



Caractérisation morphologique et agronomique de 38 variétés de manioc (*Manihot esculenta* L.)

Lionel Scherschel (agronome VSC, UMR PVBMT)

Encadrement : Jérémy Salinier (agronome, UMR PVBMT)

Février 2025

Interreg



Cofinancé par
l'UNION EUROPÉENNE



Océan Indien

« Ce projet est co-financé par l'Union européenne et la Région Réunion. L'Europe s'engage à La Réunion avec INTERREG »

Tables des matières

I) Introduction	3
II) Matériel et méthodes	4
a) Site d'étude	4
b) Matériel végétal et dispositif expérimental	4
c) Conduite culturale	9
d) Caractérisation agro-morphologique	9
e) Récolte	11
f) Évaluation de la teneur en composés cyanogéniques des tubercules et des feuilles	11
f-1) Tubercules	11
f-2) Feuilles	13
g) Évaluation de la détérioration physiologique post-récolte des tubercules	15
h) Analyse statistique des données	18
III) Résultats	18
1) Potentiel de production	20
a) Rendement	20
b) Poids frais moyen du tubercule	21
c) Nombre de tubercules récoltés par plante	22
2) Teneur en cyanure	23
2-1) Tubercules	23
2-2) Feuilles	26
3) Détérioration physiologique post-récolte des tubercules	28
4) Relation entre les variables	31
5) Répartition des variétés en groupes homogènes	34
5-1) Distribution de l'inertie	34
5-2) Description des plans factoriels	35
IV) Conclusion et perspectives	48
V) Bibliographie	50
VI) Annexes	54
1) Lecture au papier picrate des échantillons de tubercules	54
2) Lecture au papier picrate des échantillons de feuilles	56
VII) Acronymes	58
VIII) Abréviations	58

1) Introduction

La préservation, la connaissance et la valorisation des ressources génétiques végétales agricoles revêtent une importance capitale pour assurer le développement agricole durable et la sécurité alimentaire des territoires de la commission de l'océan Indien (Comores, Madagascar, Maurice, Seychelles et île de La Réunion) notamment dans le contexte actuel de changement climatique et de dépendance des économies insulaires aux importations. Le projet Germination III (projet régional de coopération) vise à sécuriser et à valoriser ces ressources menacées, afin de consolider l'avenir des agricultures régionales tout en protégeant l'environnement. Parmi ces ressources figure notamment le manioc.

Le manioc, *Manihot esculenta* L. est une plante ligneuse vivace originaire d'Amérique du Sud (Allem, 2002). Il appartient à la famille des Euphorbiacées et il est cultivé essentiellement dans les régions tropicales et subtropicales (Lebot, 2008). Le manioc est une plante rustique qui tolère la sécheresse et peut pousser sur des sols peu fertiles. Il peut être cultivé sur une large gamme d'altitudes (allant du niveau de la mer à 2000 mètres d'altitude) (Tumuhimbise, 2013). Sa culture nécessite un climat chaud et humide. Il est cultivé essentiellement pour ses tubercules et parfois pour ses feuilles (Ospina et al., 2023). Les tubercules sont riches en hydrates de carbone digestibles et sont sources de vitamines et de minéraux (Bayata, 2019). Les feuilles sont une bonne source de protéines, de vitamines, de minéraux et de caroténoïdes (Bayata, 2019 ; Lebot, 2008). Le manioc contribue significativement aux besoins alimentaires de base des populations rurales et urbaines de nombreux pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine (Amelework et al., 2021) et il constitue une source de revenus essentielle pour ses agriculteurs (Nyaika et al., 2024). Il est consommé par environ 800 millions de personnes à travers 80 pays dans le monde (Anna et al., 2010).

Il existe plus de 10 000 variétés de manioc (Salcedo et Siritunga, 2011). Les variétés diffèrent notamment par les caractéristiques morphologiques des tubercules, de la tige et des feuilles, par leur productivité, par la sensibilité à la détérioration physiologique post-récolte des tubercules et par la teneur en glycosides cyanogènes des tubercules et des feuilles (Lebot, 2008 ; Nambisan, 2011 ; Visalakshi et al., 2023). Les variétés dites douces présentent une teneur faible en glycosides cyanogènes (≤ 50 mg/kg de poids frais) et peuvent être consommées sans préparation préalable (c'est-à-dire « crues ») (Jackson et al., 2020 ;

Ndubuisi et *al.*, 2018). Les variétés dites amères présentent une teneur élevée en glycosides cyanogènes (> 100 mg/kg de poids frais) et nécessitent un processus de transformation et de détoxification avant d'être consommées (Burns et al., 2012 ; Ndubuisi et *al.*, 2018).

Cette étude a pour objectif de réaliser une caractérisation agro-morphologique, d'une part des variétés de manioc de La Réunion conservées au centre de ressources biologiques (CRB) Vatel et d'autres issues de prospections, et d'autre part de variétés représentatives de la diversité régionale provenant des Comores, de Madagascar et de Mayotte. Dans cette optique, un essai d'évaluation variétale a été mis en place pour décrire la morphologie et pour comparer les performances agronomiques des différentes variétés. Cet essai a vocation à identifier des variétés intéressantes pour les agriculteurs, à classer en groupes homogènes les variétés et à reconnaître les éventuels doublons parmi les variétés évaluées (doublons : accessions identiques mais portant des noms ou des codes différents). Aussi, l'essai doit permettre de statuer si les variétés prospectées sur l'île de La Réunion sont distinctes de celles conservées au CRB Vatel.

II) Matériel et méthodes

a) Site d'étude

L'essai a été mis en place sur la station expérimentale du Cirad à Bassin Martin (commune de Saint-Pierre, île de La Réunion, France). L'altitude est de 295 mètres et les coordonnées GPS sont -21.3085 pour la latitude et 55.5075 pour la longitude. Le climat est du type tropical humide et sec avec une saison chaude et humide de novembre à mai et une saison plus fraîche et sèche de juin à octobre. La température moyenne annuelle est d'environ 23°C, avec des températures supérieures à 18°C chaque mois de l'année. La température moyenne annuelle est d'environ 23°C, avec une température supérieure à 18°C chaque mois de l'année. Les précipitations annuelles sont d'environ 1200 mm, avec une différence d'environ 165 mm entre le mois le plus sec et le mois le plus humide (EcophytoPIC, 2025). Le sol est de type évolué ferrallitique brun (Vuillaume et Moreau, 1981).

b) Matériel végétal et dispositif expérimental

L'évaluation a porté sur 38 variétés de manioc : 24 variétés locales réunionnaises conservées au CRB Vatel, 2 nouvelles variétés prospectées sur l'île de La Réunion, 6 variétés provenant de

Madagascar, 3 variétés provenant des Comores et 3 variétés provenant de Mayotte (tableau 1). La plantation a eu lieu le 22 août 2023. Elle a été réalisée sur butte. Une photo de la parcelle d'essai, prise quelques mois après la plantation, est présentée dans la figure 1. Chacun des blocs variétaux est composé de 6 plantes alignées. Un morceau de tronc lignifié (bouture) de 15 à 20 cm de long (10-15 nœuds) a été utilisé comme matériel végétal pour chaque plante (figure 2). Les boutures ont été plantées à plat dans le sol à une profondeur de 10 cm. Une seule bouture a été plantée par trou. La distance d'espacement sur la ligne est de 1,5 mètre entre les plantes d'une même variété et de 3 mètres entre les plantes de deux variétés. La distance d'espacement entre les lignes est de 3 mètres. Cette faible densité a été choisie pour permettre une observation facile de l'ensemble des plantes et la prise de photographies. Au total, l'essai est composé de 19 lignes (figure 3).



Figure 1 : parcelle d'essai phénotypage manioc 7,5 mois après la plantation.



Figure 2 : exemple de bouture de manioc utilisée comme matériel de plantation.

Tableau 1 : liste des variétés de manioc évaluées dans l'essai et provenance des boutures.

Variété de manioc	Provenance des boutures
Long Java CR-XV-00007	CRB Vatel
Rose 1 CR-XV-00001	CRB Vatel
Express CR-XV-00059	CRB Vatel
Bassin Martin CR-XV-00079	CRB Vatel
Ravimbinda (MG7)	Madagascar
Graine Cabri CR-XV-00016	CRB Vatel
Vincendo CR-XV-00102	CRB Vatel
Graine Tangué CR-XV-00015	CRB Vatel
Plaine des Grègues CR-XV-00067	CRB Vatel
ETTY 2 CR-XV-00085	CRB Vatel
6 mois noir (MAY 1)	Mayotte
ETTY 1 CR-XV-00084	CRB Vatel
Chava 2 (CO3)	Comores
Java CR-XV-00011	CRB Vatel
Kelimanatody (MG10)	Madagascar
Rose 2 CR-XV-00008	CRB Vatel

Filant CR-XV-00005	CRB Vatel
Graine souris CR-XV-00014	CRB Vatel
Boura ramadani blanc (MAY 5)	Mayotte
Zamal CR-XV-00012	CRB Vatel
Bararata vaky (MG5)	Madagascar
Graine Papangue CR-XV-00018	CRB Vatel
Java (CO1)	Comores
Manioc Blanc CR-XV-00006	CRB Vatel
Mkudû (CO9)	Comores
Feuilles Fines CR-XV-00004	CRB Vatel
Mitàmintso (MG9)	Madagascar
Graine 6 CR-XV-00019	CRB Vatel
Langevin 2	Prospection île de La Réunion
Velag Chy CR-XV-00068	CRB Vatel
Langevin 1	Prospection île de La Réunion
Brède CR-XV-00013	CRB Vatel
Menatana (MG6)	Madagascar
Manioc Jaune CR-XV-00009	CRB Vatel
Madarasy (MG3)	Madagascar
Jaune à l'air CR-XV-00010	CRB Vatel
Ousseni Tiva (MAY 3)	Mayotte
Feuilles marronnier CR-XV-00002	CRB Vatel

Feuilles marronnier CR-XV-00002	Jaune à l'air CR-XV-00010	Manioc Jaune CR-XV-00009	Brède CR-XV-00013	Velag Chy CR-XV-00068	Graine 6 CR-XV-00019	Feuilles Fines CR-XV-00004	Manioc Blanc CR-XV-00006	Graine Papangue CR-XV-00018	Zamal CR-XV-00012	Graine Souris CR-XV-00014	Rose 2 CR-XV-00008	Java CR-XV-00011	ETTY 1 CR-XV-00084	ETTY 2 CR-XV-00085	Graine Tangué CR-XV-00015	Graine cabri CR-XV-00016	Bassin Martin CR-XV-00079	Rose 1 CR-XV-00001
Feuilles marronnier CR-XV-00002	Jaune à l'air CR-XV-00010	Manioc Jaune CR-XV-00009	Brède CR-XV-00013	Velag Chy CR-XV-00068	Graine 6 CR-XV-00019	Feuilles Fines CR-XV-00004	Manioc Blanc CR-XV-00006	Graine Papangue CR-XV-00018	Zamal CR-XV-00012	Graine Souris CR-XV-00014	Rose 2 CR-XV-00008	Java CR-XV-00011	ETTY 1 CR-XV-00084	ETTY 2 CR-XV-00085	Graine Tangué CR-XV-00015	Graine cabri CR-XV-00016	Bassin Martin CR-XV-00079	Rose 1 CR-XV-00001
Feuilles marronnier CR-XV-00002	Jaune à l'air CR-XV-00010	Manioc Jaune CR-XV-00009	Brède CR-XV-00013	Velag Chy CR-XV-00068	Graine 6 CR-XV-00019	Feuilles Fines CR-XV-00004	Manioc Blanc CR-XV-00006	Graine Papangue CR-XV-00018	Zamal CR-XV-00012	Graine Souris CR-XV-00014	Rose 2 CR-XV-00008	Java CR-XV-00011	ETTY 1 CR-XV-00084	ETTY 2 CR-XV-00085	Graine Tangué CR-XV-00015	Graine cabri CR-XV-00016	Bassin Martin CR-XV-00079	Rose 1 CR-XV-00001
Feuilles marronnier CR-XV-00002	Jaune à l'air CR-XV-00010	Manioc Jaune CR-XV-00009	Brède CR-XV-00013	Velag Chy CR-XV-00068	Graine 6 CR-XV-00019	Feuilles Fines CR-XV-00004	Manioc Blanc CR-XV-00006	Graine Papangue CR-XV-00018	Zamal CR-XV-00012	Graine Souris CR-XV-00014	Rose 2 CR-XV-00008	Java CR-XV-00011	ETTY 1 CR-XV-00084	ETTY 2 CR-XV-00085	Graine Tangué CR-XV-00015	Graine cabri CR-XV-00016	Bassin Martin CR-XV-00079	Rose 1 CR-XV-00001
Feuilles marronnier CR-XV-00002	Jaune à l'air CR-XV-00010	Manioc Jaune CR-XV-00009	Brède CR-XV-00013	Velag Chy CR-XV-00068	Graine 6 CR-XV-00019	Feuilles Fines CR-XV-00004	Manioc Blanc CR-XV-00006	Graine Papangue CR-XV-00018	Zamal CR-XV-00012	Graine Souris CR-XV-00014	Rose 2 CR-XV-00008	Java CR-XV-00011	ETTY 1 CR-XV-00084	ETTY 2 CR-XV-00085	Graine Tangué CR-XV-00015	Graine cabri CR-XV-00016	Bassin Martin CR-XV-00079	Rose 1 CR-XV-00001
MAY 3 Oussenï Tiva	MG3 Madarasy	MG6 Menatana	Langevin 1	Langevin 2	MG9 Mitàmintso	C09 Mkudú	C01 Java	MG5 Bararata vaky	MAY 5 Boura ramadani blanc	Filant CR-XV-00005	MG10 Kelimanatody	CO3 Chava 2	MAY 1 6 mois noir	Plaine des Grègues CR-XV-00067	Vincendo CR-XV-00102	MG7 Ravimbinda	Express CR-XV-00059	Long Java CR-XV-00007
MAY 3 Oussenï Tiva	MG3 Madarasy	MG6 Menatana	Langevin 1	Langevin 2	MG9 Mitàmintso	C09 Mkudú	C01 Java	MG5 Bararata vaky	MAY 5 Boura ramadani blanc	Filant CR-XV-00005	MG10 Kelimanatody	CO3 Chava 2	MAY 1 6 mois noir	Plaine des Grègues CR-XV-00067	Vincendo CR-XV-00102	MG7 Ravimbinda	Express CR-XV-00059	Long Java CR-XV-00007
MAY 3 Oussenï Tiva	MG3 Madarasy	MG6 Menatana	Langevin 1	Langevin 2	MG9 Mitàmintso	C09 Mkudú	C01 Java	MG5 Bararata vaky	MAY 5 Boura ramadani blanc	Filant CR-XV-00005	MG10 Kelimanatody	CO3 Chava 2	MAY 1 6 mois noir	Plaine des Grègues CR-XV-00067	Vincendo CR-XV-00102	MG7 Ravimbinda	Express CR-XV-00059	Long Java CR-XV-00007
MAY 3 Oussenï Tiva	MG3 Madarasy	MG6 Menatana	Langevin 1	Langevin 2	MG9 Mitàmintso	C09 Mkudú	C01 Java	MG5 Bararata vaky	MAY 5 Boura ramadani blanc	Filant CR-XV-00005	MG10 Kelimanatody	CO3 Chava 2	MAY 1 6 mois noir	Plaine des Grègues CR-XV-00067	Vincendo CR-XV-00102	MG7 Ravimbinda	Express CR-XV-00059	Long Java CR-XV-00007
MAY 3 Oussenï Tiva	MG3 Madarasy	MG6 Menatana	Langevin 1	Langevin 2	MG9 Mitàmintso	C09 Mkudú	C01 Java	MG5 Bararata vaky	MAY 5 Boura ramadani blanc	Filant CR-XV-00005	MG10 Kelimanatody	CO3 Chava 2	MAY 1 6 mois noir	Plaine des Grègues CR-XV-00067	Vincendo CR-XV-00102	MG7 Ravimbinda	Express CR-XV-00059	Long Java CR-XV-00007

