

## Caractérisation et évaluation de l'aptitude culturelle d'un sol pour la production de tomate sous climat tropical semi-aride

***Koulibi Fidèle Zongo***

Centre Universitaire de Tenkodogo,  
Université Thomas SANKARA, Ouagadougou, Burkina Faso

***Daouda Guebre***

Centre universitaire de Ziniaré,  
Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso

***Aboubacar Coulibaly***

Ecole Normale Supérieure, Ouagadougou, Burkina Faso

***Pakisba Anicet Wenceslas Daramkoum***

Centre Universitaire de Tenkodogo,  
Université Thomas SANKARA, Ouagadougou, Burkina Faso

***Issouf Sanou***

Bureau National des SOLS (BUNASOLS), Ouagadougou, Burkina Faso

***Edmond Hien***

Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre,  
Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso

[Doi:10.19044/esj.2024.v20n27p208](https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n27p208)

Submitted: 15 August 2024

Accepted: 20 September 2024

Published: 30 September 2024

Copyright 2024 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

*Cite As:*

Zongo K.F., Guebre D., Coulibaly A., Daramkoum P.A.W., Sanou I. & Hien E. (2024). *Caractérisation et évaluation de l'aptitude culturelle d'un sol pour la production de tomate sous climat tropical semi-aride*. European Scientific Journal, ESJ, 20 (27), 208.

<https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n27p208>

### Résumé

Les connaissances empiriques de la nature des sols sont des contraintes pour la mise en valeur optimale de la ressource sol au sein des petites exploitations familiales du Burkina Faso. Ainsi, pour une meilleure valorisation sectorielle du potentiel des sols, la présente étude a consisté à la caractérisation et à l'évaluation de l'aptitude culturelle d'un sol pour la production de tomate. Le sol a été ainsi caractérisé selon les directives de la FAO (1994) et son aptitude culturelle déterminée selon le manuel d'évaluation des terres du Bureau National des Sols (BUNASOLS, 1990). Les résultats des

travaux révèlent que le sol est de type ferrugineux tropical lessivé induré profond et correspond à un *Lixisol endoplinthique*. Sur le plan physique, la structure est polyédrique subangulaire faiblement développée en éléments grossiers, fins et moyens dans le premier horizon et massive dans l'horizon sous-. La texture du sol est limoneuse en surface, limono-argileuse dans la partie médiane et argileuse en profondeur. Sur le plan chimique, ce sol est caractérisé de l'horizon supérieur à celui inférieur par un rapport C/N de 7, un  $pH_{H_2O}$  moyennement acide de 6 à 5,7 ; une capacité d'échange cationique de 8,62 à 8,15 méq/100 de sol. En référence aux normes d'interprétation du BUNASOLS (1990), la valeur de la capacité d'échange cationique du sol est basse car comprise entre 5 et 10 méq/100 g de sol. En comparaison avec les exigences de la culture de la tomate, le sol présente des carences physiques liés à une mauvaise condition d'enracinement du fait de la profondeur effective limitée, la texture argileuse en profondeur limitant la pénétration et la colonisation des racines des plantes de tomate. Aussi, le sol est déficient en éléments nutritifs en raison de la basse valeur de la capacité d'échange cationique. Il découle ainsi de l'évaluation que le sol a une aptitude moyenne (S2nr) pour la culture de la tomate.

---

**Mots-clés:** Sol, caractérisation, évaluation technique, aptitude culturale, tomate, Burkina Faso

---

## **Characterization and Evaluation of Soil Suitability for Tomato Production in a Semi-Arid Tropical Climate**

***Koulibi Fidèle Zongo***

Centre Universitaire de Tenkodogo,  
Université Thomas SANKARA, Ouagadougou, Burkina Faso

***Daouda Guebre***

Centre universitaire de Ziniaré,  
Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso

***Aboubacar Coulibaly***

Ecole Normale Supérieure, Ouagadougou, Burkina Faso

***Pakisba Anicet Wenceslas Daramkoum***

Centre Universitaire de Tenkodogo,  
Université Thomas SANKARA, Ouagadougou, Burkina Faso

***Issouf Sanou***

Bureau National des SOLS (BUNASOLS), Ouagadougou, Burkina Faso

***Edmond Hien***

Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre,  
Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso

---

### **Abstract**

Empirical knowledge of the nature of soils is a constraint to the optimal use of soil resources on small family farms in Burkina Faso. With a view to making better use of soil potential by sector, this study involved characterizing and assessing the suitability of soil for tomato production. The soil was characterized in accordance with FAO guidelines (1994), and its suitability for cultivation was determined in accordance with the Bureau National des Sols land evaluation manual (BUNASOLS, 1990). The results of the work reveal that the soil is of the deep indurated leached tropical ferruginous type and corresponds to an endolithic Lixisol. Physically, the structure is subangular polyhedral, with coarse, fine, and medium elements in the first horizon and massive elements in the sub-horizon. Soil texture is silty on the surface, silty-clayey in the middle, and clayey at depth. Chemically, the soil is characterized from the upper to the lower horizon by a C/N ratio of 7; a moderately acidic pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> of 6 to 5.7; a cation exchange capacity of 8.62 to 8.15 meq/100g soil; and a sum of exchangeable bases of 4.59 to 6.13 meq/100g soil. In reference to the BUNASOLS (1990) interpretation standards, the cation exchange capacity of soil value is low, ranging from 5 to 10 meq/100 g of soil. Compared with the requirements of tomato cultivation, the soil shows physical deficiencies linked to poor rooting conditions due to the limited effective

depth, with the deep clay texture limiting the penetration and colonization of tomato plant roots. The soil is also deficient in nutrients due to its low cation exchange capacity. As a result of this assessment, the soil has an average suitability (S<sub>2nr</sub>) for tomato cultivation.

---

**Keywords:** Soil, characterization, technical evaluation, cultivation suitability, tomato

## Introduction

La tomate (*Lycopersicon esculentum* L.), est l'un des légumes-fruits les plus consommés dans le monde en général et au Burkina Faso en particulier. Elle occupe dans la culture maraîchère du pays, la seconde place après tt l'oignon bulbe, en termes de production et de superficies emblavées. C'est environ vingt un pourcent (21%) de la production maraichère totale du pays (MASA, 2013). La filière se distingue avec une production qui a atteint la barre des 300 000 tonnes l'an. La superficie emblavée en tomate était de 10 284 ha (MAAH, 2021). La superficie a augmenté de 1 519 364 ha de 2018 à 2021 soit une hausse superficiare de 32 %, imputable aux actions de soutien gouvernemental à la filière (MAAHM, 2021a). Malgré cette hausse de production, la demande en tomates du marché intérieur burkinabè n'est pas satisfaite. La culture de tomate constitue de ce point de vue une véritable opportunité d'activité génératrice de revenue pour une réduction de la pauvreté en milieux péri-urbain et rural (SCADD, 2010). La production de tomate d'une valeur totale estimée à 17 469 073 587 FCFA représentait 21 % du chiffre d'affaires des maraichers (MAH, 2011).

La tomate préfère les terres à texture limoneuse, profondes, bien drainées et riches en matières organiques (Shankara *et al.*, 2020). Cependant, les caractéristiques pédologiques du Burkina Faso ne permettent pas une optimisation de la production. En effet, l'une des contraintes à la production de la tomate est la pauvreté physico-chimique et biologiques des sols. Les principales causes de la dégradation des terres agricoles sont l'érosion des sols et la culture continue avec peu ou pas d'intrants (Tully *et al.*, 2015 ; Nezomba *et al.*, 2017). L'érosion hydrique serait responsable de la dégradation de 227 millions d'hectares en Afrique et causerait une perte de production de 280 millions de tonnes de céréales par an (ELD INITIATIVE et UNEP, 2015). Aussi, la faible teneur en matière organique due à l'exportation des résidus, le surpâturage et le brûlage de la biomasse ; et le labourage excessif et la culture de terres marginales sont les causes de cette dégradation (Jones *et al.*, 2015 ; Nezomba *et al.*, 2017). En guise d'exemple, les pertes d'éléments nutritifs dues uniquement à l'érosion dans les sols africains varient de 10 à 45 kg de NPK/ha par an (Henao et Baanante, 2006). Il a été estimé que sur les quelque 494 millions d'hectares de terres en Afrique subsaharienne touchées par la

