

## Performances agronomiques du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) soumis à différentes des doses d'engrais

Kasereka Masimengo Serge<sup>1\*</sup>, Kambale Muyisa Musongora<sup>2</sup>, Mbusa Kamavu Yves<sup>3</sup>, Mbusa Wasukundi<sup>4</sup>, Katembo Kiripi Justin<sup>5</sup>, Kakule Vyakuno Joseph Emmanuel<sup>6</sup>, Muhindo Sahani Walere<sup>7</sup>, Mutiviti Paluku Gilbert<sup>8</sup>

### Résumé

L'objectif de cette étude était d'évaluer les performances agronomiques du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) en réponse aux fractions de différentes doses d'engrais en Territoires de Beni et de Lubero. Trois essais consécutifs (2018-2019, 2019-2020 et 2020-2021) ont été conduits dans trois zones agroécologiques : Bingo, Maboya et Kirumba. Excepté le traitement témoins, la dose du phosphore a été maintenue à 40 kg/ha. Sous la combinaison NP, les doses d'azote ont varié de 40, 60 et 90 kg/ha pour les traitements NP1,2,3 ; respectivement. Pour les traitements PK, le potassium a été considéré aux doses de 40, 80 et 120 kg/ha (PK1,2,3 ; respectivement). Les traitements au NPK ont consisté à une combinaison deux à deux des doses de 40, 60 et 90 kg d'azote par ha à celles de 40, 80 et 120 kg de potassium par ha donnant ainsi les 9 variantes de NPK. La croissance végétative du manioc (diamètre au collet, hauteur des plants, nombre de feuilles) a été significativement grande à Bingo, suivi de Maboya et Kirumba. Le rendement en racines tubéreuses a été significativement élevé sur les parcelles traitées au NPK9 (43,46 t/ha), NPK6 (42,41 t/ha), NPK8 (41,73 t/ha); suivies de celles traitées au NPK7 (40,26 t/ha) et NPK5 (38,47 t/ha). Le plus bas rendement a été enregistré sur les parcelles témoins (15,8 t/ha) qui n'ont pas significativement différé de celles traitées au NP1 (17,7 t/ha). L'augmentation de la dose de potassium jusqu'à 80 kg/ha et celle d'azote à 90 kg/ha est un atout majeur pour accroître le rendement du manioc si le phosphore n'est pas limitant.

<sup>1</sup> Institut Supérieur d'Études Agronomiques, Vétérinaires et Forestières de Butembo ; Email [sergemasimengo@gmail.com](mailto:sergemasimengo@gmail.com)

<sup>2</sup> Université Catholique du Graben ; Email [kambalemuyisam@gmail.com](mailto:kambalemuyisam@gmail.com)

<sup>3</sup> Université Officielle de Semuliki, Email [yvesmbusa@gmail.com](mailto:yvesmbusa@gmail.com)

<sup>4</sup> Université Catholique du Graben ; Email [mbusawasukundi@gmail.com](mailto:mbusawasukundi@gmail.com)

<sup>5</sup> Institut Supérieur d'Études Agronomiques, Vétérinaires et Forestières de Butembo ; Email [justinkiripy@gmail.com](mailto:justinkiripy@gmail.com)

<sup>6</sup> Université Catholique du Graben ; Email [evyakuno@yahoo.fr](mailto:evyakuno@yahoo.fr)

<sup>7</sup> Université Catholique du Graben ; Email [sahaniwalerem@gmail.com](mailto:sahaniwalerem@gmail.com)

<sup>8</sup> Université Catholique du Graben ; Email [malkakuva@gmail.com](mailto:malkakuva@gmail.com)

\*Auteur correspondant : Masimengo Kasereka Serge Email : [sergemasimengo@gmail.com](mailto:sergemasimengo@gmail.com)

*Mots-clés : Manioc, Fractionnement des doses d'engrais, Performance agronomique, Fertilisation*

### **Abstract**

*The objective of this study was to evaluate the agronomic performance of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in response to the fractions of different doses of fertilizers in Beni and Lubero territories. Three consecutive trials (2018-2019, 2019-2020 and 2020-2021) were conducted in three agro-ecological zones; Bingo, Maboya and Kirumba. Except for the control, the dose of phosphorus was maintained at 40 kg/ha. For the NP combination, the nitrogen doses varied from 40, 60 and 90 kg/ha for the NP1,2,3 treatments; respectively. For PK treatments, potassium was considered at doses of 40, 80 and 120 kg/ha (PK1,2,3; respectively). The NPK treatments consisted of a two-by-two combination of doses of 40, 60 and 90 kg of nitrogen per ha with those of 40, 80 and 120 kg of potassium per ha; thus, giving the 9 variants of NPKCassava vegetative growth (collar diameter, plant height, number of leaves) was significantly higher in Bingo, followed by Maboya and Kirumba. Cassava storage roots yield was significantly higher on plots treated with NPK9 (43.46 t/ha), NPK6 (42.41 t/ha), NPK8 (41.73 t/ha); followed by those treated with NPK7 (40.26 t/ha) and NPK5 (38.47 t/ha). The lowest yield was recorded on the control plots (15.8 t/ha) which did not significantly differ from those treated with NP1 (17.7 t/ha). Increasing the dose of potassium up to 80 kg/ha and that of nitrogen to 90 kg/ha is a major asset for increasing cassava yield if phosphorus is not limiting.*

*Key words: Cassava, fertilizer dose splitting, agronomic performance, fertilization*

## **1. Introduction**

Le manioc (*Manihot esculenta* Crantz) est une des cultures vivrières susceptibles de répondre aux besoins alimentaires des populations d'Afrique subsaharienne. De par l'accroissement de sa production, la diversité de ses dérivés et l'importance de leur demande sur le marché tant local que national, le manioc s'avère une culture porteuse d'espoir, car socialement intégrée et économiquement viable (Adjanooun, 2006; Vernier *et al.*, 2018). Il est cultivé sous diverses conditions agroécologiques et est consommé sous diverses formes par ces populations en croissance galopante (Mahungu *et al.*, 2014). Son importance s'accroît de plus en plus suite à sa demande dans les industries brassicoles et pharmaceutiques pour sa teneur élevée en amidon (Okoth & Yermiyahu, 2021).

Le manioc est beaucoup plus cultivé dans des pays en voie de développement comme une culture de subsistance avec une production qui

reste de loin inférieure au potentiel de la culture (Spencer & Ezedinma, 2017). L'accroissement de la production actuellement enregistré est consécutif à l'augmentation des étendues emblavées et non à l'amélioration de la productivité des variétés sous culture et des pratiques culturales qui lui sont appliquées (Spencer & Ezedinma, 2017). Il s'observe que la production actuelle soit encore insuffisante pour répondre à la fois à la demande alimentaire de plus en plus croissante des populations les plus démunies et les usages industriels auxquels le manioc se prête déjà bien (Vernier *et al.*, 2018).

L'adaptabilité du manioc aux sols de faible fertilité et aux conditions de pluies erratiques (Howeler, 2017), sa haute productivité par unité de surface et de main d'œuvre ainsi que sa productivité continue tout au long de l'année font de cette culture une de plus appropriées dans les systèmes d'agriculture pluviale (Spencer & Ezedinma, 2017).

Bien plus, le manioc a longtemps été cultivé sans fertilisation sur des sols à faible fertilité (Biratu *et al.*, 2018). Une telle situation serait due à une culture continue sans jachère, une faible application de la matière organique et restitution des résidus de la récolte, un faible recours aux fertilisants organiques et minéraux de suite de leur coût élevé au-delà du pouvoir d'achat de « petits » producteurs (Vernier *et al.*, 2018).

Pourtant, le manioc est réputé comme une plante épuisante du sol en raison d'importantes exportations des nutriments qu'exige sa culture, particulièrement le phosphore, le calcium et le potassium (Adjanohoun, 2006; Okoth & Yermiyahu, 2021). Ainsi, la fertilisation à base d'engrais minéraux (NPK) seuls serait loin d'endiguer ce problème de fertilité dans la mesure où les carences en certains nutriments persistent et demeurent très actives même après des apports des fertilisants (Akanza & N'da, 2015; Biratu *et al.*, 2018).

Par ailleurs, l'effet de ces fertilisants sur le rendement en feuilles comestibles ainsi qu'en racines tubéreuses est fonction non seulement de la nature chimique de ces fertilisants, mais aussi du type variétal, de la nature du sol, des conditions agroécologiques et climatiques du milieu pendant la période de culture (Adjanohoun, 2006; Nassy *et al.*, 2020).

Dans cette perspective, Nassy *et al.* (2020) ont trouvé que l'application combinée de l'engrais minéral NPK et le compost optimise le rendement du

manioc comparativement à leur usage individuel. De même, l'application des doses croissantes de NPK combiné à la fiente de poules a induit un accroissement linéaire du rendement du manioc en Zambie (Biratu et al., 2018).

