



COMITE PERMANENT INTER-ETATS DE LUTTE CONTRE LA SECHERESSE DANS LE SAHEL  
PERMANENT INTERSTATE COMMITTEE FOR DROUGHT CONTROL IN THE SAHEL  
COMITÉ PERMANENTE INTER-ESTADOS DE LUTA CONTRA A SECA NO SAHEL  
اللجنة الدائمة المشتركة لمحاربة التصحر في الساحل



**Centre Régional AGRHYMET**

## **DEPARTEMENT FORMATION ET RECHERCHE**

### **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION EN AGROMETEOROLOGIE**

**Présenté par : M. OUEDRAOGO Ousmane Aly Yabyouré**

**Promotion 2021 – 2024**

### **Approche de Zonage agroécologique comme outil d'aide à la décision pour la mise à l'échelle des pratiques agricoles dans le contexte du changement climatique**

**Période : du 15 août 2023 au 31 janvier 2024**

***Soutenu le 12 février 2024 devant le jury composé de :***

**Président :** Dr Hamidou DIAWARA, *Responsable de la filière de formation en Hydrologie, Centre Régional AGRHYMET, Niamey (Niger)*

**Membre 1 :** Mr Amidou ZERBO, *Instructeur à l'Ecole Africaine de la Météorologie et de l'Aviation Civile (EAMAC), Niamey (Niger)*

**Membre 2 :** Dr Amadou COULINALY, *Expert au Centre Régional AGRHYMET, Niamey (Niger)*

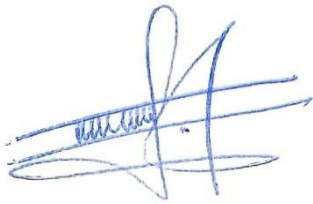
**Directeur de mémoire :** Dr Moussa WAONGO, *Responsable de la filière de formation en Agrométéorologie, Centre Régional AGRHYMET, Niamey (Niger)*

Centre Régional Agrhymet : BP 11011 Niamey, Niger – Tél : (+227) 20 31 53 16/20 31 54 36 – Fax : 20 31 59 79 – Courriel : [administration.agrhymet@cilss.int](mailto:administration.agrhymet@cilss.int) – <https://agrhyment.cilss.int>

## **CERTIFICATION**

Je, soussigné OUEDRAOGO Ousmane Aly Yabyouré, N° matricule IA/21/14, atteste que le présent document est mon propre travail pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Agrométéorologie, et qu'il ne contient aucun matériel ou travail d'une personne déjà soumis ou publié ailleurs, en dehors des travaux cités en bibliographie. Le contenu de ce mémoire n'engage en aucune manière le Centre Régional AGRHYMET et le CILSS.

**OUEDRAOGO Ousmane Aly Yabyouré**



Signature

## **DEDICACE**

Je dédie ce modeste travail à mon défunt père, Mamadou Ouédraogo.

## REMERCIEMENTS

Au terme de notre stage de fin de cycle nous voudrions adresser nos remerciements à tous ceux qui ont concouru à sa réussite. Nos remerciements vont à l'endroit de l'Administration Générale du Centre Régional AGRHYMET (CRA) pour les efforts consentis durant ces trois années académiques de formation (2021 - 2024). De façon précise, nous remercions :

- **Monsieur le Directeur Général du Centre Régional AGRHYMET, Dr Mahalmoudou Hamadoun MAIGA**, pour avoir permis cette formation et facilité notre séjour ;
- **Monsieur le Chef du Département Formation et Recherche, Pr Atta SANOUSSEI**, pour son appui inconditionnel au bon déroulement du programme de formation ;
- **Le Corps professoral interne et externe au CRA** pour avoir bien voulu partager leur connaissance et nous orienter dans nos objectifs de formation.

Nos remerciements particuliers vont à l'endroit de **Dr Moussa WAONGO**, en sa qualité d'encadreur pour ce mémoire. Par la pertinence de ses réflexions et suggestions, ses qualités humaines, son professionnalisme ainsi que son pragmatisme, il a activement contribué à l'enrichissement scientifique de ce document. Je lui témoigne ma reconnaissance pour ses appuis techniques, ses conseils et encouragements tout au long de notre formation en Agrométéorologie.

Nous faisons une mention spéciale aux camarades étudiants du CRA, et spécifiquement à ceux de la dixième promotion des Ingénieurs en Agrométéorologie, pour ces trois années de franche collaboration et apprentissage passés ensemble. Plus que des camarades, nous étions une famille.

Je remercie sincèrement au passage **Dimitri KONSIEMBO** pour les bons moments passés hors cadre académique.

Nous ne terminerons ces mots de remerciement sans avoir une pensée spéciale pour nos parents, qui ont toujours été à nos côtés pour nous soutenir et guider.

## Tables des matières

<b>Certification .....</b>	<b>i</b>
<b>Dédicace .....</b>	<b>ii</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>vii</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>viii</b>
<b>Sigles et abréviations .....</b>	<b>x</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>xii</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Synthèse bibliographique.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Le zonage agroécologique.....</b>	<b>4</b>
1.1 Notion de zonage .....	4
1.2 Zonage agroécologique.....	4
1.3 Les approches du zonage .....	4
1.3.1 Approche basée sur les isohyètes .....	5
1.3.2 Approche matricielle .....	6
1.3.3 Approche de clustering.....	6
<b>2 Adaptation aux changements climatiques .....</b>	<b>7</b>
2.1 Changements climatiques et adaptations .....	7
2.2 Stratégies liées à la CES/DRS .....	8
2.2.1 Les cordons pierreux .....	8
2.2.2 Le zaï .....	9
2.2.3 Les demi-lunes.....	10
2.3 Stratégies liées aux opérations culturales et choix des cultivars .....	12
2.3.1 Modification des dates et mode de semis .....	12
2.3.2 Choix des cultivars et association culturale.....	13
<b>3 Mise à l'échelle des stratégies d'adaptation .....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre II : Présentation de la zone d'étude.....</b>	<b>16</b>
<b>1 Localisation géographique et organisation administrative .....</b>	<b>16</b>
<b>2 Milieu physique .....</b>	<b>17</b>
2.1 Relief et sols .....	17
2.2 Hydrographie .....	17
2.3 Végétation.....	17
<b>3 Climat .....</b>	<b>18</b>

3.1	Aperçu général.....	18
3.2	Pluviométrie .....	18
3.3	Températures .....	19
<b>4</b>	<b>Situation socioéconomique .....</b>	<b>20</b>
	<b>Chapitre III : Matériel et méthodes .....</b>	<b>21</b>
<b>1</b>	<b>Source des données.....</b>	<b>21</b>
1.1	Données observées .....	21
1.2	Données de réanalyses.....	21
1.3	Données de sol et topographies .....	21
1.4	Données cartographiques.....	22
<b>2</b>	<b>Outils et logiciels.....</b>	<b>22</b>
2.1	Outils .....	22
2.2	Logiciels .....	22
<b>3</b>	<b>Méthodologie .....</b>	<b>23</b>
3.1	Détermination de la zone d'influence des stations météorologiques .....	23
3.2	Détermination des caractéristiques agroclimatiques et édaphiques .....	24
3.2.1	Longueur de la saison agricole .....	24
3.2.2	Évapotranspiration potentielle (ET <sub>p</sub> ) .....	24
3.2.3	Caractéristiques hydrophysiques du sol .....	25
3.2.4	Indice d'aridité et contenu en eau disponible .....	25
3.3	Zonage agroécologique via clustering .....	26
3.3.1	Format de données et notations .....	26
3.3.2	Analyse en composantes principales (ACP).....	27
3.3.3	Analyse de clustering.....	28
	<b>Chapitre IV : Résultats .....</b>	<b>31</b>
<b>1</b>	<b>Zone d'influence des stations .....</b>	<b>31</b>
<b>2</b>	<b>Distribution des caractéristiques agroclimatiques.....</b>	<b>31</b>
2.1	Longueur de la saison agricole .....	31
2.2	Évapotranspiration potentielle.....	32
<b>3</b>	<b>Caractéristiques du sol .....</b>	<b>33</b>
3.1	Textures du sol .....	33
3.2	Contenu en eau disponible.....	35
<b>4</b>	<b>Zonage agroécologique .....</b>	<b>35</b>
4.1	Tendance au clustering .....	35
4.2	Détermination du nombre optimal de ZAE .....	37

4.3	Zones agroécologiques du Burkina Faso .....	38
<b>5</b>	<b>Caractérisation des trois zones agroécologiques .....</b>	<b>40</b>
5.1	Climatologie .....	40
5.2	Dates de début de la saison agricole .....	40
5.3	Dates de fin et longueur de la saison agricole .....	41
5.4	Texture du sol .....	43
	<b>Chapitre V : Discussion .....</b>	<b>45</b>
<b>1</b>	<b>Zone d'influence des stations météorologiques .....</b>	<b>45</b>
<b>2</b>	<b>L'approche du clustering .....</b>	<b>46</b>
<b>3</b>	<b>Zonage agroécologique du Burkina Faso.....</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>Pertinence des variables pour le zonage agroécologiques .....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>Potentialités de mise à l'échelle des stratégies d'adaptation .....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>Contraintes socio-économiques pour la mise à l'échelle des stratégies d'adaptation</b>	<b>51</b>
	<b>Conclusion .....</b>	<b>53</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>55</b>
	<b>Annexes.....</b>	<b>I</b>

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau 1 : Critères de détermination des caractéristiques agroclimatiques.....</b>	<b>24</b>
<b>Tableau 2 : Types de sol dominant pour chacune les couches supérieure (0-40 cm) et inférieure (40-100 cm) du sol dans chacune des trois zones agroécologiques. ....</b>	<b>44</b>



## **LISTE DES FIGURES**

<b>Figure 1 : Construction de cordon pierreux sur une ligne de niveau (Melchior, 2011).</b>	<b>9</b>
<b>Figure 2 : Le processus de formation d'un poquet de zaï illustré. Marie-Liesse Vermeire, adapté de Roose et Rodriguez (1990).....</b>	<b>10</b>
<b>Figure 3 : disposition en quinconce de demi-lunes sur une parcelle.....</b>	<b>11</b>
<b>Figure 4 : Localisation de la zone d'étude et des stations météorologiques. ....</b>	<b>16</b>
<b>Figure 5 : Zones climatiques du Burkina Faso et localisation de trois stations de référence. Source : ANAM-BF, 2021. ....</b>	<b>18</b>
<b>Figure 6 : Courbe ombrothermique montrant le régime pluviométrique saisonnier au niveau des stations météorologiques de références.....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 7 : Cycle annuel des températures journalières, au niveau des stations météorologiques de références.....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 8 : Illustration du tableau de données. Source : adapté de Husson et <i>al.</i>, 2017 .....</b>	<b>26</b>
<b>Figure 9 : Graphe de connectivité sur le réseau intégral (a). Arbre couvrant de poids minimal (b).....</b>	<b>29</b>
<b>Figure 10 : Illustration du concept du coefficient de Silhouette. Source : adapté de (Kaoungku et al., 2018) .....</b>	<b>30</b>
<b>Figure 11 : Diagramme de voronoï montrant la zone d'influence couverte par chaque station d'observations météorologiques. ....</b>	<b>31</b>
<b>Figure 12 : Distribution spatiale de la longueur de la saison .....</b>	<b>32</b>
<b>Figure 13 : Répartition spatiale de la demande climatique (ETo).....</b>	<b>33</b>
<b>Figure 14 : Texture du sol selon la classification USDA pour : la couche supérieure de sol, tranche 0-40 cm (a) et la couche inférieure du sol, tranche 40-100 cm (b).....</b>	<b>34</b>
<b>Figure 15 : Eau disponible pour un mètre de sol.....</b>	<b>35</b>
<b>Figure 16 : Valeurs propres et pourcentage de la variance cumulée des facteurs issues l'analyse en composante principale. ....</b>	<b>36</b>
<b>Figure 17 : Contribution en pourcentage de chaque variable à la formation de (a) la première composante principale (CP1), (b) de la seconde (CP2), (c) de la troisième (PC3) et (d) de la quatrième (CP4).....</b>	<b>37</b>
<b>Figure 18 : Variation du coefficient de Silhouette (Rousseuw, 1987) pour un zonage en k clusters. La ligne verticale tiretée indique le nombre optimal de clusters. ....</b>	<b>38</b>

<b>Figure 19 : Répartition spatiale des zones agroécologiques (a). Nombre de stations météorologiques par zones agroécologiques (b).....</b>	<b>40</b>
<b>Figure 20 : Dates moyennes de début de la saison agricole dans chaque ZAE.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure 21 : Dates moyennes de fin de la saison agricole (a). Longueur moyenne de la saison agricole (b) .....</b>	<b>43</b>

## SIGLES ET ABBREVIATIONS

<b>ACC</b>	: Adaptation aux changements climatiques
<b>ACMAD</b>	: Centre africain pour les applications de la météorologie au développement
<b>ACP</b>	: Analyse en composante principale
<b>ANAM-BF</b>	: Agence nationale de la météorologie du Burkina Faso
<b>C3S</b>	: Copernicus climate service
<b>CAH</b>	: Classification ascendante hiérarchique
<b>CCNUCC</b>	: Convention cadre des unies sur les changements climatiques
<b>CDO</b>	: Climate data operators
<b>CDS</b>	: Climate data store
<b>CEP</b>	: Champs école paysan
<b>CES/DRS</b>	: Conservation des eaux du sol/défense et restauration du sol
<b>CP</b>	: Composante principale
<b>CRA</b>	: Centre régional Aghrymet
<b>DGDT</b>	: Convention cadre des unies sur les changements climatiques
<b>DGESS</b>	: Direction générale des études statistiques sectorielles
<b>ERA5</b>	: ECMWF reanalysis 5th generation
<b>ETo</b>	: Évapotranspiration potentielle de référence
<b>FAO</b>	: Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
<b>GIEC</b>	: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
<b>GIZ</b>	: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
<b>HDX</b>	: Human data exchange / Coopération allemande
<b>HWSD</b>	: Harmonized world soil database
<b>INSD</b>	: Institut national des statistiques et de la démographie
<b>MAAH</b>	: Ministère de l'Agriculture et des Aménagements hydro-agricoles
<b>MASA</b>	: Ministère de l'Agriculture et de la Sécurité alimentaire
<b>MEEVCC</b>	: Ministère de l'Environnement de l'économie verte et du changement climatique
<b>MINEFID</b>	: Ministère de l'Économie, des Finances et du Développement
<b>OMM</b>	: Organisation météorologique mondiale
<b>PIB</b>	: Produit intérieur brut
<b>PNA</b>	: Plan national d'adaptation au changement climatique
<b>PNSAN</b>	: Politique nationale de sécurité alimentaire et nutritionnelle
<b>PRESASS</b>	: Prévision saisonnière en Afrique soudano-sahélienne
<b>QGIS</b>	: Quantum GIS
<b>SIG</b>	: Système d'information géographique
<b>SKATER</b>	: Spatial "K"luster analysis by tree edge removal
<b>TCN</b>	: Troisième communication nationale sur les changements climatiques
<b>USDA</b>	: United states department of agriculture
<b>ZAE</b>	: Zonage agroécologique ou Zone agroécologique

## RESUME

La mise en place de stratégies d'adaptation au niveau du secteur agricole constitue une solution durable pour limiter les pertes de production agricoles consécutives aux effets néfastes de la variabilité et des changements climatiques particulièrement pour les petits producteurs. Cependant, un choix éclairé des options d'adaptations repose sur une meilleure connaissance des potentialités agricoles du milieu. Ainsi, le zonage agroécologique émerge comme un outil stratégique fondamental pour ajuster les pratiques agricoles de manière spécifique à chaque région, en tenant compte des variations climatiques locales et des caractéristiques agroécologiques locales. La présente étude propose une approche de zonage agroécologique au Burkina Faso avec pour objectif l'identification de zones de même potentialité agricole au Burkina Faso afin de faciliter la mise à l'échelle des stratégies d'adaptation pour le secteur de l'agriculture. Pour conduire l'étude, un ensemble de données agroclimatiques et pédologiques couvrant le Burkina Faso a été utilisé. Ainsi, un algorithme de clustering spatial (SKATER) a été appliqué sur les composantes principales (CP) obtenues à la suite d'une analyse en composante principale (ACP) sur les caractéristiques agroclimatiques et édaphiques de 95 stations météorologiques au Burkina Faso. À la suite de la polygonisation de voronoï, le clustering a été utilisé afin d'agréger les zones d'influence de chacune des 95 stations en zones homogènes. L'ACP a montré que quatre CP expliquaient 76,5 % de la variance et a permis d'identifier les variables les plus contributives. Les deux premiers CP sont portés par les conditions thermiques, la longueur de la saison et la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. Les deux dernières sont portées par les conditions hydriques notamment le contenu en eau du sol et l'indice d'aridité. Le clustering sur les composantes principales retenues, a permis d'identifier trois zones agroécologiques ZAE1 au nord, ZAE2 au sud-ouest et ZAE3 au sud couvrant respectivement 65, 16 et 19% du territoire, dans lesquelles certaines stratégies d'adaptation pourraient être implémentées. L'analyse des valeurs moyennes des trois zones agroécologiques ont montré que la technique du zaï amélioré ou des demi-lunes pourrait être mise à l'échelle dans les ZAE2 et ZAE1 et qu'il faudrait privilégier les cordons pierreux et les bandes enherbées dans la ZAE3. Les caractéristiques agroclimatiques et pédologiques des trois zones agroécologiques peuvent donc servir de données de référence pour un choix éclairé des stratégies d'adaptations ainsi qu'à leur mise à l'échelle.

**Mots clés :** Zonage agroécologique, Changement climatique, Analyse en composante principale, Clustering spatial, Burkina Faso.

## ABSTRACT

Implementing adaptation strategies in the agricultural sector is a sustainable solution for limiting agricultural production losses resulting from the adverse effects of climate variability and change, especially for small-scale producers. However, making an informed choice of adaptation options relies on a better understanding of the agricultural potential of the environment. Agroecological zoning is thus emerging as a fundamental strategic tool for adjusting farming practices specifically to each region, taking into account local climatic variations and local agro-ecological characteristics. This study proposes an agro-ecological zoning approach in Burkina Faso, with the aim of identifying areas of similar agricultural potential in Burkina Faso in order to facilitate the scaling-up of adaptation strategies for the agricultural sector. To conduct the study, a set of agroclimatic and soil data covering Burkina Faso was used. A spatial clustering algorithm (SKATER) was applied to the principal components (PCs) obtained from a principal component analysis (PCA) of the agroclimatic and edaphic characteristics of 95 weather stations in Burkina Faso. Following Voronoi polygonization, clustering was used to aggregate the zones of influence of each of the 95 stations into homogeneous zones. The PCA showed that four PCs explained 76.5% of the variance and identified the most contributory variables. The first two PCs are driven by thermal conditions, the length of the season, and the rate of water infiltration into the soil. The last two are driven by water conditions mainly the soil water content and the aridity index. Clustering of the principal components identified three agroecological zones, ZAE1 in the north, ZAE2 in the southwest, and ZAE3 in the south, covering 65%, 16%, and 19% of the land respectively, in which certain adaptation strategies could be implemented. Analysis of the mean values for the three agroecological zones showed that the improved zai or half-moon technique could be scaled up in ZAE2 and ZAE1, and that preference should be given to stone barriers and grass strips in ZAE3. The agroclimatic and soil characteristics of the three agro-ecological zones can therefore be used as reference data for an informed choice of adaptation strategies and for scaling them up.

**Keywords:** Agroecological zoning, climate change, principal component analysis, spatial clustering, Burkina Faso.

## INTRODUCTION

Pays sahélien et enclavé d'Afrique de l'Ouest, l'économie du Burkina Faso repose essentiellement sur l'Agriculture. En effet, le secteur agricole emploie près de 80 % de la population active et contribue à hauteur de 25 % à la formation du produit intérieur brut ([Koinda et al., 2023](#)) et constitue la principale source de revenus des populations essentiellement rurales ([MEEVCC, 2021](#)). La production agricole est presque entièrement destinée à l'autoconsommation et elle est caractérisée par une dominance céréalière (sorgho, mil, maïs, riz, fonio), quoique les oléagineux (arachide, sésame, karité) occupent une place importante mais variable selon les années ([Belemvire et al., 2008](#)). Malgré son importance, l'agriculture burkinabè est caractérisée essentiellement par de petites exploitations familiales avec des superficies de moins de cinq hectares, une utilisation limitée des machines agricoles ([MEEVCC, 2021](#)). L'agriculture au Burkina Faso est également caractérisée par une faible productivité dont les causes pourraient être dues à de nombreux facteurs, notamment, la petite taille des exploitations et l'utilisation des technologies rudimentaires ainsi que la dégradation des sols ([Savado, 2011](#)).

La dégradation des sols constitue un des obstacles majeurs à l'agriculture burkinabè. Les processus continus de dégradation des sols, dus notamment aux érosions éolienne et hydrique, réduisent considérablement les rendements agricoles déjà faibles ([Belemvire et al. 2008](#)). Toujours selon [Belemvire et al. \(2008\)](#), les estimations révèlent qu'environ 11 % des terres du pays sont considérées comme très dégradées. Depuis lors, la proportion des terres dégradées a plus que doublé, 24 % selon les études récentes ([MAAH/DGESS, 2019](#)). Cette dégradation des terres a de nombreuses conséquences dont la baisse des fertilités des sols, la fragilisation des systèmes de production entraînant une exacerbation de la vulnérabilité des populations face à une insécurité alimentaire grandissante.

L'agriculture burkinabè est extensive et à plus de 95 % pluviale ce qui du reste la rend fortement dépendante du climat et de ses variations ([Sultan et al., 2021](#) ; [MAAH/DGESS, 2019](#)). Le Burkina Faso à l'instar des pays de la région ouest-africaine, subit de plein fouet les effets néfastes des changements climatiques qui se manifeste par un changement du régime pluviométrique (inondations, sécheresses) ([Trisos et al., 2022](#)). La sécheresse est de loin le premier facteur de perte pour les exploitations agricoles ([MASA/DGESS, 2014](#)). Par ailleurs, on note en moyenne qu'une année sur trois est caractérisée par des baisses de production occasionnées par des stress hydriques prolongés ([MAAH/DGESS, 2019](#)). Cependant les

inondations causent beaucoup de dégâts sur le plan humain, infrastructures et agricole et constitue le troisième facteur de perte pour les exploitations.

Au regard des projections climatiques, les effets du changement climatique au Burkina Faso sont susceptibles de limiter encore plus les productions déjà basses, poser d'énormes défis en termes de gestions des ressources naturelles et de freiner l'amélioration des moyens d'existence des populations rurales. En effet, les projections de la répartition des précipitations saisonnières révèlent que, pour les périodes de 2021 à 2050, le pays enregistrera des poches de sécheresses de plus en plus sévères (MEEVCC, 2021). Ainsi dite, l'agriculture pourrait être fortement impactée au regard de son caractère pluvial fragilisant davantage une sécurité alimentaire déjà fébrile (PNSAN, 2013).

L'agriculture burkinabè devra faire face à de gros défis pour gagner le pari de la sécurité alimentaire et nutritionnelle dans un horizon proche. Les principaux défis du secteur de l'agriculture sont, entre autres : i) assurer une maîtrise effective et une gestion efficiente de l'eau ; ii) récupérer et restaurer la fertilité des terres dégradées ; iii) améliorer l'accès des terres ; iv) développer des systèmes d'alerte précoce en vue d'une gestion efficiente de la variabilité et des effets des changements climatiques (MEEVCC, 2021). En somme, cela implique une évaluation des contraintes et des potentialités en termes de fertilité des sols ainsi que d'autres ressources biophysiques offertes par les milieux naturels. En effet, la combinaison des facteurs climatiques, édaphiques et les effets des changements climatiques pourraient avoir un impact significatif sur la viabilité et les rendements des cultures si des stratégies d'adaptation ne sont pas adoptées.

La mise en place de stratégies d'adaptation au niveau du secteur agricole constitue une solution durable pour limiter les pertes de production agricoles consécutives aux effets néfastes de la variabilité et des changements climatiques particulièrement pour les petits producteurs. En effet, elles ont le potentiel d'améliorer le niveau de vie de ces producteurs notamment ceux en difficulté (sols infertiles, ressources hydriques irrégulières ou insuffisantes, peu de moyens), et d'accroître significativement les productions. Seulement l'identification, la formulation et la mise en œuvre de stratégies d'adaptation à grande échelle nécessitent d'une part une évaluation des facteurs de production ainsi que des contraintes biophysiques au niveau national et de l'autre, la détermination de zones homogènes localisées dans l'espace à l'intérieur desquelles les caractéristiques agroécologiques sont similaires offrant donc les mêmes contraintes et potentialités.

La détermination des zones homogènes peut se faire au moyen d'un zonage agroécologique. En effet, le zonage agroécologique est une méthode permettant de quantifier les ressources disponibles (facteurs de production) et de cerner la contrainte liée à l'utilisation de ces dernières (Kassam *et al.*, 1990). C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude intitulée : « **Approche de Zonage agroécologique comme outil d'aide à la décision pour la mise à l'échelle des pratiques agricoles dans le contexte du changement climatique** ». Cette étude a pour objectif global de contribuer à l'identification, à la formulation et la mise en œuvre de stratégies d'adaptation du secteur agricole face aux changements climatiques en tenant compte des contraintes et des potentialités offertes par les milieux naturels. De façon spécifique, l'étude vise à :

- identifier et analyser les variables à prendre en compte dans le processus de zonage agroécologique ;
- proposer une approche de zonage agroécologique spatialement cohérent à l'échelle du Burkina Faso
- caractériser les conditions agroclimatiques moyennes pour chaque zone agroécologique afin de contribuer à l'élaboration de stratégies d'adaptation.

