologie (toroïdale).

Les pluies d'intensité nulle forment la classe de **Temps Sec (TS)**, soit la **classe 17**.

Les résultats intéressants de cette étape sont : i) les **noyaux** caractérisant chaque classe ; ii) un **calendrier** récapitulant la succession des 16 classes dans le temps. La classe 17 de temps sec a été réinsérée dans ce calendrier aux dates correspondantes.

3.2 Modèle de Markov Caché

Le **calendrier** décrivant la succession des 17 classes de pluie sur la région « CV » a été modélisé avec le modèle de Markov caché (Hidden Markov's Models = HMM ; Lawrence 1989). Ce model permet de réduire la classification de pluie à 17 classes en 4 Etats Cachés (EC1, EC2, EC3 et EC4) gouvernant la chronologie des 17 classes. Il décrit ainsi le séquençement entre les différentes classes de pluie, dont on aura besoin en simulation libre stochastique. Ces modèles décrivent alors deux niveaux d'état de séquences (Ephraim et al., 2002). On les a initialement utilisés en hydrométéorologie pour conditionner des types météorologiques distribués dans le temps et dans l'espace (Zucchini et al., 1991).

Dans ce travail, nous avons cherché à déterminer les probabilités de transitions entre les 16 classes puis de connaître la probabilité d'obtenir une certaine classe si on se trouve dans l'ECi (si on est dans l'Etat Caché ECi, quelle est la probabilité d'obtenir la classe j). Le but est de trouver un modèle qui maximise la probabilité d'une séquence de classes.

Pour modéliser les EC relatifs à une succession de classes, il est indispensable de créer une amorce avec le programme développé par Etienne Leblois. Cette amorce consiste à obtenir une approximation de la **matrice de transition** (π , dimension $n_{EC} \times n_{EC} = 4 \times 4$) et de la **matrice d'expression** (ψ , dimension $n(\text{classes}) \times n_{EC} = 17 \times 4$).

La matrice de transition s'obtient à partir de la matrice de transition initiale (dimension $n(\text{classes}) \times n(\text{classes}) = 17 \times 17$) qui compte les transitions observées à chaque pas de temps au niveau élémentaire. Elle décrit l'enchaînement des classes de Kohonen. La matrice d'expression s'obtient à partir de la matrice d'expression initiale (dimension $n(\text{classes}) \times n(\text{classes}) = 17 \times 17$) qui s'obtient en sommant les lignes de la matrice initiale π . On recherche alors les vecteurs lignes de la matrice initiale π ayant la structure la plus semblable. On regarde ainsi quel est le cosinus le plus proche de 1 entre deux lignes. Une fois déterminé, on somme les deux lignes ayant le cosinus le plus grand ainsi que les deux colonnes dans la matrice de transition initiale pour obtenir une matrice transition réduite avec une colonne et une ligne de moins. Les deux colonnes de la matrice d'expression initiale sont également additionnées et on obtient une matrice d'expression réduite avec une colonne de moins (Leblois et al., 2011). Ce processus est répété jusqu'à l'obtention de la matrice de transition (π) et la matrice d'expression (ψ) exprimées en probabilités. L'amorce du modèle de Markov caché est créée et est renseignée dans la commande « `initHMM()` » de la bibliothèque « HMM » (version 1.0) dans le logiciel R. Nous obtenons ici les éléments initiaux du modèle de Markov caché.

Par la suite, ces deux matrices vont être optimisées grâce à l'algorithme de Baum-Welch, développé par Leonard E. Baum et Lloyd Welch en 1966. Cet algorithme entreprend une ré-estimation des paramètres du modèle de manière à augmenter la vraisemblance de génération des séquences observées. La commande « `ViterbiTraining()` » sur R est utilisée pour cette étape car l'algorithme de Viterbi-training converge beaucoup plus vite que l'algorithme de Baum-Welch. Une manière de se rendre compte de la bonne optimisation du modèle est de regarder les différences entre deux itérations. Plus le nombre d'itérations sera grand, plus les différences tendront vers 0. Dans notre cas, nous renseignons un nombre maximal d'itération égal à 200 et un delta égal à 1×10^{-6} (si les différences deviennent inférieures à ce seuil, les itérations s'arrêtent).

Nous obtenons un **calendrier de la succession des EC** le plus probable, correspondant aux dates de chaque classe. La commande « `viterbi()` » est utilisée. Nous récupérons aussi la **matrice de transition** fournissant les probabilités de passer d'un EC à un autre, et la **matrice d'expression** exprimant les probabilités qu'une classe se produise sachant un EC.

3.3 Analyse de la contingence

Bien que les classifications de pluie et d'atmosphère soient obtenues indépendamment, elles présentent évidemment une cohérence qui est celle attribuable à la physique de l'atmosphère. Cette articulation est quantifiable par tableau de contingence, comptage des cooccurrences d'une classe de pluie et d'une classe d'atmosphère. Le tableau de contingence est un moyen simple pour représenter simultanément deux caractères observés sur une même population. Il permet de visualiser les classes possédant le plus d'individus en commun (Saporta, 2006).

3.3.1 Test du χ^2

Le test du χ^2 d'indépendance sur un tableau de contingence permet de tester l'indépendance entre deux variables qualitatives (classes d'atmosphère ou de pluie). S'il n'y a pas d'indépendance, il est intéressant de calculer la contribution des couples de modalités à la statistique du χ^2 pour voir les associations entre modalités. Pour tester l'indépendance de deux variables qualitatives, on teste l'hypothèse nulle H_0 : « les deux variables sont

indépendantes » par rapport à l'hypothèse alternative H_1 : « les deux variables ne sont pas indépendantes ». La statistique du test du χ^2 est la suivante :

$$\chi_{obs}^2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{(n_{ij} - T_{ij})^2}{T_{ij}}$$

Où n_{ij} est l'effectif observé pour la modalité i de la première variable et la modalité j de la deuxième et T_{ij} correspond à l'effectif sous l'hypothèse d'indépendance et I et J sont les nombres de modalités de chacune des variables.

Ce test est réalisé à l'aide de la commande « chisq.test » du logiciel R et nous donne un renseignement sur la probabilité critique, p -value. **Nous souhaitons que la p -value soit inférieure à 0.05, pour conclure avec un risque de 5% que les variables ne sont pas indépendantes** (Saporta, 2006 ; Cornillon et al., 2008).

3.3.2 Entropie de Shannon

Cet outil permet de relever la pertinence de la classification (Singh, 1997, 2000). La définition de l'entropie d'une source selon Shannon (1948) est telle que plus la source est redondante, moins elle contient d'information. Plus l'entropie est grande, plus les événements sont dispersés dans les classes. En l'absence de contraintes particulières, l'entropie est maximale pour une source dont tous les symboles sont équiprobables. Par ailleurs, **plus l'entropie est faible et plus la classification explique l'événement**.

L'entropie de Shannon d'une variable aléatoire discrète X , avec n réalisations possibles, $1 \dots n$, est définie comme suit :

$$H_b(X) = - \sum_{i=1}^n P_i \log_b(P_i)$$

où, p_i représente la probabilité d'un événement d'être dans la classe i et n le nombre de classes (et $b=2$).

Nous calculons l'entropie sur les lignes et sur les colonnes du tableau de contingence. Nous évaluons ainsi le type d'atmosphère/pluie qui détermine le mieux les types de pluie/atmosphère qui peuvent se produire en cherchant l'entropie minimale. Par exemple

(Tableau 3), en situation d'atmosphère 1, on aura un nombre limité de type de pluie possible car l'entropie est minimale. L'atmosphère 1 est la plus instructive pour connaître la pluie du jour.

a.	P1	P2	P3	P4	P5	effectifs
A1	0	2	4	0	0	6
A2	0	0	1	1	0	2

b.	P1	P2	P3	P4	P5
A1	0,000	0,333	0,667	0,000	0,000
A2	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000

c.	"-p*LN(p)"					H=Σ(-p*LN(p))
	P1	P2	P3	P4	P5	
A1	0,000	0,366	0,270	0,000	0,000	0,637
A2	0,000	0,000	0,347	0,347	0,000	0,693

Tableau 3 : exemple de calcul d'entropie sur le début d'un tableau de contingence. En a) Tableau de contingence en effectifs ; en b) Tableau de contingence en probabilité sur les lignes ; en c) Calcul de des entropies par lignes.

3.3.3 Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)

L'objectif de l'AFC est de résumer et d'obtenir une représentation graphique du tableau de contingence (Benzécri, 1973 cité par Saporta, 2006). L'AFC compare les profils-lignes entre eux, les profils-colonnes entre eux afin d'interpréter les proximités entre les lignes et les colonnes. Ceci revient à visualiser les associations entre les classes des deux classifications étudiées (Cornillon et al., 2008). Nous visualisons ainsi les liens qui existent entre deux classifications. Plus des classes sont proches graphiquement, plus elles sont reliées. Cette analyse est réalisée à l'aide du programme d'AFC développé par Etienne Leblois.

3.3.4 Analyse des Correspondances Multiples (ACM)

Comme l'AFC, l'ACM est une technique de description de données qualitatives (Saporta 2006). Elle permet de **visualiser les liens entre plusieurs classifications**. Ainsi, nous visualisons les liens entre les classifications des zones « Plaine », « Piémont » et « Montagne ». On considère ici n individus (n = 15 705) décrits par p variables (les 3 classifications de pluie) à m catégories (le nombre de classes = 17). Cette méthode est particulièrement bien adaptée à l'exploration d'enquêtes sociales où les questions sont à réponses multiples. L'ACM permet d'étudier les ressemblances entre individus du point de vue de l'ensemble des variables et de dégager des profils d'individus. En résumé, elle

fonctionne de la même manière que l'AFC mais permet de comparer plus de deux classifications. L'ACM nous renvoie aussi une représentation graphique nous permettant de visualiser les liens entre les différentes classifications. Cette analyse sera réalisée à l'aide du programme d'ACM développé par Etienne Leblois et avec la commande « dudi.acm » du package « ade4 » sur R.

3.4 Construction d'une classification de Consensus

Actuellement, le simulateur stochastique de pluies (Leblois et Creutin, 2013) permet de simuler des classes de pluies sur une seule zone homogène mais n'est pas développé pour simuler des classes de pluies sur une vaste zone hétérogène. La région Cévennes-Vivarais, considérée comme une zone hétérogène, a alors été divisée en 3 zones homogènes décrites précédemment. On dispose ainsi de 3 calendriers obtenus indépendamment sur chaque zone contenus dans un même tableau.

L'approche par consensus de Condorcet (Saporta, 2006 - p 252) permet de construire une classification de consensus traduisant la situation pluvieuse à grande échelle. Cette classification de consensus est formée d'une succession de classes C, une classe C décrivant la situation pluvieuse sur les trois zones. L'exemple minimaliste ci-dessous (*Tableau 4*) explique l'approche par consensus de Condorcet. Seuls les 10 premiers jours des calendriers sur les zones « plaine », « piémont », « montagne » sont examinés dans cet exemple. Il s'agit ici d'un exemple fictif.

indices	Plaine	Piémont	Montagne
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	2	2
4	1	2	2
5	1	2	2
6	1	2	3
7	1	2	3
8	2	1	3
9	2	1	3
10	2	1	3

Classifications de consensus C			
4 situations	3 situations	2 situations	1 situation
C1	C1	C1	C1
C1	C1	C1	C1
C2	C2	C1	C1
C2	C2	C1	C1
C2	C2	C1	C1
C3	C2	C1	C1
C3	C2	C1	C1
C4	C3	C2	C1
C4	C3	C2	C1
C4	C3	C2	C1

aucune
entropie
créée

gain
d'entropie
maximum

Tableau 4 : Approche par consensus de Condorcet appliquée aux 10 premiers jours des calendriers sur les zones « plaine », « piémont », « montagne »

La démarche est donc la suivante. Dans un premier temps, la **classification de Kohonen**, défini 16 classes homogènes de pluie et d'atmosphère. Puis, le **modèle de Markov caché** réduit cette classification en 4 Etats Cachés (EC) gouvernant la chronologie des classes de Kohonen.

Dans un deuxième temps, les contingences entre les différentes classifications seront étudiées. Grâce au **test du χ^2** , nous avons une information sur les relations de dépendance, attribuable à la physique de l'atmosphère, entre les classes d'atmosphère et les classes de pluie. Le calcul de **l'entropie de Shannon**, nous permet d'évaluer la pertinence de nos classifications. **L'AFC** permet de visualiser les liens entre deux classifications. **L'ACM** établie les liens entre les classes de pluie sur les 3 zones étudiées (montagne, piémont et plaine).

Enfin, la construction d'une **classification de consensus** permettra de simuler le régime pluviométrique sur la région Cévennes-Vivarais (zone hétérogène) en préservant les caractéristiques pluviométriques des zones « plaine », « piémont » et « montagne ». Elle permettra de raccrocher les classifications locales de pluie à une classification d'atmosphère tout en préservant au mieux les liens entre ces classifications de pluies locales.

