

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, Burkina Faso

Daouda Guebre

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

Aboubacar Coulibaly

Ecole Normale Supérieure, Burkina Faso

Pakisba Anicet Wenceslas Daramkoum

Centre Universitaire de Tenkodogo,
Université Thomas SANKARA, Burkina Faso

Issouf Sanou

Bureau National des SOLS (BUNASOLS), Burkina Faso

Edmond Hien

Unité de formation et de recherche en sciences de la vie et de la terre,
Université Joseph KI-ZERBO, Burkina Faso

[Doi: 10.19044/esipreprint.8.2024.p557](https://doi.org/10.19044/esipreprint.8.2024.p557)

Approved: 23 August 2024

Posted: 24 August 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*. ESI Preprints.

<https://doi.org/10.19044/esipreprint.8.2024.p557>

Résumé

Les connaissances empiriques de la nature des sols est une contrainte pour la mise en valeur optimale de la ressource sol au sein des petites exploitations familiales du Burkina Faso. Ainsi, pour une meilleure valorisation du potentiel des sols, la présente étude a consisté à la caractérisation et à l'évaluation de l'aptitude culturelle d'un sol d'une exploitation agricole pour la production de la 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 c'est un sol

ferrugineux tropical lessivé induré profond et correspondrait 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-jacent. 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 par un rapport C/N faible d'une valeur de 7 ; le pH était moyennement acide de 6 à 5,7 ; la capacité d'échange cationique variait de 8,62 à 8,15 méq/100 g. Ce sol présente des carences physiques et est considéré comme déficient en éléments nutritifs. Il découle de l'évaluation qu'il a une aptitude moyenne (S2nr) pour la culture de tomate du fait de sa mauvaise condition d'enracinement et de la faible valeur de la Capacité d'Echange Cationique et des bases échangeables.

Mots clés : Sol, caractérisation, évaluation technique, aptitude culturale, tomate

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, Burkina Faso

Daouda Guebre

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

Aboubacar Coulibaly

Ecole Normale Supérieure, Burkina Faso

Pakisba Anicet Wenceslas Daramkoum

Centre Universitaire de Tenkodogo,
Université Thomas SANKARA, Burkina Faso

Issouf Sanou

Bureau National des SOLS (BUNASOLS), Burkina Faso

Edmond Hien

Unité de formation et de recherche en sciences de la vie et de la terre,
Université Joseph KI-ZERBO, Burkina Faso

Abstract

Empirical knowledge of the nature of soils is a constraint to the optimal development of soil resources on small family farms in Burkina Faso. Therefore, in order to make better use of soil potential, the present study consisted in characterizing and assessing the cultural suitability of a

farm soil for tomato production. The soil was characterized in accordance with FAO guidelines (1994), and its suitability for cultivation determined in accordance with the Bureau National des Sols land evaluation manual (BUNASOLS, 1990). The results of the work reveal that it is a deep indurated leached tropical ferruginous soil and corresponds to an endoplinthic Lixisol. Physically, the structure is polyhedral, subangular and weakly developed in coarse, fine and medium elements in the first horizon, and massive in the underlying horizon. Soil texture is silty on the surface, silty-clayey in the middle section and clayey at depth. Chemically, the soil had a low C/N ratio of 7; pH was moderately acidic, ranging from 6 to 5.7; cation exchange capacity varied from 8.62 to 8.15 meq/100 g. This soil is physically deficient and considered nutrient deficient. The evaluation concluded that it has an average suitability (S2nr) for tomato cultivation due to its poor rooting condition and low Cation Exchange Capacity and exchangeable base values.

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

Introduction

La tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) est la deuxième culture maraîchère au Burkina Faso en terme de production et de superficies emblavées, après l'oignon bulbe. Elle est l'un des légumes-fruits les plus consommés dans le monde et au Burkina Faso. Vingt un pourcent (21%) de la production maraîchère totale du pays a été attribué à la tomate (MASA, 2013). La filière tomate au Burkina Faso se distingue avec une production qui atteint la barre des 300 000 tonnes par an. En 2018, la superficie emblavée en tomate était de 10 284 ha (MAAH, 2021). De 2009 à 2018, la superficie exploitée au Burkina Faso a augmenté de 1 519 364 ha soit de 32 % (MAAHM, 2021a). La demande en tomates du marché intérieur burkinabè et sous régionaux ne cesse d'augmenter. La culture de tomate constitue ainsi un véritable créneau horticole offrant un potentiel élevé de réduction de la pauvreté en favorisant le développement rural (SCADD 2010), tout en améliorant la diversité de l'alimentation (Gómez et Ricketts 2013). 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 limoneuses profondes et bien drainées et riches en matières organiques (Naika et al., 2020). Cependant, les conditions pédologiques du Burkina Faso ne permettent pas une optimisation de sa 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 la variabilité des précipitations ;