Le présent document résume l'essentiel du travail sur la thématique et est structuré en cinq (05) chapitres :

- le premier chapitre est consacré à la revue de littérature sur la thématique. Il traite de l'état d'art sur les approches de zonage agroécologiques, les changements climatiques ainsi que les stratégies d'adaptations au niveau du secteur de l'agriculture.
- Le deuxième chapitre présente la zone d'étude, le Burkina Faso. Il comporte des informations générales sur le pays à savoir son organisation d'un point de vue administratif, son milieu biophysique ainsi que ses caractéristiques sociodémographiques principales.
- Le troisième chapitre est dédié aux méthodes et matériel de l'étude. Dans ce chapitre, les méthodes utilisées pour le zonage agroécologique sont présentées.
- Les résultats et discussions sont présentés respectivement dans le quatrième et cinquième chapitre. Dans ces chapitres, nous présentons et discutons les résultats du zonage agroécologique à l'échelle du Burkina Faso.
- Finalement, une synthèse des principaux résultats des travaux ainsi que quelques perspectives de recherches sont données dans la conclusion générale du document.



# CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1 Le zonage agroécologique

### 1.1 Notion de zonage

Le zonage ou la régionalisation est un processus qui consiste à diviser une zone géographique en de sous-zones contiguës. Dans la littérature plusieurs autres termes sont rencontrés : partitionnement sous contraintes, découpage de zone, ou encore « districting » ([de Fréminville, 2012](#)). Le zonage tel que défini est d'une portée beaucoup plus générale. Il intéresse plusieurs disciplines dont l'objet d'étude comporte une composante spatiale et temporelle. Le zonage a donc la particularité d'être flexible et sa nature dépend fortement des données utilisées comme « contraintes » afin d'évaluer les potentialités du milieu. Les termes pour désigner le découpage du territoire en zones homogènes, suivant la disponibilité des ressources naturelles sont des plus variés : zonage agroclimatique ([Rojas et Eldin, 1983](#) ; [Sarker et Biswas, 1988](#)) zonage agropédoclimatique ([Riou, 1991](#)), écorégionalisation ([Schröder et Schmidt, 2001](#)), et zonage agroécologique ([FAO, 1997](#)).

### 1.2 Zonage agroécologique

Les zones agroécologiques (ZAEs) sont des zones géographiques présentant des conditions agroclimatiques et édaphiques similaires, et dressent ainsi les contraintes et les potentialités qu'offre ce milieu pour tout système de production utilisant les ressources naturelles, en particulier pour l'agriculture pluviale. Le zonage agroécologique (ZAE) est le processus à travers lequel on subdivise une grande zone géographique donnée en des zones plus petites dites zones agroécologiques. En effet, il définit des zones homogènes sur la base de l'interaction des caractéristiques de sols, de la géomorphologie et du climat ([FAO, 1997](#)). Chaque zone ainsi définie représente donc une combinaison homogène et unique de contraintes et de potentiels en termes de facteurs de production. Le ZAE apparaît aujourd'hui clairement comme un outil incontournable d'aide à la décision notamment en ce qui concerne la planification agricole ainsi que la gestion des risques agroclimatiques.

### 1.3 Les approches du zonage

Plusieurs auteurs ([Rojas et Eldin, 1983](#) ; [Guinko, 1984](#) ; [Sarker et Biswas, 1988](#) ; [Ahmad et al., 2019](#)) se sont penchés sur la nécessité de découper de vastes territoires en de petites zones homogènes pour faciliter soit la gestion des ressources naturelles, formuler des politiques agricoles, des stratégies d'adaptations ou encore pour aider à l'introduction de nouvelles

cultures. Les variables utilisées en contraintes tout comme les méthodes de partitionnement (découpage) employées ont généré des approches variées, des plus simples aux plus complexes.

Sous les tropiques, notamment au Sahel, le zonage du pays se fait essentiellement suivant les précipitations moyennes sur une période d'au moins trente années. C'est le cas du Burkina Faso, où trois zones climatiques sont définies sur la base des isohyètes 600 et 900 mm ([TCN, 2022](#)). Cette approche à l'avantage d'être relativement simple à mettre en œuvre et utilise seulement la pluviométrie moyenne sur une période de trente années en entrée. La pluie est interpolée avec un outil SIG (Système d'information géographique) et la distribution spatiale donne une idée sur les grandes zones ayant des potentialités similaires. Certains auteurs ([Rojas et Eldin, 1983](#) ; [Sarker et Biswas 1988](#)) ont par la suite, au-delà de la pluie, intégré d'autres variables comme la température et le bilan hydrique (P-ET<sub>o</sub>/2).

Une des approches les plus répandues à ce jour demeure celle de la FAO (Food and Agriculture Organization), publiée en 1997 dans un document intitulé « Zonage agroécologique, Directives ». Ce document se veut être la référence en matière de ZAE. En effet, il pose les bases de définition et d'élaboration d'un ZAE, reprises par la suite et adaptées par différents auteurs, en fonction des besoins et données disponibles. Cette approche s'appuie sur l'utilisation des outils SIG, aujourd'hui plus accessible et performant, en combinant des couches de données rasters afin de parvenir à une délimitation précise susceptible à même de prendre en compte des spécificités au niveau local en fonction de la résolution des données d'entrée. Le zonage agroécologique est d'autant meilleur que les données d'entrée sont nombreuses, de bonne qualité ainsi que de haute résolution ([Ahmad et al., 2019](#)). De façon globale, l'ensemble des approches décrites plus haut peuvent être regroupées en trois catégories : i) l'approche utilisant les isohyètes ; ii) l'approche matricielle ; et iii) l'approche de clustering (analyse multivariée)

### **1.3.1 Approche basée sur les isohyètes**

Cette approche est largement utilisée dans les pays du sahel. Elle se base sur la détermination de normale pluviométrique qui représente la moyenne interannuelle des précipitations sur au moins trente années ([OMM, 2018](#)) au niveau des stations d'observations météorologiques, suivi d'une interpolation spatiale. Suivant la distribution zonale et sur la base de certains niveaux de précipitations (isohyètes), il est proposé un découpage du territoire.

L'utilisation de la pluie comme seule variable d'entrée dans cette approche vient du fait qu'au Sahel, elle est de loin la variable climatique la plus déterminante pour l'agriculture et elle permet à elle seule de déterminer l'évolution de l'environnement ([Abdou, n.d](#)). En effet, la

pluviométrie est un facteur clé dans la dynamique d'évolution des écosystèmes sahéliens ([Fall, 2014](#)). Aussi, la pluie se présente comme un élément important pour la production agricole dans la région, car sa répartition spatio-temporelle, sa distribution, ses fluctuations de début et de fin entraînent des conséquences importantes sur les cultures et partant, désorganisent les systèmes agricoles ([Gouataine, 2018](#)).

### **1.3.2 Approche matricielle**

Selon [van Wart et al. \(2013\)](#), l'exemple le plus connu et le plus ancien de l'approche matricielle du zonage est peut-être celui de Köppen depuis les années 1900. Köppen a mis au point un système de classification basé sur une approche multicritères en utilisant en entrée des données de températures et de précipitations. Dans l'approche en question, chaque variable utilisée dans le cadre du zonage est divisée en classes ou plages, suivant un seuillage basé sur l'avis d'expert et la connaissance de la distribution de celle-ci. Les zones sont formées par les "cellules" matricielles des classes qui se croisent. Par exemple, une cellule matricielle peut être une zone géographique dans laquelle la température annuelle moyenne se situe entre 20 et 25 °C et les précipitations annuelles moyennes entre 300 et 400 mm. L'approche de zonage matricielle est un cas typique de l'analyse multicritère dont les outils SIG aujourd'hui facilitent la mise en œuvre en rendant possible la superposition de plusieurs couches de données rasterisées suivant des critères pouvant s'avérer complexes selon les cas ([Pereira et Duckstein, 1993](#)).

### **1.3.3 Approche de clustering**

L'analyse de clustering ou simplement clustering est une technique courante en analyse de données. Elle est utilisée dans de nombreux domaines, notamment l'apprentissage automatique, l'exploration de données, la reconnaissance des formes, l'analyse d'images et en bio-informatique ([Madhulatha, 2012](#)). Le clustering consiste à construire un partitionnement (découpage en groupes) d'un jeu de données de telle sorte que les observations au sein d'un même groupe présentent des propriétés ou des caractéristiques communes et distinctes des observations contenues dans les autres groupes ([Kassambara, 2017a](#)). Dans la plupart des algorithmes de clustering, il est utilisé un indice de similarité avec pour objectif de comparer le degré de similarité ou de dissimilarité entre les différentes observations. Ainsi, deux observations qui se ressemblent auront une distance de dissimilarité réduite, alors que deux différentes auront une distance de dissimilarité plus grande. Le plus souvent, la similarité entre deux observations est basée sur la distance euclidienne entre elles ([Madhulatha, 2012](#)). Les méthodes de clustering peuvent être classées en deux grands groupes, à savoir celles incluant

des contraintes spatiales dites « de régionalisation » et celles dites « classiques » c'est-à-dire dont le regroupement ne prend pas en compte une cohérence spatiale a priori ([Rey et al., 2023](#)).

## **2 Adaptation aux changements climatiques**

### **2.1 Changements climatiques et adaptations**

Selon la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques ([CCNUCC, 1992](#)), les changements climatiques désignent tous les changements attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables. Bien qu'il existe des causes naturelles du réchauffement climatique, il ne subsiste plus aucun doute que les activités humaines sont à l'origine de l'accélération de celui-ci ([Trisos et al., 2022](#)). Les changements climatiques sont actuellement considérés comme l'une des menaces les plus graves posées au développement en raison des impacts significatifs sur l'ensemble des activités humaines notamment celles liées à la production agricole.

Au Burkina Faso, les principaux impacts des changements climatiques sur l'agriculture sont la perte de récoltes et de productivité, la raréfaction de l'eau et la dégradation des terres, l'augmentation des épidémies de ravageurs et de maladies, ainsi que l'intensification des conflits relatifs à l'accès aux ressources naturelles ([MEEVCC, 2021](#)). Ces impacts réduisent davantage les moyens d'existence des populations déjà vulnérables tout en les exposant à la malnutrition, la pauvreté et toutes les conséquences qui en découlent.

Selon le [Trisos et al. \(2022\)](#), les changements climatiques s'observent déjà et ses manifestations vont accroître dans les prochaines années avec notamment une modification des régimes pluviométriques, une multiplication des événements climatiques extrêmes en Afrique de l'ouest et le Burkina Faso n'est pas en reste. En effet, l'analyse des extrêmes pluviométriques et des températures projetées révèle entre autres une augmentation des jours humides et des vagues de chaleur et un bilan hydrique normale à sec ([TCN, 2022](#)). Au regard de cette situation, il est important que les systèmes de production agricole s'adaptent soit pour limiter au maximum les effets négatifs, ou de trouver des opportunités de valorisations imposées par le réchauffement climatique.

L'adaptation au changement climatique se définit comme étant une « démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Pour les systèmes humains, il s'agit d'atténuer ou d'éviter les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Pour certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à

ses conséquences » (Trisos *et al.*, 2022). Face à la nécessité de s'adapter au changement climatique, le Burkina Faso s'est doté d'un plan national d'adaptation au changement climatique (PNA) en 2015 dans lequel un certain nombre de mesures d'adaptations à court, moyen et long terme sont préconisées. Les stratégies d'adaptations prioritaires au Burkina Faso peuvent être regroupées en deux grands groupes à savoir celles : i) liées à la conservation des eaux du sol/défense et restauration du sol (CES/DRS) et ii) liées aux dates opérations culturales et choix des cultivars.

## **2.2 Stratégies liées à la CES/DRS**

Les techniques de CES/DRS sont un ensemble de méthodes qui permettent de restaurer la capacité de production du sol en améliorant ses paramètres physiques, chimiques et biologiques. Ces techniques consistent à la construction d'ouvrages antiérosifs à la surface du sol afin de collecter les eaux de ruissellement tout en améliorant leur vitesse d'infiltration. Parmi ces techniques, on peut citer le zaï, les demi-lunes, les cordons pierreux (Sanon, 2017). Selon plusieurs études (Ouédraogo *et al.*, 2010 ; Ackermann *et al.*, 2014 ; Zougmore *et al.*, 2014), les techniques de CES/DRS constituent des options d'adaptation en milieu paysan en raison des nombreux avantages en matière de gestion de l'eau agricole.

### **2.2.1 Les cordons pierreux**

Les cordons pierreux sont des ouvrages mécaniques construits avec des pierres de carrière alignés suivant les courbes de niveau et le long du contour naturel du terrain après avoir excavé 10 à 15 cm de terre de la ligne où ils doivent être construits (figure 1). Les diguettes ont une hauteur variant de 20 à 50 cm du sol en fonction de l'inclinaison du terrain. La contribution des diguette à la réduction des effets du changement climatique est meilleure lorsque les digues en pierre sont utilisées en combinaison avec des mesures biologiques (plantation d'herbe, d'arbres et de haies) et l'utilisation d'engrais organiques et de paillage (GIZ, 2012). Les cordons pierreux réduisent l'érosion hydrique et augmentent l'infiltration de l'eau, ce qui permet de réduire le stress hydrique des cultures en période de sécheresse.



**Figure 1 : Construction de cordon pierreux sur une ligne de niveau (Melchior, 2011).**

### **2.2.2 Le zaï**

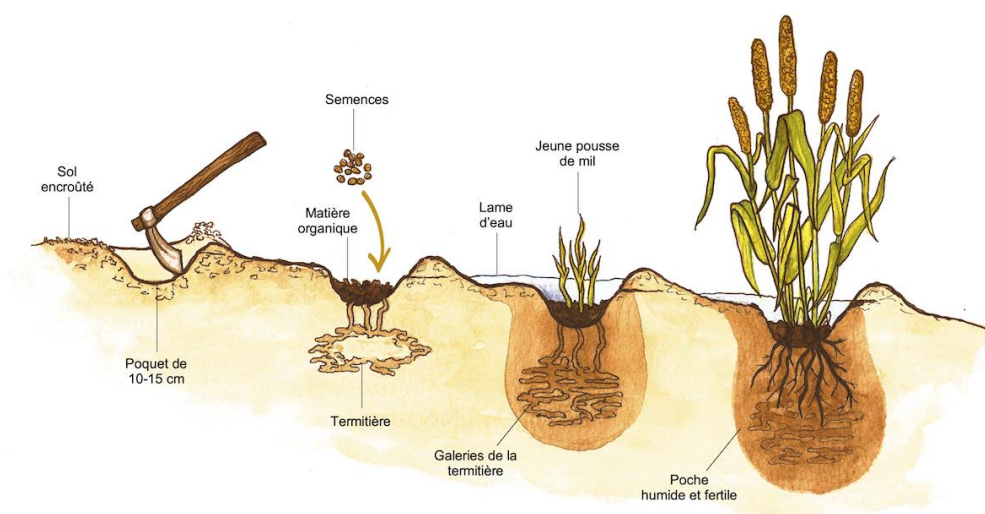
Les termes « zaï » au Burkina Faso, « tassa » au Niger désignent une même technique, d'origine paysanne, qui consiste à creuser des cuvettes destinées à piéger et concentrer l'eau de ruissellement et les ressources transportées par l'eau et le vent pour faire croître une céréale dans des environnements arides et semi-arides, sur des sols dégradés (Lahmar et Yacouba, 2012). En langue mooré le terme « zaï » est dérivé de la racine « zaïégré » qui signifie « se hâter pour préparer sa terre » (Roose et al., 1993) ou encore, « se dépêcher », « faire vite », « se lever tôt et se hâter pour travailler sa terre » (Lahmar et Yacouba, 2012).

Selon Roose et Rodriguez (1990), cette technique ancienne consiste à creuser des trous (poquets) d'environ 20-40 cm de diamètre et 10-15 cm de profondeur, au fonds duquel on y met de la fumure organique. Les trous sont généralement espacés de 70-100 cm et disposés de



manière alternée. À l'arrivée des pluies, le poquet amendé se remplit d'eau et libère des nutriments qui attirent les termites du genre *Trinervitermes*. Ces insectes creusent des galeries par lesquelles l'eau s'infiltre en profondeur, et via leurs déjections, ils transforment la matière organique qui devient alors assimilable par les plantes. Ce processus aboutit à la formation d'une poche humide et fertile où la plante développe ses racines (figure 2).

Le zaï contribue à l'adaptation au changement climatique par sa capacité à réduire les effets de la sécheresse en améliorant l'infiltration de l'eau dans le sol. Il contribue également à la récupération des terres dégradées et à l'optimisation de l'utilisation des intrants ce qui permet d'accroître les rendements agricoles, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire.



**Figure 2 : Le processus de formation d'un poquet de zaï illustré. Marie-Liesse Vermeire, adapté de [Roose et Rodriguez \(1990\)](#)**

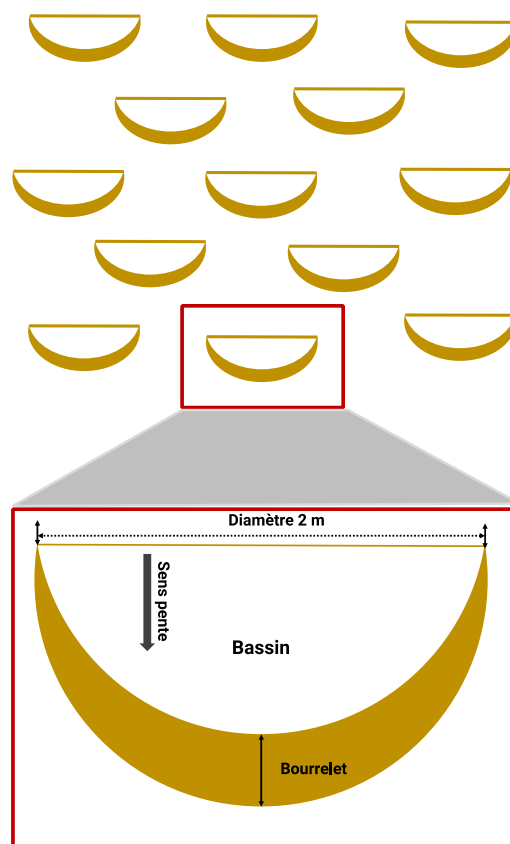
### 2.2.3 Les demi-lunes

Tout comme du zaï, la technique de la demi-lune (originale du Niger) est une autre méthode de réhabilitation des sols nus imperméables et encroûtés qui consiste en un bassin de 2 m de diamètre ([Zougmore et al, 2014](#)). Les trous ont 15-20 cm de profondeur, des écartements de 8 m et sont réalisés en forme de demi-lune suivant la pente du terrain ou les courbes de niveau afin de recueillir les eaux de ruissellement. Selon [Zougmore et al. \(2014\)](#), la surface cultivée est de 6,3 m<sup>2</sup> avec un apport d'une brouette (35 kg) de fumier animal ou de compost pour chaque demi-lune. Des diguettes en pierre sont généralement posées le long des courbes de niveau afin de ralentir le ruissellement et de permettre une meilleure rétention de l'eau dans le bassin. La partie la plus basse à l'intérieur de la demi-lune (le bassin) est travaillée afin de favoriser l'infiltration de l'eau de ruissellement recueillie par le dispositif. Comme pour les

cordons pierreux, les demi-lunes sont disposées suivant les courbes de niveau et en quinconce d'une ligne à l'autre afin de capter la quasi-totalité de l'eau de ruissellement (voir [figure 3](#)).

Comme les autres techniques de CES/DRS, les demi-lunes ralentissent le ruissellement et permettent une meilleure utilisation de l'eau récoltée, ce qui est crucial dans un contexte de pluies rares. En effet, les demi-lunes canalisent l'eau vers les plantes, augmentant ainsi l'humidité disponible pour les plantes et les permettent de survivre aux périodes de sécheresse. Cette technique est pratiquée sur des terres de plateaux et glacis dégradés (sol nu, encroûté et induré) à pentes faibles (inférieures ou égales à 3 %) à sol limoneux ou limono-sableux induré et encroûté générant un important ruissellement. Elles sont réalisées sur des terres à vocation agricole dégradées par l'action de l'érosion hydrique. En effet, si la pente est forte, la force gravitaire des écoulements pourrait mécaniquement détruire les plantes et éroder davantage le sol.

La pratique des demi-lunes contribue alors à l'adaptation au changement climatique à travers l'amélioration de l'infiltration de l'eau et partant la réduction des effets de la variabilité pluviométrique. Elle participe également à la réhabilitation des terres dégradées, la stabilisation des sols et la réduction de l'érosion hydrique.



**Figure 3 : disposition en quinconce de demi-lunes sur une parcelle.**



## 2.3 Stratégies liées aux opérations culturales et choix des cultivars

### 2.3.1 Modification des dates et mode de semis

En agriculture pluviale, le choix de la date ainsi que le mode de semis est une décision importante que l'agriculteur doit prendre en raison des conditions climatiques très variables d'une année à l'autre ou à l'intérieur de la saison (Benaouda et al., 2006). Toujours selon le même auteur et ses collaborateurs, la réussite du semis, et donc la réalisation d'un peuplement de départ adéquat, est une condition nécessaire pour la réussite d'une culture. Tout retard des semis, peut contribuer fortement à la diminution des rendements si des déficits hydriques prononcés surviennent en de fin de cycle, car les fins de saison sont en général plus stables au Sahel (Balme et al., 2005). La modification des dates et le mode de semis sont des stratégies d'adaptation souvent utilisées par les paysans au Burkina Faso.

La date de semis est cruciale en ce sens qu'elle détermine l'échec ou la réussite des cultures. En effet selon Waongo et al. (2015), elle a le potentiel d'atténuer les pertes de récoltes causées par le stress hydrique pendant l'installation des cultures si elle est optimale. La date de semis au Sahel en général, et au Burkina Faso est intimement liée à l'installation de la saison des pluies qui du reste est très variable d'une année à l'autre. En raison de cette grande variabilité, les producteurs adoptent parfois le semis à sec les années où les pluies s'installent tardivement. Les agriculteurs associent le semis à sec à la pratique du zaï afin de réduire les risques de re-semis tout en valorisant au mieux les premières pluies de la saison et ainsi gagner du temps au démarrage de la culture (Mathieu, 2021). Le semis à sec, il faut le souligner expose tout de même les paysans à des risques de perte de semence en cas de première pluie faible et/ou isolée. Cette pratique est alors plus indiquée pour des paysans plus audacieux que la moyenne, disposant de solutions de secours (stocks de semence, assurance) (Dugué, 2012).

Pour limiter les risques de pertes de semences lors d'un semis à sec ou non, l'enrobage des semis est utilisé afin d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau de pluie face à la dégradation continue des niveaux de précipitations. Selon Mathieu (2021), cette pratique ancienne remonte au temps de l'Egypte ancien et elle a été adaptée au contexte burkinabè que très récemment. Toujours selon Mathieu (2021), cette pratique d'adaptation consiste à envelopper les graines de céréales à l'aide d'un mélange d'argile, de compost, de son de céréales et parfois de cendres. Elle vise entre autres à : (i) améliorer la performance du semis à sec en changeant la forme et la couleur des graines permettant de détourner l'attention des oiseaux et des insectes granivores (ii) apporter des éléments nutritifs à la plantule dès la levée (iii) éviter l'emploi des produits chimiques de traitement de semences, (iv) diminuer la quantité de semence utilisée.

En effet, [Mathieu \(2021\)](#) a implémenté cette stratégie pour fins de tests dans des champs-écoles paysans (CEP) en 2019 et 2020. Les semis des parcelles de sorgho avec ou sans enrobage ont été réalisés à sec. L'enrobage des semences a permis d'améliorer le taux de levée par rapport aux parcelles avec semences non enrobées. De plus, les tests en 2020 ont mis en évidence une économie moyenne de 3,3 kg de semences par ha grâce à l'enrobage.

### **2.3.2 Choix des cultivars et association culturale**

Pour éviter les baisses ou pertes de rendement consécutifs aux changements climatiques, les producteurs introduisent dans leurs systèmes de cultures de nouvelles variétés. Il est important de noter que l'adoption des variétés à cycle court et résistante à la sécheresse constituent également une option d'adaptation largement utilisée chez les producteurs ([Ouédraogo et al., 2021](#)). En effet l'utilisation des variétés à cycle court permet d'ajuster le cycle cultural de la plante à la saison des pluies pour les années avec une installation tardive. La tolérance au stress hydrique est également un atout en ce sens que la modification des régimes pluviométriques induit selon les années une baisse des niveaux de précipitations surmontée d'une distribution irrégulière à l'intérieur de la saison.

Selon [Ouédraogo et al. \(2021\)](#), l'association culturale représente également une stratégie d'adaptation courante au Burkina Faso. Pour les producteurs il n'est pas question de mettre « tous les œufs dans le même panier ». L'association culturale la plus répandue au Burkina Faso est céréales (mil, sorgho) et légumineuses (niébé) ([Sawadogo et al., 2022](#)). Le niébé valorise la lumière, les ressources en eau et en éléments minéraux disponibles sous un couvert peu développé de céréales. Les variétés rampantes de niébé couvrent rapidement le sol et limitent l'enherbement et l'émergence de *Striga hermontica* ([Dugué, 1998](#)). Par ailleurs, [Zongo et al. \(2021\)](#), a montré que les associations mixtes sorgho-niébé à travers les services écophysologiques et écosystémiques rendus par le niébé, peuvent être judicieusement utilisés comme une alternative à l'amélioration des rendements et de la productivité des sols. Cela parce que le niébé associé ou pas à des céréales peut fixer jusqu'à 134 kg d'azote à l'hectare provenant de l'atmosphère. Cette aptitude du niébé à fixer l'azote atmosphérique améliore significativement la nutrition azotée des céréales en association d'une manière générale.

