

INSTITUT DE MATHÉMATIQUES ET DE SCIENCES PHYSIQUES

UNIVERSITÉ D'ABOMEY
CALAVI (BÉNIN)

Mémoire de Master

Domaine
Physique Théorique

Spécialité
Physique de l'Atmosphère

📖 **Thème** 📖

Etude de processus sous-jacents et variables pertinentes contrôlant la variabilité du flux de chaleur latente.

Superviseurs :

Prof. Basile B. KOUNOUHEWA ,
Professeur Titulaire/CAMES, Laboratoire de Physique de Rayonnement,
Université d'Abomey-Calavi, Bénin.

Dr. Jean-Martial COHARD,
Maître de Conférence, Université Grenoble Alpes, France.

Encadreur :

Dr. Ossénatou MAMADOU,
Maître Assistant à l'Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques
de l'Université d'Abomey-Calavi.

Présenté par :

Sèho Arthon NOUMON

Email : arthonnoumon@gmail.com

Laboratoire de Physique de Rayonnement (LPR)



THE ABDUS SALAM
INTERNATIONAL CENTRE FOR
THEORETICAL PHYSICS (ITALY)



Dédicace

*A ma mère TOSSOU H. Antoinette, mon feu père
NOUMON Tohinnou et tous mes frères et sœurs , je dédis ce mémoire.*

Remerciements

Au terme de ce travail, mes sincères remerciements vont à l'égard du :

- Professeur Léonard TODJIHOUNDE, Directeur de l'Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques (IMSP) de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin) et le Professeur Carlos OGOUYANDJOU, le Directeur Académique de l'Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques (IMSP) ;
- Professeur Basile KOUNOUHEWA, Directeur du Laboratoire de Physique du Rayonnement (LPR) pour l'effort consenti à la supervision de ce travail ;
- Dr Ossénatou MAMADOU, Maître Assistant à l'IMSP, pour avoir encadrer ce travail malgré toutes ses occupations, pour le bon cadre de travail et pour le modèle de chercheur qu'elle représente et qui inspire ;
- Laboratoire Mixte International Ressources en Eau et de la Zone Critique (REZOC) et ses responsables, le Professeur Emmanuel LAWIN et Dr Sylvie GALLE, pour m'avoir accordé un stage et un financement afin que ce travail soit effectif ;
- Dr Jean-Martial COHARD de l'Université Grenoble Alpes pour avoir accepté de superviser ce travail dans le cadre du LMI REZOC.
- Des enseignants qui nous ont tenu en Master II Physique Théorique, je veux noter les Professeurs Jean CHABI OROU, Gabriel AVOSSEVOU, Joël TOSSA, Docteurs Vincent MONWANOU, Clément MIWADINO, Laurent HINVI, Charles GONÇALVES, Toussaint OKE, Stéphane HOUNDJO, pour tous les efforts consentis afin de nous donner les meilleures bases ;
- Des membres de l'équipe de Micro-météorologie de l'IMSP pour les échanges et conseils ;
- Mes camarades de Master II pour la convivialité, l'entraide durant notre formation ;
- Miriam HOUNSINOU pour le soutien de tous les jours ;
- Mes amis Odilon Joël HOUDEGNONTO, Erick MIGNIGBENAN et Sabiadjiyo SINON BIAOU pour les soutiens de tout ordre ;
- Tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

Dans cette étude nous présentons les résultats comparatifs par saison et par année des variables météorologiques qui influencent la variabilité du flux de chaleur latente (LE) de même que les processus qui le contrôle durant une période de six ans (2008 à 2013) sur un site de culture de l'observatoire AMMA-CATCH (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique) à Nalohou au nord du Bénin. Les données exploitées dans cette analyse sont à l'échelle de la demi-heure et acquises en utilisant le système d'eddy covariance. La détermination des processus a été effectuée avec l'analyse en composante principale et la régression pas à pas pour identifier les variables pertinentes.

Les résultats obtenus montrent que le premier processus qui contrôle la variabilité du LE est la demande en eau atmosphérique quelque soit la saison. Elle est suivie de l'énergie disponible puis de l'humidité du sol en saison sèche et de la vitesse du vent en saison humide. Cependant, une spécificité s'observe pendant les années 2008 et 2010 comparativement aux autres années et pour certaines saisons.

Avec la régression pas à pas, nous constatons que les variables pertinentes qu'on peut retenir sont : le rayonnement net (R_n), le déficit de pression de vapeur d'eau (VPD), la vitesse du vent (U), la température de l'air (T_a) et l'humidité du sol (W_s). En saison sèche et les phases de transition, T_a n'est pas pertinente et en saison humide c'est le VPD qui ne l'est pas. R_n est la variable principale durant toute l'année mises à part la saison sèche de 2012 qui donne U comme principale variable et les phases d'assèchements de 2009 et 2010 dont la première variable principale est W_s . Il ressort aussi que la température du sol dans cette étude est peu pertinente. Enfin, les précipitations et les caractéristiques du couvert végétal ne sont pas utilisées compte tenu de l'échelle d'étude.

Abstract

In this study we present the comparative results by season and by year of the meteorological variables that influence the variability of latent heat flux (LE) as well as the processes that control it during a period of six years (2008 to 2013) on a culture site of the AMMA-CATCH observatory (Analyse Multidisciplinaire de la Moussoon Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique) in Nalohou in northern Benin. The data used in this analysis are at the half-hour scale and acquired using the eddy covariance system. Process determination was performed with principal component analysis and stepwise regression to identify relevant variables.

The results obtained show that the first process which controls the variability of the LE is the demand for atmospheric water whatever the season. It is followed by the available energy, then by soil moisture in the dry season and wind speed in the wet season. However, a specificity is observed during the years 2008 and 2010 compared to other years and for certain seasons.

With the stepwise regression, we find that the relevant variables that can be retained are : the net radiation (Rn), the water vapor pressure deficit (VPD), the wind speed (U), the temperature air (Ta) and soil moisture (Ws).

In the dry season and the transition phases, Ta is irrelevant and in the wet season it is the VPD which is not.

Rn is the main variable throughout the year apart from the dry season of 2012 which gives U as the main variable and the dryness phases of 2009 and 2010 where the first main variable is Ws. It also appears that the temperature of the soil in this study is of little relevance. Finally, in this study, the precipitation and the characteristics of the vegetation cover are not used given the scale of the study.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Introduction générale	2
1 Généralités sur le flux de chaleur latente	4
1.1 Transfert d'énergie	4
1.2 Quelques modèles empiriques du flux de chaleur latente	6
1.3 Ecoulement dans la Couche Limite Atmosphérique (CLA)	8
1.4 Conclusion	10
2 Exploration des méthodes utilisées	11
2.1 Analyse en Composantes Principales (ACP)	11
2.1.1 Fondement théorique de l'analyse en composantes principales (ACP)	11
2.1.2 Démarche d'obtention des axes principaux	16
2.1.3 Représentation et interprétation des nuages	19
2.2 Sélection de variables pertinentes par régression	20
2.2.1 Régression linéaire simple et multiple	20
2.2.2 Les méthodes de sélection de variables pertinentes : stepwise	22
2.2.3 Les critères de sélection	23
2.2.4 Colinéarité et redondance	24
2.2.5 Gestion de la non linéarité : Régression partielle	24
2.3 Conclusion	25

3	<i>Détermination des Composantes principales et Identification des processus</i>	26
3.1	Description du site	26
3.2	Appareils de mesure	26
3.3	Délimitation des saisons	27
3.4	Gestion des données manquantes	27
3.5	Détermination des composantes principales par saison	28
3.5.1	Saison sèche	29
3.5.2	Saison humide	37
3.5.3	Phase d'assèchement	42
3.5.4	Phase d'humidification	47
3.6	Conclusion	52
4	<i>Sélection de variables pertinentes par la régression pas par pas</i>	53
4.1	Sélection de variables pertinentes par régression pas à pas	53
4.2	Ce qu'on peut retenir	58
4.3	Conclusion	60
	Conclusion et perspectives	62
	ANNEXE	i
	Annexe A :Appareils de mesure	i
	Annexe B :Tableaux et figures des résultats en ACP	ii

Table des figures

1.1	Bilan d'énergie moyen annuel de la terre et échange des flux entre la terre, l'atmosphère et l'espace (figure tirée du cours de Aymeric Spiga, 2013-2014; élaborée selon Trenberth et al. 2009)	5
3.1	Histogramme des valeurs propres des saisons sèches de 2008 à 2013 . . .	31
3.2	Cercle de corrélation et qualité de représentation des saisons sèches de 2008 à 2013.	33
3.3	Graphe des contributions des variables au premier axe principal pour les saisons sèches de 2008 à 2013	35
3.4	Graphe des contributions des variables au deuxième axe principal pour les saisons sèches de 2008 à 2013	36
3.5	Graphe des contributions des variables au troisième axe principal pour les saisons sèches de 2008 à 2013	37
3.6	Cercle de corrélation des saisons humides de 2008 à 2013	40
3.7	Cercle de corrélation des phase d'assèchement de 2008 à 2013	45
3.8	Cercle de corrélation des saisons humide de 2008 à 2013	50
4.1	Histogramme des valeurs propres des saisons humide de 2008 à 2013 . . .	ii
4.2	Graphe des contributions des variables au premier axe principal pour les saisons humide de 2008 à 2013	iii
4.3	Graphe des contributions des variables au deuxième axe principal pour les saisons humide de 2008 à 2013	iv
4.4	Graphe des contributions des variables au troisième axe principal pour les saisons humide de 2008 à 2013	v
4.5	Histogramme des valeurs propres des phase d'assèchement de 2008 à 2013 :règle de "coude"	vi
4.6	Graphe des contributions des variables au premier axe principal pour les phases d'assèchement de 2008 à 2013	vii
4.7	Graphe des contributions des variables au deuxième axe principal pour les phases d'assèchement de 2008 à 2013	viii

4.8	Graphe contribution des variables au troisième axe principal pour les phases d'assèchement de 2008 à 2013	ix
4.9	Histogramme des valeurs propres des phases d'humidification de 2008 à 2013 :règle de "coude"	x
4.10	Graphe des contributions des variables au premier axe principal pour les phases d'humidification de 2008 à 2013	xi
4.11	Graphe des contributions des variables au deuxième axe principal pour les phases d'humidification de 2008 à 2013	xii
4.12	Graphe des contributions des variables au troisième axe principal pour les phases d'humidification de 2008 à 2013	xiii

Liste des tableaux

1.1	Ordres de grandeurs pour les flux énergétiques actuels à la surface de la Terre	4
3.1	Intervalle des saisons	27
3.2	Pourcentage de données manquantes de LE par année et par saison	28
3.3	Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2008.	29
3.4	Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2009.	30
3.5	Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2010.	30
3.6	Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2011.	30
3.7	Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2012.	30
3.8	Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2013.	31
3.9	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2008.	32
3.10	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2009.	34
3.11	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2010.	34
3.12	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2011.	34
3.13	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2012.	34
3.14	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2013.	35

3.15 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2008.	38
3.16 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2009.	38
3.17 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2010.	38
3.18 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2011.	39
3.19 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2012.	39
3.20 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2013.	39
3.21 contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2008	41
3.22 contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2009.	41
3.23 contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2010.	41
3.26 contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2013.	41
3.24 contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2011.	42
3.25 contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2012.	42
3.27 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d'assèchement 2008.	43
3.28 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la la phase d'assèchement 2009	43
3.29 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d'assèchement 2010.	43
3.30 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d'assèchement 2011.	44
3.31 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d'assèchement 2012.	44
3.32 Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d'assèchement 2013.	44
3.33 Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d'assèchement 2008	46
3.34 Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d'assèchement 2009.	46

3.35	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d'assèchement 2010.	46
3.36	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d'assèchement 2011.	46
3.37	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d'assèchement 2012.	47
3.38	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d'assèchement 2013.	47
3.39	Valeurs propres , pourcentage de variance et son cumul pour la phase d'humidification 2008.	47
3.40	Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d'humidification 2009.	48
3.41	Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumule pour la phase d'humidification 2010.	48
3.42	Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d'humidification 2011.	48
3.43	Valeurs propres, pourcentage de variance et cumul pour la phase d'humidification 2012.	48
3.44	Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d'humidification 2013.	49
3.45	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la phase d'humidification 2008.	51
3.46	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la phase d'humidification 2009.	51
3.47	Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la phase d'humidification 2010.	51
3.48	Contribution des variable à la variance de chaque axe propre pour la phase d'humidification 2011.	51
3.49	Contribution des variable à la variance de chaque axe propre pour la phase d'humidification 2012.	52
3.50	Contribution des variable à la variance de chaque axe propre pour la phase d'humidification 2013.	52
4.1	Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des saisons sèches 2008-2010	55
4.2	Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des saisons sèche 2011-2013	56
4.8	Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des Phases d'assèchement 2011-2013	56
4.3	Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des saisons humides 2008-2010	57

4.4	Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des saisons humides 2011-2013	58
4.5	Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des Phases d'humidification 2008-2010	59
4.6	Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des Phases d'humidification 2011-2013	60
4.7	Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des Phases d'assèchement 2008-2010	61
4.9	Les différents appareils sur la station de Nalohou . (Mamadou, 2014)	i

Introduction générale

La vie sur la terre est conditionnée par la présence de l'énergie solaire. Cette énergie réchauffe la terre et crée des conditions favorables à la vie. A la surface de la terre, l'énergie solaire se décompose en plusieurs autres flux d'énergie parmi lesquels on note les flux de chaleur latente de chaleur sensible, tous issus de la convection thermique de l'air, favorisant *in-fine* la perte de la vapeur d'eau par évapotranspiration réelle. Ces flux jouent également un rôle majeur dans l'évolution de la couche limite atmosphérique dans le monde en général (Barr et Betts, 1997) et en Afrique de l'Ouest en particulier (Guichard et al., 2009 ; Taylor et al., 2011, Galle et al., 2018). En effet, les échanges de chaleur sensible et de vapeur d'eau (équivalent énergétique de l'évapotranspiration réelle ETR) qui s'effectuent dans la Couche Limite Atmosphérique permettent le déclenchement de la convection en apportant une partie de l'eau pour la formation des nuages et par conséquent des précipitations.

Par ailleurs, l'évapotranspiration est une composante majeure du bilan hydrique, qui relie de manière unique les cycles de l'eau, de l'énergie et du carbone (Fisher et al., 2017 ; Zhou et Zhou, 2009) ; ce qui suscite son intérêt dans divers domaines scientifiques. Une partie importante des précipitations retourne dans l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration en zone semi-aride (Huizhi et Jianwu, 2012) et cette proportion peut représenter 80% du rayonnement net pendant la saison des pluies (Suyker et Verma, 2008). En particulier dans la zone soudanienne du Nord Bénin, entre 70 à 75% du rayonnement net sont dissipés en évapotranspiration réelle (Mamadou et al., 2014 ; 2016). Les résultats antérieurs ont d'ailleurs montré qu'à l'échelle saisonnière, l'humidité du sol est le principal facteur qui contrôle la partition énergétique du bilan radiatif en flux de chaleur sensible et de chaleur latente (Mamadou et al., 2016). Cependant, les mécanismes sous-jacents ainsi que ceux contrôlant la variabilité à multiples échelles de ces flux, notamment celui du flux de chaleur de chaleur sont restés inexplorés jusqu'à présent. Comprendre les processus qui affectent l'évapotranspiration (équivalent en eau du flux de chaleur latente) à différentes échelles temporelles et dans diverses conditions environnementales est ainsi crucial pour caractériser **la variabilité inter-annuelle de l'évapotranspiration en zone soudanienne.**

L'objectif principal de cette étude, effectuée dans le cadre du Laboratoire Mixte International Ressources en Eau et de la Zone Critique (REZOC), est de caractériser la variabilité saisonnière du flux de chaleur latente en termes de facteurs de contrôles pertinents en utilisant six (06) années de données recueillies par eddy covariance sur un site de culture à Nalohou dans le nord du Bénin. De façon spécifique, il s'agit :

- i) de déterminer les processus sous-jacents qui contrôlent le comportement du flux de chaleur latente en utilisant l'Analyse en Composantes Principales ;
- ii) d'identifier les variables météorologiques pertinentes qui l'influencent à l'échelle de la demi-heure.

Ce document se subdivise en quatre chapitres. Le premier est une généralité sur le flux de chaleur latente. Le deuxième présente les différentes méthodes utilisées pour analyser les données. Le troisième chapitre aborde les résultats obtenus sur la détermination des composantes principales et l'identification des processus et le dernier chapitre présente ceux issus de la sélection de variables pertinentes par régression pas à pas.

Généralités sur le flux de chaleur latente

1.1 Transfert d'énergie

L'origine de la chaleur à la surface de terre à été longtemps une préoccupation majeure vue qu'elle conditionne favorablement la vie humaine et des végétaux de même que les conditions météorologiques et les changements climatiques. Au XVIII siècle le mathématicien Joseph Fourier a proposé trois sources possibles de la chaleur à la surface terrestre : l'énergie provenant du soleil, l'énergie provenant des profondeurs de la terre et l'énergie provenant de l'espace, des autres éléments de l'espace dont la lumière et les rayonnements parviennent jusqu'à la terre (Fourier J., 1824). En 2011, (P. von Balmoos, 2011) donne les sources d'énergies avec leurs ordres de grandeur qu'il récapitule dans un tableau 1.1 :

TABLE 1.1 – Ordres de grandeurs pour les flux énergétiques actuels à la surface de la Terre .

Rayonnement électromagnétique reçu du Soleil (principalement visible et IR)	$1,710^{17}W$
Géothermie (radioactivités à période longue : $^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{40}K$)	$\sim 4,410^{13}W$
Civilisation en 2010 ($\sim 10^9$ humains consommant 10 t de pétrole/an)	$1,610^{13}W$
Énergie rotative dissipée par les marées	$2,810^{12}W$
Vent solaire (pour « cible magnétosphérique » de $25 R_{Terre} \sim 10^{14}W$)	$\sim 210^{11}W$
Rayonnement du fond cosmologique (corps noir* à 2,7 K)	$1,610^9W$
Rayonnement électromagnétique reçu des étoiles (visible, IR)	$1,310^9W$
Rayonnement cosmique (protons, alphas)	$9108W$
Météorites (~ 30000 tonnes par an, supposant $v_{impact} \approx 20$ km/s)	$\sim 210^8W$

Dans l'atmosphère, les rayons solaires viennent avec une quantité d'énergie donnée. Selon les conditions atmosphériques, la quantité d'énergie venant à la terre varie constamment. Lorsque l'énergie vient du soleil, elle vient sous forme radiative, de

rayonnement électromagnétique, sans aucun support de transfert. Les rayonnements de courte longueur d'onde pénétrant dans l'atmosphère sont réfléchis par les particules, les nuages et la surface de la terre, diffusés et même absorbés selon des gammes de longueur d'onde par ces particules, les aérosols et les traceurs. Ce que illustre la figure ci-dessous.



FIGURE 1.1 – Bilan d'énergie moyen annuel de la terre et échange des flux entre la terre, l'atmosphère et l'espace (figure tirée du cours de Aymeric Spiga, 2013-2014; élaborée selon Trenberth et al. 2009)

Le rayonnement net reçu qui arrive finalement à la surface est donné par la différence entre les longueurs d'onde reçues et longueurs d'onde émises de la couche atmosphérique considérée. Elle est obtenue par la relation :

$$Rn = LW_{in} + SW_{in} - (LW_{out} + SW_{out}) \quad (1.1)$$

- Rn est le rayonnement net ;
- LW_{in} Rayonnement de grande longueur d'onde entrant à la surface ;
- LW_{out} Rayonnement de grande longueur d'onde sortant de la surface ;
- SW_{in} Rayonnement de courte longueur d'onde entrant à la surface ;
- SW_{out} Rayonnement de courte longueur d'onde sortant de la surface.

Cette expression peut être réécrite en utilisant l'albédo α qui est la proportion du rayonnement de courte longueur d'onde sortant de celle qui rentre à la surface et donne

une idée de la capacité ou pouvoir de réflexion d'une surface.

$$\alpha = \frac{SW_{out}}{SW_{in}} \quad (1.2)$$

Ainsi :

$$Rn = LW_{in} - LW_{out} + SW_{in}(1 - \alpha) \quad (1.3)$$

Dans la couche surfacique terrestre, le rayonnement net se décompose en plusieurs flux que sont : le flux de chaleur latente(LE), le flux de chaleur sensible(H), le flux de chaleur dans le sol (G) et une énergie stockée(ΔS) dans la couche elle même. Le bilan énergétique à la surface de la terre est donné par la relation 1.4 suivante :

$$Rn - G - \Delta S = H + LE \quad (1.4)$$

Dans ce bilan d'énergie, le LE étant capital vue ses intérêts, fait objet de cette étude.

1.2 Quelques modèles empiriques du flux de chaleur latente

Le flux de chaleur latente est la correspondance en énergie de l'évapotranspiration réelle observée en un lieu. Il est l'énergie qui sert à l'évaporation de l'eau dans l'atmosphère. Elle s'évalue en fonction de l'évapotranspiration par la formule suivante :

$$LE = \lambda.ETR \quad (1.5)$$

où λ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau et ETR l'évapotranspiration réelle.

L'évapotranspiration est la quantité de vapeur d'eau provenant de trois phénomènes : l'évaporation des eaux à la surface du sol et des cours d'eau et autres surfaces interceptant la pluie due au rayonnement solaire, l'évaporation des eaux du sol due au gradient d'humidité (quand l'air est plus sec que le sol) et de la transpiration des végétaux. Thornthwaite (1948) fut le premier qui a donné le nom d'évapotranspiration à l'ensemble de l'eau évaporée à la surface et de la vapeur d'eau obtenue par transpiration des végétaux vue la difficulté rencontrée par les chercheurs à séparer les deux depuis la fin du XVIIème siècle.

On distingue trois sortes d'évapotranspiration : l'évapotranspiration réelle (ETR), l'évapotranspiration de référence (ETo) et évapotranspiration potentielle (ETP).

- L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau perdue dans l'atmosphère sous un climat donné, par unité de temps et de surface horizontale d'un champ couvert d'une végétation verte, dense, basse en plein développe-

ment et disposant de l'eau en abondance. Elle a été introduite par Thornthwaite (1948) qui la définit comme telle (Nguyen-Minh, 1966).

- L'évapotranspiration de référence (ET_o) est la quantité d'eau transmise à l'atmosphère par une surface de référence bien irriguée en eau.
- L'évapotranspiration réelle (ETR) d'une région est la quantité d'eau réellement transmise à l'atmosphère par celle-ci sous forme de vapeur.

Dans la littérature, plusieurs modèles sont proposés pour estimer l'évapotranspiration. Parmi ces modèles nous avons entre autres :

- Le modèle de Penman-Monteith

Sa formulation exprimée par Huizhi et Jianwu (2012) se présente comme suit :

$$ET = \frac{s(Rn - G) + \rho_a C_p G_a VPD}{\lambda[s + \gamma(1 + \frac{G_a}{G_s})]} \quad (1.6)$$

Avec :

- G_a la conductance aérodynamique ;
- G_s la conductance surfacique ;
- C_p est la chaleur spécifique de l'air à pression constante ;
- ρ_a la densité de l'air ;
- VPD déficit de la pression de vapeur ;
- λ est la chaleur latente de vaporisation ;
- s est la pente de la pression de vapeur saturante fonction de la température ;
- $\gamma = 0.66kPaC^{-1}$ est la constante psychométrique ;
- Le modèle de Priestley-Taylor

Formulé par Priestley et Taylor (1972) et discuté par J.P. Lhomme (1997), elle est donnée par :

$$ET = \alpha ET_o = \alpha \frac{s(Rn - G)}{s + \gamma} \quad (1.7)$$

Avec :

- ET_o est l'évapotranspiration de référence ;
- Rn est le rayonnement net ;
- G est le flux de chaleur dans le sol ;
- α est le coefficient de Priestley-Taylor ;
- Δ est la pente de la pression de vapeur saturante fonction de la température ;
- $\gamma = 0.66kPaC^{-1}$ est la constante psychométrique.

1.3 Ecoulement dans la Couche Limite Atmosphérique (CLA)

La notion de couche limite est la portion influencée par la rencontre d'un obstacle par un fluide en écoulement. Ainsi, la couche limite atmosphérique est définie selon (Stull,1988) comme la partie de la troposphère qui est directement influencée par la présence de la surface de la terre et réagit aux forces de surface dans un délai d'environ une heure ou moins.

Les équations qui régissent la dynamique d'une parcelle d'air dans l'atmosphère considérée comme un fluide et gaz parfait sont :

- Equation de Navier-Stocke (Stull, 1988)

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_I + \underbrace{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{II} = \underbrace{-\delta_{i3}g}_{III} + \underbrace{f_c \varepsilon_{ij3} u_j}_{IV} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i}}_V + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2}}_{VI} \quad (1.8)$$

Avec $i = 1, 2, 3$ tel que $u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w$ les composantes de la vitesse du vent dans les directions respectives $x_1 = x$ (est), $x_2 = y$ (nord) et $x_3 = z$ (verticale) dans un coordonnée cartésien, g la constante gravitationnelle, f_c la force de Coriolis, P la pression, ν la viscosité et ρ la densité de l'air sec.

I est la force d'inertie.

II terme d'advection ;

III terme relatif à l'action de la gravité ;

IV décrit l'effet de rotation de la terre ;

V est la force due au gradient de pression ;

VI est l'effet de la viscosité.

- Equation hydrostatique

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (1.9)$$

- Equation d'état

$$P = \rho R T \quad (1.10)$$

avec T la température et R la constante d'air sec.

- Equation de conservation de scalaire.