l'érosion des sols et les mauvaises pratiques agricoles, notamment la culture continue avec peu ou pas d'intrants (extraction de nutriments) ; 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 (Jones et al., 2015 ; Tully et al., 2015; Nezomba et al., 2017). Certaines études ont montré que 65 % de la superficie mondiale totale des terres cultivées dégradées se trouvent en Afrique (Thiombiano et Tourino-Soto, 2007) et affecte la productivité des cultures et provoque l'insécurité alimentaire (Diop et al., 2022). 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). Si l'érosion se poursuit sans relâche, les réductions de rendement en 2020 avaient été estimées de 17 % à 30 %, avec une diminution d'environ 10 millions de tonnes de céréales, 15 millions de tonnes de racines et tubercules, et 1 million de tonnes de légumineuses (Henao et Baanante, 2006).

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). Les sols du pays sont aussi très pauvres avec une teneur en matière organique totale inférieure à 1 % (Boyadgiev 1980). Selon Pallo et al. (2008 et 2009), dans les régions sahélienne et sud-soudanienne du pays, la teneur en matière organique totale est de 0,6% donc généralement faible. Or, la teneur en matière organique, en influençant les propriétés physico-chimique du sol détermine sa richesse édaphique (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 P₂O₅ et 10 kg K₂O par hectare selon Bationo et al. (1998). Les extractions annuelles de nutriments du sol étaient de -43 kg NPK/ha en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso dans les systèmes d'agriculture minière selon Henao et Baanante (2006).

Comme conséquences, la dégradation des sols entraîne une baisse de leurs fertilités et productivités. De ce fait, 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 du sol et de la classification des sols peuvent aider à une meilleure utilisation du sol. La performance de toute culture dépend largement des propriétés du sol telles que la profondeur, le drainage, la texture, etc., conditionnées par le climat et la topographie (Bargali et al., 1993). L'étude de la caractérisation du sol permettant de prédire la performance de la culture

dans une zone donnée fait partie du processus d'évaluation des terres (Arora et al., 2011). La présente étude vise à caractériser un sol en relevant des informations relatives à son utilisation et à déterminer son aptitude ou non à la culture de la tomate, sous une forme facilement reconnaissable à travers une représentation cartographique à l'aide de la technologie du système d'information géographique.

Matériel et méthodes

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 sahélienne avec un régime climatique caractérisé par deux saisons: 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 culturales.