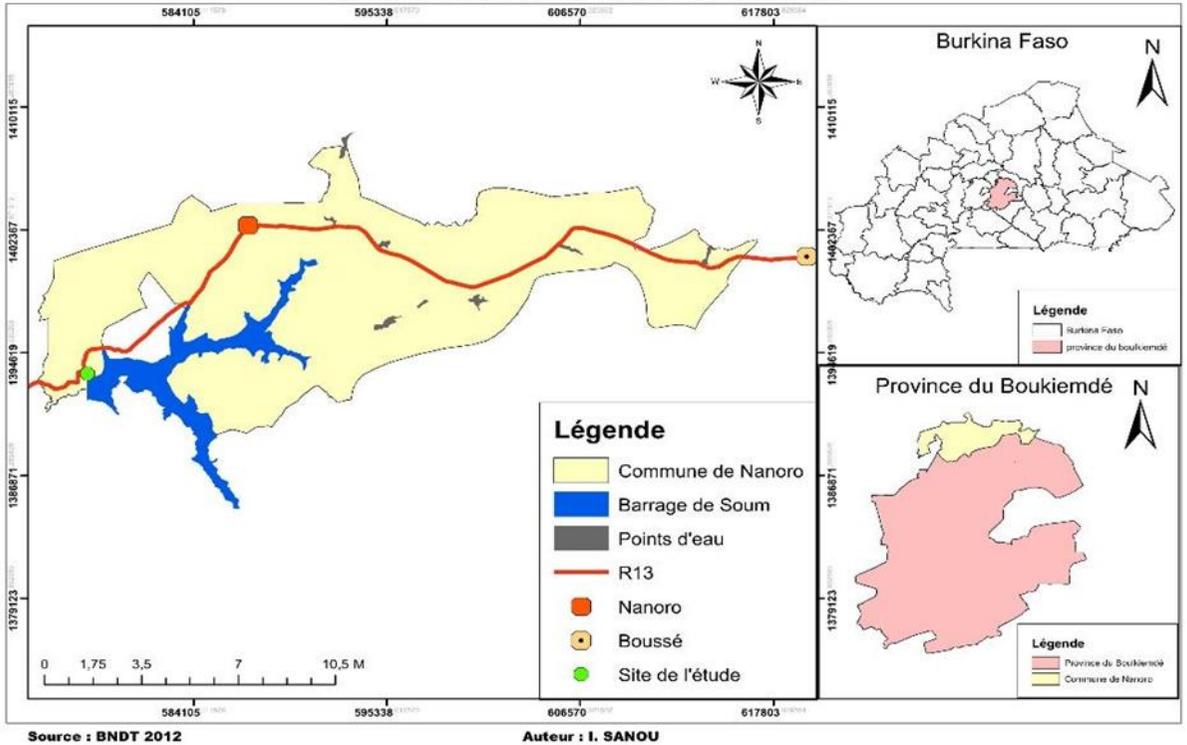
dégradation des sols, 46 % sont affectés par l'érosion hydrique, 38 % par l'érosion éolienne, 12 % par la dégradation chimique et 4 % par la dégradation physique (FAO et ITPS, 2015). La dégradation des sols est en augmentation dans la région, avec plus de 20 % des terres déjà dégradées dans la plupart des pays d'Afrique subsaharienne, affectant plus de 65 % de la population ; cela entraîne des effets négatifs importants sur la production alimentaire et les moyens d'existence (FAO et ITPS, 2015).

Au Burkina Faso, selon la situation de dégradation des terres en 2018, il ressort qu'environ 31 % du territoire est touché par la dégradation des terres (MAAHM, 2021b). Selon Pallo *et al.* (2008 et 2009), dans les régions sahéenne et sud-soudanienne du pays, la teneur en matière organique totale est de 0,6%, donc faible. Or, la teneur en matière organique, en influençant les propriétés physico-chimique du sol détermine sa richesse biologique et en éléments minéraux (Pallo *et al.*, 2006). De plus, les sols du Burkina sont initialement pauvres en éléments nutritifs essentiels notamment en azote et phosphore (Bationo *et al.*, 2014). Les teneurs en azote et en phosphore de la majeure partie des sols sont généralement inférieures à 0,06 % (UA/SAFGRAD, 2010). Le déficit en éléments nutritifs était évalué à 14 kg N, 2 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 10 kg K<sub>2</sub>O par hectare selon Bationo *et al.* (1998). Les extractions annuelles de nutriments du sol étaient de -43 kg NPK/ha en zone soudano-sahéenne du Burkina Faso dans les systèmes d'agriculture minière (Henaou et Baanante, 006). Cette dégradation des sols entraîne une baisse de leurs fertilités et productivités. Pour insuffler une dynamique d'amélioration de la production des cultures en générale et de la tomate en particulier, il est nécessaire de cerner les caractéristiques des sols afin d'identifier les leviers de leurs performances agronomiques. Les informations sur le sol et de ces propriétés associées obtenues à partir de l'étude et de la classification du sol peuvent aider à leur meilleure utilisation. Ainsi, la présente étude vise à caractériser un sol en relevant les informations relatives à l'utilisation et à déterminer l'aptitude ou non à la culture de la tomate.

## **1. Matériel et méthodes**

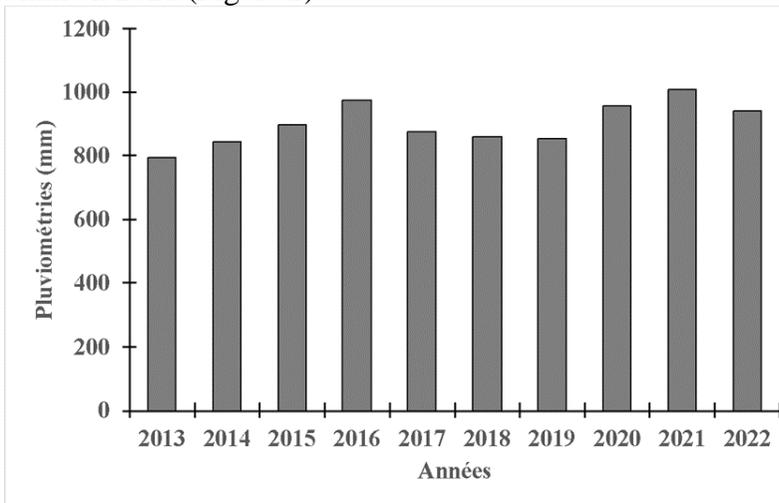
### **1.1. Présentation de la zone d'étude**

L'étude a été conduite dans la commune rurale de Nanoro (WGS84, 30P 577800, 1393390 UTM) dans la région administrative du Centre Ouest du Burkina Faso (Figure 1). La commune appartient à la région climatique soudano sahéenne avec un régime climatique monomodale : une saison sèche et une saison pluvieuse. Les sols du site d'étude appartiennent à quatre classes, à savoir, les sols minéraux bruts, les sols brunifiés, les sols a sesquioxydes de fer (ou de manganèse) et les sols hydromorphes (BUNASOLS, 2014). La fertilité des sols et l'irrégularité de la pluviométrie sont les contraintes auxquelles les producteurs adaptent leurs pratiques culturelles.



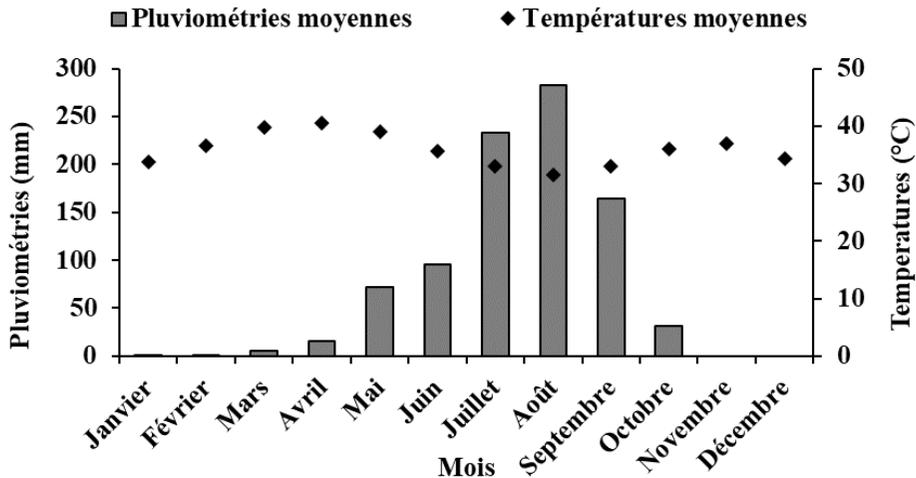
**Figure 1.** Localisation du site de l'étude

La pluviométrie moyenne des 10 dernières années a été de  $900,40 \pm 67,40$  mm. Cette pluviométrie a varié de 795,30 mm en 2013 à 1010,30 mm en 2021 (Figure 2).



**Figure 2.** Variation de la pluviométrie du site d'étude de 2013 à 2022

La figure 3 montre que de 2013 à 2022, les mois de novembre et de décembre sont les moins pluvieux avec respectivement 0 mm et le mois d'août le plus pluvieux avec en moyenne  $282,10 \pm 52,19$  mm. Les températures moyennes au cours de cette même période ont été de  $35,84 \pm 2,86$  °C avec un pic de 40,55 °C en avril et une température moyenne basse de 31,57 °C en août (Figure 3).



**Figure 3.** Variation de la pluviométrie et de la température moyennes mensuelles de 2013 à 2022

Les principales formations végétales rencontrées dans la commune rurale de Nanoro sont la savane herbeuse, arbustive et la forêt galerie le long des cours d'eau (Fontes et Guinko 1995). La végétation naturelle du périmètre est fortement perturbée du fait des activités anthropiques. Les espèces ligneuses courantes sont (Fontes et Guinko 1995): *Lannea microcarpa* ; *Parkia biglobosa* ; *Guiera senegalensis* ; *Vitellaria paradoxa* ; *Ziziphus mauritiana* ; *Azadirachta indica* ; *Balanites aegyptiaca* ; Le réseau de drainage des eaux est colonisé, dans sa partie orientale consacrée aux activités pastorales, par un peuplement de *Mitragyna inermis* et *Piliostigma thonningii* et dans les parties fortement exploitées en agriculture, par des espèces plus rares de *Ficus gnaphalocarpa* ; *Acacia seyal* ; *Terminalia macroptera*. La strate herbacée est diversifiée et comprend : *Boerhavia diffusa* ; *Gomphrena seratta* ; *Echium vulgare* ; *Amaranthus spinosus* ; *Euphorbia prostrata* ; *Vetiveria nigricans* ; *Andropogon ascinodis* ; *Andropogon gayanus* ; *Pennisetum pedicellatum* ; *Hyptis spicigera* ; *Loudetia togoensis*.

