



Full paper/Mémoire

## Diagnostic de l'état agropédologique des sols acides de la province de Kinshasa en république démocratique du Congo (RDC)



### *Diagnosis of the state agropedological acid soils of the province of Kinshasa, Democratic Republic of Congo (DRC)*

Crispin Mulaji <sup>a, \*</sup>, Pascal Disa-Disa <sup>a</sup>, Irène Kibal <sup>b</sup>, Marc Culot <sup>c</sup><sup>a</sup> Laboratoire Eau–Santé et Environnement, faculté des sciences, université de Kinshasa, B.P. 190, Kinshasa XI, république démocratique du Congo<sup>b</sup> Laboratoire de pédogéochimie, faculté des sciences, université de Kinshasa, B.P. 190, Kinshasa XI, république démocratique du Congo<sup>c</sup> Laboratoire d'écologie microbienne et d'épuration des eaux, Gembloux Agro Bio Tech, université de Liège, B-5030, Belgique

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 22 June 2015

Accepted 27 August 2015

Available online 27 January 2016

## Keywords:

Soil  
Organic matter  
Chemical composition  
Soil microbial biomass  
Kinshasa

## Mots clés:

Sol  
Matière organique  
Composition chimique  
Biomasse microbienne  
Kinshasa

## ABSTRACT

This study is a part of the research methods for sustainable management of sandy soils of the province of Kinshasa (DRC). The intended aim is to characterize the soil sites with high agricultural activity in Kinshasa and to identify the main constraints to productivity. The diagnosis revealed that soils of three sites investigated studied are sandy and characterized by low retention capacity in the field (< 45 %) present an acid reaction (pH < 5.5), have very low TOC contents ( $\leq 1\%$ ),  $N_{\text{tot}}$  ( $\leq 0.1\%$ ),  $P_{\text{ass}}$  ( $< 20 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), inexchangeable bases and are saturated to more than 60 % Al. Microbiological characteristics are weak in terms of microbial carbon, basal and induced respiration, and enzymatic activities. These characteristics are influenced by the organic matter and are the limitations on the productivity of these soils.

© 2015 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

## R É S U M É

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la recherche de méthodes de gestion durable des sols sablonneux de la province de Kinshasa (RDC). L'objectif est de caractériser les sols des sites à forte activité agricole et de dégager les principales contraintes vis-à-vis de la productivité. Le diagnostic a révélé que les sols des trois sites étudiés sont sableux et caractérisés par une faible capacité de rétention au champ (< 45 %) et présentent une réaction acide (pH < 5,5), ont de très faibles teneurs en COT ( $\leq 1\%$ ),  $N_{\text{rot}}$  ( $\leq 0,1\%$ ),  $P_{\text{ass}}$  ( $< 20 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), en bases échangeables s'il sont saturés à plus de 60 % en Al. Les caractéristiques microbiologiques sont faibles en terme de carbone microbien, de respiration basale et induite, et d'activités enzymatiques. Ces caractéristiques sont sous la dépendance du taux de matière organique et constituent les limitations à la productivité de ces sols.

© 2015 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [crismulaji@yahoo.fr](mailto:crismulaji@yahoo.fr) (C. Mulaji), [disadisap@yahoo.fr](mailto:disadisap@yahoo.fr) (P. Disa-Disa), [ikibal2014@gmail.com](mailto:ikibal2014@gmail.com) (I. Kibal), [marc.culot@skynet.be](mailto:marc.culot@skynet.be) (M. Culot).

## 1. Introduction

La république démocratique du Congo (RDC) est un pays d'Afrique centrale au potentiel agricole énorme, estimé à plus de 80 millions d'hectares de terres arables, et sa position à cheval sur l'équateur lui permet de jouir d'une alternance des climats propice à une production ininterrompue des cultures sur toute l'année [1]. Les sols de la RDC sont très variés à différentes échelles : on rencontre côte à côte les sols les plus riches sur des surfaces limitées et dispersées et les sols les plus pauvres beaucoup plus étendus [2]. La province de Kinshasa est essentiellement couverte de sols sableux dits sables ocres du système de *Kalahari* et ces sols ont un pouvoir agronomique très limité [3].

Beaucoup d'études pour la mise en valeur des terres agricoles en régions tropicales ont mis en évidence des contraintes majeures liées souvent à l'inadéquation des pratiques utilisées par rapport aux caractéristiques des sols pour une agriculture intensive et sédentaire, qui limitent considérablement leur production [4]. Elles sont d'ordre minéralogique, physique, chimique et biologiques, et leur évaluation constitue une étape indispensable permettant de dégager les techniques appropriées de gestion de sols pour une agriculture durable [5].

En RDC, l'étendue du territoire associé au manque de données complique sérieusement la gestion des terres agricoles. Peu d'informations existent sur les caractéristiques minéralogiques, physiques, chimiques et biologiques.

L'objectif poursuivi dans cette étude est la caractérisation des sols des trois sites dont deux à forte activité agricole de la province de Kinshasa à savoir, Kimwenza, Balume au plateau des Batéké et Mont-Amba en vue de déterminer leur état agropédologique et de dégager les principales contraintes chimiques et biologiques susceptibles de limiter leur production agricole.