18 mètres

57 mètres

Figure 3 : plan de l'essai phénotypage manioc mis en place sur la station expérimentale du Cirad à Bassin Martin.

c) Conduite culturale

Aucun apport d'engrais et aucun traitement pesticide n'ont été réalisés au cours de l'essai. Une irrigation par goutte-à-goutte a été appliquée 3 fois par semaine d'août à décembre 2023. Un désherbage manuel au pied des plantes a été réalisé un mois et deux mois après la plantation pour permettre une bonne croissance des jeunes pieds de manioc. En parallèle, un passage de gyrobroyeur a été effectué un mois et deux mois après la plantation pour limiter l'enherbement entre les rangs. Par la suite, une fois par mois, un désherbage à la débroussailleuse a été réalisé pour réduire, dans la mesure du possible, l'enherbement de la parcelle. Pour quelques plantes, il a été constaté, 6 semaines après la plantation, une absence de reprise. Dans ce cas, il a été décidé de replanter des nouvelles boutures. Par ailleurs, trois plantes de l'essai ont été arrachées 4 mois après la plantation en raison de présomption de symptômes du virus de la mosaïque du manioc (CMV). Des échantillons de feuilles ont été prélevés sur ces plantes et des analyses virologiques ont été réalisées. Les résultats des analyses ont montré que les plantes étaient indemnes du CMV.

d) Caractérisation agro-morphologique

La caractérisation agro-morphologique des variétés a été basée sur des observations de 37 descripteurs. Les descripteurs retenus et les périodes d'observation associées sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 : liste des descripteurs utilisés pour la caractérisation agro-morphologique des variétés de manioc évaluées et période d'observation.

Descripteur agro-morphologique	Période d'observation
1) Nombre de tiges par plante	3 mois après la plantation
2) Couleur des jeunes feuilles apicales	3 mois après la plantation
3) Pubescence des jeunes feuilles apicales	3 mois après la plantation
4) Forme de la foliole centrale	6 mois après la plantation
5) Couleur du pétiole	6 mois après la plantation
6) Couleur de la feuille	6 mois après la plantation
7) Nombre de lobes foliaires	6 mois après la plantation
8) Longueur du pétiole	6 mois après la plantation
9) Couleur des veines foliaires	6 mois après la plantation

10) Longueur du lobe de la feuille	6 mois après la plantation
11) Largeur du lobe de la feuille	6 mois après la plantation
12) Ratio longueur du lobe/largeur du lobe central de la feuille	6 mois après la plantation
13) Orientation du pétiole	6 mois après la plantation
14) Floraison	6 mois après la plantation
15) Proéminence des cicatrices foliaires	9 mois après la plantation
16) Couleur externe de la tige	9 mois après la plantation
17) Mode de croissance de la tige	9 mois après la plantation
18) Hauteur de la plante	Récolte
19) Nombre de niveaux d'embranchement	Récolte
20) Mode de ramification	Récolte
21) Port de la plante	Récolte
22) Couleur des branches terminales	Récolte
23) Direction des tubercules	Récolte
24) Arrangement des tubercules	Récolte
25) Variation de la taille des tubercules	Récolte
26) Variation de la forme des tubercules	Récolte
27) Longueur des pédoncules racinaires	Récolte
28) Forme des tubercules	Récolte
29) Couleur externe du tubercule	Récolte
30) Texture externe du tubercule	Récolte
31) Couleur du cortex racinaire	Récolte
32) Couleur de la pulpe racinaire	Récolte
33) Nombre de tubercules	Récolte
34) Poids frais total des tubercules	Récolte
35) Longueur des tubercules	Récolte
36) Diamètre des tubercules	Récolte
37) Teneur en matière sèche de la chair des tubercules	Post-récolte

Les descripteurs retenus sont tirés du guide illustré de l'IITA « *Selected morphological and agronomic descriptors for the characterization of cassava* » réalisé par Fukuda et *al.*, en 2010. Les différents niveaux et les croquis explicatifs des descripteurs sont présentés dans ce guide.

Ces descripteurs ont été complétés par des photographies de la partie aérienne entière, de la partie souterraine entière, des jeunes feuilles apicales, de la feuille adulte avec pétiole, de la tige et de trois photos de tubercule (couleur externe, cortex et coupe transversale). Les photographies permettent de mieux visualiser les caractères morphologiques et illustreront des futures fiches variétales.

e) Récolte

Les récoltes ont été réalisées manuellement et ont eu lieu 7,5 mois, 10,5 mois et 13,5 mois après la plantation. Trois dates de récolte ont été choisies pour identifier d'éventuelles variétés précoces et/ou tardives et pour déterminer la date optimale de récolte pour chacune des variétés. Pour chaque date, dans la mesure du possible, deux plantes ont été récoltées par variété.

f) Évaluation de la teneur en composés cyanogéniques des tubercules et des feuilles

Les mesures d'évaluation de la teneur en composés cyanogéniques des tubercules et des feuilles de manioc ont été réalisées lors de la deuxième et de la troisième récolte.

À cet effet, des kits de détermination de la teneur en cyanure ont été commandés auprès d'une université australienne. Ces kits sont tirés des travaux de recherche de Bradbury *et al.*, (1999) et sont basés sur la méthode semi-quantitative au papier picrate. La méthode du papier picrate repose sur des enzymes endogènes pour décomposer les glycosides cyanogènes contenus dans les tubercules et dans les feuilles de manioc frais. Le cyanure d'hydrogène libéré au cours du processus réagit avec le papier picrate qui possède un pigment de couleur. Ce pigment de couleur s'assombrit avec le cyanure libéré. La variation de couleur du papier picrate est utilisée pour mesurer la quantité de cyanure d'hydrogène libérée. Pour ce faire, une charte de couleurs fournie dans le kit fait correspondre la couleur du papier picrate à une concentration en cyanure, et une lecture de l'absorbance au spectrophotomètre rend plus précise la mesure. Le résultat est exprimé en mg d'HCN/kg de poids frais.

f-1) Tubercules

Au moment de la récolte, un tubercule dont la taille est représentative de la variété est choisi. Une section transversale de 1 à 2 mm d'épaisseur est coupée au milieu du tubercule. La peau est retirée et de petits morceaux de chair sont découpés jusqu'à atteindre un poids de 100 mg. Les morceaux de chair sont placés dans des petits flacons en plastique à fond plat (figure 4) contenant du tampon phosphate et 1 ml d'eau distillée est ajouté (le tampon phosphate a pour objectif de maintenir le pH entre 6 et 8 pour que la réaction enzymatique de dégradation des composés cyanogéniques soit optimale). Le papier indicateur picrate est alors ajouté, puis

le flacon en plastique à fond plat est fermé à l'aide d'un couvercle à vis. Il est conservé pendant 16 à 24 heures à température ambiante (20-35°C). Cette durée de conservation correspond au temps nécessaire, à température ambiante, pour que l'hydrolyse enzymatique dégrade complètement les glycosides cyanogènes en cyanure mesurable par le papier picrate. Pour le témoin négatif, les mêmes étapes sont appliquées, hormis l'ajout des 100 mg de chair du tubercule. Pour le témoin positif, de la linamarine correspondant à une concentration connue en cyanure est utilisée à la place des morceaux de tubercules.

À la suite des 24 heures d'incubation, le papier picrate est récupéré puis comparé avec le nuancier de couleurs fourni dans le kit pour lire la valeur correspondante en ppm de cyanure. Après la lecture, le papier picrate est placé dans un tube à essai et il est ajouté 5,0 ml d'eau distillée. La solution est ensuite passée dans un spectrophotomètre (figure 6) et une mesure de l'absorbance à 510 nm est réalisée. La teneur en cyanure est obtenue en appliquant un coefficient de 396 à la valeur de l'absorbance mesurée.



Figure 4 : flacons en plastique à fond plat contenant le papier picrate, les morceaux de tubercules et le tampon phosphate.

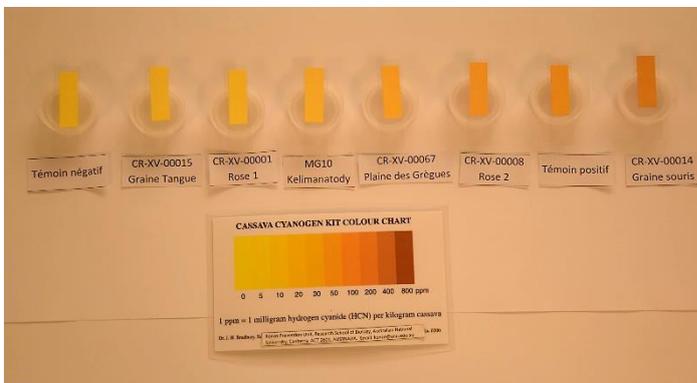


Figure 5 : lecture du résultat du papier picrate.



Figure 6 : spectrophotomètre utilisé pour la mesure de l'absorbance des échantillons.

f-2) Feuilles

Des échantillons de feuilles ont été prélevés sur chaque variété (figure 7) à deux dates : 11,5 mois et 12,5 mois après la plantation des maniocs. Il a été choisi de prélever la troisième feuille la plus jeune sur deux plantes données, dans la mesure du possible (pour certaines variétés, il ne restait qu'une plante vivante). Les pétioles ont été détachés du limbe foliaire. Les échantillons de feuilles ont été découpés puis broyés à l'aide d'un mortier (l'objectif a été d'initier la réaction de dégradation enzymatique des composés cyanogéniques) (figure 8). Il a alors été prélevé 100 mg de broyat à l'aide d'une balance électronique précise au mg près (figure 9). Les 100 mg de broyat ont été déposés dans de petits flacons transparents à fond plat contenant du tampon phosphate, puis le papier indicateur picrate a été ajouté (figure 10). Les étapes suivantes sont identiques à celles appliquées pour les tubercules. La lecture au papier picrate donne une première indication de la concentration en cyanure des feuilles, puis cette valeur est affinée à l'aide de la lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 510 nm.



Figure 7 : échantillon de feuilles utilisé pour la mesure de la teneur en cyanure des feuilles.



Figure 8 : échantillon de feuilles coupé puis broyé, utilisé pour la mesure de la teneur en cyanure des feuilles.

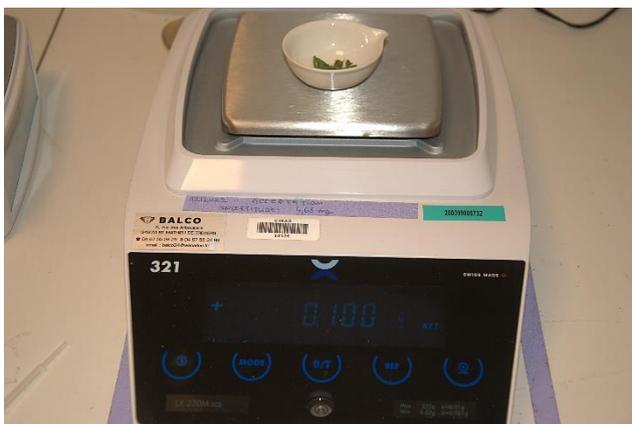


Figure 9 : balance électronique de précision utilisée pour la mesure des échantillons de feuilles et de tubercules.

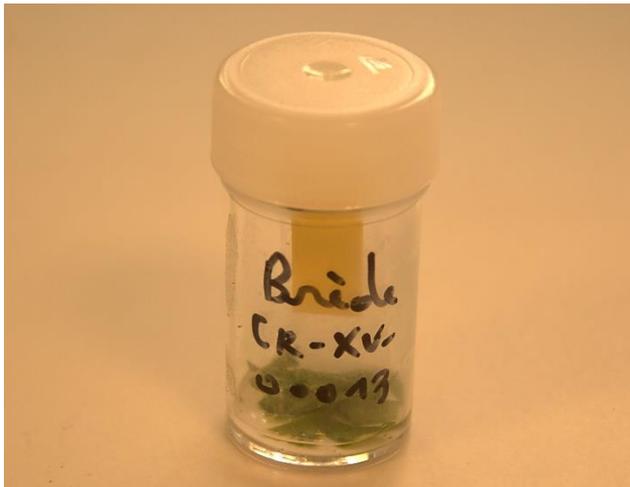


Figure 10 : flacon transparent à fond plat utilisé pour la mesure de la teneur en cyanure des feuilles.

g) Évaluation de la détérioration physiologique post-récolte des tubercules

La détérioration physiologique post-récolte est la principale cause de perte d'acceptabilité des tubercules de manioc après la récolte. Ce processus enzymatique débute 15 minutes après la coupe des tubercules au champ et devient visible entre 24 et 72 heures après récolte, rendant les tubercules impropres à la consommation (Venturini et *al.*, 2015). Les symptômes se manifestent par un tissu vasculaire rayé bleu foncé et des occlusions brunes dans le parenchyme du tubercule (Salcedo et Siritunga, 2011). La méthodologie standard d'évaluation de la détérioration physiologique post-récolte des tubercules de manioc est basée sur les travaux de Wheatley et *al.*, (1985).