## 1.2. Caractérisation morphopédologique du sol

Les travaux de terrain ont été effectués sur le site d'étude d'une superficie de 5 ha. L'emplacement du profil étudié a été effectué par la

méthode du quadrillage systématique associée à celle de la topo séquence. Le terrain étant moins complexe, les observations ont été faites selon la méthodologie de prospection pédologique (BUNASOLS,1989). L'étude étant réalisée à une échelle de 1/5 000<sup>ème</sup>, 4 observations par ha pour un total de 20 observations ont été effectuées. A l'issue des observations, 3 profils ont été ouverts et décrits, et un seul profil représentatif a été retenu pour la présente étude. Le profil pédologique a été décrit suivant les directives de la FAO (1994) adapté au contexte pédoclimatique burkinabé dans le document technique n°6 du BUNASOLS (1990). Les couleurs du sol étudié sont déterminées à l'aide du Code Munsell (édition, 2000). La classification du sol a été faite conformément à celle de la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS, 1967). Des corrélations ont été faites avec la Base de Référence Mondiale pour les ressources en sols (WRB 2015). Les principales caractéristiques morphopédologiques ont été ainsi déterminées.

### 1.3. Méthodes d'analyse physique et chimique des sols

Le prélèvement des échantillons a été fait après la description du profil pédologique. Cinq cent gramme (500 g) de terre ont été prélevé par horizon. Au total trois échantillons dans un profil, à raison d'un échantillon par horizon ont été prélevés. Les échantillons du sol prélevés ont été ensuite séchés et, tamisés à 2 mm pour les analyses. Les paramètres physiques et chimiques des échantillons de sols ont été déterminés selon les méthodes consignées dans le tableau I.

**Tableau I.** Méthodes d'analyse des paramètres du sol

<b>Paramètres analysés</b>	<b>Méthodes utilisées</b>
Granulométrie 3 fractions	Par hydrométrie spéciale calibrée à 20 °C
Matière organique	Walkey and Black (1934)
Potassium disponible	Houba <i>et al.</i> (1988)
Phosphore assimilable	Bray, Kurtz (1945)
Azote et phosphore total	Kjeldahl (1883)
Bases échangeables/CEC	Metson (1956)
pHH <sub>2</sub> O	AFNOR (1999)

### 1.4. Méthode d'interprétation des résultats de caractérisation des sols

La fertilité du sol étudié a été déterminée à partir des paramètres analytiques. Cette étude étant pour une mise en valeur de ce sol, le maraîchage modéré (B42) a été préalablement défini comme type d'utilisation. Ainsi, six (06) qualités du sol jugé pertinentes ont été choisies pour une description quantitative de leurs facteurs diagnostiques. Ces qualités sont le régime thermique (c), la disponibilité en eau (m), la disponibilité en oxygène dans la zone racinaire (w), la disponibilité en éléments nutritifs (n) et la capacité de rétention (n'), les conditions d'enracinement (r), puis le risque d'inondation (i). Des valeurs moyennes pondérées de ces paramètres ont été calculées dans

les 40 premiers centimètres selon les normes techniques du BUNASOLS (1990) pour la matière organique, l'azote total, le phosphore total, le phosphore assimilable, le potassium total et le potassium disponible. Il a porté principalement sur les 40 premiers centimètres du sol compte tenu des types d'utilisation des terres envisagés. Ces valeurs sont calculées à partir de la formule suivante :

$$P = (A \times H_1) + (40 - H_2) B / 40$$

Avec : P = valeur du paramètre chimique; H<sub>1</sub> = épaisseur de l'horizon 1 ; H<sub>2</sub> = épaisseur de l'horizon 2 ; A = valeur lue du paramètre chimique sur H<sub>1</sub> ; B : valeur lue du paramètre chimique sur H<sub>2</sub> ; et 40 = constante

Si H<sub>2</sub> > 40 on applique la formule ; si H<sub>2</sub> < 40 on continue sur l'horizon suivant et on applique la formule. Ainsi, pour les autres paramètres, il a été pris en compte la profondeur 40 à 100 cm. Si le profil ayant présenté une induration à moins de 100 cm la profondeur utile est à considérer.

Les données de terrain et de laboratoire, ainsi que l'évaluation de la qualité agronomique du sol ont été interprétées en référence aux normes internationales adaptées par le BUNASOLS (1990) aux réalités pédoclimatiques du Burkina Faso (Tableaux II et III).

**Tableau II.** Classe d'interprétation des paramètres chimiques

Paramètres sols	très bas	bas	moyen	élevé	très élevé
Matière organique (MO) %	< 0,5	0,5 - 1,0	1,0-2,0	2,0-3,0	> 3,0
Azote total (N) %	< 0,02	0,02-0,06	0,06-0,10	0,10-0,14	> 0,14
Phosphore assimilable (P) Ppm	< 5	5 - 10	10-20	20- 30	> 30
Phosphore total (P') ppm	< 100	100 - 200	200-400	400-600	> 600
Potassium disponible (K) Ppm	< 25	25 - 50	50-100	100-200	> 200
K total (K') pmm	< 500	500-1000	1000-2000	2000-4000	> 4000
CEC (T) méq/100g	< 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20
Saturation en bases (S/T) %	< 20	20 - 40	40-60	60 - 80	> 80
Somme des bases (S) méq/100g	< 1	1 - 6	6 - 11	11 - 16	> 16

Source : BUNASOLS, 1990

**Tableau III.** Classes d'interprétation du pH et du rapport C/N

	<b>Extrêmement acide</b>	<b>Très fortement acide</b>	<b>Fortement acide</b>	<b>Moyennement acide</b>	<b>Faiblement acide à neutre</b>	<b>Légèrement alcalin</b>
<b>pH<sub>H2O</sub></b>	<4,5	4,6-5,0	5,1-5,5	5,6-6,0	6,1-7,3	7,4-7,8
<b>Rapport C/N</b>	6	8	9-10	11-12	13-14	15-20
	Très faible	Faible	Normal	Légèrement élevé	Elevé	Très élevé
	Sol à décomposition rapide de la matière organique		Bonne décomposition de la matière organique		Sol d'activité biologique réduite et une décomposition lente de la matière organique	

Source : BUNASOLS, 1990

### 1.5. Méthodes de détermination de la classe d'aptitude culturale

Les classes d'aptitudes sont représentées par des lettres minuscules pour les aptitudes partielles et majuscules pour les aptitudes finales : S1 – s1 : aptitude élevée, pas de limitations sérieuses ou seulement mineures pour la production ; S2 – s2 : aptitude moyenne, limitations moyennement sérieuses réduisant la production ; S3 – s3 : aptitude marginale, limitations sérieuses réduisant considérablement la production ; N1 – n1 : inaptitude actuelle, ayant des limitations surmontables avec le temps mais qu'on ne peut pas corriger actuellement à un prix acceptable ; N2 – n2 : inaptitude permanente, ayant des limitations très sérieuses interdisant toutes possibilités de réussite. Les classes d'aptitudes S2, S3 et N1 sont accompagnées d'une ou deux lettres minuscules indiquant la ou les contraintes. Exemple : S2nr indique une aptitude moyenne à cause des contraintes de fertilité (n) et des problèmes d'enracinement (r).

Le régime thermique (c) : Il s'applique aux températures de la période de croissance des cultures dont les termes critiques correspondent à des valeurs minimales et maximales de température pour chaque type d'utilisation. La température moyenne de la période de croissance est le facteur diagnostic de cette qualité de terres. Elle influe sur la vitesse de croissance des plantes.

La disponibilité en eau (m) : La disponibilité en eau pour la réussite d'un Type d'Utilisation des Terres est influencée par plusieurs facteurs dont le climat, le sol, les formes de terrain et l'hydrologie. Elle a été estimée à partir de la pluviométrie moyenne annuelle et de la longueur de la période de croissance. La réserve en eau qui varie d'un type de sol à l'autre et d'un profil à l'autre n'a pas été pris en compte dans la présente évaluation.

La disponibilité en oxygène dans la zone racinaire (w) est assurée par le drainage naturel interne des sols et déterminée par les observations sur le terrain (couleur du sol, taches d'oxydoréduction, présence de nappe phréatique). La classe de drainage FAO est le facteur diagnostique qui permet d'apprécier cette qualité : Classe 0 : drainage très pauvre ; Classe 1 : drainage pauvre ; Classe 2 : drainage imparfait ; Classe 3 : drainage modéré ; Classe 4

: drainage normal ; Classe 5 : drainage légèrement excessif ; Classe 6 : drainage excessif.

La disponibilité en éléments nutritifs (n) et la capacité de rétention (n') : les facteurs diagnostiques retenus l'appréciation sont : la classe de fertilité estimée à partir de la somme des bases (S), la réaction du sol (pH) et la capacité d'échange cationique (CEC), permettant d'évaluer les quantités maximales d'engrais à apporter en évitant des pertes par lessivage.

Les conditions d'enracinement (r) sont déterminées par la profondeur effective du sol et par l'aisance de pénétration des racines. La profondeur effective du sol est la profondeur réelle de ce sol jusqu'à l'horizon obstruant (induration et roche). L'aisance de pénétration des racines est régie par les propriétés texturales, structurales et graveleuses de consistance. Cette qualité est donc appréciée à partir des classes texturales de la FAO, de la profondeur effective du sol, de la charge graveleuse, de la structure et de la consistance du sol.