## 2. Matériel et méthodes

Les échantillons de sol des horizons superficiels ont été utilisés pour la présente investigation. Sur chaque site, un profil a été réalisé et un échantillon composite a été préparé à partir des petites carottes de terre prélevée de façon dispersée sur une superficie d'environ 1 hectare pour Balume (latitude 04°06'19" S, longitude 15°52'01" EO et altitude 655 m) et Kimwenza (latitude 04°27'41,9" S, longitude 15°17'09,5" EO et altitude 374 m) tandis que le sol du Mont-Amba (latitude 04°25'01,16" EO, longitude 15°18'29" S et altitude 450 m) a été prélevé dans le jardin expérimental de la faculté des sciences de l'université de Kinshasa (unikin). Les échantillons étaient subdivisés en deux parties : une partie séchée à l'air libre puis broyée à l'aide d'un mortier en porcelaine et d'un pilon approprié ; et tamisée sur un tamis de 2 mm pour les analyses physico-chimiques de routine de l'estimation de la fertilité et l'autre partie conservée à l'état frais (4 °C) pour les analyses microbiologiques [6,7]. Les analyses microbiologiques ont été effectuées sur des échantillons frais ramenés à 50 % de leur capacité maximale de rétention en eau [7]. Des plus, des échantillons non perturbés ont été prélevés dans

chaque site à l'aide des cylindres métalliques (anneaux de Kopecky) en acier inoxydable pour la mesure de la densité apparente.

Les analyses microbiologiques et une partie des analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire d'écologie microbienne et d'épuration des eaux (LEMEE) de Gembloux Agro-Bio Tech, université de Liège (ULg) en Belgique. Les analyses physico-chimiques et chimiques ont été effectuées dans les laboratoires de pédologie de la faculté d'agronomie et de chimie analytique de la faculté des sciences (UNIKIN) à Kinshasa.

Le pH du sol a été mesuré dans une suspension sol-H<sub>2</sub>O et sol-KCl 1 N dans un rapport de 1/5, le carbone organique total (COT) selon le protocole de Walkley et Black (1934), l'azote organique (Norg) selon la méthode Kjeldahl, l'azote minéral (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> et NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) selon les tests spectroquants sur l'extrait au KCl (0,5 N), le phosphore total (P<sub>tot</sub>) par la digestion à H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> après calcination au four à moufle et le phosphore disponible par Bray 2, la capacité d'échanges cationiques (CEC) et les bases échangeables par extraction (percolation) en milieu tamponné à l'acétate d'ammonium pH 7 [8]. Les éléments minéraux totaux (Cu, Fe, Zn, Mn, Pb) ont été déterminés sur cendres après calcination de l'échantillon à 550°C et minéralisation par spectrophotométrie d'absorption atomique [6,8].

La biomasse microbienne a été déterminée par fumigation-extraction [9] : fumigation par des vapeurs de chloroforme, extraction par agitation dans K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,5 N). Le carbone microbien extractible est égal au supplément de carbone extrait dans les échantillons fumigés par rapport aux échantillons témoins, non traités par le chloroforme et corrélé à la biomasse microbienne par un facteur de calibration *K<sub>ce</sub>* égal à 0,38. La préparation de l'azote microbien s'est fait dans les mêmes conditions que le carbone microbien. L'azote est déterminé par dosage de l'azote Kjeldahl après minéralisation suivi d'une distillation. L'ammonium est mesuré sur les deux extraits et la différence entre les deux mesures représente l'azote microbien qui est aussi corrélé avec la biomasse microbienne. Les résultats des mesures de biomasse microbienne sont donnés en mg C.kg<sup>-1</sup> sol sec.

La respiration de sol se fait sur des échantillons à 50-60 % de leur capacité au champ dans des flacons hermétiquement fermés et incubés à 20°C, le CO<sub>2</sub> émis étant piégé par les pastilles de NaOH et mesuré par le système DBO WTW Oxitop. La respiration basale est pratiquée sur les échantillons tels quels et la respiration induite est mesurée après ajout d'un substrat (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>, NH<sub>4</sub>SO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) [10]. Elles sont exprimées en mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> sol sec.

La mesure du carbone facilement métabolisable a été déterminée et adaptée selon la mesure de la DBO (demande biochimique en oxygène) [11]. La DBO est basée sur l'incubation d'échantillons à 20°C dans des flacons fermés à l'abri de la lumière, en présence d'une solution saline et un inoculum (provenant d'une station d'épuration) traité aux ultrasons. La nitrification est inhibée par l'ajout d'allylthiourée (ATU). Le carbone facilement métabolisable (C<sub>fm</sub>) est obtenu par la relation : C<sub>fm</sub> (mg.C kg<sup>-1</sup> sol) = DBO (mg O<sub>2</sub>.j<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> sol) × 12/32 [12].

La monophosphoesterase acide a été déterminée après incubation à 37 °C pendant 1 h d'un gramme d'échantillon de sol à pH 6,5 et libération du *p*-nitrophényle [13]. L'activité de l'uréase tamponnée et non tamponnée a été déterminée par la méthode de Kandeler et Ceber [14].

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Caractéristiques physicochimiques

Les résultats des caractéristiques physicochimiques des sols des 3 sites étudiés sont consignés dans le [tableau 1](#).

L'analyse granulométrique des sols étudiés a montré une texture essentiellement sableuse dans l'horizon superficiel qui traduit bien une certaine homogénéité du matériel parental constaté dans la région [15]. Ce sont des sols constitués principalement de sables fins pouvant être classés comme *rubriques arenoferralsols (dystriques)* [16]. Les teneurs en argile et limon sont minimales dans les horizons superficiels. La densité apparente des sols des couches superficielles obtenue sur les trois sites est de  $\pm 1,2 \text{ g.cm}^{-3}$ , se trouve dans la gamme de  $1,1\text{--}1,4 \text{ g.cm}^{-3}$ , considérée comme densité des sols non récemment cultivés et non compactés [5]. Cette valeur révèle que les sols étudiés ont d'excellentes propriétés physiques, due aux conditions optimales de drainage (porosité > 40 %), de circulation de l'air et de pénétration facile des racines caractérisant les sols sablonneux [17,18].