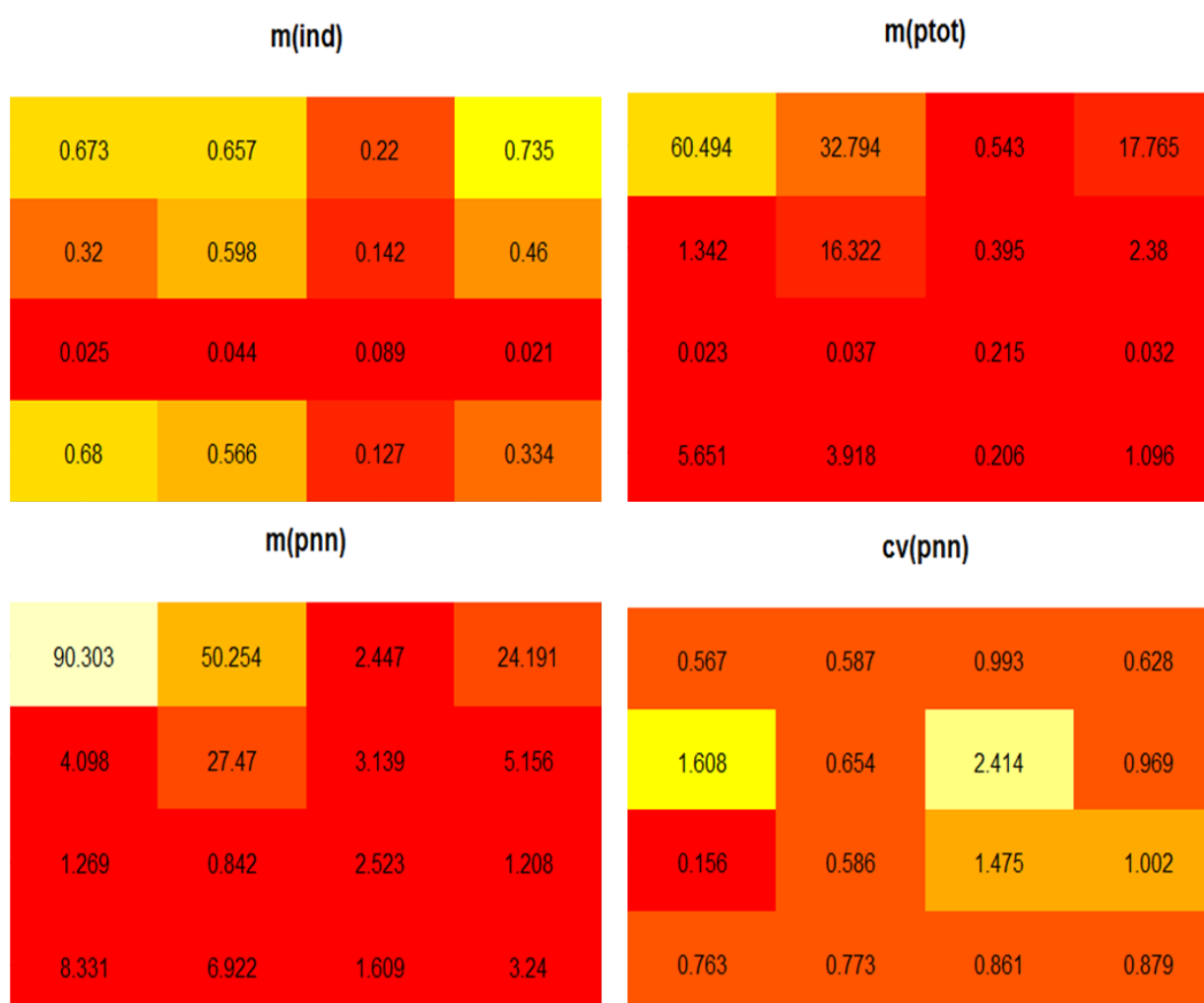
4 Résultats

4.1 Description des résultats

4.1.1 Classifications des données pluviométriques

Dans cette partie, nous nous intéressons uniquement à la classification réalisée sur la région « CV ». Les classifications réalisées sur les zones « plaine », « piémont » et « montagne » sont étudiées dans la partie 4.5.

La Figure 10 récapitule les noyaux des 16 classes de pluie (Annexe 3). Rappelons que la classe 17 est la classe de pluie nulle.



Sens de lecture des classes:

13	14	15	16
9	10	11	12
5	6	7	8
1	2	3	4

Figure 10 : Cartes des noyaux des 16 classes de pluie de la région « CV » : la dispersion de la pluie m(ind), la moyenne des pluies totale m(ptot) en mm, la moyenne des pluies non nulles m(pnn) en mm, l'écart type relatif cv(pnn).

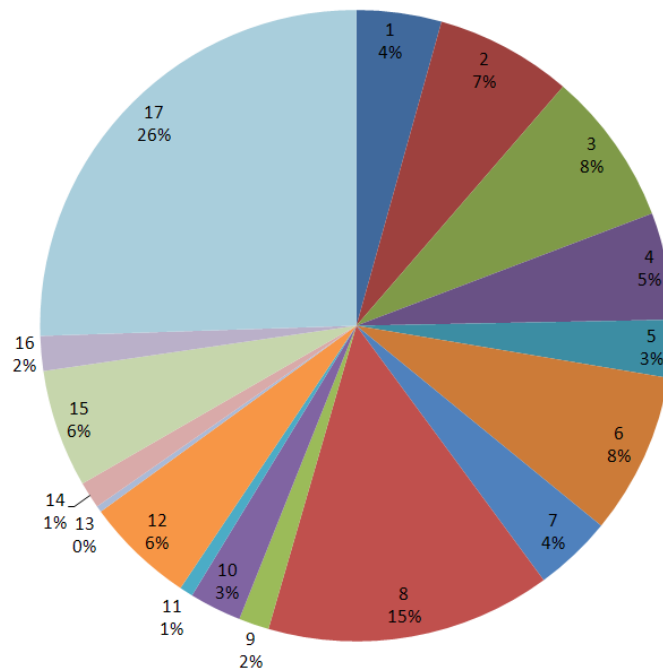


Figure 11: Pourcentage d'individus dans chaque classe de la région « CV »

Les classes **P10, P13, P14 et P16** représentent des **pluies fortes exceptionnelles** (moins de 3% des effectifs, Figure 11) sur les 2/3 du territoire (m(ind) proche de 0,6).

Les classes **P1, P2 et P12** représentent des **pluies moyennes** sur la moitié du territoire.

Les classes **P3, P6, P8 et P15** représentent des **pluies fines fréquentes**.

4.1.2 Classifications des données atmosphériques

4.1.2.1 La Grille atmosphérique de 25 points

Une interpolation des 25 points (Figure 8.b) décrits par les noyaux des 16 classes de Kohonen (Température, Humidité relative et Géopotential, à 850 hPa) a permis d'obtenir les cartes de la Figure 12. Elles présentent la situation atmosphérique à 850 hPa pour les 16 classes.

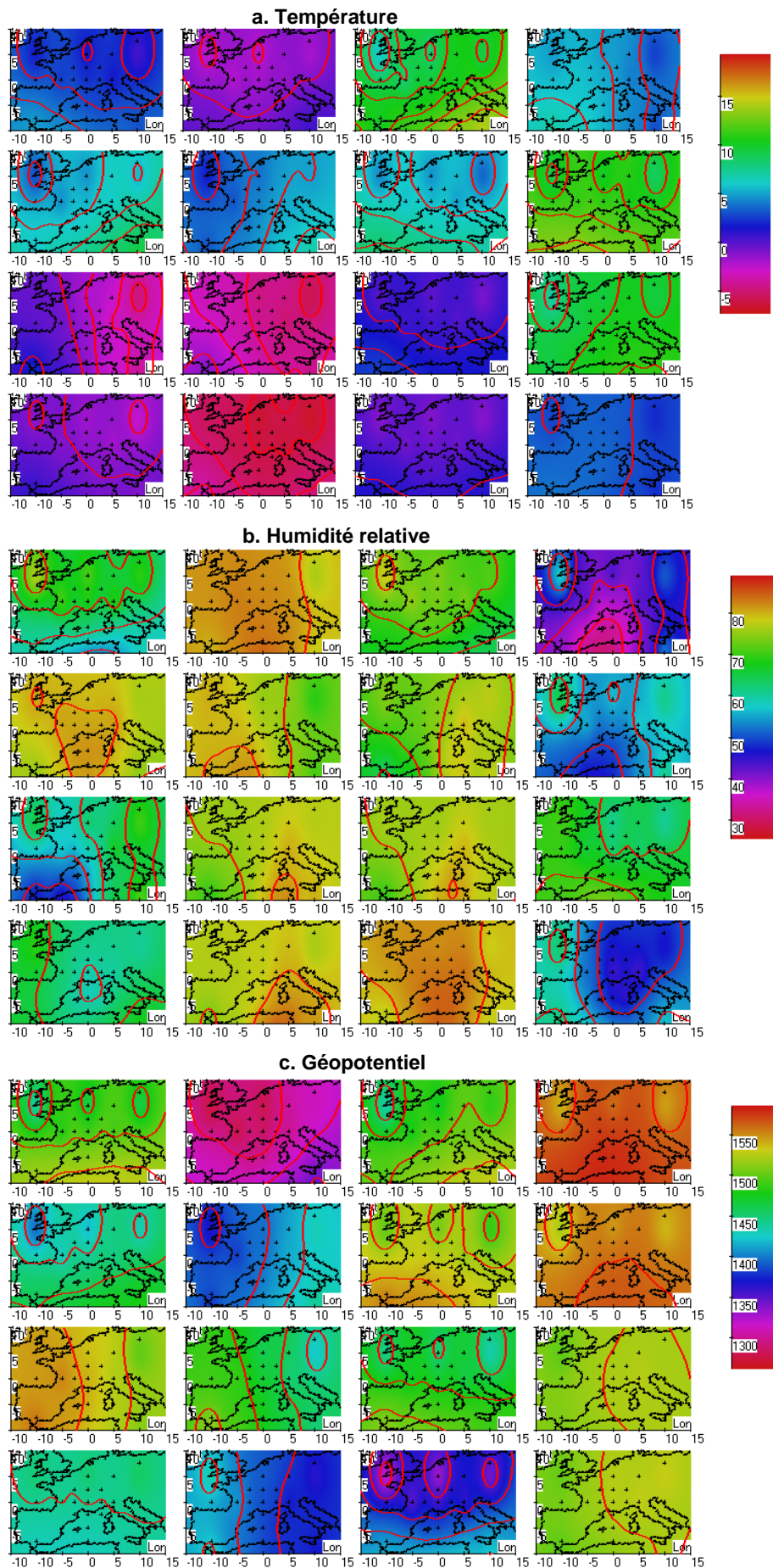


Figure 12 : Représentation des noyaux des 16 classes de la Grille atmosphérique à 850 hPa. En a) Température en °C ; en b) Humidité relative en % ; en c) Géopotential en hPa

Les classes ayant des **températures élevées** sont regroupées dans le coin à gauche de la *Figure 12.a* (classes 9, 10, 13 et 14) tandis que les classes à **températures froides** (classes 3, 4, 8 et 12) se trouvent dans le coin opposé en haut à droite. Les classes ayant une **humidité relative élevée** au-dessus de la région Cévennes-Vivarais sont les classes 2, 5 et 15 (*Figure 12.b*). Les cartes de Géopentiel (*Figure 12.c*) nous donnent des renseignements sur la direction du vent. En effet, le vent circule toujours à droite d'une zone de basse pression (Malardel, 2009). Nous repérons ainsi un **vent du nord** au-dessus de la région Cévennes-Vivarais pour les classes 9, 10 et 14, et un **vent du sud-ouest** pour les classes 2, 3, 5, 6 et 8.

4.1.2.2 Le « Radiosondage 45 »

Chacune des 16 classes du « Radiosondage 45 » est décrite par 64 descripteurs atmosphériques renseignant 9 niveaux d'altitude. L'usage d'un émagramme permet de visualiser la « signification » physique de chaque classe. Les émagrammes des 16 classes sont présentés en *Annexe 4*. Tout d'abord, nous nous intéressons aux descripteurs atmosphériques à l'altitude 850 hPa (*Figure 13*).