Le risque d'inondation (i) se rapporte aux effets défavorables d'une lame d'eau plus ou moins épaisse, stagnante ou en mouvement au-dessus de la surface du sol. Cette qualité est appréciée à partir de la position topographique, de la durée (jours) et fréquence (probabilité) de l'inondation.

Une conformation entre les qualités retenues du sol et les exigences de la culture de tomate a servi pour mettre en évidence la classe d'aptitude du sol à production de la tomate. Les résultats de l'évaluation du sol ont été ensuite présentés dans une carte d'aptitude à partir des résultats d'interprétation des données pédologiques et d'évaluation des terres. Les unités ou classes d'aptitude regroupent les unités cartographiques présentant les mêmes potentiels d'utilisation et les mêmes contraintes. La carte a été réalisée à l'aide du logiciel ArcGis version 10.3.1.

## **2. Résultats**

### **2.1. Pédogénèse et type de sol étudié**

Le matériau originel et minéralogique du sol a été formé à partir du complexe d'altération kaolinique. Sur le plan pédogénétique, on a des roches granitique (acides). Un seul type de sol a été identifié sur le site. Il appartient à la classe des sols à sesquioxyde de fer et de manganèse et au sous-groupe sol ferrugineux tropical lessivé induré profond (FLIP) (CPCS, 1967). Il correspond à un *Lixisol endoplinthique* (WRB 2015).



**Figure 4.** Profil de référence du sol

## **2.2. Caractéristiques physiques du sol**

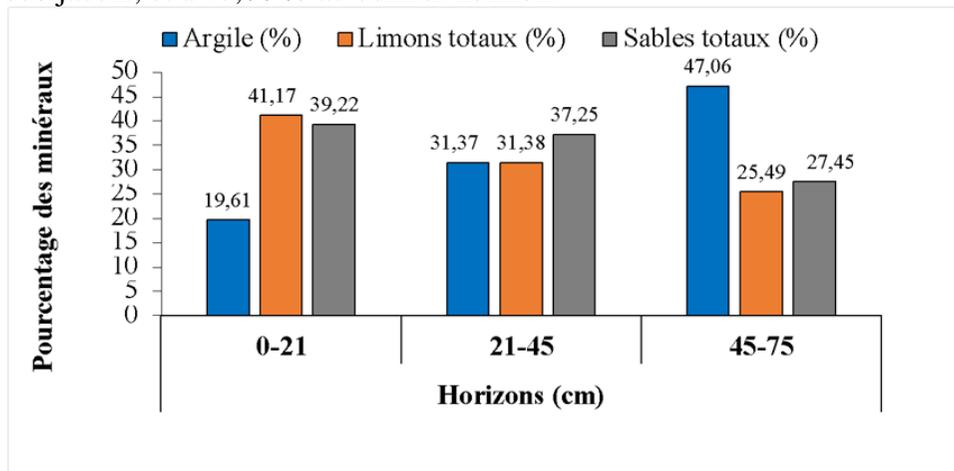
Le sol est situé sur une pente moyenne du glacis en position exondée. Leur état de surface est marqué par des épandages de graviers et de pierres dans la partie Sud-est du site. Le site est aussi traversé par un drain dans sa partie Nord-ouest. Le sol a une profondeur de 75 cm où il a été distingué trois horizons respectivement de 0-21 cm pour le premier horizon, de 21-45 cm pour l'horizon sous-jacent et de 45-75 cm pour le dernier horizon (Tableau IV). Il présente une bonne porosité et un drainage normal. La couleur matricielle est brune jaunâtre en surface et rouge jaunâtre dans le reste du profil. Le taux d'éléments grossiers augmente avec la profondeur. Il est de l'ordre de 5 % dans le premier horizon, 30 % dans l'horizon sous-jacent et 70 % au-delà. La structure est polyédrique subangulaire faiblement développée en éléments grossiers, fins et moyens dans le premier horizon et massive dans l'horizon sous-jacent. La texture est limoneuse en surface, limono-argileuse dans la partie médiane et argileuse en profondeur. La consistance est friable dans l'horizon de surface et ferme dans le reste du profil. Les racines sont nombreuses, fines, très fines et grossières dans le premier horizon. Au second horizon, elles sont peu nombreuses, de tailles très fines, fines et moyennes.

**Tableau IV.** Synthèse des caractéristiques morphologiques du profil

Horizons (cm)	Couleur		Charge graveleuse (%)	Structure	Texture
	Couleur à frais	RVB			
0-21	10YR 4/4	Brun jaunâtre	5	FA-PS-G-M-FI	Limon
21-45	7,5YR 6/6	Jaune rougeâtre	30	MA	Limon-argile
45-75	7,5YR 6/6	Jaune rougeâtre	70	FA-PS-FI-M	Argile
	Consistance à frais	Drainage	Densité et dimension des racines	Porosité	Activité biologique
0-21	Friable	Normal	N-F-TF-M	N-TF-M	I
21-45	Ferme	Normal	P-TF-F-M	N-TF-M	FA
45-75	Ferme	Normal	T-TF-G-M	N-F-M	FA

RVB : Rouge-vert-bleu ; FA : Faible ; PS : Polyédrique subangulaire ; G: Grossier (e) ; M : Moyen (ne) ; MA : Massive ; N : Nombreux (euse) ; F: Fin (e) ; P : Peu ; TF: Très fine ; T: Très peu ; I : Importante.

Les résultats analytiques sur la granulométrie indiquent que le taux de sables totaux est élevé dans le premier horizon, mais, décroît avec la profondeur avec des valeurs respectives de 37,25 % dans l’horizon sous-jacent et de 27,45 % au dernier horizon (Figure 5). Le taux de limons totaux suit la même évolution en passant de 41,17 % dans l’horizon de surface, à 31,38 % dans l’horizon sous-jacent, et à 25,49 % dans le dernier horizon. Par contre, le taux d’argile augmente de la surface vers la profondeur avec des valeurs respectives de 19,61 % dans l’horizon superficiel, à 31,37 % dans l’horizon sous-jacent, et à 47,06 % au dernier horizon.



**Figure 5.** Granulométrie suivant la profondeur des horizons

### 2.3. Caractéristiques chimiques du sol

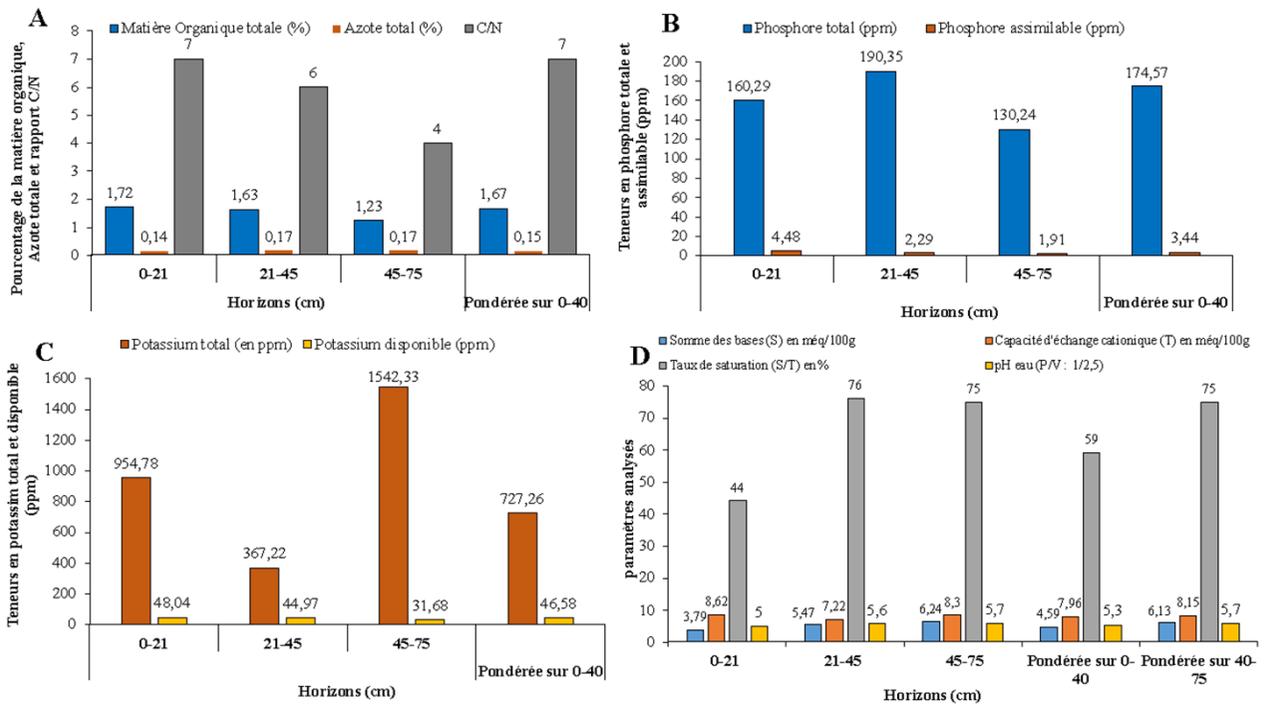
Les résultats des paramètres analytiques montrent que la teneur en matière organique dans les 40 premiers cm du profil est moyenne avec une valeur de 1,67 % (Figure 6A). On constate une tendance à la diminution de cette teneur avec la profondeur en passant de 1,72 % en surface, à 1,63 % dans le deuxième horizon, et à 1,23 % dans le troisième horizon.