De ce fait, il s'avère que la fertilisation du manioc est capable d'induire un accroissement du rendement de cette culture et ainsi rencontrer les attentes des producteurs. La connaissance d'une dose optimale pouvant maximiser le rendement du manioc est un atout pour les producteurs. Elle est un outil indispensable pour l'utilisation rationnelle d'intrants rarement disponibles dans ces petites exploitations. Elle est aussi susceptible de limiter les problèmes de pollution et eutrophisation des eaux de surface à la suite du lessivage des excédents de nutriments qui n'ont pas été absorbés par la plante pendant le cycle cultural. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'évaluer les performances agronomiques du manioc en réponse aux fractions de différentes doses d'engrais afin d'identifier celles qui en maximisent le rendement en racines tubéreuses.

## **2. Matériels et méthodes**

### **2.1. Milieu physique**

Les essais qui ont fait l'objet de cette étude ont été implantés dans la région des Grands-lacs d'Afrique centrale, en Territoires de Beni et de Lubero, au Nord-Kivu, est de la République Démocratique du Congo. Les expérimentations ont été faites sur trois sites différents dont le choix relève des caractéristiques liées à l'objectif de l'étude. Le premier site était localisé à Bingo/Nogera à 1080 mètres d'altitude, 0,49917° de latitude nord et 29,39446° de longitude est. Le deuxième a été implanté à Maboya/Luholu à 1329 mètres d'altitude, 0,29551° de latitude nord et 29,30772 de longitude est. Le troisième site, quant à lui, était à Kitsimanda à 1715 mètres d'altitude, 0,68865 de latitude sud et 29,19511 de longitude est.

Les deux premiers sites expérimentaux sont entièrement situés dans les limites administratives du Territoire de Beni, alors que le troisième est localisé en Territoire de Lubero. Cette zone connaît des températures plus

modérées, une pluviométrie plus réduite (Tab.1), des amplitudes thermiques diurnes plus élevées et des nuits fraîches.

**Tableau 1. Données relatives à la température et précipitations dans le milieu d'étude pendant la période d'essai**

Année	STATION ENRA (Territoire de Beni)						STATION KILO (Territ. de Lub.)		
	2018		2019		2020		2018	2019	2020
Mois	T°C	P(mm)	T°C	P (mm)	T °C	P(mm)	P (mm)	P (mm)	P(mm)
Janvier	22,7	111,2	23,7	79,6	22,56	50,6	47,6	26,88	19,1
Février	23,4	71,4	23	99,8	23,42	116,8	85,9	94,91	46,4
Mars	22,5	294,2	24,1	157,4	23,82	227,4	86	105,6	20,3
Avril	22,9	204,8	24,3	71,2	24,28	234,4	156,1	129,12	55,1
Mai	23,7	131,4	23,9	302,2	23,97	274,6	60,4	35,68	62,6
Juin	22,7	163	22,3	504,8	23,17	268,2	134,8	47,52	60
Juillet	22,5	170	21,5	225,8	20,89	125	74,4	50,52	9,12
Août	21,7	303,6	21,4	168,2	20,2	146,6	90,96	328,22	99,35
Sept.	22,9	198,8	20,4	262,25	21,45	185,8	95,74	187,84	271,72
Octobre	23,3	265,2	20,8	531,2	21,56	307,6	156,54	135,68	109
Nov.	24,3	162,6	21,2	123,8	22,45	211	43,36	56,8	118,4
Décembre	23,2	35,2	23,3	335,6	22,43	68	143,11	84,28	65,3
<b>TOTAL</b>		1958,4		2861,85		2216	1174,91	1283,05	936,39

T = Température, P = Précipitation. Source : Stations météorologiques de l'ENRA-Beni et Kilo.

Du point de vue pédologique, les sols des Territoires de Beni et de Lubero sont issus des roches granitiques, schisteuses et volcaniques. Néanmoins, les sols du fossé tectonique (plaine de la Semuliki) sont des sols alluviaux d'origine sédimentaire. Ce groupe de sol présente une diversité des caractéristiques et se scinde en quatre sous-groupes principaux : les Kaolisols, les sols bruns tropicaux, les sols tropicaux et les sols noirs tropicaux. Les résultats des analyses pédologiques des sols des sites qui ont abrité les expérimentations sont consignés au tableau 2.

**Tableau 2. Propriétés physico-chimiques des sols des sites d'expérimentation**

Paramètres	Site d'expérimentation		
	Bingo	Maboja	Kirumba
pH eau	5,61	5,40	6,44
pH KCl	4,83	4,50	4,35
Teneur en eau (%)	8,40	8,07	9,22
MO (%)	7,40	8,40	10,22
C (%)	4,25	4,27	5,06
N (%)	0,52	0,40	0,38
P (%)	0,86	0,97	0,57
K (%)	7,06	6,42	5,76
Ca (%)	1,16	2,17	1,83
Na (%)	0,86	0,78	0,87
Mg (%)	0,07	0,46	0,05
CEC (mék)	9,57	10,13	12,87
Argile (%)	15,49	23,21	28,90
L (%)	9,37	7,73	8,69
S (%)	75,14	69,06	62,41
Classe texturale			

Source : Nos analyses au Laboratoire Central de l'UCG

L = Limon, S = Sable, MO = Matière Organique

Si en Territoire de Beni, la tendance est à l'allocation de vastes étendues de terres aux cultures industrielles dont le cacaoyer et le caféier (Naasson et al., 2019), la situation du Territoire de Lubero semble différente. Ici, les grandes concessions appartiennent aux grands propriétaires terriens qui ne valorisent leurs terres que par l'installation des pâturages et/ou la plantation d'arbres sur de grandes étendues laissant les petits paysans sans terres cultivables, et accentuant ainsi leur pauvreté et les conflits fonciers (Muhindo & Waswande, 2020).

L'économie de la région est centrée autour de l'agriculture, du commerce et l'artisanat. Les principales productions agricoles sont les céréales, les légumineuses, les plantes à tubercules, les bananiers, les oléagineux et les cultures maraîchères. Ces cultures sont pratiquées en association et/ou en rotation, avec une jachère dont la durée ne cesse de se raccourcir de cinq à deux ans à cause de l'explosion démographique entraînant la rareté des

terres cultivables (Gbenou, 2013). L'utilisation des pesticides (insecticide, herbicide et fongicide) et des fertilisants chimiques est rare, voire inexistante surtout pour les cultures vivrières.

## 2.2. Les différents traitements en expérimentation

Les fractions de quatre types d'engrais communément rencontrés dans la région (DAP, TSP, KCl et Urée) ont été mises en expérimentation. Le DAP (le Phosphate diammonique) a comme composition : Azote (N) 18 % ammoniacal, Phosphore (P) 46 %. Le Triple super phosphate est un engrais simple contenant 46 % (P) ; le Chlorure de potassium 46 % (K) et l'Urée est un fertilisant contenant 46 % d'azote.

Les engrais minéraux constituent le facteur principal avec différentes doses, à savoir le témoin, les doses 40, 60 et 90 Kgs ha<sup>-1</sup> pour l'azote et 40, 80 et 120 Kgs ha<sup>-1</sup> pour le potassium, alors que le phosphore n'a été utilisé qu'à la dose de 40 Kgs ha<sup>-1</sup>. La combinaison de ces différentes fractions a conduit à un total de 16 traitements (15 traités et un témoin non traité), tels que présentés dans le tableau 3.

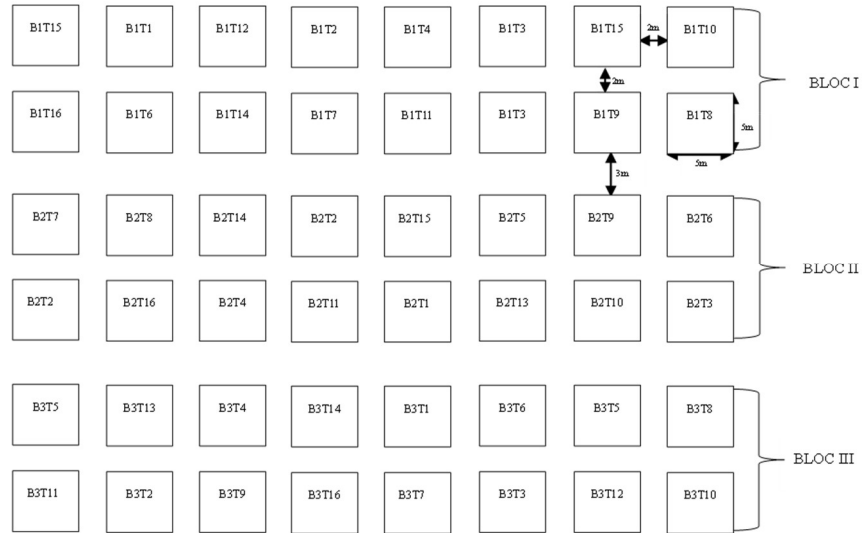
**Tableau 3. Combinaison des doses en Kgs de l'élément fertilisant**

N° Traitement	Traitements	N	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
T1	T (Contrôle)	0	0	0
T2	NP1	40	0	40
T3	NP2	60	0	40
T4	NP3	90	0	40
T5	PK1	0	40	40
T6	PK2	0	80	40
T7	PK3	0	120	40
T8	NPK1	40	40	40
T9	NPK2	40	80	40
T10	NPK3	40	120	40
T11	NPK4	60	40	40
T12	NPK5	60	80	40
T13	NPK6	60	120	40
T14	NPK7	90	40	40
T15	NPK8	90	80	40
T16	NPK9	90	120	40

### 2.3. Conduite de l'essai

Trois essais consécutifs ont été conduits dans chacun de trois sites d'expérimentation. Dans chaque site, les expérimentations consécutives étaient conduites sur une nouvelle parcelle afin d'éviter le biais lié aux effets résiduels de la culture précédente. Ces essais ont été conduits suivant un dispositif en blocs aléatoires complets constitué de trois blocs et seize traitements par bloc soit un total de 48 unités expérimentales. Les traitements constituent le facteur fixe et les blocs le facteur aléatoire. Des parcelles de 5 m x 5 m étaient séparées de 2 m, alors que les blocs étaient distants de 3 m, soit une superficie totale de 2 520 m<sup>2</sup> (Fig.1). Le matériel biologique a consisté au manioc de la variété *Sawasawa*. La variété *Sawasawa* est un type variétal de manioc doux inscrite au catalogue national des plantes vivrières depuis 2008 sous le code « MM 96/3920 ».