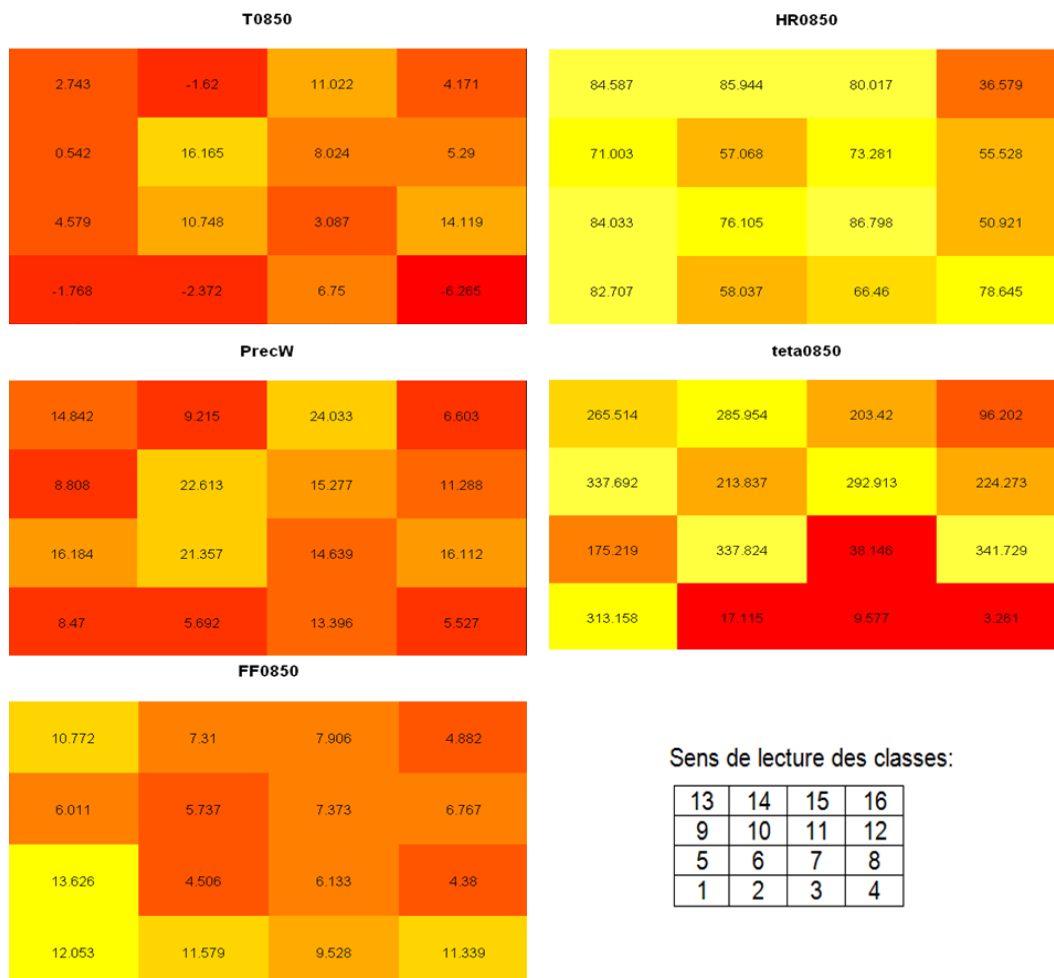


Figure 13 : Cartes des noyaux à 850 hPa des 16 classes du « Radiosondage 45 » : a) la température (°C) ; b) Humidité Relative (%) ; c) l'eau précipitable (mm) ; d) l'angle de direction du vent teta (°) : angle de direction du vent selon les normes de météorologie (0° : vent du Nord ; 90° : vent d'est ; 180° : vent du sud, 270° : vent d'ouest) ; e) la force du vent (m/s)

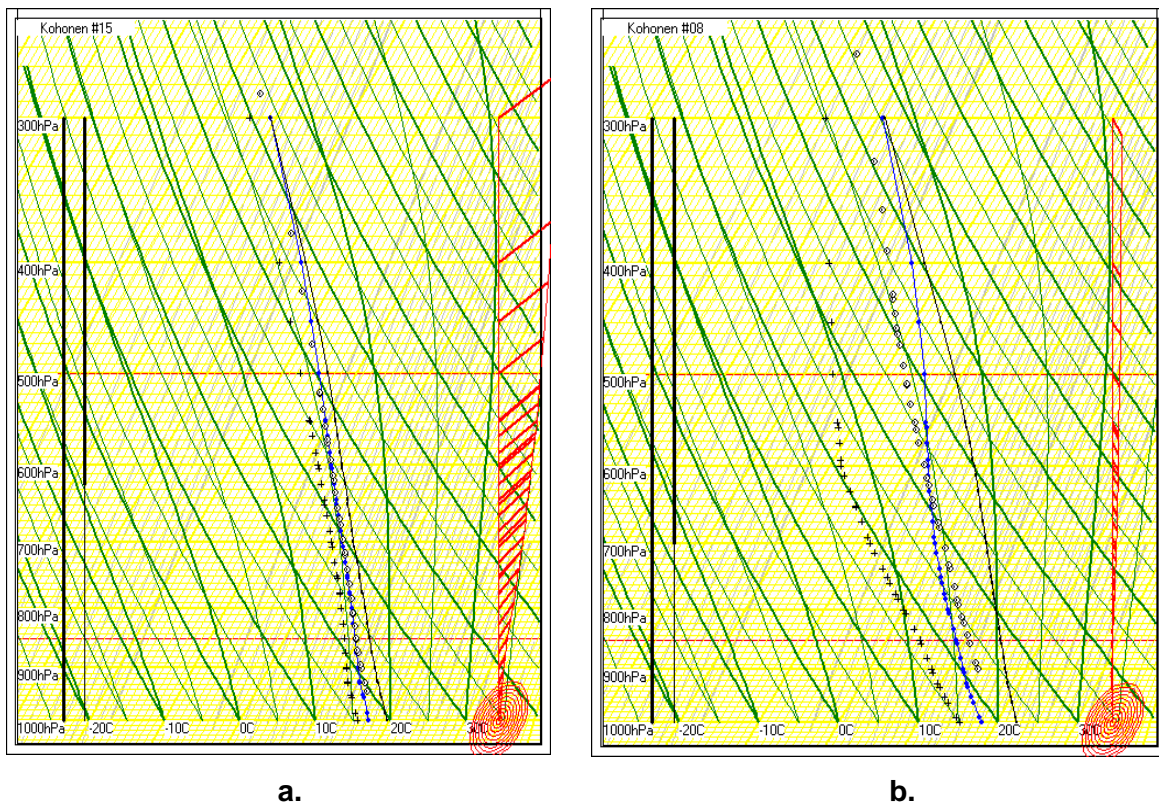


Figure 14 : Emagrammes de la classe atmosphérique A15 en a) et de la classe A8 en b)

Certaines classes du « Radiosondage 45 » se distinguent. Les classes A5, A10, A12 et A15 correspondent à des situations de **vent du sud-ouest** de faible intensité, ayant un **taux d'humidité relative important** et des **températures chaudes**. De plus, l'atmosphère A15 est particulièrement instable jusqu'à l'altitude 600 hPa comme nous pouvons le voir sur l'émagramme (Figure 14.a). Les classes A2, A3, A4 et A7 correspondent à des situations de **vent du Nord** d'intensité moyenne et sont des classes à **températures froides**. En regardant la quantité d'eau précipitable, ces classes décrivent des atmosphères assez sèches. Les classes A8 (Figure 14.b) et A16, sont des classes qui représentent des **atmosphères sèches** à vent faible.

Pour conclure, La classification de Kohonen a permis, pour les deux bases de données (atmosphérique et pluviométrique), de représenter la variabilité atmosphérique et pluviométrique en 16 classes homogènes. Dans la suite, nous déterminons les liens entre les forçages atmosphériques et les pluies associées sur la région « CV » (parties 4.2, 4.3 et 4.4).

4.2 Etude de la contingence entre l'Atmosphère et la Pluie de la région « CV »

La durée de la période commune entre les données atmosphériques et les données pluviométriques est de 43 ans (du 01/01/1958 au 30/12/2000). L'étude des liens entre les forçages atmosphériques et les types de pluie associés s'est faite sur cette période. Les pluies ont dû être dupliquées 4 fois pour respecter le pas de temps des données atmosphériques (4 pas de temps/jour).

Le tableau de contingence obtenu entre la classification atmosphérique « Grille » et la classification pluviométrique « CV » est étudié (non présenté). Celui entre la classification atmosphérique « Radiosondage 45 » et la classification pluviométrique « CV » est également étudié (non présenté). Le test du χ^2 d'indépendance, pour ces deux tableaux, donne une p-value $< 2,2 \cdot 10^{-16}$. Il est alors absolument certain que les classes d'atmosphère et les classes de pluie ne sont pas indépendantes.

Pour savoir si les pluies de la région « CV » sont mieux expliquées par une description verticale de l'atmosphère (« Radiosondage 45 ») ou par une description horizontale de l'atmosphère (Grille), nous nous sommes intéressés aux entropies de Shannon calculées sur les types de pluie et sur les types d'atmosphère suivant la contingence étudiée (*Tableau 6*). Les moyennes de ces entropies étant très proches entre les deux contingences, nous ne pouvons pas affirmer quelle description de l'atmosphère décrit le mieux la pluie sur la région « CV ». Nous nous intéressons donc à la description verticale de l'atmosphère décrite par le « Radiosondage 45 » dans la suite de cette étude.

a. Classes A Grille	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	moy
Pluie(CV) Grille	2,20	3,77	2,25	2,20	3,77	3,46	3,08	3,15	1,97	3,60	3,30	3,59	3,77	2,99	3,68	3,38	3,14

b. Classes A Radio 45	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	moy
Pluie(CV) Radio 45	3,35	2,29	1,87	3,06	3,29	3,60	3,72	2,20	3,36	3,37	3,34	3,47	3,51	3,66	3,81	2,49	3,15

c. Classes Pluies CV	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	moy
Grille Pluie(CV)	3,43	3,49	3,76	3,70	3,71	3,85	3,76	3,82	3,46	3,08	3,70	3,64	2,17	2,66	3,72	3,10	3,54	3,45
Radio 45 Pluie(CV)	3,43	3,54	3,87	3,78	3,62	3,85	3,82	3,80	3,55	2,95	3,77	3,64	1,80	2,17	3,78	2,85	3,33	3,39

Tableau 6 : entropies calculées sur a) les classes de pluie sachant les classes d'atmosphère de la Grille ; b) les classes de pluie sachant les classes d'atmosphère du Radiosondage 45 ; c) les classes d'atmosphère sachant les classes de pluie.

La *Figure 15* chiffre les liens entre les classes d'atmosphère du « Radiosondage 45 » et les classes de pluie sur la région « CV ».

On remarque que la plus grande partie des **pluies fortes** réparties sur les 2/3 du territoire, P13 (52%), P14 (50%), P10 (32%) et P16 (32%) sont provoquées par l'atmosphère A5. L'atmosphère A15 est également fortement liée à ces pluies. En effet, les atmosphères A5 et A15 correspondent à des atmosphères humides caractérisées par un vent du sud-ouest et des températures chaudes (partie 4.1.2.2). La plupart des **pluies moyennes** (par exemple P1, P2 et P12) sont reliées aux atmosphères A7, A13 et A14. Les **pluies fines** (P3, P6, P8 et P15) sont concomitantes avec les atmosphères A1, A10, A11, A12... De plus, la majorité des pluies nulles P17 est provoquée par les atmosphères sèches A8 et A16.

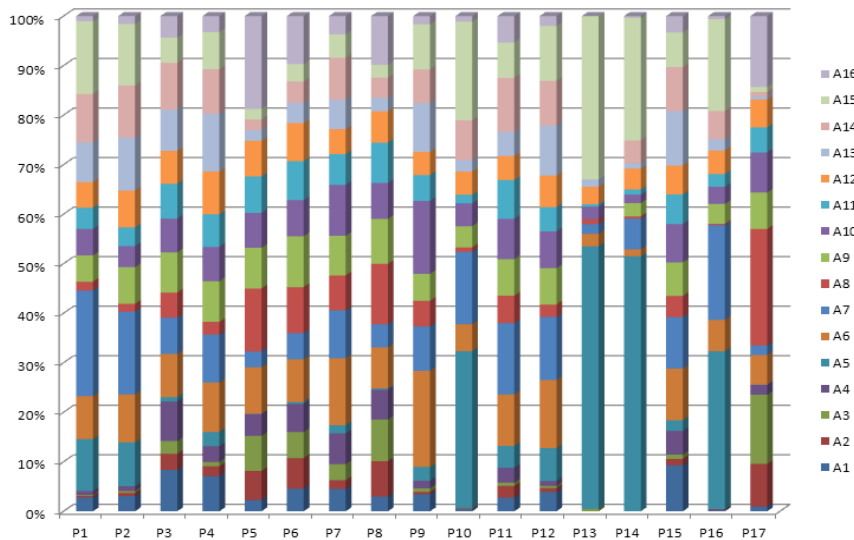


Figure 15 : Pourcentage des classes de pluie engendrées par les classes d'atmosphère

Ces liens sont visualisés à l'aide des d'une AFC (*Figure 16*). L'ellipse rouge regroupe les pluies fortes (P10, P13, P14 et P16), l'ellipse verte les pluies moyennes (P1, P2 et P12), le cercle bleu les pluies fines et le cercle noir les pluies nulles (P17).

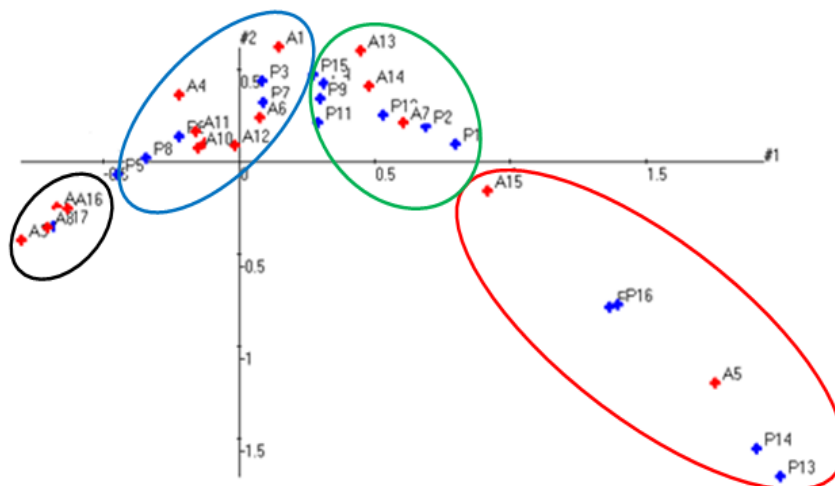


Figure 16 : AFC réalisée sur le tableau de contingence « Radiosondage 45 / Pluie CV ». Représentation sur le premier plan factoriel (91,7 % de variance).