L'analyse de la capacité de rétention au champ (CRC) qui est le seuil en dessous duquel l'eau contenue dans le sol ne peut être drainée est de plus ou moins 25 % pour les sols de Kimwenza et du Mont-Amba; et de 42 % pour le sol de Balume. Ainsi, le sol de Balume a une CRC élevée, en relation avec sa texture qui traduirait sa fraction argileuse élevée. En effet, comme d'autres caractéristiques physiques (conductivité hydraulique, perméabilité, densité apparente, etc.), la CRC est grandement liée à la texture minéralogique qui détermine la structure du sol et peut être aussi influencée par le taux des matières organiques [19].

#### 3.2. Caractéristiques chimiques

Le [tableau 2](#) contient les caractéristiques chimiques des échantillons composites des sols provenant des trois sites. Les résultats sont les moyennes de trois essais. En général, les directives proposées par London [17] et, dans la mesure du possible, d'autres auteurs [20], ont été utilisées dans la discussion des résultats.

**Tableau 1**

Quelques caractéristiques physiques des sols des sites étudiés.

| Paramètres  | Site         |              |                |
|-------------|--------------|--------------|----------------|
|             | Kimwenza     | Mont-Amba    | Balume         |
| Texture (%) | Sable        | Sable        | Sable limoneux |
| Argile      | 2,00 (0,71)  | 4,75 (0,83)  | 10 (0,71)      |
| Limon       | 6,50 (2,06)  | 2,50 (0,50)  | 1,75 (0,43)    |
| Sable       | 91,50 (1,50) | 92,75 (1,09) | 88,75 (2,59)   |
| CRC (%)     | 24,98 (0,14) | 25,80 (0,00) | 41,53 (0,19)   |

CRC : capacité de rétention au champ, Chiffre ( ) : écart-type.

**Tableau 2**

Caractéristiques chimiques des sols des sites étudiés.

| Paramètres   | Sol de site    |                |                |
|--|----------------|----------------|----------------|
|  | Kimwenza       | Mont-Amba      | Balume         |
| pH <sub>H2O</sub>  | 4,90 (0,04)    | 4,40 (0,17)    | 5,39 (0,20)    |
| pH <sub>KCl</sub>  | 4,00 (0,02)    | 4,39 (0,02)    | 4,39 (0,01)    |
| COT (%)  | 0,58 (0,03)    | 0,66 (0,02)    | 1,07 (0,05)    |
| N <sub>tot</sub> (%)                                       | 0,04 (0,01)    | 0,05 (0,01)    | 0,10 (0,04)    |
| C/N  | 14,5 (0,41)    | 13,2 (1,07)    | 10,7 (3,92)    |
| N <sub>min</sub> /N <sub>tot</sub> (%)                     | 0,31 (0,02)    | 0,20 (0,07)    | 0,14 (0,04)    |
| P <sub>ass</sub> (mg.kg <sup>-1</sup> )                    | 6,94 (0,20)    | 12,75 (0,52)   | 15,25 (1,03)   |
| P <sub>tot</sub> (mg.kg <sup>-1</sup> )                    | 101,90 (13,10) | 144,16 (23,49) | 427,99 (36,77) |
| Ca <sub>éch</sub> (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> ) | 0,22 (0,01)    | 0,22 (0,02)    | 0,27 (0,02)    |
| Mg <sub>éch</sub> (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> ) | 0,16 (0,02)    | 0,15 (0,02)    | 0,11 (0,02)    |
| K <sub>éch</sub> (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )  | 0,07 (0,01)    | 0,06 (0,00)    | 0,07 (0,01)    |
| Na <sub>éch</sub> (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> ) | 0,04 (0,02)    | 0,06 (0,01)    | 0,06 (0,01)    |
| CEC (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )               | 2,28 (0,03)    | 2,54 (0,07)    | 4,42 (0,13)    |
| CECE (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )              | 1,77 (0,07)    | 1,80 (0,01)    | 1,57 (0,04)    |
| SBE (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )               | 0,49 (0,05)    | 0,49 (0,01)    | 0,51 (0,03)    |
| TS (%)   | 21,49 (1,92)   | 19,49 (0,11)   | 11,54 (0,38)   |
| TS <sub>eff</sub> (%)                                      | 27,68 (1,75)   | 29,70 (0,58)   | 32,48 (1,08)   |
| AE <sub>éch</sub> (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> ) | 1,28 (0,12)    | 1,31 (0,08)    | 1,06 (0,05)    |
| Al <sub>éch</sub> (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> ) | 1,16 (0,04)    | 1,21 (0,05)    | 0,99 (0,10)    |
| S Al (%)   | 50,88 (0,53)   | 47,64 (2,84)   | 22,40 (0,02)   |
| S Al <sub>eff</sub> (%)                                    | 66 (1,00)      | 71,18 (2,84)   | 63,06 (0,12)   |
| Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )                                  | 42,52 (4,27)   | 33,20 (5,76)   | 52,91 (10,7)   |
| Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )                                  | 10,90 (1,10)   | 11,14 (0,70)   | 9,91 (1,30)    |
| Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )                                  | 31,10 (2,50)   | 21,20 (3,13)   | 40,80 (6,20)   |
| Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )                                  | 14,24 (1,38)   | 16,81 (2,70)   | 14,85 (1,50)   |

COT : carbone organique total, N<sub>tot</sub> : azote total, N<sub>min</sub> : azote minéral, P<sub>ass</sub> : phosphore assimilable, P<sub>tot</sub> : phosphore total, cmol : centimole, CEC : capacité d'échange cationique, CECE : capacité d'échange cationique effective, SBE : somme de bases échangeables, TS : taux de saturation, TS<sub>eff</sub> : taux de saturation effective, S Al : saturation en aluminium, S Al<sub>eff</sub> : saturation effective en aluminium, AE<sub>éch</sub> : acidité d'échange, Al<sub>éch</sub> : aluminium échangeable, chiffre ( ) : écart-type.