L'IITA est l'émetteur de son matériel génétique à partir de l'Ouganda. Elle fut introduite dans la région en 2003 par INERA Mulungu qui en est resté le responsable de maintenance. Pour l'installation de premiers essais (2019), les boutures ont été récoltées dans des champs expérimentaux de l'APROMA (Association des Producteurs du Manioc au Congo) à Pasisi, en Ville de Beni, à 10 mois d'âge. Pour les essais subséquents (2020 et 2021), les matériels de plantation de 12 mois d'âge étaient issus des résultats des essais des années précédentes respectives. En moyenne, les boutures mises en terre étaient de 21 mm de diamètre, long de 239 mm et comptant 5 nœuds.



**Figure 1. Plan expérimental de Bingo année 1 (2018)**

L'entretien et le suivi des essais avaient consisté aux travaux de sarclage manuel qui étaient couplées à l'épandage des doses séquentielles d'engrais. À la plantation, la fumure de fond (fumier de chèvre, 10 t/ha) et la dose unique de phosphore ont été épandues. Au 45<sup>e</sup> jour après plantation, l'on a procédé à l'évaluation de la levée, au sarclo-buttage et à la première application séquentielle d'engrais. Le deuxième sarclage et la seconde application d'engrais sont intervenus au 75<sup>e</sup> jour après plantation. Un troisième sarclage est intervenu au 135<sup>e</sup> jour après plantation suivi de la troisième et dernière application d'engrais.

La collecte des données relatives aux paramètres de croissance (diamètre au collet, nombre de feuilles, hauteur des plants) s'est réalisée sur 9 pieds de la zone centrale de la parcelle. Le paramètre principal était le rendement ou production parcellaire en racines de manioc. Ce paramètre a été mesuré sur tous les pieds de la parcelle excepté ceux des lignes de bordures.

#### 2.4. Analyses statistiques des données

Toutes les données relatives aux paramètres secondaires et au rendement ont été analysées selon le protocole statistique réservé « aux facteurs lieu et temps » pour le cas des expériences répétées en plusieurs endroits et au

cours de plusieurs années. Pour évaluer l'effet des fractions des doses d'engrais sur le rendement en racine de manioc, une analyse par un modèle linéaire mixte (MLM) a été effectuée à l'aide du package lme4 du logiciel R.

Le choix de ce modèle a été dicté par la nature des données, ne répondant pas à la condition d'homogénéité de la variance (Levene's test) et la normalité de la distribution des données (Shapiro-Wilk test) (Bates et al., 2015). Lorsque des différences significatives étaient observées entre les doses d'engrais ou les sites expérimentaux (ANOVA 2), une comparaison multiple des moyennes était envisagée par le Tukey's HSD pour séparer les moyennes significativement différentes (Borcard et al., 2011).

### **3. Résultats**

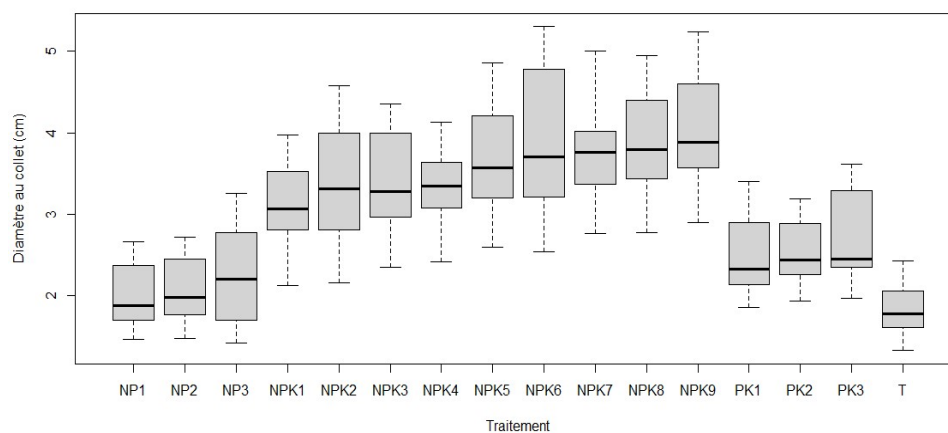
#### **3.1. Le diamètre au collet**

Les résultats de l'analyse de la variance des données relatives au diamètre au collet des plants ont révélé une interaction significative entre les sites d'expérimentation et les différents traitements (Tab. 4). De même, le diamètre au collet obtenu durant la première année (2,98 cm) a été significativement inférieur à celui obtenu durant la deuxième et la troisième années (3,06 et 3,01 cm ; respectivement). La fertilisation au NPK6, NPK9 et NPK8 a induit le diamètre au collet le plus élevé lorsque appliqué à Bingo. Ces traitements ont été suivis de NPK7, NPK5, NPK2 et NPK3 appliqués au site de Bingo et NPK9 et NPK8 appliqués au site de Maboya. Le plus faible diamètre au collet a été enregistré sur les traitements témoins de Maboya et Kirumba ainsi qu'aux traitements NP1, NP2 et NP3 appliqués dans les sites de Kirumba (Tab. 8).

**Tableau 4. Analyse de la variance du diamètre au collet**

Source des variations	Ddl	SCE	CM	Fvalue	Pr(>F)
Site	2	102,999	51,499	1008,6996	<0,001***
Traitement	15	230,53	15,369	301,0195	<0,001***
Année	2	0,498	0,249	4,8732	0,008***
Bloc	2	0,227	0,113	2,223	0,10969
Site: Traitement	30	10,768	0,359	7,0303	<0,001***
Erreurs résiduelles	380	19,401	0,051		

Pris séparément entre les sites expérimentaux, les plants de manioc de Bingo ont eu le diamètre au collet le plus significativement élevé (3,7 cm), suivi de ceux de Maboya et Kirumba pour un diamètre de 2,9 cm et 2,5 cm, respectivement. Entre les traitements par contre, le NPK9, NPK6 et NPK8 ont induit le diamètre au collet le plus significativement élevé, suivis du NPK7 et NPK5. Le diamètre au collet le plus significativement bas a été observé sur les plants des parcelles ayant reçu le traitement témoin, le NP1 et le NP2 (Fig. 2).

**Fig. 2. Diamètre au collet par traitement**

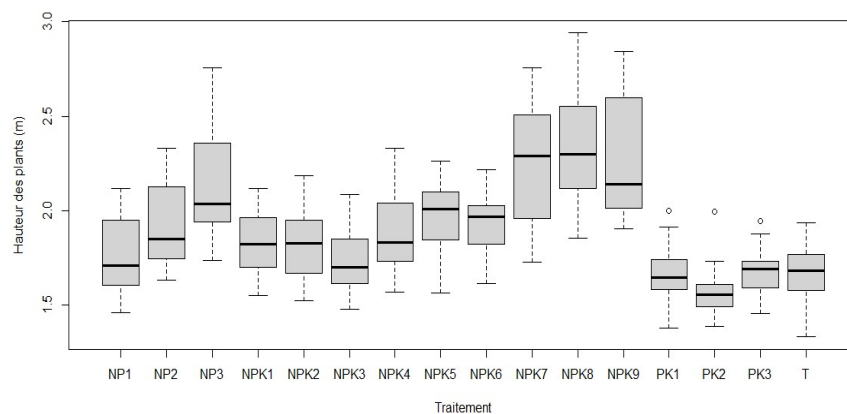
### 3.2. Hauteur des plants

La hauteur des plants a été significativement influencée par des effets interactifs entre les sites et les traitements (Tab. 5). Ainsi, la hauteur la plus élevée a été observée sur les parcelles ayant reçu les traitements NPK8, NPK9 et NPK7 au niveau de Bingo. La hauteur la plus faible a été enregistrée sur les témoins de Kirumba, PK1, PK2, PK3, NP1, NP2 et NPK3 de Kirumba ainsi que le PK2 de Maboya (Tab. 8).