4.3 Etude d'évènements catastrophiques provoqués par des pluies cévenoles dans la région Cévennes-Vivarais

Parmi les évènements catastrophiques s'étant produit en France au XX^{ème} et XXI^{ème} siècles, 11 concernent la région Cévennes-Vivarais (Laroche, 2008). Ils couvrent un ensemble de 23 dates entre 1958 et 2001, le plus souvent en **automne** (Annexe 5).

Pour évaluer les classifications précédentes, nous avons extrait ces dates dans les calendriers des classes de Kohonen (Annexe 5).

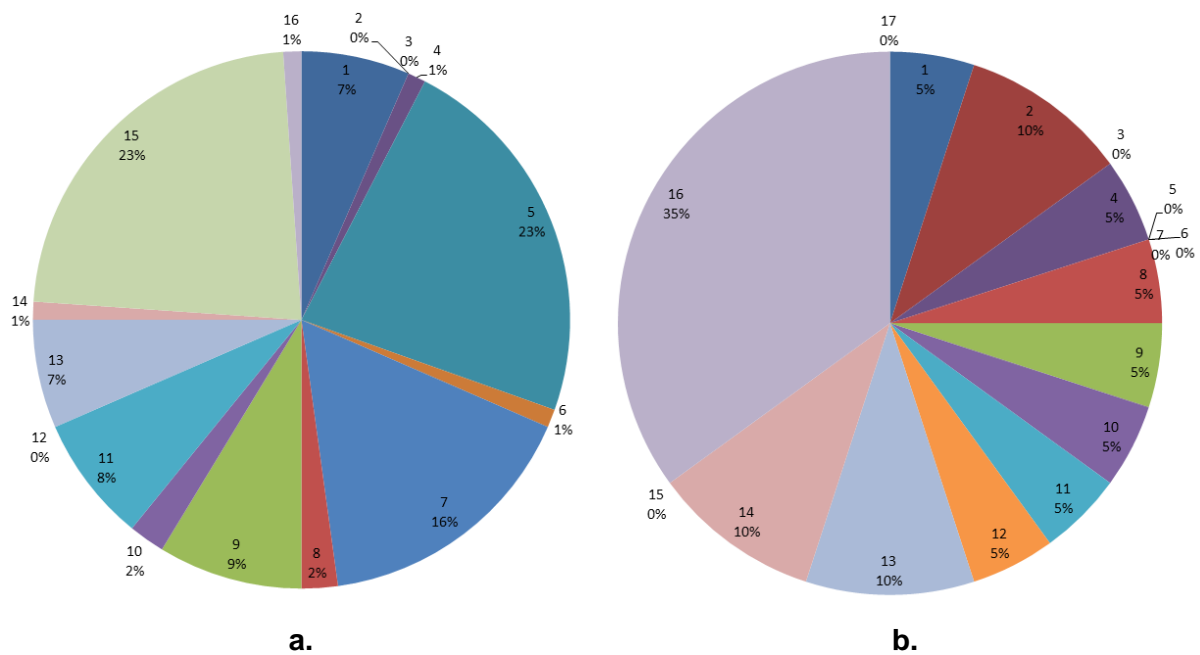


Figure 17 : Pourcentage de dates d'évènements catastrophiques dans chaque classe a) pour le « Radiosondage 45 » ; b) pour la pluie sur la région « CV »

Les classes d'atmosphère **A5** (23%) et **A15** (23%) (Figure 17.a) et les classes de pluie sur la région « CV » **P13** (10%), **P14** (10%) et **P16** (35%) (Figure 17.b) se produisent majoritairement lors de ces évènements.

En effet, les atmosphères A5 et A15 sont des atmosphères caractérisées par un fort taux d'humidité et un vent du sud-ouest : des conditions requises pour former les SCM provoquant de fortes précipitations. De plus, les pluies P13, P14 et P16 font parties des pluies fortes exceptionnelles couvrant 2/3 du territoire.

Comme le montrent les figures 18.a et 18.b, les pluies P13 et P14 ont lieu majoritairement en **automne**. La classe d'atmosphère A15 a également un pic de fréquence en septembre (Figure 18.c).

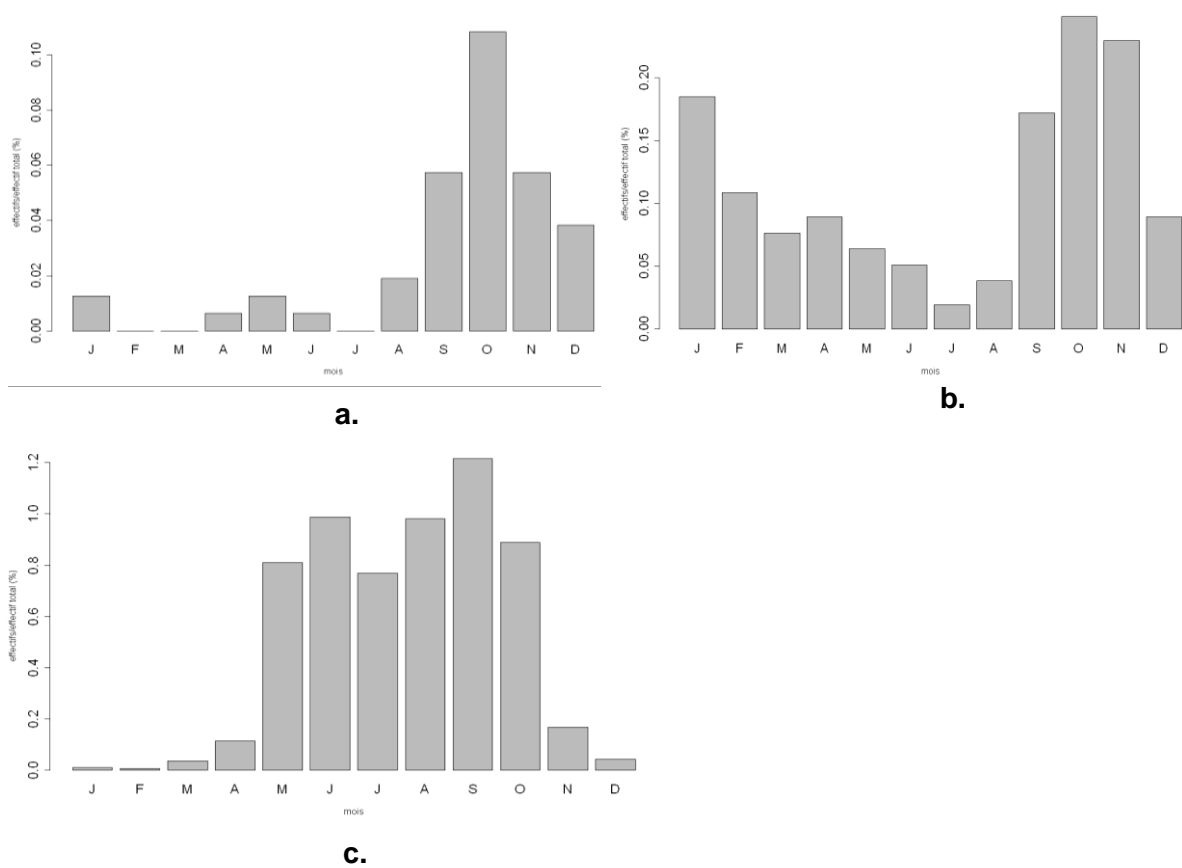


Figure 18 : Représentation de la saisonnalité de la classe de pluie P13 en a), de la classe de pluie P14 en b) et de la classe d’atmosphère A15 en c)

En analysant la contingence « Radiosondage 45/Pluie CV » pour ces évènements catastrophiques (pluies dupliquées 4 fois pour respecter le pas de temps des données atmosphériques: 80 dates), nous remarquons que les pluies P13, P14 sont provoquées uniquement par les atmosphères A5 et A15 (Figure 19). La pluie P16 est liée à 45% à l’atmosphère A5 également. La pluie P10 est entièrement provoquée par l’atmosphère A15.

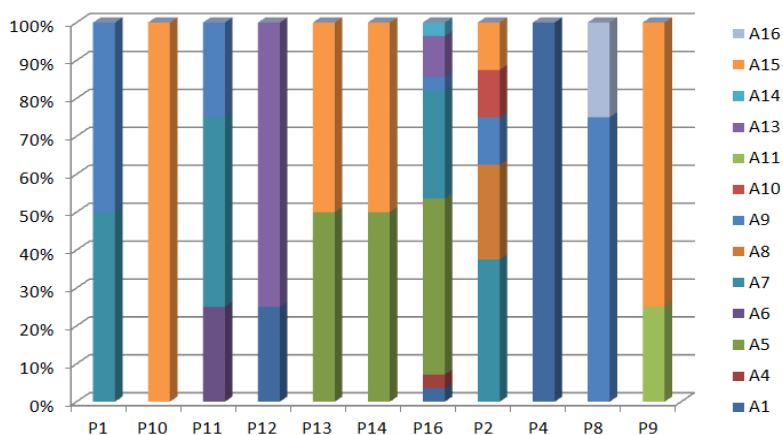


Figure 19 : Pourcentage des classes de pluie engendrées par les classes d’atmosphère pour les évènements catastrophiques

4.4 Résultats du Modèle de Markov Caché sur la pluie de la région « CV »

Le calendrier des 17 classes de pluie sur la région « CV » (issu de la classification de Kohonen) est introduit comme données d'entrées au modèle de Markov caché. Les 17 classes de pluie sont ainsi réduites en 4 états cachés (EC) gouvernant la chronologie des classes de pluie. Un extrait du calendrier des 17 classes et des EC correspondant est visible en *Annexe 6*.

$$\Psi =$$

	EC1	EC2	EC3	EC4	m(pnn)
P17	0,00002	0,00002	0,00013	0,99960	0,000
P6	0,00002	0,21949	0,00013	0,00002	0,842
P8	0,00002	0,38659	0,00013	0,00002	1,208
P5	0,00002	0,07824	0,00013	0,00002	1,269
P3	0,00002	0,20935	0,00013	0,00002	1,609
P15	0,18997	0,00002	0,00013	0,00002	2,447
P7	0,00002	0,10612	0,00013	0,00002	2,523
P11	0,00002	0,00002	0,13620	0,00002	3,139
P4	0,17254	0,00002	0,00013	0,00002	3,240
P9	0,04871	0,00002	0,00013	0,00002	4,098
P12	0,17595	0,00002	0,00013	0,00002	5,156
P2	0,22003	0,00002	0,00013	0,00002	6,922
P1	0,13647	0,00002	0,00013	0,00002	8,331
P16	0,05612	0,00002	0,00013	0,00002	24,191
P10	0,00002	0,00002	0,52803	0,00002	27,470
P14	0,00002	0,00002	0,27101	0,00002	50,254
P13	0,00002	0,00002	0,06312	0,00002	90,303

Tableau 7 : matrice d'expression Ψ reclassée par ordre croissant de moyenne des pluies non nulles (en probabilités) de la pluie sur le domaine « Ouest »

Le *tableau 7* représente la matrice d'expression finale Ψ (en probabilités) reclassée par ordre croissant de moyenne des pluies non nulles. Cette matrice représente la probabilité d'obtenir une des 17 classes si on se trouve dans un EC. On a surligné en jaune les classes ayant la plus forte probabilité de se produire sachant un EC. L'EC1 représente donc les **pluies moyennes**. L'EC2 représente les **pluies faibles**. L'EC3 représente les **pluies fortes exceptionnelles**. L'EC4 représente toutes les **pluies nulles**.

Les caractéristiques des 4 EC, notamment la dispersion de la pluie, $m(ind)$, et la moyenne des pluies non nulles, $m(pnn)$, sont présentées sur la *Figure 20*. L'EC3 représente bel et bien les pluies les plus fortes et couvrant en moyenne 60% du territoire.