La détérioration physiologique post-récolte a été évaluée à la deuxième et à la troisième récolte. Un tubercule de taille commerciale (longueur minimale de 18 cm), exempt de blessures et de moisissures, a été sélectionné pour chaque variété. Il a été réalisé sur le tubercule choisi une coupe d'une section à environ 1 cm des extrémités proximales et distales (figure 11). L'extrémité distale a été couverte d'un film alimentaire (fixé avec un élastique) dans le but de maintenir l'humidité et d'empêcher la détérioration physiologique de partir de cette surface (figure 12). Les tubercules ont ensuite été conservés pendant 7 jours dans des conditions ambiantes à l'abri du soleil et de la pluie, mais exposés à l'air (figure 13). Après les 7 jours de conservation, il a été réalisé sept tranches de 2 cm d'épaisseur de l'extrémité proximale à l'extrémité distale et un score de 0 à 10 a été attribué à chaque tranche,

correspondant au pourcentage de la surface coupée présentant une décoloration périphérique (avec 0 = 0 %, 1 = 10 %, 2 = 20 %, etc.) (figures 14 et 15). Le score de détérioration physiologique post-récolte moyen de la variété a été calculé en faisant la moyenne des scores des sept tranches.

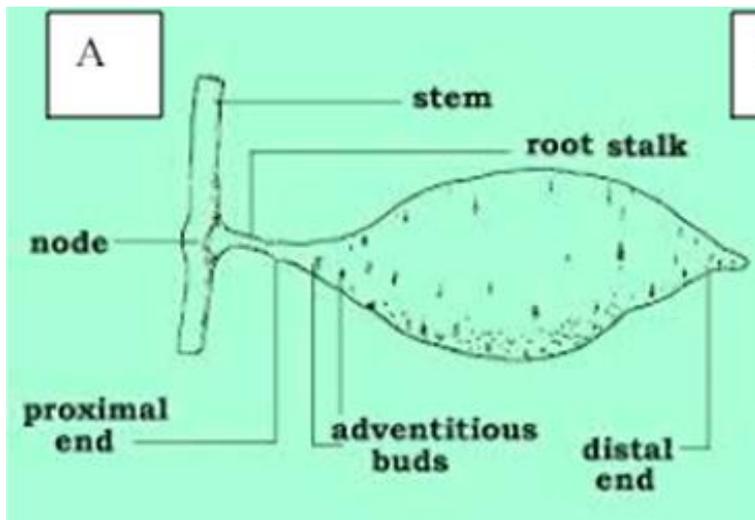


Figure 11 : tubercule de manioc attaché à la tige et illustration de l'extrémité distale (distal end) et de l'extrémité proximale (proximal end) (d'après Muyinza et al., 2016).



Figure 12 : échantillons de tubercules préparés pour la mesure de l'évaluation de la détérioration physiologique post-récolte.



Figure 13 : mise en conservation des tubercules utilisés pour la mesure de l'évaluation de la détérioration physiologique post-récolte.



Figure 14 : tranches transversales réalisées sur un tubercule de la variété de manioc Langevin 1 pour la notation de détérioration physiologique post-récolte.



Figure 15 : échelle visuelle de décoloration périphérique de la chair allant de 0 à 10 utilisée pour l'évaluation de la détérioration physiologique post-récolte des tubercules de manioc (d'après Salcedo et Siritunga, 2011).

h) Analyse statistique des données

Un corrélogramme a tout d'abord été réalisé pour étudier les relations entre les variables étudiées (Wei et Simko, 2024).

La matrice des données agro-morphologiques collectées a servi à réaliser une analyse en composantes principales (ACP). Les données ont été centrées et réduites pour éviter que les variables à forte variance pèsent indûment sur les résultats. Les variables contribuant le plus à la formation des axes factoriels ont été définies comme variables actives et le reste comme variables supplémentaires. Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a ensuite été réalisée. Elle a permis de classer les variétés en groupes homogènes selon la méthode de Ward en utilisant un indice de similarité de la distance Euclidienne. Le corrélogramme et les analyses multivariées ACP et CAH ont été réalisées à partir du logiciel R version 4.4.2 (Lê et *al.*, 2008).

III) Résultats

Avant de présenter les premiers résultats, il convient de préciser qu'un cyclone suivi d'une tempête tropicale ont eu lieu en janvier 2024, soit 5 mois après la plantation des manioc. La majorité des plantes se sont retrouvées couchées au sol (figure 16) et 12 plantes ont été détruites (emportées par les eaux ou sectionnées à la base). Certaines variétés ont été très impactées. C'est notamment le cas des variétés ETTY 1 CR-XV-00084, ETTY 2 CR-XV-00085, Rose 2 CR-XV-00008, Zamal CR-XV-00012, Graine Papangue CR-XV-00018 (figure 17), Jaune à l'air CR-XV-00010, Manioc blanc CR-XV-00006 et CO1 Java dont de nombreuses plantes ont perdu toutes leurs feuilles et/ou ont eu des feuilles quasiment à entièrement desséchées.



Figure 16 : plantes de manioc couchées au sol suite au passage du cyclone BELAL en janvier 2024.



Figure 17 : plante de manioc couchée au sol avec feuilles absentes de la tige (arrachées par les épisodes venteux de janvier 2024), variété Graine Papangue CR-XV-00018.

1) Potentiel de production

Parmi les deux plantes récoltées (le cas échéant s'il en restait deux), seules les données de la plante la plus productive ont été sélectionnées pour illustrer le potentiel de la variété pour la date donnée.

a) Rendement

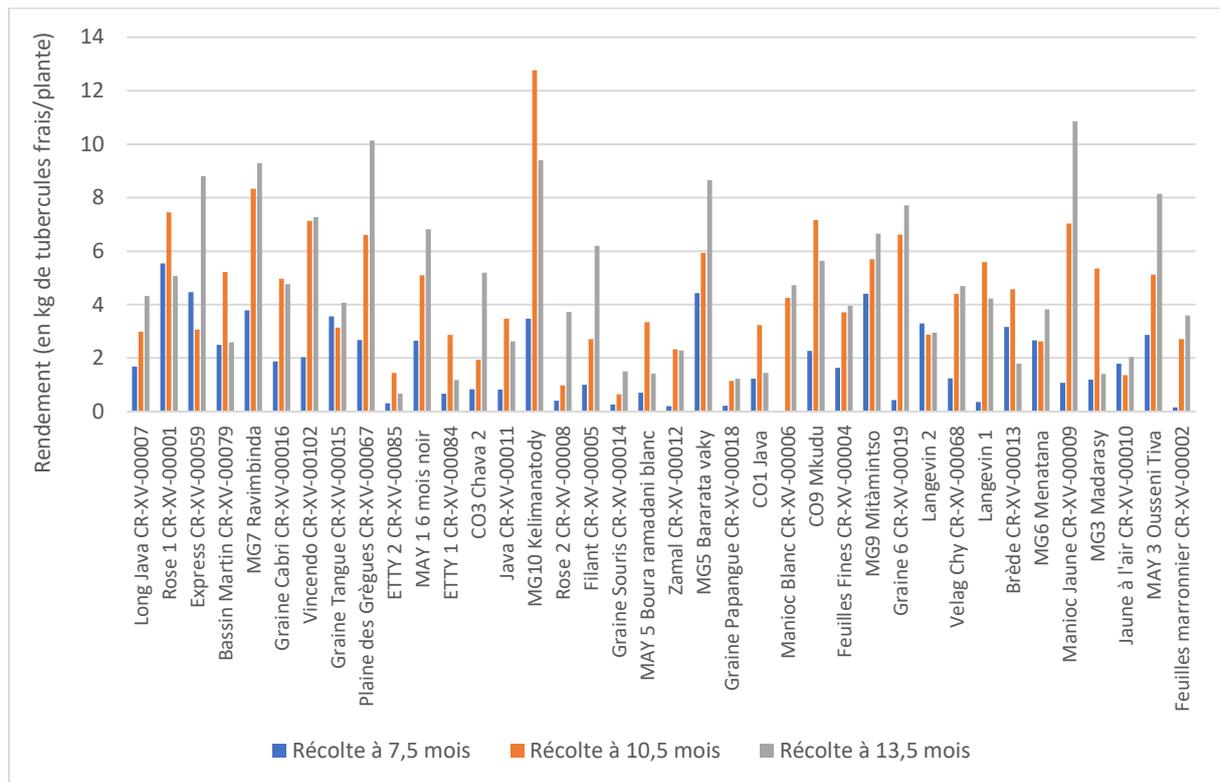


Figure 18 : rendement des variétés de manioc à 3 dates de récolte.

La figure 18 permet de voir qu'il existe une variabilité du potentiel de production entre les variétés. Cette variabilité est d'un facteur 10 entre la variété à plus faible production (Graine Papangue CR-XV-00018 : 1,2 kg de tubercules/plante à la récolte optimale) et la variété à plus forte production (MG10 Kelimanatody : 12,76 kg/plante à la récolte optimale).

Il y a 7 variétés à très fort potentiel de production (rendement en tubercules supérieur à 8 kg), 7 variétés à fort potentiel de production (rendement en tubercules compris entre 6 et 8 kg), 21 variétés à potentiel de production modéré (rendement en tubercules compris entre 2 et 6 kg), et 3 variétés à faible potentiel de production (rendement en tubercules inférieur à 2 kg) (figure 18).

La figure 18 permet également de voir que la date optimale de récolte varie suivant les variétés. Hormis pour une variété (Langevin 2), le rendement en tubercules récoltés augmente entre la récolte date 1 et la récolte date 2. Pour 23 variétés, le rendement en tubercules récoltés augmente entre la récolte date 2 et la récolte date 3 et pour 15 variétés, le rendement en tubercules récoltés diminue entre la récolte date 2 et la récolte date 3.

Une variété a un potentiel de production maximum 7,5 mois après la plantation (Langevin 2). Treize variétés ont un potentiel de production maximum 10,5 mois après la plantation. Vingt-quatre variétés ont un potentiel de production maximum 13,5 mois après la plantation (figure 18).

b) Poids frais moyen du tubercule

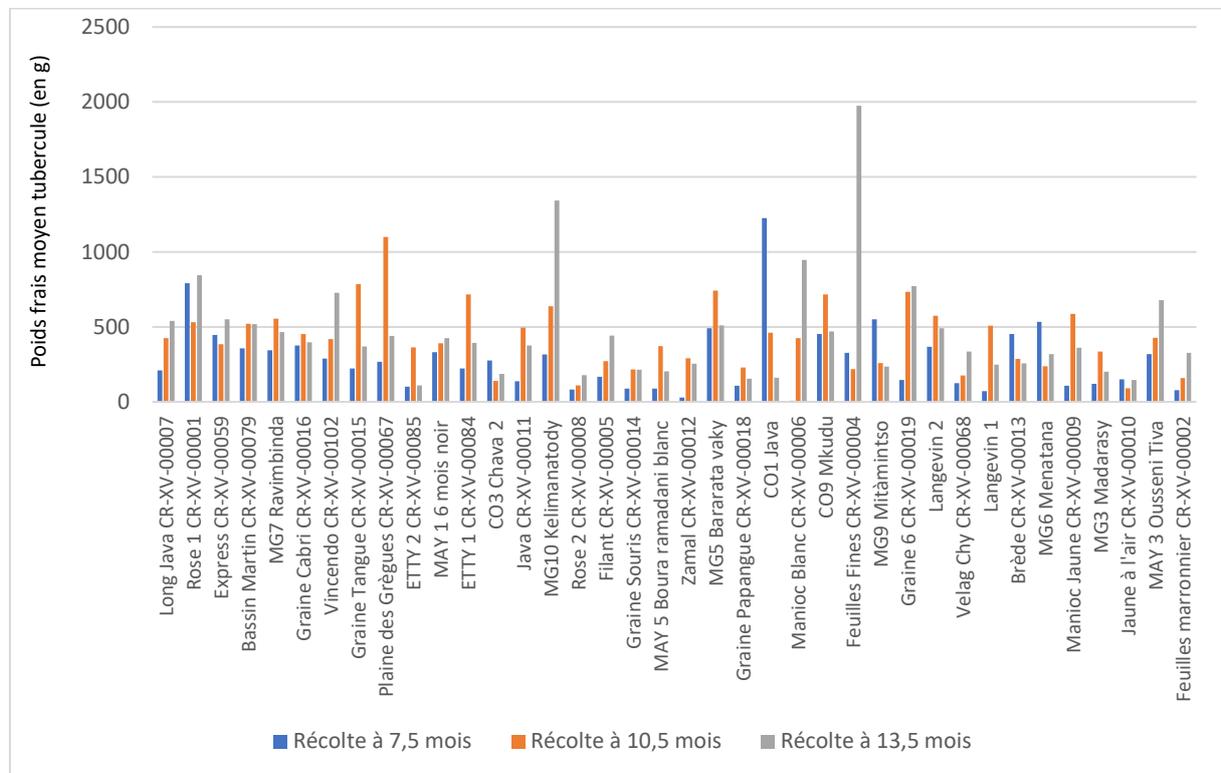


Figure 19 : poids frais moyen du tubercule des variétés de manioc à 3 dates de récolte.

Il existe une variabilité du poids frais moyen du tubercule entre les variétés de manioc évaluées (figure 19). Cette variabilité est d'un facteur 11 entre la variété dont le poids frais moyen du tubercule est le plus élevé (Feuilles Fines CR-XV-00004 : 1975 g à la date optimale de récolte) et la variété dont le poids frais moyen du tubercule est le plus faible (Rose 2 CR-XV-00008 : 178 g à la date optimale de récolte). Hormis pour 3 variétés, le poids frais moyen du tubercule augmente entre la récolte date 1 et la récolte date 2. Il augmente pour 16

variétés entre la récolte date 2 et la récolte date 3 et il diminue pour 22 variétés entre la récolte date 2 et la récolte date 3 (figure 19).