La teneur en azote total dans les 40 premiers cm du profil est très élevée avec une valeur de 0,15% (Figure 6A). On constate une tendance à l'augmentation de cette teneur avec la profondeur en passant respectivement de 0,14 % en surface, à 0,17 % dans le deuxième et troisième horizon. Le rapport C/N est faible avec une valeur de 7 (Figure 6A).

La teneur en phosphore assimilable est très basse dans les 40 premiers cm de sol soit 3,44 ppm (Figure 6B). La teneur en phosphore total y est basse (174,57 ppm). On constate en outre, une variation régressive du taux de phosphore assimilable avec la profondeur dans le profil, passant de 4,48 ppm au premier horizon à 1,91 ppm au dernier (Figure 4B).

La teneur en potassium total est basse dans les 40 premiers cm de 727,26 ppm avec un taux moyen de potassium disponible d'une valeur de 46,58 ppm (Figure 6C).

Le pH est moyennement acide (6 à 5,7) dans l'ensemble du profil. La valeur augmente suivant la profondeur en passant de 5 en surface à 5,7 dans le dernier horizon (Figure 6D). La somme des bases échangeables (S) est basse (4,59 méq/100g) dans les 40 premiers cm de sol et moyenne au-delà avec une valeur de 6,13 méq/100g (Figure 6D). On constate que cette valeur augmente de l'horizon de surface vers la profondeur. La valeur de la CEC est basse dans l'ensemble du profil (8,15 méq/100g à 8,62 méq/100g) (Figure 6D). Le résultat du paramètre montre que le taux de saturation est élevé dans l'ensemble du profil avec des valeurs de 69 % et 75 % respectivement dans les couches de sol 0-40 cm et 40-75 cm (Figure 6D).



**Figure 6.** Variation des teneurs : en matière organique, en azote total et le rapport C/N (A) ; en phosphore du sol (B) ; en potassium du sol (C) ; de la somme des bases, capacité d'échange cationique, taux de saturation et pH (D) suivant la profondeur des horizons

## 2.4. Aptitude du sol pour la culture de tomate

Une conformation entre les qualités retenues du sol (Tableau V) et les exigences de la culture de tomate (Tableau VI) a permis de mettre en évidence la classe d'aptitude moyenne à la culture de tomate :  $S_{2nr}$  (Tableau VII). Les principaux facteurs/majeurs limitant à une mise en valeur optimum pour la culture de la tomate, portent sur les qualités suivantes :

- La disponibilité en éléments nutritifs (bases échangeables faible à moyenne) ;
- La capacité de rétention en éléments nutritifs faible ;
- Les conditions d'enracinement, notamment la structure faiblement développée à tendance massive.

Les résultats du processus de compatibilité sont consignés dans le Tableau V.

**Tableau 5. Qualités et facteurs diagnostics du sol**

<b>Qualités retenues pour l'évaluation du sol</b>	<b>Facteurs diagnostics</b>	<b>Sol ferrugineux tropical Lessivé Induré profond (Caractéristiques)</b>
Le régime thermique (c)	La température moyenne de la période de croissance	28,6 °C
La disponibilité en eau (m)	Pluviométrie annuelle	628,56 mm
La disponibilité en oxygène dans la zone racinaire (w)	Classe de drainage FAO	Normal
La disponibilité en éléments nutritifs (n) et capacité de rétention (n')	Somme des bases (S) Réaction du sol (pH) CEC	4,59 méq/100g 5,3 8,62 méq/100g à 8,15 méq/100g
Les conditions d'enracinement (r)	Profondeur effective Charge graveleuse L'aisance de pénétration des racines : Texture Structure Consistance	75 cm 5%  Texture moyenne en surface Faiblement développée à tendance massive Friable
Le risque d'inondation (i)	Position topographique Fréquence (probabilité) de l'inondation	Pente moyenne du glacis Risque d'inondation est très faible sur l'ensemble du site

**Tableau VI. Exigences de la culture de tomate**

<b>Exigences de la culture de la tomate</b>	<b>Très apte S1</b>	<b>Modérément apte S2</b>	<b>Marginalement apte S3</b>	<b>Inapte N</b>
<b>Facteurs climatiques</b>				
Périodes de croissance (jours)				
-Variété hâtive	> 110	90 - 110	80-90	< 80
-Variété moyenne	> 130	110 - 130	100 - 110	< 100
-Variété tardive	> 150	130 - 150	120 - 130	< 120
Précipitation annuelle (mm)				
-Variété hâtive	> 600	500 - 600	400 - 500	< 400
-Variété moyenne	-	-	-	-
-Variété tardive	-	-	-	-
Température Moyenne pendant la période de croissance (°C)	20 - 30	15 - 20 30 - 35	10-15 35 - 40	< 10 > 40
<b>Facteurs pédologiques</b>				
Profondeur effective (cm)	> 100	60 - 100	30 - 60	< 30
Disponibilité en eau (mm)	> 150	100 - 150	50 - 100	< 50

Drainage interne (Classes FAO)	4	3 et 5	2 et 6	0 et 1
Acidité (pH)	5 -7	-	-	-
Bases échangeables (méq/100g)	> 15	10 - 15	5 – 10	< 5
Texture (classes FAO)	M	G	F et TG	TF
Consistance (classes FAO)	Meuble à peu dure	Dure	Très  Dure	Extrêmement  dure
Charge graveleuse (%)	< 15	15 - 45	45 – 75	> 75
Conductivité électrique (mm ho /cm)	0 -3	3-6	6-8	> 8
Régime d'inondation (fréquence et longueur)	Nulle	Exceptionnellement courte	Occasionnellement courte	Régulière courte

mm ho : miliohme ; cm : centimètre ; mm : millimètre % : pourcentage °C : degré  
Celsius ; - : données indisponibles ; M : moyenne ; G : Grossière ; F : Fine ;TG :Très  
grossière ; TF : Très fine.

Source : BUNASOLS, 1990

**Tableau 7.** Résultat de processus de compatibilité du sol étudié à la culture de tomate

Qualités des terres	Facteurs diagnostiques	Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés profonds
Régime thermique	Température moyenne	s1
Disponibilité en eau	Pluviométrie annuelle	s1
Disponibilité dans la zone racinaire en oxygène	Classe de drainage FAO	s1
Disponibilité et capacité de rétention en éléments nutritifs	Classe de fertilité	
	-S	s2
	-pH	s1
	-CEC	s2
Conditions d'enracinement	Profondeur effective Aisance de pénétration des racines	s2
	-Structure	s1
	-Texture	s2
	-Charge graveleuse	s1
Risque d'inondation	Position topographique et fréquence	s1
Résultat		s2
<b>Aptitude globale du sol</b>		<b>S2nr</b>

s1 : aptitude partielle élevée ; s2 : aptitude partielle moyenne ; n : disponibilité en éléments nutritifs ; r : conditions d'enracinement ; S2nr : Aptitude globale moyenne.

## 2.5. Carte pédologique et d'aptitude culturale du sol

La figure 7 présente la carte d'aptitude pédologique et d'aptitude culturale du sol du site de l'étude. Le sol est caractérisé par une faible

disponibilité en éléments nutritifs, en capacité d'échange cationique et une mauvaise condition d'enracinement. De manière générale pour lever les contraintes, il est nécessaire de réaliser des labours perpendiculaires à la pente, des diguettes enherbées, des apports de fertilisants organiques (2 à 3 t/ha de fumure organique) et des minéraux en fonction des besoins de la culture.