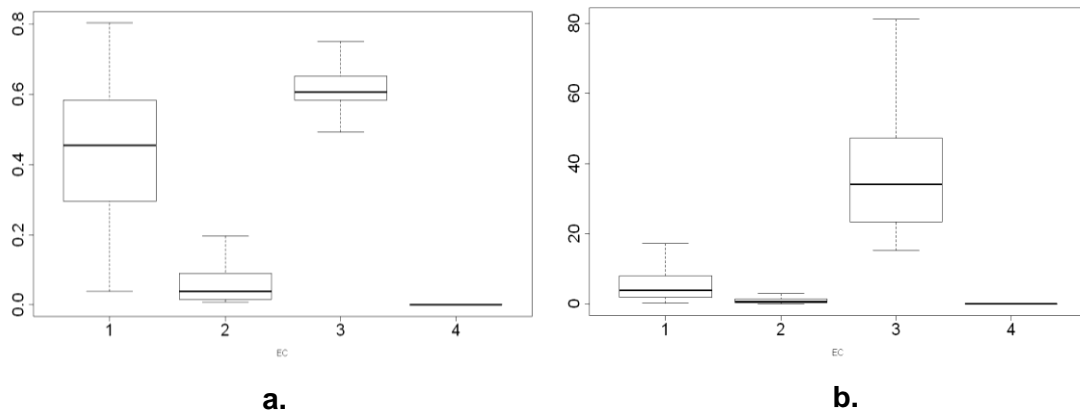


Figure 20 : Caractérisation des 4 EC. En a) $m(ind)$ (entre 0 et 1) ; en b) $m(pnn)$ (mm)

La saisonnalité de l'EC3 et de l'EC4 est présentée sur la Figure 21. L'EC3, traduisant des pluies fortes, a lieu le plus souvent en automne (Figure 21.a) et l'EC4, représentant les pluies nulles a un pic de fréquence en été (Figure 21.b).

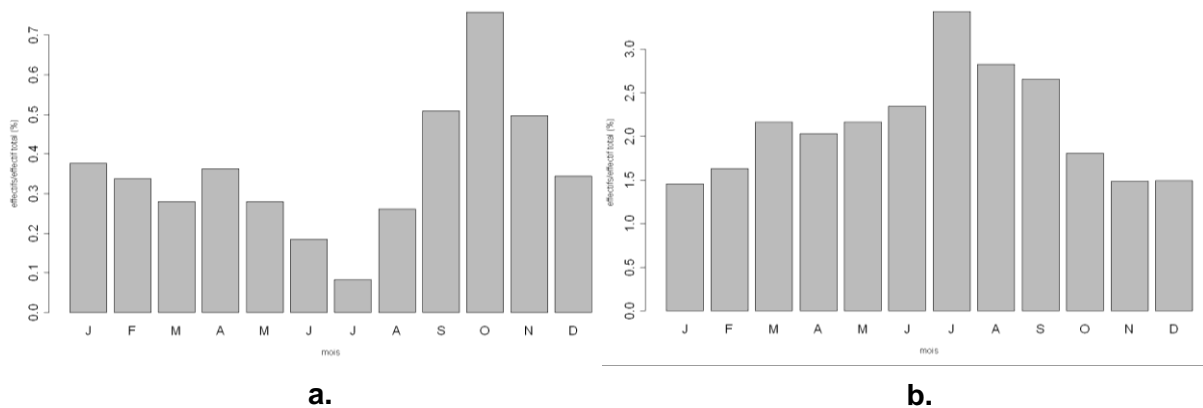


Figure 21 : Saisonnalité de l'EC3 en a) et de l'EC4 en b

Le tableau 8 représente la matrice de transition entre les 4 EC et décrit les probabilités de passer d'un EC à un autre. Dans ce modèle, les probabilités sont assez fortes sur la diagonale, c'est-à-dire que les états sont stables. Cependant, lorsque l'on se trouve dans l'EC3 (pluies fortes), on aura plus tendance à passer dans l'EC1 (pluies moyennes). Cela traduit bien que l'EC3 regroupe des pluies fortes exceptionnelles et que cet EC est instable dans le temps. Notons une probabilité plus élevée pour l'EC4. Cela signifie que les pluies nulles sont des phénomènes un peu plus durables que les autres pluies.

TT =

	EC1	EC2	EC3	EC4
EC1	0,521	0,343	0,079	0,057
EC2	0,262	0,487	0,027	0,224
EC3	0,501	0,230	0,251	0,018
EC4	0,109	0,286	0,010	0,595

Tableau 8 : matrice de transition exprimée en probabilités sur les lignes

Nous avons examiné la contingence entre les EC de la pluie sur la région « CV » et les forçages atmosphériques (16 classes du « Radiosondage45 »). La *figure 22* montre que l'EC3 (P_EC3), contenant les pluies fortes, se retrouve tout comme les classes des pluies fortes, avec les atmosphères A5 (42%) et A15 (20%). L'EC4 (P_EC4), contenant les pluies nulles, est relié aussi aux atmosphères sèches A8 et A16. En parallèle, l'EC1 (P_EC1), regroupant les pluies moyennes, se situe proche des atmosphères A7, A13 et A14 comme les classes des pluies moyennes. Enfin, les pluies fines rassemblées au sein de l'EC 2 (P_EC2) sont reliées aux mêmes atmosphères que les classes des pluies fines.

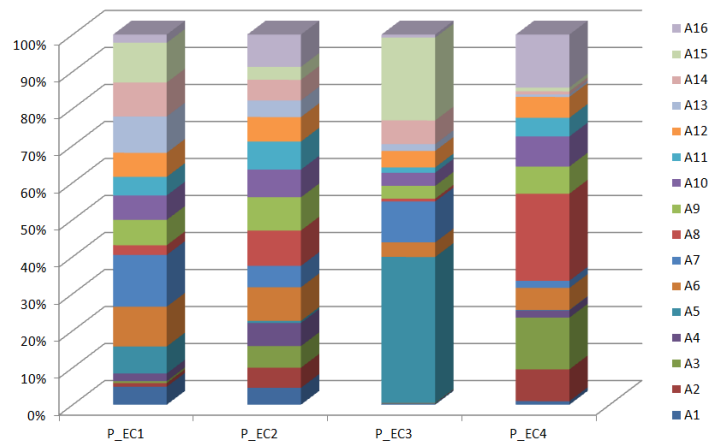


Figure 22 : Pourcentage des EC de pluies engendrés par les classes d'atmosphère

Une AFC (Figure 23) met en évidence les liens cités ci-dessus. L'ellipse rouge regroupe les pluies fortes (P_EC3), l'ellipse verte les pluies moyennes (P_EC1), le cercle bleu les pluies fines (P_EC2) et le cercle noir les pluies nulles (P_EC4).

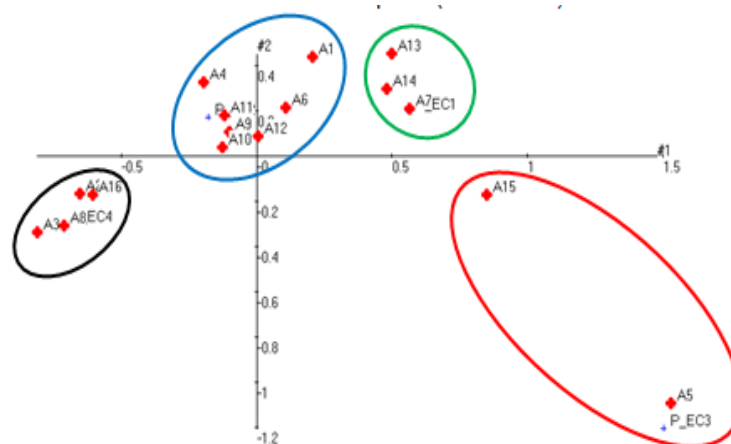


Figure 23 : AFC réalisée sur le tableau de contingence des classes du « Radiosondage 45 » et des EC des Pluie de la région « CV ». Représentation sur le premier plan factoriel (96,3 % de variance)

Nous retrouvons donc une cohérence entre la classification atmosphérique et le modèle de Markov caché.

Pour conclure, les événements passés présentant des **pluies fortes** « **exceptionnelles** » sont principalement regroupées dans les classes **P10, P13, P14 et P16**, et dans l'**EC3**. Ces pluies sont liées aux atmosphères instables **A5 et A15** caractérisées par une forte humidité, un vent du sud-ouest et des températures élevées. Ce sont ces situations Atmosphère/Pluie qui provoquent le plus souvent des événements de types cévenols dans la région Cévennes-Vivarais en **automne**.

Le **modèle de Markov caché** a donc permis de modéliser les classes de pluie de façon moins homogène à l'aide de classes dites cachées qui décrivent elles-aussi des saisons durant l'année, dans le but de simuler des séquences de classes de pluie. Cette classe cachée est réputée pour conditionner la classe de pluie, mais sans la déterminer totalement. En effet, la classe de pluie à l'instant $t + 1$ dépend également de la classe de pluie à l'instant t . De plus, la réduction de la classification de pluie à 17 classes en 4 EC ne dégrade pas significativement la contingence entre l'atmosphère et la pluie.

On a alors **simulé le régime pluviométrique sur la région « CV »** sur une année (*Figure 24*) car on connaît les probabilités de transitions entre chaque EC et les probabilités d'expression d'avoir une des 16 classes sachant un EC. Cependant cette simulation pluviométrique ne prend pas en compte l'hétérogénéité de la région « CV ». C'est pourquoi, nous avons décidé de simuler le régime pluviométrique de la région Cévennes-Vivarais avec le simulateur stochastique (Leblois et Creutin, 2013), en tenant compte de l'hétérogénéité de cette région. La région « CV » a donc été divisée en trois zones homogènes « plaine », « piémont » et « montagne ».

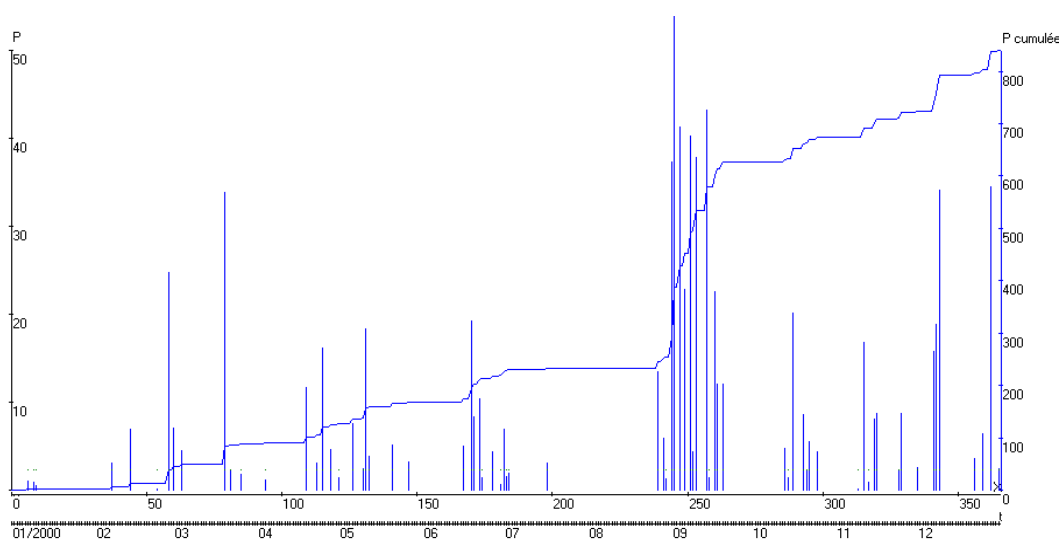


Figure 24 : Hyétogrammes au pas de temps journalier issus d'une simulation du régime pluviométrique annuel sur la région Cévennes Vivarais (Leblois)

4.5 Vers une simulation du régime pluviométrique de la région Cévennes-Vivarais respectant l'hétérogénéité de cette région

Une classification de Kohonen a permis d'obtenir les trois calendriers sur les zones « plaine », « piémont » et « montagne », décrits par les 17 classes. D'après les noyaux qualifiant les 17 classes de pluie selon la zone étudiée (*Annexe 7*), les pluies fortes sont qualifiées entre autre par la situation (plaine, piémont, montagne) = (P8, P12, P7).

Une ACM, réalisée sur les trois calendriers, montre des liens intéressants (*Figure 25*). En effet, les pluies fortes sur les trois zones ont tendance à se produire en même temps (cercle rouge). Quant à la situation de temps sec (situation P17 pour les 3 zones), elle se produit aussi en même temps sur les trois zones (cercle noir).

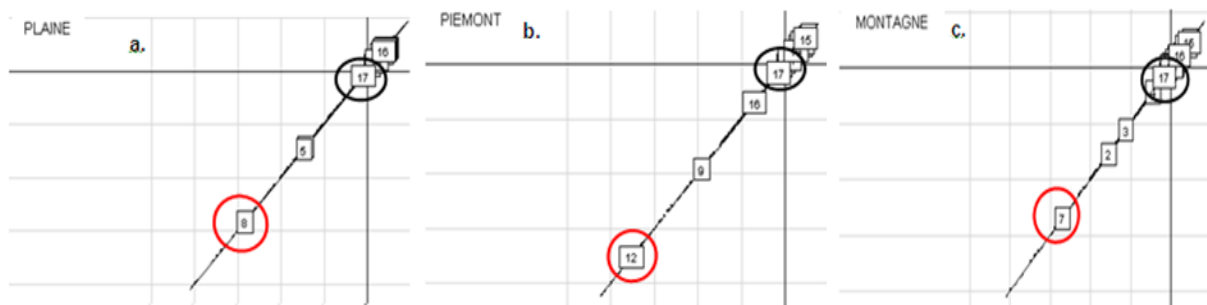


Figure 25 : ACM réalisée sur les calendriers des classes de pluie sur la zone a) « plaine », b) « piémont », c) « montagne ». Représentation sur le premier plan factoriel.