**Tableau 5. Analyse de la variance de la hauteur des plants**

Source des variations	ddl	SCE	CM	Fvalue	Pr(>F)
Site	2	12,994	6,497	616,6823	<0,001***
Traitement	15	22,7541	1,5169	143,9856	<0,001***
Année	2	0,0285	0,0143	1,3529	0,2597
Bloc	2	0,0211	0,0105	1,0004	0,10969
Site: Traitement	30	0,0211	0,0105	8,2605	<0,001***
Erreurs résiduelles	380	4,0034	0,0105		

Le site de Bingo a produit des plants de hauteur significativement plus élevée (2,12 m) comparativement à ceux produit à ceux de Maboya (1,88 m) et Kirumba (1,70 m). En ce qui concerne les traitements, le NPK8, NPK9 et NPK7 ont induit une hauteur significativement plus élevée (2,33 m ; 2,27 m et 2,25 m, respectivement) comparativement aux autres, suivi directement du traitement NP3. La hauteur la moins élevée a été obtenue avec le traitement PK2 (1,57 m), statistiquement comparable au témoin (1,65 m) et au PK1 (1,66 m) (Fig. 3).



**Figure 3. Hauteur des plants par traitement**

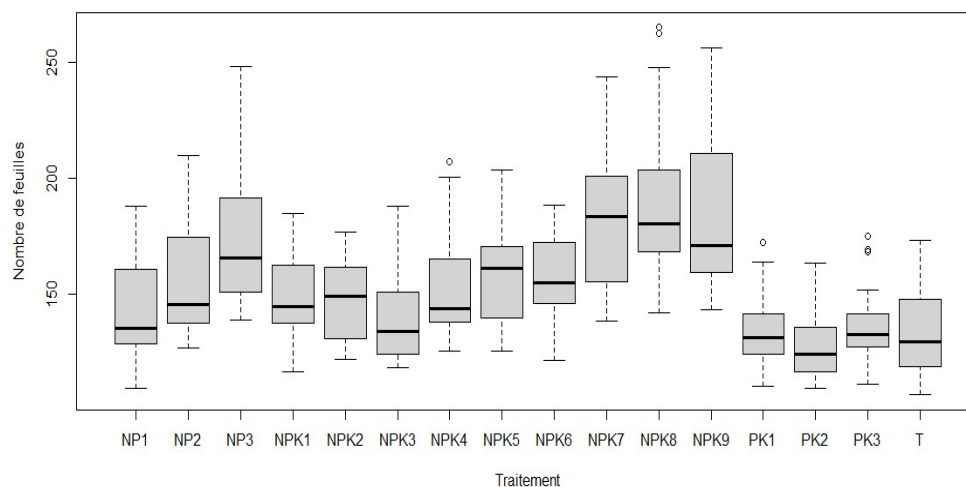
### 3.3. Nombre de feuilles

Des interactions significatives ont été observées entre sites et traitements en ce qui concerne le nombre de feuilles développées (Tab. 6). Le nombre moyen de feuilles développées au cours de la première et deuxième années a significativement augmenté au cours de la troisième année (157) comparativement à la première et deuxième années (152). Lorsque appliqués au site Bingo, les traitements NPK9, NPK8, NPK7 et NP3 ont induit un développement de feuilles significativement plus important, suivis des traitements NP2, NPK4, NPK5, NPK6 appliqués à Bingo et NPK8, NPK7 appliqué à Maboya (Tab. 8). Le plus faible nombre de feuilles a été dénombré sur les traitements témoins de Maboya et Kirumba, NPK3, NP1, PK1, PK2 appliqués à Maboya ainsi que NPK4, NPK5, NPK1, NPK2, NP1, NPK3, PK3 appliqués à Kirumba (Tab. 8).

**Tableau 6. Analyse de la variance du nombre de feuilles**

Source des variations	Ddl	SCE	CM	Fvalue	Pr(>F)
Site	2	147047	73524	512,4622	<0,001***
Traitement	15	146966	9798	68,2906	<0,001***
Année	2	2263	1132	7,8867	<0,001***
Bloc	2	177	88	0,6152	0,541
Site: Traitement	30	18555	619	4,311	<0,001***
Erreurs résiduelles	380	54519	143		

Le site de Bingo a porté des plants ayant développé le plus un grand nombre de feuilles (178) significativement supérieur à celui observé à Maboya (150) ou à Kirumba (133). Le nombre de feuilles a été significativement le plus élevé pour les traitements NPK8, NPK9, NPK7 et NP3, suivi des traitements NPK5, NPK6 et NP2. La valeur la plus faible du nombre de feuilles développées a été obtenue avec le traitement témoin qui n'a pas significativement différencié de traitements PK1, PK2 et PK3 (Fig. 4).



**Figure 4. Nombre de feuilles par traitement**

### 3.4. Rendement en racines tubéreuses

Les résultats de l'analyse de la variance des données relatives au rendement en racine de manioc ont révélé une interaction significative entre les sites d'expérimentation et les différents traitements (Tab. 7). Bien plus, le rendement réalisé au cours de la deuxième année a été significativement élevé (31,35 t/ha) comparativement à celui réalisé au cours de la première et troisième années, de l'ordre de 30,16 et 30,5 tonnes/ha respectivement.

Les traitements NPK6, NPK9 et NPK8 ont induit un rendement en racines significativement supérieur lorsque appliqués à Bingo. Ces traitements ont été suivis de NPK9, NPK8 et NPK6 appliqués au site de Maboya. Le plus faible rendement en racine de manioc a été enregistré sur les traitements témoins dans tous les trois sites expérimentaux ainsi qu'aux traitements NP1, NP2 et NP3 appliqués dans les sites de Maboya et Kirumba (Tab. 8).

**Tableau 7. Analyse de la variance du rendement en racines de manioc**

Source des variations	ddl	SCE	CM	Fvalue	Pr(>F)
Site	2	7043	3521,3	512,8242	<0,001***
Traitement	15	38003	2533,5	368,9619	<0,001***
Année	2	109	54,3	7,9035	<0,001***
Bloc	2	62	31,2	4,5375	0,0113*
Site:Traitement	30	2216	73,9	10,7576	<0,001***
Erreurs résiduelles	380	2609	6,9		

Le site de Bingo a donné un rendement significativement élevé (34,9 t/ha) comparativement aux sites Maboya (31,8 t/ha) et Kirumba (25,3 t/ha). Les rendements les plus significativement élevés ont été obtenus sur les parcelles traitées au NPK9, NPK6, NPK8 ; suivies de celles traitées au NPK7 et NPK5. Le plus bas rendement a été enregistré sur les parcelles témoins (15,8 t/ha) qui n'ont pas significativement différencié de celles traitées au NP1 (17,7 t/ha) (Fig. 5)

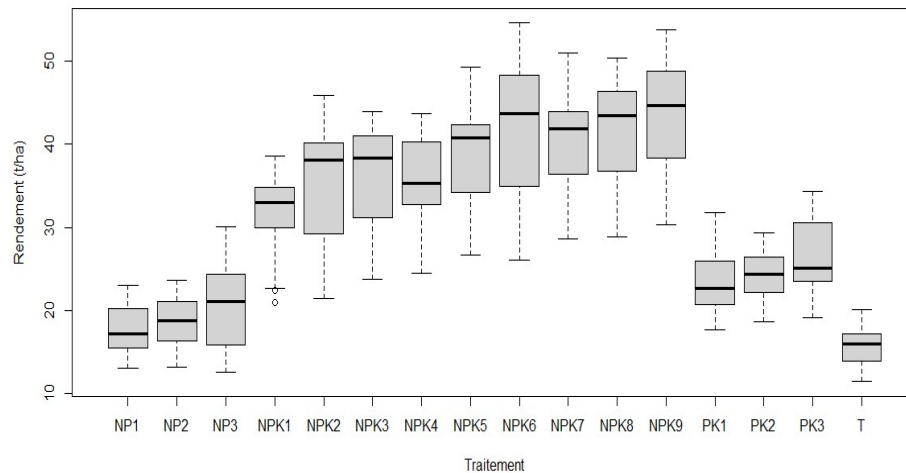
**Figure 5. Rendement en racines de manioc par traitement**

Tableau 8. Effet des doses séquentielles d'engrais sur les paramètres de croissance et le rendement en racines de manioc.