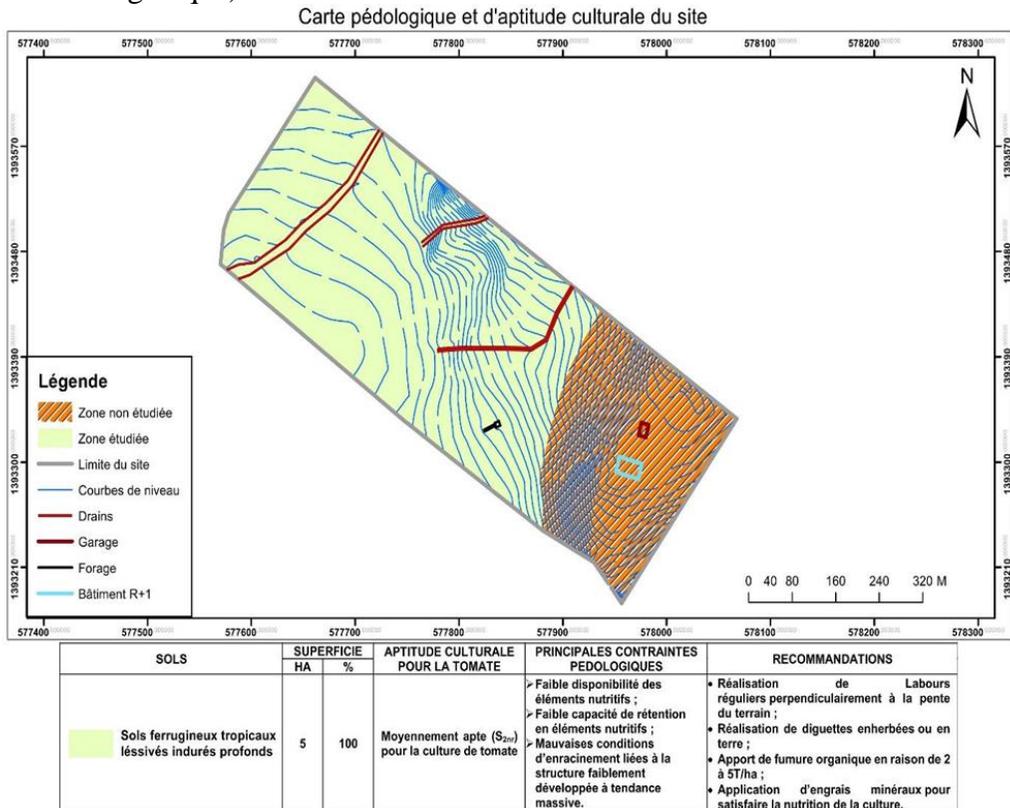


Figure 7. Carte pédologique et d'aptitude culturale du site

### 3. Discussion

#### 3.1. Evolution pédogénétique et caractéristiques du sol

Les résultats de la caractérisation morpho-pédologique que le sol à une profondeur limitée caractérisée par une induration marquée par la présence d'une carapace ou d'une cuirasse ferrugineuse et ferro-manganifère dans l'horizon inférieur. Cette induration est due à une ferruginisation résultant de la précipitation des oxydes de fer et de manganèse. En effet, dans ces sols, les processus de ferruginisation aboutissent à une évolution rapide du fer vers la forme cristalline avec pour conséquence la formation de concrétions ferrugineuses et ferro-manganifères. Le taux d'éléments grossiers augmente avec la profondeur. Ceci est dû au phénomène de ferruginisation qui s'effectue sur toutes les roches mères silicatées primaires et sédimentaires, en climat tropical en saison humide avec une saison sèche marquée selon aussi les

travaux de Guiré (1991). La profondeur utile considérée du sol était de 40 cm avec une texture limoneuse en surface, limono-argileuse dans la partie médiane et argileuse en profondeur. La faible teneur d'argile ainsi observée en surface provient de l'action conjuguée du lessivage des particules très fines et de l'érosion en nappe de type sélective. Ce départ préférentiel des argiles des horizons superficiels favorise l'accumulation relative des sables, lesquels sont assez lourds pour résister plus ou moins aux phénomènes de lessivage et de ruissellement. Le taux de sables et de limons totaux sont élevés dans le premier horizon, mais, décroît avec la profondeur contrairement au taux d'argile. Une quantité importante de limon dans les sols peut entraîner la formation d'une croûte dure, s'ils sont cultivés, réduisant ainsi leurs capacités de rétention en eau (Bassolé *et al.*, 2023). Mais lorsque le sable domine, les sols deviennent secs et pauvres en substances nutritives.

Le pH est moyennement acide dans l'ensemble du profil avec une tendance à augmenter avec la profondeur. La tendance du pH à l'élévation avec la profondeur s'explique par le phénomène de lixiviation qui selon Thompson (1957) et, s'effectue avec la présence des cations disponibles. Ce phénomène couplé au lessivage entraîne les éléments fins et les ions échangeables qui s'accumulent dans les horizons de profondeur. Les teneurs en C sont faibles et comparables aux sols de la zone sahélienne du pays étudiés par Pallo *et al.* (2006) et à ceux de la zone sud-soudanienne par Pallo *et al.* (2008). Les teneurs en matière organique dans du profil est moyenne dans les 40 premiers cm avec une tendance à la diminution avec la profondeur. Aussi, les pertes en carbone organique dépendent de la texture des sols. En culture continue, pour les sols sableux, les pertes annuelles moyennes de carbone organique du sol peuvent atteindre 4,7 %, tandis que pour les sols limoneux sableux, les pertes sont plus faibles, avec une moyenne de 2 % (Bationo *et al.*, 2007).

La teneur élevée en azote du sol dans sur les 40 cm s'explique en partie par l'antécédent cultural de la parcelle. En effet, le profil étant situé dans une parcelle ayant été exploitée pour la production de niébé, légumineuse fixatrice d'azote, avec une application d'engrais chimiques la campagne précédente aurait influencé la teneur de l'azote du sol.

Le bas niveau de phosphore total du sol se justifie par la nature granitique (pauvre en phosphore) de la roche-mère. Cette pauvreté en P avait déjà été relatée dans des études pédologiques faites sur l'ensemble des sols du Burkina Faso (Pieri 1989 ; Lompo *et al.* 2009 ; Zongo, 2017 ; Zongo *et al.*, 2023). En générale, les sols sous les climats tropicaux et subtropicaux sont souvent déficients en P avec une fixation élevée de P car ils sont principalement acides (Rafael *et al.*, 2018). Aussi, la proportion du P total du sol sous forme inorganique et organique échangeable, labile, adsorbée sur les surfaces du sol ou liée aux composés de Fe et Al est inversement proportionnelle à la teneur en sable (Stewart *et al.*, 1987). Il a été démontré

que ces teneurs en phosphore sont associées aux charges graveleuses de surface et de profondeur des sols (Zongo *et al.*, 2017). Cela s'explique par le fait que les graviers ferrugineux ou ferro-manganifères découlent de ces concrétions dans ces sols dans lesquelles le phosphore est lié au fer (Dabin, 1974). Le phosphore est ainsi déficient car le P inorganique soluble est fixé par l'Al et le Fe (Adnan *et al.*, 2003). Ce résultat corrobore celui de Guiré (1991) sur les sols ferrugineux tropicaux indurés et il lie cela à la forte rétrogradation du phosphore en raison de leur teneur en argiles plus élevées avec la profondeur. Le faible taux de phosphore assimilable obtenu est conforme aux résultats de (Dabin, 1967) sur les sols ferrugineux tropicaux. En effet, ces teneurs en phosphore de ces sols ainsi que leur pH légèrement acide soient environ 6,5 et quelques fois neutres sont dans les mêmes tendances que 85% des sols ferrugineux du Burkina selon les études de Pallo et Thiombiano (1989). Ainsi, la baisse du taux de phosphore assimilable avec la profondeur, semble en corrélation positive avec le taux de matière organique ainsi que la teneur et le type d'argile.

La teneur en potassium total est basse dans les 40 premiers cm. Il peut y avoir plus de compétition pour les sites de capacité d'échange de cations en raison de la concentration élevée de  $H^+$ ,  $Al^{3+}$ , et  $Fe^{3+}$  à faible pH, ce qui rend le K moins disponible dans le sol (Rawal *et al.*, 2022). Le statut du K dans le sol est dynamique et déterminé par un certain nombre de facteurs tels que la texture du sol, la minéralogie, la température et le pH (Rawal *et al.*, 2022). La disponibilité du K dépend du K échangeable dans les sols et sa libération est facilitée par un pH supérieur à 6, la texture et l'humidité du sol (Ayeni et Adeleye, 2014). Guiré (1991) avait aussi indiqué que la rétrogradation par les argiles et les oxydes de fer réduit la disponibilité du potassium dans les sols ferrugineux.

La somme des bases échangeables est basse dans les 40 premiers cm du sol et moyenne au-delà. On constate que cette valeur augmente de l'horizon de surface vers la profondeur. L'évolution des bases échangeables avec la profondeur est due à la forte lixiviation des cations de la surface vers les horizons sous-jacents et aussi à une meilleure capacité de fixation du complexe argilo-humique en profondeur, du fait d'une plus grande proportion d'argiles. La valeur de la capacité d'échange cationique est basse dans l'ensemble du profil. Ce résultat corrobore avec ceux de (Pallo *et al.*, 1989). Ces faibles valeurs de la capacité d'échange cationique et de la somme des bases échangeables sont dues à la nature kaolinitique des argiles qui ont une faible capacité d'échange et de la rapide minéralisation de la matière organique selon le rapport C/N. La kaolinite étant le principal type d'argile des sols dans les zones arides d'Afrique de l'ouest, la capacité d'échange cationique, souvent inférieure à  $1 \text{ cmol kg}^{-1}$ , dépend du carbone organique du sol (Bationo *et al.*, 2007).

La saturation en bases (S/T) ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{M}^{2+}$   $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$ ) est influencée par la perméabilité, l'excès d'eau et la position sur la pente et représente donc un indice de lessivage du sol. Ce taux de saturation est élevé dans l'ensemble du profil avec des valeurs de 69% et 75% respectivement dans les couches de sol 0-40 cm et 40-75 cm. En effet, un sol saturé à plus de 90% possède moins de 10% de sites occupés par des ions  $\text{H}^+$ , le pH est donc alcalin et généralement supérieure à 7,5 (Wendling *et al.*, 2020). Idéalement, un taux de saturation de l'ordre de 75% est recherché (Wendling *et al.*, 2020).

D'une manière générale, la matière organique, le phosphore assimilable, l'azote, les bases échangeables et la CEC sont donc les facteurs limitatifs majeurs des sols ferrugineux lessivés (Bassolé *et al.*, 2023). Les résultats obtenus sont en accord avec ceux trouvés par Kissou *et al.* (2018), Tahirou *et al.* (2022), Bassolé *et al.* (2023) qui ont trouvé que les sols ferrugineux tropicaux de la zone soudano-sahélienne sont caractérisés par une déficience en éléments organo-minéraux traduisent ainsi une réduction de leur niveau de fertilité.