## **3 Mise à l'échelle des stratégies d'adaptation**

Sur la base des nombreuses études prouvant que le changement climatique est réel et qu'il aura des impacts plus ou moins significatifs au niveau de pratiquement tous secteurs stratégiques de la vie de l'homme, la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

(CCNUCC) a mis en place le processus des plans nationaux d'adaptation (PNA) au changement climatique pour faciliter la planification de l'adaptation dans les pays les moins avancés et les autres pays en développement (CCNUCC, 2012). Ce nouveau cadre de planification contient des informations pratiques pour (i) la réduction de la vulnérabilité des systèmes naturels, sociaux et économiques aux changements climatiques et (ii) l'intégration de l'adaptation aux changements climatiques (ACC) dans les politiques et stratégies de développement actuelles ou à venir (Basson et al., 2020).

Toujours selon Basson et al. (2020), le Burkina Faso a élaboré son PNA en 2015 qui énonce en tous trois tendances principales (i) les températures augmentent plus que les moyennes mondiales (ii) les changements imprévisibles dans la répartition des précipitations et (iii) l'augmentation des phénomènes climatiques extrêmes. Par ailleurs, le PNA contient plusieurs stratégies d'adaptation pour sept (07) secteurs prioritaires, dont l'agriculture (PNA, 2015). La plupart des stratégies d'adaptation du secteur agricole qui sont formulées dans ce plan ont fait l'objet de nombreuses études scientifiques que ce soit dans la sous-région sahélienne ou à l'intérieur du pays. Ces différentes études scientifiques ont d'une part contribué de manière significative à une meilleure connaissance et à l'amélioration des pratiques agroécologiques jadis utilisées. En effet elles ont permis de mettre en évidence l'efficacité de ses pratiques agroécologiques, notamment leur capacité à rendre les systèmes agricoles plus performants à l'échelle de la parcelle et/ou de l'exploitation. Il faut noter que la plupart des pratiques ou stratégies d'adaptation du secteur agricole ont été mises en œuvre à l'échelle de la parcelle. Cependant pour que les systèmes de production agricole soient plus résilients, la mise à l'échelle des pratiques agroécologiques est très capitale en ce sens qu'elle permettra de mettre en œuvre celles réussies dans d'autres contrées partageant les mêmes contraintes et potentialités (Torquebiau et al., 2019). Taruvinga et al. (2013) dans son étude, montre que les pratiques d'adaptation développées par les producteurs en réponse aux conséquences négatives des changements climatiques dépendent, en plus des facteurs socio-économiques, de plusieurs facteurs environnementaux. L'évaluation des contraintes et potentialités serait donc incontournable dans tout processus de mise à l'échelle des stratégies d'adaptation performantes et innovantes.

Pour rappel, l'objectif d'un zonage agroécologique est l'identification des zones partageant les mêmes contraintes et potentialités en termes de ressources biophysiques. Ainsi, la conduite d'un zonage agroécologique permettra d'identifier les zones potentielles, à l'échelle du territoire, où il sera question de vulgariser des stratégies d'adaptation ayant fait leurs preuves dans une zone

similaire. En effet, [Sarker et Biswas \(1988\)](#) ont montré que le zonage peut contribuer à renforcer les stratégies d'adaptation en identifiant les terres propices aux cultures sur la base des exigences agroclimatiques qui leur sont propres. Le zonage agroécologique permet également de mieux apprécier les risques agroclimatiques à l'échelle du territoire et de préparer les populations locales à adopter les stratégies d'adaptation à même de les aider à faire face aux effets néfastes des changements climatiques. A la lumière de tous ces éléments, on peut dire que le zonage agroécologique constituerait un atout non négligeable dans le processus de mise à l'échelle des pratiques agroécologiques pour renforcer les capacités d'adaptation des communautés rurales déjà vulnérables.

## CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

### 1 Localisation géographique et organisation administrative

Le Burkina Faso est un pays sahélien situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest (figure 4) avec une superficie de 274 296 km<sup>2</sup>. Il partage ses frontières avec la Côte-d'Ivoire au sud-ouest, le Ghana et le Togo au sud, le Bénin au sud-est, le Mali au nord-ouest et le Niger à l'est et au nord-ouest. Il s'étend sur 625 km du nord au sud et sur 850 km de l'est à l'ouest. Pays enclavé, le Burkina Faso reste un pays de transit entre les pays sahéliens (Mali et Niger) et côtiers (Côte d'Ivoire, Ghana, Togo et Bénin).

Le Burkina Faso compte 13 régions, 45 provinces, 49 communes urbaines, 302 communes rurales et 9 288 villages et secteurs administratifs. En termes de superficie, la région de l'Est est la plus vaste avec 46 629 Km<sup>2</sup>, soit 17 % de la superficie nationale et la moins vaste est celle du Centre avec 2 852 km<sup>2</sup>, soit 1 %. La région qui compte le plus grand nombre de villages est celle du sud-ouest avec 1 093 villages et celle qui en a le moins est le Centre avec 242.

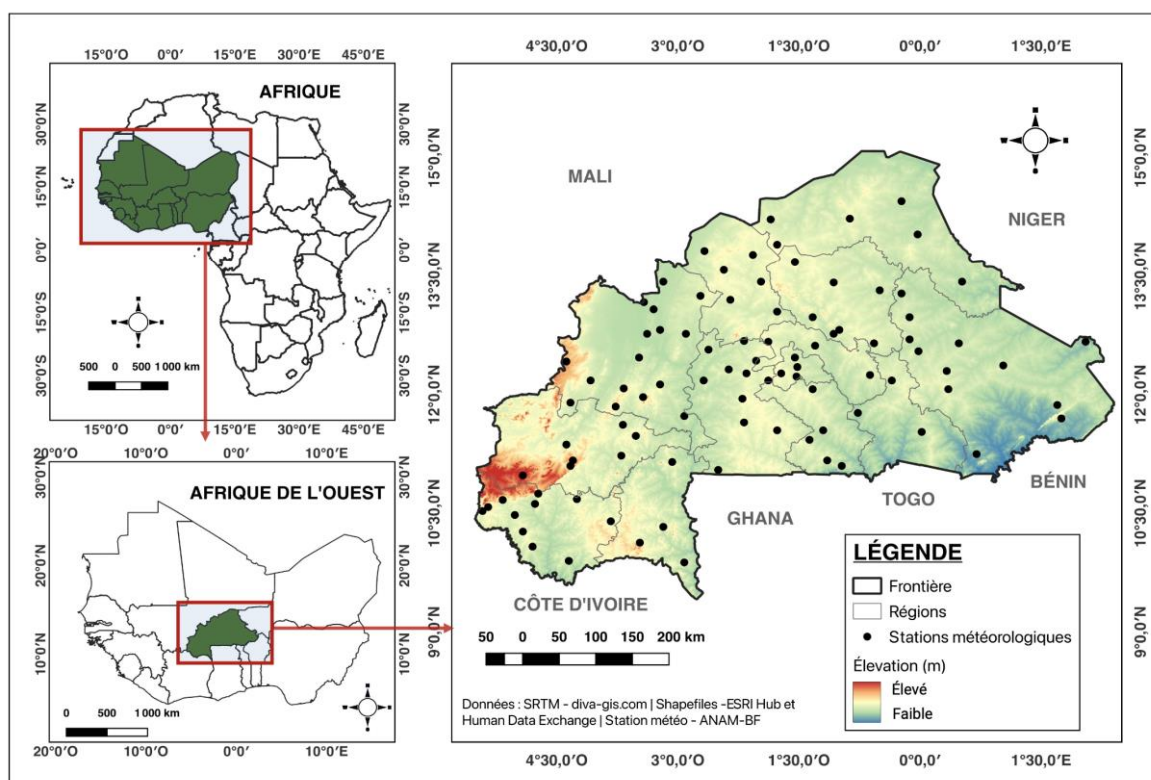


Figure 4 : Localisation de la zone d'étude et des stations météorologiques.

## 2 Milieu physique

### 2.1 Relief et sols

Le paysage du Burkina Faso est monotone avec un relief plat et une latitude moyenne ne dépassant pas 400 m. Le point le plus haut est le mont Ténankourou (747 m) situé dans la province de la Léraba, région des Cascades, à l'extrême ouest. Le point le plus bas se trouve dans la vallée de la Pendjari (125 m) dans la province de la Kompienga, région de l'Est. Plus de la moitié de la superficie du pays se trouve entre 250 et 350 mètres d'altitude. On trouve par ailleurs, des chaînes de collines, des pénéplaines et des plateaux gréseux.

Selon [TCN \(2022\)](#), les différentes études réalisées ont permis de recenser neuf (9) types de sols classifiés par ordre d'importance. Ce sont : i) les sols à sesquioxydes de fer et de manganèse, ii) les sols peu évolués, iii) les sols hydromorphes, iv) les vertisols, v) les sols brunifiés, vi) les sols minéraux bruts, vii) les sols sodiques, viii) les sols ferralitiques et ix) les sols isohumiques. Les niveaux de fertilité et de capacité de rétention en eau des sols sont dans l'ensemble faibles. La fertilité des sols est marquée par un faible niveau de teneur en éléments minéraux (notamment le phosphore et l'azote) et organiques.

### 2.2 Hydrographie

Tous les cours d'eau du Burkina Faso sont tributaires de trois fleuves internationaux à savoir le Niger, la Volta et la Comoé. On distingue quatre principales unités de bassins hydrographiques nationaux qui sont les bassins versants de la Comoé, du Niger, du Nakambé et du Mouhoun. A un niveau inférieur, ces quatre bassins sont subdivisés en 21 sous-bassins nationaux. Le Mouhoun et la Comoé sont des cours d'eau permanents, tandis que le Nakambé et les affluents du Niger sont temporaires. Les écoulements de ces derniers ont lieu en général de mai à novembre. Le réseau hydrographique du Burkina est dense, surtout dans sa partie est et la majorité des cours d'eau est intermittentes.

### 2.3 Végétation

On distingue deux domaines phytogéographiques subdivisés en secteurs et en districts sur la base de la trilogie climat-flore-végétation : le domaine sahélien et le domaine soudanien dont la frontière se situe aux environs la latitude 13° nord.

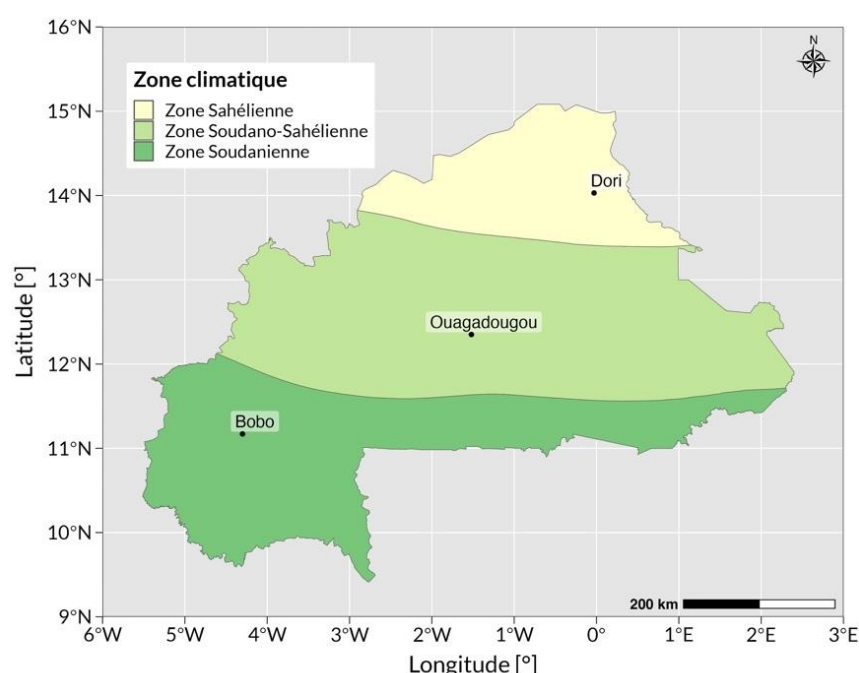
La végétation d'ensemble du **domaine sahélien** est dominée par des steppes à plusieurs faciès (herbeuse, arbustive, arborée). Les steppes sont identifiables par une strate arborée et/ou arbustive éparse avec un tapis herbacé discontinu dont la hauteur moyenne excède difficilement

40 cm. Le **domaine soudanien**, quant à lui, constitue la zone d'extension des savanes. La formation végétale savane comporte de multiples faciès et constitue le type de formation le plus répandu du pays. Elle comprend une strate arborée et/ou arbustive disséminée dans un tapis plus haut (+80 cm) et plus dense.

### 3 Climat

#### 3.1 Aperçu général

Le Burkina Faso est situé dans la bande sahélienne de l'Afrique de l'Ouest et à l'intérieur de la boucle du Niger entre 09° et 15° nord, 2°30' est et 05°30' ouest. Le climat est de type soudanien à deux saisons contrastées, une saison humide de juin à septembre et une saison sèche s'étendant en moyenne de novembre à avril. La saison sèche est caractérisée par des vents du secteur nord-est (harmattan) chargés de poussière, tandis que la saison des pluies est dominée par des vents humides du secteur sud-ouest (mousson) en provenance du Golfe de Guinée. La position des deux isohyètes 600 mm et 900 mm permet de définir trois zones climatiques à savoir : *i*) la zone sahélienne (Dori), *ii*) la zone soudano-sahélienne (Ouagadougou) et *iii*) la zone soudanienne (Bobo-Dioulasso) (figure 5).



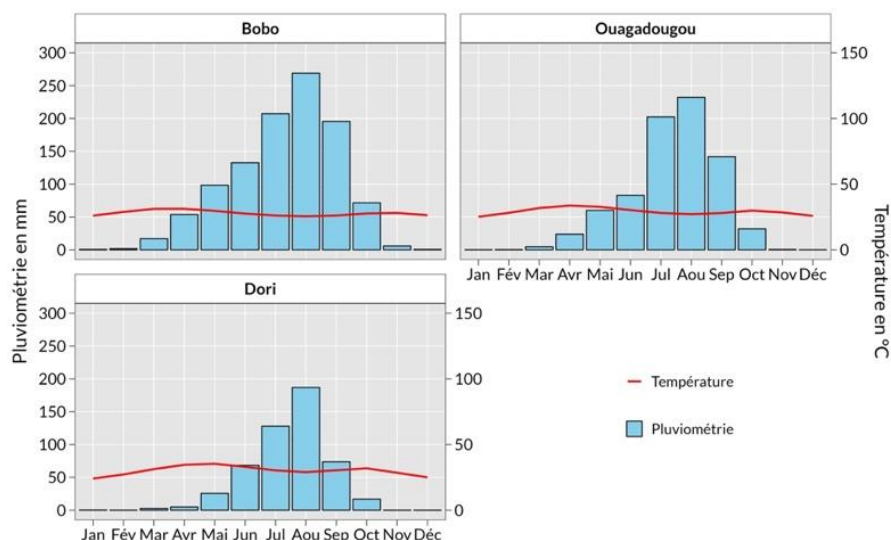
**Figure 5 : Zones climatiques du Burkina Faso et localisation de trois stations de référence.**  
Source : ANAM-BF, 2021.

#### 3.2 Pluviométrie

Les précipitations ont une distribution unimodale pour toutes les zones climatiques (figure



4). Les niveaux de précipitations mensuelles augmentent du Nord (Dori) au Sud (Bobo-Dioulasso) (figure 6). Le mois d'août est le mois le plus pluvieux dans les trois indépendamment de la zone. La hauteur maximale des précipitations mensuelles est d'environ 170 mm à Dori, 232 mm à Ouagadougou et 269 mm à Bobo-Dioulasso. Les précipitations de la période juillet-août-septembre représentent environ 76 % et 63 % des précipitations annuelles dans le Nord et le Sud, respectivement. En ne considérant que les mois avec 50 mm comme cumul pluviométrique, la durée de la saison humide passe de six mois au Sud à quatre mois au Nord.

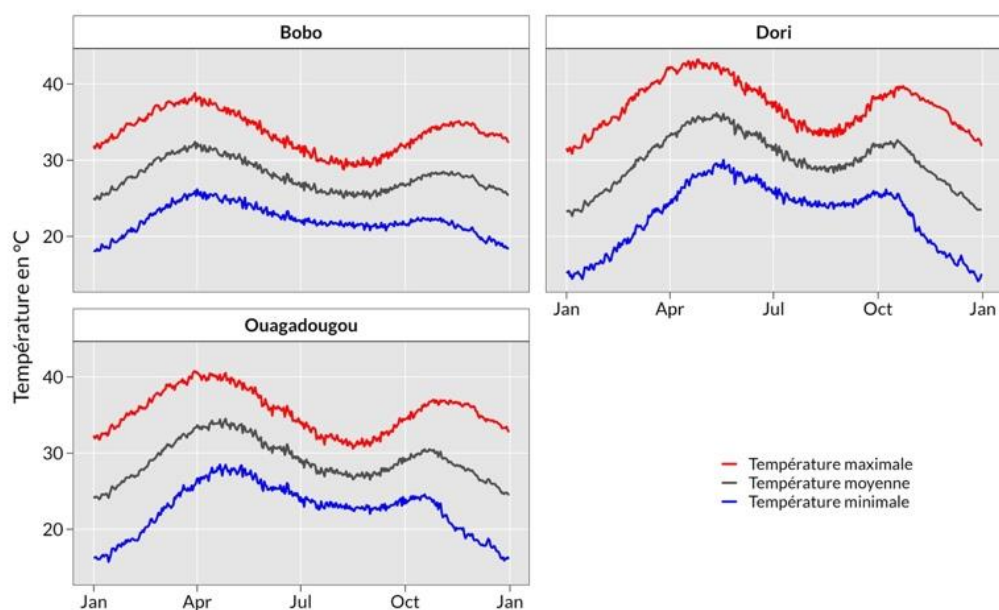


**Figure 6 : Courbe ombrothermique montrant le régime pluviométrique saisonnier au niveau des stations météorologiques de références**

### 3.3 Températures

Elles présentent de grandes variations saisonnières et de fortes amplitudes diurnes. La distribution des températures moyennes est bimodale et présente un pic de chaleur (températures maximales  $> 40^{\circ}\text{C}$ ) en Mars-Avril et en second au mois d'octobre (figure 7). Quant aux faibles valeurs (température moyennes  $< 25^{\circ}\text{C}$ ), elles sont observées entre novembre et février. Les valeurs les plus élevées et les plus faibles se rencontrent dans la zone sahélienne (Dori) donnant des amplitudes thermiques diurnes, mensuelles et annuelles élevées. Les températures maximales restent en général comprises entre  $28^{\circ}\text{C}$  et  $42^{\circ}\text{C}$  mais il faut noter que le record de températures maximales est de  $46^{\circ}\text{C}$  (Dori).





**Figure 7 : Cycle annuel des températures journalières, au niveau des stations météorologiques de références**

#### **4 Situation socioéconomique**

Selon les résultats définitifs du Recensement général de la population et de l’habitation réalisé en 2019 (INSD, 2019), la population du Burkina Faso était estimée à 20 505 155 habitants dont un peu plus de la moitié (51,7 %) sont des femmes. On note également que la grande majorité de cette population soit 73,86 % réside en milieu rural contre 26,14 % en milieu urbain. Comme partout ailleurs en Afrique en général, et dans la sous-région en particulier, la population burkinabè est caractérisée par sa jeunesse. Les enfants de moins de 15 ans représentent environ 45,3 % et les jeunes de 15-34 ans, 32,6 %.

L’activité économique au Burkina Faso est dominée par le secteur primaire (agriculture, élevage, foresterie, chasse et pêche) surtout en termes d’employabilité. Pour ce qui est de la contribution à la formation du PIB, le secteur tertiaire (celui des services) prend de plus en plus une part importante vis-à-vis du primaire. Au secteur agricole, il faut ajouter les sous-secteurs des secteurs secondaire et tertiaire (l’industrie, l’artisanat, les mines, le commerce, les banques et les assurances, le tourisme, les télécommunications et le transport). Le sous-secteur **agricole** lui constitue la principale source de revenus des ménages surtout en milieu rural. En matière de production, les principales sont la production céréalière (sorgho, mil, maïs), les cultures de rentes (coton, soja, sésame).

## CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

### 1 Source des données

#### 1.1 Données observées

Les données pluviométriques utilisées dans cette étude ont été fournies par l'Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso (ANAM-BF). Ces données proviennent de du réseau météorologique nationale, sont au pas de temps journalier et couvrent la période allant de 1991 à 2020 sur l'ensemble du pays. Les métadonnées des stations à savoir le nom, les coordonnées géographiques, sont données à l'annexe 1. Un contrôle de qualité est effectué sur l'ensemble des données notamment sur les coordonnées géographiques et la proportion de données manquantes durant la saison des pluies (mai à octobre) sur la période 1991-2020. Seules les stations disposant d'au moins 85 % des données quotidiennes ont été retenues pour l'étude. Ainsi, sur les 132 stations reçues de l'ANAM-BF, seules quatre-vingt-quinze (95) stations météorologiques sont utilisées.

#### 1.2 Données de réanalyses

Les données climatiques, à savoir les données de température à 2 m, de point de rosée à 2 m, de vitesse du vent (zonale et méridionale) à 10 m et de radiation globale, proviennent de la base de données de réanalyse ERA5 de ECMWF ([Hersbach et al., 2018](#)) accessible via le portail de données Copernicus Climate Change Service (C3S). Les données téléchargées sont au pas de temps horaire et couvrent la période 1991-2020 pour l'ensemble du pays avec une résolution de 0.25° x 0.25° (environ 30 km).

#### 1.3 Données de sol et topographies

Les données de sols utilisées proviennent de la base de données mondiale harmonisée des sols version 2 (HWSD v2) de la FAO ([Nachtergaele et al., 2023](#)). HWSD v2 est un composite de plusieurs sources de données (nationales et globales) et contient au total 29385 unités cartographiques de sol différentes fondées sur une représentation raster de 30 arc-secondes (environ 1 km) et prend en compte plus de 20 propriétés physico-chimiques dont les fractions estimées de sable, d'argile et de limon. Ces propriétés sont présentées en des tranches de sol d'épaisseur fixe : 20 cm de la surface jusqu'à 100 cm et 50 cm entre 100 et 200 cm de profondeur soit en tout sept (07) couches de sol.

## 1.4 Données cartographiques

Dans cette étude les données cartographiques comprennent à la fois les informations de localisation des stations météorologiques (coordonnées géographiques, altitude) et les limites administratives du Burkina Faso. Les coordonnées géographiques des stations météorologiques ont été fournies par l'ANAM-BF, tandis que les limites administratives du Burkina Faso ont été téléchargées depuis le portail de données humanitaire The Humanitarian Data Exchange (HDX) via le lien <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-bfa?>. Les données administratives regroupent les limites frontalières du pays ainsi que les 3 autres niveaux de subdivision administrative en vigueur à savoir : les régions, les provinces et les communes (MINEFID/DGDT, 2018).

## 2 Outils et logiciels

### 2.1 Outils

Comme outils, nous avons utilisé CDO acronyme de Climate Data Operators (Schulzweida, 2022). CDO est une collection d'opérateurs en ligne de commande permettant de manipuler, traiter et d'analyser les données des modèles climatiques. Il comporte plus de 600 opérateurs disponibles pour l'information, la manipulation, le formatage ainsi que l'analyse des données. CDO permet traiter des fichiers très volumineux et a été conçu de sorte que les mêmes fonctions de traitement sont utilisées pour un large éventail de format de données couramment utilisés en science atmosphérique : srv, ext, ieg, grib1/2, netCDF 3/4 et nczarr.

### 2.2 Logiciels

Dans le cadre de cette étude, deux logiciels ont été utilisés pour les analyses et la visualisation de données. Il s'agit de R avec son environnement de développement intégré (IDE) RStudio et du logiciel QGIS.

**R & RStudio** : R (R Core Team, 2023) est un langage de programmation et un environnement logiciel open source largement utilisé dans le domaine de la statistique, de l'analyse de données et de la science des données. Il offre une large gamme de packages et de fonctions pour effectuer des analyses statistiques avancées, générer des graphiques et visualiser les données. RStudio, quant à lui, est un environnement de développement intégré (IDE) spécifiquement conçu pour faciliter l'utilisation de R.

**QGIS, ou Quantum GIS** est un système d'information géographique (SIG) open source. Il permet de visualiser, gérer, éditer, analyser et cartographier des données géospatiales. QGIS

offre une interface conviviale, prend en charge de nombreux formats de données géographiques, et propose une variété d'outils pour travailler avec des données cartographiques d'accéder, de traiter, d'analyser et de visualiser des données géospatiales.

### 3 Méthodologie

#### 3.1 Détermination de la zone d'influence des stations météorologiques

Nous avons déterminé la zone d'influence de chacune des quatre-vingt-quinze (95) stations météorologiques qui représentent en fin de compte les stations de référence pour leur zone d'influence respective. La zone d'influence définit l'aire géographique où, prise au hasard, toute localité dépourvue de sa propre station météorologique pourrait adopter les caractéristiques climatiques de la station de référence en question car étant plus proche de celle-là que des autres.

Pour se faire nous avons utilisé le diagramme de voronoï qui est un pavage (découpage) du plan en régions ou cellules adjacentes (cellules de voronoï) à partir d'un ensemble discret de points, ici les stations météorologiques, appelés « germes ».

De façon formelle, pour un ensemble  $n$  de stations météorologiques distinctes (germes) repérées par leurs coordonnées géographiques  $lon_i$  (longitude) et  $lat_i$  (latitude) sur le territoire du BF (noté  $D$ )  $S = \{s_i | (lon_i, lat_i) | i = 2, 3, 4, \dots, n\}$ , on définit la cellule de voronoï de la station  $s_i$  noté  $V(s_i)$  par la formule suivante :

$$V(s_i) = \{s \mid s \in D; d(s, s_i) \leq d(s, s_j), j \neq i, j = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad \text{Equation 3.1}$$

$d(\cdot, \cdot)$  représente la distance euclidienne,  $s$  représente un point de  $D$ . Ainsi pour deux stations  $s_i$  et  $s_j$  distinctes de  $D$  on a :

$$d(s_i, s_j) = \sqrt{(lon_j - lon_i)^2 + (lat_j - lat_i)^2} \quad \text{Equation 3.2}$$

Le diagramme de voronoï  $v(S) = \{V(s_1), V(s_2), V(s_3), \dots, V(s_n)\}$  n'est rien d'autre que l'ensemble des cellules de voronoï.