Site	Traitement	DC(en cm)	H(en m)	NF	Rendement (en t/ha)
Bingo	NP1	2,47(0,04) <sup>f</sup>	2,02(0,02) <sup>cd</sup>	170,02(3,73) <sup>cdef</sup>	20,61(0,53) <sup>f</sup>
	NP2	2,54(0,04) <sup>f</sup>	2,19(0,03) <sup>c</sup>	183,68(4,07) <sup>bc</sup>	21,52(0,47) <sup>f</sup>
	NP3	2,94(0,07) <sup>e</sup>	2,46(0,05) <sup>b</sup>	207,28(7,67) <sup>ab</sup>	26,24(0,78) <sup>e</sup>
	NPK1	3,65(0,06) <sup>d</sup>	2,01(0,03) <sup>cde</sup>	168,42(4,03) <sup>cdefg</sup>	34,74(0,68) <sup>d</sup>
	NPK2	4,2(0,07) <sup>c</sup>	1,98(0,06) <sup>def</sup>	165,72(2,63) <sup>cdefg</sup>	41,37(0,8) <sup>c</sup>
	NPK3	4,16(0,05) <sup>c</sup>	1,95(0,04) <sup>defg</sup>	163,77(5,66) <sup>cdefg</sup>	40,91(0,62) <sup>c</sup>
	NPK4	3,75(0,09) <sup>d</sup>	2,15(0,04) <sup>cd</sup>	180,96(6,02) <sup>bc</sup>	35,96(1,09) <sup>d</sup>
	NPK5	4,39(0,08) <sup>bc</sup>	2,11(0,03) <sup>cd</sup>	177,9(5,55) <sup>cd</sup>	43,7(0,96) <sup>bc</sup>
	NPK6	4,96(0,06) <sup>a</sup>	2,1(0,03) <sup>cd</sup>	176,07(2,79) <sup>cde</sup>	50,52(0,75) <sup>a</sup>
	NPK7	4,42(0,14) <sup>bc</sup>	2,58(0,05) <sup>ab</sup>	212,48(5,67) <sup>a</sup>	44,09(1,67) <sup>bc</sup>
	NPK8	4,64(0,08) <sup>ab</sup>	2,7(0,06) <sup>a</sup>	224,01(9,01) <sup>a</sup>	46,68(0,91) <sup>ab</sup>
	NPK9	4,85(0,09) <sup>a</sup>	2,68(0,04) <sup>a</sup>	225,3(7,29) <sup>a</sup>	49,18(1,08) <sup>a</sup>
	PK1	3,03(0,07) <sup>c</sup>	1,78(0,05) <sup>gh</sup>	149,68(5,34) <sup>efg</sup>	27,37(0,85) <sup>e</sup>
	PK2	2,97(0,04) <sup>c</sup>	1,68(0,05) <sup>h</sup>	140,98(5,10) <sup>g</sup>	26,68(0,48) <sup>e</sup>
PK3	3,4(0,04) <sup>d</sup>	1,76(0,04) <sup>gh</sup>	147,75(5,91) <sup>fg</sup>	31,79(0,51) <sup>d</sup>	
T	2,21(0,06) <sup>f</sup>	1,82(0,03) <sup>efgh</sup>	152,83(4,39) <sup>cdefg</sup>	17,58(0,72) <sup>f</sup>	
<b>Total Bingo</b>	<b>3,66(0,07)<sup>a</sup></b>	<b>2,12(0,03)<sup>a</sup></b>	<b>177,93(2,53)<sup>a</sup></b>	<b>34,93(0,89)<sup>a</sup></b>	
Maboya	NP1	1,87(0,05) <sup>gh</sup>	1,7(0,03) <sup>gh</sup>	136,48(3,38) <sup>fgh</sup>	17,07(0,55) <sup>gh</sup>
	NP2	1,96(0,04) <sup>fgh</sup>	1,8(0,02) <sup>fg</sup>	144,28(3,67) <sup>efg</sup>	18,28(0,54) <sup>fgh</sup>
	NP3	2,13(0,08) <sup>efg</sup>	2,02(0,03) <sup>cd</sup>	161,54(4,77) <sup>bcd</sup>	20,19(0,96) <sup>efg</sup>
	NPK1	3,08(0,07) <sup>d</sup>	1,83(0,03) <sup>efg</sup>	145,88(2,64) <sup>cdefg</sup>	33,6(0,91) <sup>d</sup>
	NPK2	3,29(0,08) <sup>cd</sup>	1,9(0,02) <sup>def</sup>	151,56(2,97) <sup>cdef</sup>	38,03(0,71) <sup>c</sup>
	NPK3	3,34(0,09) <sup>cd</sup>	1,71(0,02) <sup>gh</sup>	136,73(2,49) <sup>fgh</sup>	38,83(1,07) <sup>c</sup>
	NPK4	3,43(0,11) <sup>bcd</sup>	1,81(0,02) <sup>efg</sup>	144,67(2,24) <sup>efg</sup>	40,81(0,80) <sup>bc</sup>
	NPK5	3,61(0,08) <sup>abc</sup>	2,05(0,03) <sup>bc</sup>	163,86(2,47) <sup>bc</sup>	40,64(0,79) <sup>bc</sup>
	NPK6	3,75(0,09) <sup>ab</sup>	1,93(0,03) <sup>cde</sup>	154,33(3,15) <sup>cde</sup>	44,37(0,53) <sup>ab</sup>
	NPK7	3,71(0,06) <sup>ab</sup>	2,28(0,04) <sup>a</sup>	181,95(3,89) <sup>a</sup>	43,02(0,49) <sup>ab</sup>
	NPK8	3,82(0,05) <sup>a</sup>	2,29(0,03) <sup>a</sup>	183,41(4,16) <sup>a</sup>	44,88(0,64) <sup>a</sup>
	NPK9	3,88(0,05) <sup>a</sup>	2,15(0,02) <sup>b</sup>	171,86(4,06) <sup>ab</sup>	45,59(1,07) <sup>a</sup>
	PK1	2,25(0,08) <sup>ef</sup>	1,67(0,02) <sup>h</sup>	133,79(2,49) <sup>gh</sup>	21,54(0,93) <sup>ef</sup>
	PK2	2,38(0,08) <sup>e</sup>	1,54(0,02) <sup>i</sup>	123,27(3,15) <sup>h</sup>	23,22(0,98) <sup>e</sup>
PK3	2,33(0,04) <sup>e</sup>	1,72(0,01) <sup>gh</sup>	137,41(2,93) <sup>fgh</sup>	23,41(0,63) <sup>e</sup>	
T	1,75(0,04) <sup>h</sup>	1,67(0,02) <sup>h</sup>	133,95(3,27) <sup>gh</sup>	15,86(0,53) <sup>h</sup>	
<b>Total Maboya</b>	<b>2,91(0,07)<sup>b</sup></b>	<b>1,88(0,02)<sup>b</sup></b>	<b>150,31(1,65)<sup>b</sup></b>	<b>31,83(0,94)<sup>b</sup></b>	
Kirumba	NP1	1,63(0,04) <sup>h</sup>	1,57(0,03) <sup>efghi</sup>	123(3,46) <sup>defg</sup>	15,01(0,52) <sup>h</sup>
	NP2	1,65(0,05) <sup>h</sup>	1,76(0,04) <sup>cd</sup>	137,31(1,56) <sup>bc</sup>	15,28(0,63) <sup>h</sup>
	NP3	1,65(0,05) <sup>h</sup>	1,92(0,05) <sup>ab</sup>	150,53(3,19) <sup>ab</sup>	15,26(0,57) <sup>h</sup>
	NPK1	2,61(0,12) <sup>def</sup>	1,67(0,03) <sup>defg</sup>	130,78(3,13) <sup>cde</sup>	26,82(1,41) <sup>def</sup>
	NPK2	2,55(0,10) <sup>def</sup>	1,63(0,03) <sup>defgh</sup>	127,85(1,39) <sup>cdef</sup>	26,11(1,16) <sup>def</sup>
	NPK3	2,73(0,08) <sup>cde</sup>	1,56(0,02) <sup>efghi</sup>	121,96(1,19) <sup>defg</sup>	28,29(1,02) <sup>cde</sup>
	NPK4	2,86(0,11) <sup>bcd</sup>	1,71(0,03) <sup>de</sup>	134,19(1,94) <sup>cd</sup>	29,88(1,30) <sup>bcd</sup>
	NPK5	2,97(0,10) <sup>abcd</sup>	1,7(0,04) <sup>def</sup>	133(2,09) <sup>cd</sup>	31,09(1,20) <sup>abcd</sup>
	NPK6	3,07(0,11) <sup>abc</sup>	1,79(0,05) <sup>bcd</sup>	140,21(4,48) <sup>bc</sup>	32,31(1,31) <sup>abc</sup>
	NPK7	3,18(0,11) <sup>ab</sup>	1,9(0,03) <sup>abc</sup>	148,56(2,47) <sup>ab</sup>	33,67(1,31) <sup>ab</sup>
	NPK8	3,18(0,10) <sup>ab</sup>	2(0,05) <sup>a</sup>	156,98(4,53) <sup>a</sup>	33,63(1,15) <sup>ab</sup>
	NPK9	3,3(0,10) <sup>a</sup>	1,98(0,02) <sup>a</sup>	155,44(2,85) <sup>a</sup>	35,11(1,16) <sup>a</sup>
	PK1	2,11(0,06) <sup>g</sup>	1,52(0,03) <sup>gh</sup>	118,86(2,63) <sup>efg</sup>	20,77(0,70) <sup>g</sup>
	PK2	2,25(0,07) <sup>fg</sup>	1,49(0,02) <sup>hi</sup>	116,7(1,97) <sup>fg</sup>	22,53(0,84) <sup>fg</sup>
PK3	2,39(0,08) <sup>efg</sup>	1,54(0,02) <sup>fghi</sup>	120,81(2,49) <sup>defg</sup>	24,22(1,01) <sup>efg</sup>	
T	1,54(0,05) <sup>h</sup>	1,46(0,04) <sup>j</sup>	114,06(1,96) <sup>g</sup>	14,02(0,58) <sup>h</sup>	
<b>Total Kirumba</b>	<b>2,48(0,05)<sup>c</sup></b>	<b>1,7(0,02)<sup>c</sup></b>	<b>133,14(1,31)<sup>c</sup></b>	<b>25,25(0,65)<sup>c</sup></b>	