### **3.2. Aptitude du sol à la culture de la tomate**

Le résultat du processus de compatibilité a mis en évidence une classe d'aptitude moyenne ( $S_{2nr}$ ) du sol à la culture de tomate. Dans ce sens, Amara *et al.* (2016) avaient constaté que les sols de la région semi-aride du Nord de l'Inde étaient modérément adaptés à la production de la tomate. Les résultats de cette étude montrent que la pluviométrie de la zone ne constitue pas une contrainte pour la production de tomate sur le sol caractérisé. Selon le MAHRH (2007), la plante de tomate pour le développement a besoin de 750 mm d'eau en 110 jours. Le climat, à l'exception de la pluviométrie moyenne annuelle totale (755,2 mm), la température annuelle de 24 et 28 °C, la topographie, le drainage et la toxicité du sol étaient au fait adapté à la culture de la tomate sur un sol ustique avec un régime de température isohyperthermique dans la région semi-aride du Nord de l'Inde (Amara *et al.*, 2016). Aussi, le pH du sol d'une valeur de 6, n'est pas aussi contraignant pour la production de tomate sur le sol étudié. Selon Shankara *et al.* (2020), la tomate tolère modérément un large intervalle de valeurs du pH, mais, pousse le mieux dans des sols où la valeur du pH varie entre 5,5 et 6,8. Aussi, selon Amara *et al.* (2016), le pH le plus approprié pour la tomate est de 6,0-7,0 dans la région semi-aride du Nord de l'Inde. Il a été également prouvé que dans la région du Nord du Ghana, les plinthosols et planosols relativement bien drainés, caractérisés par une densité apparente relativement faible (1,4-1,6) et une légère acidité (5,5-6,5) étaient apte pour la culture de la tomate (Zakaria *et al.*, 2022). L'aptitude moyenne du sol étudié à la culture de la tomate s'explique aussi par la structure faiblement développée à massive du sol et la profondeur effective insuffisante pouvant rendre difficile la pénétration et le

développement racinaire de la tomate. Selon le BUNASOLS (1990), la profondeur effective pour un sol à aptitude élevée pour la culture de tomate doit être supérieure à 100 cm. En effet, une profondeur de sol supérieure à 75 cm avait été considérée comme propice pour la production de la tomate (NBSS et LUP, 1994). La somme des bases échangeables et la capacité d'échange cationique présentent aussi des contraintes modérées pour une production rentable de la tomate. Ce résultat est en accord avec les travaux de Guiré (1991) sur des sols ferrugineux tropicaux indurés au Burkina Faso. De l'analyse et de l'interprétation de ces résultats, il en découle que ces sols se caractérisent essentiellement par une réserve hydrique faible à moyenne, de mauvaises conditions d'enracinement et une faible fertilité chimique, faible taux en matière organique et en éléments minéraux majeurs (N.P.K.). Ils présentent des risques de dégradation physique (érosion, encroûtement) en surface et leurs aptitudes varient selon la profondeur utile. Conformément à une partie des résultats, une profondeur utile de 50 à 75 cm et la texture limon argileuse à limon argileux sableuse des sols étaient appropriées, mais le volume de fragments grossiers (31,2 à 53,5%) dans les sols a été observé comme une limitation modérée pour la culture de la tomate dans la région semi-aride du Nord de l'Inde (Amara *et al.*, 2016).

## Conclusion

Le sol étudié est un sol ferrugineux tropical lessivé induré profond (FLIP), correspondant à un *Lixisol endoplinthique*. Il présente des contraintes d'ordre physique, chimique et biologique pour la production de tomate. L'évaluation, par processus de compatibilité entre qualités intrinsèques du sol étudié et exigences de la culture de tomate envisagée montre que ce type de sol a une aptitude culturale moyenne (S2nr) pour la culture de tomate. La température moyenne et la pluviométrie sont des caractéristiques appropriées pour la culture de la tomate dans la zone d'étude. Les contraintes sont les conditions d'enracinement difficiles imputables à la structure faiblement développée à tendance massive, à la texture argileuse en profondeur, la profondeur effective limitée et de la charge graveleuse élevée. Les valeurs la CEC, des teneurs en phosphore et en potassium totaux sont basses par rapport aux exigences de la tomate. Pour la conservation du sol et l'optimisation des rendements, il est nécessaire de prévoir les aménagements et amendements adéquats. Pour améliorer les conditions d'enracinement, il faut installer des cordons pierreux suivant les courbes de niveau. La formation de diguettes enherbées ou en terre. Pour améliorer la fertilité chimique et minérale, il faut apporter de la fumure organique enrichi au Burkina phosphate (Bp) à des doses de 2-3 t/ha/an. Apporter de la chaux pour saturer les ions Al et Fe afin de relever le pH du sol. Pour une meilleure gestion du potentiel de fertilité du sol étudié, il est nécessaire d'effectuer une étude complémentaire de fertilité pour

une meilleure exploitation durable. Au regard de l'aptitude culturale que présente ce sol pour la production de tomate, cette étude doit se poursuivre, afin de déterminer pour quelles spéculations maraîchères ce sol est plus économiquement rentable.

**Contributions des auteurs:** KFZ, PAWD, IS ont été les investigateurs de la recherche. Ils ont réalisé les travaux de terrain, acquis, analyser, interpréter les données et rédiger le manuscrit. DG, AC, EH à la révision du manuscrit et à l'amélioration de la qualité scientifique.

**Conflit d'intérêts :** Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

**Disponibilité des données :** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

**Déclaration de financement :** Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

#### **References:**

1. Adnan, A., Mavinic, D. S., & Koch, F. A. (2003). Pilot-scale study of phosphorus recovery through struvite crystallization – examining the process feasibility. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2(5), 315–324. <https://doi.org/10.1139/s03-040>
2. AFNOR (Agence Française de Normalisation), (1999). Détermination du pH. AFNOR Qualité des sols : Paris ; 339-348.
3. Amara, D.M.K., Patil P.L., Gali, SK. & Quee, D.D. (2016). Soil suitability assessment for sustainable production of vegetable crops in Northern semi-arid region of India. *International Journal of Agricultural Policy and Research*, 4 (3), 52–61. <http://dx.doi.org/10.15739/IJAPR.16.008>.
4. Ayeni, L. S., & Adeleye, O. E. (2014). Mineralization rates of soil forms of nitrogen, phosphorus, and potassium as affected by organomineral fertilizer in Sandy Loam. *Advances in Agriculture*, 2014, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2014/149209>
5. Bassole, Z., Yanogo, I. P., & Idani, F. T. (2023). Caractérisation des Sols Ferrugineux Tropicaux Lessivés et des Sols Bruns eutrophes tropicaux pour l'utilisation agricole dans le Bas-Fond de Goundi-Djoro (Burkina Faso). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 17(1), 247–266. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v17i1.18>.
6. Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., & Kimetu, J. (2007). Soil Organic Carbon Dynamics, functions and management in West

- African agro-ecosystems. *Agricultural Systems*, 94(1), 13–25.  
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.08.011>.
7. Bationo, A., Kihara, J., Waswa, B., Ouattara, B., & Vanlauwe, B. (2014). Technologies for sustainable management of sandy Sahelian soils. In: Management of Tropical Sandy soils for sustainable agricultura. A holistic approach for sustainable development of problema soils in the tropics. FAO Regional Office for Asia and the Pacific. Bangkok : 414-429.  
<https://www.fao.org/3/ag125e/AG125E32.htm>.
  8. Bationo, A., Sivakumar, M.V.K., Acheampong, K., & Harmsen, K. (1998). Technologies de lutte contre la dégradation des terres dans la zone soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. In Breman H et Sissoko K (éds) L' intensification agricole au Sahel. Paris Karthala. p. 709-725. <https://research.wur.nl/en/publications/lintensification-agricole-au-sahel>.
  9. Bray, R.H., & Kurtz L.T. (1945). Determination of total organic, and available forms of phosphorous in soil. *Soil Sci.* 59: 39-45.  
<https://doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>.
  10. BUNASOLS (1989). Méthodologie de prospection pédologique, documentations techniques n°5, Ouagadougou, 121p.
  11. BUNASOLS (1990). Manuel pour l'évaluation des terres, documentations techniques n°6, Ouagadougou, 181p.
  12. BUNASOLS (2014). Etude morphopédologique de la province du Boulkiemdé, échelle 1/100 000, 95p.
  13. CPCS (Commision de Pédologie et de cartographie des sols) (1967). Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Edition 1967, 87p.  
[https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers16-03/12186.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-03/12186.pdf).
  14. Dabin, B. (1967). Méthode d'analyse du phosphore dans les sols tropicaux. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux Tannarive, novembre 1967, publié. I.R.A.T., 1, 99-115.
  15. Dabin, B. (1974). Evolution des phosphates en sols acides des régions tropicales. Bulletin A.F.E.S. 2 : 87-104.
  16. ELD Initiative, UNEP. (2015). *The economics of land degradation in Africa: Benefits of action outweigh the costs; a complementary report to the Eld initiative.* UNEP.  
<https://www.unep.org/resources/report/economics-land-degradation-africa-benefits-action-outweigh-costsa-complementary>.
  17. FAO et ITPS (2015). État des ressources en sols du monde - Résumé technique. 79 p.  
[https://www.researchgate.net/publication/324056184\\_Etat\\_des\\_Ressources\\_en\\_Sols\\_dans\\_le\\_Monde\\_Resume\\_technique](https://www.researchgate.net/publication/324056184_Etat_des_Ressources_en_Sols_dans_le_Monde_Resume_technique).