Il y a 4 variétés à très gros tubercules (poids frais moyen du tubercule supérieur à 1000 g), 18 variétés à tubercules de grosseur moyenne (poids frais moyen du tubercule entre 500 et 1000 g) et 16 variétés à petits tubercules (poids frais moyen du tubercule inférieur à 500 g) (figure 19).

c) Nombre de tubercules récoltés par plante

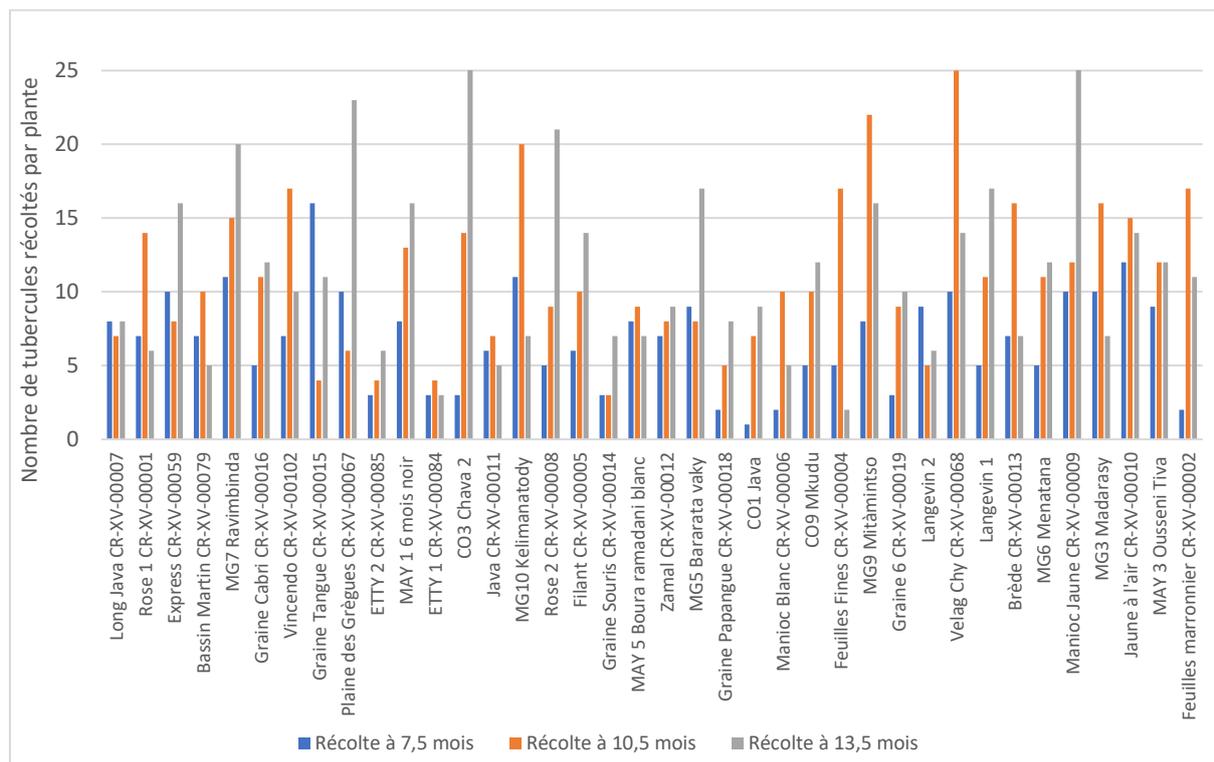


Figure 20 : nombre de tubercules par plante des variétés de manioc à 3 dates de récolte.

Il existe une variabilité du nombre de tubercules récoltés par plante entre les variétés de manioc évaluées (figure 20). Cette variabilité est d'un facteur 6 entre les variétés dont le nombre de tubercules récoltés par plante est le plus élevé (C03 Chava 2, Velag Chy CR-XV-00068 et Manioc Jaune CR-XV-00009 : 25 tubercules récoltés) et celle où le nombre de tubercules récoltés par plante est le plus faible (ETTY 1 CR-XV-00084 : 4 tubercules récoltés). Hormis pour deux variétés (Langevin 2 et Graine Tangué CR-XV-00015), le nombre de tubercules récoltés augmente entre la récolte date 1 et la récolte date 2 (figure 20). Il augmente pour 21 variétés entre la récolte date 2 et la récolte date 3 et il diminue pour 17 variétés entre la récolte date 2 et la récolte date 3 (figure 20).

Parmi les variétés, 6 variétés produisent beaucoup de tubercules par plante (nombre de tubercules supérieur à 20), 5 variétés produisent peu de tubercules par plante (moins de 10 tubercules) et 27 variétés produisent un nombre modéré de tubercules par plante (entre 10 et 20 tubercules) (figure 20).

2) Teneur en cyanure

2-1) Tubercules

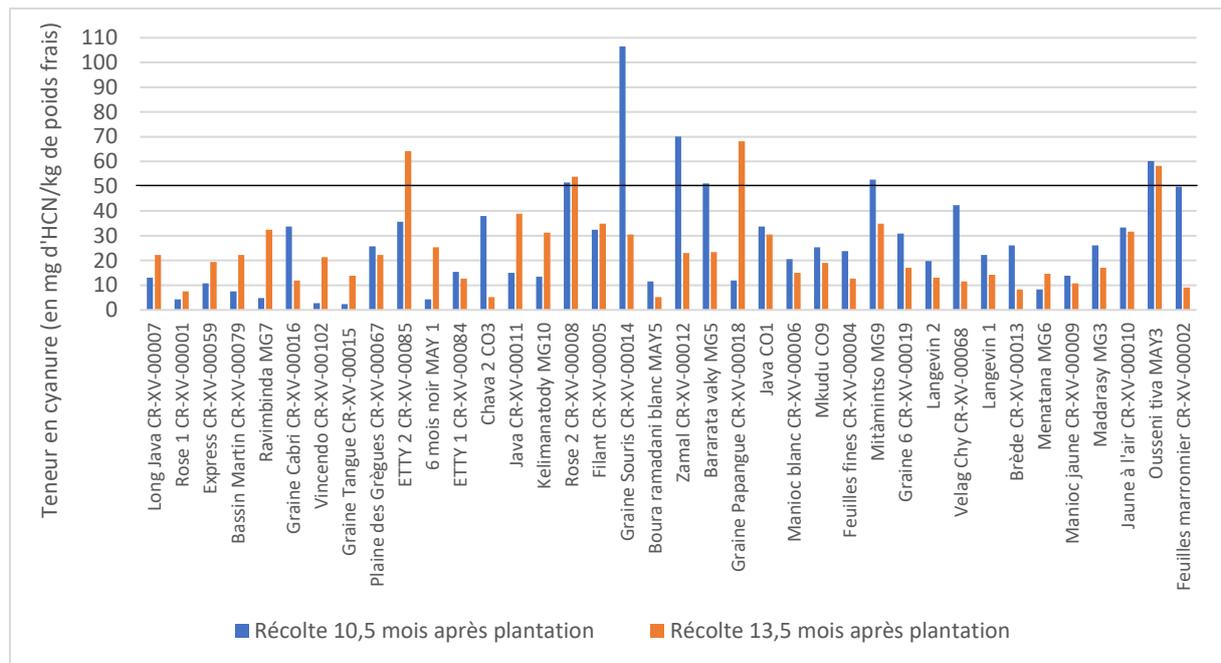


Figure 21 : teneur en cyanure des tubercules des variétés de manioc à deux dates de récolte (résultat de la mesure au spectrophotomètre). La ligne horizontale noire est un point de repère associé au seuil de différenciation entre manioc doux et manioc amer (valeur de 50 mg d'HCN kg/poids frais).

Les résultats de mesure de la teneur en cyanure des tubercules au spectrophotomètre (figure 21) et de la lecture au papier picrate sont bien corrélés (figures 22, 23, 24, 25 et 26 de l'annexe 1). La lecture au papier picrate donne une gamme de concentration de la teneur en cyanure avec une précision de 5 à 10 mg d'HCN/kg de poids frais pour les valeurs comprises entre 0 et 30 mg d'HCN/kg de poids frais et de 20 mg d'HCN/kg de poids frais pour les valeurs comprises entre 30 et 50 mg d'HCN/kg de poids frais. La mesure au spectrophotomètre est plus précise car elle donne un résultat avec une précision au dixième de mg d'HCN/kg de poids frais.

Les mesures effectuées dans le cadre de notre expérimentation montrent qu'il existe une variabilité de la teneur en cyanure des tubercules entre les variétés évaluées. Cette variabilité

est d'un facteur 44 entre la variété à plus forte teneur en cyanure dans les tubercules (Graine souris CR-XV-00014 : 106,5 mg d'HCN/kg de poids frais) et celle à plus faible teneur en cyanure dans les tubercules (Graine Tangué CR-XV-00015 : 2,4 mg d'HCN/kg de poids frais) (figure 21). Les variétés évaluées se situent toutes dans une gamme basse de concentration en cyanure ; en effet, d'après la littérature, la gamme de concentration en cyanure du parenchyme des tubercules de manioc varie de 1 à 1550 mg d'HCN/kg de poids frais (Burns et al., 2012).

Le Codex Alimentarius définit une variété de manioc doux, si elle contient moins de 50 mg d'HCN/kg de poids frais (norme Codex 238-2003). La majorité des variétés évaluées peuvent ainsi être considérées comme des variétés de manioc doux. Certaines variétés, comme ETTY 2 CR-XV-00025, Rose 2 CR-XV-00008, Graine Souris CR-XV-00014, Zamal CR-XV-00012 et Graine Papangue CR-XV-00018, ont une teneur en cyanure des tubercules supérieure à 50 mg/kg de poids frais. Il convient de préciser que ces variétés ont été impactées par le cyclone BELAL et par la tempête Candice (confère préambule de la partie résultats). Il est possible que le stress généré par ces épisodes venteux ait entraîné une augmentation de la teneur en cyanure dans les tubercules. En effet, selon Nyaika et al., (2024), le stress, par exemple hydrique, perturbe le métabolisme normal des plantes, affectant l'équilibre entre la production de glycosides cyanogènes et les enzymes de détoxification du manioc. C'est pourquoi les plantes de manioc stressées auraient tendance à présenter une teneur en cyanure plus élevée dans leurs tubercules que les plantes cultivées dans des conditions optimales. L'effet varierait en fonction du stade de croissance de la plante. Par ailleurs, les 2 épisodes venteux qui ont touché la parcelle d'essai ont entraîné la destruction du système d'irrigation, ce qui a pu générer un stress hydrique au moment de la saison sèche de juin à octobre 2024 et donc participer à l'accumulation des composés cyanogènes dans les tubercules. Une expérimentation réalisée en culture pluviale sur la variété de manioc Kasestart 50 a montré en effet que l'apport d'eau par irrigation pendant le neuvième mois de culture (60 mm d'eau apportée), lorsqu'il n'y avait pas de pluie, a permis de réduire de 40 % la teneur en cyanure des tubercules par rapport au témoin non irrigué (Hular-Bograd et al., 2011). Selon ces auteurs, l'irrigation faciliterait la dilution des cyanures, qui sont des composés solubles dans l'eau, réduisant ainsi leur concentration dans les tubercules.

De ce fait, il serait intéressant de refaire une mesure de la teneur en cyanure des tubercules des variétés dont la valeur est supérieure à 50 mg d'HCN/kg de poids frais ou proche de ce seuil, et ce, sur des plantes n'ayant pas subi de cyclone au même stade de croissance (en

l'occurrence ici 5 mois après la plantation) et, dans la mesure du possible, avec une irrigation maintenue en saison sèche. L'objectif sera de comparer les valeurs obtenues et de trancher sur le caractère doux ou non des variétés.

La figure 21 montre également qu'il existe, pour de nombreuses variétés, une variabilité de la teneur en cyanure des tubercules en fonction de la date de récolte. Selon l'étude de Adegbola et *al.*, (2018), récolter les tubercules à maturité physiologique tendrait à réduire la teneur en cyanure des tubercules. De fait, la variabilité de la teneur en cyanure intra-variétale entre deux dates de récoltes pourrait, en partie, être expliquée par la différence de maturité physiologique des tubercules. D'autre part, selon Bradbury et *al.*, (2009), la teneur en cyanure varie entre les différents tubercules d'une même plante et entre les différentes plantes d'une même variété. En conséquence, il est possible que la variabilité intra-variétale observée entre les deux dates de récolte reflète également, en partie, la variabilité entre les tubercules et/ou entre les plantes de la même variété.

Pour avoir un résultat plus fiable de la teneur en cyanure des tubercules d'une variété à une date donnée, il conviendrait, lors de la phase de préparation des 100 mg de chair, d'utiliser deux tubercules ou plus, et ce, prélevés à partir de différentes plantes et de mélanger les morceaux de chair.