#### 3.2.1. pH

Le pH est un paramètre important qui conditionne un grand nombre des réactions chimiques et microbiologiques dans le sol. Généralement, la plupart des plantes cultivées poussent convenablement dans un sol neutre ou légèrement acide c'est-à-dire de  $5,5 < \text{pH} < 7$  [17]. Les faibles valeurs de pH dans les sols limitent la croissance végétale par la diminution de la nitrification, la déficience en phosphore, la toxicité aluminique et manganique, et par la grande disponibilité des certains éléments mineurs, etc. Le [tableau 2](#) révèle que tous les sols ont un pH<sub>H2O</sub> < 5,5, et sont donc caractérisés par une réaction acide. Les sols de Kimwenza (pH = 4,90) et du Mont-Amba (pH = 4,4) sont fortement acides alors que celui de Balume (pH = 5,39) est moyennement acide. En outre, les résultats montrent dans tous les cas, que le pH<sub>H2O</sub> est supérieur au pH<sub>KCl</sub>, indiquant la présence de colloïdes à charge négative dans les sols étudiés [21].

#### 3.2.2. Carbone organique total (COT) et azote total (N<sub>tot</sub>)

La matière organique constitue une source principale par excellence d'éléments nutritifs (N, S, P, etc.) dans les sols tropicaux fortement altérés à faible réserve minéralogique. Les teneurs en COT et N<sub>tot</sub> respectivement  $\leq 1\%$  et  $\leq 0,1\%$  ont été obtenues sur les trois sites étudiés soit 0,58 et 0,04 à Kimwenza ; 0,66 et 0,05 au Mont-Amba et 1,07 et 0,1 à Balume. Confrontés aux valeurs guides proposées dans la

littérature [17,20], les sols étudiés sont pauvres en COT et  $N_{\text{tot}}$ . Les faibles teneurs en matières organiques se répercutent négativement sur la fertilité des sols et génèrent de nombreuses déficiences du fait de ses effets physiques, chimiques et biologiques [22]. Cette situation expose ces sols à la dégradation par l'érosion hydrique lors des fortes précipitations en milieu tropical humide et surtout lorsque les pentes deviennent fortes.

Le rapport C/N est moyen à Kimwenza et Mont-Amba (13–15) et bas à Balume (10,7). Ceci indique pour le cas des sols de Kimwenza et Mont-Amba, la présence d'une matière organique de mauvaise qualité, c'est-à-dire difficilement décomposable ou biodégradable. Ces rapports sont caractéristiques des sols à faible teneur en azote, dus probablement à la faible vitesse de minéralisation de la matière organique [22], combinée à une perte d'azote par le lessivage intense et continu propre aux régions tropicales caractérisées par des températures élevées et des fortes précipitations [24]. Selon, London [17], dans les sols à pH < 5,5, les bactéries nitrifiantes et fixatrices d'azote sont détruites par l'acidité du sol, et la nitrification de la matière organique est significativement limitée, conduisant ainsi à la déficience en azote. Le rapport  $N_{\text{min}}/N_{\text{tot}}$  qui constitue un bon indicateur du taux de minéralisation est faible pour les sols étudiés. Les formes minérales d'azote constituent seulement 0,1 à 0,3 % de l'azote total présent dans les sols. Le taux de minéralisation est faible dans tous les sols étudiés selon l'ordre de Kimwenza (0,3) > Mont-Amba (0,2) > Balume (0,1) en raison du faible taux de matière organique.

### 3.2.3. Phosphore

La teneur en phosphore assimilable ( $P_{\text{ass}}$ ) pour le sol de Kimwenza est de 7  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , plus ou moins la moitié de celle des deux autres sites, Mont-Amba (13  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) et Balume (15  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Ces valeurs sont inférieures aux valeurs guides des sols tropicaux (> 15 ppm) [17] et indiquent une déficience en phosphore dans les sols. Dans les sols acides tropicaux, le phosphate se combine au fer et à l'aluminium pour former des composés très peu solubles qui sont non disponibles pour les plantes [25,26]. Ces formes peuvent être solubilisées par les microflore du sol, mais cela dépend de la qualité de la matière organique. Quant au phosphore total ( $P_{\text{tot}}$ ), les valeurs indiquent des sols très déficients à Kimwenza, à faibles teneurs à Mont-Amba et moyennes teneurs à Balume.

### 3.2.4. Capacité d'échange cationique (CEC) et bases échangeables

Les valeurs de la CEC obtenues sont de l'ordre de 2,5 et 4,5  $\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$  respectivement pour Kimwenza, Mont-Amba et Balume. Ces valeurs sont très faibles par rapport aux valeurs guides [17,20]. Ces sols contiennent par conséquent, des faibles réserves d'éléments nutritifs et ont une capacité de stockage en cations limitée en fonction de la texture trouvée, même lorsqu'on considère leur capacité d'échange cationique effective ( $\text{CECE} \leq 4 \text{ cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) [3]. Les propriétés physiques observées ci-dessus prédisposent ces sols aux pertes d'éléments nutritifs par lessivage. Considérant les faibles taux de matière organique obtenus dans les sols de tous les sites, la contribution de cette matière à la capacité d'échange cationique est faible.