**Légende** : Dans une même colonne et pour un même site expérimental, les valeurs suivies par au moins une lettre similaire ne sont pas statistiquement et

significativement différentes. DC = diamètre au collet, H = Hauteur des plants, NF = Nombre de feuilles

### **3.5. Analyse Factorielle Mixte (AFM) des facteurs testés et des paramètres quantitatifs observés**

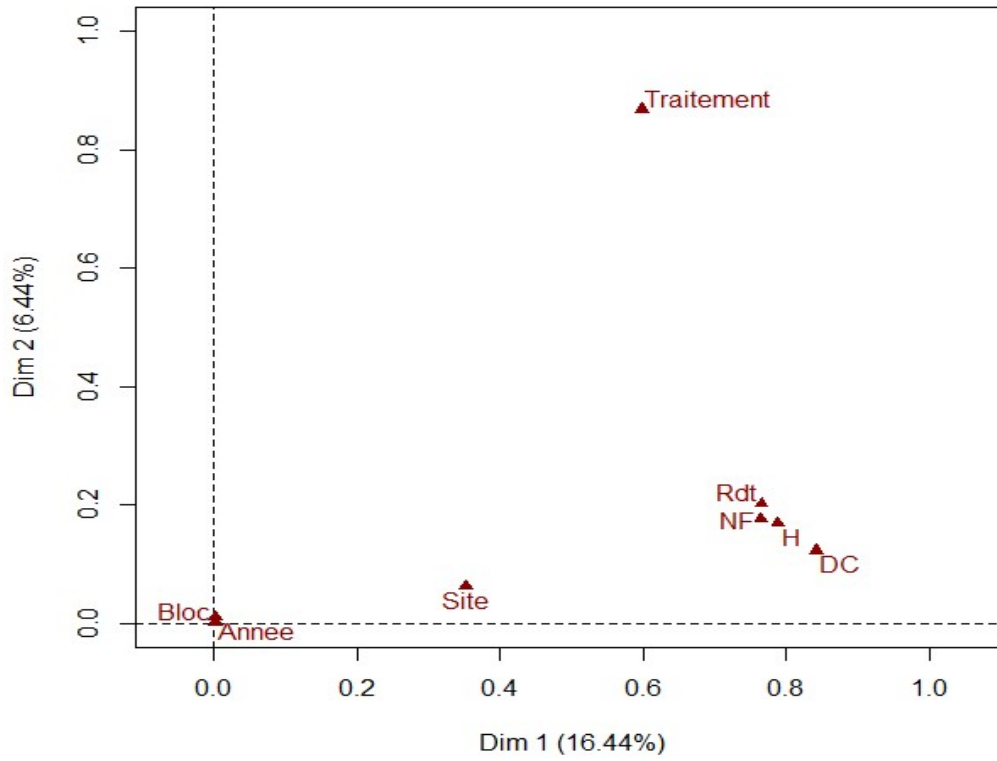
L'Analyse Factorielle Mixte montre que le Site est le seul facteur aléatoire qui, avec le traitement (facteur fixe) et les paramètres observés (variables quantitatives), a contribué à la variation observée dans la distribution des données obtenues au cours de cette étude. Le site et les quatre paramètres observés (Rendement, diamètre au collet, hauteur des plants et nombre de feuilles par pied) ont surtout contribué à la construction du premier axe, tandis que le Traitement a contribué à la construction de deux axes à la fois.

Les quatre paramètres observés sont positivement corrélés entre eux, mais la corrélation est forte entre le rendement et le diamètre au collet ainsi qu'entre la hauteur et le nombre de feuilles par pied (Fig. 6b). Le premier axe sépare les valeurs élevées (au-dessus) des valeurs faibles (en dessous), alors que le deuxième axe sépare les valeurs élevées (à droite) des valeurs faibles (à gauche) de ces paramètres.

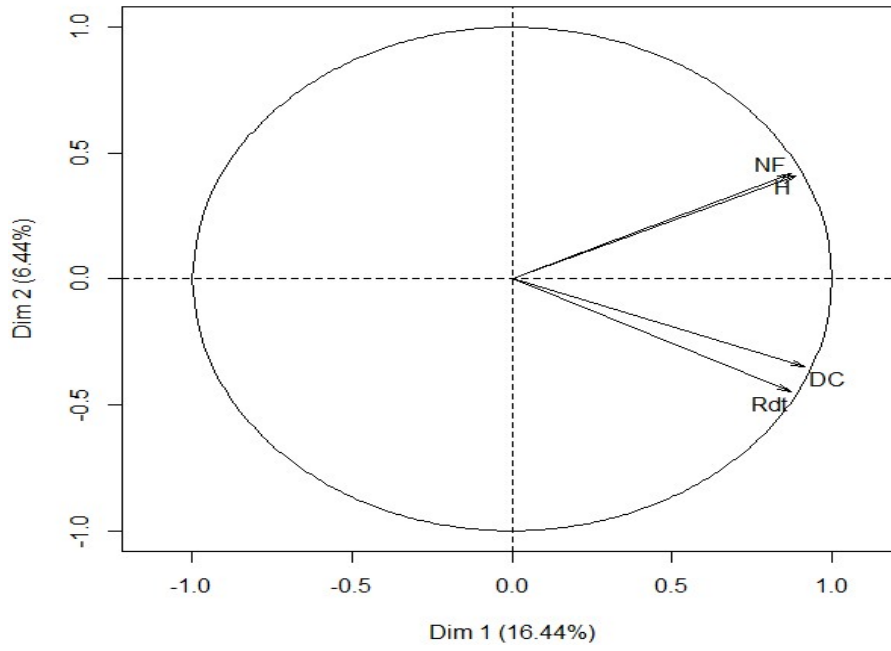
Ainsi, les traitements NPK montrent une corrélation positive avec ces paramètres (valeurs élevées) et se séparent de deux autres groupes de traitements (NP et PK) qui leur sont négativement corrélés (valeurs faibles) (Fig. 6c). Quant aux sites, la corrélation positive avec les paramètres s'est observée pour Bingo, contrairement aux deux autres sites (Maboya et Kirumba) qui ont montré une corrélation négative avec les paramètres (Fig. 6c). Mais cette corrélation négative semble plus forte à Kirumba qu'à Maboya. Ce dernier semble intermédiaire entre les deux extrêmes, Bingo à l'extrême positif et Kirumba à l'extrême négatif.

Pour ce qui est du rendement, les meilleurs résultats sont obtenus à Bingo, suivi de Maboya, puis Kirumba en fonction du traitement pris en considération. Somme toute, la culture du manioc s'est montrée performante à Bingo, puis à Maboya, en appliquant du NPK, mais moins performante à Kirumba lorsqu'il est fait usage du NP et du PK.