2-2) Feuilles

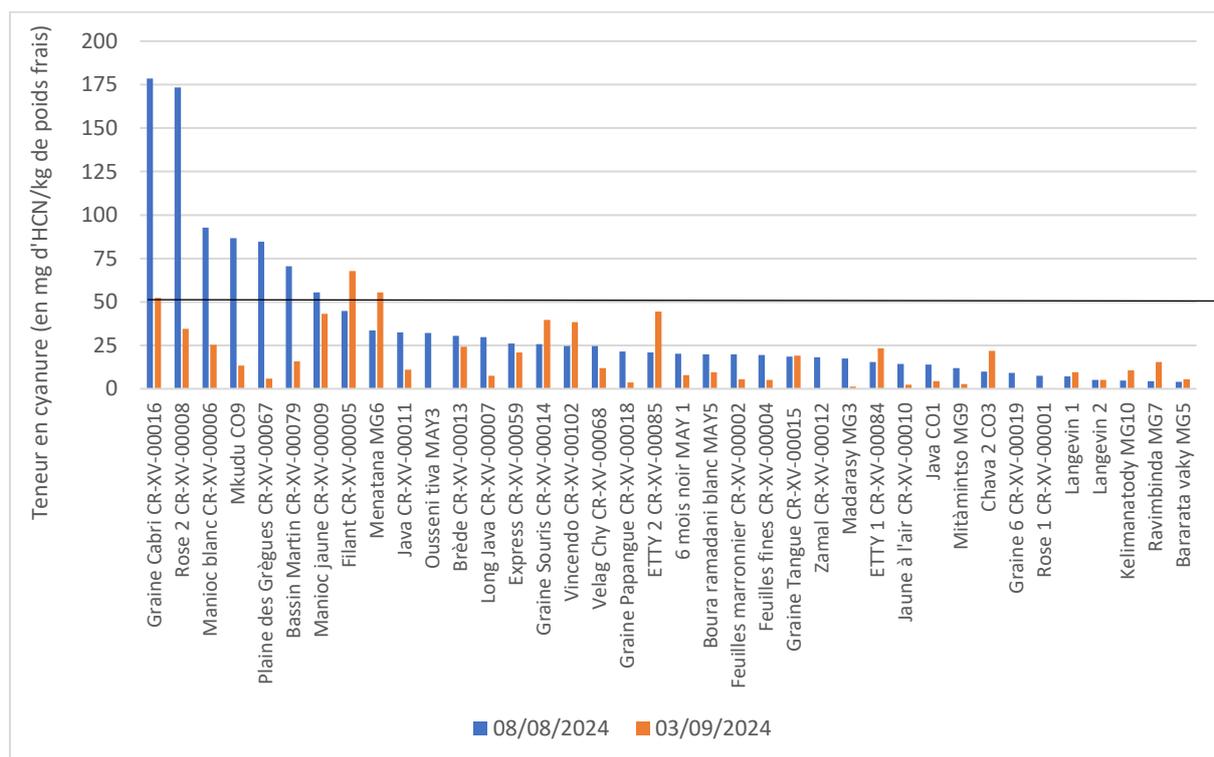


Figure 27 : teneur en cyanure des feuilles des variétés de manioc à deux dates d'échantillonnage (résultat de la mesure au spectrophotomètre). La ligne horizontale noire est un point de repère associé au seuil de différenciation entre manioc doux et manioc amer (valeur de 50 mg d'HCN/kg de poids frais).

Comme pour les tubercules, les résultats de la mesure de la teneur en cyanure des feuilles au spectrophotomètre (figure 27) et de la lecture au papier picrate sont bien corrélés (figures 28, 29, 30 et 31 de l'annexe 2).

Il existe une variabilité de la teneur en cyanure des feuilles entre les variétés évaluées. Cette variabilité va de 0 mg d'HCN/kg de poids frais pour les variétés Zamal CR-XV-00012, Graine 6 CR-XV-00019, Rose 1 CR-XV-00001 et Ousseni Tiva MAY 3 à la date d'échantillonnage du 03/09/2024, à 179 mg d'HCN/kg de poids frais pour la variété Graine Cabri CR-XV-00016 à la date d'échantillonnage du 08/08/2024 (figure 27). Les variétés évaluées se situent toutes dans une gamme basse de concentration en cyanure ; en effet, dans la littérature, la gamme de concentration en cyanure des feuilles de manioc varie de 20 à 1860 mg d'HCN/kg de poids frais (Burns et al., 2012).

Pour la majorité des variétés, la concentration en cyanure des feuilles se situe en dessous de 50 mg d'HCN/kg de poids frais. Elles peuvent donc être consommées sans préparation préalable. Pour les variétés où la concentration est supérieure à 50 mg d'HCN/kg de poids frais, il est recommandé de piler/broyer les feuilles puis de les faire bouillir dans de l'eau pendant au moins 15 minutes pour réduire significativement la teneur en cyanure et les consommer sans danger. En effet, selon Bradbury et Denton (2014), piler/broyer les feuilles de manioc pendant 10 à 15 minutes puis les faire bouillir pendant 10 minutes permet d'éliminer tout le cyanure. Le broyage/pilage provoque la rupture des cellules végétales, ce qui entraîne la libération de la linamarase pour catalyser l'hydrolyse des glycosides cyanogènes en cyanure et en acétone. La cuisson à l'eau permet d'éliminer les cyanogènes hydrosolubles résiduels (linamarine, cyanhydrine d'acétone et acide cyanhydrique) qui sont toujours présents dans les feuilles pilées.

La figure 27 montre qu'il existe également une variabilité intra-variétale de la teneur en cyanure des feuilles, plus ou moins marquée, entre les dates d'échantillonnage.

Cette variabilité pourrait provenir de la méthodologie d'échantillonnage appliquée. En effet, Bradbury et Denton (2011) ont montré, dans une étude sur 4 variétés de manioc, qu'il existe au sein d'une même feuille un gradient croissant, de facteur 3 à 4, de la teneur en cyanure de la pointe vers l'extrémité pédonculaire (extrémité rattachée au pétiole) (figure 28). La partie centrale de la feuille présente une teneur intermédiaire entre ces deux régions. Lors de l'échantillonnage, nous n'avons pas tenu compte de cette hétérogénéité intra-feuille. Il est possible, dans certains cas, que nous ayons privilégié une extrémité plutôt qu'une autre. Comme le recommandent Bradbury et Denton (2014), dans le cadre d'une future étude, il conviendra de prélever uniquement la partie centrale de la feuille.

Par ailleurs, la différence d'âge physiologique des plantes entre les deux dates d'échantillonnage pourrait avoir eu une influence sur la variabilité intra-variétale de la teneur en cyanure des feuilles. En effet, la teneur en cyanure des feuilles varie selon l'âge physiologique des plantes et cette variation est génotype-dépendante (Ospina et al., 2013 ; Gómez et al., 1985). La variabilité intra-variétale ne provient pas d'une hétérogénéité de teneur en cyanure entre les folioles d'une même feuille. En effet, selon De Bruijn (1971), la teneur en glycosides cyanogènes ne varie pas entre les différentes folioles d'une même feuille.

3) Détérioration physiologique post-récolte des tubercules

La figure 32 met en évidence qu'il existe une variabilité du pourcentage de détérioration physiologique post-récolte (PPD) des tubercules d'une part, entre les variétés, et d'autre part une variabilité intra-variétale entre les dates de récolte. Ces résultats concordent avec ceux rapportés par Morante et *al.*, (2010) et par Tumuhimbise et *al.*, (2015), qui montrent qu'il existe une variabilité génétique dans la susceptibilité à la PPD chez le manioc. L'amplitude de la variation des scores de la PPD (de 0 à 100) est en adéquation avec la littérature (Chávez et *al.*, 2005). La forte variabilité intra-variétale des scores de la PPD pourrait, en partie, être le reflet de la variabilité entre les tubercules. En effet, selon Garcia et *al.*, (2013), des tubercules d'une même plante peuvent avoir des scores de PPD variant de 0 à 100, notamment en raison de blessures pendant le processus de récolte et de variations de la teneur en matière sèche. Les études qui travaillent sur l'évaluation de la PPD utilisent entre 5 et 15 tubercules par variété pour minimiser la variabilité entre les tubercules et rendre le score mesuré plus viable (Salcedo et *al.*, 2011 ; Morante et *al.*, 2010 ; García et *al.*, 2013). D'autre part, la variabilité intra-variétale observée pourrait être due, également, à la différence d'état physiologique des plantes entre les deux dates de récolte. En effet, selon Tumuhimbise et *al.*, (2015), plus une plante de manioc se rapproche de sa maturité physiologique, plus elle accumule de la matière sèche dans ses tubercules et plus le score de la PPD tendrait à augmenter.

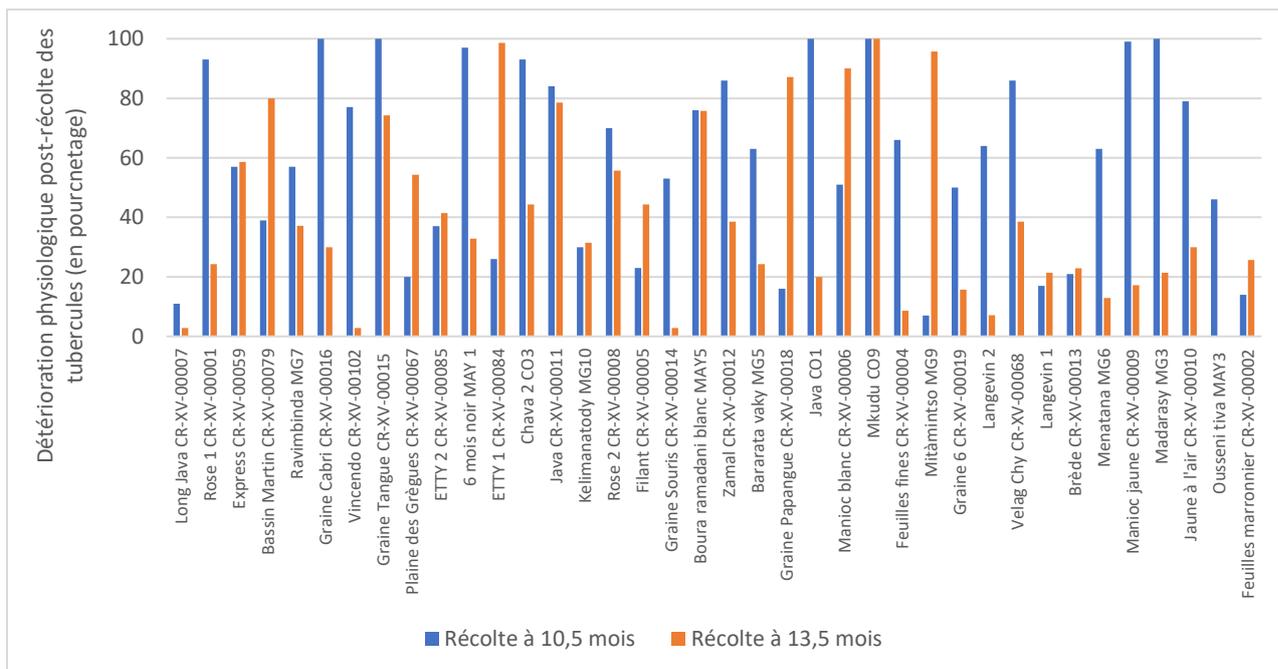


Figure 32 : pourcentage de détérioration physiologique post-récolte (PPD) des tubercules des différentes variétés à deux dates de récolte.

Pour chaque variété, une moyenne des pourcentages des deux récoltes a été calculée (figure 33) dans l'optique de catégoriser les variétés par rapport à la sensibilité à la détérioration physiologique post-récolte des tubercules.

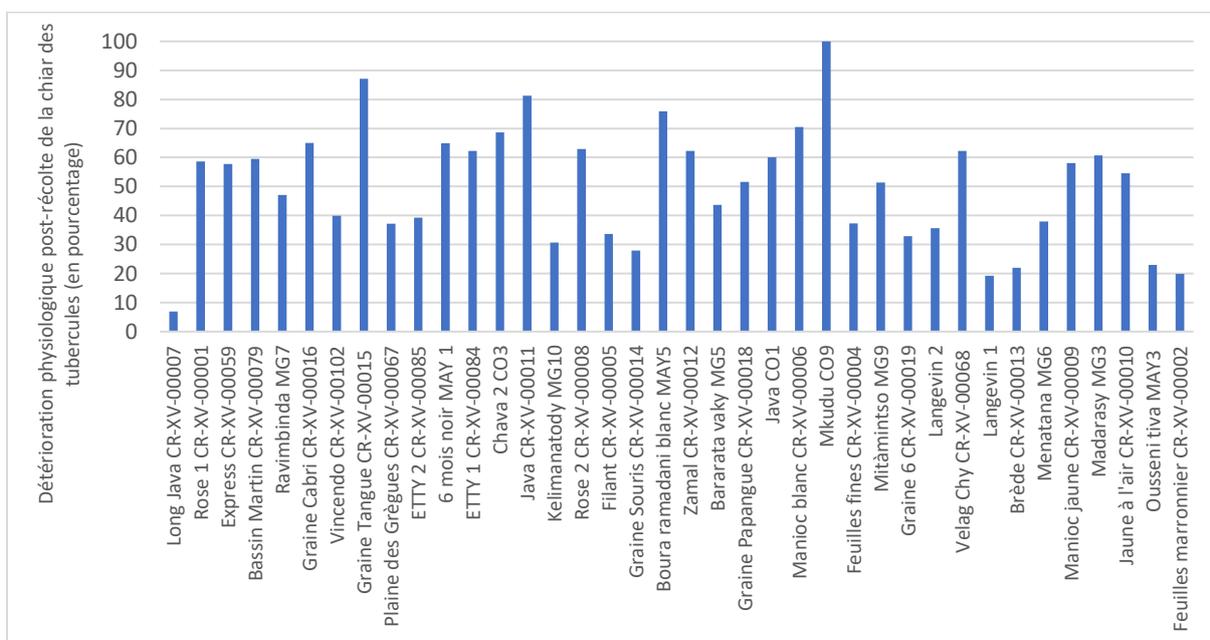


Figure 33 : pourcentage moyen de détérioration physiologique post-récolte (PPD) des tubercules des différentes variétés (moyenne des deux dates de récolte).

D'après Muyinza et *al.*, (2016) et Visalkshi et *al.*, (2023), une variété peut être classée hautement tolérante à la détérioration physiologique post-récolte (PPD) si le pourcentage de PPD est inférieur à 10, modérément tolérante à la PPD si le pourcentage de PPD est compris entre 11 et 40, modérément susceptible à la PPD si le pourcentage est compris entre 41 et 50, et susceptible à la PPD si le pourcentage de PPD est supérieur à 50.

La variété Long Java CR-XV-00007 peut être considérée comme hautement tolérante à la PPD. En effet, son pourcentage moyen de PPD est inférieur à 10 (figure 33).

Les variétés Vincenzo CR-XV-00102, Plaine des Grègues CR-XV-00067, ETTY 2 CR-XV-00085, Kelimanatody MG10, Filant CR-XV-00005, Graine Souris CR-XV-00014, Feuilles fines CR-XV-00004, Graine 6 CR-XV-00019, Langevin 2, Langevin 1, Brède CR-XV-00013, Menatana MG6, Oussenitiva MAY3 et Feuilles marronnier CR-XV-00002 ont un pourcentage de PPD compris entre 11 et 40 (figure 33), elles peuvent donc être classées comme modérément tolérantes à la PPD.