Concernant les bases échangeables (Ca, Mg et K) pour tous les sols étudiés, les valeurs trouvées sont inférieures aux valeurs limites pour les sols tropicaux [17]. La déficience en Ca s'observe dans les sols à faibles CEC et à pH  $\leq 5,5$ ; le Mg échangeable < 0,5  $\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$  correspond à la teneur seuil de déficience pour des sols tropicaux; quant à K, les teneurs échangeables sont inférieures à la valeur 0,2 considérée comme seuil de déficience [17]. Les rapports Ca/Mg < 3 et Mg/K suggèrent respectivement une inhibition possible de phosphore, une déficience en Ca et indiquent des faibles teneurs en magnésium et potassium [17,23].

### 3.2.5. Taux de saturation en bases

Les résultats consignés dans le Tableau 2 révèlent que les taux de saturation sont très faibles dans tous les sols étudiés (< 25 %). Ces sols sont qualifiés de *dystriques*, avec un taux de saturation < 50 %; tous les éléments nutritifs sont concentrés dans les matières organiques du sol et/ou dans la biomasse microbienne [16]. Le Ca, le Mg et le K sont considérés en agriculture comme les cations basiques les plus importants. Les valeurs idéales de saturation en bases pour les trois cations sont de 70–85 % pour le Ca, 10–15 % pour le Mg et 4–7 % pour le K [27]. On observe donc un déséquilibre entre ces cations, dû probablement au degré d'altération propre aux sols des régions tropicales résultant d'un excès d'aluminium échangeable.

### 3.2.6. Acidité d'échange, Al échangeable et saturation en Al

L'acidification entraîne la diminution de pH des sols par lessivage des cations basiques en région tropicale humide dominée par de fortes précipitations et des températures élevées; il devient plus important dans les sols à textures grossières [28]. L'acidité d'échange (AE) provient des ions hydrogène et aluminium, soit 1,3  $\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$  pour les sols de Kimwenza et Mont-Amba et 1,1  $\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$  pour le sol de Balume (tableau 2). Les teneurs en Al échangeables sont de l'ordre de 1 à 1,2  $\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Dans les sols où le pH > 5,5, l'aluminium est sous la forme  $\text{Al}(\text{OH})_3$  et  $\text{Al}^{3+}$  échangeable n'existe plus. Dès que le pH devient inférieur à cette valeur, la teneur en  $\text{Al}^{3+}$  augmente et ce cation devient le plus abondant pour l'échange [17,23,29].

Les valeurs correspondantes de saturation en aluminium par rapport à la capacité d'échange cationique effective varient de 63 à 71 %. Les sols saturés à plus de 60 % d'aluminium présentent une toxicité aluminique considérable, et pose de sérieux problèmes de croissance des plantes [17]. Seules les cultures tolérantes peuvent y croître normalement. En revanche, les sols dont la saturation aluminique est comprise entre 10 et 60 % présentent des problèmes d'acidité et l'aluminium conduit également à des troubles de la croissance végétale [4]. En effet, Al disponible vient de l'altération irréversible des argiles lorsque le pH diminue; si le pH augmente,  $\text{Al}^{3+}$  précipite et n'est que très peu recapté par les argiles. La désaturation des complexes adsorbants des sols tropicaux consécutive au lessivage des cations basiques, conduit généralement à leur enrichissement en Al et, par conséquent, à l'acidification des sols [4,17]. Ceci explique que les valeurs de saturation en Al trouvées dans les sols

étudiés seraient liées principalement aux pH acides et au faible statut en cations basiques [28].

### 3.2.7. Eléments nutritifs mineurs

Les microéléments du sol proviennent essentiellement de l'altération des roches et des minéraux et leurs déficiences ou toxicités dépendent de leurs teneurs totales dans les sols. Les teneurs en Fe, Mn, Zn et Cu (tableau 2) dans les 3 sites sont inférieures aux valeurs indicatives de toxicité dans les sols agricoles [30]. La solubilité et la disponibilité des microéléments sont très influencées par les conditions environnementales.

### 3.3. Caractéristiques microbiologiques

Les résultats des caractéristiques liées à la biomasse, à l'activité microbienne et enzymatique pour les échantillons des sols des trois sites sont présentés dans le Tableau 3. Il faut noter qu'il n'est pas toujours facile de comparer les caractéristiques microbiologiques dans la littérature, car les données varient fortement en fonction de nombreux facteurs tels que les conditions pédoclimatiques, les méthodes d'analyse, etc. Cependant, ces caractéristiques renseignent sur la minéralisation de la matière organique et sa qualité potentielle et les changements de l'état de fertilité des sols, etc.

#### 3.3.1. Azote et carbone de la biomasse microbienne

L'azote microbien et le carbone microbien sont deux paramètres microbiologiques qui traduisent la biomasse microbienne. Les faibles valeurs de  $C_{mic}$  (Tableau 3) à Balume (53 mg C.kg<sup>-1</sup> de sol sec) se situent à la limite basse pour des sols de surface (50–500 mg.kg<sup>-1</sup> sol) et, pour les deux autres sites, elles sont très inférieures [31].

Le rapport  $C_{mic}/N_{mic}$ , qui sert d'indicateur du taux de minéralisation du carbone et de l'azote à partir des formes organiques de base et renseigne aussi sur la proportion relative de la composition microbienne, est pour le Mont-Amba (11,6) égal au double de celui des deux autres sites.