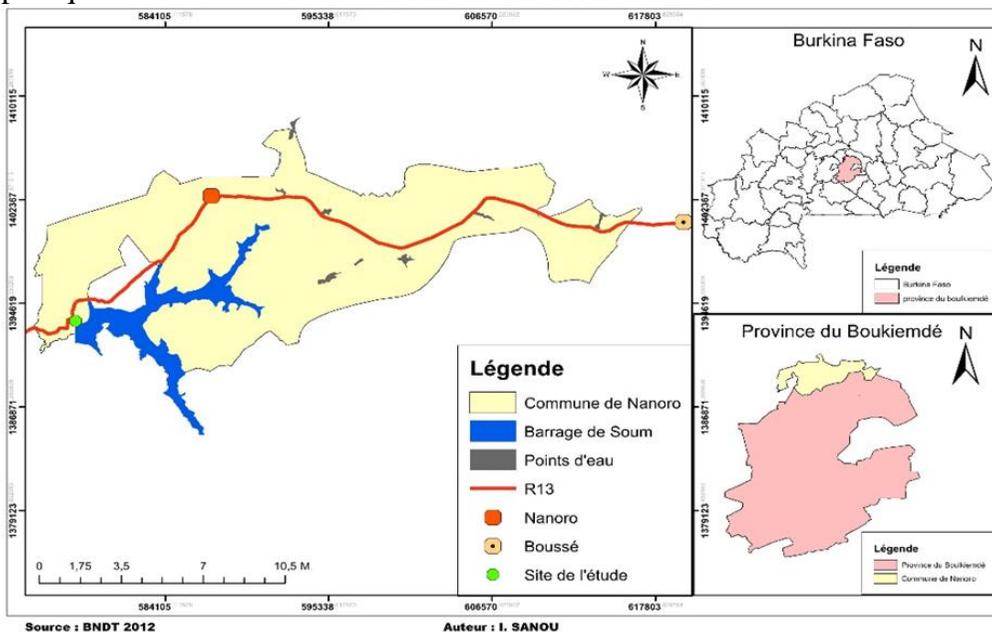


Figure 1. Localisation du site de l'étude

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

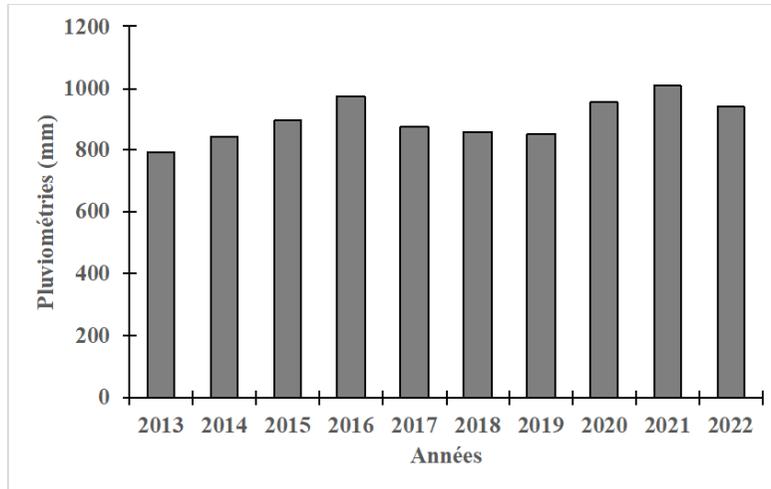


Figure 2. Variation de la pluviométrie du site d'étude de 2013 à 2022

De 2013 à 2022 la figure 3 montre que les mois de Novembre et de décembre sont les moins pluvieux 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 Aout (Figure 3).

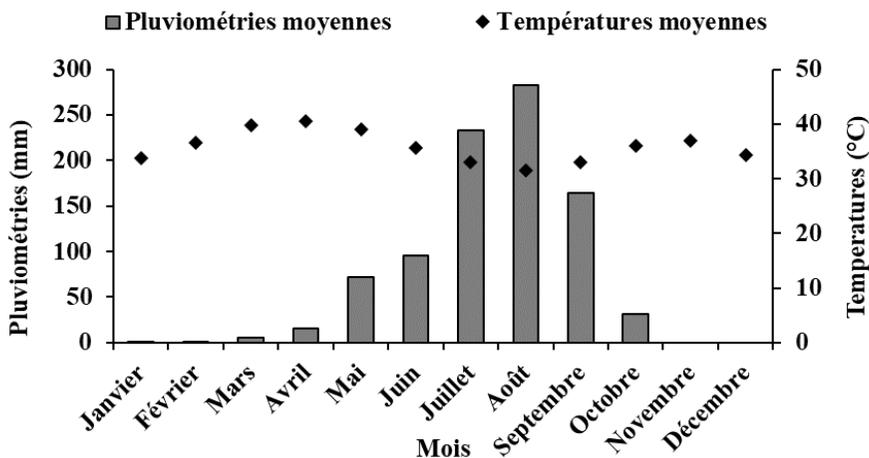


Figure 3. Variation de la pluviométrie et de la température moyennes mensuelles de 2013 à 2022

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. La végétation naturelle du périmètre est fortement perturbée du fait des activités anthropiques. Les espèces ligneuses courantes sont : *Lannea microcarpa* ; *Parkia biglobosa* ; *Piliostigma reticulatum* ; *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*.

Caractérisation morphologique du sol

Les travaux de cette étude ont été effectués en deux phases à savoir une phase d'étude du sol sur le terrain et une phase d'étude au laboratoire. Les travaux de terrain ont été effectués sur le site d'étude d'une superficie de 5 ha. Le placement 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 du BUNASOLS (1989). L'étude étant réalisée à une échelle de 1/5 000^{ème}, 4 observations par ha pour un total de 20 observations sur les 5 ha ont été effectués. A l'issue de ces 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 de ce 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 morphologiques ont été ainsi déterminées.

Méthodes d'analyse physique et chimique des sols

Le prélèvement des échantillons a été fait après la description du profil pédologique. L'échantillon afin d'être suffisamment représentatif de l'horizon a été prélevé un peu partout au niveau de celui-ci. Cinq cent gramme (500 g) de terre ont été prélevés par horizon. Au total trois (03) échantillons dans un profil, à raison d'un échantillon par horizon ont été prélevés. Les échantillons du sol prélevés ont été ensuite séchés, 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 1.

Tableau 1. Méthodes d'analyse des paramètres du sol

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

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 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 des paramètres chimiques; H₁ = épaisseur de l'horizon 1 ; H₂ = épaisseur de l'horizon 2 ; A = valeur lue sur H₁ ; B : valeur lue sur H₂ ; et 40 = constante

Si H₂ > 40 on applique la formule ; si H₂ < 40 on continue sur l'horizon suivant et on applique la formule. Ainsi, pour les autres paramètres il a été également 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 2 et 3).

Tableau 2. 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 |

Tableau 3. Classes d'interprétation du pH et du rapport C/N

| | Extrêmement acide | Très fortement acide | Fortement acide | Moyennement acide | Faiblement acide à neutre | Légèrement alcalin |
|------------------------|---|----------------------------|--|----------------------|---|-----------------------|
| pHH20 | <4,5 | 4,6-5,0 | 5,1-5,5 | 5,6-6,0 | 6,1-7,3 | 7,4-7,8 |
| Rapport C/N | 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

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 diagnostique de cette qualité de terres. Elle influe directement 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 pour notre cas, 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 pour son 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, roche). L'aisance de pénétration des racines est régie par les propriétés texturales, structurales, 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.