Le processus pour obtenir le diagramme de voronoï  $v(S)$  est aussi appelé **décomposition de voronoï**, **partition de voronoï** ou **tessellation de Dirichlet**. La cellule de Voronoï, quant à elle est plus connue sous le nom **polygone de voronoï** ou **polygone de thiesen**. Pour déterminer de façon pratique les zones d'influences des stations météorologiques, nous avons utilisé le package R *ggvoronoi* (Garret et Fischer, 2022).

## 3.2 Détermination des caractéristiques agroclimatiques et édaphiques

### 3.2.1 Longueur de la saison agricole

Pour évaluer la longueur moyenne de la saison sur la période 1991-2020, nous avons déterminé, les dates de début et de fin de saison à l'aide du logiciel **Instat+**. Les critères de détermination de ces dates ([tableau 1](#)) sont celles utilisés par ANAM-BF et en vigueur pour la prévision saisonnière en Afrique soudano-sahélienne (PRESASS).

**Tableau 1 : Critères de détermination des caractéristiques agroclimatiques**

Caractéristique agroclimatique	Détermination
Dates de début de saison (DDS)	Date après le <b>15 MARS</b> , à partir de laquelle un cumul pluviométrique d'au moins <b>20 mm</b> est enregistré pendant 01 à 03 jours consécutifs et sans épisode sec excédant <b>20 jours</b> pendant les <b>30 jours</b> qui suivent.
Dates de fin de saison (DFS)	Date après le 1er septembre quand un sol capable de contenir <b>70 mm</b> d'eau disponible est <b>complètement</b> épuisé par une perte quotidienne d'évapotranspiration de <b>5 mm</b> .
Longueur de la saison (LS)	LS = DFS - DDS

Source : *Guide méthodologique PRESASS, 2020*

### 3.2.2 Évapotranspiration potentielle (ET<sub>o</sub>)

A partir des données de réanalyse ERA5 (vent, température, radiation, humidité relative) nous avons calculé l'évapotranspiration de référence Penman-Monteith FAO-56 (ET<sub>o</sub>) au pas de temps journalier en utilisant la méthodologie proposée par [Allen et al. \(1998\)](#). L'équation utilisée est celle donnée da :

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\left(\frac{900}{T_{moy} + 273.15}\right)u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Equation 3.3}$$

Où ET<sub>o</sub> est l'évapotranspiration de référence FAO 56 Penman-Monteith (mm/j), R<sub>n</sub> est le rayonnement net (MJ/m<sup>2</sup>/j), G est le flux de chaleur dans le sol (MJ/m<sup>2</sup>/j), T<sub>moy</sub> est la température moyenne de l'air (°C), u<sub>2</sub> est la vitesse du vent à 2 m de hauteur (m/s), e<sub>s</sub> est la pression de vapeur saturante de l'air (kPa), e<sub>a</sub> est la pression de vapeur actuelle (kPa), (e<sub>s</sub>-e<sub>a</sub>) est

le déficit de pression de vapeur saturante de l'air (kPa),  $\Delta$  est la pente de la courbe de pression de vapeur (kPa/°C),  $\gamma$  est la constante psychrométrique (kPa/°C).

Par la suite, nous avons extrait et calculé la moyenne interannuelle de l'ETo en mm/jour sur la période 1991-2020 pour chacun des polygones de voronoï.

### 3.2.3 Caractéristiques hydrophysiques du sol

A partir des fractions de sable, limon et argile pour les cinq (05) premières couches (1 m de profil) de sol du HWSO v2.0, nous avons déterminé les textures de sol sur la base de la classification texturale des sols du Département d'état américain de l'agriculture (USDA, 2017). Cette classification repose sur le triangle des sols USDA qui fournit la classe texturale d'un sol en fonction de la fraction des particules du sol (annexe 1). De façon pratique, la texture du sol a été déterminée en utilisant un programme R sous-tendu par la librairie *soiltexture* (Moeys, 2018) qui regorge de plusieurs fonctions permettant de créer des graphiques de triangles des textures, de déterminer la classe de texture à partir des fractions d'argile, de limon et de sable. Par la suite, pour chacun des polygones de voronoï, la texture du sol dominant pour les couche supérieure (0-40 cm) et couche inférieure (40-100 cm) est déterminée au moyen d'une analyse fréquentielle. Sur la base de la texture de sol dominant, les caractéristiques hydrophysiques du sol à savoir le point de flétrissement, la capacité aux champs, la saturation et la conductivité hydraulique ont été évaluées à partir des informations fournies par Saxton et Rawls (2006) (annexe 2).

### 3.2.4 Indice d'aridité et contenu en eau disponible

#### *Indice d'aridité*

À partir de l'évapotranspiration et du cumul pluviométrique nous avons calculé l'indice d'aridité de chaque polygone de voronoï en utilisant l'équation :

$$AI = ETo_{saison} / P_{saison} \quad \text{Equation 3.4}$$

Où AI est l'indice d'aridité annuel ;  $ETo_{saison}$  : évapotranspiration saisonnière moyenne en millimètres ;  $P_{saison}$  : précipitations annuelles moyennes en millimètres.

#### *Contenu en eau disponible*

Le contenu en eau disponible encore appelée réserve utile (AWC) a été calculé pour chacune des deux couches du sol au niveau de chacune des polygones de voronoï. Le contenu en eau

disponible sur le mètre de sol est obtenu en additionnant les deux quantités. L'équation utilisée pour évaluer le contenu en eau disponible pour une couche s'écrit :

$$AWC = (H_{CC}(\%) - H_{PF}(\%)) * Z \quad \text{Equation 3.5}$$

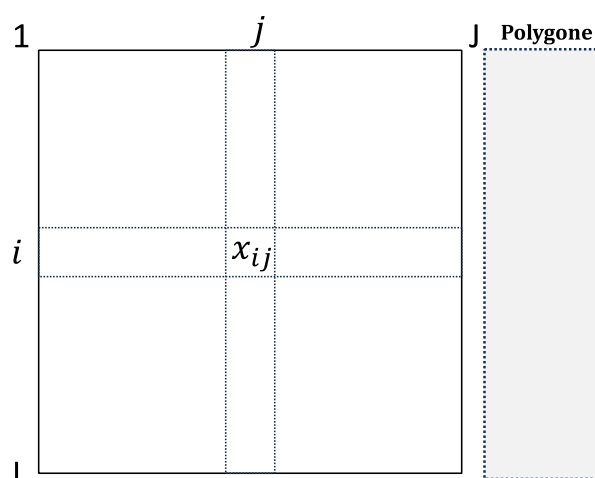
où  $H_{CC}(\%)$  : teneur en eau volumétrique à la capacité au champ,  $H_{PF}(\%)$  : teneur en eau volumétrique au point de flétrissement permanent,  $Z$  = épaisseur de la couche du sol.

### 3.3 Zonage agroécologique via clustering

#### 3.3.1 Format de données et notations

Avant d'entamer les analyses de zonage, il convient de décrire le format des données d'entrée ainsi que certaines notions auxquelles nous ferons référence très souvent dans cette section et un peu plus loin dans le document.

Les données de sols (le contenu en eau disponible, le point de saturation ainsi que la conductivité hydraulique respectivement pour la couche supérieure ( $t_{awc}$ ,  $t_{sat}$ ,  $t_{ks}$ ) et la couche inférieure ( $s_{awc}$ ,  $s_{sat}$ ,  $s_{ks}$ ); agroclimatiques (les températures minimale ( $t_n$ ), maximale ( $t_x$ ), l'indice d'aridité ( $a_i$ ) et la longueur de saison ( $ls$ )) toutes numériques sont rangées dans une matrice  $X$  de dimension  $I \times J$ . Avec  $I$  représentant le nombre de lignes ou observations et  $J$  représentant le nombre de variables à traiter ([figure 8](#)). Dans notre étude,  $I = 95$  (c'est le nombre de polygones de voronoï) et  $J = 9$  (l'ensembles des variables agroclimatiques et de sols). A cette matrice est associée l'information spatiale de chaque polygone de voronoï.



**Figure 8 : Illustration du tableau de données. Source : adapté de [Husson et al., 2017](#)**

Dans cette matrice, une variable  $j$  est un vecteur de  $I$  éléments et on note :  $x_j = (x_{ij})$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ . Aussi, chaque ligne correspond aux caractéristiques d'un des polygones de Voronoï. Ainsi la cellule  $V(s_i)$  aura pour coordonnées  $x_i = (x_{ij})^t$ ;  $i \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$ .

La moyenne de la variable  $j$ , s'écrit :

$$\bar{x}_j = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I x_{ij} \quad \text{Equation 3.6}$$

L'écart-type de la variable  $j$ , abstraction faite des individus s'écrit :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad \text{Equation 3.7}$$

La distance entre deux observations (lignes) distinctes  $k$  et  $l$  dans notre étude c'est la distance entre deux polygones de voronoï s'écrit :

$$d(k, l) = \sqrt{\sum_{j=1}^J (x_{lj} - x_{kj})^2} \quad \text{Equation 3.8}$$

La distance entre deux polygones de voronoï, représente donc à partir de maintenant la distance entre les caractéristiques agroclimatiques et édaphiques de ces derniers.

Le tableau de données est dit centré et réduit ou standardisé si chacune des variables est centrée et réduite. La variable  $x_j$  est centrée et réduite en  $x'_j$  suivant l'équation :

$$x'_j = \frac{x_j - \bar{x}_j}{\sigma_j} \quad \text{Equation 3.9}$$

La nouvelle matrice s'écrit :  $X' = (x'_{ij}); i \in \{1, 2, 3, \dots, I\}, j \in \{1, 2, 3, \dots, J\}$

### 3.3.2 Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composante principale (ACP) est une méthode de réduction de dimension largement utilisée en analyse de données multivariées ([Kassambara, 2017b](#)). Cette méthode consiste à soustraire le maximum d'information d'un jeu de données à plusieurs variables ( $J$  pour notre cas) et de l'exprimer en un jeu de données de  $P$  nouvelles variables ( $P$  inférieur ou égal à  $J$ ) qui se trouve être pour chacune d'elles une combinaison linéaire des variables initiales ([Kassambara, 2017b](#)). Les nouvelles variables issues de l'ACP, sont appelées composantes principales. Une ACP est appliquée à notre jeu de données standardisé, afin de réduire sa dimensionnalité (le nombre de variables) tout en gardant le maximum d'information possible.



Le nombre de composante principale à retenir est déterminé en utilisant la règle de Kaiser-Guttman ([Kaiser, 1991](#)).

### 3.3.3 Analyse de clustering

#### 3.3.3.1 Tendances des données au clustering

La statistique H de Hopkins ([Lawson et Jurs, 1990](#)) a été utilisée afin de déterminer si les observations sont purement aléatoires ou présentent une certaine structure (existence de groupes). Cette statistique est basée sur la différence de distance  $U_i$  entre les caractéristiques d'un polygone de voronoï réel  $V(s_i)$  de coordonnées  $x_i$  et le polygone voisin le plus proche  $V(s_j)$  de coordonnée  $x_j$  et de la distance  $W_i$  entre un polygone fictif avec des caractéristiques fictives  $V(s_i^f)$  de coordonnées  $x_i^f$  avec un polygone réel  $V(s_j)$  de coordonnées  $x_j$ . La statistique de H est calculée suivant l'équation :

$$\frac{\sum_{i=1}^I U_i}{\sum_{i=1}^I (U_i + W_i)} \quad \text{Equation 3.10}$$

Avec :  $U_i = \min \sqrt{(x_i - x_j)^2}; i, j \in \{1, 2, 3, \dots, I\}, j \neq i$

$W_i = \min \sqrt{(x_i^f - x_j)^2}; i, j \in \{1, 2, 3, \dots, I\}, j \neq i$

Si la valeur de la statistique de Hopkins (H) est proche de 1 (supérieure à 0,5), nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle et conclure que le jeu de données peut être regroupé de manière significative, donc présente une structure interne propice à la formation de clusters distincts.

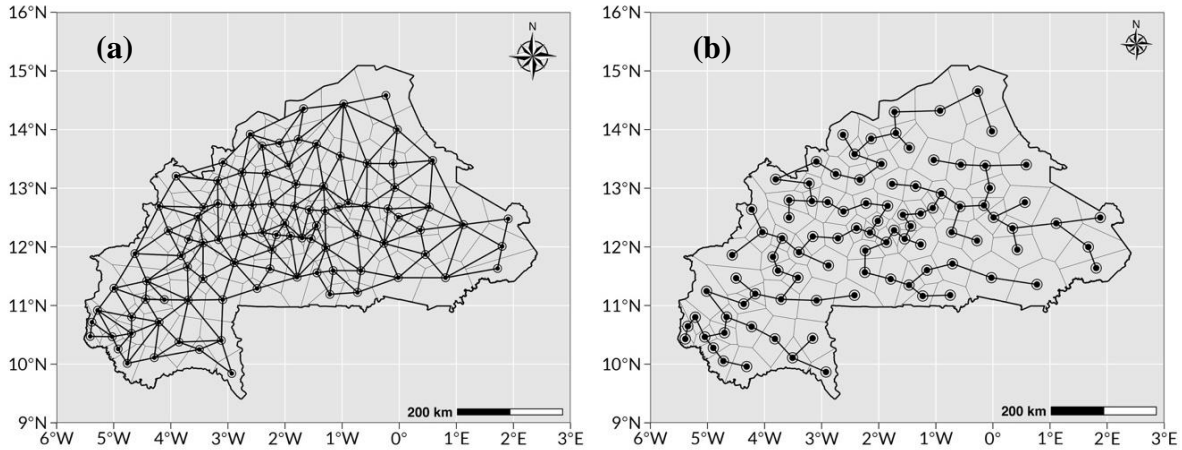
#### 3.3.3.2 Zonage (clustering) avec contraintes spatiales

Contrairement au clustering classique, le clustering avec contrainte spatiale assure toujours une cohérence spatiale des clusters. En effet pour notre cas, toutes les cellules de voronoï  $V(s_i)$  appartenant au même cluster sont adjacentes, ce qui ne sera pas forcément le cas dans un clustering classique. Le clustering avec contrainte spatiale est plus connu sous le nom de régionalisation.

La régionalisation est une technique utilisée en sciences de données spatiales et a pour objectif de produire des clusters homogènes et contigus ([Jamro et al., 2019](#)). Dans la littérature, il existe plusieurs algorithmes de régionalisation dont **SKATER** (Spatial "K" luster Analysis using Tree Edge Removal) développé par [Assunção et al. \(2006\)](#). L'algorithme de SKATER est basé sur le découpage des arêtes d'un graphe connecté, notamment l'arbre couvrant de poids

minimal ou minimum spanning tree (MST), dont les sommets sont les centroïdes des polygones de voronoï  $V(s_i)$  noté  $C(s_i)$ . Le MST (figure 9 b) est calculé à partir du graphe de connectivité générer suivant le schéma de voisinage spatial **Queen** (Anselin, 1988) (figure 9a) en utilisant l'algorithme proposé par Prim (1957).

### 3.3.3.3 Choix du nombre optimal de cluster



**Figure 9 : Graphe de connectivité sur le réseau intégral (a). Arbre couvrant de poids minimal (b)**

La plupart des algorithmes de clustering présentent des limites au niveau du choix approprié du nombre de clusters  $k$ . Pour minimiser le risque d'un choix inadéquat de  $k$ , le coefficient de silhouette (Rousseuw, 1987) est largement utilisé pour déterminer le nombre optimal de cluster  $k$ , c'est-à-dire le nombre de groupes qui séparent au mieux les données. Le coefficient de silhouette est totalement indépendant de la méthode de clustering utilisée. Le concept général de calcul du coefficient de silhouette est illustré par la figure 10. Étant donné un clustering en  $k$  clusters notés  $\pi(k) = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_k\}$ . Pour chaque  $\pi_k$  composée de  $n$  cellules de voronoï  $V(s_i)$  de coordonnées  $x_i$  on calcule d'une part,  $a_{V(s_i)}$  qui est la distance moyenne entre  $V(s_i)$  et les autres cellules de voronoï lui appartenant et de l'autre, on calcule  $b_{V(s_i)}$  qui est la distance moyenne entre  $V(s_i)$  et les autres cellules de voronoï appartenant au cluster le plus proche. Le coefficient de Silhouette est calculé en utilisant les équations suivantes :

$$S_{V(s_i)} = \frac{b_{V(s_i)} - a_{V(s_i)}}{\max(b_{V(s_i)}, a_{V(s_i)})} \quad \text{Equation 3.11}$$

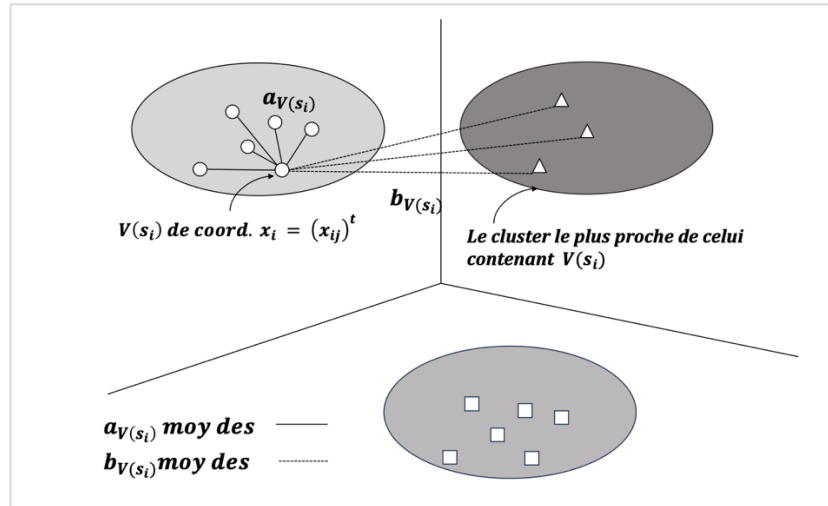
Avec :  $V(s_i)$  appartenant à  $\pi_k$   $a_{V(s_i)}$  la distance moyenne entre  $V(s_i)$  et les autres cellules de voronoï de  $\pi_k$  et  $b_{V(s_i)}$  la distance moyenne entre  $V(s_i)$  et les autres cellules de voronoï du cluster le plus proche de  $\pi_k$ .

$$S_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{V(s_i)} \quad \text{Equation 3.12}$$

Où  $k$  est le numéro du  $k$ -ième cluster à savoir  $\pi_k$  et  $n$  le nombre de cellules de voronoï qui le compose.

$$S_{\pi(k)} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k S_k \quad \text{Equation 3.13}$$

Où  $k$  est le nombre total de clusters issue du clustering  $\pi(k)$ .



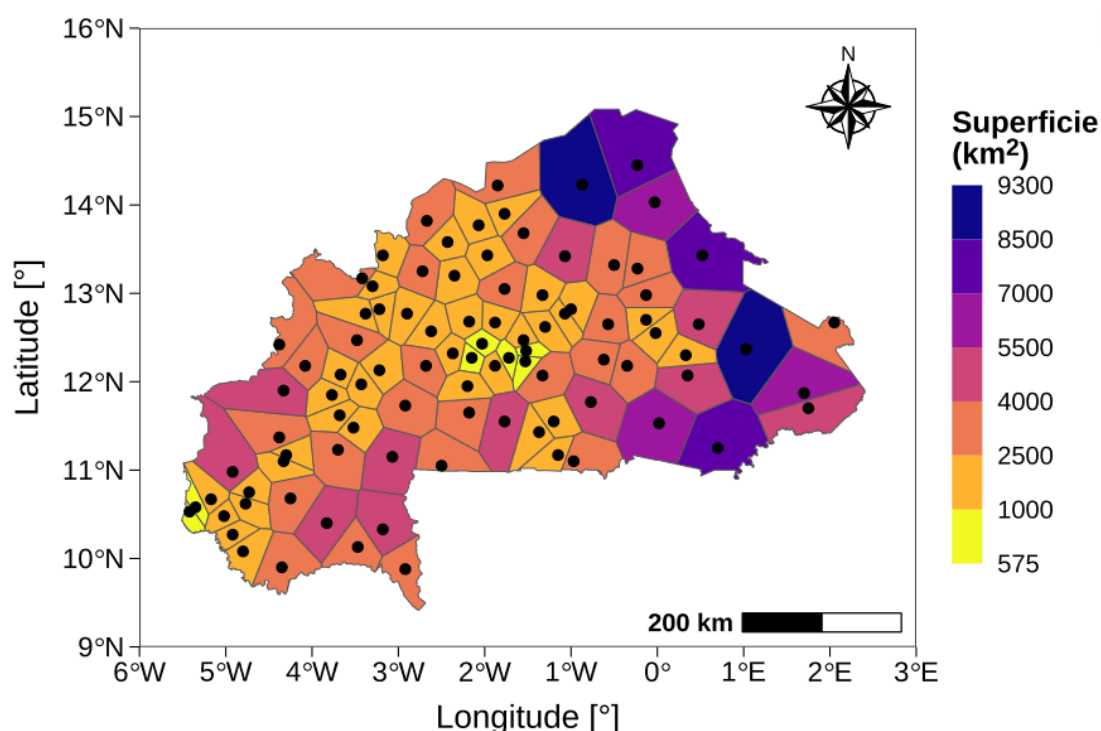
**Figure 10 : Illustration du concept du coefficient de Silhouette. Source : adapté de (Kaoungku et al., 2018)**

Le nombre optimal de clusters  $k$  n'est rien d'autre que le  $k$  maximisant  $S_{\pi(k)}$  pour  $k$  variant de 2 à 10 dans cette étude.

## CHAPITRE IV : RESULTATS

### 1 Zone d'influence des stations

La [figure 11](#) présente la zone d'influence ou polygone de voronoï de chacune des 95 stations météorologiques. La taille des zones d'influence est fonction de la densité du réseau. Plus les stations sont rapprochées les unes des autres, moins les zones d'influences sont de grande superficie. Ainsi, les zones les moins fournies en stations (correspondant aux parties du pays où les zones d'influences sont grandes) se situent à l'est, et au nord du pays. Il faut aussi noter que le rayon de couverture des zones d'influences varie de 14 km pour la station de Ouagadougou aéroport (dans la région du Centre) à 54 km pour la station de Aribinda (dans la région du Sahel). On note une moyenne de 30 km pour le rayon de couverture d'une station sur l'ensemble du réseau d'observation météorologique du Burkina Faso.



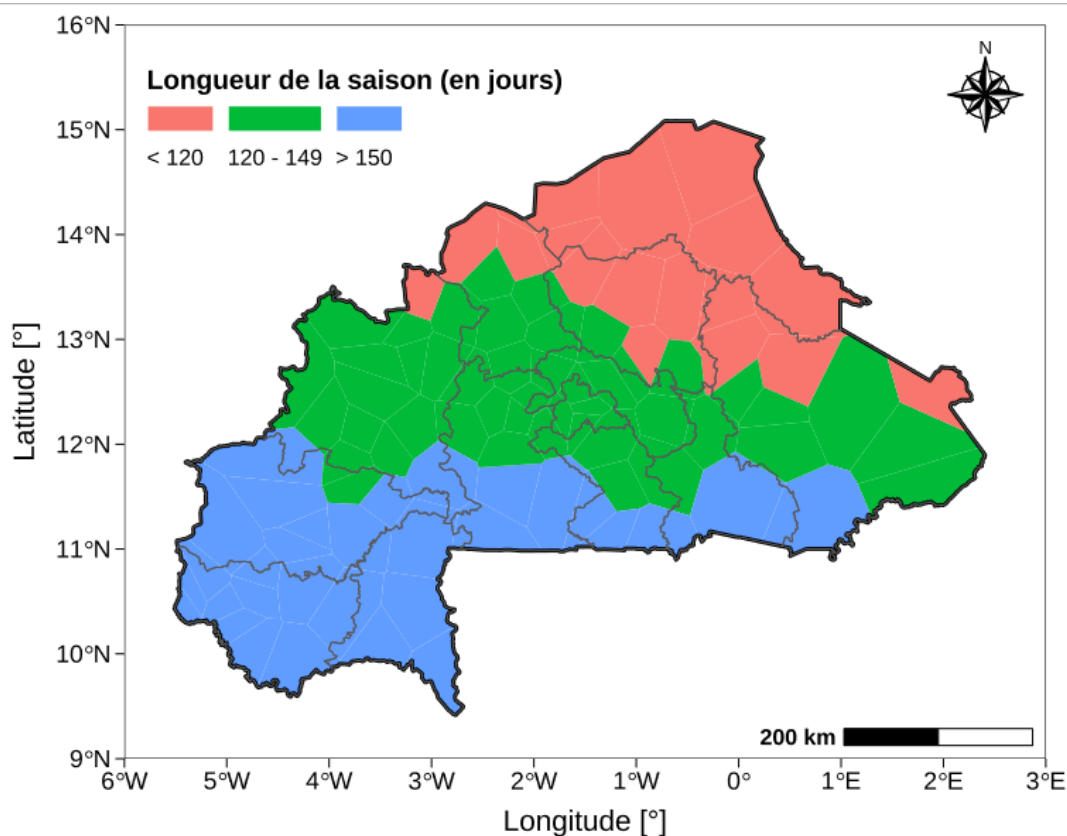
**Figure 11 : Diagramme de voronoï montrant la zone d'influence couverte par chaque station d'observations météorologiques.**

### 2 Distribution des caractéristiques agroclimatiques

#### 2.1 Longueur de la saison agricole

La longueur de la saison agricole a été calculée à l'échelle de la station et sur la base des données pluviométriques journalières. Les résultats montrent qu'elle varie de 91 jours (3 mois), au nord à plus de 180 jours (6 mois), au sud et à l'ouest du BF. La distribution spatiale de la longueur

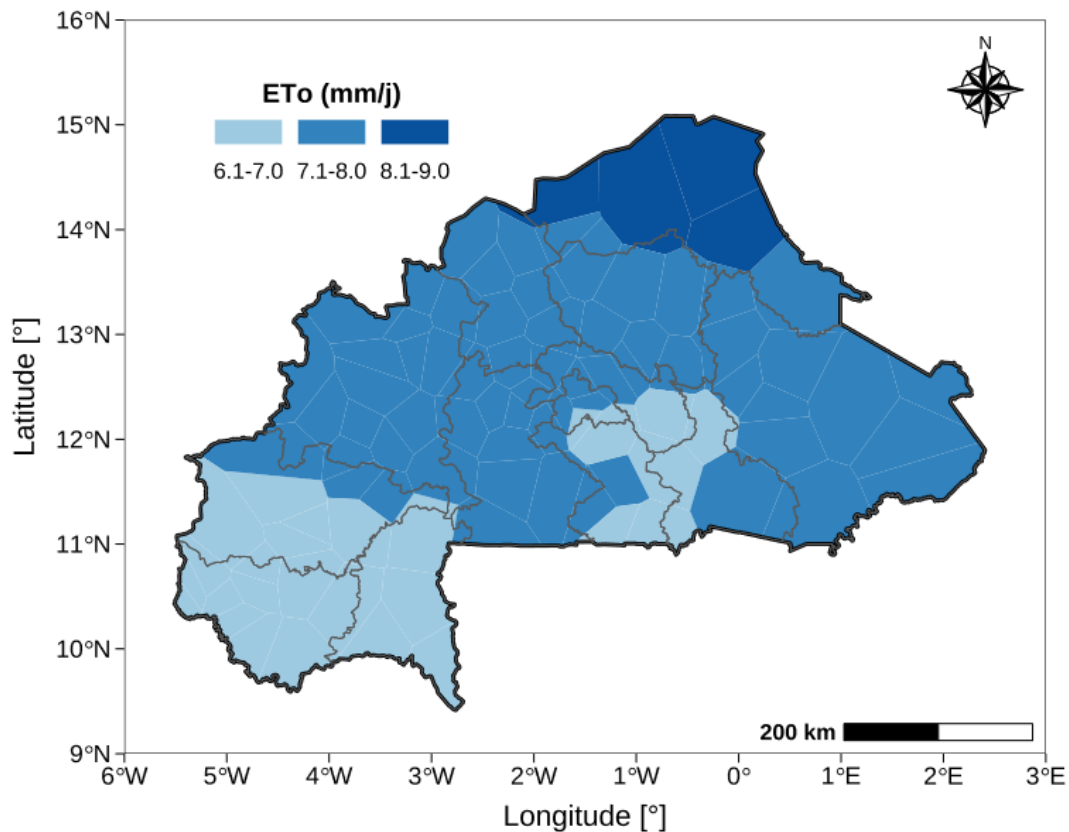
de la saison agricole présente un gradient significatif du nord au sud, avec les saisons les plus courtes localisées au nord du pays (figure 12). L'analyse de la distribution spatiale des longueurs de la saison agricole fait ressortir trois zones bien distinctes : (i) le nord avec des longueurs de saison inférieures à 120 jours, (ii) le centre, avec des longueurs comprises entre 120-149 jours, (iii) le sud avec des durées de saison au-delà de 150 jours.