Les variétés Ravimbinda MG7 et Bararata vaky MG5 peuvent être classées comme modérément susceptibles à la PPD car leur pourcentage moyen de PPD est compris entre 41 et 50 (figure 33).

Les variétés Rose 1 CR-XV-00001, Express CR-XV-00059, Bassin Martin CR-XV-00079, Graine Cabri CR-XV-00016, Graine Tangué CR-XV-00015, 6 mois noir MAY 1, ETTY 1 CR-XV-00084, Chava 2 CO3, Java CR-XV-00011, Rose 2 CR-XV-00008, Boura ramadani blanc MAY5, Zamal CR-XV-00012, Graine Papangue CR-XV-00018, Java CO1, Manioc blanc CR-XV-00006, Mkudu CO9, Mitàmintso MG9, Velag Chy CR-XV-00068, Manioc jaune CR-XV-00009, Madarasy MG3 et Jaune à l'air CR-XV-00010 ont un pourcentage de PPD supérieur à 50, elles peuvent donc être classées comme susceptibles à la PPD.

4) Relation entre les variables

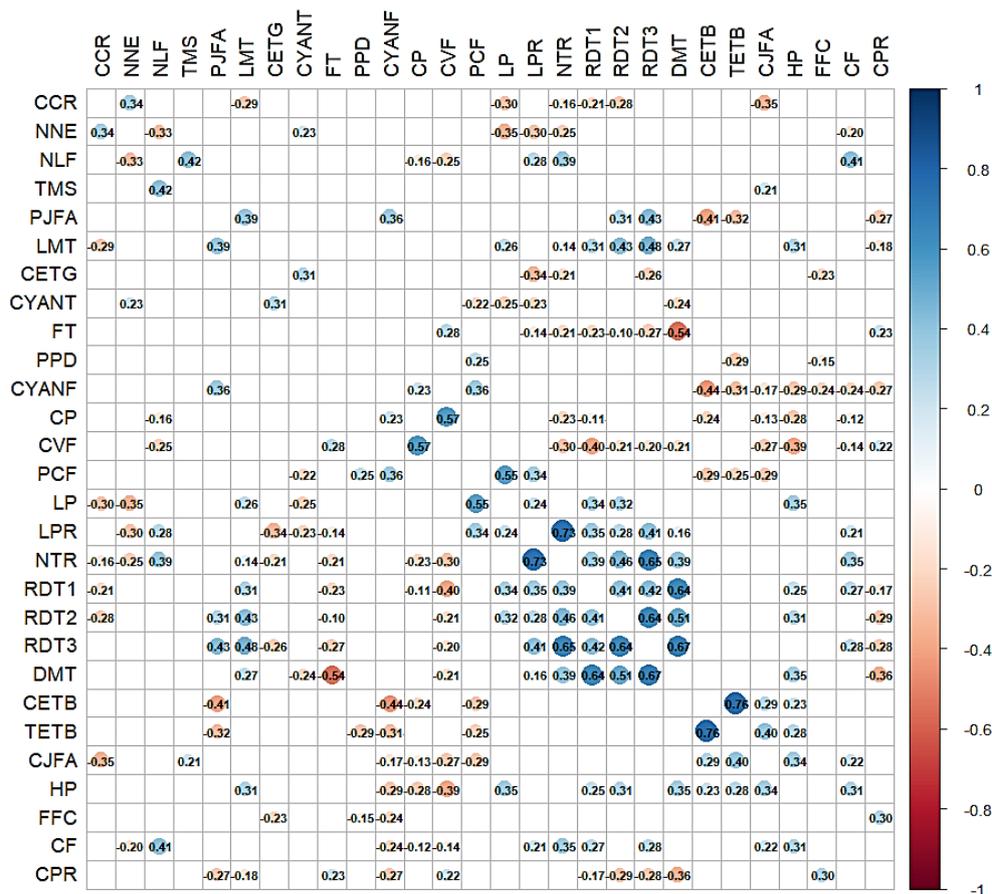


Figure 34 : cercle de corrélations des variables mesurées dans l'essai phénotypage.

Les significations des abréviations sont les suivantes, CCR : couleur du cortex racinaire, NNE : nombre de niveaux d'embranchement, NLF : nombre de lobes foliaires, TMS : teneur en matière sèche de la chair, PJFA : pubescence des jeunes feuilles apicales, LMT : longueur moyenne du tubercule, CETG : couleur externe de la tige, CYANT : cyanure du tubercule, FT : forme du tubercule, PPD : détérioration physiologique post-récolte, CYANF : cyanure de la feuille, CP : couleur du pétiole, CVF : couleur des veines foliaires, PCF : proéminence des cicatrices foliaires, LP : longueur du pétiole, LPR : longueur du pédoncule racinaire, NTR : nombre de tubercules récoltés, RDT1 : rendement de la récolte à la date 1, RDT2 : rendement de la récolte à la date 2, RDT3 : rendement de la récolte à la date 3, DMT : diamètre du tubercule, CETB : couleur externe du tubercule, TETB : texture externe du tubercule, CJFA : couleur des jeunes feuilles apicales, HP : hauteur de la plante, FFC : forme de la foliole centrale, CF : couleur de la feuille, CPR : couleur de la pulpe racinaire

Seules les corrélations significatives entre les variables sont affichées (p -value < 0,05), avec, à l'intérieur du cercle, la valeur du coefficient de corrélation de Pearson entre les deux variables considérées. Les aires des cercles indiquent la valeur absolue des coefficients de corrélation correspondants. L'intensité de la couleur des cercles est proportionnelle aux coefficients de corrélation.

Les variables CETB (couleur externe du tubercule) et TETB (texture externe du tubercule) sont corrélées positivement entre elles. Cette corrélation est très élevée, car le coefficient de corrélation de Pearson est supérieur à 0,7. Plus une variété a une couleur externe du tubercule foncée (brune), plus la texture externe du tubercule est rugueuse. À l'inverse, plus une variété est de couleur claire (blanche), plus la texture externe du tubercule est lisse (figure 34).

La variable NTR (nombre de tubercules récoltés) présente une corrélation positive très élevée avec la variable LPR (longueur du pédoncule racinaire). Les variétés à longueur du pédoncule mixte produisent le plus de tubercules. Les variétés sans pédoncule racinaire (sessiles) sont celles qui produisent le moins de tubercules. Les variables RDT3 (rendement à la date de récolte 3) et NTR sont corrélées positivement fortement entre elles. Plus une variété a un rendement élevé en récolte 3, plus elle produit un grand nombre de tubercules. Il existe également une corrélation positive et moyenne entre les variables NTR et RDT1 (rendement à la date de récolte 1) et entre les variables NTR et RDT2 (rendement à la date de récolte 2) (la corrélation est moyenne, car le coefficient de corrélation de Pearson est compris entre 0,3 et 0,5). La corrélation positive entre rendement et nombre de tubercules récoltés a aussi été trouvée par Fulgence et *al.*, (2024).

Les variables RDT1, RDT2 et RDT3 sont corrélées positivement à la variable DMT (diamètre moyen du tubercule) (figure 34). La corrélation est élevée, car le coefficient de corrélation de Pearson est supérieur à 0,5. Plus une variété a un rendement élevé aux trois dates de récolte, plus elle a tendance à produire des gros tubercules.

La corrélation entre les variables RDT2 et RDT3 est positive et élevée (figure 34). Plus une variété a un rendement élevé à la date de récolte 2, plus elle aura un rendement élevé à la date de récolte 3.

La corrélation entre les variables DMT (diamètre moyen du tubercule) et FT (forme du tubercule) est négative et élevée. Plus une variété a une forme conique, plus elle produit de

gros tubercules. À l'inverse, plus une variété a une forme irrégulière, plus elle produit de petits tubercules (figure 34).

Les variables CP (couleur du pétiole) et CVF (couleur des veines foliaires) ont une corrélation positive et élevée. Plus une variété a une couleur du pétiole rouge, plus la couleur des veines foliaires est rouge sur toute la longueur (figure 34).

Il existe une corrélation positive et élevée entre les variables PCF (proéminences des cicatrices foliaires) et LP (longueur du pétiole). Plus une variété a un pétiole long, plus elle a tendance à avoir des cicatrices foliaires proéminentes (figure 34).

Il existe une corrélation positive moyenne entre les variables PPD (détérioration physiologique post-récolte des tubercules) et FT (forme du tubercule) (figure 34). Les variétés à forme de tubercule irrégulière ont plus tendance à avoir une PPD élevée. Cela peut s'expliquer par le fait que la forme irrégulière des tubercules pourrait être plus sujette à la casse (aux blessures) des tubercules au moment de la récolte.

La variable HP (hauteur de la plante) présente une corrélation positive moyenne avec les variables LMT (longueur moyenne du tubercule), RDT2 (rendement à la date de récolte 2) et DMT (diamètre moyen du tubercule) (le coefficient de corrélation est compris entre 0,3 et 0,5) (figure 34). Plus une plante est grande, plus elle a tendance à produire des gros et des longs tubercules et à avoir un rendement élevé à la date de récolte 2. Cela pourrait s'expliquer par le fait que plus une plante est grande, plus théoriquement elle a un nombre élevé de feuilles et donc plus elle aura tendance à faire de la photosynthèse.

La variable CYANF (cyanure feuille) présente une corrélation négative moyenne avec les variables CETB (couleur externe du tubercule) et TETB (texture externe du tubercule) (figure 34). Les variétés à peau brune et à texture rugueuse tendraient à présenter des plus faibles valeurs de cyanure dans les feuilles que les variétés à peau blanche et à texture fine. De plus, les variables CYANF (cyanure feuille) et PJFA (pubescence des jeunes feuilles apicales) ont une corrélation positive moyenne. Les variétés à jeunes feuilles apicales pubescentes auraient tendance à produire plus de cyanure dans les feuilles (figure 34).

La variable CYANT (cyanure tubercule) présente une corrélation positive moyenne avec la variable CETG (couleur externe de la tige). Les variétés à tige plus « foncée » auraient tendance à produire plus de cyanure dans les tubercules que les variétés à tige plus « claire » (figure 35).

Il convient aussi de noter qu'il existe une corrélation négative faible entre les variables CYANT (cyanure du tubercule) et DMT (diamètre moyen du tubercule). Les variétés à petits tubercules

auraient tendance à présenter plus de cyanure dans les tubercules que les variétés à gros tubercules.

Il n'y a pas de corrélation entre les variables PPD (détérioration physiologique post-récolte des tubercules) et TMS (teneur en matière sèche de la chair) dans la présente évaluation. Cette absence de relation est en désaccord avec les études de Tumuhimbise et *al.*, (2015) et de Sánchez et *al.*, (2006) qui avaient trouvé une corrélation positive entre ces deux variables.

Les variables PPD et CPR (couleur de la pulpe racinaire) ne sont pas corrélées dans notre évaluation. Cette absence de relation est en désaccord avec l'hypothèse de Sánchez et *al.*, (2006) qui avaient suggéré que les variétés à chair interne colorée auraient tendance à avoir une plus faible PPD de par leur plus grande teneur en caroténoïdes (qui possèdent des propriétés antioxydantes).

5) Répartition des variétés en groupes homogènes

5-1) Distribution de l'inertie

Le diagramme des éboulis met en évidence un ralentissement dans la décroissance des valeurs propres après l'axe 4 (figure 36). De fait, il a été décidé de retenir les 4 premiers axes pour la description de l'analyse (critère du coude). Les 4 premiers axes expriment 68,5 % de l'inertie totale du jeu de données.

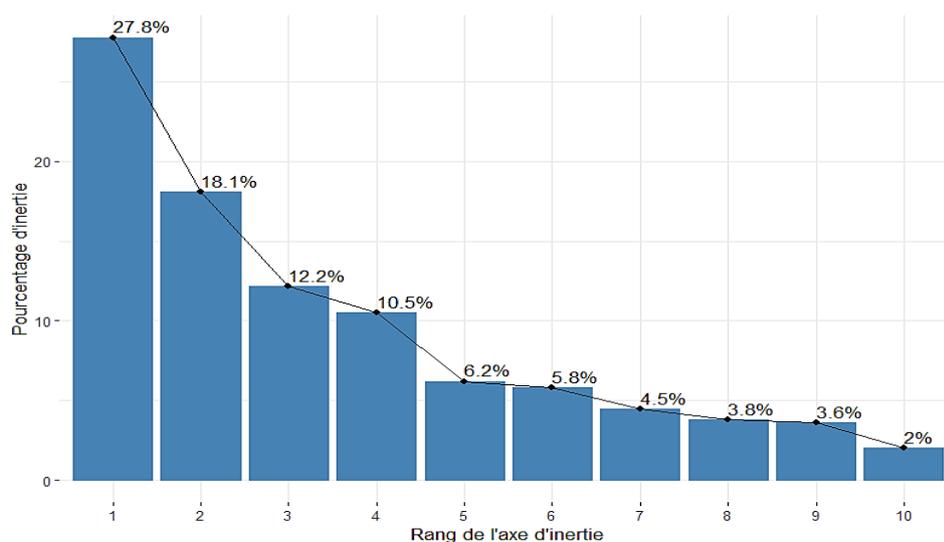


Figure 36 : diagramme des éboulis des valeurs propres (réalisé à l'aide de la fonction `fviz_eig` du package `FactoMineR`).

5-2) Description des plans factoriels

5-2-1) Description du plan factoriel 1 : 2

Les variables DMT (diamètre moyen du tubercule), RDT2 (rendement à la date de récolte 2), RDT1 (rendement à la date de récolte 1), RDT3 (rendement à la date de récolte 3), NTR (nombre de tubercules récoltés), LP (longueur du pétiole), HP (hauteur de la plante) et LPR (longueur du pédoncule racinaire) contribuent le plus à la formation de l'axe factoriel 1 (figures 37 et 39). Ce plan factoriel oppose des individus tels que MAY 1 6 mois noir, MG10 Kelimanatody, MG7 Ravimbinda, MG9 Mitàmintso et Rose 1 (à droite du graphe, caractérisés par une coordonnée fortement positive sur l'axe) à des individus comme Graine Souris, Graine Papangue, Rose 2, CO1 Java, ETTY 2, MAY 5 Boura ramadani blanc, ETTY 1 et Feuilles marronnier (à gauche du graphe, caractérisés par une coordonnée fortement négative sur l'axe) (figures 39 et 40). Le groupe auquel les individus MAY 1 6 mois noir, MG10 Kelimanatody, MG7 Ravimbinda, MG9 Mitàmintso et Rose 1 appartiennent (caractérisés par une coordonnée positive sur l'axe) partage de fortes valeurs pour les variables RDT1, RDT2, RDT3, LPR, DMT, LP, HP, NTR (figures 39 et 40). Le groupe auquel les individus Graine Souris, Graine Papangue et Rose 2 appartiennent (caractérisés par une coordonnée négative sur l'axe) partage de faibles valeurs pour les variables DMT, LPR, LP, HP, RDT1, RDT2 et RDT3 (figures 39 et 40).