Résultats

Pédogénèse et type de sol étudié

Le matériau originel et minéralogique du sol a été formé à partir du complexe d'altération kaolinitique, sur le plan pédogénétique appartenant pour l'essentiel à la famille des roches granitique (acides). Un seul type de sol a été identifié sur le site. Il s'agit d'un sol ferrugineux tropical lessivé induré profond (FLIP). Ce type de sol appartient au sous-groupe des sols ferrugineux tropicaux lessivés induré et à la classe des sols à sesquioxyde de fer et de manganèse (CPCS 1967). Il correspondrait à un *Lixisol endoplinthique* (WRB 2015).



Figure 4. Profil de référence du sol

Caractéristiques physiques du sol

Le sol est situé sur une pente moyenne du glaciaire 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 on distingue 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 4). 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 4. Synthèse des caractéristiques morphologiques du profil

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

| Horizons (cm) | Couleur à frais | Couleur RVB | Charge graveleuse (%) | Structure | Texture |
|---------------|---------------------|-----------------|----------------------------------|--------------|---------------------|
| 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 |

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.

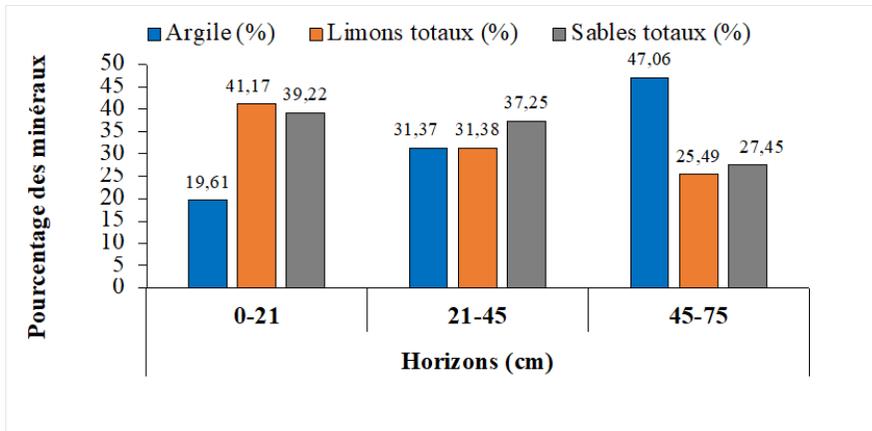
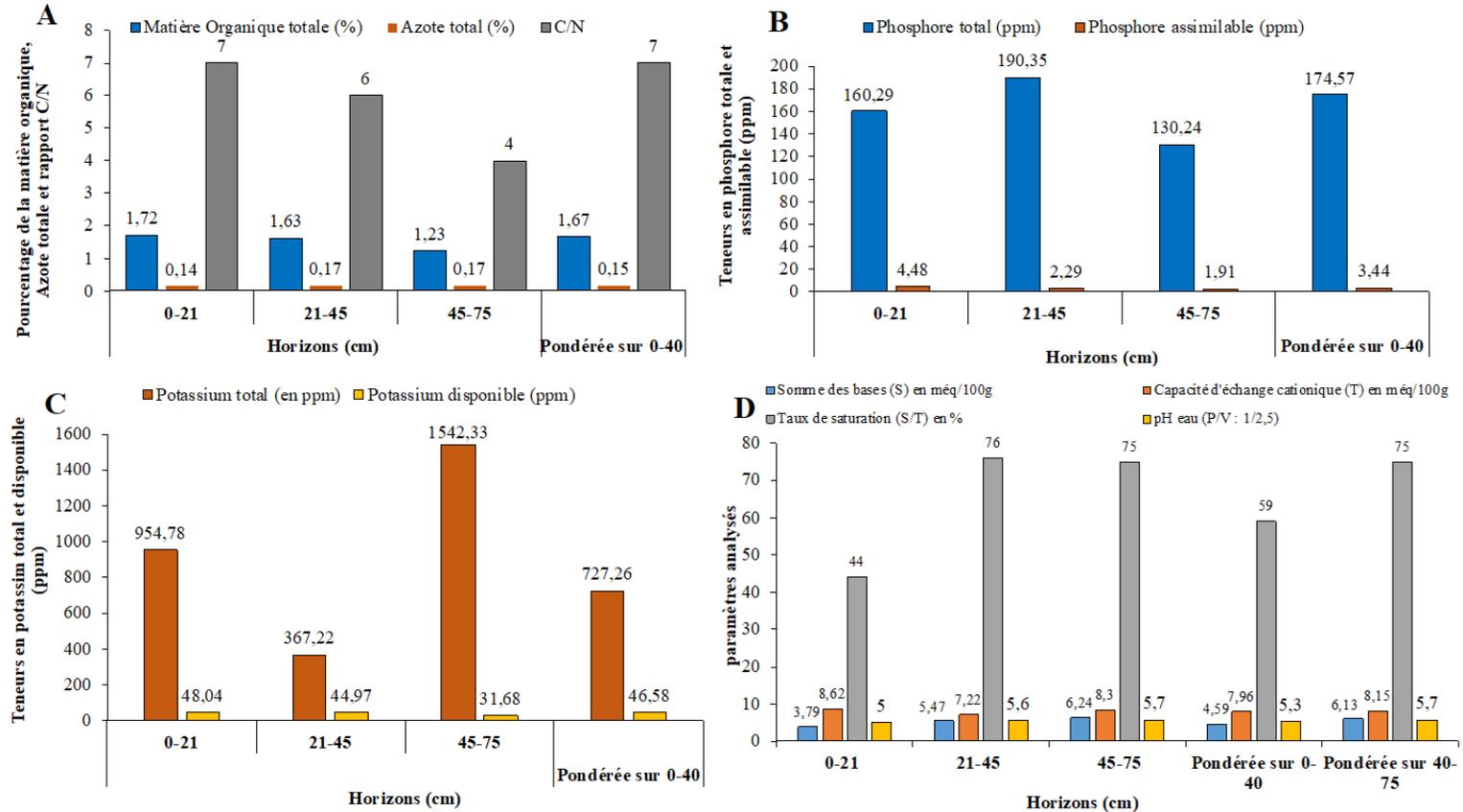