**Figure 12 : Distribution spatiale de la longueur de la saison**

## 2.2 Évapotranspiration potentielle

La figure 13 illustre la répartition spatiale de la demande climatique (ET<sub>o</sub>) sur l'ensemble du pays. Tout comme pour la longueur de la saison, on note une évolution nord-sud avec cette fois-ci les plus grandes demandes climatiques pouvant excéder 8 mm/jour en moyenne à l'extrême nord du pays. De l'analyse de la distribution spatiale de la demande climatique, il ressort également que le pays peut être subdivisé en trois zones distinctes : (i) une au nord avec des demandes climatiques quotidiennes inférieures à 7 mm, (ii) une au nord avec des demandes climatiques quotidiennes comprises entre 8 et 9 mm, (ii) une zone intermédiaire située entre 7 et 8 mm.



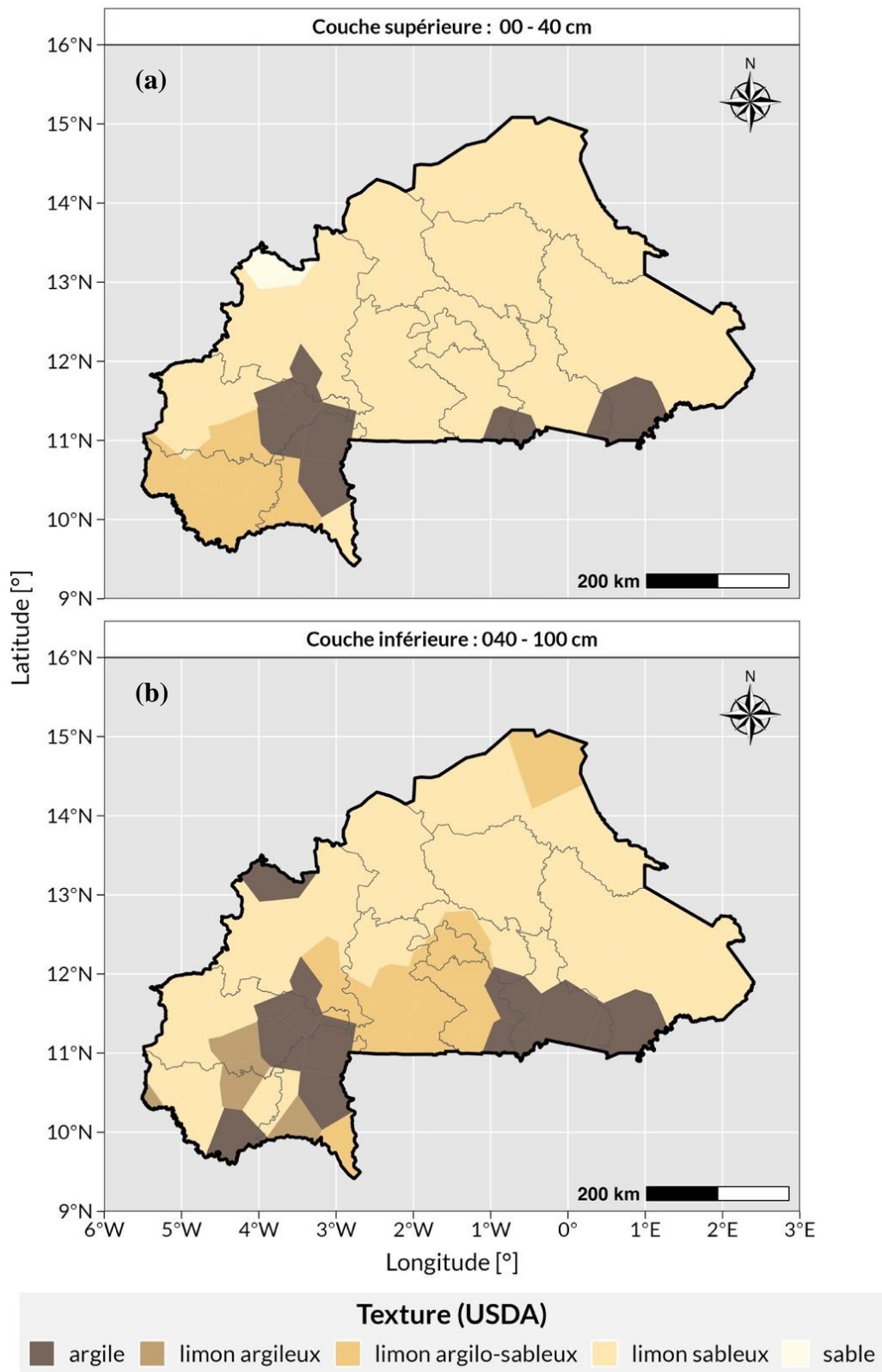
**Figure 13 : Répartition spatiale de la demande climatique (ETo)**

### **3 Caractéristiques du sol**

#### **3.1 Textures du sol**

L'analyse de la répartition des textures du sol révèle une homogénéité sur la majeure partie du pays pour la couche supérieure du sol (0-40 cm). Le sol dominant rencontré est de texture limon sableux. Dans le sud-ouest du pays, on rencontre les sols limon argilo-sableux et argileux (région des Cascades, une partie de la région des Hauts-Bassins et du Sud-Ouest) (figure 14a). La couche inférieure du sol présente plus d'hétérogénéité en termes de répartition des types de sols. Les sols lourds (argile, limon argileux, limon argilo-sableux) sont localisés dans la moitié sud du pays tandis que les sols légers (limon sableux) sont localisés dans la moitié nord. (figure 14 b).

Dans l'ensemble, on distingue deux grands blocs : la moitié sud du pays qui présente une distribution hétérogène des types sols en majorité lourds (argile, limon argileux, limon argilo-sableux) contre la moitié nord qui est plus homogène et est constitué de sols légers (limon sableux)



**Figure 14 : Texture du sol selon la classification USDA pour : la couche supérieure de sol, tranche 0-40 cm (a) et la couche inférieure du sol, tranche 40-100 cm (b).**



### 3.2 Contenu en eau disponible

A partir des caractéristiques hydrophysiques du sol, la réserve d'eau du sol a été évaluée pour un mètre de sol dont la répartition spatiale est illustrée par la [figure 15](#). La distribution de l'eau disponible est homogène sur la majeure partie du pays avec des niveaux de réserve de 90 mm. On observe une répartition hétérogène dans deux zones. La première se situe dans le sud-ouest du pays où elle peut atteindre 130 mm. La seconde se localise au sud des régions du Centre-Est, Centre-Sud et de l'Est, avec 110-120 mm.

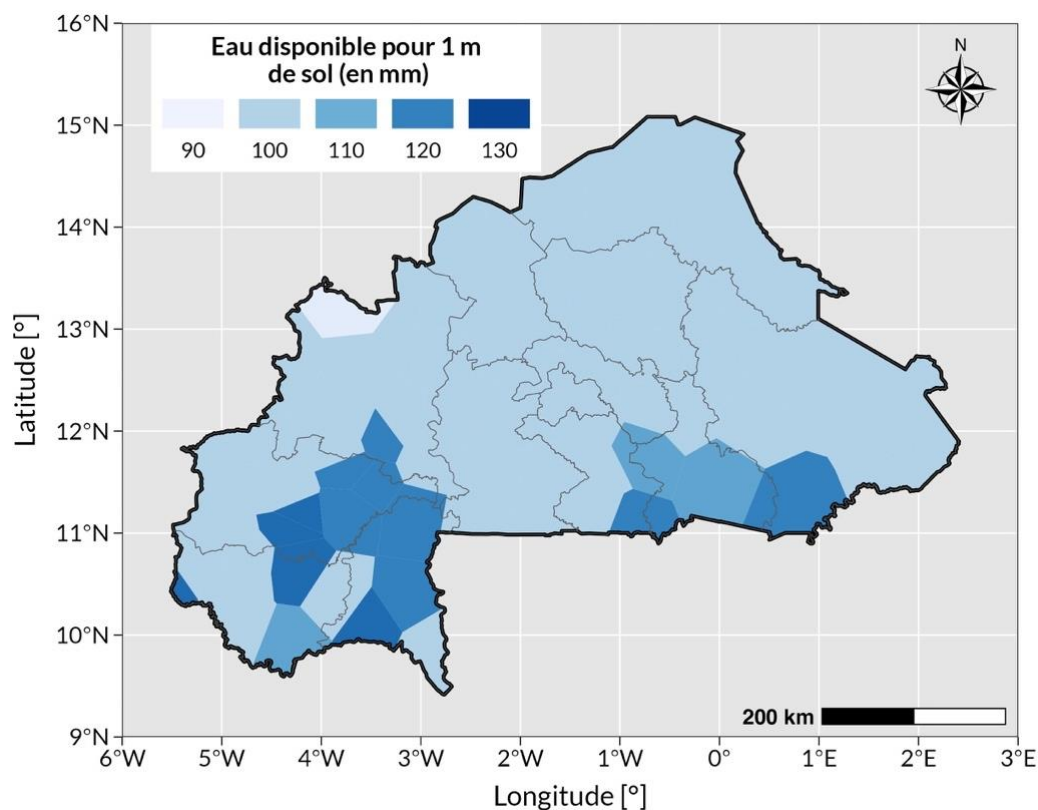


Figure 15 : Eau disponible pour un mètre de sol

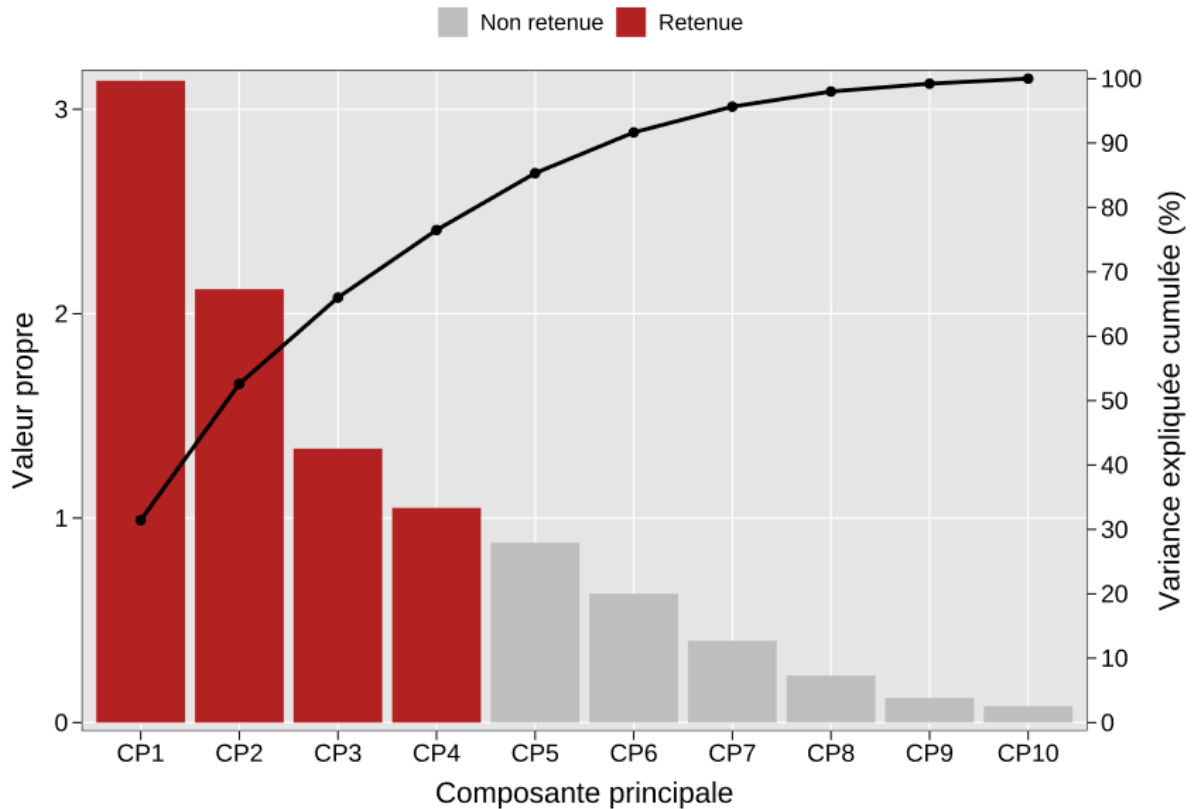
## 4 Zonage agroécologique

### 4.1 Tendance au clustering

Une ACP a été réalisée sur une matrice de 95 individus (en ligne) et dix variables (en colonne). Chaque ligne représente les observations pour une station météorologique tandis que chaque colonne contient les valeurs d'une des dix variables agroclimatiques et édaphiques listés dans l'[annexe 4](#). L'ACP a permis d'extraire quatre composantes principales sur la base du critère des valeurs propres de Kaiser-Guttman ([Kaiser, 1991](#)). Les quatre (04) premières composantes

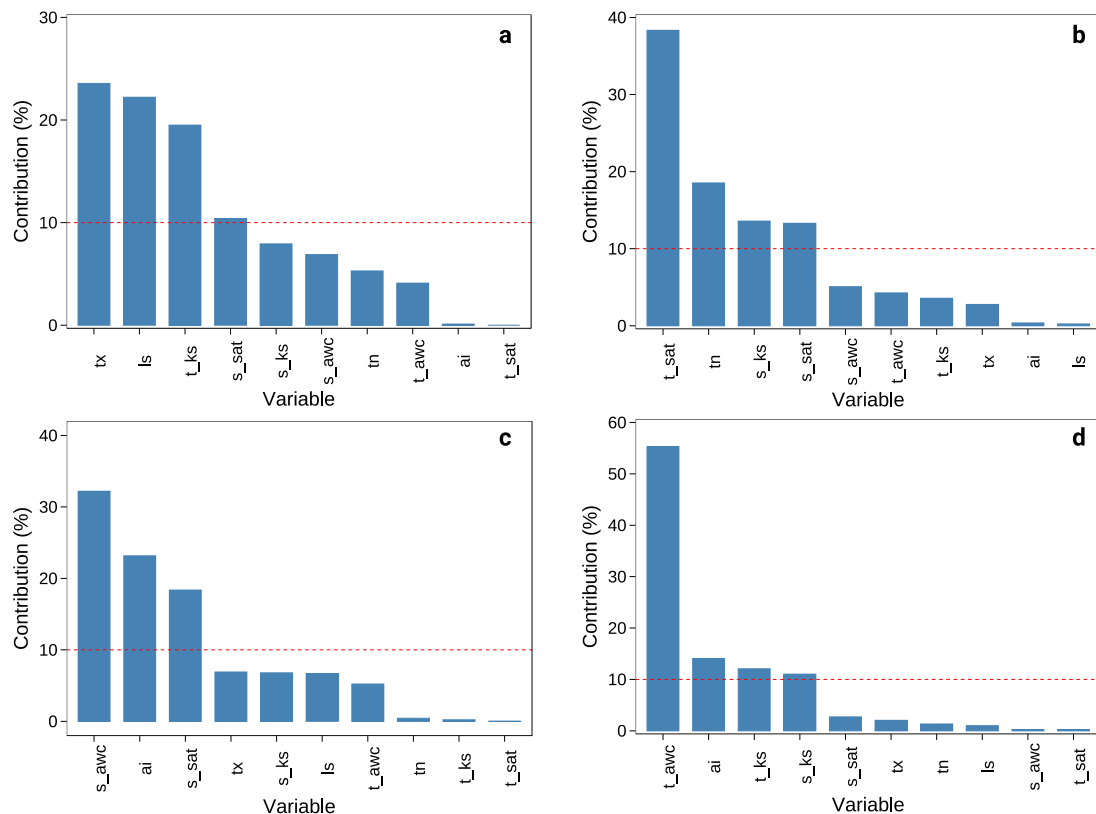


principales retenues (CP1 à CP4) expliquent cumulativement 76,49 % de la variance totale des données (figure 16).



**Figure 16 : Valeurs propres et pourcentage de la variance cumulée des facteurs issues l'analyse en composante principale.**

L'analyse de la contribution des variables à la formation des axes factoriels (composantes principales) montre que la température maximale, la longueur de la saison ainsi que la conductivité hydraulique de la couche supérieure ont contribué le plus à la formation du premier axe CP1 (31,43 % de variance expliquée) (figure 17a). Pour le second axe CP2 (21,17 % de variance expliquée), trois variables contribuent le plus à savoir le point de saturation de la couche supérieure, la température minimale ainsi que la conductivité hydraulique de la couche inférieure (figure 17 b). Les deux premières composantes principales (52,60 % de variance expliquée) sont portées par les conditions thermiques, la longueur de la saison et la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. Les deux dernières composantes (23.89 % de variance expliquée) quant à elles sont portées par les conditions hydriques (contenu en eau du sol et l'indice d'aridité.) (figure 17c et 17 d).



**Figure 17 : Contribution en pourcentage de chaque variable à la formation de (a) la première composante principale (CP1), (b) de la seconde (CP2), (c) de la troisième (PC3) et (d) de la quatrième (CP4).**

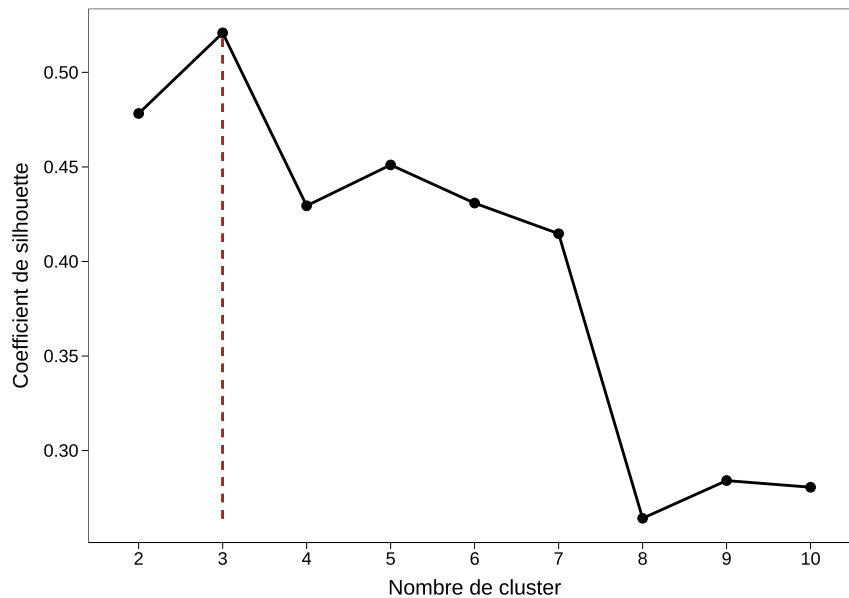
awc = contenu en eau disponible, ai = indice d'aridité, tx = température maximale, tn = température minimale, ls = longueur de la saison, ks = conductivité hydraulique, sat = point de saturation du sol. Préfixe s\_ = couche inférieure du sol (40-100 cm) et t\_ = couche supérieure du sol (0-40 cm).

Le clustering sur les composantes principales retenues, est précédé par le calcul de la statistique H de Hopkins (Lawson et Jurs, 1990). La valeur moyenne de H calculé est d'environ 0,81 ce qui est nettement supérieur à la valeur seuil de 0,5. Ce résultat suggère que l'on peut rejeter l'hypothèse nulle à savoir que les données sont distribuées de façon uniforme au seuil de 90 % (Pierna et Massart, 2000). En d'autres termes les quatre composantes principales retenues présentent une structure interne propice à la formation de clusters ou zones agroécologiques distinctes.

#### 4.2 Détermination du nombre optimal de ZAE

La variation du coefficient de silhouette en fonction du nombre de clusters défini est illustrée par la figure 18. Les résultats montrent que le coefficient de silhouette est maximal pour un

nombre de clusters  $k = 3$ , suggérant ainsi une subdivision du pays en 3 zones agroécologiques distinctes. La figure 18, révèle également une baisse plus ou moins drastique du coefficient de silhouette moyen pour  $k \geq 4$ . Ceci indique que l'ajout d'une zone agroécologique supplémentaire détériore plus ou moins fortement la qualité du zonage.



**Figure 18 : Variation du coefficient de Silhouette (Rousseuw, 1987) pour un zonage en k clusters. La ligne verticale tiretée indique le nombre optimal de clusters.**

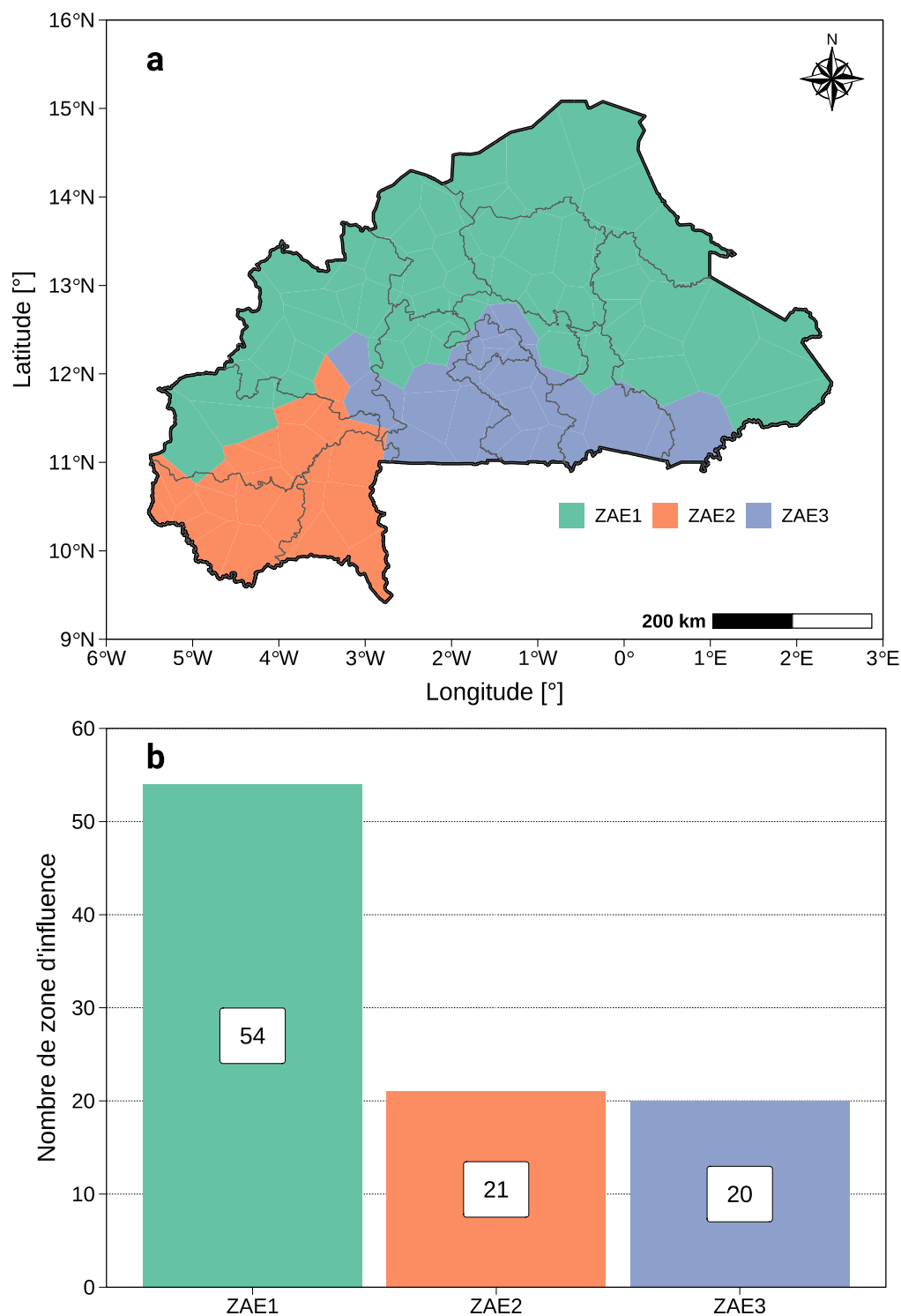
### 4.3 Zones agroécologiques du Burkina Faso

Sur la base du fait que,  $k = 3$  est le nombre optimal de zone agroécologiques, nous avons réalisé un zonage du pays en trois zones agroécologiques. La répartition spatiale des trois zones agroécologiques ZAE1, ZAE2 et ZAE3 est illustrée par la figure 19a.