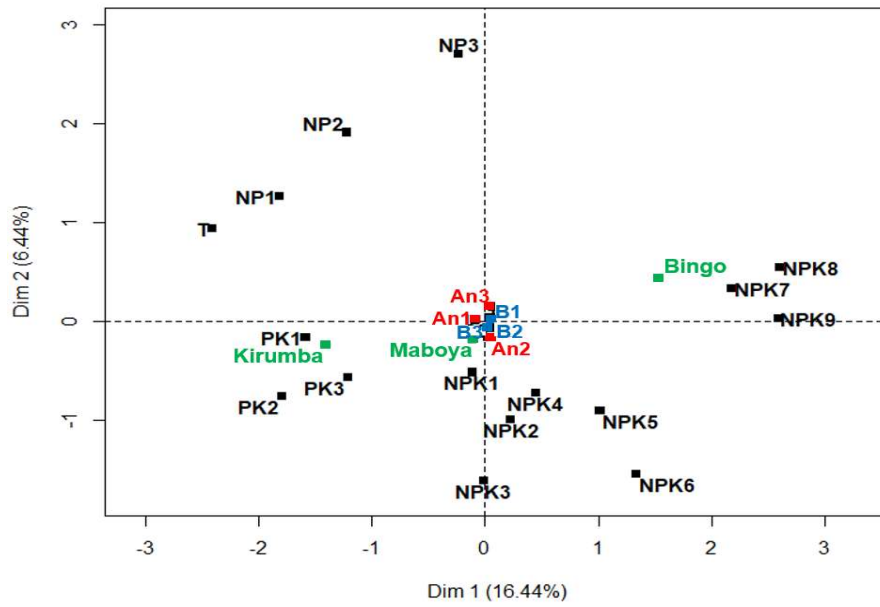
Graph of the variables

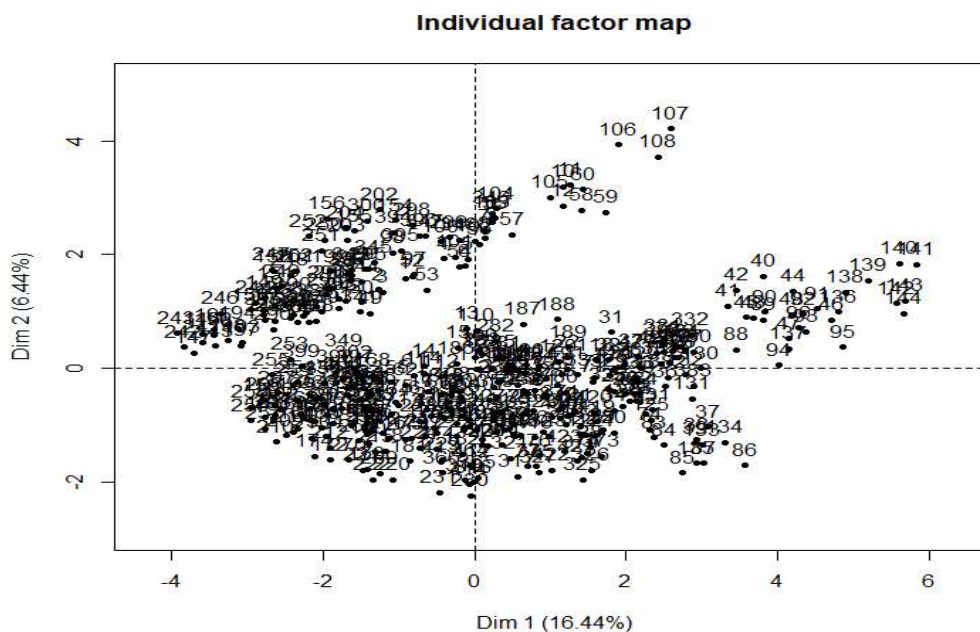


**Graph of the quantitative variables**



**Individual factor map**





**Figure 6. Analyse Factorielle Mixte (AFM) des facteurs mis en jeu et des paramètres observés**

#### 4. Discussion des résultats

Le rendement du manioc, en poids frais de tubercules à l’hectare, obtenu au cours de cette étude a varié de 15,8 t/ha pour le traitement témoin sans engrais (T0) à plus de 35 t/ha pour les meilleurs traitements (NPK6, NPK8 et NPK9) dont l’ordre d’importance a très fortement varié d’une zone à une autre.

A Bingo par exemple, le NPK6 a été le traitement plus performant suivi du NPK9 et NPK8. À Maboya et Kirumba par contre, la performance des traitements a suivi l’ordre de NPK9, NPK8 et NPK6. Une telle évolution serait un reflet d’une réponse de la culture aux doses croissantes du fertilisant en fonction de la fertilité inhérente du sol de chaque site (Ferreira et al., 2017).

En effet, le site de Bingo présentait déjà des teneurs en azote et potassium substantiellement élevées (Tableau 2) comparativement au site de Maboya et Kirumba. L’augmentation de ces nutriments par la

fertilisation au-delà de l'optimum de croissance (3,6 % et 6,8 % pour l'azote et le potassium respectivement) (Ballot et al., 2016) n'aurait pas induit un accroissement linéaire du rendement dans ce site particulier.

Dans les sites de Maboya et Kirumba par contre, l'accroissement des apports en N et K ont contribué à combler le déficit en induisant des rendements de plus en plus élevés. Ceci serait d'autant plus vrai qu'Adiele et al. (2022) ont observé un accroissement linéaire de la quantité d'azote, phosphore et potassium absorbé en fonction de leur stock initial dans le sol. De même, Ezui et al (2017) ont montré que l'application du K sur la culture du manioc induit un accroissement de 36 à 41 % de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et l'accumulation de la matière sèche. Ces effets étaient encore plus accentués en présence d'une adéquate fertilisation azotée (Ezui et al., 2017).

Bien plus, les fortes précipitations enregistrées en Territoire de Beni comparativement en Territoire de Lubero (Tableau 1) pendant la période des essais peuvent justifier la forte réponse agronomique de la variété *Sawasawa* aux fractions d'engrais ici expérimentées.

En effet, l'absorption des nutriments décroît dans les conditions de stress hydrique pour plusieurs raisons dont la difficulté de transport des nutriments ainsi que l'inhibition de la minéralisation (Howeler, 2017). L'effet de la sécheresse sur la demande et l'absorption de ces nutriments est fonction de l'intensité, la durée de cette sécheresse et le stade physiologique de la plante au moment de l'avènement de cette sécheresse (Adiele et al., 2022).

L'absorption des nutriments chez le manioc est maximale dans les quatre premiers mois après installation et ainsi toute carence en eau pendant ce stade serait dommageable (Adiele et al., 2021). La différence de température dans les différents sites expérimentaux (Tableau 1) serait aussi clé pour justifier la différence de la réponse agronomique de la variété *Sawasawa* aux fractions des doses d'engrais.

À Lusaka, en Zambie, Omondi et al (2020) ont trouvé qu'une augmentation de température de 3,7°C a entraîné un accroissement du rendement de 285 % en lien direct avec la vigueur de croissance et la production de la biomasse foliaire. Ainsi, le manioc planté en basse altitude de Bingo a-t-il eu un diamètre au collet, une hauteur et un nombre de feuilles les plus élevés (respectivement 3,7 cm, 2,12 m et 178), suivi de la moyenne

altitude de Maboya (2,9 cm, 1,88 m et 150) et les hautes terres de Kirumba (2,5 cm, 1,70 m et 133). Parmi les facteurs d'influence de l'effet des fertilisants dans la production du manioc, figurent la fertilité initiale du sol et la pluviométrie (Fermont et al., 2010). Des écarts semblables sont évoqués pour la même spéculation dans trois zones agroécologiques au Nigéria (Alamu et al., 2022). Par conséquent, la maîtrise de l'environnement physique est un pilier d'amélioration des performances du manioc.

Les valeurs de rendement obtenues au cours de la présente étude sont similaires à celles rapportées par Zinga et al. (2013) qui ont obtenu un rendement moyen en poids frais de tubercule de 18,01 t/ha sans apport minéral au sol avec la variété locale « *Gabon* » en République Centrafricaine.

Les traitements au NPK sous toutes leurs variantes ont permis d'obtenir des rendements similaires ou légèrement supérieurs à ceux obtenus lorsque les doses recommandées pour la culture de manioc (67-N + 38-P + 122-K avec un ratio en N-P-K = 1-2-3 pour un rendement de tubercules frais de 37 t/ha) (Howeler, 2017). Il en résulte que les doses croissantes des engrais NPK induisent un accroissement de rendement en racines tubéreuses de manioc. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Sinta et Dansa (2023) à Arba Minch, sud Ethiopia, où une dose de 92 kg/ha d'azote a été considérée comme l'optimum.

De par les paramètres de croissance étudiés (diamètre au collet, hauteur des plants, nombre de feuilles), le site de Bingo a produit des plants plus vigoureux comparativement au site de Maboya et Kirumba. Cette observation est un indicateur d'une bonne adaptation de la variété de manioc en étude (*Sawasawa*) aux conditions agroécologiques de Bingo.

Les faibles précipitations ayant caractérisé le site de Kirumba seraient à la base de la faible croissance végétative observée dans la mesure où le déficit hydrique se traduit par une réduction du taux de croissance foliaire et la réallocation des photosynthétats vers les racines de stockage au détriment des bourgeons pour la croissance végétative (Adiele et al., 2021; Howeler, 2017).

À part les traitements au NP, les autres traitements ont produit des plants dont le diamètre et la hauteur se sont retrouvés dans les fourchettes jugées

bonnes comme indicateurs de la performance agronomique du manioc (entre 2 et 8 cm pour le diamètre et 1,2 et 3,7 m pour la hauteur) (Alves, 2002). Les fumures NPK9, NPK6 et NPK8 ont induit un diamètre au collet le plus significativement élevé, suivis du NPK7 et NPK5, alors que la plus faible valeur a été observée sur les plants des parcelles témoins, NP1 et NP2.

Aussi les NPK8, NPK9 et NPK7 ont induit une hauteur significativement plus élevée (respectivement 2,33 m, 2,27 m et 2,25 m) comparativement aux autres, suivis directement du traitement NP3. La hauteur la moins élevée a été obtenue avec le traitement PK2 (1,57 m), statistiquement comparable au témoin (1,65 m) et au PK1 (1,66 m). Les traitements NPK8, NPK9, NPK7 et NP3 ont bien performé sur le nombre de feuilles, suivi de NPK5, NPK6 et NP2, tandis que les traitements PK1, PK2 et PK3 se sont rapprochés du témoin.

Des résultats similaires ont été obtenus en Côte d'Ivoire sur le manioc et dans d'autres pays où les rendements les plus élevés étaient obtenus avec les apports simultanés de N, P et K (Bakayoko et al., 2009; Howeler, 2017; Pypers et al., 2012). L'évaluation de la croissance et du rendement montre que cette culture possède un fort potentiel qui peut s'exprimer en présence de la fumure.

En fait, les différentes doses d'engrais utilisées en ont amélioré significativement le diamètre au collet, la hauteur, le nombre de feuilles et le rendement en racines tubéreuses aux trois sites concernés. Des résultats similaires ont été rapportés pour le rendement en feuilles et en racines de manioc sous compost en Thaïlande (Nassy et al., 2020) et sous fientes de volailles en Zambie (Biratu et al., 2018). Ceci corrobore les propos qui mettent en exergue les besoins élevés du manioc en nutriments (Adjanohoun, 2006; Okoth & Yermiyahu, 2021), notamment sous les tropiques, surtout en N et en K (Bakayoko et al., 2009).