L'équation de conservation d'un scalaire dans l'atmosphère selon (Stull, 1988) est donnée par :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\zeta)}{\partial x_j} = \nu_\zeta \frac{\partial^2(\zeta)}{\partial x_j^2} + S_\zeta \quad (1.11)$$

Avec ζ la concentration d'un traceur, ν_ζ la diffusivité moléculaire et S_ζ une source de ζ

Dans le cas de l'étude de mouvement turbulent, appliquons à toutes les variables la décomposition de Reynolds. Pour une variable ξ la décomposition on a :

$$\xi = \bar{\xi} + \xi' \quad (1.12)$$

ou $\bar{\xi}$ est la moyenne et ξ' la fluctuation par rapport à la moyenne de ξ

En considérant les variables φ , ξ et une constantes a , on a les relations en 1.13 :

$$\begin{aligned} \bar{\xi}' &= 0 \\ \overline{\varphi\xi} &= \bar{\varphi}\bar{\xi} + \overline{\varphi'\xi'} \\ \overline{\varphi\xi} &= \bar{\varphi}\bar{\xi} \\ \overline{a\xi} &= a\bar{\xi} \\ \overline{\varphi + \xi} &= \bar{\varphi} + \bar{\xi}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

En appliquant aussi l'approximation de Boussinesq (Boussinesq, 1877 ; Businger, 1982 ; Stull, 1988) qui stipule une faible variation de la densité. Pour $\rho = \bar{\rho} + \rho'$ on a $1 + \frac{\rho'}{\bar{\rho}} \cong 1$. Les équations deviennent :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j \bar{u}_i + \overline{u'_j u'_i})}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g + f_c \varepsilon_{ij3} \bar{u}_j - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i^2} \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j \bar{\zeta} + \overline{u'_j \zeta'})}{\partial x_j} = \nu_\zeta \frac{\partial^2 (\bar{\zeta})}{\partial x_j^2} + \bar{S}_\zeta \quad (1.15)$$

D'après (Aubinet et al., 2012) dans la CLA, les forces de trainée, de gradient de pression et de Coriolis sont considérées comme négligeables pour une couche limite de surface plane et horizontalement homogène au-dessus des éléments de rugosité. Le terme de flottabilité n'est pas aussi pris en compte. En considérant pour l'équation de conservation de scalaire une diffusion moléculaire faible par rapport à celle turbulente et que les traceurs considérés sont H_2O , CO_2 , les termes de droite s'annulent.

Les équations deviennent :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j \bar{u}_i + \overline{u'_j u'_i})}{\partial x_j} = 0 \quad (1.16)$$

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j \bar{\zeta} + \overline{u'_j \zeta'})}{\partial x_j} = 0 \quad (1.17)$$

En choisissant convenablement la direction de x identique à celle du vent moyen et en considérant une homogénéité horizontale et une condition statique on a :

$$\frac{\partial(\overline{w'u'})}{\partial z} = 0 \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial(\overline{w'\zeta'})}{\partial z} = 0 \quad (1.19)$$

Ce qui montre que les quantités $(\overline{w'u'})$ et $(\overline{w'\zeta'})$ sont des constantes par rapport à la hauteur. Elles sont promotionnelles aux flux turbulents associés au scalaire. Ce flux, pour le cas où l'humidité absolue de l'air q joue le rôle de scalaire, s'écrit : d'après (Kaimal et Finnigan, 1994) comme suit :

$$LE = \overline{\rho w'q'} \quad (1.20)$$

où LE est le flux de chaleur latente.

Cette formule est utilisée pour calculer les flux par la méthode d'eddy covariance.

1.4 Conclusion

Le flux de chaleur latente est lié aux notions de transfert d'énergie et joue un rôle crucial dans la circulation atmosphérique. Plusieurs variables atmosphériques (rayonnement, température) et de surface (humidité du sol, indice foliaire de la végétation etc.) influencent la variabilité de ce flux ; et ce à différentes échelles temporelles à cause des échanges permanents qui se produisent au sein de la CLA. Comment peut-on donc déterminer les variables pertinentes ainsi que les processus qui contrôlent le flux de chaleur latente ?

Exploration des méthodes utilisées

Plusieurs méthodes statistiques multivariées peuvent être utilisées pour identifier les variables dites 'pertinentes' qui influent la variabilité des échanges évaporatifs. On peut citer parmi celles-ci :

- L'Analyse en Composantes Principales (ACP) ;
- La régression multiple linéaire et non linéaire ;

2.1 Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse factorielle utilisée en statistique descriptive à variables quantitatives qui procède à des représentations géométriques dans un espace réel à dimension bien définie afin de trouver la similitude entre individus (observation) ou la liaison(relation) entre variables (Escofier et al., 2008). Il est parfois difficile de procéder à une représentation graphique pouvant permettre une bonne analyse car très pratiquement le nombre de variables et d'individus considéré est très grand (supérieur à 3). Son avantage est qu'elle permet donc de réduire la dimension de représentation en modifiant au moins possible la réalité du nuage des observations (R.Indhumathi et S.Sathiyabama, 2010 ; Kassembara, 2017). L'idée centrale de l'analyse en composantes principales (ACP) est de réduire la dimension d'un ensemble de données constitué d'un grand nombre de variables interdépendantes, tout en conservant autant que possible la variation présente dans l'ensemble de données (Jolliffe, 2002).

2.1.1 Fondement théorique de l'analyse en composantes principales (ACP)

Dans la matrice représentant le tableau de données indiquée ci-dessous à titre illustratif, la première colonne contient les individus, ceux sur quoi les grandeurs X^j sont relevées. Dans la première ligne il y a des variables X^j qui sont les paramètres ou grandeurs d'intérêts considérés pour chaque individu. La grandeur X_i^j est la valeur de la variable j mesurée sur l'individu i .

	X^1	...	X^j	...	X^p
X_1	X_1^1	...	X_1^j	...	X_1^p
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
X_i	X_i^1	...	X_i^j	...	X_i^p
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
X_n	X_n^1	...	X_n^j	...	X_n^p

Ainsi :

- Chaque individu peut être représenté par un vecteur X_i ($X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^j, \dots, X_i^p$) dans un espace réel \mathbb{R}^p . L'ensemble des individus dans cet espace constitue le nuage des individus $N_I = \{X_i \in \mathbb{R}^p, i = \{1, \dots, n\} \in \mathbb{N}\}$.

- Chaque variable peut être représentée par un vecteur X^j ($X_1^j, \dots, X_i^j, \dots, X_n^j$) dans un espace réel \mathbb{R}^n . L'ensemble des variables représentés dans cet espace constitue le nuage des variables $N_V = \{X^j \in \mathbb{R}^n, j = \{1, \dots, p\} \in \mathbb{N}\}$.

Centre de gravité, distance euclidienne et produit scalaire dans les espaces de représentation

- Centre de gravité : Le centre de gravité G du nuage des individus est le point dont les coordonnées suivant chaque variable correspond à la moyenne de cette dernière. Il est donné comme suit :

$$G = {}^t(\bar{X}^1, \dots, \bar{X}^j, \dots, \bar{X}^p)$$

$$\bar{X}^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^j \quad (2.1)$$

- Distance euclidienne : La distance euclidienne entre deux individus dans le nuage des individus est donnée par :

$$d^2(X_i, X_{i'}) = \sum_{j=1}^p (X_i^j - X_{i'}^j)^2 \quad (2.2)$$

La distance par rapport au centre de gravité est donc donnée par :

$$d^2(X_i, X_{i'}) = \sum_{j=1}^p (X_i^j - \bar{X}^j)^2 \quad (2.3)$$

- Produit scalaire :

Le produit scalaire entre deux vecteurs d'individus

$$\langle X_i, X_{i'} \rangle = {}^t X_i M X_{i'} = \sum_{j=1}^p X_i^j X_{i'}^j. \quad (2.4)$$

avec M la métrique, matrice $p \times p$.

Le produit scalaire entre deux variables

$$\langle X^j, X^{j'} \rangle = {}^t X^j D X^{j'} = \sum_{i=1}^n P_i X_i^j X_i^{j'}. \quad (2.5)$$

Avec

– D la métrique des poids, matrice $n \times n$.

– $P_i = \frac{1}{n}$ le poids de l'individu i pour les tirages aléatoires.

Translation et normalisation des données brutes : données centrées réduites

- Translation : données centrées

Les nuages peuvent être représentés en considérant les vecteurs comme énoncés précédemment. Lorsque les observations sont de très grandes valeurs, l'origine du repère de représentation se trouve éloignée des points représentant les individus. Une translation de l'origine au centre de gravité du nuage permet de l'avoir proche des points des individus. Ceci faciliterait l'observation globale du nuage. Les données obtenues ainsi sont dites centrées et on obtient une nouvelle matrice dont l'éléments est le suivant :

$$Y_i^j = X_i^j - \bar{X}^j \quad (2.6)$$

- Normalisation : données réduites

Les études physiques des phénomènes impliquent généralement plusieurs paramètres et ces derniers n'ont pas les mêmes unités ce qui engendre de différente répartition du nuage quant une unité change. Pour gérer cette différence ont réduit les données pour uniformiser les unités comme suit :

$$Z_i^j = \frac{X_i^j - \bar{X}^j}{S^j} \quad (2.7)$$

avec $(S^j)^2 = \text{var}(X^j)$ le carré de l'écart type de la variable X^j

Variance d'une variable, covariance et corrélation de variables

- Variance d'une variable : La variance d'une variable est le carré de la distance entre la variable et le centre de gravité du nuage formé par les variables.

$$var(X^j) = \sum_{i=1}^n P_i (X_i^j - \bar{X}^j)^2 = d^2(X^j, \bar{X}^j). \quad (2.8)$$

Si le point G pris comme origine alors $\bar{X}^j = 0$

$$var(X^j) = {}^t X^j D X^j = \|X^j\|^2. \quad (2.9)$$

- Covariance de variable : La covariance entre deux variables est le produit scalaire des vecteurs représentant ces variables dans le nuage des variables.

$$cov(X^j, X^{j'}) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (X_i^j - \bar{X}^j)(X_i^{j'} - \bar{X}^{j'}). \quad (2.10)$$

Si le point G pris comme origine alors $\bar{X}^j = 0$

$$cov(X^j, X^{j'}) = {}^t X^j D X^{j'} = \langle X^j, X^{j'} \rangle. \quad (2.11)$$

- Corrélation de variables : La corrélation entre deux variables est la valeur donnée par le cosinus de l'angle entre les deux vecteurs représentant ces variables.

$$\begin{aligned} \langle X^j, X^{j'} \rangle &= \|X^j\| \cdot \|X^{j'}\| \cos(\alpha) \\ \cos(\alpha) &= \frac{\langle X^j, X^{j'} \rangle}{\|X^j\| \cdot \|X^{j'}\|}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

α est l'angle entre X^j et $X^{j'}$

$$\cos(\alpha) = \frac{cov(X^j, X^{j'})}{\sqrt{var(X^j) \cdot var(X^{j'})}}. \quad (2.13)$$

Ainsi donc on a :

$$cor(X^j, X^{j'}) = \frac{cov(X^j, X^{j'})}{\sqrt{var(X^j) \cdot var(X^{j'})}} = \cos(\alpha). \quad (2.14)$$

Notion d'inertie

- Inertie totale I_G du nuage des individus :
C'est la dispersion du nuage des individus par rapport à son centre de gravité ou barycentre G . Elle est égale à la somme des variances des variables et représente la variance totale du nuage.

$$\begin{aligned}
 I_G &= \sum_{i=1}^n P_i d^2(G, X_i) \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p P_i (X_{ij} - \bar{X}^j)^2 \\
 I_G &= \sum_{j=1}^p \text{var}(X^j). \tag{2.15}
 \end{aligned}$$

- Inertie du nuage des individus expliquée par un axe u passant par le centre de gravité G :
L'inertie est la somme des carrés des distances entre les projetés orthogonaux sur l'espace considéré de tous les individus par rapport à l'origine.

$$\begin{aligned}
 I_u &= \sum_{i=1}^n P_i d^2(G, X_{u_i}) \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p P_i (X_{u_i}^j - \bar{X}^j)^2 \\
 I_u &= \sum_{j=1}^p \text{var}(X_u^j) = \sum_{j=1}^p \langle u, X^j \rangle \tag{2.16}
 \end{aligned}$$

Avec :

- X_{u_i} la projection orthogonale de l'individu i sur l'axe u .
- $X_{u_i}^j$ est la valeur de la variable j observée sur la projection orthogonale de l'individu i .

si les données sont centrées alors :

$$\begin{aligned}
 I_u &= \sum_{i=1}^n P_i (X_{u_i})^2 = \sum_{i=1}^n P_i \langle X_i, u \rangle^2 \\
 I_u &= \sum_{i=1}^n P_i ({}^t X_i M u)^2 = {}^t u {}^t (X M) D (X M) u \tag{2.17}
 \end{aligned}$$

2.1.2 Démarche d'obtention des axes principaux

La démarche de l'analyse en composantes principales passe par la détermination des axes dits "axes principaux ou axes factoriels" l'un après l'autre. Ce sont des axes orthogonaux deux à deux obtenus à partir des vecteurs de base de l'espace des individus ou variables. Les coordonnées des individus suivant ces axes principaux sont dits "composantes principales ou facteurs" qui sont des variables synthétiques.

Le premier axe principal : est l'axe ayant perturbé le moins possible la somme des distances entre les individus si on projette tous les individus sur cet axe. Autrement c'est l'axe ayant l'inertie maximale.

Le second axe principal : est celle ayant l'inertie maximale et est orthogonal à la première.

Le troisième axe principal : est celle ayant l'inertie maximale et est orthogonal à l'espace formé par les axes déjà déterminés. La procédure se répète jusqu'à déterminer les p axes principaux. Ainsi on cherche une ensemble d'axes dans les composantes ne sont pas corrélées entres elles.

Axes principaux et matrice de covariance

La matrice de covariance : est la matrice qui renferme la covariance entre les variables deux à deux. Lorsque les variables sont centrées et réduites, la matrice de covariance devient la matrice des corrélations. La matrice de covariance notée C est donnée par l'expression suivante :

$$C = {}^t X M X. \quad (2.18)$$

L'obtention de vecteur principal revient à déterminer le vecteur u qui maximise la fonction :

$$\begin{aligned} I : \mathbb{R}^p &\longrightarrow \mathbb{R} \\ u &\longmapsto {}^t u {}^t (X M) D (X M) u. \end{aligned} \quad (2.19)$$

En considérant une contrainte du vecteur u comme un vecteur unitaire on a :

$$\|u\| = 1 \quad \text{ou} \quad {}^t u M u = 1. \quad (2.20)$$

Ainsi chercher le maximum de la fonction $I(u)$ revient donc à chercher le maximum de la fonction f_λ définie par :

$$\begin{aligned} f_\lambda : \mathbb{R}^p &\longrightarrow \mathbb{R} \\ u &\longmapsto {}^t u {}^t (X M) D (X M) u - \lambda ({}^t u M u - 1). \end{aligned} \quad (2.21)$$

où λ étant un multiplicateur de Lagrange
ce qui revient à poser :

$$\begin{aligned}\nabla f_\lambda(u) &= 0 \\ \text{or} \\ \nabla f_\lambda(u) &= 2 {}^t(XM)D(XM)u - 2\lambda Mu \\ &= 2 MCMu - 2\lambda Mu\end{aligned}\tag{2.22}$$

Ainsi :

$$\nabla f_\lambda(u) = 0 \Leftrightarrow MCMu = \lambda Mu\tag{2.23}$$

avec $MC = C$ et $Mu = u$ alors on peut donc conclure que le vecteur propre de la matrice de variance covariance correspondant à la valeur propre λ est le vecteur d'inertie maximale.

Avec la contrainte du deuxième vecteur principal qui est nommé, perpendiculaire au premier et ayant l'inertie maximale, il revient donc à déterminer un vecteur u_2 qui maximise la fonction :

$$\begin{aligned}f_\lambda : \mathbb{R}^p &\longrightarrow \mathbb{R} \\ u &\longmapsto {}^t u_2 {}^t(XM)D(XM)u_2 - \lambda_2({}^t u_2 M u_2 - 1) - \mu_2({}^t u_2 M u_1).\end{aligned}\tag{2.24}$$

où λ_2 et μ_2 sont des multiplicateurs de Lagrange et u_1 le premier vecteur propre précédemment trouvé

$$\begin{aligned}\nabla f_\lambda(u_2) &= 2 {}^t(XM)D(XM)u_2 - 2\lambda_2 M u_2 - \mu_2 M u_1 \\ &= 2 MCMu_2 - 2\lambda_2 M u_2 - \mu_2 M u_1.\end{aligned}\tag{2.25}$$

Trouver le maximum revient alors à poser :

$$2 MCMu_2 - 2\lambda_2 M u_2 - \mu_2 M u_1 = 0.\tag{2.26}$$

En multipliant cette relation par ${}^t u_1$ on trouve :

$$\mu_2({}^t u_1 M u_1) = 0$$

$$\text{Ainsi}\tag{2.27}$$

$$\mu_2 = 0.$$

Par conséquent :

$$MCMu_2 = \lambda_2 M u_2$$

Ceci est similaire à l'équation 2.23, On en déduit que le deuxième vecteur propre de la matrice de covariance ayant la deuxième plus grande valeur propre correspond au deuxième vecteur principal.

De manière analogique, on obtient le *jième* vecteur principale correspond à *jime* vecteur propre associé à la *jième* valeur propre dans l'autre décroissant de ces dernières. Ces vecteurs ainsi obtenus correspondent aux vecteurs propres de la matrice de variance-covariance ou de corrélation si les données sont centrées réduites.

Contribution des axes principaux à l'inertie totale

Connaissant l'inertie de chaque axe principal, on peut alors déterminer leur contribution (ou pourcentage d'explication), ou celle d'un sous espace formé par un nombre donné de ces vecteurs, à l'inertie totale. La contribution à l'inertie totale d'un espace permet de connaître la part d'inertie des nuages expliquée par cet espace. L'inertie totale est donnée par :

$$I_G = \sum_{j=1}^p \lambda_j \quad (2.28)$$

la contribution d'un axe u est donnée par :

$$ctr(u) = \frac{I_u}{I_G}. \quad (2.29)$$

Ainsi pour un axe principal u_k d'inertie λ_k on a :

$$ctr(u_k) = \frac{\lambda_k}{\sum_{j=1}^p \lambda_j}. \quad (2.30)$$

Pour un sous-espace formé par un nombre donné de vecteurs principaux u_k et u_m le pourcentage d'explication est donné par :

$$ctr(u_k, u_m) = \frac{\lambda_k + \lambda_m}{\sum_{j=1}^p \lambda_j}. \quad (2.31)$$

Dans cette même idée de proportion expliquée, on peut définir la contribution d'un individu ou d'une variable à un axe par :

$$ctr = \frac{f_u^2}{\lambda_u}. \quad (2.32)$$

avec f_u^2 la coordonnée de la variable ou de l'individu sur l'axe principal u associé à la valeur propre λ_u

Le choix de l'espace de représentation

Le nombre de vecteurs à considérer dans les analyses n'est par exhaustif. Il faut néanmoins noter qu'il n'y a pas de règle objective pour le choix du nombre d'axes à

considérer pour son étude. Le choix dépend du domaine d'étude et pourcentage d'explication qui satisfait. (Kassembara, 2017). Les règles énumérées ci-dessous sont empiriques (Lebart et al, 1995) et sont :

- Règle de Kaiser (1961) : Selon ce critère, c'est les axes principaux de valeur propre associée ou d'inertie supérieure à la moyenne des valeurs propres de la matrice de covariance ou des inerties qui sont retenus pour former la base de l'espace d'étude à considérer. Cependant, elle surestime parfois le nombre d'axes considérés et peut être mise en défaut par un facteur de taille très dominant .
- Règle d'éboullis ou de coude : Elle a été préconisée par Cattell (1966) et consiste à faire une représentation graphique montrant l'histogramme de la décroissance des valeurs propres et on choisit celles avant la « coude » qui apparaît dans l'histogramme et indique un changement de pente.

2.1.3 Représentation et interprétation des nuages

La représentation des nuages dans l'espace propre de la matrice de covariance passe par la détermination des coordonnées de chaque point du nuage suivant chacun des p axes principaux. L'ensemble des coordonnées suivant un axe principal de tous les individus est dit : *composante principale* ou facteur qui sont des variables synthétiques. Si la coordonnée de l'individu X_i suivant l'axe u_j est donnée par :

$$F_i^j = \langle X_i, u_j \rangle = {}^t X_i M u_j \quad (2.33)$$

Alors, la composante principale donnée par l'axe u_j est le vecteur F^j de \mathbb{R}^n donnée par :

$$F^j = X M u_j. \quad (2.34)$$

Pour mieux exploiter une représentation plane du nuage des individus, plusieurs grandeurs d'interprétation sont utilisées.

- Qualité de représentation d'un individu par un axe principal.

La qualité de représentation d'un individu sur un axe principal est le cosinus carré du vecteur qui le représente et le vecteur principal.

$$\cos^2 \alpha = \frac{F_i^j{}^2}{\|X_i\|^2} = \frac{F_i^j{}^2}{\sum_{k=1}^p (F_i^k)^2}. \quad (2.35)$$

- Qualité de représentation d'un individu par un espace principal.

Pour l'espace formé par les q premiers vecteurs propres, on a :

$$\cos^2 \alpha = \frac{\sum_{k=1}^q F_i^{k^2}}{\|X_i\|^2} = \frac{\sum_{k=1}^q F_i^{k^2}}{\sum_{k=1}^p (F_i^k)^2}. \quad (2.36)$$

La représentation des variables se fait dans un cercle dit cercle de corrélation et de rayon unité. Il est souvent représenté dans le plan formé par les premiers axes principaux. *Dans le cercle de corrélation, une variable bien représentée a son vecteur de représentation proche du cercle. La corrélation entre les variables est vue par l'angle qui les sépare.*

2.2 Sélection de variables pertinentes par régression

L'objectif de la régression est de trouver une relation donnant une variable dite « variable à expliquée ou endogène » en fonction d'un ou plusieurs autres variables dites « variables explicatives ou exogène ». On distingue plusieurs types de régression :

- Linéaire ou non si la relation entre les variables est linéaire ou non
- Simple ou multiple si la variable explicative est unique ou si il y en a plusieurs.
- Pour trouver les variables explicatives qui expliquent mieux la variable à expliquer, on procède à une régression pas par pas ascendante ou descendante (en ajoutant les variables importantes ou en retranchant les variables moins importantes du modèle respectivement).

2.2.1 Régression linéaire simple et multiple

Dans le cas de la régression linéaire multiple le modèle est sous la forme :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_j X_j + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon. \quad (2.37)$$

ou sous forme matricielle

$$Y = X\beta + \varepsilon. \quad (2.38)$$

- ε est le vecteur renfermant les erreurs, résidus ou bruits. C'est une variable aléatoire indépendante des variables explicatives.
- X est la matrice des données ajoutées d'un premier colonne ayant la valeur 1 à toute les lignes.
- β est le vecteur des estimations de Moindre Carré Ordinaire (MCO). Ce sont les paramètres inconnus du modèle et ne sont pas des variables aléatoires.

Les estimateurs des moindres carrés ordinaires (MCO)

Soit la fonction :

$$S(\hat{\beta}) = \sum_{i=1}^n L(Y_i - \sum_{j=0}^p \hat{\beta}_j X_{ij}). \quad (2.39)$$

L est la fonction de coût ou de perte tel que :

$L(u) = |u|$ qui est le coût absolu ;

$L(u) = u^2$ qui est le coût quadratique.

On parle des moindres carrés ordinaires lorsque la fonction de coût utilisée est le coût quadratique (cours de Arnaud Guyader, 2012/2013 ; Christophe Chesneau, 2017). Elle sera utilisée dans la suite.

$$S(\hat{\beta}) = \sum_{i=1}^n (Y_i - \sum_{j=0}^p \hat{\beta}_j X_{ij})^2. \quad (2.40)$$

où

$$S(\hat{\beta}) = \sum_{i=1}^n (Y_i - X\hat{\beta})^2. \quad (2.41)$$

Pour minimiser les erreurs dans le modèle, il revient à trouver les valeurs de $\hat{\beta}$ pour lesquelles la fonction S est minimisée. Ces valeurs β de $\hat{\beta}$ sont les estimateurs de moindres carrés ordinaires

$$\beta = \underset{\hat{\beta} \in \mathbb{R}^{p+1}}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n (Y_i - \sum_{j=0}^p \hat{\beta}_j X_{ij})^2. \quad (2.42)$$

Pour minimiser S il faut annuler son gradient par rapport aux estimateurs de MCO.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\operatorname{grad}} S(\beta) &= 0 \\ \overrightarrow{\operatorname{grad}} S(\beta) &= 2 {}^t\beta {}^tXX - 2 {}^tYX = 0. \end{aligned} \quad (2.43)$$

alors

$$\beta = (X^tX)^{-1} {}^tXY. \quad (2.44)$$

β est un vecteur de dimension $p + 1$. Pour le cas particulier de $p=1$ la régression est dite linéaire simple.

2.2.2 Les méthodes de sélection de variables pertinentes : stepwise

La régression pas à pas permet de sélectionner les variables significatives en suivant plusieurs étapes. Elle peut être ascendante, descendante, ou une combinaison des deux précédentes.

- **La régression pas à pas ascendante**

Elle consiste à partir d'une constante et à réaliser p régressions de la variable à expliquée en ajoutant chaque variable explicative à la constante puis choisir le meilleur modèle en utilisant un test de sélection bien approprié. Par la suite, faire un nombre de régressions multiples correspondantes au nombre de variables non sélectionnées en ajoutant ces variables à celle déjà sélectionnées puis faire le test de sélection de modèle pour choisir le meilleur modèle. Reprendre la procédure et s'arrêter lorsque le test du modèle est moins meilleur que celui du modèle précédent. Au cours de la sélection par régression ascendante, une variable ajoutée ne peut plus être retirée.

- **La régression pas à pas descendante**

Elle suit les mêmes règles que la régression ascendante à différence près qu'on part d'une régression multiple de la variable à expliquée par toutes les variables explicatives et on retire celle la moins significative. En suite, on reprend la procédure avec les variables restantes jusqu'à la condition d'arrêt.

- **La régression stepwise**

Elle se fait de la même manière que la sélection ascendante sauf qu'à chaque étape, c'est toutes les variables qui sont remises en jeu. Ainsi une variable déjà qualifiée de significative à une étape peut ne pas l'être à une étape suivante. Ceci peut être lié à la redondance entre les variables.