Nous avons au total 4913 (17^3) situations envisageables mais toutes ne se produisent pas car les 3 zones concernées sont dépendantes au niveau du climat. Seuls 1311 situations sont observées. Nous avons réduit ces 1311 situations en un nombre plus faible de situations afin de construire une classification de consensus à 16 classes C. Ce nombre de classe a été choisi arbitrairement sans étude de sensibilité par manque de temps. La perte d'information est quantifiée à travers un gain d'entropie de 56 924,06 (à comparer à 139 261,81 pour une classification de consensus à une seule).

L'ACM sur les calendriers des 3 zones et la classification de consensus (*Figure 26*) montre que les 16 classes de consensus (C1 à C16) se superposent assez bien aux classes de pluie sur les trois zones malgré la réduction drastique effectuée.

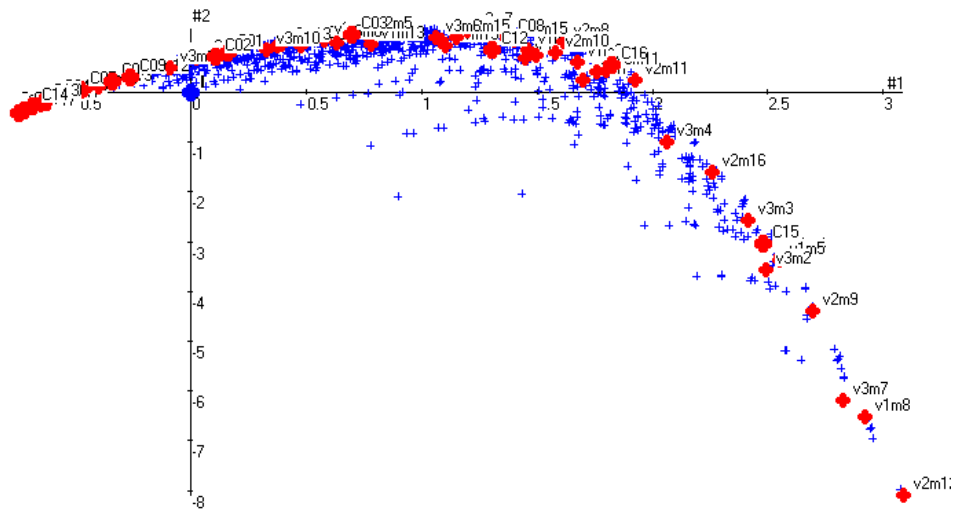


Figure 26 : ACM sur les calendriers des 3 zones (v1 = plaine, v2 = piémont, v3 = montagne) décrits par les 17 classes (m1 à m17) et la classification de consensus (C1 à C16). Représentation sur le premier plan factoriel (10% de variance).

A présent, nous allons examiner les liens entre les classes d’atmosphère et la classification de consensus décrivant les situations pluvieuses sur les trois zones. Cette classification de consensus permet ainsi de raccrocher toutes les classifications locales de pluie à un classement de l’atmosphère tout en préservant au maximum les liens entre les classifications de pluies locales.

La figure 27 permet de chiffrer la contingence entre les classes du « Radiosondage 45 » et la classification de consensus. Les situations pluvieuses sur les trois zones décrites par la classification de consensus sont assez bien reliées aux classes d’atmosphère.

La classe de consensus C15 (35%) et l’atmosphère A5 sont les mieux reliées. La classe C15 traduit le plus souvent la situation (plaine, piémont, montagne) = (P5, P16, P4) (Annexe 8). Ces trois classes pluviométriques représentent des pluies fortes (Annexe 7) et l’A5 est donc, comme on l’espérait, fortement liées aux pluies fortes.

La classe de consensus C6, représentant le temps sec sur les trois zones (situation (P17, P17, P17)), est bien reliée aux atmosphères sèches A8 et A16.

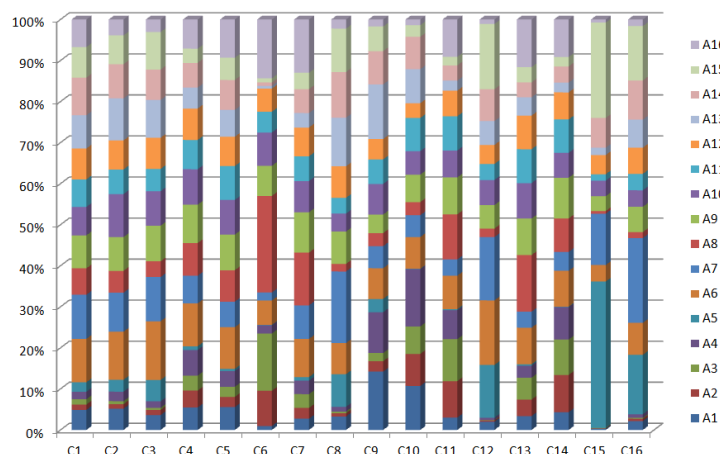


Figure 27 : Pourcentage des classes de consensus engendrées par les classes d’atmosphère

Après traitement de la classification de consensus, une simulation annelle du régime pluviométrique sur la région Cévennes-Vivarais, coordonnée sur les trois zones « plaine », « piémont » et « montagne », a été réalisée par Etienne Leblois (*Figure 28*). On observe que les pluies sur les trois zones sont reliées entre elles tout en étant distinctes. Cette année-là, le cumul de pluie annuel est de 580 mm en « plaine » (*Figure 28.a*), 850 mm en « piémont » (*Figure 28.b*) et 1200 mm en « montagne » (*Figure 28.c*). De plus, on discerne une hausse de l'intensité pluvieuse et du cumul de pluie en **automne** sur les trois zones traduisant des **pluies cévenoles** (plus marqué en montagne).

Cette première simulation, coordonnée sur les trois zones, appelle néanmoins à une étape d'évaluation qui ne fait pas l'objet de mon stage.

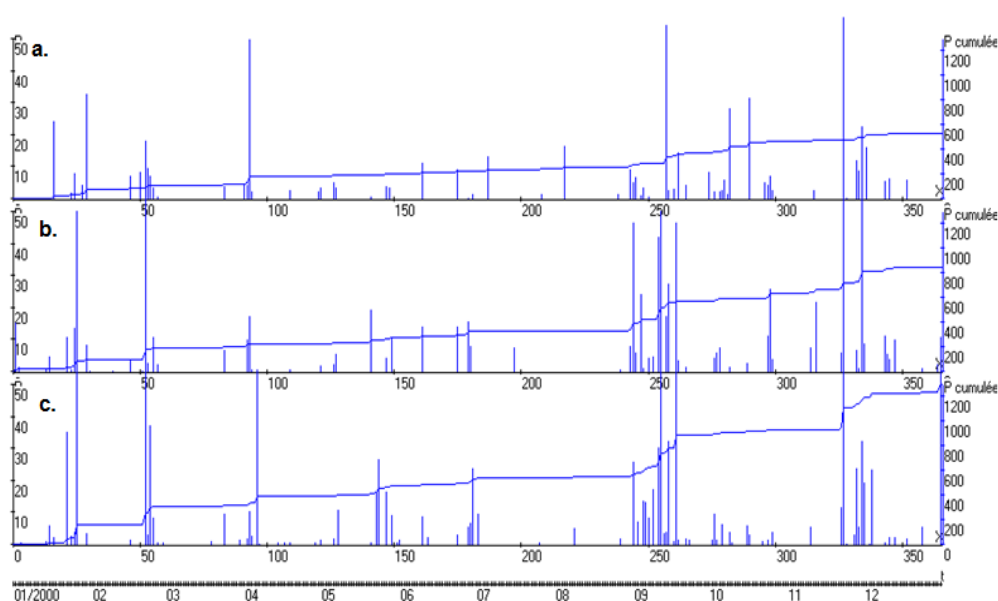


Figure 28 : Hyétogrammes au pas de temps journalier issus d'une simulation du régime pluviométrique annuel coordonnée sur les trois zones : a) en « plaine », b) en « piémont », c) en « montagne » (Leblois)

La classification de Consensus, a permis de réaliser une **simulation de pluie coordonnée sur 3 zones homogènes** aboutissant à la simulation du régime pluviométrique sur une région hétérogène comme la région Cévennes-Vivarais. Cela peut avoir un réel bénéfice sur **l'analyse du risque hydrologique** sur un grand bassin versant. De plus, on a pu **raccrocher plusieurs classifications locales de pluie à une classification d'atmosphère** tout en préservant au maximum les liens entre les classifications de pluies locales.

5 Discussion et conclusion

Ce stage de Master 2 recherche m'a permis de proposer une démarche scientifique visant à reproduire le régime pluviométrique de la région Cévennes-Vivarais, tout en respectant l'hétérogénéité de cette région. Les outils de classifications et les méthodes statistiques, sur lesquels nous nous sommes appuyés, nous ont aidés à mettre en évidence et à chiffrer les liens entre les types de temps et les pluies qui en découlent.

Cependant, le choix des descripteurs physiques a un impact majeur sur les classifications. Pour cette première étude, nous avons choisi de rester dans un système général décrit de la manière la plus simple en sélectionnant des descripteurs atmosphériques de base. De plus, afin de s'adapter à toutes les situations envisageables et de simuler des régimes de pluie sur la région Cévennes-Vivarais, nous avons privilégié la continuité temporelle des données d'entrées.

Par ailleurs, les classifications d'atmosphère pouvaient être obtenues à partir de plusieurs séries de données atmosphériques extraites des réanalyses ERA40. Les réanalyses ERA interim sont certes plus récentes mais n'étaient pas disponibles lors de ce stage.

Les données issues de la grille centrée de 25 points décrivent bien la situation atmosphérique horizontalement mais seulement à l'altitude 850 hPa. Cette altitude traduit les processus atmosphériques de basses couches qui expliquent les pluies orographiques.

Les données issues du radiosondage à la latitude 45.0 N et à la longitude 5.0 E (au-dessus de Valence) fournissent une description verticale de l'atmosphère (9 niveaux d'altitude renseignés) mais restent localisées en un seul point. Le choix de ce point peut être discuté. En effet, une classification de l'atmosphère a été réalisée à partir des données issues du radiosondage à la latitude 42.5 N et à la longitude 5.0 E (au-dessus de la mer Méditerranée). Ces deux classifications décrivent des atmosphères proches. Cependant la contingence entre les classes d'atmosphère du radiosondage au-dessus des terres et les classes de pluie de la région Cévennes-Vivarais reste meilleure.

Lors de cette étude, nous avons privilégié la description verticale de l'atmosphère en utilisant les données issues du « Radiosondage 45 » mais il serait intéressant de combiner les deux descriptions atmosphériques afin d'obtenir à la fois une variabilité horizontale et verticale de l'atmosphère.

Afin de valider la démarche scientifique proposée, des études de sensibilité sur le choix du nombre de classes de Kohonen et de classes de consensus, doivent être menées. En effet, plus le nombre de classes est élevé, moins elles contiennent d'effectifs et plus ces classes sont « fragiles ». De plus, un nombre important de classes rendrait très difficile la

description de l'enchaînement des classes par le modèle de Markov Caché. Enfin, un nombre trop faible de classes peut augmenter la variabilité intra-classe et rendre ces classes hétérogènes.

Bien entendu, les pluies simulées sur la région Cévennes-Vivarais doivent être également évaluées par comparaison des pluies observées sur chacune des zones « plaine », « piémont » et « montagne ».

Pour finir, cette démarche a de nombreux domaines d'applications.

D'abord, les résultats des simulations du régime pluviométrique sur la région Cévennes-Vivarais peuvent alimenter des modèles hydrologiques afin de mener des études d'analyse de risques hydrologiques sur de grands bassins versants hétérogènes.

Enfin, les liens mis en évidence entre les classes d'atmosphère et les classes de pluie peuvent être utilisés pour déterminer l'évolution du régime pluviométrique de la région Cévennes-Vivarais dans un contexte d'évolution climatique.

En effet, cette démarche permet une évaluation financière de ces aménagements (études coûts/bénéfices justifiant les décisions d'aménagement et motivant la réflexion sur les pratiques assurantielles). Tous les opérateurs en charge de territoires, qu'ils soient de droit public (Etat, autorités décentralisées, autorités déconcentrées) ou de statut privé (production d'électricité, assurance, aménagement de cours d'eau), se heurtent à de grandes difficultés méthodologiques pour construire des scénarios climatiques à l'échelle régionale qui présentent une cohérence territoriale suffisante. La société civile et les décideurs souhaitent une évaluation précise, à l'échelle régionale, des impacts à attendre du changement climatique sur les risques hydrologiques, la ressource en eau et les ressources associées.