Un faible rapport pourrait traduire la prédominance de la communauté bactérienne car pour les champignons le rapport est plus élevé [32]. En revanche, les valeurs élevées dans les trois sites ont été observées ( $\geq 2$ ) pour le quotient métabolique ou respiration spécifique ( $q_{CO_2}$ ), qui sert d'indicateur de perturbation ou de développement de l'écosystème microbien et traduit également la disponibilité des nutriments [33].

Selon Dilly [31] et Leclerc [34], les conditions de stress du milieu ont pour origine de faibles pH qui réduisent l'activité bactérienne ainsi qu'une faible disponibilité de carbone organique. Enfin, aux conditions pédoclimatiques comparables la taille du compartiment « biomasse microbienne » est directement fonction du carbone disponible pour satisfaire les besoins énergétiques des micro-organismes (carbone du sol plus ou moins biodégradable). On constate (Tableau 3) que la biomasse microbienne est de beaucoup plus importante à Balume comparée rapport aux autres sites.

Les valeurs de  $C_{mic}/COT < 1\%$  sur les trois sites sont faibles devant les valeurs limites (1 à 5%) dans les sols alors que celles de  $N_{mic}/N_{tot} \geq 1\%$  sauf pour le Mont-Amba sont dans la gamme (1–6 %) attendue [34,35,36].

#### 3.3.2. Respiration du sol et carbone facilement métabolisable

Les résultats de la respiration basale (RB) et de la respiration induite par le substrat (RIS), qui servent à la surveillance et à l'évaluation du potentiel écotoxique des sols de l'activité microbienne, sont consignés dans le Tableau 3. Il ressort de ce tableau que les valeurs de la respiration basale sont de l'ordre de 0,23 et de 0,37  $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}$  de sol sec respectivement pour les sols de deux sites de Kimwenza et Mont-Amba et pour celui de Balume. Les valeurs correspondantes de la respiration induite par le substrat sont de 1,13 pour Kimwenza ; 1,63 pour Mont-Amba et 3,59  $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}$  de sol sec pour Balume. La respiration microbienne du sol est donc plus importante au niveau du site de Balume, en relation avec la disponibilité du matériel organique. Le taux élevé du carbone organique

**Tableau 3**

Valeurs moyennes de carbone & azote microbien, respiration basale & induite par substrat, quotient d'activation respiratoire, quotient métabolique, carbone facilement métabolisable, activité de la monophosphoesterase acide, activité de l'uréase tamponnée & non tamponnée.

| Paramètres   | Sol de site   |                |                |
|--|---------------|----------------|----------------|
|  | Kimwenza      | Mont-Amba      | Balume         |
| $C_{mic}$ (mg C.kg <sup>-1</sup> sol sec)  | 23,03 (2,13)  | 33,19 (1,57)   | 53,51 (6,25)   |
| $N_{mic}$ (mg N.kg <sup>-1</sup> sol sec)  | 4,00 (0,30)   | 3,00 (0,76)    | 12,00 (1,01)   |
| RB (mg CO <sub>2</sub> .kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> sol sec)                   | 0,23 (0,02)   | 0,23 (0,04)    | 0,37 (0,03)    |
| RIS (mg CO <sub>2</sub> .kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> sol sec)                  | 1,13 (0,12)   | 1,63 (0,09)    | 3,59 (0,26)    |
| $C_{fm}$ (mg C.kg <sup>-1</sup> .sol sec)  | 155,67 (7,19) | 173,35 (10,34) | 293,03 (25,70) |
| $AU_{nt}$ ( $\mu\text{g NH}_4^+ \cdot \text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$ sol sec)   | 6,57 (0,20)   | 11,82 (0,73)   | 13,20 (0,69)   |
| $AU_t$ ( $\mu\text{g NH}_4^+ \cdot \text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$ sol sec)      | 15,42 (0,75)  | 17,82 (0,50)   | 22,93 (1,04)   |
| APA ( $\mu\text{mol. PNP. g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ sol sec)                      | 0,24 (0,02)   | 0,32 (0,05)    | 0,50 (0,02)    |
| $q_{CO_2}$ (mg C-CO <sub>2</sub> .kg <sup>-1</sup> .C <sub>mic</sub> <sup>-1</sup> ) | 2,72 (0,46)   | 1,89 (0,20)    | 1,89 (0,06)    |
| $Q_R$  | 0,20 (0,02)   | 0,14 (0,01)    | 0,10 (0,01)    |
| $C_{mic}/COT$ (%)  | 0,40 (0,04)   | 0,50 (0,01)    | 0,50 (0,03)    |
| $C_{fm}/COT$ (%)   | 2,68 (0,39)   | 2,63 (0,06)    | 2,74 (0,09)    |
| $N_{mic}/N_{tot}$ (%)  | 1,00 (0,15)   | 0,60 (0,13)    | 1,20 (0,40)    |
| $C_{mic}/N_{mic}$  | 5,75 (0,08)   | 11,60 (2,01)   | 4,46 (0,12)    |

$C_{min}$  : carbone microbien,  $N_{min}$  : azote microbien, RB : respiration basale, RIS : respiration induite par substrat,  $Q_R$  : quotient d'activation respiratoire,  $C_{fm}$  : carbone facilement métabolisable,  $AU_{nt}$  : activité de l'uréase non tamponnée,  $AU_t$  : activité de l'uréase tamponnée, APA : activité de la monophosphoesterase acide,  $q_{CO_2}$  : quotient métabolique, Chiffre ( ) : écart-type.