18. Fontes, J. & Guinko, S. 1995. Carte de la végétation et occupation des sols du Burkina Faso. Notice explicative. Toulouse, Institut de la Carte Internationale de la végétation, Institut du Développement Rural, Faculté des sciences et techniques, Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 67 p.
19. Gallais, A., & Bannerot, H. (1992). Amélioration des espèces végétales cultivées. Objectifs et critères de sélection. Paris, INRA, 77p. [https://mots-agronomie.inrae.fr/index.php/Andr%C3%A9\\_Gallais](https://mots-agronomie.inrae.fr/index.php/Andr%C3%A9_Gallais).
20. Gómez, M. I., & Ricketts, K. D. (2013). Food value chain transformations in developing countries: Selected hypotheses on nutritional implications. *Food Policy*, 42, 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2013.06.010>.
21. Guiré, A. (1991). Etude des sols ferrugineux tropicaux lessives indures et leur aptitude à la culture du mil, du sorgho, de l'arachide et du niébé. Mémoire de fin d'étude en ingénieur du développement durable, IRD, Univ Ouaga, 122p. <https://beep.ird.fr/collect/upb/index/assoc/IDR-1991-GUI-ETU/IDR-1991-GUI-ETU.pdf>.
22. Henao, J. and baanante, C. (2006) agricultural production and soil nutrient mining in Africa implications for resource conservation and policy development. - references - scientific research publishing. (n.d.). 13 p. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2636313](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2636313).
23. Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Chapelle, J., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O., Dondeyne, S., Gallali, T., Hallett, S. & al. (2015). Atlas des sols d'Afrique. *Luxembourg, GD Luxembourg: Union européenne. Bureau des Publications*; 176 p. <http://hdl.handle.net/1854/LU-7017089>;
24. Kissou, R., Gnankambary, Z., Nacro, H. B., & Sedogo, M. P. (2018). Classification locale et utilisation des sols en zone Sahélienne au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(1), 610. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i1.46>
25. Kjeldahl, J., (1883). New Method for the Determination of Nitrogen. *Chem News*. News 48 (1240): 101–102. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01338151>.
26. Lompo, F., Segda, Z., Gnankambary, Z., & Ouandaogo, N. (2009). Influence des phosphates naturels sur la qualité et la biodégradation d'un compost de paille de maïs. *Tropicultura*, 27 : 105-109. <https://www.researchgate.net/publication/45266591>.
27. MAAH (2021). Annuaire des statistiques agricoles 2020, Burkina Faso, juin 2021, 386p.

28. MAAHM (2021a). Tableau de bord statistique de l'agriculture 2020, 85p.
29. MAAHM (2021b). Rapport d'actualisation des volets 2 et 3 de la situation de référence des terres dégradées et de la conservation des eaux et des sols au Burkina Faso, Avril 2021, 34p.
30. MAH (2011). Bureau Central du Recensement Général de L'agriculture : Rapport général du module Maraîchage, Phase 2 RGA 2006-2010, Ouagadougou, Burkina Faso. 318p.
31. MAHRH (2007). Fiche technique pour la production de la tomate au Burkina Faso, Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des ressources Halieutique, Burkina Faso, 7p.
32. MARH (2008). Evolution du secteur agricole et des conditions des ménages au Burkina Faso. Projet AI/CN-SISA. 92p.
33. MASA (2013). Rapport final situation de référence filières agricoles, Ministère de l'Agriculture et de la Sécurité Alimentaire, Burkina Faso, 208p.
34. Metson A.J. 1956. Methods of chemical analysis for soil survey samples. N.Z. Soil Bur. Bull., n°12.
35. NBSS & LUP (National Bureau of Soil Survey and Land Use planning) (1994). Proceedings of National Meet on Soil- site suitability criteria for different crops, Nagpur, National Bureau of Soil Survey and Land Use Planning, NBSS et LUP Publication. Feb. 7-8, 32p.
36. Nezomba, H., Mtambanengwe, F., Tittonell, P., & Mapfumo, P. (2017). Practical assessment of soil degradation on smallholder farmers' fields in Zimbabwe: Integrating local knowledge and scientific diagnostic indicators. *CATENA*, 156, 216–227. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.014>.
37. Pallo, F.J.P., & Thiombiano, L. (1989). Les sols ferrugineux tropicaux lessives à concrétions du Burkina Faso. Caractéristiques et contraintes pour l'utilisation agricole, SOLTROP 89, BUNASOLS - BP 7142 - Ouagadougou - BURKINA FASO, 307-327p. <https://www.researchgate.net/publication/32981638>.
38. Pallo, F.J.P., Asimi, S., Assa, A., Sedogo, P.M., & Sawadogo, N. (2006). Statut de la matière organique des sols de la région sahélienne du Burkina Faso. *Étude Gestion Sols*, 13 (4), 289 304.
39. Pallo, F.J.P., Sawadogo, N., Zombré N. P., Sedogo M.P. (2009). Statut de la matière organique des sols de la zone nord-soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2009 13(1), 139-142  
Pallo, F.J.P., Sawadogo, N., Sawadogo, L., Sedogo, M.P., & Assa, A. (2008). Statut de la matière organique des sols dans la zone sud-soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 12(3),

- 291-301. <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=17264&file=1&pid=2791>;
40. Pieri, C. (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT, ISBN 2-87614-02461, 444 p.
41. Rafael, R. B., Fernández-Marcos, M. L., Cocco, S., Ruello, M. L., Weindorf, D. C., Cardelli, V., & Corti, G. (2018). Assessment of potential nutrient release from phosphate rock and Dolostone for application in acid soils. *Pedosphere*, 28(1), 44–58. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(17\)60437-5](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(17)60437-5);
42. Rawal, N., Pande, K. R., Shrestha, R., & Vista, S. P. (2022). Phosphorus and potassium mineralization as affected by phosphorus levels and soil types under laboratory condition. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 5(1). <https://doi.org/10.1002/agg2.20229>.
43. Stewart, J. W., O'Halloran, I. P., & Kachanoski, R. G. (1987). Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. *Canadian Journal of Soil Science*, 67(1), 147–163. <https://doi.org/10.4141/cjss87-013>.
44. SCADD, (2010). Projet d'appui à l'élaboration d'un schéma directeur pour la promotion d'une agriculture orientée vers le marché. Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques, de l'Assainissement et de la Sécurité Alimentaire Ouagadougou, Burkina Faso.
45. Shankara, N., Jeude, J. L., Goffau, M., Hilmi, M., & Dam, B. (2020). La culture de tomate production, transformation et commercialisation Editor : Barbara van Dam, Imprimé par Digigrafi, Fondation Agromisa et CTA, Wageningen, Pays-Bas 105p. <https://www.researchgate.net/publication/346427083>.
46. Tahirou, S., Zerbo, P., Ouattara, S., & Ado, M. N. (2022). Caractérisation des paramètres Physico-Chimiques du Sol de la zone Rizicole de Saga (Niamey) dans la vallée du Fleuve Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 16(2), 842–854. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v16i2.26>
47. Thompson, L.M. (1957). Sols et fertilité des sols. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York. 83(5): p415. Tully, K., Sullivan, C., Weil, R., & Sanchez, P. (2015). The state of soil degradation in Sub-Saharan africa: Baselines, trajectories, and solutions. *Sustainability*, 7(6), 6523–6552. <https://doi.org/10.3390/su7066523>.
48. UA/SAFGRAD (2010). Recherche et développement agricoles dans les zones semi-arides d'Afrique. Technologies agricoles au Burkina Faso. Recueil des technologies agricoles, p100. <https://archives.au.int/handle/123456789/9968>.

49. Houba, J., van Der Lee J., Novozamsky, I., & Walinga, I. (1988). Soil and Plants Analysis. Part 5, Soil Analysis Procedures. Wageningen University, Wageningen.
50. Walkley, A. and Black, I.A. (1934) An Examination of the Degtjareff Method for determining soil organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 37, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
51. Wendling, M., Carrard E., Schaffner L., Füllemann F., Charles R. (2020). Le sol et la CEC comme facteurs décisionnels pour le chaulage et la fumure. 8p. [https://www.progres-sol.ch/fileadmin/progres-sol/documents/La\\_CEC\\_comme\\_facteur\\_decisionnel\\_pour\\_le\\_chaulage\\_v1.pdf](https://www.progres-sol.ch/fileadmin/progres-sol/documents/La_CEC_comme_facteur_decisionnel_pour_le_chaulage_v1.pdf).
52. WRB (World Reference Bases) (2015). Publishers, A. and, & Corporate Author(s). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (n.d.). *Base de Référence Mondiale Pour Les Ressources en Sols 2014, mise à Jour 2015. Système International de Classification Des Sols Pour Nommer Les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques*. Land Portal. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d41c1333-a2ac-4161-993a-b0ae955e9c93/content>.
53. Zakaria, Y. S., Shaibu, A.-G., & Baatuuwie, B. N. (2022). Assessment of physical suitability of soils for vegetable production in the Libga Irrigation Scheme, Northern Region, Ghana using the analytic hierarchy process and weighted overlay analysis. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 10(8), 1395–1403. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i8.1395-1403.5004>.
54. Zongo, K.F. (2017). Déterminants des performances des associations céréales-légumineuses dans les agroécosystèmes soudano-sahéliens du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO, Burkina Faso, 186 p. [www.secheresse.info/spip.php?article70079](http://www.secheresse.info/spip.php?article70079).
55. Zongo, K.F., Nandkangre, H., Guébré, D., Sanon, A., Kambou, D.J., Kabore, P., Ouoba, A, Hien, E., & Ouedraogo, M. (2023). Soil characterization and potentiality to improve two Bambara groundnut varieties cropping under rock phosphate fertilization at sudano-sahelian climate of Burkina Faso. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 8(4):829-838. <https://ijias.issr-journals.org/abstract.php?article=IJIAS-22-264-03>.