- **La régression stagewise**

La régression de sélection de variables stagewise consiste à ajouter à chaque étape de la méthode ascendante la variable qui explique mieux la partie non expliquée (le résidu) par l'étape précédente de la variable à expliquer (Bourbonnais, 1998 ; Dodge, 2004).

2.2.3 Les critères de sélection

Le choix d'une variable se fait par test de sélection devant respecter un pourcentage ou intervalle de confiance donné. Généralement ce pourcentage critique est fixé à 5% ou un p -value inférieur à 0,005. Comme test pouvant être utilisé on a :

- **Critère d'information d'Akaike (AIC)**

Une régression est meilleure lorsque son AIC défini ci-dessous est le plus faible (Pierre-André Cornillon et al., 2011).

$$AIC = n \ln \frac{SCR}{n} + 2 \times (q + 1). \quad (2.45)$$

où

- $SCR = \sum_i (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ est la somme des carrés résiduels.
- \hat{Y}_i est le modèle de la i ème observation.
- q est le nombre de variables contenu dans le modèle.
- n est le nombre d'observation.

- **Le test de student**

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-q}}}. \quad (2.46)$$

où r est la corrélation entre la variable explicative correspondante et la variable à expliquer ; q est le nombre de variables utilisées dans le modèle et $n - q$ est le degré de liberté.

- **Le test de Fisher ou F partiel de Fisher**

A chaque étape d'une sélection de variable, celle dont le modèle a le F ($F = t^2$) le plus grand est la plus significative et celle de F le plus petit est moins significative. Une variable est ajoutée lorsque le F partiel de Fisher indique que le coefficient qui lui est associé est significativement différent de zéro. une variable est supprimée si son coefficient n'est pas significatif (Tenenhaus , 2007 ; Pierre-André Cornillon et al., 2011).

2.2.4 Colinéarité et redondance

La colinéarité entre variables s'explique par le fait que certaines variables peuvent être très corrélées entre elles. Lors de la sélection, une variable choisie peut empêcher de voir l'action d'une autre variable avec laquelle elle est fortement corrélée en la rendant moins significative. Dans ce cas, on dit qu'il y a redondance et la sélection est ainsi faussée : d'où l'inconvénient de cette approche. Pour ce fait, il est donc important de savoir quel critère de sélection choisir pour éviter au mieux ce problème.

Le critère *AIC* permet de traiter de manière implicite le problème de colinéarité en pénalisant la complexité du modèle. Pour identifier la colinéarité, on utilise des tests comme le critère VIF (Variance Inflation Factor).

2.2.5 Gestion de la non linéarité : Régression partielle

Pour connaître l'impact d'une variable explicative sur la variable à expliquer, selon (Pierre-André Cornillon et al,2011) , il faut :

- faire la régression de la variable à expliquer par toutes les autres variables explicatives sauf celle dont on veut connaître l'impact ;
- faire la régression de la variable explicative dont on veut connaître l'impact par toutes les autres variables explicatives ;
- tracer le graphique de la régression partielle de la variable dont on veut connaître l'impact. Ceci n'est que la représentation graphique de la partie non expliquée de la variable à expliquer par la partie non expliquée de la variable dont on désire connaître l'impact.

Si :

- L'ensemble des points du graphique constituent une droite de pente supérieure à Zéro alors la régression entre les deux variables est linéaire ;
- La droite à une pente presque nulle alors la variable n'a pas d'importance dans la régression totale de la variable à expliquer.
- Les points forment une courbe qui n'est pas linéaire, alors il est convenable de remplacer dans la régression la variable dont on désire connaître l'impact par la fonction non linéaire caractéristique de la courbe.

Considérons une variable à expliquée Y par p variables explicatives X_j .

La régression linéaire multiple nous donne la relation 2.37 qu'on peut réécrire en s'accentuant sur une variable quelconque X_τ comme suit :

$$Y = \beta_0 + \beta_\tau X_\tau + \dots + \beta_j X_j + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon. \quad (2.47)$$

La projection sur un espace orthogonal à l'espace formé par toutes les variables excepté

le X_τ donne

$$Y_\perp = \beta_0 + \beta_\tau X_{\tau\perp} + \dots + \beta_j X_{j\perp} + \dots + \beta_p X_{p\perp} + \varepsilon_\perp. \quad (2.48)$$

avec $\beta_m X_{m\perp} = 0$ si $m \neq \tau$

$$Y_\perp = \beta_0 + \beta_\tau X_{\tau\perp} + \varepsilon_\perp. \quad (2.49)$$

où Y_\perp est la projection de la variable explicative Y qui représente aussi la part de Y non expliquée par les autres $p-1$ variables mises à part X_τ ; $X_{\tau\perp}$ la projection de X_τ qui représente aussi sa part non expliquée par les autres $p-1$ variables explicatives. Ceci montre que Si 2.48 est linéaire alors la relation entre Y_\perp et $X_{\tau\perp}$ est linéaire si non elle ne l'est pas.

La régression entre Y_\perp et $X_{\tau\perp}$ est une régression partielle et leur coefficient de corrélation est dite coefficient de corrélation partiel.

2.3 Conclusion

Les méthodes exposées dans ce chapitre traitent de la sélection de variables pertinentes. L'ACP permet de faire une sélection des variables sous-jacentes qui sont des synthèses des variables mesurées en utilisant l'inertie du nuage expliquée par ces variables. **L'ACP ne sélectionne pas les variables directement observées, elle permet d'obtenir les composantes principales qui représentent des processus physiques influençant la variable à expliquer.** La sélection directe des variables observées peut se faire par la régression pas à pas qui se base sur la qualité du modèle selon qu'on ajoute ou retranche une variable en plusieurs étapes.

Au vue de ces méthodes explorées, quelles sont les variables pertinentes et processus qui contrôlent le flux de chaleur latente dans la zone de culture à Nalohou au nord du Bénin ?

Détermination des Composantes principales et Identification des processus

3.1 Description du site

Le site d'étude se situe dans une zone de culture au nord du Bénin proche du village de Nalohou sur le bassin versant de la Donga. Ses coordonnées géographiques sont : longitude de 1°60457 E, sa latitude 9°74484 N et 449 m d'altitude. La parcelle sur laquelle est installée la tour de mesure est en jachère et autour d'elle se trouve une diversité de culture qui varie annuellement et alterné par des périodes où le sol est laissé en jachère. L'aspect spatial du site est très diversifié en culture et les produits les plus cultivés sont le maïs, le manioc, l'igname, l'arachide... Ces plantes sont de type C4 qui sont des espèces de graminées dont la capacité de photosynthèse est très développée. Le paysage est plutôt plat, et a une pente d'environ 3% localement, recouvrant un substrat rocheux cristallin métamorphique. Les principaux sols sont de type ferrugineux peu lessivés (Faure et Volkoff, 1998). Le sol, à la surface, est un sable limoneux de grande perméabilité alors que le substrat altéré sous-jacent présente des couches argileux profondes ayant une capacité élevée de rétention (De condappa et al, 2008). Sur le site la nappe phréatique est peu profonde et est en moyenne comprise entre 1,5m et 3m de la surface.

3.2 Appareils de mesure

Les capteurs micro-météorologiques sont l'anémomètre sonique 3D (CSAT3 Campbell Scientific) et un analyseur de gaz infrarouge "open path" (Li-7500-LICOR) qui forment l'ensemble dit « système d'Eddy covariance ». Ces derniers mesurent respectivement les trois composantes de la vitesse du vent, la température virtuelle et les concentrations en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau présent dans l'air. En plus de ces capteurs micro-météorologiques, le site dispose des capteurs météorologiques dont

la liste est présentée en annexe.

3.3 Délimitation des saisons

L'identification des différentes saisons (tableau 3.1) au nord du Bénin est faite par (Mamadou, 2014 ; Mercier, 2017 ; et Gnonlonfoun, 2020) pour les années allant de 2007 à 2013. En effet, ces auteurs ont combiné l'humidité absolue de l'air et la direction du vent pour délimiter les différentes saisons. Sachant que le déplacement nord-sud de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) évoque de différentes directions du vent sur le continent et contrôle les saisons, ces derniers ont tracé la direction du vent en fonction de l'humidité absolue en considérant les vitesses du vent supérieures à 1m/s. Ainsi, l'humidité absolue inférieure à $6g.cm^{-3}$ correspond à des directions nord-est du vent qui indique la saison sèche. Lorsque l'humidité est supérieure à $16g.cm^{-3}$, le vent à une direction sud-ouest qui indique la saison humide. Les valeurs de l'humidité comprises entre ces deux seuils correspondent aux deux phases de transition c'est-à-dire de la saison sèche à la saison humide (Phase d'Humidification de l'Atmosphère) et de la saison humide à la saison sèche (Phase d'Assèchement de l'Atmosphère).

TABLE 3.1 – Intervalle des saisons .

Années	Saison Sèche			Saison humide		
	Date début	Date fin	Nombre de jour	Date début	Date fin	Nombre de jour
2008	20/12/07	23/02/08	65	01/05/08	19/10/08	171
2009	27/12/08	26/01/09	30	15/04/09	31/10/09	199
2010	27/12/09	05/02/10	40	20/04/10	01/11/10	195
2011	29/12/2010	20/01/2011	23	24/04/2011	28/10/2011	187
2012	24/12/2011	18/01/2012	25	2012-07-04	2012-09-11	216
2013	22/12/2012	11/02/2013	50	06/03/2013	25/10/2013	233

3.4 Gestion des données manquantes

Les données recueillies sur le site d'étude ne sont souvent complètes et comportent des valeurs manquantes. Ceci est dû au fait que les appareils peuvent tomber en panne, être en étalonnage ou à la présence des masses de poussière et des gouttelettes d'eau sur les capteurs. Aussi, Une donnée mesurée dans des conditions non adéquates où la turbulence n'est pas bien développée surtout la nuit est rejetée.

Le tableau 3.2 suivant, montre le pourcentage de données manquantes du flux de chaleur latente calculé au pas de temps de la demie-heure. Les années 2010, 2011 sont celles qui ont un fort pourcentage de données manquantes (64.23% et 68.23%) tandis que l'année 2013 est celle ayant moins de données manquantes (28.91%). Ceci serait probablement dû à l'éventualité qu'il n'y aurait pas assez de précipitation pendant la saison pluvieuse de l'année 2013. De manière générale, la saison humide est celle ayant le fort taux de données manquantes quelque soit l'année suivie des phases de transition. De toutes les saisons, la saison sèche de 2008 est la meilleure saison avec 15.45% de données manquantes tandis que la phase d'assèchement de 2012 a plus de données manquantes (85.75%).

TABLE 3.2 – Pourcentage de données manquantes de LE par année et par saison .

	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Année	32.45	42.81	64.30	68.23	52.82	28.91
Saison sèche	15.47	19.82	19.16	67.67	53.20	54.54
Saison humide	40.13	45.06	75.59	73.44	46.04	21.78
Phase d'assèchement	34.10	54.43	66.88	60.01	86.75	35.52
Phase d'humidification	32.21	37.45	51.67	64.07	54.06	50.90

D'après certaines études montrant la variabilité de LE sur d'autres sites, les mesures simultanées des variables météorologiques et environnementales ont été recueillies sur le site pour aider à combler les lacunes des données d'Eddy covariance (Zhou et al., 2019). Ces variables, de même que la vitesse du vent, sont soumises aux imputations et les autres à l'interpolation linéaire pour les plus petites lacunes et à la méthode diurne moyenne pour les grandes lacunes (Falge et al., 2001). D'après Huizhi et Jianwu (2012), les variables ne sont pas comblées de la même manière. Les flux de chaleur sensible et les flux de chaleur latente sont soumis à une méthode de multi-imputation de (Hui et al., 2004), d'autres sont soumises aux imputations et le comblement des écarts par la méthode d'interpolation et la méthode diurne moyenne (Falge et al., 2001). Dans notre étude d'identification des variables pertinentes contrôlant la variabilité des flux de chaleur latente, les données manquantes obtenues à l'échelle de la demie-heure de mesure sont supprimées du tableau de données et aucun comblement de données n'a été effectué ; ceci pour ne pas introduire de biais dans l'interprétation des résultats qui seront obtenus.

3.5 Détermination des composantes principales par saison

Dans cette section, l'approche ACP explicitée dans le chapitre précédent a été utilisée pour déterminer les principales composantes (PC) et par la suite identifier

les processus, objectif principal de ce travail. Ainsi, les variables météorologiques qui influencent la variabilité du flux de chaleur latente (LE) dans la couche limite atmosphérique sont généralement la précipitation (P), le rayonnement net (Rn), la vitesse du vent (U), l'humidité du sol (Ws), la température de l'air (T) et le déficit de pression de vapeur d'eau saturante (VPD) auxquelles s'ajoute la température du sol (Ts10). Toutes ces variables sont utilisées dans cette étude exceptée la précipitation. Pour des raisons de disponibilité des données, l'humidité du sol n'est pas prise en compte lors de l'exploitation des données des années de 2011 à 2013.

Le seuil de pourcentage d'inertie est de 90% et l'analyse factorielle des PC est élaborée selon (Huizhi and Jianwu, 2012)

3.5.1 Saison sèche

L'analyse des valeurs propres (inertie ou variance expliquée par les axes principaux) de la matrice de corrélation des saisons sèches de 2008 à 2013 (tableaux 3.3 à 3.8) montre que durant toutes les saisons sèches, deux valeurs propres sont supérieures à un (01) à l'exception de 2009 où trois valeurs propres sont supérieures à un (01). Les vecteurs principaux à retenir selon la règle de Kaiser pour ces études sont les deux premiers (80% environ en 2008 et 2010, 94% de 2011 à 2013) et en 2009 les trois premiers (93 %).

Les histogrammes des valeurs propres de la figure 3.1 permettent en utilisant la règle de coude, de conserver les deux premiers axes principaux pour toutes les années mis à part l'année 2008 où il faut quatre axes principaux (98.89%) car leurs valeurs propres sont avant la coude.

Pour les années 2008 et 2010, les troisièmes valeurs propres bien qu'étant inférieures à un (01) y sont très proches. En considérant les trois premiers axes principaux pour les saisons sèches de 2008 à 2010, on uniformise le nombre de vecteurs au nombre à considéré pour forcerment conserver au moins 90% de la variance ou de l'inertie totale. Ainsi les axes considérés sont les trois premiers de 2008 à 2010 et les deux premiers de 2011 à 2013.

TABLE 3.3 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2008.

	Valeurs propres	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	2.82	47.06	47.06
dim 2	1.88	31.31	78.37
dim 3	0.99	16.57	94.94
dim 4	0.24	3.95	98.89
dim 5	0.05	0.88	99.77
dim 6	0.01	0.23	100

TABLE 3.4 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2009.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
dim 1	2.97	49.47	49.47
dim 2	1.57	26.19	75.67
dim 3	1.04	17.42	93.08
dim 4	0.29	4.88	97.96
dim 5	0.09	1.50	99.46
dim 6	0.03	0.54	100

TABLE 3.5 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2010.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
dim 1	3.25	54.18	54.18
dim 2	1.57	26.25	80.44
dim 3	0.93	15.54	95.98
dim 4	0.15	2.55	98.53
dim 5	0.07	1.13	99.66
dim 6	0.02	0.33	100

TABLE 3.6 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2011.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
dim 1	2.77	55.46	55.46
dim 2	1.89	37.80	93.26
dim 3	0.29	5.73	98.99
dim 4	0.04	0.84	99.83
dim 5	0.01	0.17	100

TABLE 3.7 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2012.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
dim 1	2.94	58.81	58.81
dim 2	1.79	35.74	94.55
dim 3	0.20	4.08	98.63
dim 4	0.06	1.11	99.74
dim 5	0.01	0.26	100

TABLE 3.8 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison sèche 2013.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
dim 1	2.90	58.01	58.01
dim 2	1.79	35.84	93.85
dim 3	0.22	4.34	98.20
dim 4	0.07	1.43	99.63
dim 5	0.02	0.37	100

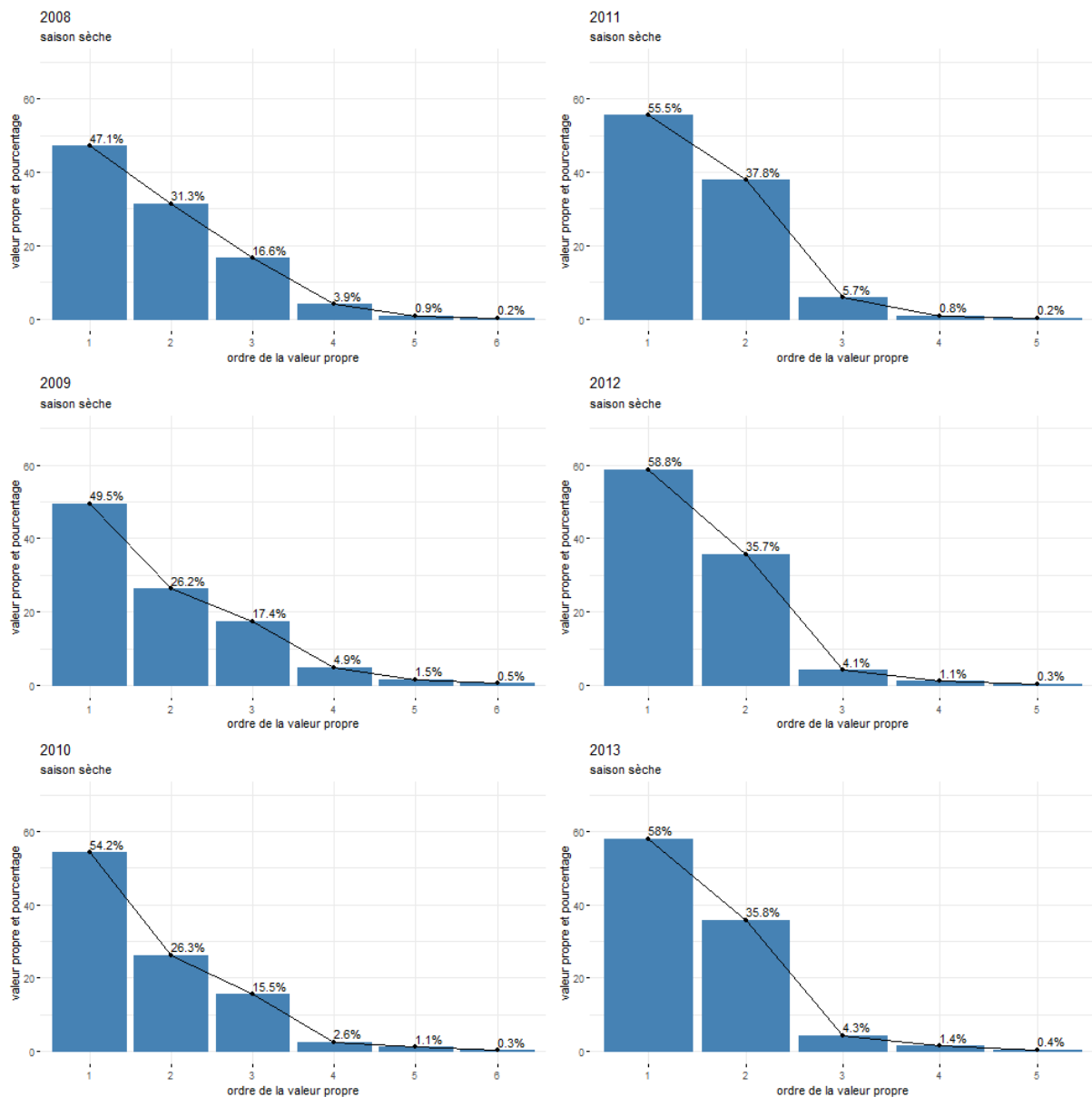


FIGURE 3.1 – Histogramme des valeurs propres des saisons sèches de 2008 à 2013

Une variable représentée dans le cercle de corrélation et qui possède une bonne qualité de représentation dans le premier plan principal contribue fortement à l'inertie d'un axe principal lorsqu'il est proche de cet axe. La variable qui n'est pas bien représentée peut être plus corrélée avec un axe principal non représenté par le premier plan principal.

Les cercles de corrélation de la figure 3.2 permettent de trouver des regroupements de variables pouvant permettre de donner une signification à chaque composante de même que les contributions des variables données dans les tableaux de 3.9 à 3.14 et représentées graphiquement par les figures 3.3,3.4 et 3.5. Pour les saisons sèches de 2008 à 2013 exceptée celle de 2010, la première composante regroupe le VPD et le Ta qui ont chacune une contribution sensiblement égale. La deuxième composante regroupe le Ts10, le Rn et le U avec le Ts10 qui à une forte contribution. La troisième composante est formée de Ws. Ainsi la première variables synthétique ou composante principale est **la demande atmosphérique en eau**, la deuxième est **l'énergie** considérant que le Rn est lié aux autres variable de cette composante et la troisième est **l'humidité du sol** pour les années 2008 et 2009 .

En 2010, la première composante est formée de Ta, VPD, Rn et U ; la deuxième est formée de Ts10 et la troisième de Ws. En considérant la variable formant la troisième composante de 2008 à 2010, la non utilisation des données de l'humidité du sol des années de 2011 à 2013 est probablement la raison du manque d'une troisième composante principale. Ainsi nous pouvons dire que les trois processus contrôlant le flux de chaleur latente en saison sèche sont : *la demande atmosphérique en eau, l'énergie et l'humidité du sol*.

TABLE 3.9 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2008.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	12.50	32.25	0.10	6.24	47.65	1.26
Ws	0.01	7.88	84.57	3.74	3.60	0.20
Rn	14.65	24.93	1.35	40.12	17.68	1.26
VPD	33.68	1.17	0.83	0.10	24.58	39.64
Ta	33.62	1.25	1.56	0.30	5.77	57.50
U	5.54	32.52	11.59	49.50	0.72	0.14

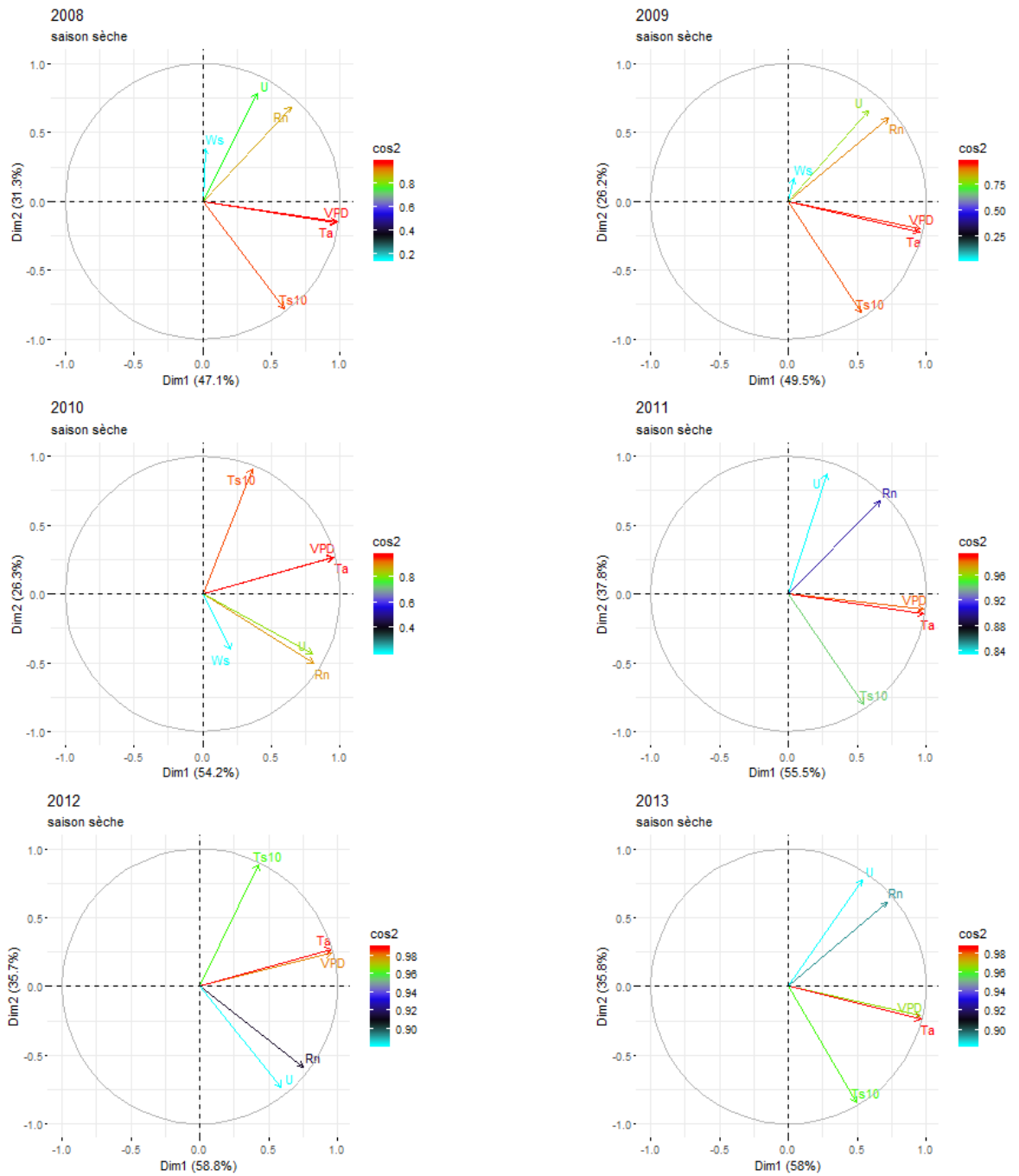


FIGURE 3.2 – Cercle de corrélation et qualité de représentation des saisons sèches de 2008 à 2013.