de ce site peut être considéré comme l'un des facteurs les plus importants affectant l'activité microbienne du sol [37]. D'autres facteurs tels que l'aération, l'approvisionnement en eau dans le sol (saison sèche, saison de pluie), la température, le pH et la fourniture de chaque nutriment sont également importants, mais la fourniture de l'énergie est très fréquemment le facteur limitant dans l'activité microbienne [38]. Concernant le carbone facilement métabolisable ( $C_{fm}$ ), qui est aussi une composante du carbone organique total, les valeurs obtenues sont faibles (Tableau 3). Les valeurs du rapport  $C_{fm}/COT$  indiquent mieux la qualité de la matière organique du sol. Le carbone facilement mobilisable se situe entre 2,6 % pour Kimwenza, Mont-Amba et 2,74 % pour Balume du carbone total. Cette fraction du carbone présente un grand intérêt chimique et microbiologique, pour caractériser un sol bien que la mesure de ce paramètre soit le plus souvent utilisée pour les eaux usées et les boues de stations d'épuration.

### 3.3.3. Activité enzymatique de la phosphatase et l'uréase

Les résultats des mesures des activités de la mono-phosphoestérase et de l'uréase ( $U_t$ : tamponnée et  $U_{nt}$ : non tamponnée) sont rapportés dans le Tableau 3. Les valeurs obtenues montrent des activités très faibles comprises entre 0,24 et 0,50  $\mu\text{mol.pNP.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$  de sol sec pour APA; 6,57 et 13,20  $\mu\text{g.N-NH}_4.\text{g}^{-1}.\text{h}^{-1}$  de sols sec pour  $U_{nt}$  et de 15,42 et 22,93  $\mu\text{g.N-NH}_4.\text{g}^{-1}.\text{h}^{-1}$  sol sec pour  $U_t$ . Pour tous ces paramètres la répartition sur les trois sites suit la distribution de la matière organique des sols dans l'ordre croissant Kimwenza < Mont-Amba < Balume. Ces observations ont été faites par plusieurs auteurs [38,39].

## 4. Conclusion

Les niveaux des caractéristiques physicochimiques et microbiologiques étudiées permettent de dégager les principales contraintes à la productivité des sols dans les régions sélectionnées.

La caractérisation physique a révélé que les sols étudiés ont une texture essentiellement sableuse dans l'horizon superficiel. La classification des sols comme *rubiques arenoferralsols (dystriques)* a confirmé et précisé l'homogénéité des conditions de formation des sols de la Province de Kinshasa. La capacité de rétention est très faible.

La caractérisation chimique des sols a montré que ces derniers présentent une réaction acide ( $\text{pH} < 5,5$ ) et possèdent de très faibles teneurs en carbone organique total, en azote total, en phosphore disponible, en cations basiques échangeables, et de faibles valeurs de la capacité d'échange cationique.

S'agissant des caractéristiques microbiologiques, les résultats montrent une faible activité microbienne dans les sols de tous les sites; ces activités restent influencées par les taux de matière organique.

La faible fertilité chimique et biologique combinée au faible potentiel de rétention d'eau restreindrait considérablement la production agricole des sols de la province de Kinshasa. Pour accroître la production agricole de ces sols, il faudrait relever leur fertilité chimique et biologique jusqu'au niveau optimal en utilisant des techniques appropriées de gestion. Les solutions durables impliquent

de fréquentes applications d'une part d'amendements organiques à la fois classiques, tels que les fumiers ou les résidus de plantes, ainsi que non conventionnels, tels que les différents types de compost ou boues de station d'épuration, et d'autre part la combinaison d'amendements organiques avec les engrais chimiques ou les agrominéraux. Ils améliorent la stabilité, la structure et la rétention d'eau du sol; influent sur la chimie en corrigeant l'acidification par l'effet de son pouvoir tampon et en fournissant les substances nutritives progressivement assimilables par les cultures; et provoquent la stimulation de la biomasse microbienne, qui influe sur les propriétés chimiques.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Coopération technique belge (CTB) pour son apport financier (project 05 RDC/3207) à la réalisation de la présente étude.