Figure 5. Granulométrie suivant la profondeur des horizons

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. Sa 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 C.E.C est basse dans l'ensemble du profil (8,15 méq/100g à 8,62 méq/100g) (Figure 6D). Le résultat de ce paramètre nous 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



Aptitude du sol pour la culture de tomate

Une conformation entre les qualités retenues du sol (Tableau 5) et les exigences de la culture de tomate (Tableau 6) a permis de mettre en évidence la classe d'aptitude moyenne à la culture de tomate : S_{2nr} (Tableau 7). 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 5.

Tableau 5. Qualités et facteurs diagnostics du sol

| Qualités retenues pour l'évaluation du sol | Facteurs diagnostics | Sol ferrugineux tropical Lessivé Induré profond (Caractéristiques) |
|--|--|--|
| 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 | Somme des bases (S) | 4,59 méq/100g |
| | Réaction du sol (pH) | 5,3 |
| de rétention (n') | CEC | 8,62 méq/100g à 8,15méq/100g |
| Les conditions d'enracinement (r) | Profondeur effective | 75 cm |
| | Charge graveleuse | 5% |
| | L'aisance de pénétration des racines : | |
| | Texture | Texture moyenne en surface |
| Structure | Faiblement développée à tendance massive | |
| | Consistance | friable |
| Le risque d'inondation (i) | Position topographique | Pente moyenne du glacis |
| | Fréquence (probabilité) | Risque d'inondation est très |
| | de l'inondation | faible sur l'ensemble du site |

Tableau 6. Exigences de la culture de tomate

| Exigences de la culture de la tomate | Très apte S1 | Modérément apte S2 | Marginalement apte S3 | Inapte N |
|---|---------------------|---------------------------|------------------------------|------------------|
| Facteurs climatiques | | | | |
| 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 |
| Facteurs pédologiques | | | | |
| 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 totales 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 | s2 |
| | Aisance de pénétration des racines | |
| | -Structure | s1 |
| | -Texture | s2 |
| Risque d'inondation | -Charge graveleuse | s1 |
| | Position topographique et fréquence | s1 |
| Résultat | | s2 |
| Aptitude globale du sol | | S2nr |

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

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. Cette carte montre que le type de sol du site d'étude est ferrugineux tropical lessivé induré profond 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 minéraux en fonction des besoins de la culture.