6 Références

- ARTIGUE G., DUMAS D., MERTZ C., WESOLEK E. (2010), *Episode pluvio-orageux du 15 juin 2000 sur le Var - Retour d'expérience sur la prévision météorologique et hydrologique d'un épisode diluvien exceptionnel*. Keraunos, Observatoire Français des Tornades et des Orages Violents, Pôle Prévision - Pôle Suivi et recensement des phénomènes convectifs, 18 juin 2010
- BENZECRI JP (1973). *L'analyse des Données*. Dunod, Paris, France
- CORNILLON P-A., GUYADER A., HUSSON F., JEGOU N., JOSSE J., KLOAREG M., MATZNER-LOBER E., ROUVIERE L. (2008), *Statistiques avec R. Pratique de la statistique*, Presses universitaires de Rennes, ISBN : 978-2-7535-0722-7
- DELRIEU G., DUCROCQ V., GAUME E., NICOL J., PAYRASTRE O., YATES E., ANDRIEU H., AYRAL P.A., BOUVIER C., CREUTIN J.D., LIVET M., ANQUETIN S., LANG M., NEPPEL L., OBLED C., PARENT-DU-CHATELET J., SAULNIER G.M., WALPERSDORF A., WOBROCK W. (2005): *The catastrophic flash flood event of 8-9 September 2002 in the Gard region, France: a first case study for the Cévennes-Vivarais Mediterranean Hydro-meteorological Observatory*. Journal of Hydrometeorology, 6, pages 34-52
- DUCROCQ V., AULLO G., SANTURETTE P. (2003), *Les précipitations intenses et les inondations des 12 et 13 novembre 1999 sur le sud de la France*. La Météorologie - n° 42 - août 2003, pages 18-27
- DUCROCQ V., NUISSIER O., RICARD D., LEBEAUPIN C., THOUVENIN T. (2008), *A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern France II: Mesoscale triggering and stationarity factors*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 134: pages 131-145, DOI: 10.1002/qj.199
- EPHRAIM Y., MERHAY N. (2002), *Hidden markov processes*. IEEE Trans. Inform. Theory, 48, pages 1518-1569
- GIEC (2007), *Bilan 2007 des changements climatiques : rapport de synthèse*. Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A., GIEC, Genève, Suisse, ISBN 92-9169-222-0

- GODART (2009), *Les précipitations orographiques organisées en bandes dans la région Cévennes-Vivarais : caractérisation et contribution au régime pluviométrique*. Thèse Université Joseph Fourier, Laboratoire d'étude des Transfert en Hydrologie et Environnement, Ecole Doctorale « Terre, Univers, Environnement »
- KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R., COLLINS W., DEAVEN D., GANDIN L., IREDELL M., SAHA S., WHITE G., WOOLEN J., ZHU Y., CHELLIAH M., EBISUZAKI W., HIGGINS W., JANOWIAK J., MO K.C., ROPELEWSKI C., WANG J., LEETMAN A., REYNOLDS R., JENNE R., JOSEPH D. (1996), *The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project*. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 77, No. 3, March 1996, pages 437-471
- KALTEH A.M, HJORTH P., BERNDTSSON R. (2008), Review of the self-organizing map (SOM) approach in water resources: Analysis, modelling and application. Environmental, Modelling & Software 23, pages 835–845, DOI : 10.1016/j.envsoft.2007.10.001
- KOHONEN T., OJA E., STIMULA O., VISA A., KANGAS J. (1996), *Engineering Applications of the Self-Organizing Map*. Proceedings of the IEEE, Vol 84, No 10, October 1996, pages 1358-1384, Publisher Item Identifier: S 0018-9219(96)07176-9
- KOHONEN T. (1997), *Self-organizing maps*. 2nd ed. Berlin, Germany: Springer
- KOHONEN T., KASKI S., LAGUS K., SALOJARVI J., HONKELA J., PAATERO V., SAARELA A. (2000), *Self Organization of a Massive Document Collection*. IEEE Transactions on neural networks, Vol. 11, No. 3, May 2000, pages 574-585, Publisher Item Identifier: S 1045-9227(00)04036-4
- LAROCHE R. (2008), *Les événements naturels dommageables en France et dans le monde en 2007*. Direction Générale de la Prévention des Risques, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le Climat
- LAWRENCE R., RABINER (1989), *A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition*. Proceedings of the IEEE, vol. 77, No. 2 February, 1989, pages 257-286, DOI : 10.1109/5.18626

- LEBLOIS E. (2008), *Extraction de lexique bilingue à partir d'un corpus de traduction: une stratégie par écrémage*. JADT 2008 : 9^{ème} Journées internationales d'Analyse statistique des Données Textuelles, pages 713-724
- LEBLOIS E., JEANPIERRE A.L (2011), *Analyse de la pluie de la région de Querétaro, Mexique - Articulation avec la circulation atmosphérique*. Report to the project proyecto Agua-Queretaro, Universidad autonoma de Querétaro, Mexico
- LEBLOIS E., CREUTIN J.D. (2013), *Space time simulation of rainfall fields given a prescribed advection field: a geostatistical approach*. Water Resources Research, vol 49, DOI:10.1002/wrcr.20190
- MALARDEL S. (2009), *Fondamentaux de meteorology – A l'école du temps (2ème edition)*. Cépaduès-Edition, ISBN : 2.85428.851.3
- MINISCLOUX F., CREUTIN J.D., ANQUETIN S. (2001): *Geostatistical analysis of orographic rainbands*. Journal of Applied Meteorology, 40, pages 1835-1854
- MOLINIE G., CERESSETTI D., ANQUETIN S., CREUTIN J.D., BOUDEVILLAIN B. (2012), *Rainfall regime of a mountainous Mediterranean Region: Statistical analysis at short time steps*. Journal of Applied Meteo. and Climatology. 51, 3, pages 429-448 DOI: 10.1175/2011JAMC2691.1
- NUISSIER O., DUCROCQ V., RICARD D., LEBEAUPIN C., ANQUETIN S. (2008), *A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern France. I: Numerical framework and synoptic ingredients*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 134: pages 111-130, DOI: 10.1002/qj.200
- NUISSIER O., JOLY B., VIE B., DUCROCQ V. (2012), *Uncertainty of lateral boundary conditions in a convection-permitting ensemble: a strategy of selection for Mediterranean heavy precipitation events*. Natural Hazards Earth System Sciences, 12, pages 2993-3011, DOI:10.5194/nhess-12-2993-2012
- RUIN I., CREUTIN J.-D., ANQUETIN S., LUTOFF C. (2008). *Human exposure to flash-floods - Relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in southern France*, Journal of Hydrology, 361, pages 199-213.

SAPORTA G., (2006), *Probabilité, analyse des données et statistiques*. 2^{ème} édition révisée et augmentée, Edition Technip, Paris, 622 pages, ISBN : 978-2-7108-0814-5

SAUTER T., VENEMA V. (2011), *Natural Three-Dimensional Predictor Domains for statistical Precipitation Downscaling*. *Journal of Climate*, volume 24, pages 6132-6145. DOI: 10.1175/2011JCLI4155.1

SINGH V.P., (1997), *The use of entropy in hydrology and water resources*. *Hydrological processes*, 11, pages 587-626

SINGH V.P. (2000), *The entropy theory as a tool for modelling and decision-making in environmental and water resources*. *Water SA*, 26, pages 1-12

SHANNON C.E (1948), *A Mathematical Theory of Communication*. The Bell System Technical Journal, Vol. 27, pages 379–423, 623–656, July, October, 1948.

UPPALA S.M, KÄILBERG P.W, SIMMONS A.J, ANDRAE U., DA COSTA BECHTOLD V., FIORINO M., GIBSON J.K, HASELER J., HERNANDEZ A., KELLY G.A, LI X., ONOGI K., SAARINEN S., SOKKA N., ALLAN R.P, ANDERSON E., ARPE K., BALMASEDA M.A, BELJAARS A.C.M, VAN DE BERG L., BIDLOT J., BORMANN N., CAIRES S., CHEVALLIER F., DETHOF A., DRAGOSAVAC M., FISHER M., FUENTES M., HAGEMANN S., HOLM E., HOSKINS B.J., ISAKSEN L., JANSSEN P.A.E.M, JENNE R., MCNALLY A.P., MAHFOUF J-F, MORCRETTE J-J, RAYNER N.A., SAUNDERS R.W. , SIMON P., STERL A., TRENBERTH K.E., UNTCH A., VASIJEVIC D., VITERBO P., WOOLEN J. (2005), *The ERA-40 re-analysis*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, pages 2961-3012, DOI: 10.1256/qj.04.176

ZUCCHINI W., GUTTORP P. (1991), *A hidden Markov model for space-time precipitation*. *Water Resources. Res.*, 27, pages 1917-1923, DOI: 10.1029/91WR01403

Annexe 2 : Calculs des descripteurs statistiques de pluie pour chacune des dates

Le calcul des descripteurs statistiques de pluies se fait sur un tableau à n colonnes (n étant le nombre de stations pluviométriques) pour chacune des 15 705 dates. Ci-dessous un extrait du tableau des intensités pluviométriques pour chaque pluviomètre X et pour chaque date (ici les dix premières). NA signifie « Not available » : pas de donnée disponible.

dates	X283	X287	X288	X293	...	X372
195801010700	0,300000012	0	NA	0	...	0
195801020700	0,899999976	0	NA	0	...	0,30000001
195801030700	0	0	NA	0	...	0
195801040700	4,199999809	3	NA	4,19999981	...	6,9000001
195801050700	2,799999952	0	NA	0	...	0,2
195801060700	0	0	NA	0	...	0
195801070700	0	0	NA	0	...	0
195801080700	0	0	NA	0	...	0
195801090700	5,300000191	0	NA	0	...	0
195801100700	0	2	NA	2	...	4,19999981

- La moyenne de l'indicatrice $m(ind)$: détermine la proportion des sites où il pleut (entre 0 et 1):

$$m\ ind = \frac{\text{nombre de stations où il pleut}}{n}$$

- La moyenne des pluies totales $m(ptot)$: moyenne des intensités de pluie sur toutes les stations (en mm) :

$$m(ptot) = \frac{\sum_{j=1}^n \text{Intensités}}{n}$$

- La moyenne des pluies non nulles $m(pnn)$: moyenne des intensités de pluie sur les stations où il pleut (en mm):

$$m(pnn) = \frac{\sum_{j=1}^n \text{Intensités}}{\text{nombre de stations où il pleut}}$$

Remarque : si le nombre de station où il pleut était égal à 0, alors $m\ pnn = 0$

- L'écart type relatif sur les pluies non nulles $cv(pnn)$: coefficient de variation des pluies non nulles :

$$cv\ pnn = \frac{\sigma(pnn)}{m(pnn)}$$

Où :

$$\sigma(pnn) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - m(pnn))^2}{(\text{nombre de stations où il pleut} - 1)}}$$

Remarque : Si le nombre de stations où il pleut est inférieur à 2, alors $cv\ pnn = 1$

La classe 17 de temps sec se caractérise par :

$$m(\text{ind}) = 0 \quad m(\text{ptot}) = 0 \text{ mm} \quad m(\text{pnn}) = 0 \text{ mm} \quad cv(\text{pnn}) = 1$$

Ci-dessous, le tableau récapitulant les dix premières dates décrites par les quatre descripteurs calculés :

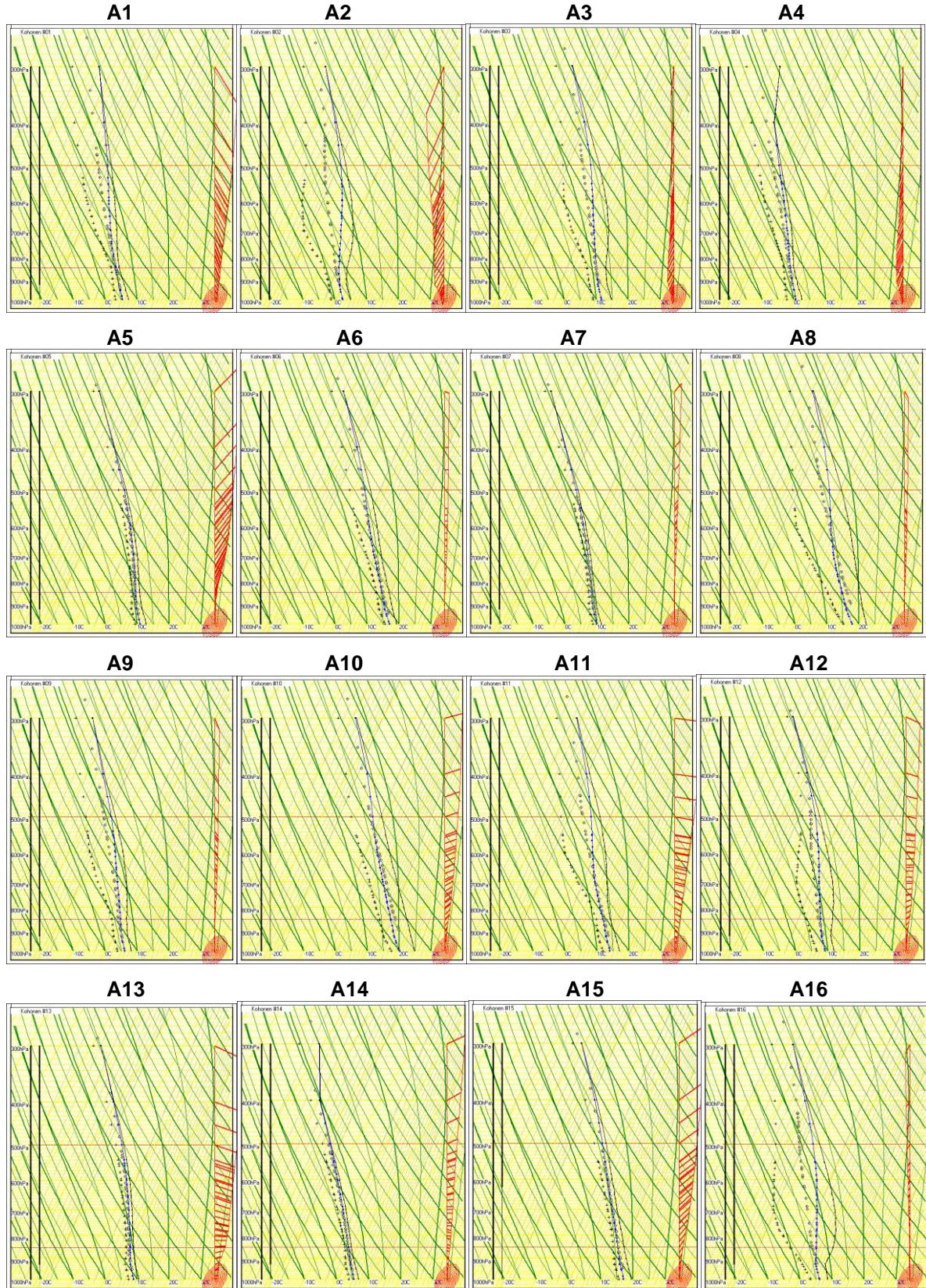
dates	m(ind)	m(ptot) (mm)	m(pnn) (mm)	cv(pnn)
195801010700	0,09090909	0,02727273	0,30000001	1
195801020700	0,27272727	0,29090909	1,06666666	0,80828232
195801030700	0,09090909	0,59090909	6,5	1
195801040700	0,72727273	3,09999998	4,26249998	0,57928522
195801050700	0,18181818	0,27272727	1,49999998	1,22565175
195801060700	0	0	0	1
195801070700	0	0	0	1
195801080700	0	0	0	1
195801090700	0,18181818	1,05454549	5,80000019	0,12191496
195801100700	0,63636364	1,9909091	3,12857144	0,4511699