TABLE 3.10 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2009.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	9.37	41.73	0.55	9.46	34.84	4.05
Ws	0.06	1.75	91.32	5.10	1.17	0.60
Rn	17.75	23.15	0.06	28.55	26.79	3.71
VPD	30.76	2.55	0.28	0.79	35.56	30.06
Ta	30.65	3.09	1.44	1.79	1.63	61.39
U	11.41	27.73	6.35	54.31	0.00	0.19

TABLE 3.11 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2010.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	3.96	52.40	1.77	1.01	40.51	0.35
Ws	1.26	10.38	84.89	2.14	1.33	0.00
Rn	19.95	16.18	2.22	40.86	19.21	1.60
VPD	27.65	4.57	0.46	0.02	23.58	43.72
Ta	27.73	4.51	0.60	2.40	10.87	53.88
U	19.45	11.97	10.06	53.57	4.50	0.45

TABLE 3.12 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2011.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	10.90	34.00	13.32	40.46	1.32
Rn	16.19	23.96	30.07	28.57	1.21
VPD	35.13	0.64	0.00	24.72	39.51
Ta	35.00	1.13	0.22	5.76	57.89
U	2.78	40.28	56.39	0.48	0.08

TABLE 3.13 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2012.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	6.25	43.59	6.79	42.04	1.34
Rn	19.45	19.17	35.63	25.11	0.68
VPD	31.27	3.41	0.27	24.65	40.40
Ta	31.10	4.12	0.38	6.83	57.57
U	11.97	29.72	56.93	1.37	0.00

TABLE 3.14 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la saison sèche 2013.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	8.53	39.85	3.11	42.85	5.66
Rn	17.81	21.08	43.99	12.78	4.34
VPD	31.73	2.57	0.62	38.00	27.10
Ta	32.05	3.16	0.55	1.34	62.90
U	9.88	33.34	51.72	5.05	0.00

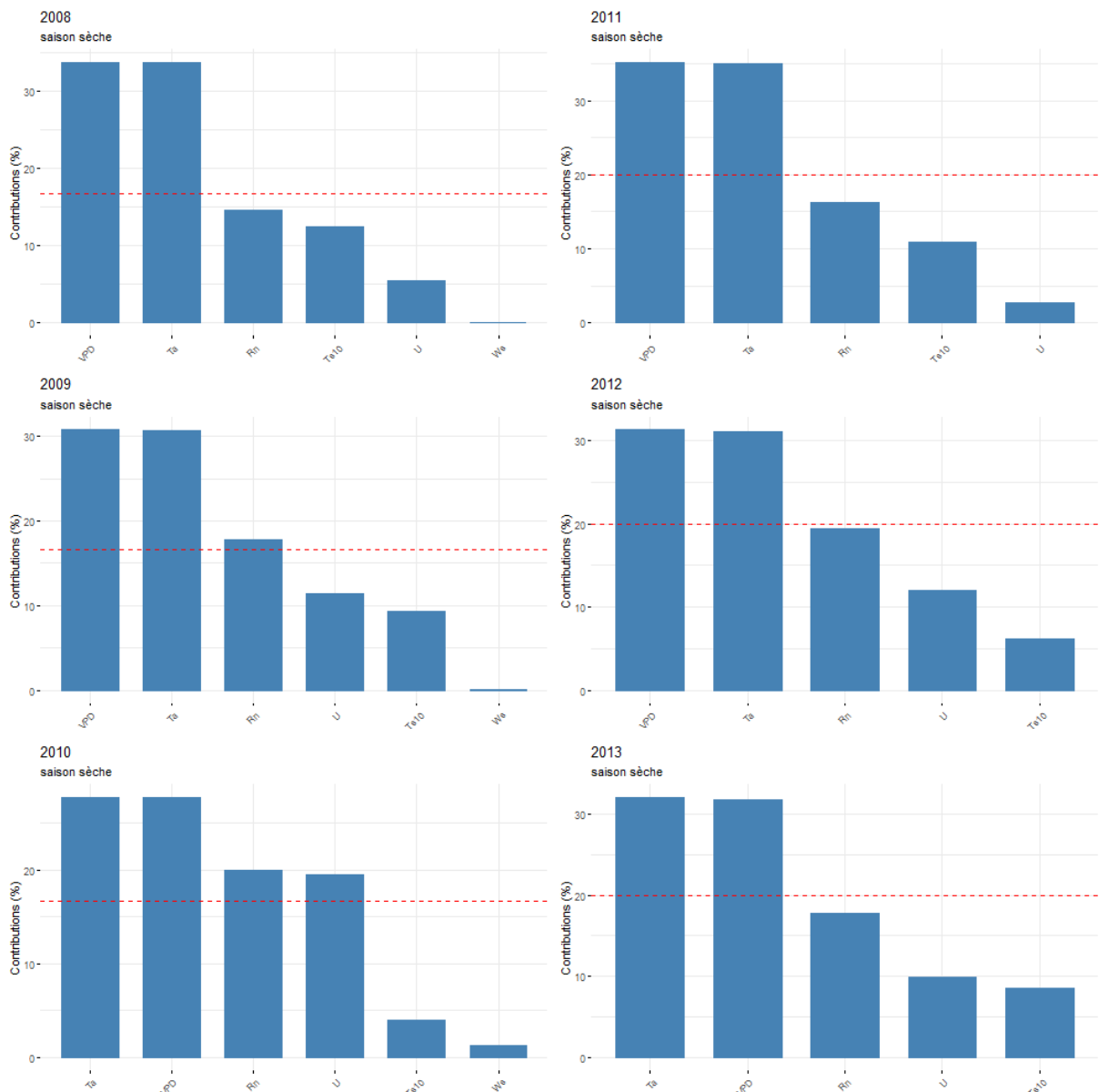


FIGURE 3.3 – Graphe des contributions des variables au premier axe principal pour les saisons sèches de 2008 à 2013

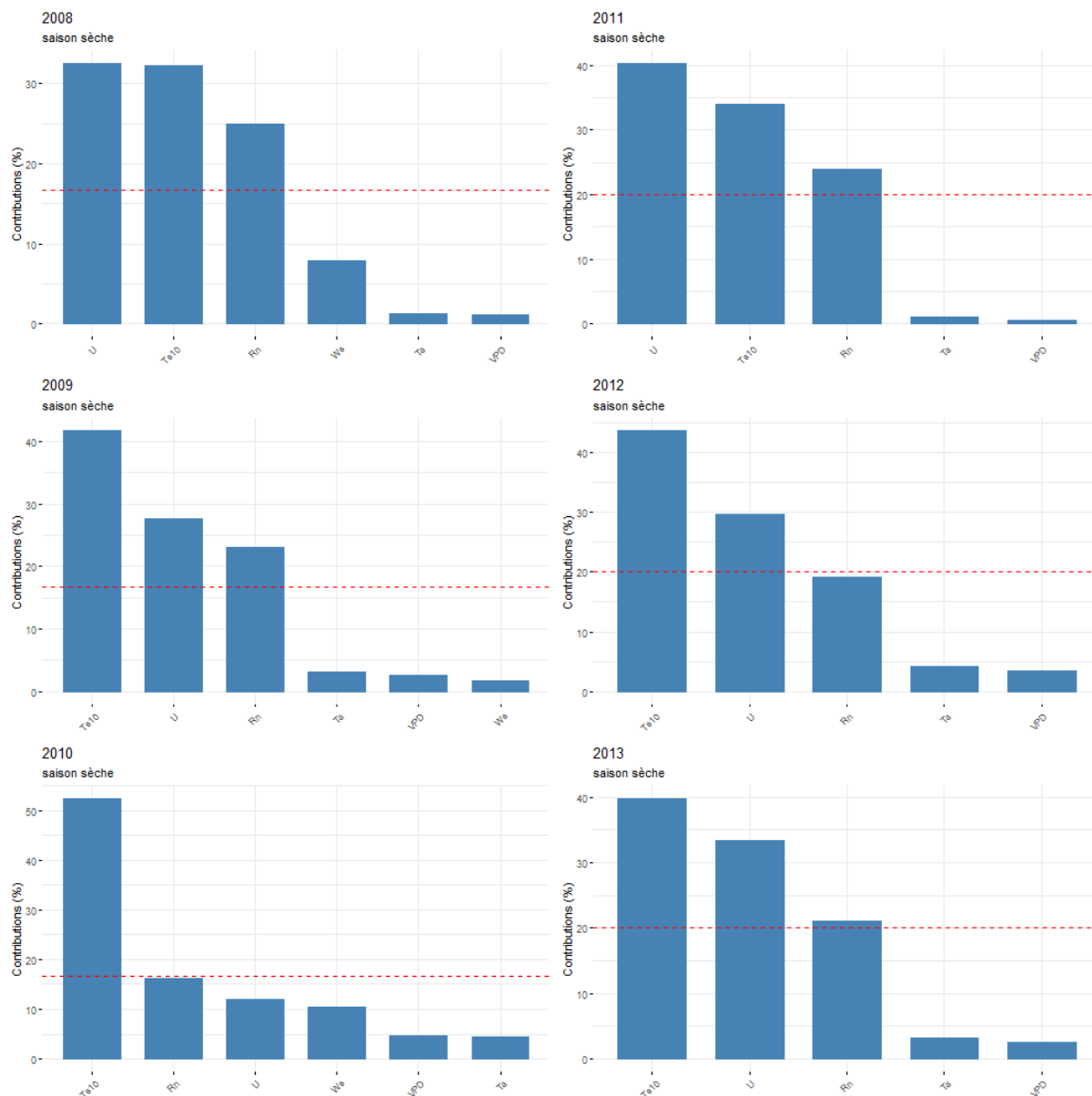


FIGURE 3.4 – Graphe des contributions des variables au deuxième axe principal pour les saisons sèches de 2008 à 2013

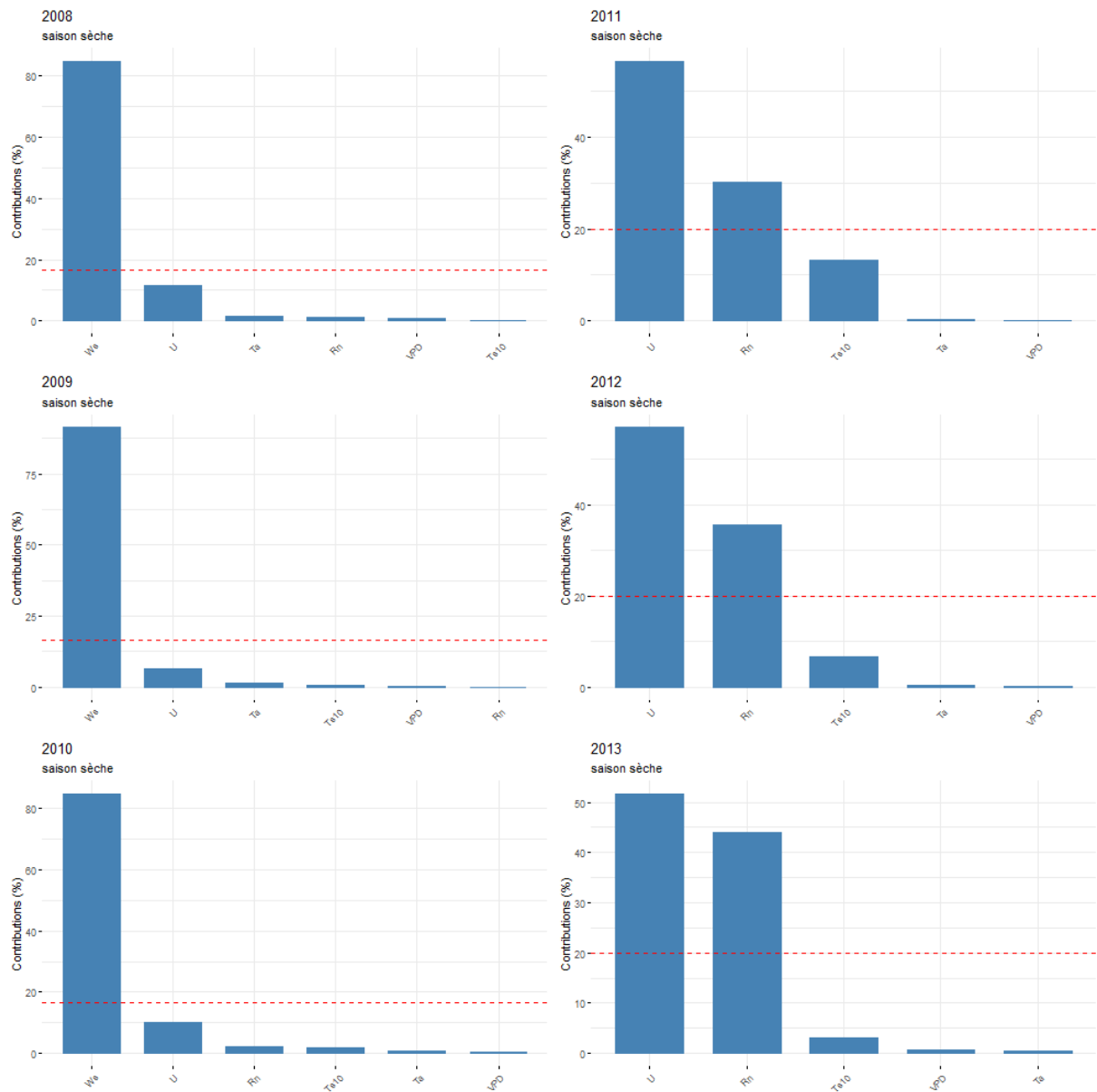


FIGURE 3.5 – Graphe des contributions des variables au troisième axe principal pour les saisons sèches de 2008 à 2013

3.5.2 Saison humide

Les tableaux 3.15 à 3.20 des valeurs propres obtenues pour les saisons humides de 2008 à 2013 permettent de considérer trois (03), et quatre (04) seulement en 2010, axes principaux dans cette étude. Ils expliquent au moins 90% de la variance totale bien que la règle de Kaiser et de coude (figure 4.1 en annexe) considèrent deux axes principaux par année donnant un pourcentage d'environ 70% de 2008 à 2010 et 80%

en 2011 et 2013.

TABLE 3.15 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2008.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
dim 1	3.34	55.67	55.67
dim 2	1.30	21.69	77.36
dim 3	0.83	13.83	91.19
dim 4	0.39	6.46	97.66
dim 5	0.10	1.65	99.30
dim 6	0.04	0.70	100

TABLE 3.16 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2009.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
dim 1	3.38	56.36	56.36
dim 2	1.26	21.07	77.42
dim 3	0.83	13.82	91.24
dim 4	0.39	6.44	97.69
dim 5	0.10	1.66	99.35
dim 6	0.04	0.65	100

TABLE 3.17 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2010.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
dim 1	3.05	50.88	50.88
dim 2	1.24	20.68	71.56
dim 3	0.79	13.25	84.81
dim 4	0.66	11.05	95.86
dim 5	0.20	3.29	99.15
dim 6	0.05	0.85	100

Les cercles de corrélation de la figure 3.6 et les tableaux 3.21 à 3.26 des contributions des variables aux axes principaux donnent pour les années 2008 et 2009 la première composante formée de Ts10, VPD et Ta avec de fortes contributions pour VPD ou Ta ; la deuxième composante formée des variables Ws, Rn avec une forte contribution pour cette dernière et la troisième composante est U. En 2010, la première composante est formée de VPD et Ta ; la deuxième de Rn, la troisième de Ts10 et U et la quatrième composante est formée de Ws. Pour les années de 2011 à 2013, les trois composantes

TABLE 3.18 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2011.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
dim 1	3.10	61.95	61.95
dim 2	0.96	19.21	81.16
dim 3	0.76	15.23	96.39
dim 4	0.14	2.77	99.16
dim 5	0.04	0.84	100

TABLE 3.19 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2012.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
dim 1	3.11	62.29	62.29
dim 2	1.02	20.40	82.68
dim 3	0.70	14.04	96.72
dim 4	0.12	2.49	99.21
dim 5	0.04	0.80	100

TABLE 3.20 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la saison humide 2013.

	Valeurs propres	Pourcentage	Pourcentage cumulé
Dim 1	3.07	61.50	61.50
Dim 2	1.06	21.14	82.64
Dim 3	0.71	14.22	96.87
Dim 4	0.11	2.13	99.00
Dim 5	0.05	1.00	100

sont identiques et sont formées, pour la première de VPD et Ta, pour la deuxième de Ts10 , Rn en forte contribution et pour la troisième composante de U uniquement.

On peut donc retenir en saison humide que la première composante est *la demande atmosphérique en eau* et la troisième *la vitesse du vent* et considérant que l'humidité du sol ,étroitement liée à la température du sol , facilite l'action du Rn sur le LE alors la deuxième composante peut être *l'énergie disponible*. Durant les saisons sèche et humide, l'année 2010 est particulière avec un nombre important de composantes à considéré.

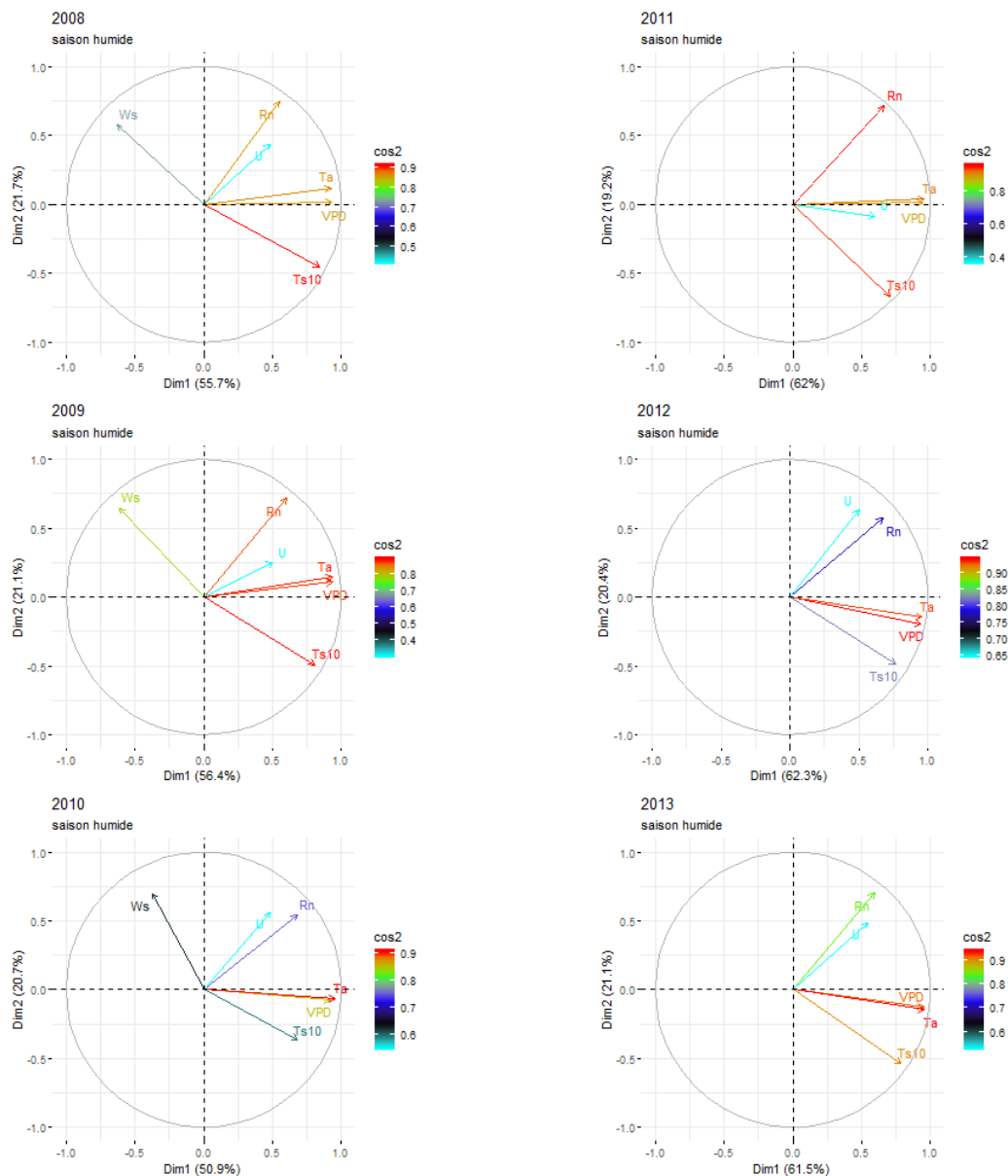


FIGURE 3.6 – Cercle de corrélation des saisons humides de 2008 à 2013

TABLE 3.21 – contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2008 .

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	21.02	15.79	0.79	8.37	53.83	0.19
Ws	11.87	25.45	11.27	44.29	7.02	0.10
Rn	9.02	43.04	0.91	29.56	16.05	1.42
VPD	25.68	0.01	10.43	6.53	10.99	46.36
Ta	25.52	1.09	12.00	0.82	8.73	51.83
U	6.88	14.62	64.59	10.44	3.37	0.10

TABLE 3.22 – contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2009.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	19.21	19.16	0.44	14.68	46.21	0.25
Ws	11.04	32.81	1.23	51.29	3.56	0.07
Rn	10.79	40.55	0.52	24.52	23.58	0.04
VPD	25.87	0.93	7.77	5.04	9.78	50.66
Ta	25.73	1.59	8.18	2.53	12.97	49.03
U	7.31	4.96	81.86	1.94	3.93	00.00

TABLE 3.23 – contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2010.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	15.30	10.54	36.90	8.87	24.24	4.1
Ws	4.48	39.48	2.31	53.45	0.27	0.01
Rn	14.96	23.77	19.68	3.07	35.53	2.99
VPD	27.85	0.46	4.83	4.37	30.57	31.91
Ta	29.64	0.37	2.19	5.97	1.35	60.48
U	7.76	25.38	34.09	24.27	8.03	0.46

TABLE 3.26 – contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2013.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	19.96	27.41	7.28	38.82	6.53
Rn	11.37	46.77	18.70	20.19	2.98
VPD	29.29	1.50	4.15	37.96	27.11
Ta	29.73	2.01	4.49	0.87	62.90
U	9.64	22.32	65.38	2.17	0.49

TABLE 3.24 – contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2011.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	16.24	46.09	0.39	36.97	0.31
Rn	14.37	52.97	0.50	31.55	0.66
VPD	28.59	0.01	9.19	18.73	43.46
Ta	29.32	0.16	7.44	7.52	55.56
U	11.53	0.77	82.47	5.22	0.00

TABLE 3.25 – contribution des variables à la variance de chaque axes propres pour la saison humide 2012.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	18.96	23.16	17.57	40.23	0.08
Rn	14.53	31.97	26.96	25.64	0.91
VPD	29.06	3.76	1.89	20.77	44.52
Ta	29.41	2.10	4.11	9.96	54.41
U	8.05	39.01	49.46	3.40	0.08

3.5.3 Phase d'assèchement

Les tableaux 3.27 à 3.32 présentent les valeurs propres de la matrice de corrélation des variables obtenues durant la phase d'assèchement des années 2008 à 2013 de même que leurs pourcentages de variance expliquées et leurs pourcentages cumulés. Ils nous permettent, pour avoir les 90% de variance expliquée, de retenir deux axes principaux pour les phases d'assèchement de 2011 et 2012; trois axes principaux pour celles de 2009, 2010 et 2013 puis quatre axes principaux pour 2008.

D'après l'histogramme de la figure 4.5 en annexe, deux axes principaux sont suffisants pour l'étude des nuages quelque soit l'année (77% pour 2008 et 2009, 85% pour 2010, plus de 90% de 2011 à 2013). Ce que confirme la règle de kaiser à l'exception de l'année 2009 où cette dernière considère trois axes principaux avec 93% d'inertie totale expliquée.

TABLE 3.27 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d’assèchement 2008.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	3.17	52.85	52.85
dim 2	1.43	23.91	76.75
dim 3	0.62	10.36	87.12
dim 4	0.43	7.21	94.33
dim 5	0.27	4.53	98.87
dim 6	0.07	1.13	100

TABLE 3.28 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la la phase d’assèchement 2009 .

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	3.29	54.81	54.81
dim 2	1.33	22.09	76.89
dim 3	1.02	16.92	93.82
dim 4	0.18	2.95	96.77
dim 5	0.14	2.40	99.17
dim 6	0.05	0.83	100

TABLE 3.29 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d’assèchement 2010.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	3.70	61.69	61.69
dim 2	1.41	23.58	85.27
dim 3	0.69	11.50	96.77
dim 4	0.10	1.66	98.43
dim 5	0.08	1.20	99.62
dim 6	0.02	0.38	100

La figure 3.7 donne les cercles de corrélation pour les phases d’assèchement et les tableaux 3.33 à 3.38 les contributions des variables aux axes principaux de 2008 à 2013 respectivement. Les années 2009 et 2010 donnent les même variables pour les trois composantes principales de même que les années 2011 et 2012 pour les deux composantes. La première composante principale de toutes les années est formée de Rn, VPD, Ta et U sauf 2008 où elle est formée de Ts10, VPD et Ta. La deuxième composante est le Ts10 et pour 2008, elle est Rn. La troisième composante est le Ws pour les années 2009 et 2010 ; le U pour 2008 et 2013. La quatrième composante pour l’année 2008 uniquement est le Ws.