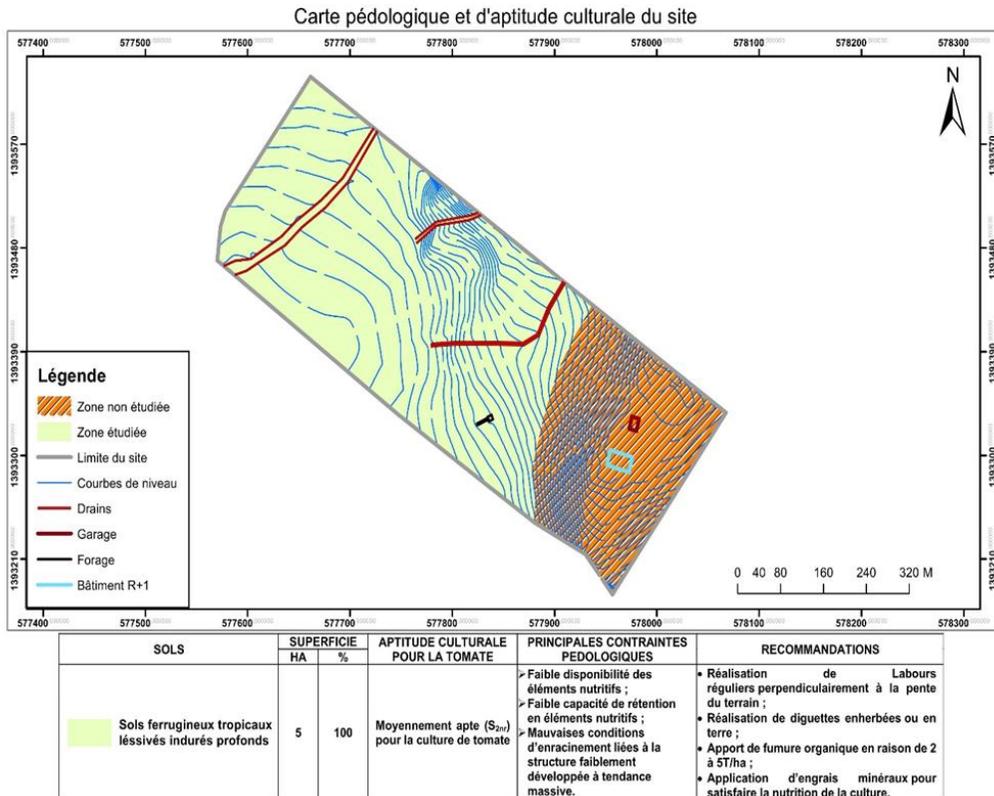


Figure 6. Carte pédologique et d'aptitude culturale du site

Discussion

Evolution pédogénétique et caractéristiques du sol

Les résultats de la caractérisation morpho-pédologique du sol étudié ont montré qu'il s'agit d'un sol ferrugineux tropical lessivé induré profond (FLIP). La ferruginisation serait due à une 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 sa forme cristalline avec pour conséquence la formation de concrétions ferrugineuses et ferromanganifères. L'induration marquée par la présence d'une carapace ou d'une cuirasse rend difficile la pénétration racinaire. Le taux d'éléments grossiers augmente avec la profondeur. Ceci serait dû également 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 Guire (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 proviendrait essentiellement de l'action conjuguée du lessivage de ces 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 énergiquement 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 très 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 (Väderstad 2022).

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 pourrait s'expliquer par le phénomène de lixiviation qui selon Thompson (1957), s'effectue préférentiellement 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'expliquerait 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 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 pourrait se justifier 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 extrêmement déficients en P avec une fixation élevée de P car ils sont principalement acides (Chien et al., 2010 ; 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 (O'Halloran et al., 1987). Il a été également 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 Guire (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 pourrait 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 (Nabin et al., 2022). Le statut du K dans le sol est également dynamique et déterminé par un certain nombre de facteurs tels que la texture du sol, la minéralogie, la température et le pH (Nabin 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). Guire (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 serait 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 seraient dues à la nature kaolinique 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 cmol kg^{-1} , dépend fortement du carbone organique du sol (Bationo et al., 2007).

La saturation en bases (S/T) (Ca^{2+} , M^{2+} Na^+ 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. En effet, un sol saturé à plus de 90% possèdera moins de 10% de sites occupés par des ions H^+ , son pH sera donc alcalin, généralement > 7.5 (Wendling et al. 2020). Un sol saturé à moins de 60% par des cations nutritifs aura par contre un pH acide, de nombreux sites étant occupés par les ions H^+ (Collaud et al., 1990). 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.

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 notre 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 son 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 à fait adaptés 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. (2005), 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 était 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 aptes 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 également 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 de nos résultats, une profondeur utile de 50 à 75 cm et la texture limon argileuse à limon argileux sableuse des sols étaient très 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 chimique, physique 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 du sol appropriées pour la culture de la tomate dans la zone d'étude. Les contraintes étant la somme des bases échangeables et la C.E.C faibles. Les teneurs en phosphore et potassium totaux sont faibles. Les conditions d'enracinement difficiles imputables à la structure faiblement développée à tendance massive, la profondeur effective et de la charge graveleuse élevée. Pour la conservation de ce sol et l'optimisation des rendements, il est nécessaire de prévoir les aménagements et amendements adéquats. Pour améliorer les conditions d'enracinement faire l'installation de cordons pierreux suivant les courbes de niveau. La formation de diguettes enherbées ou en terre. Pour améliorer la fertilité chimique et minérale, 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 pour relever le pH du sol. Pour une meilleure connaissance et de gestion du potentiel de fertilité du sol étudié, il est nécessaire d'effectuer une étude complémentaire de fertilité pour une meilleure exploitation et gestion durable de ce sol. Au regard de l'aptitude culturale que présente ce sol pour la production de tomate, cette étude pourrait se poursuivre, afin de déterminer pour quelles spéculations maraichères ce sol serait plus économiquement rentable.