Annexe 3 : Noyaux des classes de pluie sur la région « CV »

classes	m(ind)	m(ptot) (mm)	m(pnn) (mm)	cv(pnn)	effectifs	cumul annuel (mm)*
1	0,680	5,651	8,331	0,763	681	89,441
2	0,566	3,918	6,922	0,773	1098	99,971
3	0,127	0,206	1,609	0,861	1239	5,921
4	0,334	1,096	3,240	0,879	861	21,922
5	0,025	0,023	1,269	0,156	463	0,252
6	0,044	0,037	0,842	0,586	1299	1,110
7	0,089	0,215	2,523	1,475	628	3,136
8	0,021	0,032	1,208	1,002	2288	1,724
9	0,320	1,342	4,098	1,608	243	7,577
10	0,598	16,322	27,470	0,654	419	158,941
11	0,142	0,395	3,139	2,414	108	0,992
12	0,460	2,380	5,156	0,969	878	48,570
13	0,673	60,494	90,303	0,567	50	70,297
14	0,657	32,794	50,254	0,587	215	163,867
15	0,220	0,543	2,447	0,993	948	11,962
16	0,735	17,765	24,191	0,628	280	115,604
17	0,000	0,000	0,000	1,000	4007	0,000

*: $m(\text{ptot}) \times \text{effectifs} / \text{nombre années avec un nombre d'années égal à 43 ans}$.

Annexe 4 : Emagrammes qualifiant les 16 classes du « Radiosondage 45 »



Annexe 5 : Liste des évènements catastrophiques provoqués par des pluies cévenoles en France (23 jours) et classes de pluie (région « CV ») et d'atmosphère (« radiosondage 45 ») pour chaque date.

Dates (AAAMJJ)	Evènements	classes de pluie	classes d'atmosphère (00h, 6h, 12h, 18h)			
19580930	Débordements dans le Gard et l'Hérault notamment – 35 morts dans le Gard	13	15	15	15	15
19581004		10	15	15	15	15
19881003	Inondations - Nîmes – 10 morts	9	15	15	15	11
19920922	Inondations - Vaison-la-Romaine – 47 morts	14	15	15	15	15
19920926	Inondations - Aude et Pyrénées-Orientales – plusieurs victimes notamment à Rennes-les-Bains	2	8	8	10	15
19941105	Inondations - Vallée du Var	16	5	5	5	5
19941106		11	7	7	9	6
19960128	Puisserguier et débordement de l'Orb (Hérault)– 4 morts	16	9	7	7	7
19960129		2	7	7	9	7
19960130		8	9	9	9	16
19971216	Inondations - Languedoc-Roussillon (Hérault notamment)	16	14	4	5	5
19971217		14	5	5	5	5
19971218		13	5	5	5	5
19971219		16	5	5	5	5
19991112	Inondations - Débordements dans l'Aude, le Tarn, les Pyrénées-Orientales, l'Hérault et l'Aveyron – 36 morts ou disparus ; 438 communes sinistrées	16	7	7	5	5
19991113		16	5	7	7	7
19991114		1	7	9	7	9
19991226	Inondations -France métropolitaine (Sud-Est relativement épargné) 92 morts ; plus de 15 G € de dommages	12	13	13	1	13
19991227		16	13	1	13	13
19991228		4	1	1	1	1
20011006	Inondations - Gard – 2 morts		11	11	10	15
20011007			15	15	11	11
20011009	Inondations - Hérault mais aussi Gard		11	11	15	15

Annexe 6 : Extrait du calendrier des 17 classes de pluie sur la région « CV » et du calendrier des Etats cachés (EC) correspondant (10 premiers jours)

indices	dates	classes	EC
1	195801010700	3	2
2	195801020700	4	1
3	195801030700	3	2
4	195801040700	12	1
5	195801050700	12	1
6	195801060700	3	2
7	195801070700	3	2
8	195801080700	17	4
9	195801090700	3	2
10	195801100700	12	1

Annexe 7 : Noyaux des classes de pluie sur les zones « Plaine », « Piémont » et « Montagne »

- *Noyaux des classes de pluie sur la zone « Plaine » :*

classes	m(ind)	m(ptot) (mm)	m(pnn) (mm)	cv(pnn)	effectifs	cumul annuel (mm)*
1	0,763	5,756	7,491	0,794	285	38,128
2	0,235	0,638	2,681	0,814	298	4,416
3	0,594	4,276	7,228	0,311	447	44,419
4	0,771	22,635	29,474	0,336	192	101,002
5	0,585	18,516	31,932	0,332	224	96,394
6	0,207	0,236	1,164	0,169	303	1,660
7	0,748	5,848	7,800	0,362	468	63,605
8	0,698	47,933	70,483	0,468	61	67,954
9	0,578	3,534	6,051	0,896	330	27,105
10	0,217	0,274	1,247	0,499	375	2,384
11	0,415	1,309	3,071	0,416	458	13,934
12	0,576	2,933	5,093	0,582	508	34,627
13	0,279	1,409	5,123	1,314	149	4,881
14	0,095	0,186	1,855	1,002	1342	5,789
15	0,409	1,630	3,908	0,810	406	15,384
16	0,550	3,430	6,189	1,383	128	10,205
17	0,000	0,000	0,000	1,000	9731	0,000

- *Noyaux des classes de pluie sur la zone « Piémont » :*

classes	m(ind)	m(ptot) (mm)	m(pnn) (mm)	cv(pnn)	effectifs	cumul annuel (mm)*
1	0,058	0,063	1,354	0,233	624	0,907
2	0,027	0,052	1,572	1,027	1699	2,040
3	0,175	0,207	1,187	0,677	633	3,051
4	0,336	1,224	3,513	1,670	181	5,150
5	0,388	1,254	3,172	0,797	611	17,809
6	0,084	0,129	1,482	0,687	778	2,324
7	0,514	2,501	4,855	0,681	553	32,138
8	0,625	4,122	6,574	0,556	696	66,668
9	0,675	29,037	43,438	0,445	264	178,151
10	0,632	4,794	7,601	1,050	409	45,564
11	0,730	8,297	11,312	0,587	548	105,665
12	0,684	63,503	93,526	0,399	35	51,653
13	0,270	0,888	3,216	0,851	569	11,744
14	0,133	0,391	2,882	1,434	359	3,259
15	0,506	2,604	5,122	1,225	297	17,970
16	0,627	14,604	23,341	0,463	422	143,221
17	0,000	0,000	0,000	1,000	7028	0,000

- *Noyaux des classes de pluie sur la zone « Montagne » :*

classes	m(ind)	m(ptot) (mm)	m(pnn) (mm)	cv(pnn)	effectifs	cumul annuel (mm)*
1	0,211	0,721	3,768	2,191	118	1,978
2	0,578	34,503	59,798	0,538	154	123,491
3	0,727	29,248	40,239	0,603	253	171,975
4	0,584	14,888	25,571	0,598	471	162,974
5	0,044	0,030	0,659	0,353	965	0,670
6	0,500	2,920	5,815	0,756	1132	76,830
7	0,677	64,952	97,430	0,539	70	105,668
8	0,445	2,243	5,042	1,300	360	18,767
9	0,026	0,035	1,210	1,006	2048	1,669
10	0,365	1,191	3,222	0,792	926	25,629
11	0,734	7,901	10,743	0,669	581	106,693
12	0,225	0,400	1,768	0,796	920	8,555
13	0,127	0,246	1,898	1,335	592	3,389
14	0,115	0,134	1,134	0,738	1039	3,226
15	0,613	4,114	6,720	0,773	912	87,206
16	0,281	0,776	2,759	1,145	591	10,652
17	0,000	0,000	0,000	1,000	4573	0,000

*: $m(\text{ptot}) \times \text{effectifs} / \text{nombre années avec un nombre d'années égal à 43 ans}$

Annexe 8 : Tableaux de contingence entre la classification de consensus et les classifications sur les zones « plaine », « piémont », « montagne »

- Contingence Consensus / Plaine :

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17
C1	1	33	18	0	0	129	8	0	2	124	27	53	21	278	18	3	0
C2	13	101	5	0	1	31	2	0	21	58	66	14	28	290	34	5	508
C3	10	37	15	0	2	49	7	0	34	40	57	25	22	109	30	10	77
C4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	553
C5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	768
C6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4007
C7	2	40	3	0	0	42	0	0	5	61	23	1	10	576	31	0	0
C8	68	28	137	5	3	19	217	0	60	41	131	131	16	27	99	16	16
C9	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	2	1	0	495
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	799
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1378
C12	97	48	42	4	3	29	33	1	106	46	70	88	44	59	100	73	29
C13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	636
C14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	463
C15	46	2	64	150	184	0	79	58	29	1	15	44	3	0	16	5	1
C16	48	8	163	33	31	2	122	2	73	3	69	152	4	1	77	16	1

- Contingence Consensus / Piémont :

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17
C1	8	6	254	25	88	238	18	1	0	0	2	0	57	4	1	2	11
C2	7	18	335	6	1	41	6	1	0	4	3	0	463	283	0	0	9
C3	3	1	3	141	369	0	2	0	0	1	0	0	0	1	3	0	0
C4	0	553	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C5	395	0	0	0	0	373	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4007
C7	193	297	25	1	2	31	0	0	0	0	0	0	6	1	0	0	238
C8	0	0	0	5	31	1	485	429	4	2	7	0	12	0	21	17	0
C9	18	186	10	0	22	84	0	0	0	2	0	0	0	59	0	0	122
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	799
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1378
C12	0	2	5	3	95	10	39	31	0	349	20	0	27	11	268	12	0
C13	0	636	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	463
C15	0	0	0	0	3	0	2	3	260	2	3	35	0	0	3	386	0
C16	0	0	1	0	0	0	1	231	0	49	513	0	4	0	1	5	0

- Contingence Consensus / Montagne:

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	
C1	15	0	1	0	57	95	0	36	25	33	0	184	29	149	7	77	7	
C2	28	2	0	2	34	128	1	75	36	300	3	160	84	95	70	153	6	
C3	4	2	0	2	0	114	0	80	1	199	3	4	4	3	88	20	0	
C4	0	0	0	0	0	0	0	0	284	0	0	171	98	0	0	0	0	
C5	0	0	0	0	93	27	0	15	133	25	0	128	62	131	0	87	67	
C6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4007
C7	6	0	0	0	145	4	0	3	190	15	0	42	77	84	0	26	202	
C8	3	5	8	39	0	530	1	63	0	97	103	17	0	1	126	21	0	
C9	53	0	0	0	0	66	0	20	0	212	1	0	0	0	0	151	0	
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	199	204	396	0	0	0	
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	1378	0	0	0	0	0	0	0	0	
C12	9	17	18	146	0	152	0	63	1	41	124	15	33	0	197	56	0	
C13	0	0	0	0	172	0	0	0	0	0	0	0	0	180	0	0	284	
C14	0	0	0	0	463	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
C15	0	128	143	278	0	7	67	2	0	0	41	0	0	0	31	0	0	
C16	0	0	83	4	1	9	1	3	0	4	306	0	1	0	393	0	0	