La zone ZAE1 est la plus vaste. Elle s'étend sur plus de la moitié du pays (65 %) et compte 54 zones d'influences ou stations météorologique (figure 19 b). Sur le plan administratif, elle contient les régions du Nord, du Sahel, une bonne partie (côté nord) des régions de l'Est et de la Boucle du Mouhoun, la partie ouest de la région des Hauts-Bassins, le nord de la région du Centre-Est, Centre-Ouest ainsi le les parties nord et est de la région du Plateau-Central.

La zone ZAE2 est la plus petite en termes de superficie, environ 16 % territoire. Au sein de cette zone, on dénombre en tout 21 stations météorologiques (figure 19 b). La Zone ZAE2 couvre les régions des Cascades, du Sud-Ouest, et la moitié est de la région des Hauts-Bassins et fait frontière dans sa partie sud avec la Côte d'Ivoire et sa partie ouest avec le Mali.

Enfin, la zone ZAE3 se présente sous forme de bande s'étalant d'est en ouest qui se repose sur la partie sud du pays partageant la frontière avec le Ghana, le Togo et le Bénin. Cette zone couvre 19 % de la superficie totale du pays et compte 20 stations météorologiques ([figure 19 b](#)). La zone ZAE3 intéresse les régions des Cascades, du Sud-Ouest, et la moitié est de la région des Hauts-Bassins.



**Figure 19 : Répartition spatiale des zones agroécologiques (a). Nombre de stations météorologiques par zones agroécologiques (b).**

## **5 Caractérisation des trois zones agroécologiques**

### **5.1 Climatologie**

Dans la zone agroécologique ZAE1, les températures minimales varient entre 22 et 24 °C tandis que les maximales varient entre 32,5 et 36 °C. La pluviométrie totale annuelle y est très variable. Elle varie de 440 mm sur une saison pluvieuse de 91 jours à l'extrême nord de la zone à environ 1155 mm en 180 jours dans son extrême sud-ouest. La hauteur annuelle des pluies y est plus faible qu'ailleurs tandis que la demande climatique (évapotranspiration potentielle) y est plus élevée (7,4 mm/jour en moyenne et pouvant dépasser 8 mm/jour au nord) que dans les deux autres zones agroécologiques.

Au niveau de la zone agroécologique ZAE2, les températures minimales varient entre 22 et 23 °C tandis que les maximales varient entre 32 et 34 °C. La hauteur pluviométrique annuelle moyenne est d'environ 1000 mm pour une saison pluvieuse longue de 122 à 187 jours. C'est la zone la plus pluvieuse et la moins exigeante en termes de demande climatique (6,7 mm/jour en moyenne)

Pour ce qui est de la zone ZAE3, les températures minimales varient peu 23 à 24 °C en moyenne annuelle. La hauteur pluviométrique annuelle moyenne est d'environ 830 mm, avec un maximum de 1090 mm pour une saison pluvieuse longue de 126 à 180 jours, la demande climatique y est très peu variable et se situe autour de 7 mm/jour en moyenne.

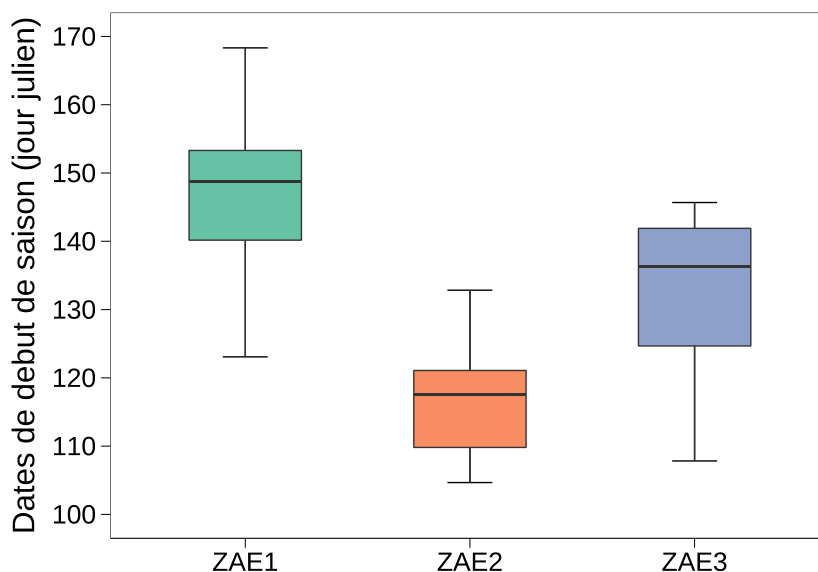
### **5.2 Dates de début de la saison agricole**

L'analyse des dates moyennes de début de saison ([figure 20](#)) montrent que pour la zone ZAE1, les dates moyennes de début de saison sont assez variables. En effet, elles varient entre le 122<sup>e</sup> jour (1<sup>er</sup> mai) et le 167<sup>e</sup> jour (15 juin). Dans cette zone la date d'installation moyenne se situe en moyenne au 30 mai, mais il est important de garder à l'esprit qu'elle peut survenir beaucoup plus tôt (01 mai) dans la partie sud-ouest et nettement plus tard (10-15 juillet) dans la partie septentrionale selon les années.

Dans la zone ZAE2, les dates d'installations moyennes sont moins variables comparativement aux deux autres zones. On y retrouve les dates d'installation moyenne les plus précoces du pays. Ces dernières varient entre 106<sup>e</sup> jour (15 avril) et le 151<sup>e</sup> jour (30 mai). L'installation moyenne

se situe en moyenne au 121<sup>e</sup> jour (30 avril). Dans cette zone les installations sont observées entre 15 et le 20 mai en années tardives.

La zone ZAE3 est le lieu où les localités présentent des dates d'installations les plus variables. Les dates de début de saison varient entre 115<sup>e</sup> jour (25 avril) et le 146<sup>e</sup> jour (25 mai). L'installation moyenne se situe autour du 131<sup>e</sup> jour (10 Mai). Dans cette zone les installations sont observées entre 15 et le 20 mai en années tardives.



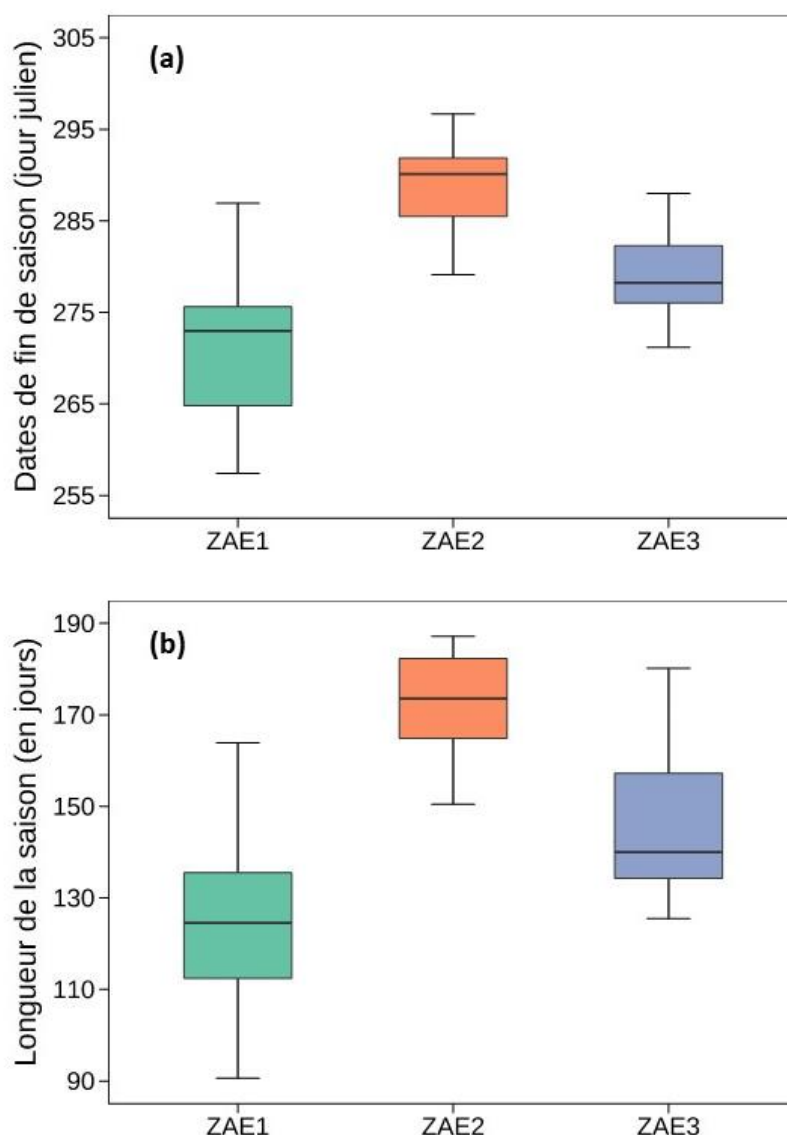
**Figure 20 : Dates moyennes de début de la saison agricole dans chaque ZAE**

### 5.3 Dates de fin et longueur de la saison agricole

L'analyse des résultats montrent globalement une évolution en sens inverse des dates de fin de saison ([figure 21a](#) vs [figure 20](#)). La zone ZAE1 bien que présentant les dates d'installations les plus tardives, est le lieu des fins de saison les plus précoces sur l'ensemble du pays ([figure 21 b](#)). On note également que c'est la zone où les dates de fin de saison très variables comparativement aux zones ZAE2 et ZAE3 où ces dernières ne font pratiquement pas l'objet de surprise. Les dates de fin de saison vont du 259<sup>e</sup> jour au nord (15 septembre) au 294<sup>e</sup> jour (20 octobre) au sud-ouest avec des dates de fins moyennes survenant autour du 269<sup>e</sup> jour (25 septembre). En raison du fait que les dates de débuts de saisons les plus tardives et les fins de saisons les plus précoces du pays s'y trouvent, la zone agroécologique ZAE1 est le lieu où les saisons pluvieuses les plus courtes sont rencontrées ([figure 21 b](#)). En moyennes, la saison des pluies dure 120 jours (4 mois) dans cette zone, avec 90 jours dans sa partie la plus septentrionale et pratiquement 180 jours (6 mois) dans sa partie sud-ouest.

Au niveau de la zone ZAE2, les dates de fin de saison vont du 274<sup>e</sup> jour (30 septembre) au 293<sup>e</sup> jour (23 octobre) selon les localités. La fin des saisons moyennes survient autour du 289<sup>e</sup> jour (15 octobre). La zone agroécologique ZAE2 regroupe les localités avec des longueurs de saisons pluvieuses les plus longues du pays ([figure 21 b](#)). En moyenne, la saison des pluies y dure 169 jours (~ 5 mois et demi) tout en oscillant entre 120 jours (4 mois) et 188 jours (~6 mois) selon les localités. Les dates de fin de saison varient très peu dans la zone ([figure 16 b](#)) suggérant une certaine stabilité des dans le retrait de la saison des pluies.

La zone ZAE3, tout comme au niveau des dates de débuts de saison, se veut être la zone intermédiaire en termes de retrait de la saison des plus et donc de longueur de saison au niveau du pays. La de fin de saison dans la zone se situe en moyenne autour du 288<sup>e</sup> jour (5 octobre), au plus tôt vers le 272<sup>e</sup> jour (28 septembre) et au plus tard le 291 jours (21 octobre). Ces dates sont à deux trois jours près similaires à celle de la zone ZAE2. Par contre la longueur de la saison y (dans la zone ZAE3) est en moyenne d'une décade plus courte que dans ZAE2.



**Figure 21 : Dates moyennes de fin de la saison agricole (a). Longueur moyenne de la saison agricole (b)**

#### 5.4 Texture du sol

Une analyse fréquentielle a été conduite pour déterminer le type de sol dominant rencontré dans chacune des zones aussi bien dans la couche supérieure (0-40 cm) qu'inférieure (40-100 cm) du sol. Le cas où un type de sol ne se distingue pas de loin, nous avons fait ressortir les deux types de sols les plus dominants. Les résultats de l'analyse fréquentielles sont présentés dans le [tableau 2](#). Ces résultats indiquent que le sol est à plus de 90 % dominé par le type « limon sableux » sur tout le mètre de sol dans la zone agroécologique ZAE1. Il s'agit d'un sol limoneux à texture modérément grossière sols sont à dites

Dans la zone ZAE2, au niveau de la couche supérieure le type de sol dominant est limon argilo-sableux (texture modérément fine) pendant que dans la couche inférieure on note à proportion



quasi-similaire la présence de sol « limon sableux » (sol à texture modérément grossière) et de l'argile (sol à texture fine).

Le sol dominant est respectivement « limon sableux » et « limon argilo-sableux » respectivement pour la couche inférieure et supérieure du sol au niveau de la zone agroécologique ZAE3

**Tableau 2 : Types de sol dominant pour chacune les couches supérieure (0-40 cm) et inférieure (40-100 cm) du sol dans chacune des trois zones agroécologiques.**

Couche	Zone	Texture USDA	Nom	Freq (%)
<b>Couche supérieure (0-40 cm)</b>	ZAE1	SaLo	limon sableux	98
	ZAE2	SaClLo	limon argilo-sableux	67
	ZAE3	SaLo	limon sableux	90
<b>Couche inférieure (40-100 cm)</b>	ZAE1	SaLo	limon sableux	96
	ZAE2	SaLo	limon sableux	38
		Cl	Argile	33
	ZAE3	SaClLo	limon argilo-sableux	80

## CHAPITRE V : DISCUSSION

### 1 Zone d'influence des stations météorologiques

Les polygones de voronoï ou thiessen sont largement utilisés en hydrométéorologie notamment pour la détermination des pluies moyennes sur un bassin versant (Tabios III et Salas, 1985 ; Fiedler, 2003 ; Bhat et Singh, 2023), ou pour ajuster un modèle d'interpolation sur fond d'une régression géographiquement pondérée (Chao et al., 2018 ; Yaagoubi et al., 2021). La méthode est également utilisée en géographie quantitative et en logistique pour déterminer les zones d'influences de certains services ou infrastructures publiques (Erwig, 2000). Sur la base de la littérature, il existe très peu d'études dans lesquelles cette méthode est utilisée pour déterminer la zone d'influence d'une station météorologique, ce qui rend notre démarche pionnière en agrométéorologie, principalement dans la sous-région sahélienne et au Burkina Faso. Cette approche a le mérite d'évaluer la superficie couverte par chaque station de façon explicite et de rendre compte de la densité de réseau à un niveau local (densité zonale).

La densité du réseau d'observation est cruciale pour capturer la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques agroclimatiques (Xu et al., 2013). Nos résultats montrent une forte densité de poste de mesure au niveau de la partie centrale du pays et une faible densité au nord et à l'est du pays. Cela pourrait être dû à l'accessibilité de ses zones. En effet, le nord et l'est du pays abritent tous deux un environnement particulièrement hostile aux activités humaines. Le nord du pays est une zone sahélienne, prémisses de zone désertique avec très peu de réseau de communication. Les densités de population y sont faibles selon INSD (2019) et les infrastructures de communications rares et pas en très bon état. Pour ce qui est de la partie est, elle abrite des zones de forêts dont la plus grande est le parc W. Cette forêt est l'une des plus denses de la région et donc constitue une zone peu accessible. OMM (2008), indique effectivement que la densité de la population influence la conception du réseau et qu'il est quasiment impossible d'installer et d'exploiter de façon satisfaisante un nombre important de stations dans des zones où la population est très clairsemée. En général, ces zones peu habitées coïncident avec les zones d'un climat hostile : régions arides ou de forêts dans notre cas.

Selon OMM (2008), la densité minimale requise pour un réseau d'observation est de dix-huit stations pluviométriques pour 10 000 km<sup>2</sup>. Cependant, nos résultats sont tels que nous avons pour 10 000 km<sup>2</sup> respectivement 3, 5 et 4 stations dans ZAE1, ZAE2 et ZAE3 ce qui est nettement en deçà des minimas requis. Il faut noter que les densités du réseau que nous avons obtenues sont caractéristiques des pays du Sahel à savoir 1 à 5 stations pour 10 000 km<sup>2</sup>

conformément à l'étude de [Taupin \(2003\)](#). Cette faible densité du réseau pourrait s'expliquer par le manque de moyen financier des pays sahéliens pour investir dans des réseaux de collectes de données météorologiques. Cependant, des efforts sont en cours pour améliorer la situation. En exemple, au Burkina Faso, depuis 2012, ANAM-BF avec l'appui des partenaires a acquis et installé plus de 200 stations automatiques bien réparties à l'échelle du pays. Seulement la faible profondeur historique des observations de ce réseau (la grande partie de ses stations ont été installées en 2016) fait que son utilisation reste limitée sur le plan agroclimatologique, ce qui nous a conduits à utiliser un réseau relativement peu dense par endroits (nord et est du pays). Dans les régions où la densité du réseau d'observation est plus ou moins lâche (grands polygones de voronoï), nous disposons de très peu d'informations pour capturer la variabilité spatiale du climat ce qui pourrait limiter la qualité du clustering appliqué aux ressources biophysique et édaphique du milieu.

## **2 L'approche du clustering**

L'analyse par clustering est fréquemment utilisée dans la délimitation des zones agroécologiques. De nombreuses études ([Liu et Samal, 2002](#) ; [Jarasiunas et al. 2017](#) ; [Bessah et al., 2022](#) ; [Agaada et al., 2023](#)) ont par exemple eu recours au clustering hiérarchique ou la méthode des k-means afin d'identifier ces zones. La difficulté majeure dans l'analyse de clustering classique c'est qu'elle ne garantit pas à la fin une contiguïté spatiale des zones agroécologiques qui seront obtenues, c'est-à-dire que deux objets spatiaux peuvent appartenir à un même cluster sans pour autant être voisins. Dans le but d'ajouter une contrainte spatiale aux contraintes agroécologiques (environnementales) nous avons dans cette étude utilisé un algorithme de clustering spatial ou de régionalisation, en l'occurrence SKATER ([Assunção et al., 2006](#)). Les entités spatiales utilisées comme contraintes supplémentaires sont les polygones de Thiessen représentant les zones d'influences des stations. L'utilisation de cet algorithme en particulier et d'un nombre aussi important de variables biophysiques et édaphiques semble être nouvelle au Burkina Faso (voir section suivante). Cependant elle a été utilisée ailleurs en dehors du Sahel. En effet, [Fathi et al. \(2022\)](#) à utiliser cet algorithme pour délimiter des régions spatialement contiguës comprenant des stations ayant des niveaux de précipitation infra journalière similaires en Arabie Saoudite. Par ailleurs [Shesu et al. \(2021\)](#) dans son étude à utiliser l'algorithme SKATER, pour délimiter cinq régions distinctes et spatialement contiguës

dans le golfe du Bengale à partir de données climatologiques de la température de surface et la salinité de l'océan.

Les données environnementales utilisées en entrées dans le processus de zonage présentent le plus souvent des problèmes d'autocorrélation et de multi-colinéarité (Legendre et Legendre, 2012). Pour contourner cette contrainte, Cruz-Cárdenas et al. (2015) suggère d'utiliser une ACP sur l'ensemble des variables car celle-ci permet de supprimer l'autocorrélation spatiale et la multi-colinéarité dans le jeu de données environnementales et de définir un nombre réduit de variables synthétiques (composantes principales) sur la base des variables originelles tout en gardant le maximum d'information. En outre, l'ACP permet également d'évaluer la contribution de chacune des variables à la formation des composantes principales. Dans notre étude, l'ACP a permis de retenir 4 composantes principales totalisant plus de 75 % de variance expliquée pour le zonage agroécologique et d'identifier les variables pertinentes pour la définition des zones agroécologiques (voir section 3 de ce chapitre).

### **3 Zonage agroécologique du Burkina Faso**

Les tentatives de zonage du milieu sur la base des conditions biophysiques ne sont pas nouvelles. Elles remontent pour les classifications assez solides sur le plan scientifique au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle et ont été proposées essentiellement par des naturalistes et des biologistes. En effet, les tout premiers essais de classification ou zonation se sont basés sur la distribution des espèces animales et végétales (notion de biome) sur le globe terrestre qui est intimement liée à la distribution des températures et des précipitations. En 1900, Köppen a mis au point un système de classification basé sur une approche multicritères en utilisant en entrée des données de températures et des précipitations (van Wart et al., 2013). Le but recherché par Köppen était de faire coïncider les zones climatiques et les biomes naturels existants. Cette classification, ainsi que sa version modifiée, dite classification de Köppen-Geiger (Geiger et Pohl, 1930) a été longtemps utilisée car elle est peu exigeante en termes de données d'entrées. Thorntwaite (1948) a lui intégré la notion de demande climatique (ET<sub>o</sub>) dans la définition des zones climatiques. Son approche ne se limitait déjà plus à la quantité d'eau précipitée et la température, elle intégrait les besoins en eaux des espèces végétales qui est la dérivée de plusieurs variables supplémentaires comme le vent, la radiation, l'humidité relative (Allen et al., 1998). Plus tard avec les développements récents des ordinateurs et la disponibilité des données, des approches plus sophistiquées de zonage ont été développées au moyen d'algorithmes de machine learning (Lasantha et al., 2022).

Au Burkina Faso les principaux travaux ayant conduit à un zonage climatique fin sont ceux de [Guinko \(1984\)](#) et de [Fontès et Guinko \(1995\)](#). Prenant en compte le climat et les éléments de la flore, Guinko a proposé un découpage phytogéographique du Burkina Faso en quatre zones suivant un gradient nord-sud, avec la zone la plus sèche au nord et la plus humide au sud-ouest (annexe 4). Le découpage de Guinko, a permis de mettre en évidence une forte adéquation entre la distribution des zones climatiques et phytogéographiques et celle de certains taxons animaux. Plus tard, en 2011 et en 2021, ANAM-BF a proposé un zonage climatique sur la base respectivement des niveaux de précipitations moyennes annuelles climatologiques 1981-2010 et 1991-2020. Ce zonage est obtenu sur la base d'une interpolation spatiale des précipitations collectées sur le réseau de station d'observations de l'agence, et la position des isohyètes 600 et 900 mm subdivise le Burkina en trois zones. La principale différence entre les deux zonages du Burkina est la migration des isohyètes 600 et 900 mm du nord vers le sud ([TCN, 2022](#)). La zone sahélienne (au nord) proposée par ANAM-BF en 2020 (figure 5), regroupe les deux zones climatiques nord-sahéliennes et sud-sahéliennes issue du découpage de Guinko. La zone soudanienne quant à elle est plus importante au sud-ouest que le secteur nord-soudanien proposé par Guinko. Les différences que nous venons de souligner sont probablement dues par les modifications des régimes pluviométriques, le changement dans la dynamique d'occupation des sols et la perte progressive des forêts et de la biodiversité comme le souligne [Belemvire et al. \(2008\)](#) ; [Tankoano et al. \(2016\)](#) et [TCN \(2022\)](#). Comparativement au zonage de Guinko, et ANAM-BF en 2021, notre étude apporte une approche nouvelle pour ce qui est du Burkina Faso. En effet, notre approche **prendre** en compte l'agroclimatologie récente (données actualisées) incluant (i) la mémoire des changements plus ou moins importants du régime pluviométrique (ii) la dynamique du couvert végétal et donc de l'occupation des sols ; les conditions édaphiques traduisant le budget hydrique nécessaire au développement des cultures. Aussi, les résultats de notre étude proposent une subdivision du Burkina Faso en trois zones agroécologiques distinctes. Le nombre total de zones distinctes reste dans l'ordre de celui de ANAM-BF et dans une moindre mesure celui de Guinko.

La couverture spatiale des zones agroécologiques de notre étude présente des similitudes avec les zonages existants. En effet, les zones agroécologiques mis en exergue dans cette étude respectent le gradient sud-nord comme ceux proposés par les précédents auteurs avec une particularité pour l'ouest du pays. En comparant notre zonage agroécologique avec celle proposé par ANAM-BF, on remarque que : (i) la zone ZAE1 est une fusion de la zone sahélienne et de la zone soudano-sahélienne en grande majorité (ii) la zone ZAE2 est une partie

de la zone soudanienne dans l'ouest du pays, (iii) la zone ZAE3 est une fusion de la seconde partie de la zone soudanienne avec une petite partie de la zone soudano-sahélienne. Cette réorganisation observée des zones agroécologiques existantes pourrait être induite par les caractéristiques du sol intimement lié à la distribution des types de sol (textures). La fusion des zones sahélienne et soudano-sahélienne malgré la différence de niveau de précipitations annuelles moyennes entre les deux zones, pourrait s'expliquer par le fait que ces dernières partagent le même type de sol. En effet dans ces deux régions le sol est homogène et du type limon sableux. De plus dans la partie ouest (domaine ZAE1) et sud (domaine ZAE3), le sol est très hétérogène et est constitué d'un mix de sol lourd et moyen tant en surface qu'en profondeur. Cet état de fait pourrait une fois de plus justifier la division de la zone soudanienne en les zones ZAE2 et ZAE1.