Contributions des Auteurs: KFZ, PAWD, IS ont été les investigateurs ont réalisé les travaux de terrain et à l'acquisition, l'analyse et à l'interprétation des données, à la rédaction du manuscrit. DG, AC, EH à la révision du manuscrit et à l'amélioration de sa 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., Mavnic, D.S., & Koch, F.A. (2003). Pilot-scale study of phosphorus recovery through struvite crystallization-examining to process feasibility. *J. Environ. Eng. and Sci.* 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. Arora, V.P.S., Bargali, S.S., & Rawat, J.S. (2011). Climate change: challenges, impacts, and role of biotechnology in mitigation and adaptation. *Progressive Agric.* 11: 8-15.
5. 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. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Agriculture*. 5 pages. <https://doi.org/10.1155/2014/149209>.

6. Bargali, S.S., Singh, R.P., & Mukesh J. (1993). Changes in soil characteristics in eucalyptus plantations replacing natural broad leaved forests. *J. Vegetation Sci.* 4: 25-28. <https://doi.org/10.2307/3235730>.
7. Bassolé, 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). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 17(1): 247-266. DOI:10.4314/ijbcs.v17i1.18.
8. Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., & Kimetu J. (2007). Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agric. Syst.* 94:13–25. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.08.011>.
9. 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>.
10. 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>;
11. Boyadgiev, T.G. (1980). Création d'un service des sols. Haute-Volta. *Etat des connaissances des sols.* AG : DP/UPV/74/007 - Rapport technique 1. PNUD/FAO, Rome, 1980, 33 p.
12. 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>.
13. BUNASOLS (1987). Méthodes d'analyse physique et chimique des sols, eaux et plantes, Documentations techniques n°3, Ouagadougou, 128p.
14. BUNASOLS (1989). Méthodologie de prospection pédologique, documentations techniques n°5, Ouagadougou, 121p.
15. BUNASOLS (1990). Manuel pour l'évaluation des terres, documentations techniques n°6, Ouagadougou, 181p.
16. BUNASOLS (2014). Etude morphopédologique de la province du Boulkiemdé, échelle 1/100 000, 95p.

17. BUNASOLS (2017). Rapport d'activités du Bureau National des Sols (BUNASOLS), décembre 2017, Ouagadougou, 38p.
18. Chauv, C., & Foury, C.L. (1994). Cultures légumières et maraîchères. Tome III : légumineuses potagères, légumes Fruit. Tec et Doc Lavoisier, Paris, 563p.
19. Chien, S.H., Prochnow, L. I., & Mikkelsen, R. (2010). Agronomic Use of Phosphate Rock for Direct Application: Better Crops/Vol. 94 (4) : 21-23.
20. Collaud, G., Ryser, J.P., & Schwarz, J.J. (1990). Capacité d'échange des cations. *Revue suisse Agric.* 22 : 285-289.
21. CPCS (Commission 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.
22. 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.
23. Dabin, B. (1974). Evolution des phosphates en sols acides des régions tropicales. *Bulletin A.F.E.S.* 2 : 87-104.
24. Diop, M., Chirinda, N., Beniaich, A., El Gharous, M., & El Mejahed, K. (2022). Soil and Water Conservation in Africa: State of Play and Potential Role in Tackling Soil Degradation and Building Soil Health in Agricultural Lands. *Sustainability*, 14(20) :13425; <https://doi.org/10.3390/su142013425>.
25. Duchaufour, P. (1997). Abrégé de pédologie, sol, végétation, environnement. Elsevier Masson, Paris, France, 5e édition, Broché VII-291p.
26. FAO (2005). Appui à la mise en œuvre du pddaa/nepad au Burkina Faso, vol. 1, Rome, 46p.
27. Gallais, A., & Bannerot, H. (1992). Amélioration des espèces végétales cultivées. Objectifs et critères de sélection. Paris, INRA, 77p.
28. Gomez, M.I., & Ricketts, K.D. (2013). Food value chain transformations in developing countries Selected hypotheses on nutritional implications. *Food Policy*, 42(C) : 139-150. DOI: 10.1016/j.foodpol.2013.06.010.
29. Guire, 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.