TABLE 3.30 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d’assèchement 2011.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	3.22	64.44	64.44
dim 2	1.31	26.28	90.72
dim 3	0.29	5.87	96.59
dim 4	0.11	2.24	98.82
dim 5	0.06	1.18	100

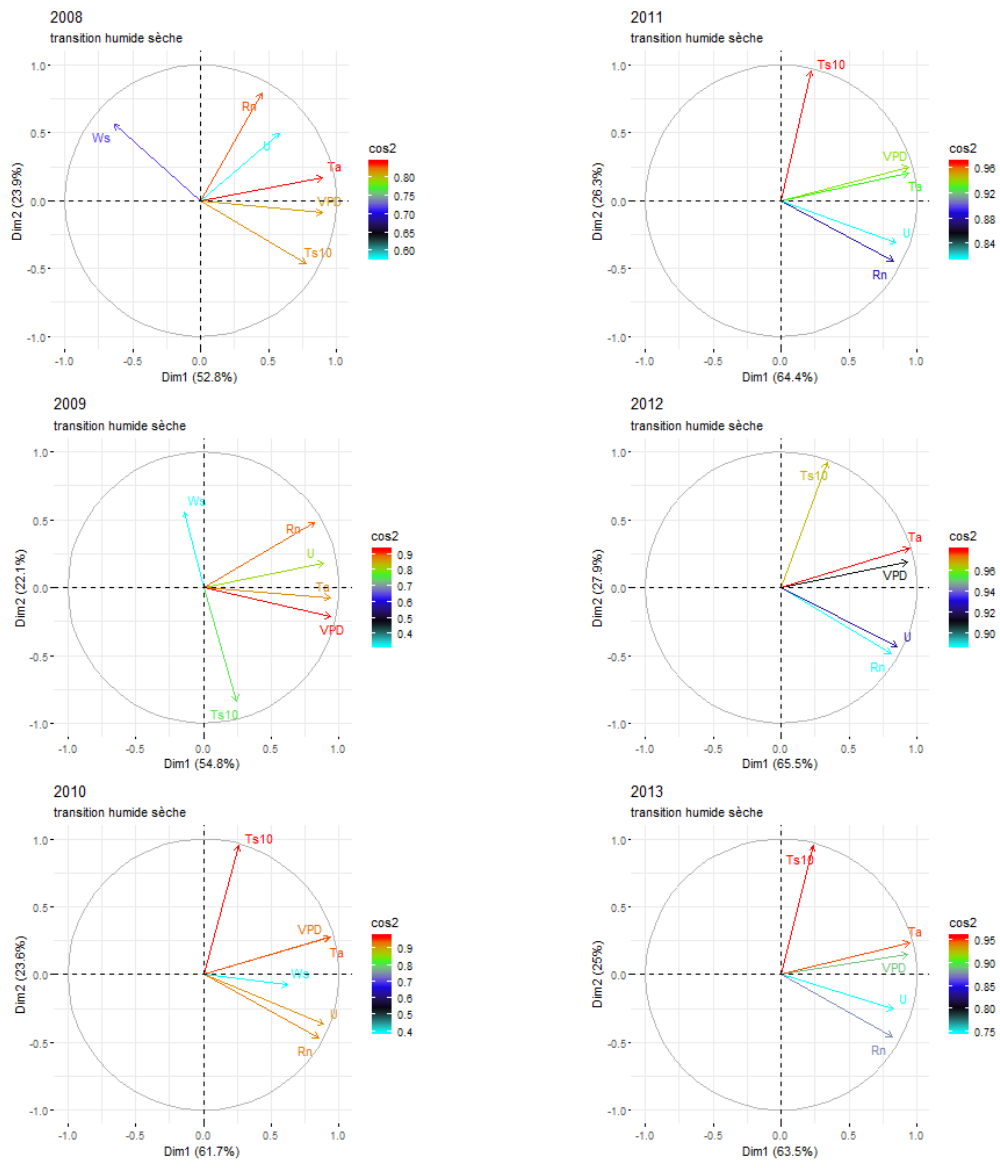
TABLE 3.31 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d’assèchement 2012.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	3.28	65.55	65.55
dim 2	1.39	27.89	93.44
dim 3	0.21	4.13	97.57
dim 4	0.10	1.91	99.49
dim 5	0.026	0.51	100

TABLE 3.32 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d’assèchement 2013.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	3.17	63.49	63.49
dim 2	1.25	25.00	88.49
dim 3	0.34	6.84	95.33
dim 4	0.18	3.62	98.96
dim 5	0.05	1.04	100

Durant les phases d'assèchement on peut retenir la première composante formée de R_n , VPD , T_a et U ; la deuxième est formée de T_{s10} et la troisième formée de W_s . Il faut noter que l'année 2008 paraît spéciale par le nombre de composante et les variables qui les composent.



.png

FIGURE 3.7 – Cercle de corrélation des phase d'assèchement de 2008 à 2013

TABLE 3.33 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d'assèchement 2008 .

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	19.11	14.87	0.17	17.41	34.93	13.51
Ws	12.79	21.81	11.99	46.64	0.23	6.54
Rn	6.53	43.69	2.71	22.24	17.78	7.05
VPD	25.39	0.58	8.52	0.29	43.09	22.12
Ta	25.61	1.95	16.40	5.38	0.06	50.59
U	10.56	17.09	60.21	8.03	3.91	0.19

TABLE 3.34 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d'assèchement 2009.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	1.84	52.76	20.41	0.09	21.66	3.23
Ws	0.58	23.48	64.46	6.74	0.87	3.86
Rn	20.45	17.40	0.02	33.81	24.06	4.26
VPD	26.80	3.48	0.06	0.41	39.19	30.06
Ta	26.55	0.41	8.15	1.28	5.05	58.56
U	23.78	2.45	6.89	57.67	9.18	0.03

TABLE 3.35 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d'assèchement 2010.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	1.83	63.91	0.61	0.04	33.06	0.55
Ws	10.49	0.41	87.67	0.02	1.37	0.03
Rn	19.41	15.25	1.29	41.48	21.34	1.23
VPD	23.26	5.46	5.05	0.02	24.13	42.07
Ta	23.78	5.46	3.07	1.74	9.91	56.04
U	21.23	9.50	2.30	56.71	10.18	0.07

TABLE 3.36 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d'assèchement 2011.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	1.50	70.04	0.13	27.05	1.28
Rn	21.26	14.93	29.55	22.85	11.42
VPD	27.24	4.61	1.25	35.71	31.20
Ta	27.65	3.07	10.83	4.97	53.48
U	22.36	7.36	58.24	9.42	2.62

TABLE 3.37 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d’assèchement 2012.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	3.49	61.11	7.87	14.21	13.32
Rn	19.99	16.79	50.92	3.57	8.73
VPD	26.69	2.59	27.67	30.00	13.05
Ta	27.33	6.02	1.53	0.69	64.43
U	22.51	13.49	12.00	51.52	0.47

TABLE 3.38 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la Phase d’assèchement 2013.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	1.75	72.07	2.58	17.37	6.23
Rn	21.10	16.52	12.04	43.60	6.74
VPD	27.34	1.77	7.92	38.82	24.16
Ta	28.26	4.38	4.40	0.16	62.801
U	21.55	5.26	73.06	0.06	0.07

3.5.4 Phase d’humidification

Les valeurs propres des phases d’humidification des années étudiées sont données dans les tableaux 3.39 à 3.44. Pour les trois premières années, il faut les quatre premiers axes principaux et pour les trois dernières années les trois premiers axes principaux pour obtenir les 90% de variance expliquée.

TABLE 3.39 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d’humidification 2008.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	2.93	48.87	48.87
dim 2	1.43	23.83	72.70
dim 3	0.78	13.02	85.72
dim 4	0.60	10.07	95.79
dim 5	0.20	3.41	99.20
dim 6	0.05	0.80	100

TABLE 3.40 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d’humidification 2009.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	2.95	49.13	49.13
dim 2	1.40	23.29	72.42
dim 3	0.82	13.61	86.02
dim 4	0.53	8.88	94.90
dim 5	0.25	4.24	99.15
dim 6	0.05	0.85	100

TABLE 3.41 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumule pour la phase d’humidification 2010.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	2.82	46.99	46.99
dim 2	1.51	25.24	72.22
dim 3	0.88	14.59	86.82
dim 4	0.48	8.08	94.90
dim 5	0.26	4.28	99.17
dim 6	0.05	0.83	100

TABLE 3.42 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d’humidification 2011.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	2.88	57.66	57.66
dim 2	1.30	25.98	83.64
dim 3	0.52	10.47	94.11
dim 4	0.26	5.12	99.22
dim 5	0.04	0.78	100

TABLE 3.43 – Valeurs propres, pourcentage de variance et cumul pour la phase d’humidification 2012.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	2.88	57.66	57.66
dim 2	1.41	28.20	85.86
dim 3	0.40	7.82	93.68
dim 4	0.23	4.65	98.32
dim 5	0.08	1.68	100

TABLE 3.44 – Valeurs propres, pourcentage de variance et son cumul pour la phase d’humidification 2013.

	Valeurs propre	pourcentage	pourcentage cumulé
dim 1	2.91	58.20	58.20
dim 2	1.42	28.41	86.61
dim 3	0.38	7.56	94.17
dim 4	0.25	5.07	99.24
dim 5	0.04	0.76	100

Les cercles de corrélation de la figure 3.8 et les tableaux des contributions 3.45 à 3.50 permettent de trouver les variables qui composent chaque composante principale pendant les phases d’humidification des années 2008 à 2013. Les résultats sont assez diversifiés selon les années. La première composante est formée de VPD et de Ta de 2009 à 2013 auxquelles s’ajoute Ts10 en 2008 et elle est formée uniquement de Ta en 2013. La deuxième composante est formée de Rn en 2008 à qui s’ajoute Ts10 en 2009, 2011 et 2013. En 2010 et 2012, elle est formée uniquement de Ts10. La troisième composante est formé de Ws de 2008 à 2010, de U en 2011, de Rn et U en 2012 et VPD et U en 2013. *Les résultats pendant la phase d’humidification sont assez diversifiés selon les années.*

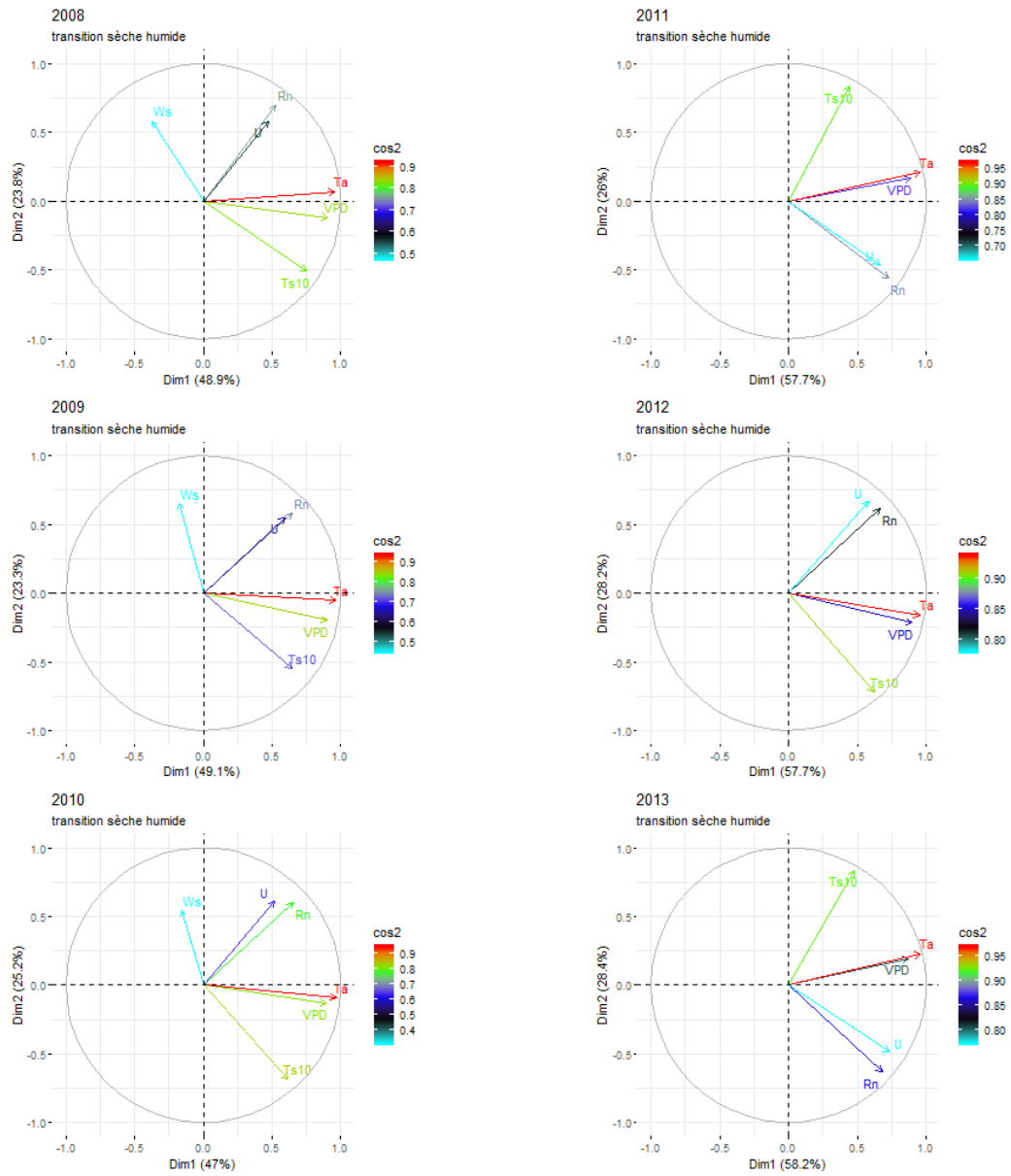


FIGURE 3.8 – Cercle de corrélation des saisons humide de 2008 à 2013

TABLE 3.45 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la phase d’humidification 2008.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	19.25	18.01	1.13	14.11	39.14	8.37
Ws	4.66	23.54	58.44	11.23	1.00	1.15
Rn	9.39	33.96	1.69	30.95	17.54	6.48
VPD	27.98	1.00	8.24	1.82	38.90	22.07
Ta	31.16	0.34	6.41	0.26	0.00	61.83
U	7.57	23.15	24.10	41.65	3.43	0.10

TABLE 3.46 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la phase d’humidification 2009.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	13.99	21.55	19.07	10.45	28.22	6.72
Ws	1.06	30.00	65.84	1.93	0.50	0.66
Rn	14.08	24.04	10.40	15.25	31.72	4.52
VPD	27.35	2.85	0.06	9.66	35.00	25.07
Ta	31.60	0.20	2.15	2.76	0.46	62.82
U	11.92	21.36	2.49	59.94	4.10	0.20

TABLE 3.47 – Contribution des variables à la variance de chaque axe propre pour la phase d’humidification 2010.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Ts10	13.22	30.84	3.55	12.63	23.39	16.37
Ws	0.86	19.18	76.85	2.24	0.48	0.39
Rn	14.98	23.78	2.95	27.46	21.04	9.82
VPD	28.26	1.12	3.11	3.91	52.43	11.16
Ta	33.15	0.55	2.38	0.33	1.52	62.07
U	9.53	24.53	11.16	53.44	1.14	0.19

TABLE 3.48 – Contribution des variable à la variance de chaque axe propre pour la phase d’humidification 2011.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	6.81	53.70	11.35	16.53	11.62
Rn	18.40	24.33	9.65	38.93	8.69
VPD	27.43	2.09	14.27	39.39	16.82
Ta	32.02	3.36	1.46	0.49	62.67
U	15.34	16.52	63.27	4.66	0.21

TABLE 3.49 – Contribution des variable à la variance de chaque axe propre pour la phase d’humidification 2012.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	13.42	36.86	2.52	29.51	17.68
Rn	15.25	26.63	41.33	6.24	10.56
VPD	27.92	3.34	0.02	60.92	7.82
Ta	31.66	1.76	1.43	1.55	63.60
U	11.75	31.41	54.71	1.79	0.34

TABLE 3.50 – Contribution des variable à la variance de chaque axe propre pour la phase d’humidification 2013.

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Ts10	7.78	49.04	9.10	13.75	20.33
Rn	15.98	28.10	10.62	36.45	8.85
VPD	26.28	2.68	26.55	37.01	7.47
Ta	31.50	3.65	0.01	3.19	61.65
U	18.46	16.52	53.73	9.59	1.69

3.6 Conclusion

De cette étude, la première composante principale est restée presque la même durant toute les saisons de toutes les années et est une combinaison de VPD, Ta et Ts10 est observée comme première composante. Le premier processus est relatif à la demande en eau de l’atmosphère. La deuxième composante formée de Rn quelle que soit la saison de l’année et suivie de U durant la saison sèche et de Ws en saison humide. La troisième composante est Ws en saison sèche et U en saison humide. U et Ws s’inversent de rôle selon les saisons humide et sèche respectivement et font ainsi leur particularité. Des phases d’humidification et d’assèchement, différents résultats sont obtenus suivant les années. Elles n’ont donc de processus fixes. Les années 2010 en saison sèche et humide et 2008 durant les phases de transition sont particulières par le nombre de composantes retenues et la répartition des variables qui les forment.

Sélection de variables pertinentes par la régression pas par pas

Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus avec la régression pas par pas avec l'appui des notions déjà abordées dans le chapitre 2. Les variables explicatives sont les mêmes que celles utilisées dans le chapitre précédent.

4.1 Sélection de variables pertinentes par régression pas à pas

Avant de passer aux étapes de la régression stagewise proprement dite, on vérifie l'impact de chaque variable sur LE. Pour le faire il faut réaliser la régression linéaire multiple de LE par toutes les variables sauf la variable dont on désire connaître l'impact. Par la suite faire la régression linéaire multiple de la variable dont on veut connaître l'impact par les autres variables explicatives restantes. En ce faisant, on extrait l'effet des autres variables des deux considérées et en réalisant le nuage des points formé par les résidus des deux régressions, on identifie la relation qui lie les deux variables. En utilisant nos données, Nous avons constaté que les relations entre LE et chacune des variables explicatives est linéaire ou sans un ordre spécifique.

La sélection des variables qui influencent la variabilité du LE est faite par la méthode pas à pas utilisant les régressions linéaires multiples pour chaque saison de chaque année. Les résultats sont récapitulés dans les tableaux 4.1 et 4.2 pour les saisons sèches ; les tableaux 4.3 et 4.4 pour les saisons humides ; les tableaux 4.5 et 4.6 pour les phases d'humidification puis les tableaux 4.7 et 4.8 pour les phases d'assèchement des années 2008 à 2013. Il est à noter que durant les trois dernières années le W_s n'est pas utilisé dans les données.

Les tableaux présentent les différentes étapes de la sélection. La première étape donne les F partiels de Ficher de la régression linéaire de LE en fonction de chaque variable utilisée dans cette étude. Les autres étapes donnent le F partiel de Ficher

de la régression des résidus du modèle issu de l'étape précédente et de chacune des variables restantes. La variable sélectionnée à une étape est celle ayant la plus grand F avec un p value inférieur à 0.01. La sélection s'arrête si à une étape aucune variable ne respecte cette condition.

Le rayonnement net (Rn), pour toute les saisons de toutes les années étudiées, est la première variable qui influence la variabilité de flux de chaleur latente, ayant un F compris entre 346.4 et $2.13e^4$ avec un p-value inférieur à $2.2e^{-16}$ mis à part la saison sèche de 2012 qui donne deux variables pertinentes que sont la vitesse du vent (U) et la température de l'air (Ta) dans cet ordre et les phases d'assèchement 2009, 2010 où l'humidité du sol est la première variable pertinente.

Pendant les saisons sèches, le VPD est la deuxième variable pertinente, ayant un F compris entre 43 et 72.99 pour les années de 2008 à 2010 et 2013. L'année 2011 a comme deuxième variable U avec un F=27.4 et de p-Value de $3.643e^{-07}$. La troisième variable est U pour 2008 et 2013 de F respectif 42.37 (p-value : $9.334e^{-11}$), 18.91 (p-value : $1.492e^{-5}$) et Ws pour les deux années consécutives 2009 et 2010 de F respectif 26.18 (p-value : $3.626e^{-07}$), 30.29 (p-value : $4.339e^{-08}$). Elle est le VPD pour la saison sèche de 2011. Seules les trois premières années ont une quatrième variable qui est Ws en 2008 et U en 2009 et 2010. *On peut donc retenir pour les saisons sèches que quatre variables pertinentes contrôlent la variabilité du LE que sont : le Rn, le VPD, le Ws et le U.*

Les saisons humides de 2008 à 2010 ont donné les mêmes variables à chaque étape. A la suite de la première qui est Rn, il y a la Ws (F respectifs 439.8 ; 551.5 ; 540.5 et de p-value inférieur à $2.2e^{-16}$) ; Ta (F respectives 216.2 ; 367.7 ; 160 et de p-value inférieur à $2.2e^{-16}$) et à la fin U (F respectifs 7.07 ; 13.7 ; 82.97 et de p-value respectifs 0.0079 ; 0.0002 et inférieur à $2.2e^{-16}$). Les saisons humides de 2011 et 2013 ont les trois premières variables pertinentes qui sont : le Rn, le Ts10 et le Ta auxquelles s'ajoute une quatrième variable VPD uniquement en 2013. La saison humide de l'année 2012 a Rn, VPD, Ts10 et U comme variables pertinentes pris dans cet ordre. *En saison humide les variable pouvant être retenus sont : Rn , Ws, Ta et U.*

Au cours des phases d'assèchement, la Ts10 est la deuxième variable pertinente en 2011 et le VPD en 2012 et en 2013. Elles sont les dernières variables retenues pour ces années. Pour l'année 2010, le Rn lors de la phase d'assèchement n'est pas une variable pertinente mais le Ws suivie du Ts10 et U. En 2009 le Rn vient à la deuxième étape après le Ws et est suivi de VPD et Ta. En 2008, Rn est la première variable suivie de Ws, U et Ts10 dans cet ordre. La pertinence du Rn décroît de 2008 à 2010 pendant la phase d'assèchement.

Au cours des phases d'humidification, le Rn est la seule variable pertinente en 2011 à laquelle s'ajoutent Ts10 en 2012 et VPD suivie de Ts10 en 2013. Pour les années

de 2008 à 2010, le Rn et le Ws sont les deux premières variables pertinentes dans cet ordre. Elles sont suivies de U en 2008, de VPD en 2009, de VPD et U en 2010.

TABLE 4.1 – Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des saisons sèches 2008-2010 .

Etapas	2008			2009			2010		
	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
1	Rn	2518	$2.2e^{-16}$	Rn	3381	$2.2e^{-16}$	Rn	2412	$2.2e^{-16}$
	U	1251	$2.2e^{-16}$	U	1016	$2.2e^{-16}$	U	1741	$2.2e^{-16}$
	VPD	676.3	$2.2e^{-16}$	Ta	674.1	$2.2e^{-16}$	VPD	786.8	$2.2e^{-16}$
	Ta	655.5	$2.2e^{-16}$	VPD	668	$2.2e^{-16}$	Ta	761.7	$2.2e^{-16}$
	Ws	39.91	$3.209e^{-10}$	Ws	16.6	$4.922e^{-05}$	Ws	148.9	$2.2e^{-16}$
	Ts10	5.974	0.01459	Ts10	2.953	0.08596	Ts10	15.88	$7.036e^{-05}$
2	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	VPD	62.93	$3.385e^{-15}$	VPD	72.99		VPD	47.74	$7.032e^{-12}$
	Ta	45.99	$1.522e^{-11}$	Ta	61.58	$9.394e^{-15}$	Ws	30.35	$4.207e^{-08}$
	U	25.21	$5.557e^{-07}$	Ts10	21.23	$4.506e^{-06}$	Ta	32.56	$1.376e^{-08}$
	Ts10	16.94	$3.997e^{-05}$	Ws	19.65	$1.015e^{-05}$	U	22.28	$2.56e^{-06}$
	Ws	2.848	0.0916	U	18.32	$2.016e^{-05}$	Ts10	5.025	0.02513
	Modèle	1350	$2.2e^{-16}$	Modèle	1897	$2.2e^{-16}$	Modèle	1301	$< 2.2e^{-16}$
3	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	U	42.37	$9.334e^{-11}$	Ws	26.18	$3.626e^{-07}$	Ws	30.29	$4.339e^{-08}$
	Ts10	16.59	$4.802e^{-05}$	U	19.96	$8.673e^{-06}$	Ts10	28.82	$9.131e^{-08}$
	Ws	4.717	0.02997	Ts10	16.06	$6.53e^{-05}$	U	14.64	0.0001353
	Ta	0.7975	0.3719	Ta	0.01819	0.8927	Ta	0.7969	0.3722
	Modèle	971.2	$2.2e^{-16}$	Modèle	1300	$2.2e^{-16}$	Modèle	895.7	$2.2e^{-16}$
4	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	Ws	10.51	$(-1.562)^2$	U	26.63	$2.882e^{-07}$	U	20.79	$5.531e^{-06}$
	Ta10	10.42	0.001263	Ts10	8.652	0.00333	Ta	0.9373	0.3331
	Ta	0.2338	0.6288	Ta	0.1304	0.7181	Ts10	20.57	$6.191e^{-06}$
	Modèle	734.4	$2.2e^{-16}$	Modèle	1036	$2.2e^{-16}$	Modèle	724.1	$2.2e^{-16}$
5	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	Ts10	5.822	0.01591	Ts10	5.845	0.01577	Ta	0.4182	0.5179
	Ta	0.3036	0.5817	Ta	0.0007579	0.978	Ws	$7.773e^{-29}$	1
	Modèle	611.5	$2.2e^{-16}$	Modèle	852.1	$2.2e^{-16}$			
6	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value			
	Ta	0.002532	0.9599	Ta	0.4305	0.5119			

TABLE 4.2 – Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des saisons sèche 2011-2013 .