L'étroite relation observée entre les paramètres de croissance dont la hauteur des plants, le diamètre au collet, le nombre de feuilles avec le rendement en racines tubéreuses dénote d'un équilibre entre la constitution des réserves au niveau racinaire et les besoins de croissance de cette culture en réponse à une fertilisation adéquate et un environnement propice. L'influence positive de la fumure sur la tubérisation est à mettre en relation avec ce développement végétatif rapide qui aurait permis d'exploiter au

mieux les niveaux de radiations lumineuses de la phase active d'élaboration de photosynthétats.

### **Conclusion**

La réponse agronomique du manioc aux fractions de différentes doses d'engrais varie en fonction de la combinaison d'éléments nutritifs et de la zone agroécologique. La fertilisation au NPK6, NPK9 et NPK8 a induit un rendement significativement élevé suivi des parcelles avec les mêmes traitements dans tous les sites d'expérimentation. Les variantes du traitement NP ont été moins performantes, en dessous même des traitements témoins lorsque appliquées aux sites de Maboya et Kirumba.

D'un point de vue purement agronomique, cette étude a mis en évidence l'efficacité d'usage de doses croissantes de potassium et une dose modérée d'azote comme moyen d'améliorer le rendement de la culture de manioc à condition que le phosphore ne soit pas limitant. Ainsi, les doses de 60-N, 40-P et 120-K ; 90-N, 40-P et 80-K ainsi que celle de 90-N, 40-P et 120-K sont susceptibles de garantir une réponse agronomique satisfaisante pour la culture du manioc.

Cependant, le coût d'acquisition de ces doses d'engrais peut démotiver les agriculteurs qui font face à une crise pécuniaire ne leur permettant pas d'investir dans la fertilisation. La supplémentation des fertilisants minéraux par les matières organiques directement disponibles dans le champ est une alternative pour contourner ce problème de quantité d'engrais à pourvoir ainsi que leur coût afin d'améliorer le rendement du manioc.

## Références bibliographiques

- ADIELE, J. G., SCHUT, A. G. T., EZUI, K. S., & GILLER, K. E. (2022). LINTUL-Cassava-NPK : A simulation model for nutrient-limited cassava growth. *Field crops research*, 281, 108488. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108488>
- ADIELE, J. G., SCHUT, A. G. T., EZUI, K. S., PYPERS, P., & GILLER, K. E. (2021). Dynamics of N-P-K demand and uptake in cassava. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00649-w>
- ADJANOHOOUN, A. (2006). Détermination des doses d'azote, de phosphore et de potassium pour l'accroissement des rendements et la rentabilité du manioc au Sud du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, 51, 9.
- AKANZA, K. P., & N'DA, H. A. (2015). Effets des fumures sur la fertilité, les composantes du rendement et diagnostic des carences du sol sous culture de manioc sur les ferralsols en Côte d'Ivoire. *Science de la Vie, de Terre et Agronomie*, 3(1), 6-13.
- ALAMU, E., DIXON, A., EYINLA, T. E., & MAZIYA-DIXON, B. (2022). Characterization of macro and micro-minerals in cassava leaves from genotypes planted in three different agroecological locations in Nigeria. *Heliyon*, 8, e11618. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11618>
- ALVES, A. A. C. (2002). *Cassava : Biology, production, and utilization* (R. J. Hillocks, J. M. Thresh, & A. Bellotti, Édés.). CABI Pub.
- BAKAYOKO, S., NINDJIN, C., DAO, D., TSCHANNEN, A., GIRARDIN, O., & ASSA, A. (2009). Fumure organique et productivité du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 19(3), 271-279. <https://doi.org/10.4314/aga.v19i3.1730>
- BALLOT, C. S. A., MAWUSSI, G., ATAKPAMA, W., MOITA-NASSY, M., YANGAKOLA, T. M., & ZINGA, I. (2016). Caractérisation physico-chimique des sols en vue de l'amélioration de la productivité du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) dans la région de Damara au centre-sud de Centrafrique. *Agronomie Africaine*, 28(1), 9-23.

- BATES, D., MÄCHLER, M., BOLKER, B., & WALKER, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using **lme4**. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- BIRATU, G. K., ELIAS, E., NTAWURUHUNGA, P., & SILESHI, G. W. (2018). Cassava response to the integrated use of manure and NPK fertilizer in Zambia. *Heliyon*, 4(8), e00759. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00759>
- BORCARD, D., GILLET, F., & LEGENDRE, P. (2011). *Numerical Ecology With R* (1<sup>re</sup> éd.). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7976-6>
- EZUI, K. S., FRANKE, A. C., LEFFELAAR, P. A., MANDO, A., VAN HEERWAARDEN, J., SANABRIA, J., SOGBEDJI, J., & GILLER, K. E. (2017). Water and radiation use efficiencies explain the effect of potassium on the productivity of cassava. *European Journal of Agronomy*, 83, 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.005>
- FERMONT, A., TITTONELL, P. A., BAGUMA, Y., NTAWURUHUNGA, P., & GILLER, K. (2010). Towards understanding factors that govern fertilizer response in cassava : Lessons from East Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 86, 133-151. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9278-3>
- FERREIRA, I. E. P., ZOCCHI, S. S., & BARON, D. (2017). Reconciling the Mitscherlich's law of diminishing returns with Liebig's law of the minimum. Some results on crop modeling. *Mathematical Biosciences*, 293, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2017.08.008>
- HOWELER, R. (2017). Dry matter accumulation and nutrient absorption and distribution during the growth cycle of cassava. In R. Howeler (Éd.), *The cassava handbook: A reference manual based on the Asian Regional Cassava Training Course, held in Thailan* (Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- MAHUNGU, N. M., HANGY, K. W. T., & BIDIKA, S. M. (2014). *Multiplication de matériel de plantation du manioc et gestion des maladies et ravageurs*. Institut International d'Agriculture Tropicale.

- MUHINDO, T. J., & WASWANDE, K. N. A. (2020). Analyse de la pauvreté monétaire en territoire de Lubero en République Démocratique du Congo. *Multidisciplinary Research Academic Journal*, 5(2), 15.
- NAASSON, B. M., CHARLES, M. M., & MUHINDO, S. (2019). Analyse de la dynamique spatio-temporelle du paysage forestier de la région de Beni (Nord-Kivu, RDC). *Geo-Eco-Trop*, 43(1), 171-184.
- NASSY, M. L. M., HAUSER, S., EGWEKHIDE, M., BATAWILA, K., KULAKOW, P., & ABBERTON, M. (2020). Rendement en feuilles et racines de trois variétés améliorées de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) en réponse aux fertilisants organo-minéraux et à la récolte des feuilles au Sud-Ouest du Nigeria. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(4), 1432-1447. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i4.21>
- OKOTH, O. J., & YERMIYAHU, U. (2021). Improvement in cassava yield per area by fertilizer application. In A. Frediansyah (Éd.), *Cassava—Biology, Production, and Use*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97366>
- OMONDI, J. O., YERMIYAHU, U., RACHMILEVITCH, S., & BOAHEN, S. (2020). Optimizing root yield of cassava under fertigation and the masked effect of atmospheric temperature. *Journal of the science of food and agriculture*, 100(12), 4592-4600. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10519>
- PYPERS, P., BIMPONDA, W., LODI-LAMA, J.-P., LELE, B., MULUMBA, R., KACHAKA, C., BOECKX, P., MERCKX, R., & VANLAUWE, B. (2012). Combining Mineral Fertilizer and Green Manure for Increased, Profitable Cassava Production. *Agronomy Journal*, 104(1), 178-187. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0219>
- SINTA, Z., & DANSAN, Y. (2023). Yield and quality response of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) to nitrogen and potassium fertilizer rates at Arba Minch, Southern Ethiopia. *Journal of plant nutrition*, 46(14), 3557-3568. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2209109>
- SPENCER, D. S. C., & EZEDINMA, C. (2017). Cassava cultivation in sub-Saharan Africa. In formerly International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Colombia & C. Hershey (Éds.), *Burleigh Dodds Series in*

*Agricultural Science* (p. 123-148). Burleigh Dodds Science Publishing.  
<https://doi.org/10.19103/AS.2016.0014.06>

VERNIER, P., N'ZUÉ, B., & ZAKHIA-ROZIS, N. (2018). *Le manioc, entre culture alimentaire et filière agro-industrielle* (Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux). éditions Quæ.  
<https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2708-2>

ZINGA, I., CHIROLEU, F., LEGG, J., LEFEUVRE, P., KOMBA, E. K., SEMBALLA, S., YANDIA, S. P., MANDAKOMBO, N. B., REYNAUD, B., & LETT, J.-M. (2013). Epidemiological assessment of cassava mosaic disease in Central African Republic reveals the importance of mixed viral infection and poor health of plant cuttings. *Crop Protection*, 44, 6-12. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.10.010>