## Bibliographie

- [1] FAO, Deuxième rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture, République démocratique du Congo, 2009, p. 66.
- [2] A.K. Fahem, Les sols, in: G. Laclavere (Ed.), Atlas de la République démocratique du Congo, Jeune Afrique, Paris, 1978, p. 71.
- [3] C. Sys, The ferralsols of Zaïre, in: Proceeding of the Fourth International Soil Classification Workshop, Agricultural Edition 4, Part I, 1983, pp. 76–110.
- [4] J.-C. Voundi, Utilisation des déchets de l'industrie du bois en vue de l'amélioration de la fertilité chimique de sols acides tropicaux, Thèse de doctorat, Faculté Landbouwkundige en Toepegaste Biologische Wetenschappen, Universiteit Gent, Belgique, 1998, p. 194.
- [5] J.-P. Legros, Les grands sols du monde, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 2007, p. 566.
- [6] L. Pauwels, E. Van Ranst, M. Verloo, Z.A. Mvondo, Manuel de laboratoire de pédologie – Méthodes d'analyses des sols et des plantes – Equipement, Gestion de stocks, de verrerie et des produits chimiques, Publication agricole 28, AGCD, Dschang-Bruxelles, Belgique, 1992, p. 265.
- [7] R. Öhlinger, Sample preparation, in: F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, R. Margesin (Eds.), Methods in soil biology, Springer, Berlin, Heidelberg, 1995, pp. 9–11.
- [8] M. Pansu, J. Gautheryrou, L'analyse du sol, Minéralogie, organique et minérale, IRD, Springer-Verlag, France, 2003, p. 93.
- [9] Z. Solaiman, Measurement of microbial biomass and activity in soil, in: Advanced Techniques in Soil Microbiology, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007, p. 415.
- [10] ISO 17155, Soil quality – Determination of abundance and activity of soil microflora using respiration curves, International Standard Organization, Geneva, Switzerland, 2002, p. 12.
- [11] D.E. Andrew, S.C. Lenore, E.G. Arnold, Biochemical oxygen demand (5210 B)/5-Day BOD Test (5-5), Standard methods for examination of water and wastewater, American Public Health Association, USA, ISBN: 0-87553-223-6.
- [12] J.M. Mbonigaba, Étude de l'impact des composts à base de biomasse végétale sur la dynamique des indicateurs physico-chimiques, chimiques et microbiologiques de la fertilité des sols: application sur trois sols acides tropicaux du Rwanda, Thèse de doctorat, faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique, 2007, p. 243.
- [13] K. Alef, Soil respiration, in: K. Alef, P. Nannipieri (Eds.), Methods in applied soil microbiology and biochemistry, Academic Press, Londres, 1995, pp. 214–218.
- [14] E. Kander, H. Gerber, Biol. Fert. Environ. 86 (1988).
- [15] C. Sys, A. Van Wambeke, J. Frankart, La cartographie des sols au Congo, Ses principes et ses méthodes, Publ. INEAC, Sér. Sci, 1961, p. 66.
- [16] FAO, World reference base for soil resources, World Soil Resources Report N° 103, 2nd ed., Rome, 2006.
- [17] J.R. Landon, Booker Tropical Soil Manual, A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics, Paperback, Longman, Booker Tate limited, Oxon, Royaume-Uni, 1991, p. 474.

- [18] D. Baize, M.-C. Girard, J. Boulaine, C. Cheverry, A. Ruelain, Référentiel pédologique, Association française pour l'étude du sol, Quae, 2008, p. 453.
- [19] A. Klute, Water retention : laboratory methods, in: A. Klute (Ed.), *Methods of analysis. Part I*, Agron. Monogr. 9, ASA, Madison, WI, États-Unis, 2nd edition, 1986, pp. 635–662.
- [20] H. Sawadogo, Fertilisation organique et phosphate en système de culture Zaï en milieu soudano-sahélien du Burkina Faso, Thèse de doctorat, faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique, 2006, p. 219.
- [21] R. Koy, Amélioration de la qualité des sols sableux du plateau des Batéké (RD Congo) par application des matériels géologiques et des déchets organiques industriels locaux, Thèse de doctorat, faculté des sciences, Université Gent, Belgique, 2009, p. 323.
- [22] H. Ben Hassine, T. Aloui, T. Gallali, T. Bouzid, S. El Amri, R. Ben Hassine, *Agrosolution* 19 (2008) 2.
- [23] J. Boyer, Les sols ferrallitiques, Tome X : facteurs de fertilité et utilisation des sols, Initiations – Documentations Techniques, N° 52, ORSTOM, Paris, France, 1982.
- [24] P. Kanyankogote, E. Van Ranst, A. Verdoody, G. Baert, *Etude Gest. Sols*. 12 (2005).
- [25] F.R. Troeh, L.M. Thompson, *Soils and soil fertility*, 6th ed., Blackwell publishing, Oxford, Royaume-Uni, 2005, p. 489.
- [26] V. Kotchi, K.A. Yao, D. Sitapha, *J. Appl. Biosci* 31 (2010).
- [27] B. Wolf, The fertile triangle: The interrelationship of air, water and nutrient in maximizing soil production, Food Product Press, New York, 2000.
- [28] D.L. Rowell, A. Wild, *Soil Use Manag.* 1 (1985).
- [29] J.O. Reuss, E.C. Roswall, R.W. Hopper, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 (1990).
- [30] D. Baize, Examen critique des valeurs limites « sols » de la réglementation française, in: D. Baize, M. Tercé (Eds.), *Les éléments traces métalliques dans les sols : approches fonctionnelles et spatiales*, INERA, Paris, France, 2002, pp. 137–154.
- [31] O. Dilly, Microbial energetic in soil, in: F. Buscot, A. Varma (Eds.), *Microorganisms in soils: roles in genesis and functions*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 2005, pp. 123–138.
- [32] O. Dilly, *FEMS Microbiol. Ecol.* 43 (2003).
- [33] O. Dilly, A. Gnaß, E.-M. Pfeiffer, *Soil Biol. Biochem.* 37 (2005).
- [34] B. Leclerc, *Guide des matières organiques*, ITAB, Tome 2, Paris, 2001, p. 91.
- [35] L.J. Smith, E.A. Paul, The significance of soil biomass estimations, in: J.M. Bollag, G. Stotzky (Eds.), *Soil Biochemistry*, Vol. 6, Marcel Dekker, New York, USA, 1990, pp. 357–396.
- [36] G.P. Sparling, Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health, in: C.E. Pankhurst, B.M. Doubé, V.V.S.R. Gupta (Eds.), *Biological indicators of soil health*, CABI Publishing, Wallingford, Royaume-Uni, 1997, pp. 97–119.
- [37] M. Tejada, C. Garcia, J.L. Gonzalez, M.T. Hernandez, *Soil Biol. Biochem.* 38 (2006).
- [38] A.S. Mamilov, O. Dilly, *Soil Biol. Biochem.* 34 (2002).
- [39] M. Tejada, J.L. Gonzalez, *Eur. J. Agron.* 25 (2006).