Etapas	2011			2012			2013		
	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value
1	Rn	126.1	$< 2.2e^{-16}$	U	447.8	$< 2.2e^{-16}$	Rn	801.3	$< 2.2e^{-16}$
	U	79.86		Rn	339.4	$< 2.2e^{-16}$	U	574	$< 2.2e^{-16}$
	Ts10	63.37	$3.318e^{-14}$	Ts10	83.95	$< 2.2e^{-16}$	VPD	181.6	$< 2.2e^{-16}$
	VPD	6.566	0.01087	VPD	73.75	$< 2.2e^{-16}$	Ta	152.9	$< 2.2e^{-16}$
	Ta	5.824	0.01639	Ta	71.61	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	62.48	$6.347e^{-15}$
2	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	U	27.04	$3.643e^{-07}$	Ta	45.16	$4.333e^{-11}$	VPD	43.74	$5.753e^{-11}$
	Ts10	6.478	0.01141	VPD	40.5	$3.986e^{-10}$	Ta	22.73	$2.106e^{-06}$
	Ta	2.443	0.1191	Ts10	6.166	0.01331	U	13.68	0.0002275
	VPD	1.857	0.174		5.668	0.0176	Ts10	6.46	0.01117
	Modèle	85.78	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	265.1	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	443	$< 2.2e^{-16}$
3	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	VPD	4.123	0.04317	Ts10	1.728	0.1892	U	18.91	$1.492e^{-05}$
	Ta	3.982	0.04687	Rn	0.4371	0.5088	Ts10	9.448	0.002164
	Ts10	0.2343	0.6287	VPD	0.05071	0.8219	Ta	2.37	0.1239
	Modèle	60.49	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	180.8	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	323.9	$< 2.2e^{-16}$
4	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	Ts10	1.04	0.3087	Rn	0.142	0.7064	Ts10	3.21	0.07346
	Ta	0.0008571	0.9767	VPD	0.01969	0.8884	Ta	1.22	0.2696

TABLE 4.8 – Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des Phases d'assèchement 2011-2013 .

Etapas	2011			2012			2013		
	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value
1	Rn	437.6	$< 2.2e^{-16}$	Rn	346.4	$< 2.2e^{-16}$	Rn	1329	$< 2.2e^{-16}$
	Ta	194.8	$< 2.2e^{-16}$	U	306.2	$< 2.2e^{-16}$	VPD	893.5	$< 2.2e^{-16}$
	U	110.9	$< 2.2e^{-16}$	VPD	85.76	$< 2.2e^{-16}$	Ta	851.5	$< 2.2e^{-16}$
	VPD	94.47	$< 2.2e^{-16}$	Ta	80.37	$< 2.2e^{-16}$	U	501.8	$< 2.2e^{-16}$
	Ts10	34.98	$4.48e^{-09}$	Ts10	13.04	0.0003645	Ts10	2.625	0.1054
	2	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F
Ts10		13.15	0.0003005	VPD	29.99	$1.007e^{-07}$	VPD	111.3	$< 2.2e^{-16}$
Ta		2.357	0.125	Ta	20.02	$1.141e^{-05}$	Ta	81.5	$< 2.2e^{-16}$
U		2.194	0.1389	U	12.7	0.0004332	Ts10	57.92	$5.405e^{-14}$
VPD		0.01272	0.9102	Ts10	5.631	0.01836	U	4.209	0.04042
Modèle		231	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	213.5	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	863.7	$< 2.2e^{-16}$
3	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	U	2.661	0.1031	U	4.431	0.03623	U	3.161	0.07565
	VPD	1.9	0.1684	Ts10	2.386	0.1236	Ts10	0.01769	0.8942
	Ta	$1.686e^{-28}$	1	Ta	0.1623	0.6874	Ta	0.008392	0.927
4	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value			
	Ta			Ta	0.04124	0.8392			
				Ts10	0.01357	0.9073			

TABLE 4.3 – Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des saisons humides 2008-2010 .

Étapes	2008			2009			2010		
	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value
1	Rn	$2.13e^{+04}$	$< 2.2e^{-16}$	Rn	$2.093e^{+04}$	$< 2.2e^{-16}$	Rn	3127	$< 2.2e^{-16}$
	Ta	1654	$< 2.2e^{-16}$	Ta	2199	$< 2.2e^{-16}$	Ws	175.8	$< 2.2e^{-16}$
	U	1016	$< 2.2e^{-16}$	VPD	1633	$< 2.2e^{-16}$	U	122	$< 2.2e^{-16}$
	VPD	687.4	$< 2.2e^{-16}$	U	870.6	$< 2.2e^{-16}$	Ta	121.1	$< 2.2e^{-16}$
	Ws	459.5	$< 2.2e^{-16}$	Ws	267.4	$< 2.2e^{-16}$	VPD	48.36	$4.967e^{-12}$
	Ts10	65.85	$6.078e^{-16}$	Ts10	69.17	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	15.88	$7.036e^{-05}$
2	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	Ws	439.8	$< 2.2e^{-16}$	Ws	551.5	$< 2.2e^{-16}$	Ws	540.5	$< 2.2e^{-16}$
	Ta	60.6	$8.445e^{-15}$	Ta	79.72	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	5.127	0.02368
	Ts10	34.52	$4.501e^{-09}$	VPD	52.3	$5.443e^{-13}$	U	3.188	0.07434
	VPD	20.02	$7.853e^{-06}$	Ts10	11.59	0.000668	VPD	1.957	0.162
	U	11.83	0.0005889	U	7.078	0.007826	Ta	0.002114	0.9633
	Modèle	$1.186e^{+04}$	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	$1.185e^{+04}$	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	2311	$< 2.2e^{-16}$
3	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	Ta	216.2	$< 2.2e^{-16}$	Ta	367.7	$< 2.2e^{-16}$	Ta	160	$< 2.2e^{-16}$
	VPD	154	$< 2.2e^{-16}$	VPD	335.6	$< 2.2e^{-16}$	VPD	149.4	$< 2.2e^{-16}$
	Ts10	68.73	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	169.5	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	61.89	$6.267e^{-15}$
	U	2.715	0.09946	U	3.839	0.05011	U	19.15	$1.281e^{-05}$
	Modèle	8553	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	9198	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	1619	$< 2.2e^{-16}$
4	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	U	7.07	0.007864	U	13.77	0.000209	VPD	82.97	$< 2.2e^{-16}$
	VPD	5.399	0.02019	Ts10	0.2502	0.6169	U	49.63	$2.65e^{-12}$
	Ts10	3.213	0.07314	VPD	0.01479	0.9032	Ts10	$1.468e^{-28}$	1
	Modèle	6429	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	6925	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	1405	$< 2.2e^{-16}$
5	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	VPD	5.715	0.01686	Ts10	0.1257	0.7229	U	2.671	0.1023
	Ts10	5.419	0.01996	VPD	0.005425	0.9413	Ts10	$8.375e^{-29}$	1
	Modèle	5232	$< 2.2e^{-16}$						
6	Variables	F	P-value						
	Ts10	1.57	0.2102						

TABLE 4.4 – Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des saisons humides 2011-2013 .

Etapas	2011			2012			2013		
1	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value
	Rn	7121	$< 2.2e^{-16}$	Rn	$2.123e^{+04}$	$< 2.2e^{-16}$	Rn	$1.934e^{+04}$	$< 2.2e^{-16}$
	Ta	1028	$< 2.2e^{-16}$	Ta	3975	$< 2.2e^{-16}$	Ta	2226	$< 2.2e^{-16}$
	VPD	715.7	$< 2.2e^{-16}$	VPD	3162	$< 2.2e^{-16}$	VPD	1842	$< 2.2e^{-16}$
	U	298.3	$< 2.2e^{-16}$	U	1758	$< 2.2e^{-16}$	U	1237	$< 2.2e^{-16}$
	Ts10	26.65	$2.641e^{-07}$	Ts10	287.2	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	62.48	$6.347e^{-15}$
2	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	Ts10	20.66	$5.762e^{-06}$	VPD	809.8	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	40.35	$2.233e^{-10}$
	Ta	4.948	0.02621	Ta	613	$< 2.2e^{-16}$	U	22.32	$2.342e^{-06}$
	U	0.5696	0.4505	Ts10	509.7	$< 2.2e^{-16}$	Ta	13.98	0.0001855
	VPD	0.04547	0.8312	U	22.94	$1.721e^{-06}$	VPD	1.146	0.2843
	Modèle	3600	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	$1.397e^{+04}$	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	9733	$< 2.2e^{-16}$
3	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	Ta	26.83	$2.41e^{-07}$	Ts10	20.82	$5.169e^{-06}$	Ta	73.4	$< 2.2e^{-16}$
	VPD	10.09	0.001508	U	9.515	0.00205	VPD	12.14	0.0004967
	U	0.8287	0.3627	Ta	0.1154	0.7341	U	9.792	0.001758
	Modèle	2568	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	9476	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	6981	$< 2.2e^{-16}$
4	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	U	6.011	0.01429	U	25.32	$5.05e^{-07}$	VPD	14.78	0.0001214
	VPD	2.847	0.09165	Ta	0.07469	0.7846	U	1.957	0.1619
	Modèle	1934	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	7176	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	5354	$< 2.2e^{-16}$
5	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	VPD	2.543	0.1109	Ta	0.1274	0.7212	U	2.686	0.1013

4.2 Ce qu'on peut retenir

En saison sèche quelque soit le pourcentage de données manquantes les variables qui apparaissent pertinentes sont Rn, VPD, Ws et U. La principale est Rn suivie du VPD et l'ordre des autres varie selon l'année. L'année 2012 est une année spéciale car le Rn n'apparait pas comme une variable pertinente mais U et Ta (qui est généralement fortement corrélée au VPD).

En saison humide, nous pouvons retenir les variables Rn, Ws, Ta et U comme les variables pertinentes. La Ts10 non considérée est due au fait qu'elle est étroitement liée Ws (fortement corrélé négativement). Sa présence dans les trois dernières années d'étude est probablement relative au non usage de Ws dans ces données. Le VPD est généralement fortement corrélé avec Ta (voir cercle de corrélation en ACP) et atteint probablement une saturation en saison humide vue la forte disponibilité en eau.

Les phases d'humidification ressemblent à la saison sèche par les variables pertinentes qu'on peut retenir (vu l'absence de Ta). Les phases d'assèchement ne présentent pas assez de ressemblance pour une synthèse possible mais il faut indiquer que les phases d'assèchement de 2009 et 2010 ont comme première variable pertinente Ws. Rn vient à sa suite en 2009 et n'est pas pertinente en 2010.

TABLE 4.5 – Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des Phases d'humidification 2008-2010 .

Etapas	2008			2009			2010		
	Variable	F e/m	P-value e/m	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value
1	Rn	683.6/	$2.2e^{-16}$	Rn	1319	$2.2e^{-16}$	Rn	837.1	$2.2e^{-16}$
	Ws	592.5	$2.2e^{-16}$	Ws	592.5	$2.2e^{-16}$	Ws	812.2	$2.2e^{-16}$
	Ts10	65.85/	$6.078e^{-16}$	U	369.1	$6.078e^{-16}$	Ta	278.1	$6.078e^{-16}$
	Ta	62.41	$4.396e^{-15}$	Ta	227	$6.078e^{-16}$	U	240.3	$6.078e^{-16}$
	U	60.4	$1.181e^{-14}$	VPD	85.56	$6.078e^{-16}$	VPD	233.5	$6.078e^{-16}$
	VPD	8.623	0.003354	Ts10	65.85/	$6.078e^{-16}$	Ts10	1.29	$6.078e^{-16}$
2	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	Ws	694.3	$< 2.2e^{-16}$	Ws	576.1	$< 2.2e^{-16}$	Ws	1029	$< 2.2e^{-16}$
	Ts10	115.4	$< 2.2e^{-16}$	VPD	4.835	0.02799	VPD	30.54	$3.795e^{-08}$
	VPD	29.23	$7.114e^{-08}$	Ts10	1.281	0.2578	Ta	12.95	0.0003285
	Ta	17.68	$2.716e^{-05}$	Ta	0.9053	0.3415	U	1.1	0.2944
	U	15.5	$8.509e^{-05}$	U	0.7776	0.378	Ts10	0.9654	0.326
	Modèle	800.4	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	1115	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	1208	$< 2.2e^{-16}$
3	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	U	8.194	0.004242	VPD	25.13	$5.771e^{-07}$	VPD	118.1	$< 2.2e^{-16}$
	VPD	1.614	0.2041	Ts10	11.75	0.0006188	Ts10	92.32	$< 2.2e^{-16}$
	Ts10	1.038	0.3083	Ta	6.916	0.008599	Ta	68.5	$2.568e^{-16}$
	Ta	0.01754	0.8947	u	0.1153	0.7342	u	2.606	0.1067
	Modèle	539.6	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	764.1	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	924.7	$< 2.2e^{-16}$
4	Variable	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	VPD	2.682	0.1017	Ta	2.895	0.08901	U	4.005	0.04554
	Ts10	0.2042	0.6514	U	1.531	0.2161	Ta	0.9096	0.3404
	Ta	0.1877	0.6649	Ts10	0.001804	0.9661	Ts10	$7.999e^{-29}$	1
							Modèle	693.8	$< 2.2e^{-16}$
5							Variables	F	P-value
							Ts10	5.651	0.01756
							Ta	0.009444	0.9226
							Modèle	U, Ts10	pas significatifs

TABLE 4.6 – Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des Phases d’humidification 2011-2013 .

Étapes	2011			2012			2013		
	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value
1	Rn	462.1	$< 2.2e^{-16}$	Rn	3013	$< 2.2e^{-16}$	Rn	314.9	$< 2.2e^{-16}$
	U	168.3	$< 2.2e^{-16}$	U	554.9	$< 2.2e^{-16}$	VPD	224.7	$< 2.2e^{-16}$
	Ta	83.12	$< 2.2e^{-16}$	Ta	429	$< 2.2e^{-16}$	U	187.2	$< 2.2e^{-16}$
	VPD	60.19	$1.526e^{-14}$	VPD	158.3	$< 2.2e^{-16}$	Ta	134.6	$< 2.2e^{-16}$
	Ts10	25.88	$4.063e^{-07}$	Ts10	20.32	$6.998e^{-06}$	Ts10	2.625	0.1054
2	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	U	2.583	0.1082	Ts10	46.54	$1.234e^{-11}$	VPD	74.02	$< 2.2e^{-16}$
	Ta	1.691	0.1936	Ta	22.32	$2.491e^{-06}$	Ta	18.9	$1.663e^{-05}$
	VPD	0.7119	0.3989	VPD	12.22	0.0004843	U	7.257	0.007294
	Ts10	0.2319	0.6302	U	6.523	0.01073	Ts10	5.929	0.01523
3				Modèle	1574	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	233.6	$< 2.2e^{-16}$
	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	U	3.326	0.06837	U	3.326	0.06837	Ts10	10.8	0.001084
	VPD	0.5864	0.4439	VPD	0.5864	0.4439	Ta	5.158	0.02355
4				Ta	0.1014	0.7502	U	1.364	0.2434
	Variables	F	P-value				Modèle	167.5	$< 2.2e^{-16}$
	U	1.292	0.2562				Variables	F	P-value
						Ta	0.2136	0.6441	

4.3 Conclusion

Il ressort de cette analyse que le Rn est la plus importante variable pertinente à l’exception de la saison sèche de 2012 et des phases d’assèchement de 2009 et 2010. La différence majeure entre la saison humide et la saison sèche est la Ta et le VPD. Alors que l’ACP permet de considérer toutes les variables en les regroupant par composante et donc "processus", la régression pas par pas en réduit, ne sélectionnant que les variables les plus importantes. **Dans un cas particulier ou une régression pas par pas retiendrait beaucoup de variables, il serait possible de faire un ACP à sa suite pour considérer alors les processus sous-jacents.**

TABLE 4.7 – Tableau récapitulatif de la sélection pas par pas des Phases d’assèchement 2008-2010 .

Etapas	2008			2009			2010		
	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value	Variable	F	P-value
1	Rn	$1.552e^{+04}$	$< 2.2e^{-16}$	Ws	1539	$< 2.2e^{-16}$	Ws	108	$< 2.2e^{-16}$
	Ws	3380	$< 2.2e^{-16}$	Rn	987.1	$< 2.2e^{-16}$	Rn	66.89	$5.447e^{-15}$
	Ta	834.7	$< 2.2e^{-16}$	Ta	325.2	$< 2.2e^{-16}$	U	41.68	$3.614e^{-10}$
	U	670.4	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	94.59	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	32.68	$2.334e^{-08}$
	Ts10	624	$< 2.2e^{-16}$	VPD	88.05	$< 2.2e^{-16}$	VPD	18.73	$1.97e^{-05}$
	VPD	23.5	$1.269e^{-06}$	U	86.65	$< 2.2e^{-16}$	Ta	16.99	$4.7e^{-05}$
2	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	Ws	3782	$< 2.2e^{-16}$	Rn	781.8	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	56.47	$4.865e^{-13}$
	VPD	1444	$< 2.2e^{-16}$	U	616.8	$< 2.2e^{-16}$	Rn	50.07	$8.208e^{-12}$
	U	515.1	$< 2.2e^{-16}$	VPD	402	$< 2.2e^{-16}$	U	40.57	$5.996e^{-10}$
	Ts10	461.5	$< 2.2e^{-16}$	Ta	269.3	$< 2.2e^{-16}$	Ta	17.15	$4.346e^{-05}$
	Ta	253	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	79.18	$< 2.2e^{-16}$	VPD	16.58	$5.782e^{-05}$
	Modèle	$1.278e^{+04}$	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	1855	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	90.93	$< 2.2e^{-16}$
3	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	U	177.4	$< 2.2e^{-16}$	VPD	63.53	$3.603e^{-15}$	U	13.1	0.000339
	Ta	122.2	$< 2.2e^{-16}$	U	17.43	$3.186e^{-05}$	Rn	12.3	0.000513
	Ts10	0.3285	0.5666	Ts10	14.33	0.0001611	VPD	3.352	0.06796
	VPD	$2.849e - 26$	1	Ta	13.9	0.0002021	Ta	3.176	0.07561
	Modèle	8668	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	1353	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	68.4	$< 2.2e^{-16}$
4	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value
	Ts10	140.7	$< 2.2e^{-16}$	Ta	9.181	0.002496	Rn	3.615	0.0581
	VPD	49.1	$2.58e^{-12}$	U	1.597	0.2066	Ta	0.3825	0.5366
	Ta	1.852	0.1736	Ts10	1.395	0.2377	VPD	0.2744	0.6008
	Modèle	6688	$< 2.2e^{-16}$	Modèle	1091	$< 2.2e^{-16}$	Modèle		
5	Variables	F	P-value	Variables	F	P-value			
	VPD	142.6	$< 2.2e^{-16}$	Ts10	0.4695	0.4933			
	Ta	49.04	$2.668e^{-12}$	U	$3.014e^{-28}$	1			
	Modèle	5538	$< 2.2e^{-16}$	Modèle					
6	Variables	F	P-value						
	Ta	0.08014	0.7771						

Conclusion et perspectives

Pour faciliter et/ou pouvoir faire la modélisation du flux de chaleur latente sur un site de culture au Nord du Bénin, nous avons déterminé dans cette étude, saison par saison, les processus majeurs qui contrôlent la variabilité de ce flux et par la suite, grâce à la régression pas par pas, identifié les variables météorologiques les plus pertinentes qui l'influencent.

Les résultats principaux montrent quelques uniformités de même que des divergences par saison. De manière générale, les variables pertinentes retenues quelque soit la saison sont le rayonnement net (R_n) qui est la principale variable météorologique contrôlant la variabilité du flux de chaleur latente, le déficit de pression de vapeur d'eau (VPD), la température de l'air (T_a), la vitesse du vent (U) et l'humidité du sol (W_s). En saison sèche toutes ces variables sont pertinentes sauf T_a mais en saison humide c'est le VPD qui n'est pas pertinente. La température du sol à 10 cm de la surface (T_{s10}) s'est révélée pas trop pertinente à l'échelle de l'étude.

Les processus sous-jacents qui peuvent être retenus pendant la saison sèche et humide est la demande en eau qui est souvent formée de T_a et VPD. Le deuxième processus est l'énergie formé par le R_n et autres variables comme T_{s10} . Le troisième processus est l'humidité du sol en saison sèche et la vitesse du vent en saison humide. Les phases d'assèchement ont le premier processus constitué du R_n, VPD, T_a, U ; le deuxième est T_{s10} et le troisième est W_s . Les phases d'humidification ont donné des résultats différents pour chaque année indiquant ainsi qu'il n'y a pas véritablement de processus ou variables particulières facilement identifiables. Les années 2010 en saison sèche, saison humide et 2008 en phase d'assèchement différent quant à elles des autres années par le nombre de processus et les variables qui les composent. Enfin, il est à noter quelques limites de cette étude relatives à la non prise en compte de la précipitation, de l'humidité du sol des années de 2011 à 2013 et des caractéristiques du couvert végétal.

A la suite de cette étude, les perspectives en vue sont : i) la réalisation de cette étude à l'échelle de la journée et de l'année en considérant les caractéristiques du couvert végétal, de même que la précipitation, afin de consolider les résultats obtenus en utilisant le modèle d'équation structurelle (SEM) et des approches plus physiques (comme les Wavelets) et enfin ii) réaliser une étude de la variabilité du flux de chaleur latente dans le but de proposer au final un modèle spécifique pour le site étudié.

Bibliographie

- Arnaud Guyader, *Cours : Régression linéaire*, 2012/2013
- Aymeric Spiga, *Introduction aux sciences de l'atmosphère; Cours niveau licence. Année universitaire 2013-2014.*
- Blanchard M., Peugeot C. et Seghieri, J.. *Structure et dynamique saisonnière de la végétation sur quatre faciées du bassin versant de la Donga. Rapp. tech., pp 58 , 2007.*
- Barr, A. G., and A. K. Betts, *Radiosonde boundary layer budgets above a boreal forest. J. Geophys. Res., 102 (D24), 29 205-29 212, 1997.*
- Bourbonnais Régis, « *Econométrie ? Manuel et exercices corrigés* », Dunod, 1998.
- Boussinesq J., *Essai sur la théorie des eaux courantes. Mem Savants Etrange. 23 :46 pp, 1877.*
- Businger J.A., *Equations and concepts. In : Nieuwstadt FTM and Van Dop H (eds.), Atmospheric turbulence and air pollution modelling : A course held in The Hague, 21 ?25 September 1981. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 1 ?36, 1982.*
- Cattell R.B., - *The scree test for the number of factors. Mult. Behavioral Research, 1966.*
- Christophe Chesneau, *Sur l'Estimateur des Moindres Carrés Ordinaires (emco)*, 2017.
- Chen, Y., Xue, Y., Hu, Y., *How multiple factors control evapotranspiration in North America evergreen needleleaf forests. Sci. Total Environ. 622 ?623, 1217 ?1224,, 2018.*
- De Condappa, D., Galle, S., Dewandel, B., and Haverkamp, R. : *Bimodal zone of the soil textural triangle : Common in tropical and subtropical regions, Soil Sci. Soc. Am. J., 72, 33 ?40, 2008.*
- Dodge Y., V.Rousson, « *Analyse de régression appliquée* », Dunod, 2004.
- Escofier B. et Pagès J. . *Analyses factorielles simples et multiples : Objectifs, méthodes et interprétation, 4e édition, 2008.*
- Falge, E., and Coauthors : *Gap filling strategies for long term energy flux data sets. Agric. For. Meteor., 107, 71-77, 2001.*
- Faure P., Volkoff B., *Some factors affecting regional differentiation of the soils in the Republic of Benin (West Africa). en. Catena. P. 281-306, 1998.*
- Fisher, J.B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M.F., Cook, S., Baldocchi, D., Townsend, P.A., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D.D., Perret, J., Lagouarde, J.-P., Waliser, D., Purdy, A.J., French, A., Schimel, D., Famiglietti, J.S., Stephens, G., Wood, E.F.. *The future of evapotranspiration, global requirements for ecosystem functioning, carbon*

- and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resour. Res.* 53 (4), 2618-2626, 2017.
- Gnonlonfon David Florentin, *Etude multi-échelles du pouvoir réfléchissant (albédo) d'une surface cultivée*, 2020.
- Fourier, Joseph. *Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*, *Annales de Chimie et de Physique*, vol. 27, p. 136-167 (1824). Guichard, F., L. Kergoat, E. Mougín, F. Timouk, F. Baup, P. Hiernaux, et F. Lavenu. « Surface thermodynamics and radiative budget in the Sahelian Gourma : Seasonal and diurnal cycles ». *Journal of Hydrology* 375, no 1-2 (2009) : 161-177. Galle, S., M. Grippa, C. Peugeot, I. Bouzou Moussa, B. Cappelaere, J. Demarty, E. Mougín, et al. « AMMA-CATCH, a Critical Zone Observatory in West Africa Monitoring a Region in Transition ». *Vadose Zone Journal* 17, no 1 (2018) : 180062. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.03.0062>.
- Huizhi Liu and Jianwu Feng, *Seasonal and Interannual Variations of Evapotranspiration and Energy Exchange over Different Land Surfaces in a Semiarid Area of China*, 2012.
- Hui, D., S. Wan, B. Su, G. Katul, R. Monson, and Y. Luo, *Gapfilling missing data in eddy covariance measurements using multiple imputation (MI) for annual estimation*. *Agric. For. Meteorol.*, 121, 93-111, 2004.
- Jolliffe I.T., *Principal Component Analysis, Second Edition*, 2002.
- J.-P. Lhomme . *A theoretical basis for the pfuestley-taylor coefficient*, 1996.
- Kaimal, J.C., Finnigan J.J., *Atmospheric boundary layer Flows their structure and measurement*, 1994.
- Kaiser H. F., *A note on Guttman's lower bound for the number of common factors*. *Brit. J. Statist. Psychol.*, 14, p 1-2, 1961.
- Kassembara Alboukadel, *Practical Guide To Principal Component Methods in R* , STHDA, 2017.
- Lebart Ludovic, Alain Morineau et Marie Piron, *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, 1995.
- Marc Aubinet , Timo Vesala et Dario Papale, *Eddy Covariance : A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*, 2012.
- Mercier Virginie, *séquestration de carbone par une forêt claire au Bénin : variabilité interannuelle des flux et d'un indice de végétation* , 2017.
- Mamadou, Ossénatou. *Etude des Flux d'Evapotranspiration en Climat Soudanien : comportement comparé de deux couverts végétaux au Bénin.*, 2014.
- Mamadou, Ossénatou, Sylvie Galle, Jean-Martial Cohard, Christophe Peugeot, Basile Kounouhewa, Romain Biron, Basile Hector, et Arnaud Bruno Zannou. « Dynamics of Water Vapor and Energy Exchanges above Two Contrasting Sudanian Climate Ecosystems in Northern Benin (West Africa) : Water Vapor and Energy Exchanges ». *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JD024749>.
- Mamadou, O., J. M. Cohard, S. Galle, C. N. Awanou, A. Diedhiou, B. Kounouhewa, et C. Peugeot. « Energy fluxes and surface characteristics over a cultivated area in Benin : daily and seasonal dynamics ». *Hydrology and Earth System Sciences* 18, no 3 (7 mars 2014) :

- 893-2014. <https://doi.org/10.5194/hess-18-893-2014>.
- Nguyen-Minh T., *Evapotranspiration et déficit en eau dans le sol*, 1966
- Penman, H. L., *Evaporation : An Introductory Survey*, *Netherlands J. Agric. Sci.* 1, 9-29, 1956.
- Pierre-André Cornillon, Eric Matzner-Løber, *Régression avec R*, 2011
- Priestley C.H.B., Taylor R.J., *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters*. *Monthly Weather Review*, 100 : 81-92, 1972.
- R. Indhumathi et S. Sathiyabama, *Reducing and Clustering high Dimensional Data through Principal Component Analysis*, *International Journal of Computer Applications (0975 - 8887)*, 2010.
- P. von Balmoos, *Le Climat à Découvert*, CNRS éditions, 2011
- Roland B. Stull, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, 1999.
- S. Pal Arya, *Introduction to micrometeorology*, second edition 2001.
- Stull RB (1988) *An Introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic, Dordrecht/Boston/London, 666 pp
- Suyker Andrew E., Shashi B. Verma, *Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem*, 2008.
- Tenenhaus M., « *Statistique : Méthodes pour décrire, expliquer et prévoir* », Dunod, 2007.
- Taylor, Christopher M., Amanda Gounou, Françoise Guichard, Phil P. Harris, Richard J. Ellis, Fleur Couvreux, et Martin De Kauwe. « *Frequency of Sahelian storm initiation enhanced over mesoscale soil-moisture patterns* ». *Nature Geoscience*, juin 2011. <https://doi.org/10.1038/ngeo1173>.
- Thornthwaite, C.W., *An approach towards a rational classification of climate*. *Geographical Review*, 38 : 55-94, 1948.
- Trenberth, K. E., John T. Fasullo, and Jeffrey Kiehl; *EARTH'S GLOBAL ENERGY BUDGET*, (2009) Wilson, K.B., Baldocchi, D.D., *Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America*. *Agric. For. Meteorol.* 100 (1), 1-18, 2000.
- Zhou, L., Zhou, G.S., *Measurement and modelling of evapotranspiration over a reed (Phragmites australis) marsh in Northeast China*. *J. Hydrol.* 372 (1-4), 41-47, 2009.
- Zhou, L., Yu Wang, Qingyu Jia, Rongping Li, Mengzi Zhou, Guangsheng Zhou, *Evapotranspiration over a rainfed maize field in northeast China : How are relationships between the environment and terrestrial evapotranspiration mediated by leaf area*, 2019.