#### **4 Pertinence des variables pour le zonage agroécologiques**

Des résultats de notre étude, il ressort que d'une manière générale, les variables les plus importantes pour la définition des zones agroécologiques au niveau du Burkina Faso sont entre autres les températures minimale et maximale, la longueur de la saison, l'indice d'aridité et le contenu en eau disponible. Ces variables sont d'une importance capitale pour la viabilité des cultures.

La croissance et le développement des cultures dépendent principalement de la température si l'eau est disponible de manière optimale. Elle est essentielle pour la définition de zones de culture, en ce sens qu'elle conditionne spécifiquement la germination et la floraison, moment critique du cycle de vie d'une culture ([Ritchie et Nesmith, 1991](#) ; [Balkaya, 2004](#)). Le maintien d'une température adéquate est particulièrement requis pour assurer un taux de germination optimal et favoriser la croissance saine des plants. En effet, le passage d'un stade phénologique à un autre est souvent conditionné par l'accumulation d'une certaine somme de température (degré jours de croissance). Aussi, La photopériode et/ou la température peut accélérer le processus de passage de phase végétative à celle reproductive. En l'occurrence, des jours courts ou températures sous-optimales (15 °C pour le maïs) réduisent le nombre final de feuilles et font survenir la floraison à un âge physiologique plus précoce. Le froid peut également selon les génotypes, diminuer le nombre de ramifications de la panicule ([Bechoux et al., 2000](#)). En somme, des variations importantes de températures peuvent entraîner un retard ou une précocité de la floraison, une mauvaise pollinisation voire une coulure des fleurs compromettant du même coup le processus de reproduction. Dans des situations pareilles, selon les cas, on peut assister à des pertes importantes, voire intégrales, des récoltes.

En plus de la température, l'indice d'aridité joue un rôle prépondérant sur la croissance et le développement des cultures et est utilisé dans le processus zonage agroécologique en vue de contribuer à l'identification des contraintes sur l'agriculture. En effet, selon [Zomer et al. \(2022\)](#), l'indice d'aridité (ratio entre pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle) comme les autres indices d'aridité d'ailleurs, fournissent une mesure de l'humidité disponible pour la croissance potentielle d'une culture de référence ou d'autres types de végétation spécifique. Résumant le concept d'aridité en un chiffre, l'utilisation d'un indice d'aridité permet des comparaisons à la fois spatiales et temporelles et fournit une base de référence importante pour mesurer et anticiper les impacts du changement climatique. L'indice d'aridité reflète les échanges d'énergie et d'eau entre la surface terrestre et l'atmosphère, et ses variations peuvent être utilisées comme données d'entrée pour toute une série de décisions opérationnelles, telles que l'irrigation et la gestion des cultures, ainsi que la prévision des modèles de sécheresse et d'inondation, ce qui lui confère une grande importance pour la production agricole et la gestion de l'eau.

L'eau conditionne la vie sous toutes ses formes. Au Sahel en général et au Burkina Faso en particulier, la croissance des cultures est étroitement liée aux précipitations si bien que les variations au cours de la saison des pluies affectent fortement la production agricole ([Cissé, 2016](#)). La longueur de la saison agricole ainsi que le contenu en eau disponible conditionnent la disponibilité de l'eau pour les cultures et déterminent la durée de la période de croissance de celle-ci.

## **5 Potentialités de mise à l'échelle des stratégies d'adaptation**

Des expériences de terrain ont montré que les stratégies d'adaptation sont plus ou moins adaptées aux régions. Leur efficacité dépend en partie des potentialités agroécologiques des régions. Ainsi, l'implémentation d'une technique d'adaptation dans une zone doit au préalable bénéficier d'un croisement des informations agroécologiques du milieu concerné avec celles exigées par la technique d'adaptation. En effet, [Kaboré et al., 2006](#) et [Bayen et al., 2012](#) ont montré par exemple que la technique de zaï donne de bons résultats dans le Yatenga une région du nord. Selon ces mêmes études, il ressort que la technique du zaï est encore plus performante selon la taille des poquets ainsi que le type de fertilisation associée (compost et/ou matière végétale, minérale). [Bayen et al. \(2012\)](#) indique des améliorations sur le taux de germination, la biomasse et le rendement grain du sorgho dans le Yatenga (région du Nord). [Ouattara et al. \(2017\)](#), a également testé avec succès la technique du zaï en combinaison avec des bandes enherbées, une fertilisation minérale et organique à Houndé et à Pénis, dans la région des Hauts-

Bassins dans l'ouest du pays. Les résultats de son étude indiquent une augmentation significative du rendement grain du maïs. [Gnoumou et al. \(2017\)](#) a conduit une étude dans la région du Centre-Nord, pour évaluer l'efficacité de la technique du zaï compost avec une semence améliorée du sorgho. Les résultats de son étude montrent que le traitement « zaï compost + semence améliorée » s'adapte bien aux changements climatiques et permet un meilleur développement du sorgho et une augmentation des rendements en grains de 3 fois par rapport aux témoins. De façon globale, les différentes études en dehors de l'augmentation des performances de la culture, notent une réelle amélioration de la capacité de rétention en eau du sol ainsi que des propriétés physico-chimiques. Les sites concernés par les études mentionnés se situent tous dans la zone agroécologique ZAE1. Ainsi, sur la base des contraintes et potentialités communes à toutes les localités de ZAE1, la technique du zaï en association avec d'autres techniques comme la fertilisation minérale et/ou organique, les bandes enherbées et l'incorporation de matière végétale pourrait donner également de bons résultats dans les autres localités. Aussi, [Zougmore et al. \(2014\)](#), a montré que les cordons pierreux, les demi-lunes associées à certaines doses de fertilisation minérale et/ou organique boostent la production agricole. Cette étude a été réalisée à la station de recherche agricole de Saria, dans le Boulkiemde. Zougmore a souligné dans cette étude l'importance d'apporter des nutriments supplémentaires lorsque l'on déploie ses techniques dans cette région du pays.

[Koudougou et al. \(2017\)](#), ont fait le point sur les technologies CES/DRS couramment rencontrées dans les provinces du Houet, Tuy et Ioba. Il ressort que les technologies transférées sont globalement bien connues au plan national et qu'il s'agit principalement des cordons pierreux (enherbés, végétalisés ou non), les diguettes dans leurs différentes formes et les haies vives. Parmi les mesures d'amendement du sol, il y a essentiellement les technologies de production et d'utilisation de la fumure organique (fosse fumière et compostage en tas, le parcase amélioré, le paillage, etc.). La culture de légumineuses/fourragère (principalement le niébé) en association avec les céréales ou en pure avec rotation avec ces céréales est aussi couramment utilisée. Les trois provinces sont localisées dans la zone agroécologique ZAE2, ainsi les différentes technologies existantes dans ces localités pourraient être transféré sur l'ensemble de la zone, bien sur la base des contraintes et potentialités qui y sont partagées.

## **6 Contraintes socio-économiques pour la mise à l'échelle des stratégies d'adaptation**

L'implémentation d'une technologie dans une zone donnée devra prendre en compte certaines spécificités locales comme par exemple la question de l'adoptabilité par les populations locales



qui repose sur des aspects comme la pénibilité, la disponibilité des matériaux et de la logistique, le coût économique et ainsi que le savoir-faire ([Vlaar, 1992](#)). En effet, selon [Barro et al. \(2005\)](#) la technique du zaï est pénible et demande beaucoup de temps car elle est réalisée au moment de grandes chaleurs (40 à 45 °C). Le temps de travail estimé pour la mise en œuvre des poquets de zaï étant de l'ordre de 300 heures pour un hectare. Il est alors nécessaire de disposer d'une main d'œuvre conséquente ou de faire recours au zaï mécanisé. L'approche mécanisée, proposée par Barro et collaborateurs, permet d'obtenir des poquets identiques au zaï manuel mais aussi de réduire considérablement le temps de travail de 300 heures/ha à 36 voire 22 heures/ha suivant les conditions locales comme la nature du sol par exemple. Au-delà, du gain substantiel de temps de travail, d'économie en main d'œuvre, l'auteur met en évidence que cette approche est plus performante que le zaï manuel et peut entraîner une augmentation significative des rendements en comparaison.

On note par ailleurs que la mise en place des cordons pierreux en plus d'être pénible (extraction et port de pierres lourdes) exige la disponibilité des pierres dans les environs et la logistique (camions, charrettes, pickaxes, brouettes) nécessaire pour l'extraction et/ou le transport de ces dernières. La main-d'œuvre doit être disponible et en grand nombre. Somme toute fait, les coûts qui en résultent peuvent vite devenir énormes et difficiles à supporter pour les paysans, surtout que l'infrastructure requiert une routine d'entretien annuelle ([Savado et al., 2011](#))

Au regard de toutes ses considérations, il convient que la mise à l'échelle d'une stratégie donnée intègre d'autres facteurs socio-économiques au-delà du potentiel biophysique du milieu.

## CONCLUSION

Le Burkina Faso a l'image des pays de la sous-région fait face au changement climatique et ses impacts notamment sur l'agriculture. Ces impacts entraînent des baisses de production à la suite des modifications du régime pluviométrique déjà constaté. Sur la base des projections climatiques, les effets du changement climatique sont susceptibles de limiter encore plus les productions agricoles déjà basses, poser d'énormes défis en termes de gestion des ressources naturelles et de freiner l'amélioration des moyens d'existence des populations rurales. Pour garantir la sécurité alimentaire dans un avenir proche, il est nécessaire que le secteur agricole s'adapte via la mise en œuvre de stratégies d'adaptation. Cette étude visait globalement à contribuer à une meilleure connaissance du milieu biophysique afin d'éclairer les choix et la mise en œuvre des stratégies d'adaptations face aux changements climatiques. Notre approche prend en compte les contraintes et les potentialités offertes par les milieux naturels. Ainsi, le zonage agroécologique a été conduit en utilisant les contraintes agroclimatiques et édaphiques essentielles à la production agricole. Cette étude a permis d'identifier à l'échelle du Burkina Faso trois zones agroécologiques homogènes distinctes. L'analyse de chaque zone a permis de relever les conditions agroclimatiques et édaphiques et donc les potentialités qu'offrent le milieu de production agricole. Cette analyse révèle aussi les localités présentant les mêmes vulnérabilités face aux impacts du changement mais aussi et surtout les mêmes opportunités en matière de stratégies d'adaptation. Les résultats de cette étude peuvent donc servir de base pour repérer des stratégies d'adaptation efficaces et identifier les emplacements potentiels pour leur implémentation à grande échelle sur l'ensemble du territoire national. Cette approche peut donc servir d'outils d'aide à la décision pour la mise à l'échelle de solutions d'adaptation spécifiques et ciblées, favorisant ainsi une utilisation plus efficace des ressources de production agricole disponibles.

Notre étude comporte un certain nombre de limites. Ces limites sont liées à la dépendance aux données d'entrées historiques disponibles (nature, qualité et représentativité spatiale). La faible densité du réseau d'observation au niveau national et le recours aux données de réanalyses pour compléter les données de pluies pourraient avoir des répercussions plus ou moins importantes sur la qualité du zonage agroécologique obtenu. Aussi, le zonage agroécologique proposé dans le cadre de cette étude reste plus ou moins général en ce sens qu'il ne s'adresse pas à une culture en particulier et n'intègre pas les projections climatiques afin d'évaluer les impacts du changement climatique sur la dynamique écosystèmes naturelle (zones agroécologiques) à court, moyen ou long terme.

En termes de recommandation, il serait envisageable de conduire une étude similaire à une échelle plus vaste, englobant par exemple l'Afrique de l'Ouest ou le Sahel. Ceci permettrait de disposer, au niveau régional, d'un outil d'aide à la décision pour étendre les stratégies d'adaptation aux changements climatiques et mettre en œuvre les plans régionaux d'adaptation. Une telle étude à l'échelle régionale pourrait servir également de fondement pour la mise en place d'une agriculture durable face au changement climatique.

Les limites et recommandations de cette étude nous amènent à formuler les perspectives de recherches suivantes :

- Conduire une étude de zonage agroécologique spécifique à chaque culture de base en Afrique de l'Ouest afin de promouvoir une agriculture intelligente face au climat ;
- Etendre l'étude sur toute le Sahel ou l'Afrique de l'Ouest pour mieux évaluer les contraintes et potentialités des écosystèmes naturels et aider à la planification des stratégies d'adaptations à une échelle régionale ;
- Promouvoir les études sur l'impact des changements climatiques sur la dynamique des zones agroécologiques impliquant plusieurs jeux de données de projection afin de mieux apprécier les options d'adaptation à court et moyen termes.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abdou Ali. n.d. Le Sahel face aux changements climatiques : enjeux pour un développement durable. Bulletin mensuel, numéro spécial. Centre Régional AGHRYMET, Niamey, Niger. <http://portails.cilss.bf/IMG/pdf/specialChC.pdf>, pp.17-20
- Ackermann, K., Nill, D., Trux, A., van den Akker, E., Wegner, M., et Gerhartsreiter, T. 2014. Water and soil conservation practices in the Sahel: an analysis of their potential to increase resilience of rural livelihoods. *Planet@ Risk*, 2(1).
- Agada, I. O., Aondoakaa, S. I., et Eweh, E. J. 2023. Re-defining the Climatic Zones over Nigeria. *Physical Science International Journal*, 27(4), pp. 12-30.
- Ahmad, A., Khan, M. R., Shah, S. H. H., Kamran, M. A., Wajid, S. A., Amin, M., Khan, A., Arshad, M. N., Cheema, M. J. M., Saqib, Z. A., Ullah, R., Ziaf, K., Huq, A., Ahmad, S., Ahmad, I., Fahad, M., Waqas, M. M., Abbas, A., Iqbal, A., et Khan, I. A. 2019. Agro-ecological zones of Punjab, Pakistan.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., et Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Anselin, L., Florax, R., et Rey, S. J. 2013. Advances in spatial econometrics: methodology, tools and applications. Springer Science & Business Media.
- Assunção, R. M., Neves, M. C., Câmara, G., et da Costa Freitas, C. 2006. Efficient regionalization techniques for socio-economic geographical units using minimum spanning trees. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 797-811.
- Balkaya, A. 2004. Modelling the effect of temperature on the germination speed in some legume crops. *Journal of Agronomy*, 3(3), pp. 179-183.
- Balme, M., Galle, S., et Lebel, T. 2005. Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 16(1), pp. 15-22.
- Barro, A., Zougmore, R., et Taonda, J. B. S. 2005. Mécanisation de la technique du zaï manuel en zone semi-aride. *Cahiers Agricultures*, 14(6), pp. 549-559.
- Basson, F., Zougmore, F., Somda, J., Dipama, J.-M., et Ilboudo, H. W. (2020). Analyse Du Plan National d'Adaptation Aux Changements Climatiques (PNA) Du Burkina Faso Et De Sa Capacité A Atteindre Ses Objectifs. *European Scientific Journal*, 16(27). <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n27>, 149 pp.

- Batool, F., et Hennig, C. 2021. Clustering with the average silhouette width. *Computational Statistics & Data Analysis*, 158, 107190.
- Bayen, P., Traoré, S., Bognounou, F., Kaiser, D., et Thiombiano, A. 2012. Effet du zaï amélioré sur la productivité du sorgho en zone sahélienne. *VertigO*, 11(3).
- Bechoux, N., Bernier, G., et Lejeune, P. 2000. Environmental effects on the early stages of tassel morphogenesis in maize (*Zea mays* L.). *Plant, Cell & Environment*, 23(1), pp. 91-98.
- Belemvire, A., Maiga, A., Sawadogo, H., Savadogo, M., et Ouedraogo, S. 2008. Évaluation des impacts biophysiques et socio-économiques des investissements dans les actions de gestion des ressources naturelles au Nord du Plateau Central du Burkina Faso. Rapport de synthèse, 94 p.
- Benaouda, H., El Gharras, O., Vadon, B., et Farouq, E. 2006. Le semis direct : Un système en extension à la coopérative agricole Khemisset Chaouia. *Options Méditerranéennes, Serie A*, 69, pp. 173-175.
- Bessah, E., Amponsah, W., Ansah, S. O., Afrifa, A., Yahaya, B., Wemegah, C. S., et Agyare, W. A. 2022. Climatic zoning of Ghana using selected meteorological variables for the period 1976–2018. *Meteorological Applications*, 29(1), e2049.
- Bhat, I. A., et Singh, P. 2023. Spatial Interpolation Techniques for Analysing Precipitation Trends in Over Kashmir Valley, Jammu and Kashmir India. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 5(2), pp. 860-883.
- CCNUCC. 1992. Convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques. Nations unies. New York, États unis d'Amérique. 25 pp.
- CCNUCC. 2012. Plans nationaux d'adaptation : Directives techniques pour le processus des plans nationaux d'adaptation. Groupe d'experts des PMA, décembre 2012. 24 pp.
- Chao, L., Zhang, K., Li, Z., Zhu, Y., Wang, J., et Yu, Z. 2018. Geographically weighted regression-based methods for merging satellite and gauge precipitation. *Journal of Hydrology*, 558, pp. 275-289.
- Cruz-Cárdenas, G., Silva, J. T., Ochoa-Estrada, S., Estrada-Godoy, F., et Nava-Velázquez, J. 2017. Delineation of environmental units by multivariate techniques in the Duero River Watershed, Michoacán, Mexico. *Environmental Modeling & Assessment*, 22, pp. 257-266.
- de Fréminville, P. D. L. P. 2012. Partitionnement d'une zone géographique en territoires homogènes et contigus. Ecole Polytechnique, Montréal (Canada).

- Dugué, M. J., Delille, H., et Malgrange, S. 2012. Caractérisation des stratégies d'adaptation au changement climatique en agriculture paysanne. Etude de capitalisation réalisée sur les terrains de coopération d'AVSF, 50 pp.
- Dugué, P. 1998. Gestion de la fertilité et stratégies paysannes. Le cas des zones de savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre.
- Erwig, M. 2000. The graph Voronoi diagram with applications. *Networks : An International Journal*, 36(3), pp. 156-163.
- Fall, A. 2014. Le Ferlo sénégalais: Approche géographique de la vulnérabilité des anthroposystèmes sahéliens. Thèses de doctorat. Université Paris 13 - Sorbonne Paris Cité. <https://hal.science/tel-01622314>.
- FAO. 1997. Zonage agroécologique. Directives. Bulletin Pédologique de la FAO, no. 73. Rome, Italie. <https://www.fao.org/3/w2962f/w2962f00.htm>
- Fathi, M. M., Awadallah, A. G., et Awadallah, N. A. 2021. Estimation of regional sub-daily rainfall ratios using SKATER algorithm and logistic regression. *Water Resources Management*, 35, pp. 555-571.
- Fiedler, F. R. 2003. Simple, practical method for determining station weights using Thiessen polygons and isohyetal maps. *Journal of Hydrologic engineering*, 8(4), pp. 219-221.
- Fontès, J., et Guinko, S. 1995. Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso.
- Garrett, R. C., Nar, A. et Fisher, T. J. 2022. ggvoronoi: Voronoi Diagrams and Heatmaps with “ggplot2”. <https://CRAN.R-project.org/package=ggvoronoi>.
- Geiger, R. et Pohl, W. 1954. “Eine neue Wandkarte der Klimagebiete der Erde nach W. köppens klassifikation (a new wall map of the climatic regions of the world according to W. Köppen’s classification),” *Erdkunde*, vol. 8, pp. 58–61.
- GIZ. 2012. Good practices in soil and water conservation: a contribution to adaptation and farmers’ resilience towards climate change in the Sahel.
- Gouataine, S. R. 2018. Effets des variabilités pluviométriques sur les systèmes de cultures et adaptations des agriculteurs dans la plaine du mayo-kebbi (sud-ouest du Tchad). Thèses de doctorat. Université de Maroua. <https://theses.hal.science/tel-01789304>.
- Gnoumou, X. N., Yaméogo, J. T., Traoré, M., Bazongo, G., et Bazongo, P. 2017. Adaptation aux changements climatiques en Afrique sub-saharienne : impact du zaï et des semences améliorées sur le rendement du sorgho dans les villages de Loaga et Sika (province du Bam), Burkina Faso/Adaptation to the climatic changes in Africa sub-Saharan: impact of zaï and improved seeds on sorghum yield in the villages of Loaga and Sika (Bam province), Burkina Faso. *International journal of innovation and applied studies*, 19(1), 166 pp.

Guinko S., 1984.- Végétation de Haute Volta. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Bordeaux III, 318 pp.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J. et Thépaut, J. N. 2018. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus climate change service (c3s) climate data store (cds), 10(10.24381).

Husson, F., Le, S. et Pagès, J. 2017. Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R (2 Ed.). Chapman & Hall/CRC.

INSD (Institut national des statistiques et de la démographie). 2019. Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation du Burkina Faso (RGPH). Burkina Faso

Jamro, S., Dars, G. H., Ansari, K., et Krakauer, N. Y. 2019. Spatio-temporal variability of drought in Pakistan using standardized precipitation evapotranspiration index. Applied Sciences, 9(21), 4588.

Jarasiunas, G., Kinderiene, I., et Bašić, F. 2017. Delineation Lithuanian agricultural land for agro-ecological suitability for farming using soil and terrain criteria. Ekológia (Bratislava), 36(1), pp. 88-100.

Kabore, P. N., Barbier, B., Ouoba, P., Kiema, A., Some, L. et Ouedraogo, A. 2019. Perceptions du changement climatique, impacts environnementaux et stratégies endogènes d'adaptation par les producteurs du Centre-nord du Burkina Faso. Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement. (Volume 19 Numéro 1). doi.org/10.4000/vertigo.24637.

Kabore, W. T., Masse, D., Dugué, P., Hien, E. et Lepage, M. 2006. Pratiques innovantes d'utilisation de la fumure organique dans les systèmes de culture et viabilité des agrosystèmes en zone soudano-sahélienne : cas de Ziga (Yatenga, Burkina Faso).

Kaiser, H. F. 1991. Coefficient alpha for a principal component and the Kaiser-Guttman Rule. Psychological Reports, 68(3, Pt 1), pp. 855–858. <https://doi.org/10.2466/PR0.68.3>.

Kaoungku, N., Suksut, K., Chanklan, R., Kerdprasop, K. et Kerdprasop, N. 2018. The silhouette width criterion for clustering and association mining to select image features. International journal of machine learning and computing, 8(1), pp. 69-73.

Kassam, A. H., M. M. Shah, H. T. Van Velthuizen, G. W. Fischer, D. Dent, et I. J. Graham-Bryce. 1990. «Land Resources Inventory and Productivity Evaluation for National Development Planning [and Discussion] ». Philosophical Transactions: Biological Sciences 329 (1255), pp. 391-401.

Kassambara, A. 2017a. Practical guide to cluster analysis in R: Unsupervised machine learning. STHDA.

- Kassambara, A. 2017b. Practical guide to principal component methods in R: PCA, M (CA), FAMD, MFA, HCPC, factoextra. STHDA.
- Koinda F., Souratie M., Montaud, J. M., Ouedraogo E., Zougouri G., Nanema C. B., et Ouedraogo D. 2023. Effets des aléas pluviométriques sur l'agriculture au Burkina Faso : Une analyse EGC sensible au genre. Working Paper 2023-06. PEP Working Paper Series. Partnership for Economic Policies (PEP).
- Koudougou, S., Stiem, L., Kleene, P., Taminy, D. D., Guiguemdé, O., Zango, O., et Kaboré, G. 2017. La Gestion Durable des Terres au Burkina Faso : une analyse d'expériences de projets dans le Houet, le Tuy et le Ioba. Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam, Germany.
- Kumar, J., Mills, R. T., Hoffman, F. M., et Hargrove, W. W. 2011. Parallel k-means clustering for quantitative ecoregion delineation using large data sets. *Procedia Computer Science*, 4, pp. 1602-1611.
- Lahmar, R., & Yacouba, H. 2012. Zaï et potentiel de l'association cultures annuelles arbustes natifs. In Dia, A., & Duponnois, R. (Eds.), *La Grande Muraille Verte : Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux*. IRD Éditions. doi: 10.4000/books.irdeditions.3298.
- Lasantha, V., Oki, T., et Tokuda, D. 2022. Data-Driven versus Köppen–Geiger Systems of Climate Classification. *Advances in Meteorology*, 2022.
- Lawson, R. G., et Jurs, P. C. 1990. New index for clustering tendency and its application to chemical problems. *Journal of chemical information and computer sciences*, 30(1), pp. 36-41.
- Legendre, P., et Legendre, L. 2012. Interpretation of ecological structures. In *Developments in environmental modelling*. Vol. 24, Elsevier, pp. 521-624.
- Liu, M., et Samal, A. 2002. A fuzzy clustering approach to delineate agroecozones. *Ecological modelling*, 149(3), pp. 215-228.
- Lopez, D. 2021. Diagrammes de Voronoï et surfaces évolutives. Thèse de doctorat. Université de Lorraine. Available from: <https://hal.science/tel-03530955>.
- Lüdecke, D., Ben-Shachar, M. S., Patil, I., Waggoner, P. et Makowski, D. 2021. performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models. *Journal of Open Source Software*. 6(60):3139. doi.org/10.21105/joss.03139.
- MAAH/DGESS. 2019. Programme d'activités 2020 du Ministère de l'agriculture et des aménagements hydro-agricoles. Burkina Faso. 102 p.
- Madhulatha, T. S. 2012. An overview on clustering methods. *IOSR Journal of Engineering*, Vol 2(4)(Apr. 2012), pp. 719–725. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1205.1117>



MASA/DGESS. 2014. Second rapport d'étude diagnostique sur les risques agricoles et alimentaires et les outils de gestion au Burkina Faso. Burkina Faso.