30. Henao, J., & Baanante, C. (2006). Agricultural Production and Soil Nutrient Mining in Africa: Implications for Resource Conservation and Policy Development [Online]. 13 p.
31. IUSS Working Group WRB. (2015). Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, Mise à jour 2015. Système international de classification des sols pour nommer es sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rapport sur les ressources en sols du monde n° 106. FAO, Rome, 203p.
32. 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>;
33. Kissou, R., Gnankambary, Z., Nacro, H.B., Sédogo, M.P., & Sédogo, M.P. (2018). Classification locale et utilisation des sols en zone sahélienne au Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 12(1) : 610-617. DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v12i1.46>
34. Kjeldahl, J., (1883). New Method for the Determination of Nitrogen. *Chem News*. News 48 (1240): 101–102. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01338151>.
35. 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.
36. MAAH (2021). Annuaire des statistiques agricoles 2020, Burkina Faso, juin 2021, 386p.
37. MAAHM (2021a). Tableau de bord statistique de l'agriculture 2020, 85p.
38. 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.
39. MAH (2012). Rapport final 2012, Stratégie nationale de développement de l'entreprenariat agricole à l'horizon 2025, 54p.
40. MAH (2011). Bureau Central du Recensement Général de L'agriculture : Rapport général du module Maraîchage, Phase 2 RGA 2006-2010, Ouagadougou, Burkina Faso. 318p.
41. 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.
42. MARH (2008). Evolution du secteur agricole et des conditions des ménages au Burkina Faso. Projet AI/CN-SISA. 92p.

43. MASA (2013). Rapport final situation de référence filières agricoles, Ministère de l'Agriculture et de la Sécurité Alimentaire, Burkina Faso, 208p.
44. Metson A.J. 1956. Methods of chemical analysis for soil survey samples. N.Z. Soil Bur. Bull., n°12.
45. Nabin, R., Keshab, R.P., Renuka, S., & Shree, P.V. (2022). Phosphorus and potassium mineralization as affected by phosphorus levels and soil types under laboratory condition. pp:1-9. <https://doi.org/10.1002/agg2.20229>.
46. Naika, S., Lidt de jeude, V.J., Goffau de, M., Hilmi, M. & Van dam, B. (2020). La culture de la tomate : production, transformation et commercialisation, Fondation Agromisa et CTA, Wageningen, Agrodok 17, 105p.
47. NBSS & LUP (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.
48. 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. [Google Scholar] [CrossRef].
49. O'Halloran, I.P., Stewart, J.W.B., & Kachanoski R.G. (1987). Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 67: 147-163.
50. 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.
51. 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.
52. 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: 291-301.
53. 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.
54. Rafael, R.B.A., 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.
55. Sanchez, P.A., Shepherd, K.D., Soule, M.J., Place, F.M., Buresh, R.J., & Izac, A.M.N. (1997). Soil fertility replenishment in Africa: An investment in natural resource capital. In *Replenishing Soil fertility in Africa*. SSSA Special Publication Number. 51 : 1-46.
 56. 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.
 57. Shankara, N., Jeude, J. L., Goffau, M., Hilmi, M., & Dam, B. (2005). *La culture de tomate Production, transformation et commercialisation* Editor : Barbara van Dam, Imprimé par Digigrafi, Fondation Agromisa et CTA, Wageningen, Pays-Bas 105p.
 58. 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. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 16 (2) : 842-854. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v16i2.26>. <http://www.ifgdg.org>.
 59. Thiombiano, L., & Tourino-Soto, I. (2007). Status and Trends in Land Degradation in Africa. In *Climate and Land Degradation*; Sivakumar, M.V.K., Ndiang'ui, N., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 39–53. ISBN 9783540724384. [Google Scholar].
 60. Thompson, L.M. (1957). *Sols et fertilité des sols*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York. 83(5): p415.
 61. Tully, K., Sullivan, C., Weil, R., & Sanchez, P. (2015). The State of Soil Degradation in Sub-Saharan Africa: Baselines, Trajectories, and Solutions. *Sustainability*, 7: 6523–6552. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
 62. UA/SAFGRAD (2010). *Recherche et développement agricoles dans les zones semi-arides d'Afrique. Technologies agricoles au Burkina Faso*. Recueil des technologies agricoles, p100.
 63. Väderstad (2022). *Caractéristiques des différents types de sols*, www.vaderstad.com/fr.
 64. Houba, J., van Der Lee J., Novozamsky, I., & Walinga, I. (1988). *Soil and Plants Analysis. Part 5, Soil Analysis Procedures*. Wageningen University, Wageningen.
 65. Walkey, A., & Black, I.A. (1934). Détermination de la matière organique dans le sol. *Soil Sci*, 37,549-556.

66. 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 : Décision en bref. 8p.
67. WRB (World Reference Bases) (2015). World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. Classification, correlation and communication, 2nd édition. World Soil Resources Reports No.103, FAO, Rome, 145 p.
68. 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; DOI: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i8.1395-1403.5004>.
69. 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.
70. Zongo, K.F., Nandkangre, H., Guebre, 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.