ANNEXE

Annexe A : Appareils de mesure

TABLE 4.9 – Les différents appareils sur la station de Nalohou . (Mamadou, 2014)

Variables (Unités)	Marque et Modèle du Capteur	Hauteur de mesure	Précision	Intervalle de stockage
Mesures atmosphériques				
Température de l'air [$^{\circ}C$]	Vaisala WXT510	2 m	$\pm 3^{\circ}$	15 min
Humidité relative de l'air [%]	Vaisala WXT510	2 m	$\pm 3\%$ [0 – 90%]; $\pm 5\%$ [90 – 100%]	15 min
Pression atmosphérique de l'air [hPa]	Vaisala WXT510	2 m	$\pm 0.5hPa$ [0– $30^{\circ}C$]	15 min
Vitesse du vent [$m.s^{-1}$]	Vaisala WXT510	2 m	$\pm 0.3m.s^{-1}$	15 min
Direction du vent [$^{\circ}$]	Vaisala WXT510	2 m	$\pm 3^{\circ}$	15 min
Rayonnement incident de courte longueur d'onde [$W.m^{-2}$]	Kipp et Zonen CNR1	2 m	$\pm 10\%$ pour les moyj.	15 min
	$0.305 < \lambda < 2.8\mu m$			
Rayonnement réfléchi de courte longueur d'onde [$W.m^{-2}$]	Kipp et Zonen CNR1	2 m	$\pm 10\%$ pour les moyj.	15 min
	$0.305 < \lambda < 2.8\mu m$			
Rayonnement incident de grande longueur d'onde [$W.m^{-2}$]	Kipp et Zonen CNR1	2 m	$\pm 10\%$ pour les moyj.	15 min
	$5 < \lambda < 50\mu m$			
Rayonnement réfléchi de grande longueur d'onde [$W.m^{-2}$]	Kipp et Zonen CNR1	2 m	$\pm 10\%$ pour les moyj.	15 min
	$5 < \lambda < 50\mu m$			
Mesures des flux				
Vitesse du vent dans la direction verticale [$m.s^{-1}$]	Campbell Sci. CSAT 3	4.5 m	$< \pm 2cm.s^{-1}$	1/20 sec
[H_2O] – [$g.m^{-3}$]	Licor LI-7500	4.5 m	0.0047	1/20 sec

Annexe B :Tableaux et figures des résultats en ACP

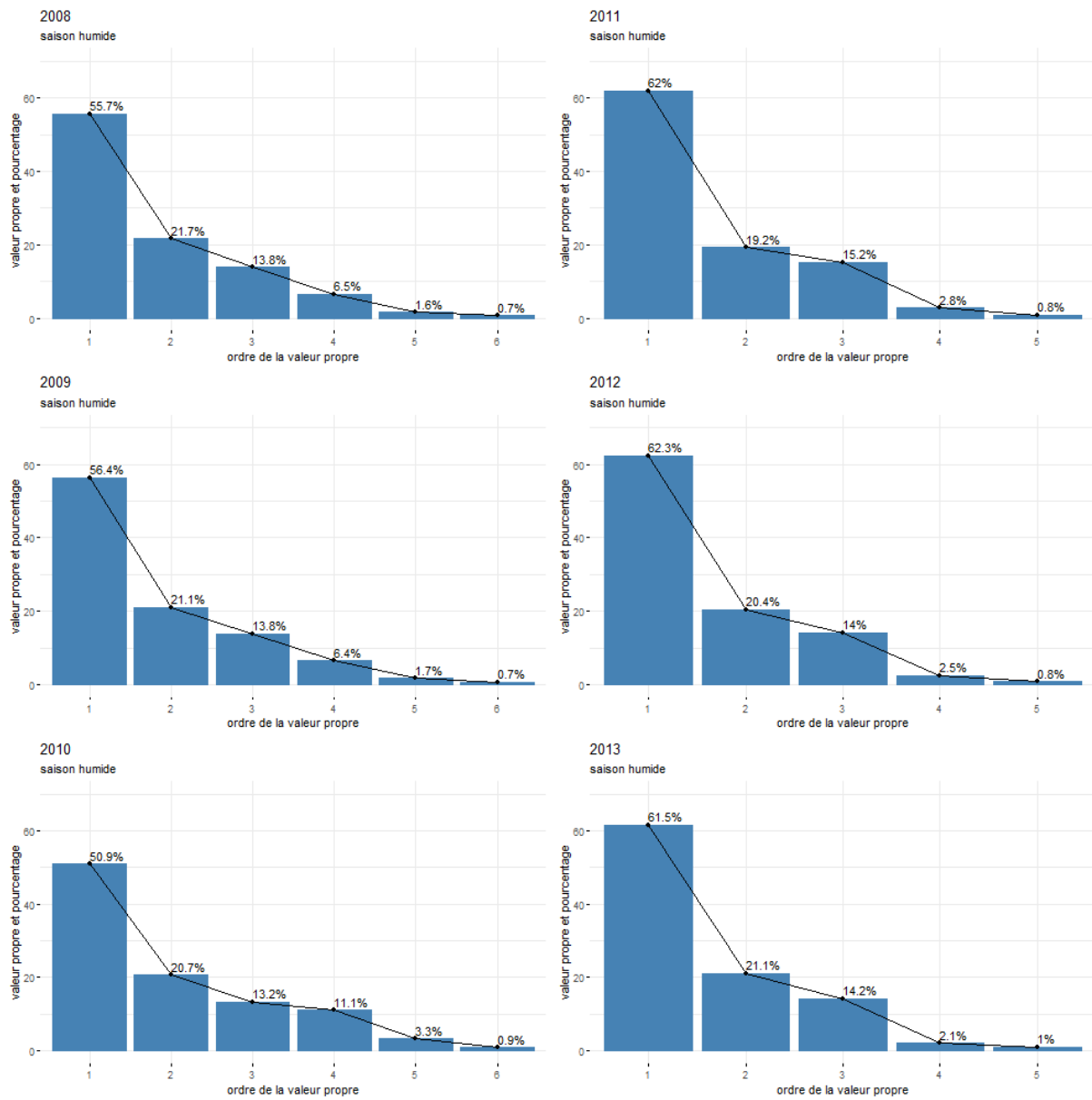


FIGURE 4.1 – Histogramme des valeurs propres des saisons humide de 2008 à 2013

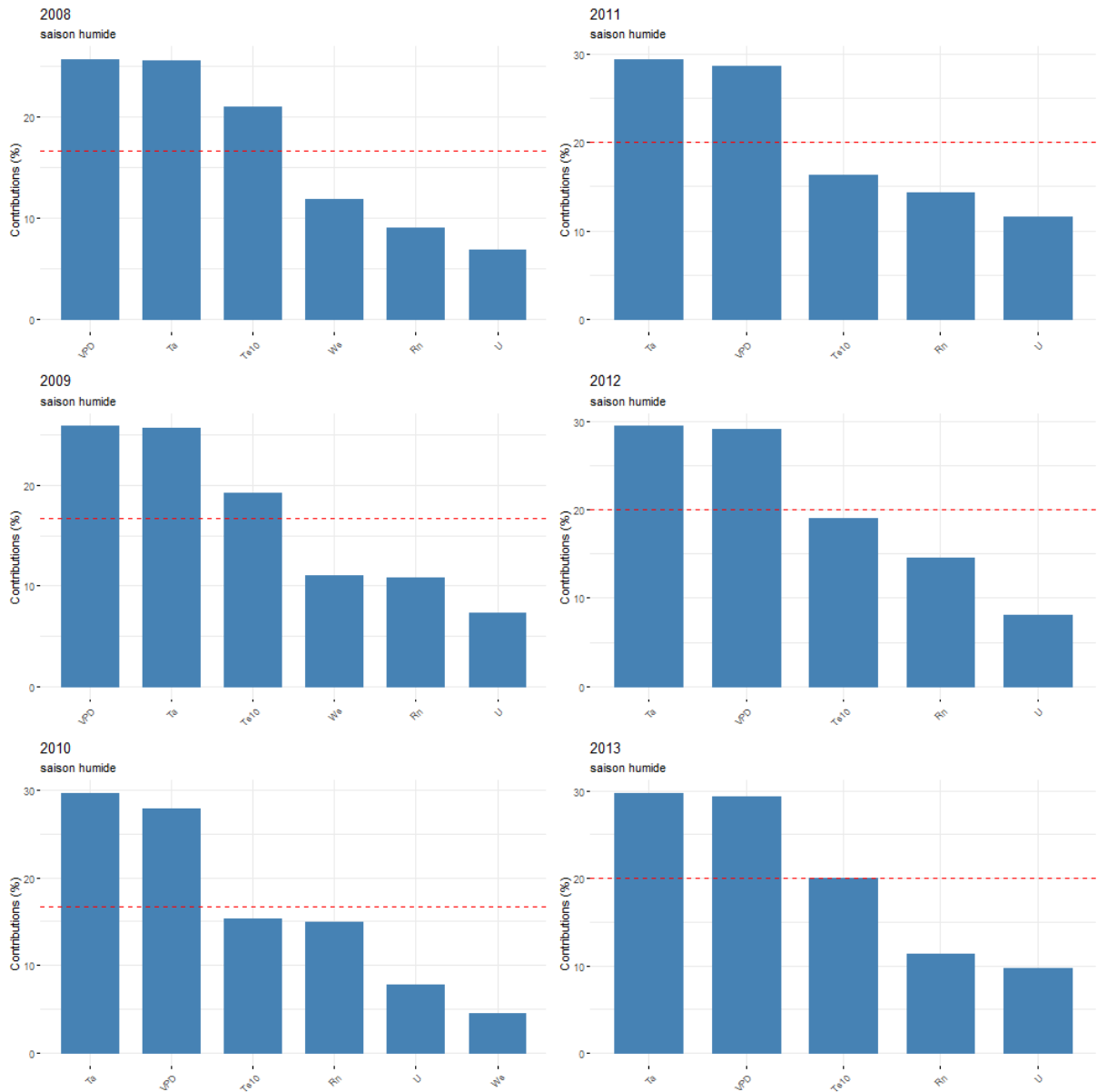


FIGURE 4.2 – Graphe des contributions des variables au premier axe principal pour les saisons humide de 2008 à 2013

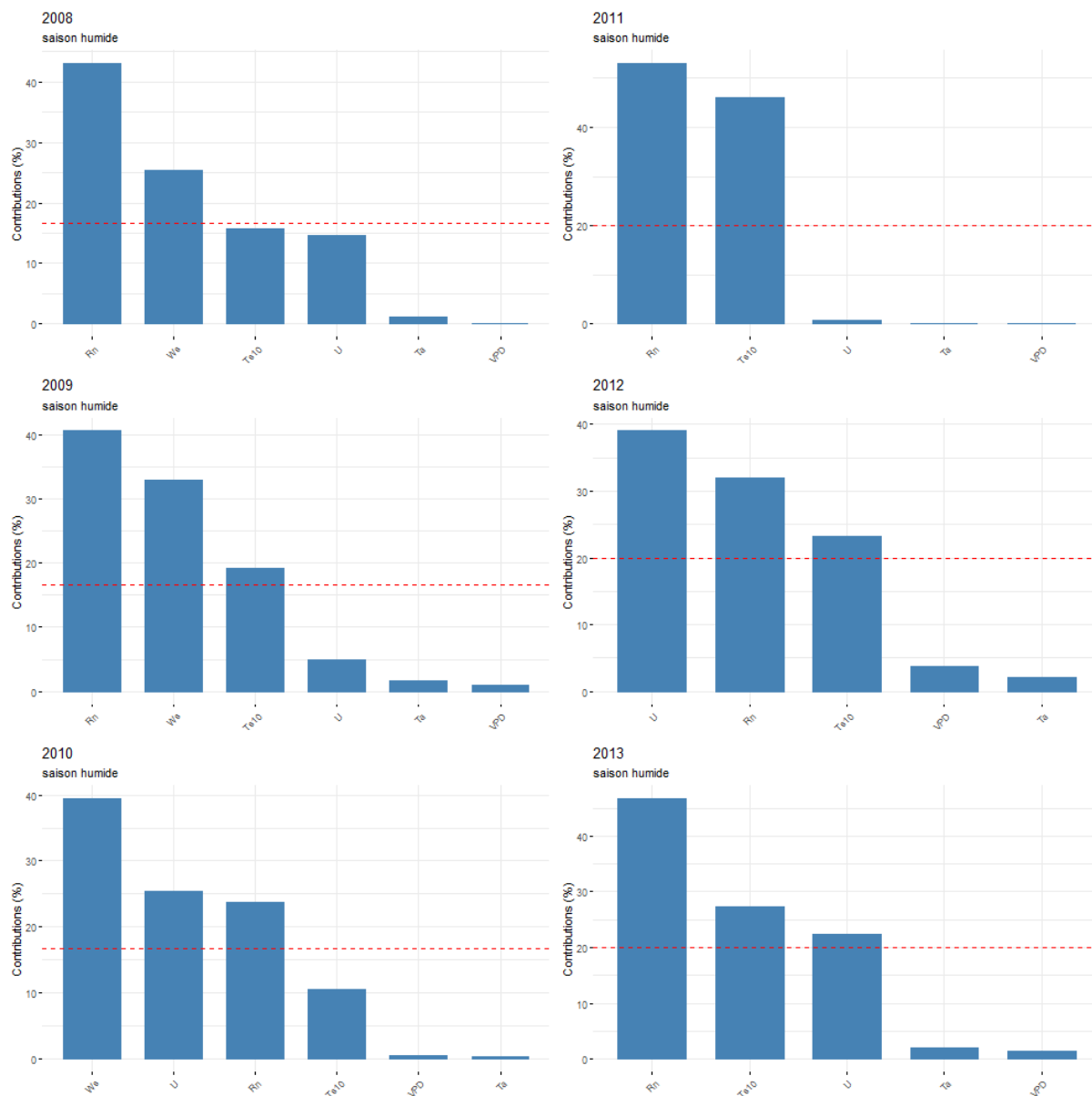


FIGURE 4.3 – Graphe des contributions des variables au deuxième axe principal pour les saisons humide de 2008 à 2013

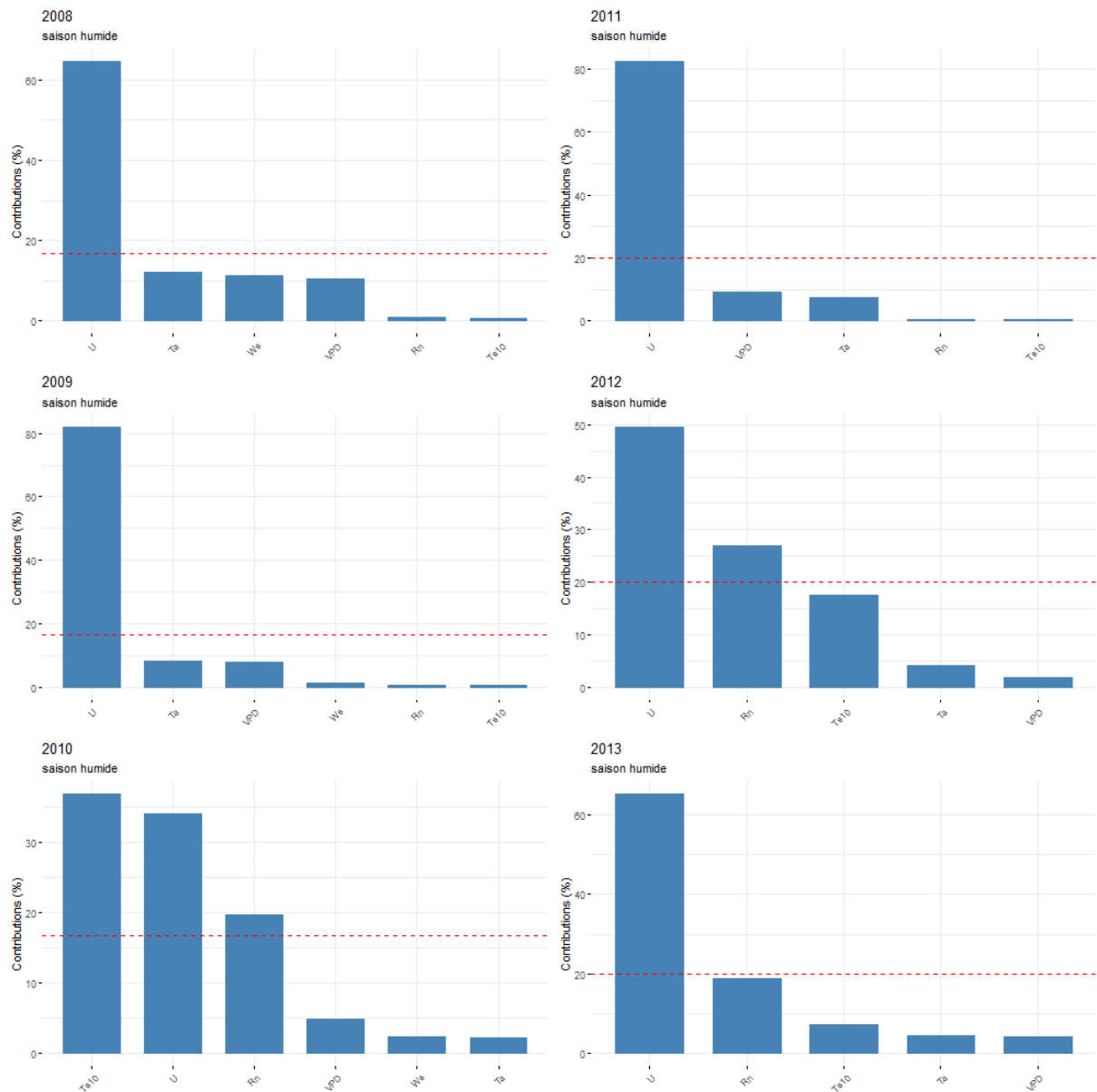


FIGURE 4.4 – Graphe des contributions des variables au troisième axe principal pour les saisons humide de 2008 à 2013

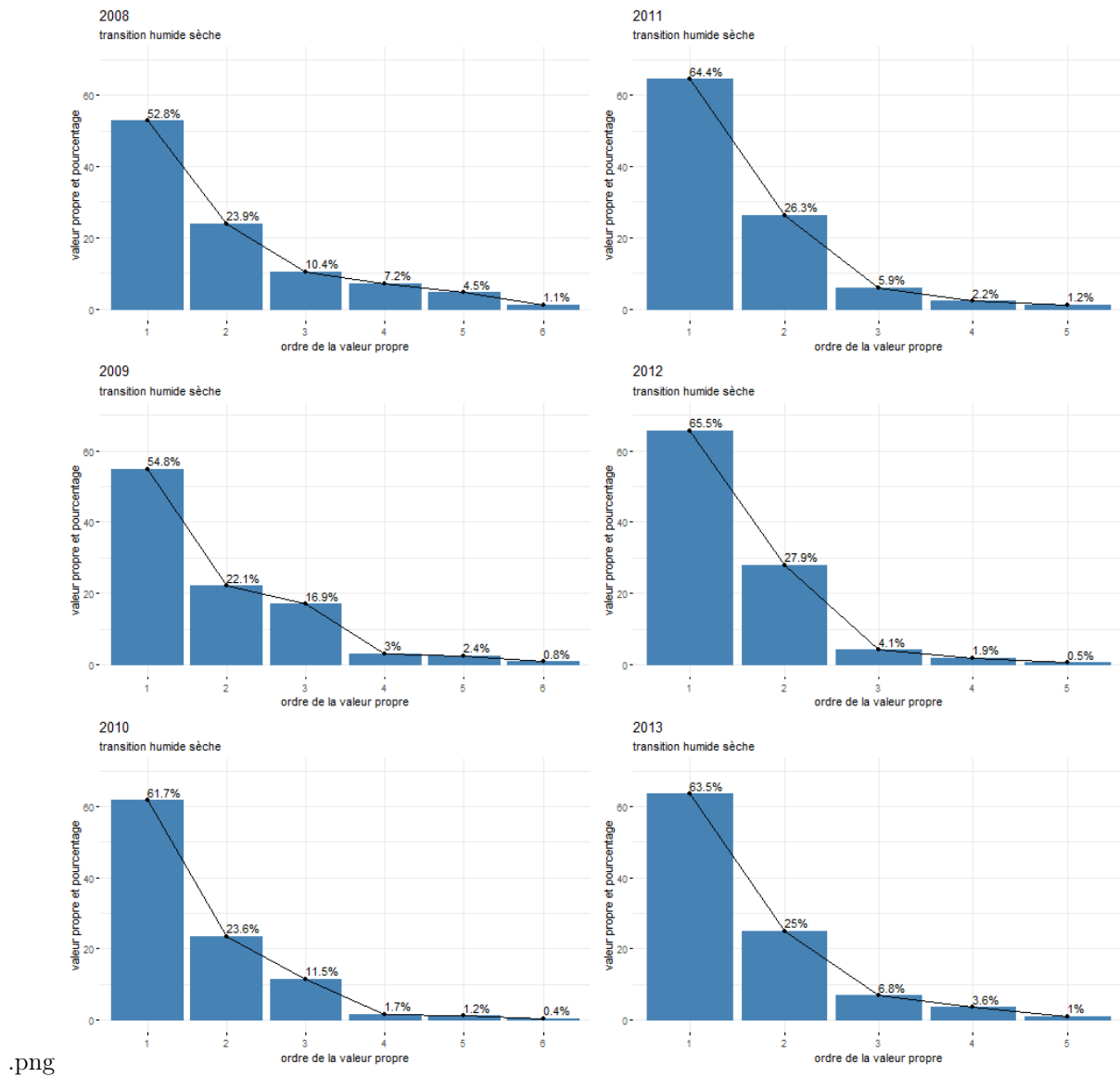


FIGURE 4.5 – Histogramme des valeurs propres des phase d’assèchement de 2008 à 2013 :règle de "coude"