Les variables CETB (couleur externe du tubercule), TETB (texture externe du tubercule), CYANF (cyanure feuille), PJFA (pubescence des jeunes feuilles apicales) et RDT3 (rendement à la date de récolte 3) contribuent le plus à la formation de l'axe factoriel 2 (figures 38 et 39). Ce plan factoriel oppose des individus tels que CO1 Java, ETTY 2, MAY 5 Boura ramadani blanc, ETTY 1 et Feuilles marronnier (en haut du graphe, caractérisés par une coordonnée fortement positive sur l'axe) à des individus comme Plaine des Grègues, Manioc Jaune, Express et Filant (en bas du graphe, caractérisés par une coordonnée fortement négative sur l'axe) (figures 39 et 40). Le groupe auquel appartiennent les individus CO1 Java, ETTY 2, MAY 5 Boura ramadani blanc, ETTY 1 et Feuilles marronnier (caractérisés par une coordonnée positive sur l'axe) partage de fortes valeurs pour les variables CETB et TETB et de faibles valeurs pour les variables RDT3 et PJFA (figures 39 et 40). Le groupe auquel appartiennent les individus Plaine des Grègues, Manioc Jaune, Express et Filant (caractérisés par une coordonnée négative sur

l'axe) partage de fortes valeurs pour les variables RDT3, CYANF et PJFA et de faibles valeurs pour les variables CETB et TETB (figures 39 et 40).

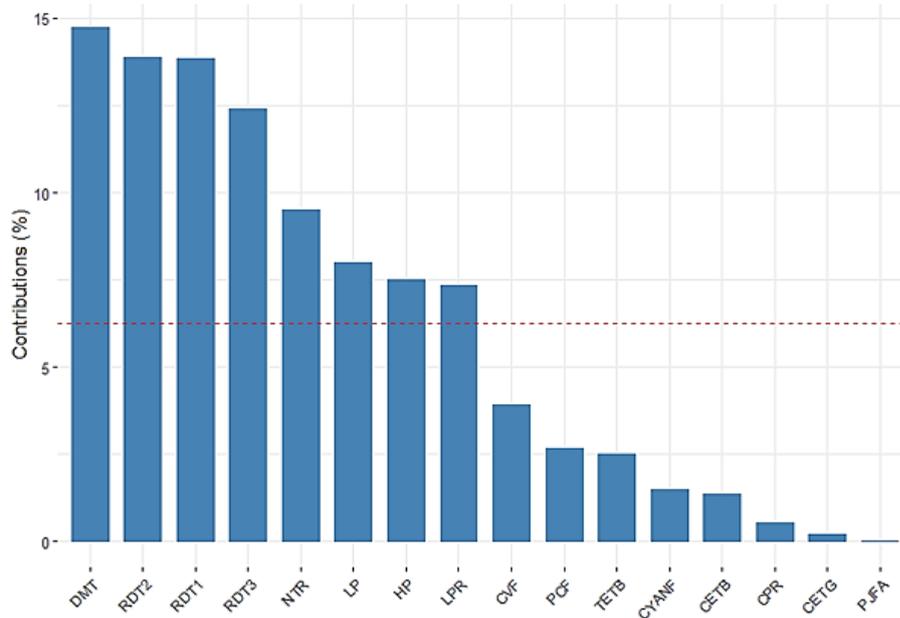


Figure 37 : contribution des variables à l'axe factoriel 1 (réalisée à l'aide de la fonction « fviz_contrib » du package Factoextra). La ligne pointillée rouge indique la contribution moyenne attendue. Les variables qui dépassent la ligne pointillée rouge contribuent le plus à la formation de l'axe factoriel 1.

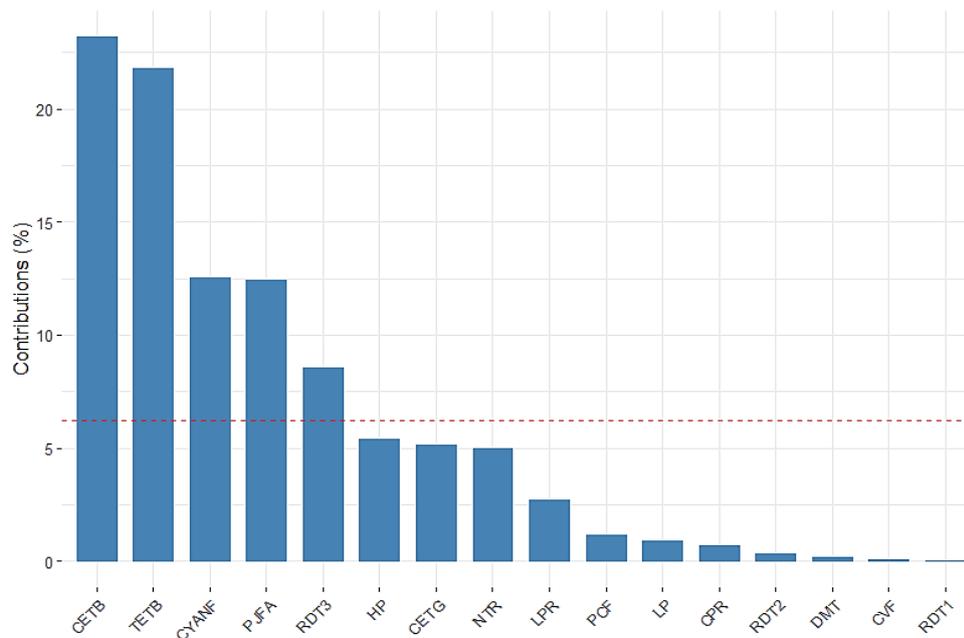


Figure 38 : contribution des variables à l'axe factoriel 2 (réalisée à l'aide de la fonction « fviz_contrib » du package Factoextra). Les variables qui dépassent la ligne pointillée rouge contribuent le plus à la formation de l'axe factoriel 2.

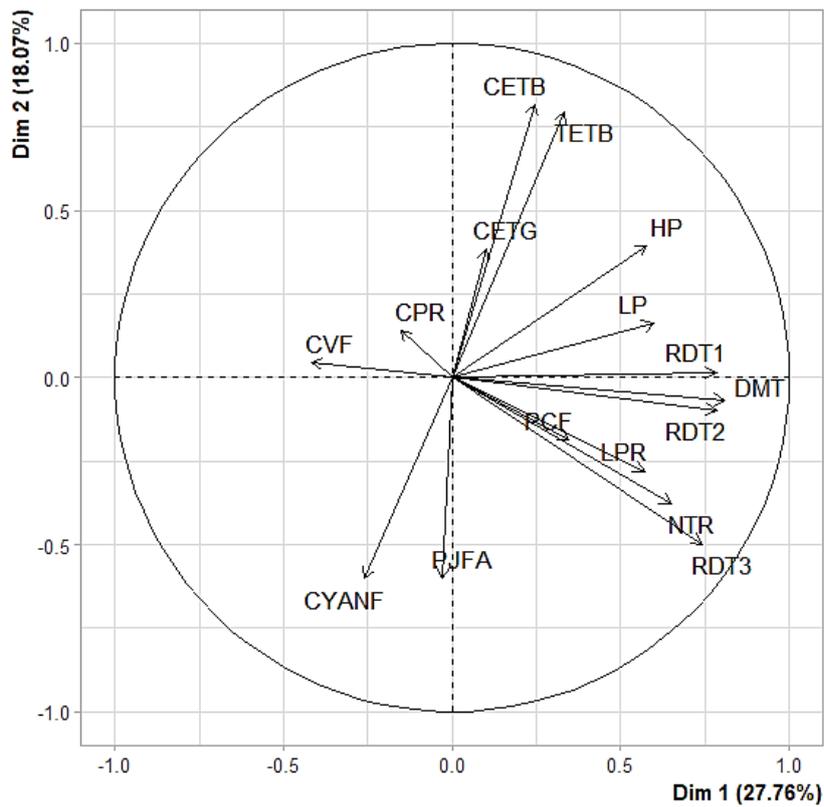


Figure 39 : graphe des variables du plan factoriel 1 : 2 de l'ACP (réalisé à l'aide de la fonction res.pca du package FactoMiner).

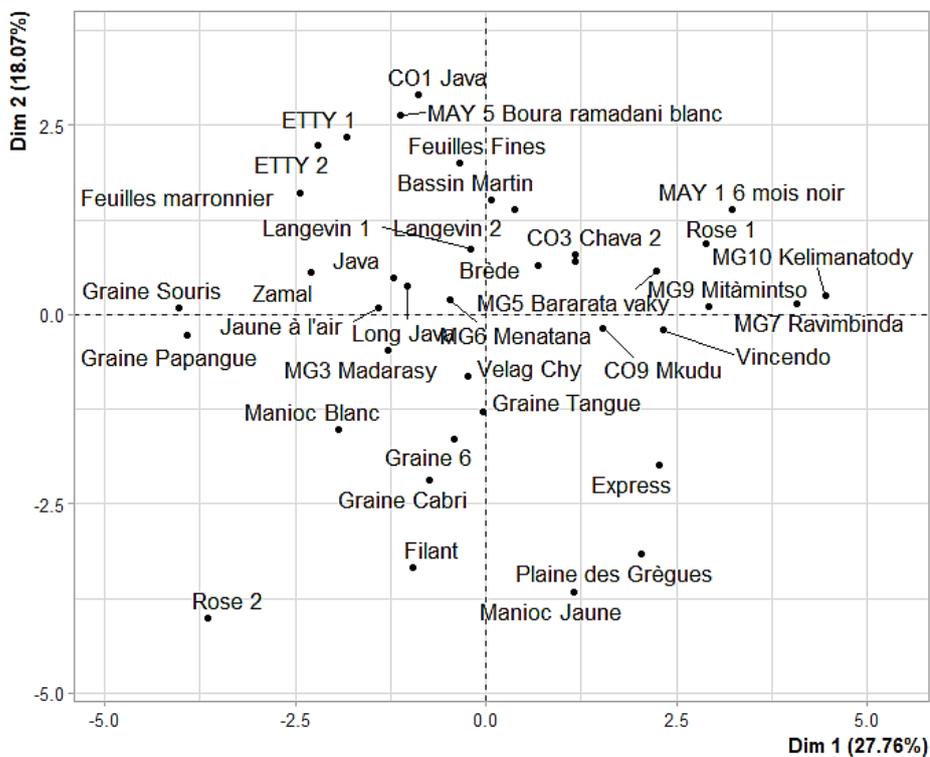


Figure 40 : graphe des individus du plan factoriel 1 : 2 de l'ACP (réalisé à l'aide de la fonction res.pca du package FactoMiner).

5-2-2) Description du plan factoriel 3 : 4

Les variables CPR (couleur de la pulpe racinaire), LPR (longueur du pédoncule racinaire), PJFA (pubescence des jeunes feuilles apicales), CETG (couleur externe de la tige) et CVF (couleur des veines foliaires) contribuent le plus à la formation de l'axe factoriel 3 (figures 41 et 43). Ce plan factoriel oppose des individus tels que Velag Chy, Jaune à l'air, Langevin 1, Langevin 2 et Graine Tangue (à droite du graphe, caractérisés par une coordonnée fortement positive sur l'axe) à des individus comme MAY 3 Ousseni Tiva, CO9 Mkudu, MG5 Bararata vaky, Graine Cabri, MG3 Madarasy, MG6 Menatana, Brède, ETTY 1 et MG7 Ravimbinda (à gauche du graphe, caractérisés par une coordonnée fortement négative sur l'axe) (figures 43 et 44). Le groupe auquel appartiennent les individus Velag Chy, Jaune à l'air, Langevin 1, Langevin 2 et Graine Tangue (caractérisés par une coordonnée positive sur l'axe) partage de fortes valeurs pour les variables CPR et LPR et de faibles valeurs pour les variables PJFA et CETG. Le groupe auquel appartiennent les individus CO9 Mkudu, Graine Cabri, Brède et ETTY 1 (caractérisés par une coordonnée négative sur l'axe) partage de fortes valeurs pour les variables CETG et CYANF et de faibles valeurs pour la variable PJFA. Le groupe auquel appartiennent les individus MAY 3 Ousseni Tiva, MG5 Bararata vaky, MG3 Madarasy, MG6 Menatana et MG7 Ravimbinda (caractérisés par une coordonnée négative sur l'axe) partage de faibles valeurs pour les variables PCF, CVF et LP et de faibles valeurs pour la variable LPR.

Les variables qui contribuent le plus à l'axe factoriel 4 sont : PCF (proéminence des cicatrices foliaires), LP (longueur du pétiole), CETG (couleur externe de la tige), CVF (couleur des veines foliaires) et CYANF (cyanure feuille). Ce plan factoriel oppose des individus tels que CO9 Mkudu, Graine Cabri, Brède et ETTY 1 (en haut du graphe, caractérisés par une coordonnée fortement positive sur l'axe) à des individus comme MAY 3 Ousseni Tiva, MG5 Bararata vaky, MG3 Madarasy, MG6 Menatana et MG7 Ravimbinda (en bas du graphe, caractérisés par une coordonnée fortement négative sur l'axe). Le groupe auquel appartiennent les individus CO9 Mkudu, Graine Cabri, Brède et ETTY 1 (caractérisés par une coordonnée positive sur l'axe) partage de fortes valeurs pour les variables CETG, CYANF, LP et PCF. Le groupe auquel appartiennent les individus MAY 3 Ousseni Tiva, MG5 Bararata vaky, MG3 Madarasy, MG6 Menatana et MG7 Ravimbinda (caractérisés par une coordonnée négative sur l'axe) partage de faibles valeurs pour les variables PCF, CVF et LP.