Mathieu B. 2021. Les actions innovantes d'AVSF : Le semis à sec et l'enrobage des semences au Burkina Faso. AVSF. 6p. [https://www.avsf.org/public/posts/2612/avsf\\_action-innovante\\_enrobage\\_semences\\_burkina\\_faso\\_oct2021\\_vf.pdf](https://www.avsf.org/public/posts/2612/avsf_action-innovante_enrobage_semences_burkina_faso_oct2021_vf.pdf)

MEEVCC. 2021. Communication sur l'adaptation aux changements climatiques au Burkina Faso. Ministère de l'environnement, de l'économie verte et du changement climatique. Burkina Faso. 43 p. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/burkina-faso-2021-communication-sur-l-adaptation.pdf>

Melchior, L. 2011. Des cordons pierreux contre la désertification. Rurale 21 Plateforme internationale. [https://www.rural21.com/fileadmin/migrated/content/uploads/rural\\_fr\\_58-59\\_2-2011.pdf](https://www.rural21.com/fileadmin/migrated/content/uploads/rural_fr_58-59_2-2011.pdf)

MINEFID/DGDT. 2018. Profils des régions du Burkina Faso. Burkina Faso.

Moeys, J. 2018. The soil texture wizard: R functions for plotting, classifying, transforming and exploring soil texture data. CRAN. R-Project.

Nachtergaele, F., van Velthuisen, H., Verelst, L., Wiberg, D., Henry, M., Chiozza, F., Yigini, Y., Aksoy, E. et Tramberend, S. 2023. Harmonized World Soil Database version 2.0. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Nikiema, A., Ouedraogo, S.J. et Boussim, J. 2001. Situation des ressources génétiques forestières du Burkina Faso. Atelier sous-régional FAO/IPGRI/ICRAF sur la conservation, la gestion, l'utilisation durable et la mise en valeur des ressources génétiques forestières de la zone sahélienne (Ouagadougou, 22-24 sept. 1998). Note thématique sur les ressources génétiques forestières. Document FGR/22F. Département des forêts, FAO, Rome, Italie.

OMM. 2008. Guide des pratiques hydrologiques. Volume I, Hydrologie : de la mesure à l'information hydrologique. OMM-N° 168. Organisation Météorologique Mondiale, Genève, Suisse. <https://library.wmo.int/viewer/32206/>

OMM. 2018. Guide des pratiques climatologiques. OMM-N°100. Organisation Météorologique Mondiale, Genève, Suisse. <https://library.wmo.int/idurl/4/55604>

Openshaw, S. 1977. A geographical solution to scale and aggregation problems in region-building, partitioning and spatial modelling. Transactions of the institute of british geographers, 459-472.

OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel). 2013. Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb. OSS Collection Synthèse n° 4. Tunis, 88 pp.

- Ouattara, K., Serme, I., Bongoungou, S., et Zombre, P. 2017. Soil and water conservation, and soil fertility management effects on rain water productivity of maize hybrid in Burkina Faso. *African journal of agricultural research*, 12(12), pp. 1014-1021.
- Ouedraogo, I., Mbow, C., Balinga, M., et Neufeldt, H. 2015. Transitions in land use architecture under multiple human driving forces in a semi-arid zone. *Land*, 4(3), pp. 560-577.
- Ouédraogo, M., Dembélé, Y., et Somé, L. 2010. Perceptions et stratégies d'adaptation aux changements des précipitations : cas des paysans du Burkina Faso. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 21(2), pp. 87-96.
- Pebesma, E. 2018. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*. 10(1):439–446. doi.org/10.32614/RJ-2018-009.
- Pereira, J. M. C. et Duckstein, L. 1993. A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. *International journal of geographical information systems*. doi.org/10.1080/02693799308901971. pp. 407–424.
- PNA. 2015. Plan national d'adaptation aux changements climatiques du Burkina Faso. Burkina Faso. 155 pp.
- PNSAN. 2013. Politique nationale de sécurité alimentaire et nutritionnelle. Burkina Faso. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/bkf141993.pdf>, 67 pp.
- Prim, R. C. 1957. Shortest connection networks and some generalizations. *The Bell System Technical Journal*, 36(6), pp. 1389-1401.
- R Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Available from: <https://www.R-project.org/>.
- Rey, S., Arribas-Bel, D., et Wolf, L. J. 2023. *Geographic data science with python*. CRC Press.
- Riou, C. 1991. Le zonage agropédoclimatique. Institut National de la recherche Agronomique (INRA), Paris, France. Commission d'Agrométéorologie.
- Ritchie, J. T., et Nesmith, D. S. 1991. Temperature and crop development. *Modeling plant and soil systems*, 31, pp. 5-29.
- Rojas, O. E. et Eldin, M. 1983. Agroclimate potential determination for sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) production in Costa Rica [Central Valley, North Pacific]. *Turrialba (IICA)*, 33(1).
- Roose E., Rodriguez L. 1990. Aménagement de terroirs au Yatenga (Nord-Ouest du Burkina Faso) : quatre années de gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES) : bilan et perspective. Montpellier : ORSTOM, 40 pp.
- Roose, E., Kabore, V., et Guenat, C. 1993. Le zaï : fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des

terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). Cahiers Orstom, série Pédologie, 2, pp. 159-173.

Rousseeuw, P. J. 1987. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of computational and applied mathematics, 20, pp. 53-65.

Saba, F., Sawadogo, H., Cornelis, J. T., Ouedraogo, A. K., Cisse, D., Coulibaly, D. K., et Nacro, H. B. 2022. Gestion efficiente des nutriments par l'utilisation de biochar et compost dans un systeme zai au centre-nord du Burkina Faso. Agronomie Africaine, 34(1), pp. 101-115.

Sanon, K. F. J. 2017. Effets de l'agriculture de conservation sur les flux hydriques, la fertilité du sol et les rendements des cultures dans l'Ouest du Burkina Faso. Mémoire d'Ingénieur. Université Nazi Boni, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 63 p. [https://bibliovirtuelle.unaziboni.bf/biblio/opac\\_css/docnume/idr/environnement2/IDR-2017-SAN-EFF.pdf](https://bibliovirtuelle.unaziboni.bf/biblio/opac_css/docnume/idr/environnement2/IDR-2017-SAN-EFF.pdf)

Sarker, R. P. et Biswas, B. C. 1988. A new approach to agroclimatic classification to find out crop potential. Mausam, 39(4), pp. 343-358.

Savadogo, M., Somda, J., Seynou, O., Zabré, S., et Nianogo, A. J. 2011. Catalogue des bonnes pratiques d'adaptation aux risques climatiques au Burkina Faso. Ouagadougou, Burkina Faso : UICN Burkina Faso. 52 p. ISBN : 978-2-8317-1392-2.

Sawadogo M., Zahonogo P. et Sawadogo, J. P. W. 2022. Analyse des facteurs explicatifs de l'association des cultures au Burkina Faso. Économie rurale. doi: <https://doi.org/10.4000/economierurale.10065>

Saxton, K. E. et Rawls, W. J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil science society of America Journal, 70(5), 1569-1578.

Schröder, W., et Schmidt, G. 2001. Defining ecoregions as framework for the assessment of ecological monitoring networks in Germany by means of GIS and classification and regression trees (CART). Gate to EHS, 2001, pp. 1-9.

Schulzweida, U., Kornblueh, L., et Quast, R. 2019. CDO user guide.

Shesu, R. V., Ravichandran, M., Rao, B. V., et Jampana, V. 2021. Qualitative Regionalization of Bay of Bengal. International Journal, 9(9).

SNRCRS. 2019. Stratégie nationale de restauration, conservation et récupération des Sols au Burkina Faso 2020-2024. Ministère de l'agriculture et des aménagements hydro-agricoles. Burkina Faso. 82 pp. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/bkf198243.pdf>

Sultan B., Lalou R., Kergoat L., Gastineau B., et Vischel T. 2021. « Changements climatiques et agriculture : impacts et adaptation en Afrique de l'Ouest ». In Milieux extrêmes et critiques face au changement climatique : climats, territoires, environnement, 139-54. Géographie. Paris : Sorbonne Université Presses. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010083446>.

- Tabios III, G. Q., et Salas, J. D. 1985. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 21(3), pp. 365-380.
- Tankoano, B., Hien, M., Dibi, N., Sanon, Z., Akpa, Y. et Sokeng, V. J. 2016. Cartographie de la dynamique du couvert végétal du Parc National des Deux Balé à l'Ouest du Burkina Faso [Mapping Land Cover Dynamics of Deux Balé National Park, Western Burkina Faso]. International Journal of Innovation and Applied Studies, 16(4), 837 pp.
- Taruvinga, A., Muchenje, V. et Mushunje, A. 2013. Climate change impacts and adaptations on small-scale livestock production. Int. J. Dev. Sustain., 2, pp. 664–685
- Taupin, J. D. 2003. Précision de l'estimation des précipitations au Sahel selon la densité du réseau d'observation pluviométrique. Comptes Rendus Géoscience, 335(2), pp. 215-225.
- TCN. 2022. Troisième communication nationale sur les changements climatiques. Burkina Faso. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/bfanc2french.pdf>. 268 pp.
- Thorntwaite, C. W. 1948. An Approach Toward a Rational Classification of Climate. The Geographical Review, Vol. 38, pp. 55-94.
- Torquebiau, E., Roudier, P., Demenois, J., Saj, S., Hainzelin, É., et Maraun, F. 2019. Agro-écologie et changement climatique : des liens intimes et porteurs d'espoir. La transition agro-écologique, 245 pp.
- Trisos, C.H., I.O. Adelekan, E. Totin, A. Ayanlade, J. Efitre, A. Gemed, K. Kalaba, C. Lennard, C. Masao, Y. Mgaya, G. Ngaruiya, D. Olago, N.P. Simpson, et S. Zakieldean, 2022: Africa. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, doi:10.1017/9781009325844.011, pp. 1285–1455.
- USDA. 2017. Soil survey manual, Soil Survey Division Staff. Soil Conservation Service; United States Department of Agriculture.
- van Wart, J., van Bussel, L. G., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., et Cassman, K. G. 2013. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. Field crops research, 143, pp. 44-55.
- Vlaar, J.C.J. (Ed.), 1992. Les techniques de conservation des eaux et des sols dans les pays du Sahel. Rapport d'une étude effectuée dans le cadre de la collaboration entre le Comité

Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Ouagadougou Burkina Faso, et l'Université Agronomique Wageningen (UAW), Wageningen, les Pays-Bas.

Waongo, M., Laux, P., et Kunstmann, H. 2015. Adaptation to climate change: The impacts of optimized planting dates on attainable maize yields under rainfed conditions in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology*, 205, pp. 23-39.

Xu, H., Xu, C. Y., Chen, H., Zhang, Z., et Li, L. 2013. Assessing the influence of rain gauge density and distribution on hydrological model performance in a humid region of China. *Journal of Hydrology*, 505, pp. 1-12.

Yaagoubi, R., Faisal, K. et Miky, Y. 2021. Land value assessment based on an integrated Voronoi-geographically weighted regression approach in Makkah, Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Science*, 33(7), 101557.

Zhang, C., Huang, W., Niu, T., Liu, Z., Li, G., et Cao, D. 2023. Review of Clustering Technology and Its Application in Coordinating Vehicle Subsystems. *Automotive Innovation*, 6(1), 89-115.

Zomer, R. J., Xu, J., et Trabucco, A. 2022. Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database. *Scientific Data*, 9(1), 409 pp.

Zongo, K. F., Hien, E., Mare, B. T., et Guebre, D. 2021. Performance de l'association mixte sorgho-niébé sur les productivités du sorgho et des sols en zone Soudano-Sahélienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(3), pp. 987-1005.

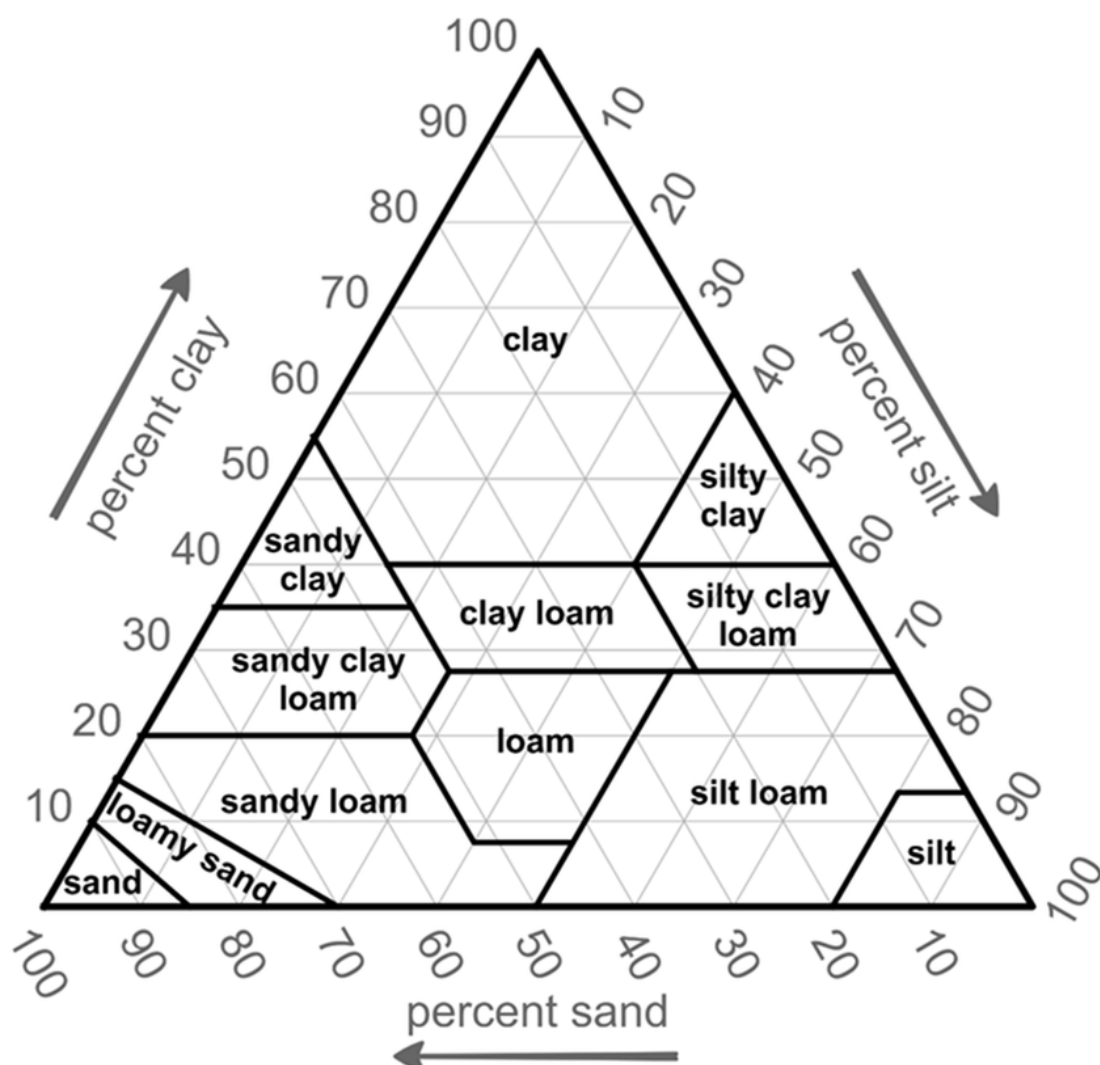
Zougmore, R., Jalloh, A., et Tioro, A. 2014. Climate-smart soil water and nutrient management options in semiarid West Africa: a review of evidence and analysis of stone bunds and zaï techniques. *Agriculture & Food Security*, 3, 1-8.

## ANNEXES

### Annexe 1 : Triangle des textures selon la classification USDA

N°	Lon	Lat	Station	N°	Lon	Lat	Station
1	-1,55	12,47	KAMBOINCE	49	-4,33	11,90	KOUKA
2	-0,77	11,77	NIAOGHO	50	-1,33	12,98	MANE
3	-1,53	12,23	BOULBI	51	2,05	12,67	BOTOU
4	-1,85	14,22	BARABOULE	52	-0,57	12,65	BOULSA
5	-4,33	11,10	FARAKO-BA (AGRO)	53	-1,77	13,90	POBE
6	-5,35	10,58	LOUMANA	54	-3,38	12,77	LERI
7	-4,38	11,37	VALLEE DU KOU	55	-1,37	11,43	BETARE
8	-2,15	12,27	SARIA	56	-3,77	11,85	BONDOUKUY
9	-2,67	13,82	THIOU-OUAHIGOUYA	57	-1,07	12,77	KORSIMORO
10	-2,92	9,88	BATIE	58	0,02	11,53	OUARGAYE
11	-4,92	10,27	NIANGOLOKO	59	-3,43	11,97	WONA
12	-2,07	13,77	TITAO	60	-0,87	14,23	ARIBINDA
13	-4,35	9,90	MANGODARA	61	-1,55	13,68	BOURZANGA
14	-1,00	12,82	BOUSSOUMA	62	-3,07	11,15	DANO
15	-0,23	14,45	GOROM-GOROM	63	-1,30	12,62	GUILONGOU
16	-3,83	10,40	OUO	64	-5,42	10,53	BAGUERA
17	1,03	12,37	MATIAKOUALY	65	-2,37	12,32	REO AGRI
18	1,70	11,87	NAMOUNOU	66	-4,92	10,98	ORODARA
19	-1,20	11,55	NOBERE	67	-2,18	12,68	NANORO
20	-3,42	13,17	DI-SOUROU	68	-4,77	10,62	BANFORA
21	-1,88	12,67	BOUSSE	69	-3,68	11,62	BEREBA
22	-3,22	12,82	SOUROU-GASSAN	70	-3,52	11,48	HOUNDE
23	-4,73	10,75	BEREGADOUGOU	71	1,75	11,70	MAHADAGA
24	-0,97	11,10	TIEBELE	72	-3,70	11,23	KOUMBIA
25	-3,67	12,08	OUARKOYE	73	-4,80	10,08	OUANGOLODOUGOU
26	-2,18	11,65	GAO	74	0,70	11,25	PAMA
27	-2,35	13,20	GOURCY	75	-2,90	12,77	TOMA
28	-3,30	13,08	KASSOUM	76	-1,07	13,42	BARSALOGHO
29	-1,77	11,55	SAPOUY	77	-2,50	11,05	BOURA
30	-2,62	12,57	DIDYR	78	-3,18	10,33	GAOUA
31	-1,33	12,07	KOMBISSIRI	79	-0,35	12,18	KOUELA
32	-0,13	12,70	PIELA	80	0,52	13,43	SEBBA
33	-3,47	10,13	KAMPTI	81	-4,08	12,18	SOLENZO
34	0,48	12,65	GAYERI	82	-4,30	11,17	BOBO-DIOULASSO
35	-0,50	13,32	TOUGOURI	83	-0,13	12,98	BOGANDE
36	-2,20	11,95	THIOU-KOUDOUYOU	84	-2,92	11,73	BOROMO
37	-1,97	13,43	SEGUENEGA	85	-0,23	13,28	DAKIRI
38	-4,38	12,42	TANSILLA	86	-3,48	12,47	DEDOUGOU
39	-2,72	13,25	KIEMBARA	87	-0,03	14,03	DORI
40	-1,72	12,27	TANGHIN DASSOURI	88	0,35	12,07	FADA N GOURMA
41	-3,18	13,43	TOENI	89	-5,17	10,67	SINDOU
42	-0,02	12,55	BILANGA	90	-5,02	10,48	SOUBAKANIEDOUGOU
43	-3,22	12,13	SAFANE	91	-1,77	13,05	TEMA
44	-2,68	12,18	TIOGO	92	0,33	12,30	YAMBA
45	-1,88	12,18	KOKOLOGHO	93	-0,62	12,25	ZORGHO
46	-2,03	12,43	KINDI	94	-1,52	12,35	OUAGADOUGOU
47	-2,43	13,58	OUAHIGOUYA	95	-4,25	10,68	SIDERADOUGOU
48	-1,15	11,17	PO				

## Annexe 2 : Triangle des textures selon la classification USDA



### Annexe 3 : Caractéristiques hydrophysiques du sol selon la texture (Saxton et Rawls, 2006)

Texture (anglais)	Texture (français)	Abréviation	Capacité au champs (fc) (%)	Point de flétrissement (pwp) (%)	Point de saturation (sat) (%)	Conductivité hydraulique (ks) (mm/h)
Clay	Argile	Cl	42	30	50	1.1
Silty Clay	Argile limoneuse	SiCl	41	27	52	3.7
Sandy Clay	Argile sableuse	SaCl	36	25	44	1.4
Clay Loam	Limon argileux	ClLo	36	22	48	4.3
Silty Clay Loam	Limon argileux fin	SiClLo	38	22	51	5.7
Sandy Clay Loam	Limon argilo-sableux	SaClLo	27	17	43	11.3
Loam	Limon	Lo	28	14	46	15.5
Silty Loam	Limon fin	SiLo	31	11	48	16.1
Sandy Loam	Limon sableux	SaLo	18	8	45	50.3
Silt	Limon très fin	Si	30	6	48	22.0
Loamy Sand	Sable limoneux	LoSa	12	5	46	96.7
Sand	Sable	Sa	10	5	46	108.1

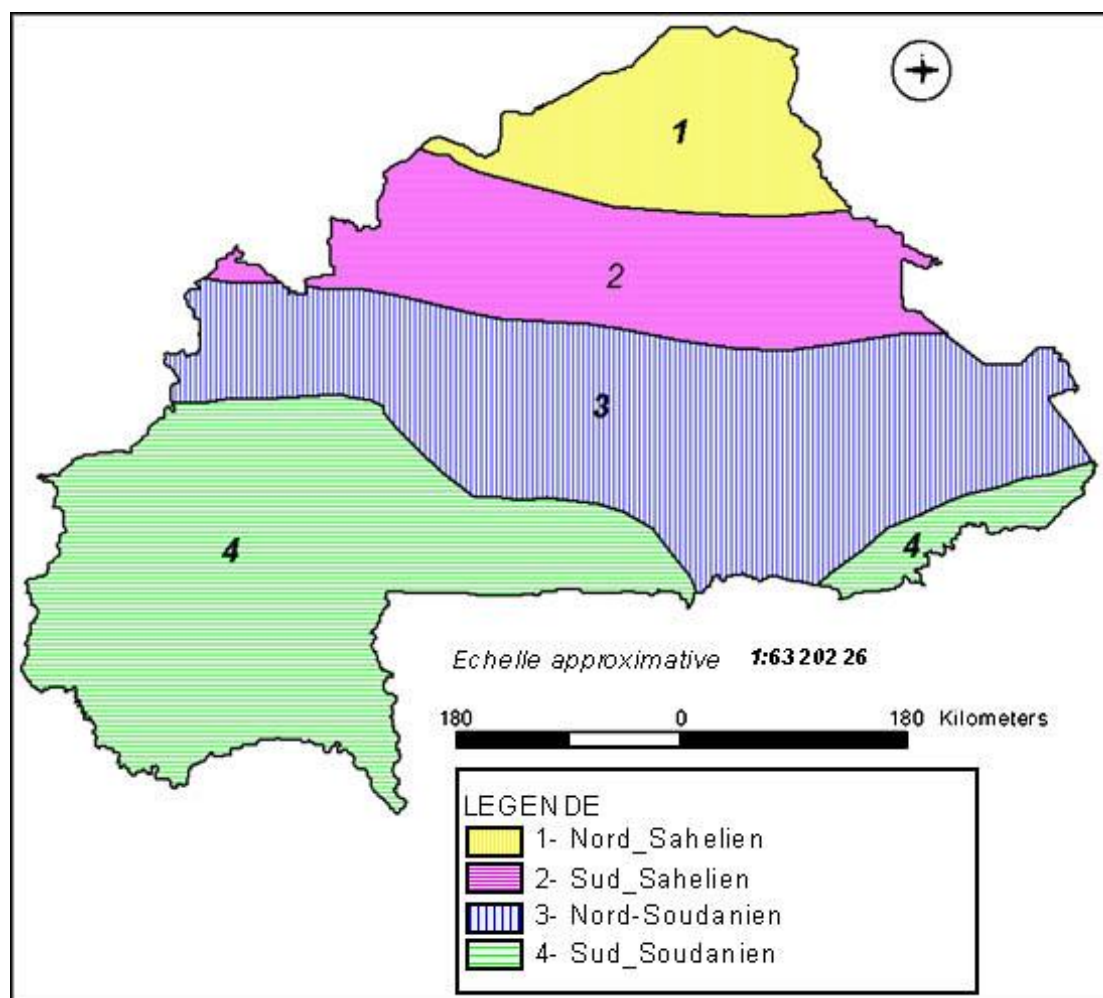
### Annexe 4 : Abréviation des variables agroclimatiques et édaphiques

Abréviation	Nom variable
(s_ ou t_) awc	Contenu en eau disponible
ai	Indice d'aridité
tx	Température maximale
tn	Température minimale
ls	Longueur de la saison agricole
(s_ ou t_) ks	Conductivité hydraulique
(s_ ou t_) sat	Point de saturation

Préfixe s\_ : couche inférieure (40-100 cm) ; t\_ : couche supérieure (0-40 cm)



**Annexe 5 : Zonage climatique du Burkina Faso, proposé par Guinko et al., (1984),  
tiré de la publication de Nikiema et al. (2021).**



Annexe 6 : Textures de sols au Burkina Faso pour six couches entre la surface et 150 cm de profondeur. Source : HWSO v2