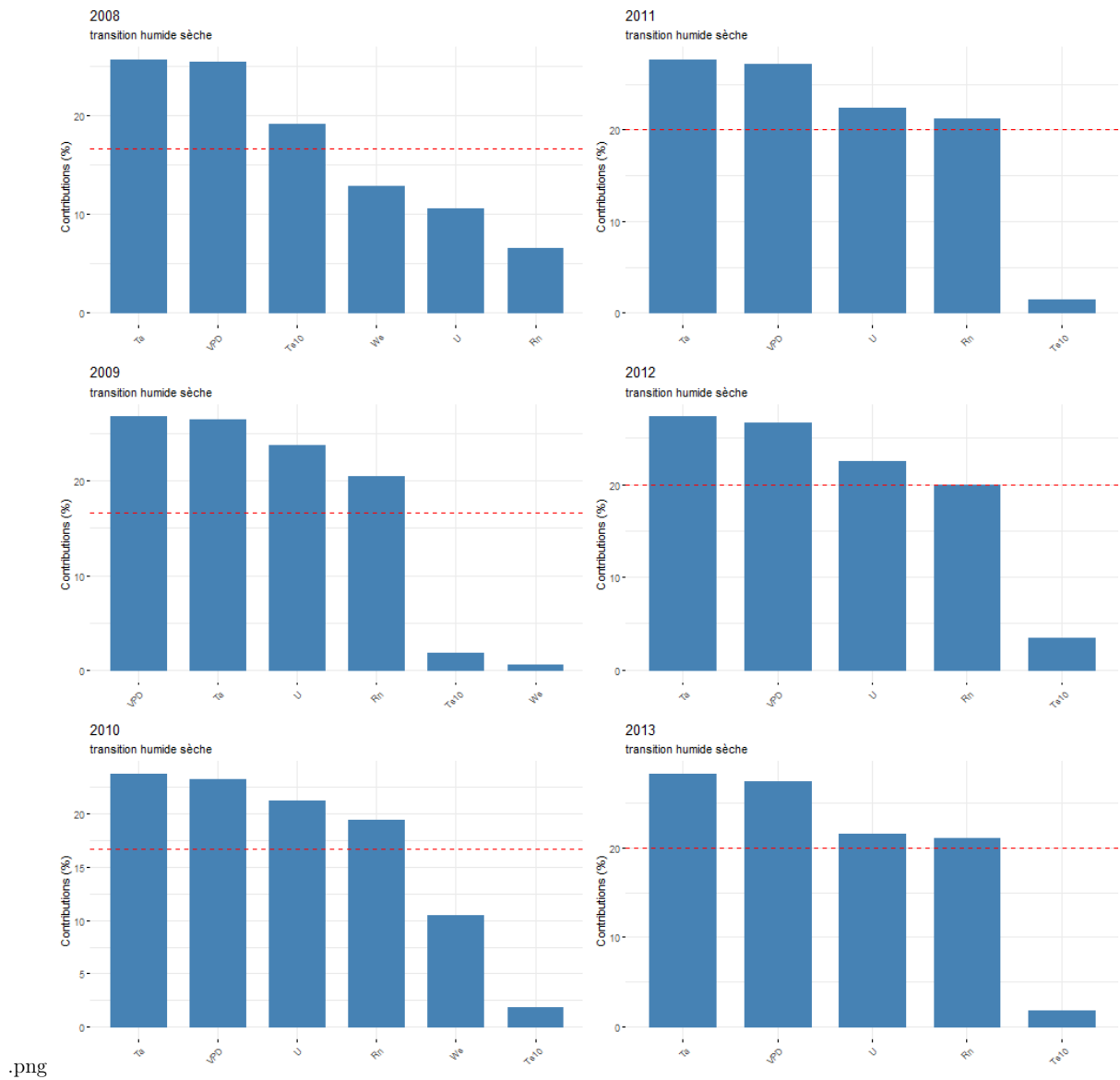


FIGURE 4.6 – Graphe des contributions des variables au premier axe principal pour les phases d’assèchement de 2008 à 2013

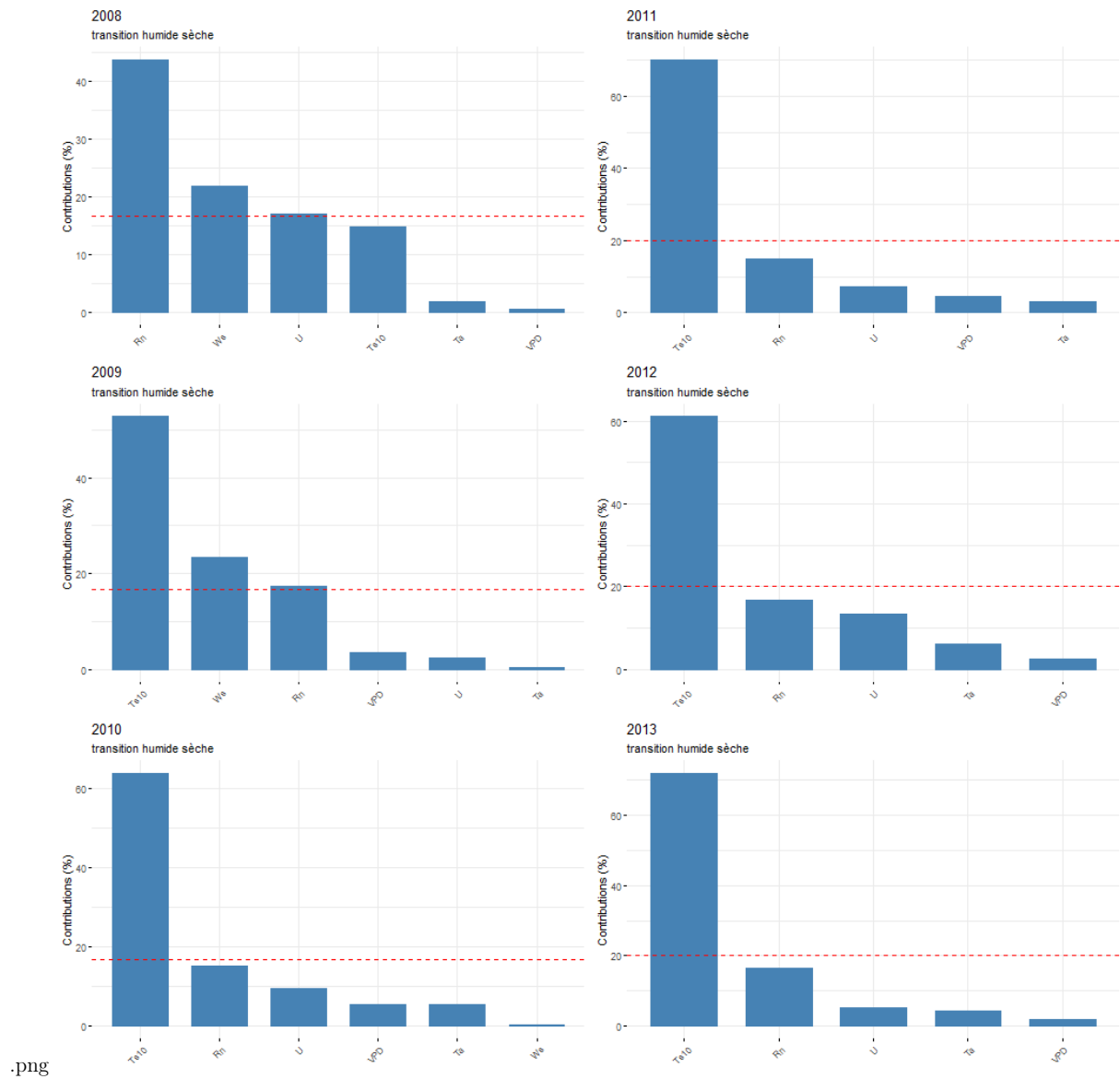


FIGURE 4.7 – Graphe des contributions des variables au deuxième axe principal pour les phases d'assèchement de 2008 à 2013

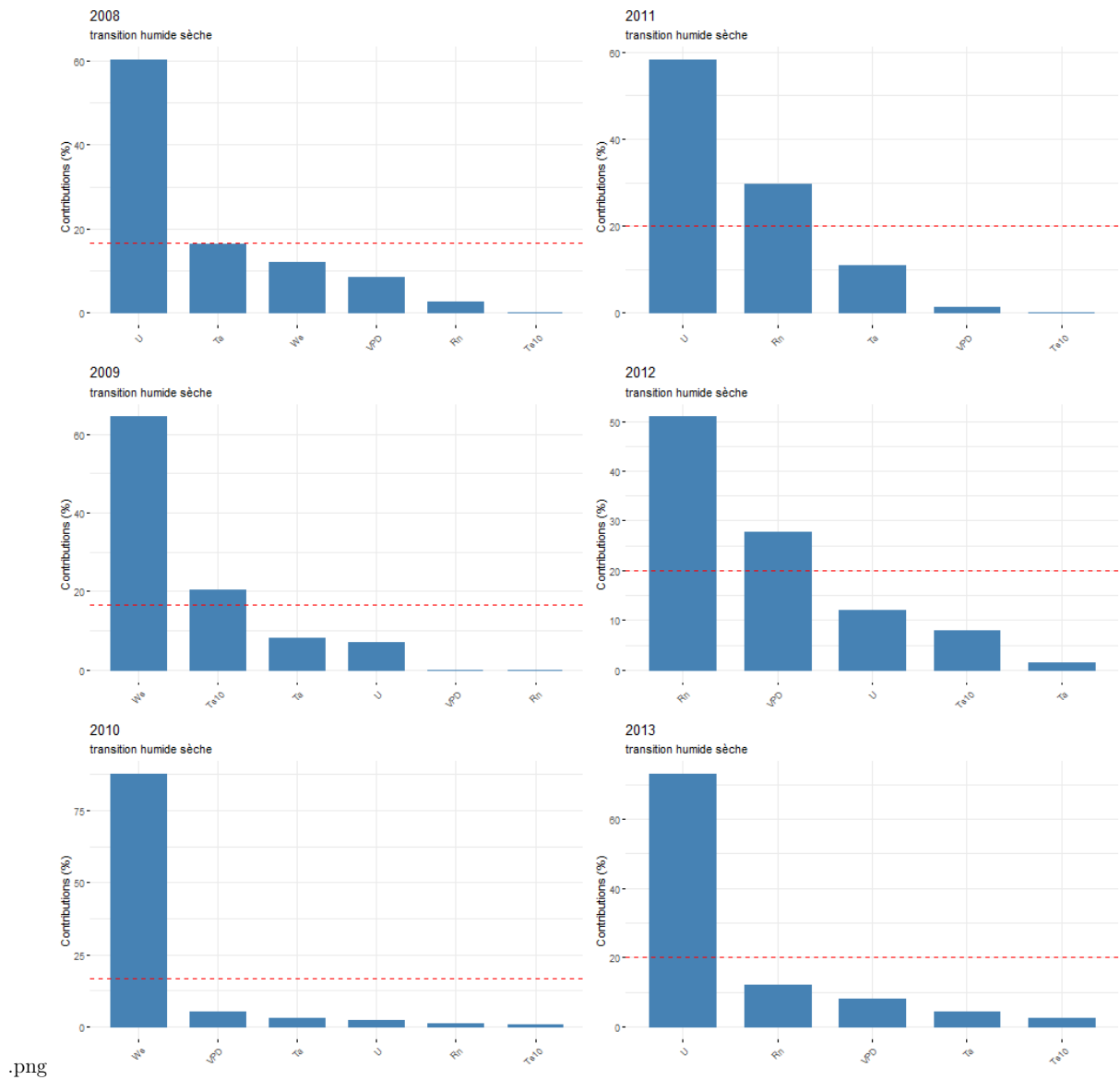


FIGURE 4.8 – Graphe contribution des variables au troisième axe principal pour les phases d'assèchement de 2008 à 2013

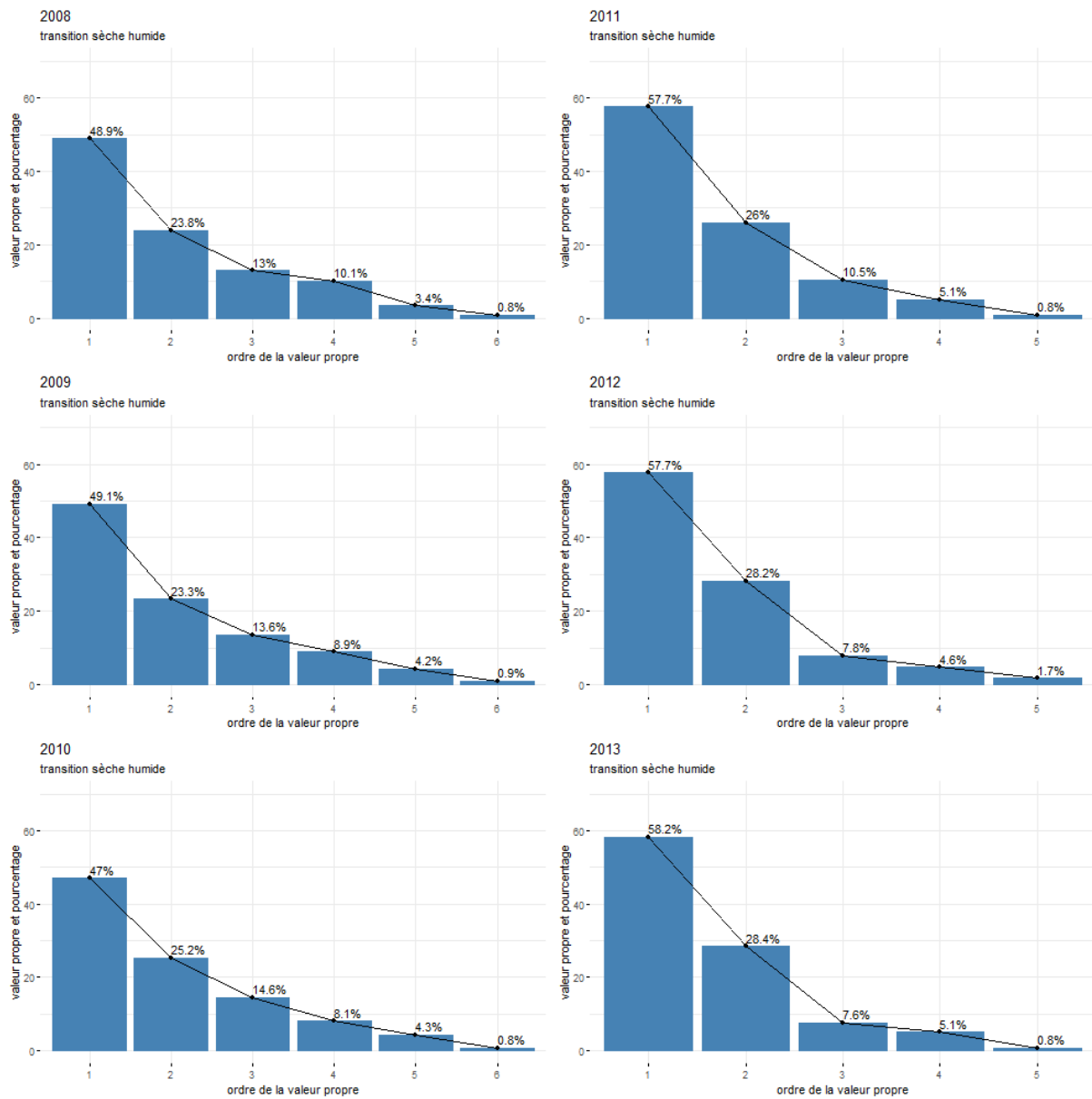


FIGURE 4.9 – Histogramme des valeurs propres des phases d'humidification de 2008 à 2013 :règle de "coude"

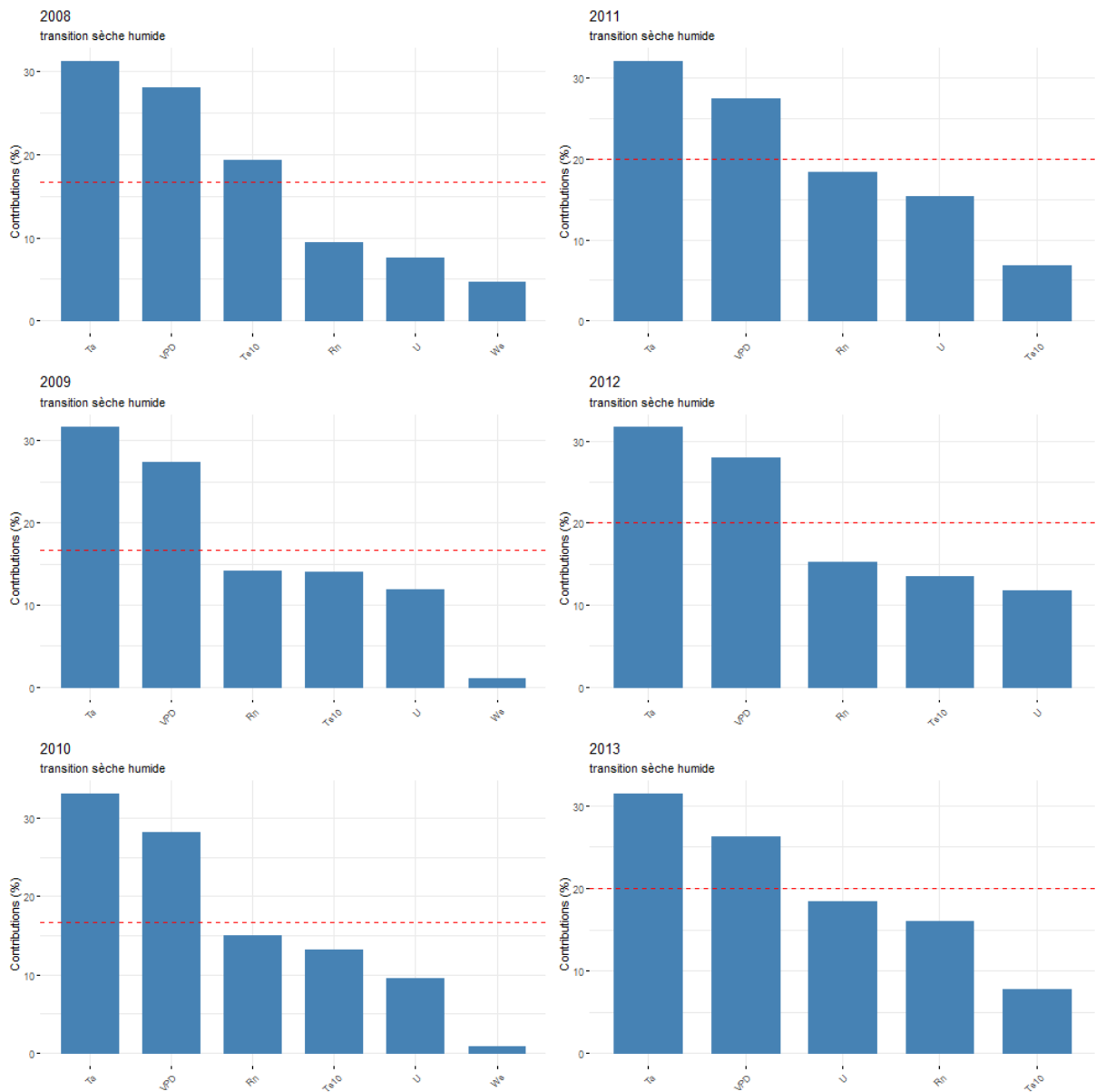


FIGURE 4.10 – Graphe des contributions des variables au premier axe principal pour les phases d'humidification de 2008 à 2013

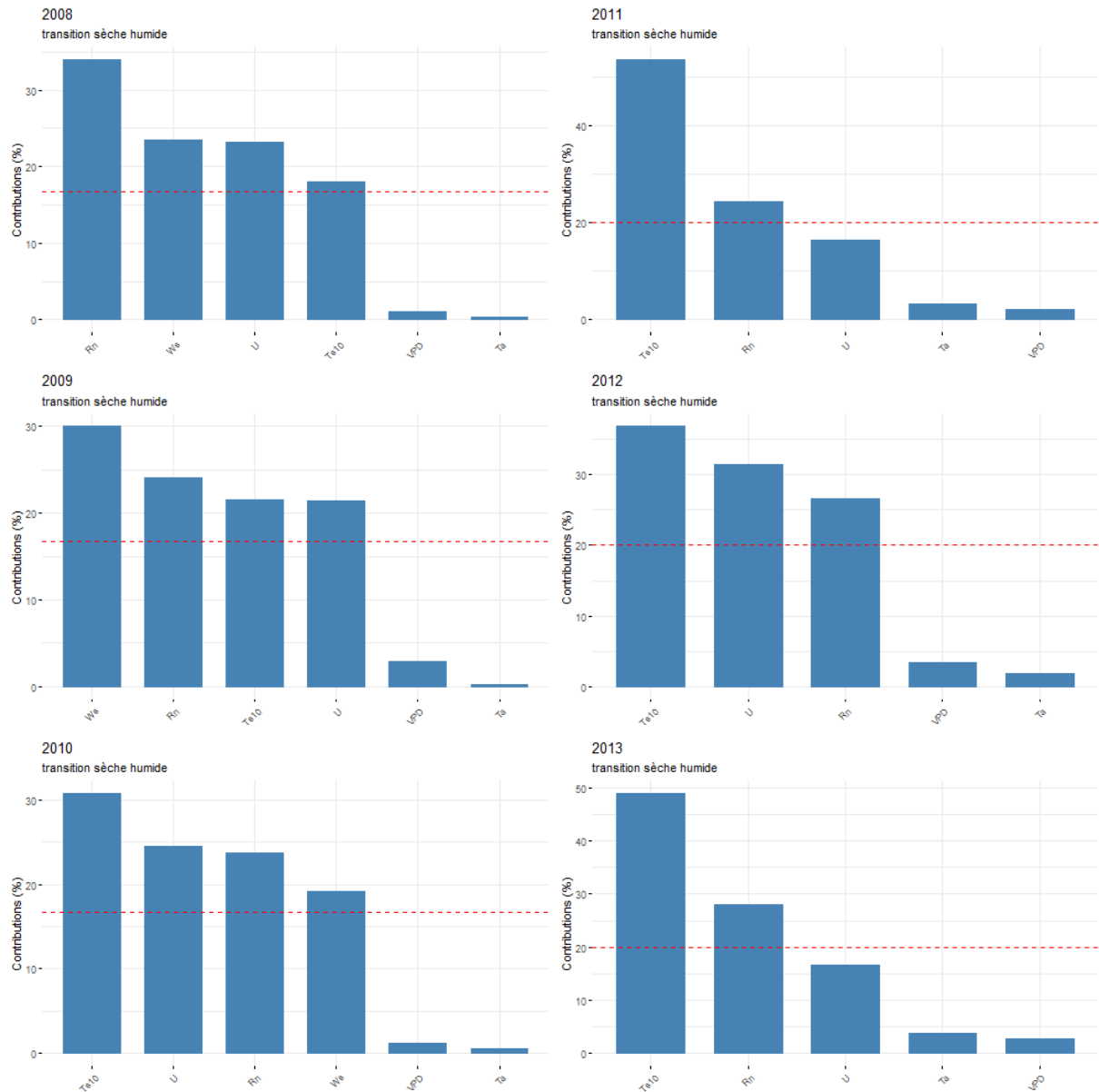


FIGURE 4.11 – Graphe des contributions des variables au deuxième axe principal pour les phases d’humidification de 2008 à 2013

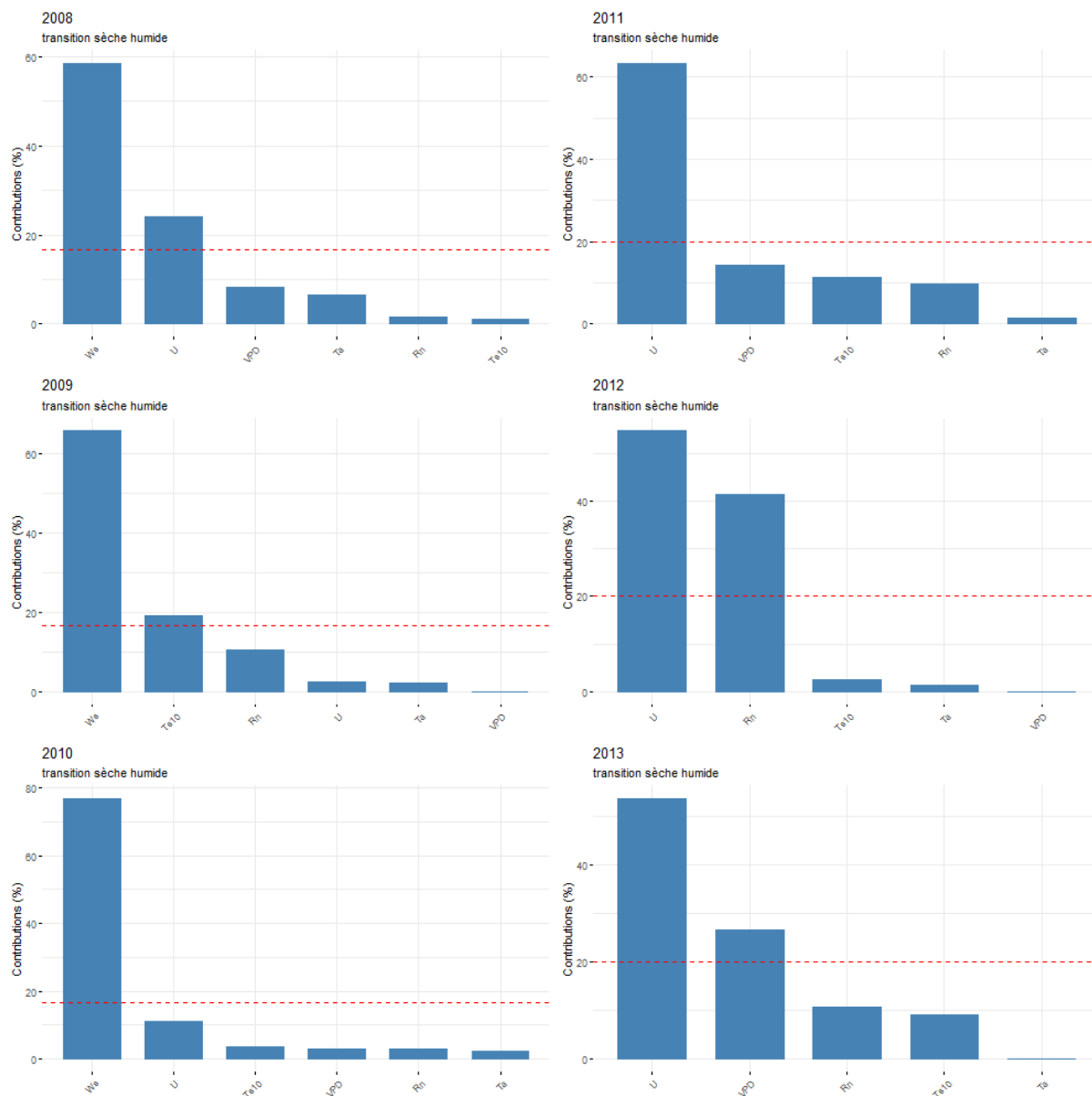


FIGURE 4.12 – Graphe des contributions des variables au troisième axe principal pour les phases d’humidification de 2008 à 2013