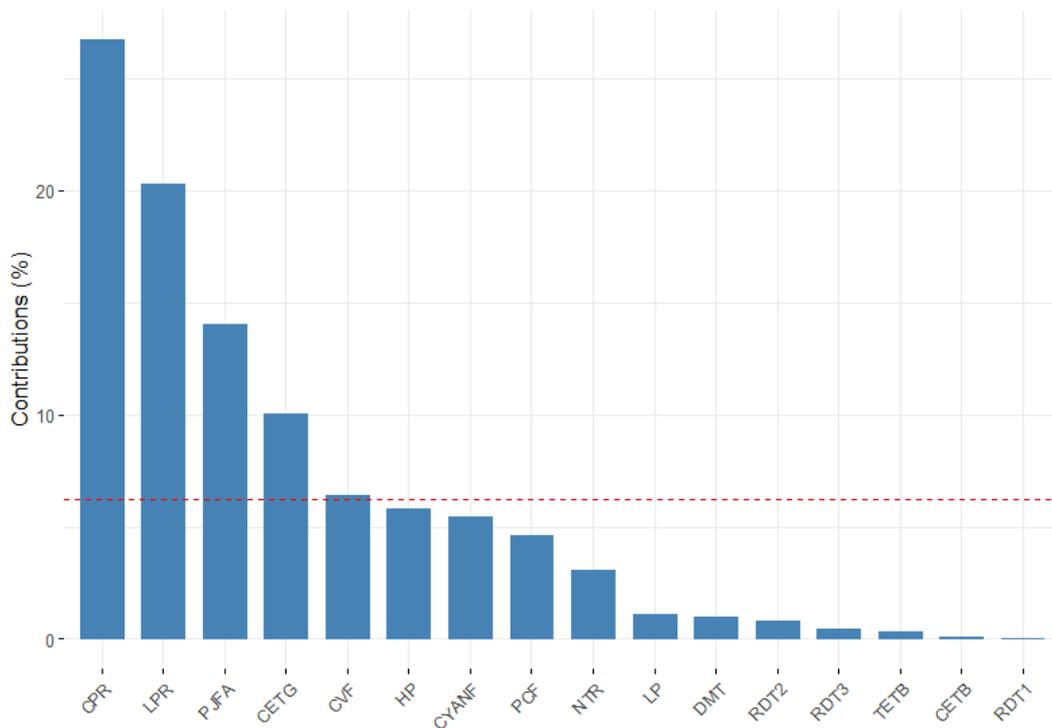


Figure 41 : contribution des variables à l'axe factoriel 3 (réalisée à l'aide de la fonction « fviz_contrib » du package Factoextra). Les variables qui dépassent la ligne pointillée rouge contribuent le plus à la formation de l'axe factoriel 3.

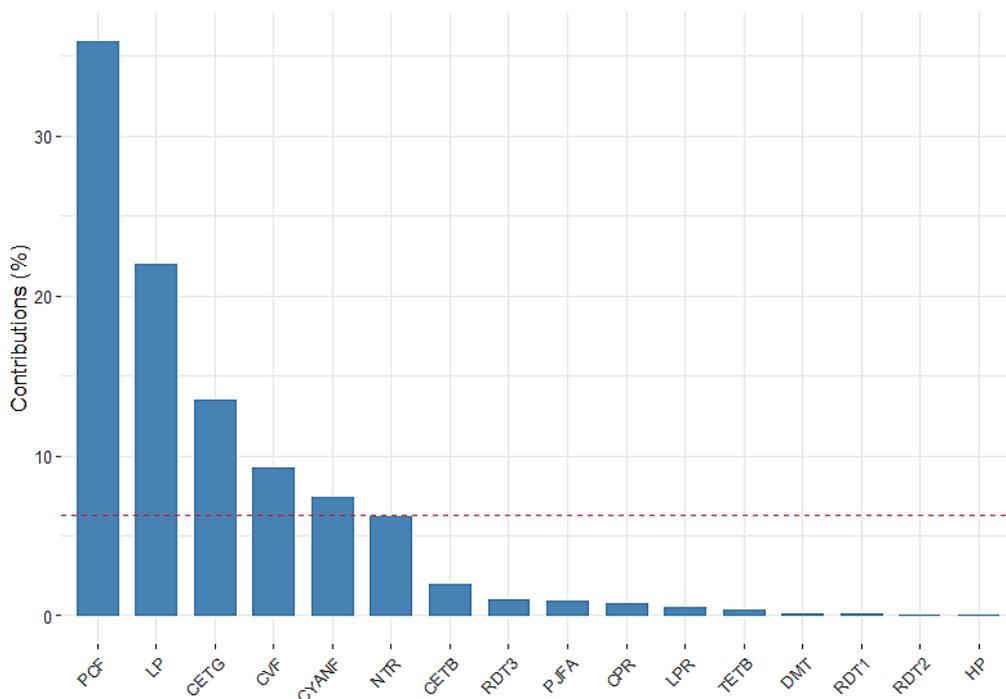


Figure 42 : contribution des variables à l'axe factoriel 4 (réalisée à l'aide de la fonction « fviz_contrib » du package Factoextra). Les variables qui dépassent la ligne pointillée rouge contribuent le plus à la formation de l'axe factoriel 4.

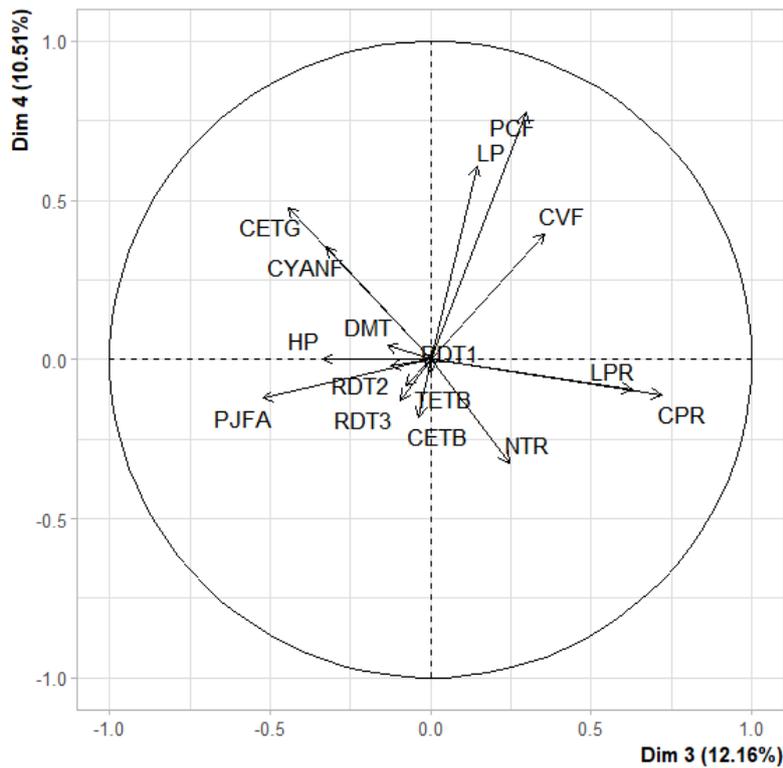


Figure 43 : graphe des variables du plan factoriel 3 : 4 de l'ACP (réalisé à l'aide de la fonction res.pca du package FactoMinerR).

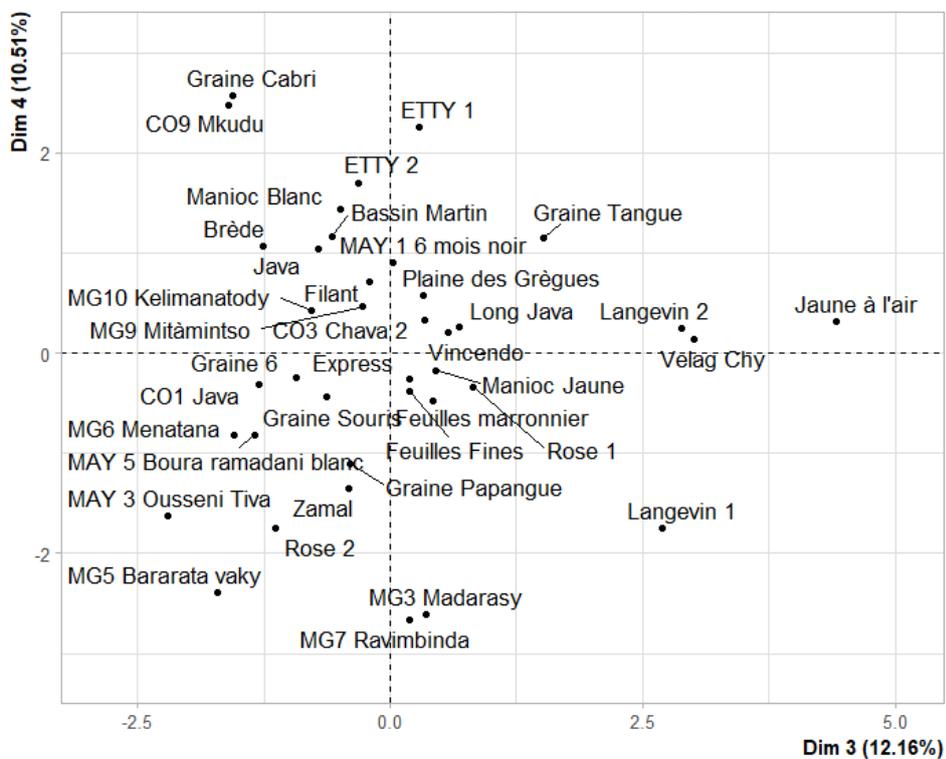


Figure 44 : graphe des individus du plan factoriel 3 : 4 de l'ACP (réalisé à l'aide de la fonction res.pca du package FactoMinerR).

5-3-3) Classification ascendante hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique, réalisée à partir des moyennes des variables sur la base de la distance euclidienne, sépare les variétés en 5 groupes. La description des groupes est en lien avec la caractérisation des plans factoriels 1 : 2 et 3 : 4 réalisée précédemment.

Le groupe 1 est composé des variétés Velag Chy CR-XV-00068, Jaune à l'air CR-XV-00010, Langevin 2 et Langevin 1 (figure 45). Ces variétés sont caractérisées par de fortes valeurs de CPR (couleur de la pulpe racinaire) et de LPR (longueur du pédoncule racinaire), de faibles valeurs de PJFA (pubescence des jeunes feuilles apicales) et de CETG (couleur externe de la tige) et des valeurs moyennes de RDT1 (rendement à la date de récolte 1), RDT2 (rendement à la date de récolte 2) et RDT3 (rendement à la date de récolte 3) (tableau 45). Ce sont des variétés moyennement productives à chair colorée (couleur crème à jaune), à longueur du pédoncule mixte, à jeunes feuilles apicales non pubescentes, et à couleur de la tige jaune-vert (tableau 3).

Le groupe 2 est composé des variétés Rose 2 CR-XV-00008, MG3 Madarasy, Graine Souris CR-XV-00014 et Graine Papangue CR-XV-00018 (figure 45). Ces variétés sont caractérisées par de fortes valeurs de PJFA (pubescence des jeunes feuilles apicales) et de CYANF (cyanure de la feuille) et de faibles valeurs de RDT1 (rendement à la date de récolte 1), RDT2 (rendement à la date de récolte 2), RDT3 (rendement à la date de récolte 3), LP (longueur du pétiole), DMT (diamètre moyen du tubercule), HP (hauteur de la plante) et PCF (proéminence des cicatrices foliaires). Ce sont des variétés à faible productivité et à petits tubercules, de petite taille, à jeunes feuilles apicales pubescentes, à chair de couleur blanche, à teneur en cyanure dans les feuilles élevée (élevée en comparaison de trois des autres groupes de variétés l'étude mais faible par rapport à la littérature), à longueur du pétiole courte et à cicatrices semi-proéminentes sur la tige (tableau 3).

Le groupe 3 est composé des variétés Long Java CR-XV-00007, Bassin Martin CR-XV-00079, Feuilles marronnier CR-XV-00002, ETTY 2 CR-XV-00085, ETTY 1 CR-XV-00084, Java CR-XV-00011, MAY5 Boura ramadani blanc, CO1 Java, Zamal CR-XV-00012 et Feuilles Fines CR-XV-00004 (figure 45). Ces variétés sont caractérisées par de fortes valeurs pour les variables TETB (texture externe du tubercule), CETG (couleur externe de la tige) et CETB (couleur externe du

tubercule), et par de faibles valeurs pour les variables LPR (longueur du pédoncule racinaire), RDT1 (rendement à la date de récolte 1), RDT3 (rendement à la date de récolte 3), NTR (nombre de tubercules récoltés) et PJFA (pubescence des jeunes feuilles apicales) (tableau 45). Ce sont des variétés à faible productivité et à petits tubercules. La couleur externe du tubercule est brun clair à brun foncé, la texture est rugueuse, la couleur externe de la tige est argentée à grise, et les jeunes feuilles apicales sont non pubescentes (tableau 45).

Le groupe 4 est composé des variétés MG5 Bararata vaky, May 3 Ousseni Tiva, MG10 Kelimanatody, MG9 Mitàminsto, CO3 Chava 2, MG7 Ravimbinda, Rose 1 CR-XV-00001, Vincenzo CR-XV-00102 et MAY 1 6 mois noir (figure 45). Ces variétés sont caractérisées par de fortes valeurs pour les variables RDT1 (rendement à la date de récolte 1), RDT2 (rendement à la date de récolte 2), RDT3 (rendement à la date de récolte 3), DMT (diamètre moyen du tubercule), HP (hauteur de la plante), NTR (nombre de tubercules récoltés), LPR (longueur du pédoncule racinaire), TETB (texture externe du tubercule) et CETB (couleur externe du tubercule), et par de faibles valeurs pour la variable CVF (couleur des veines foliaires). Ce sont des variétés à forte productivité à toutes les dates de récolte. Elles peuvent être considérées comme précoces, car elles ont une bonne productivité dès la première date de récolte. Elles produisent de nombreux tubercules qui ont un gros diamètre. La texture des tubercules est rugueuse, la couleur externe brun clair à brun foncé, la chair est blanche, et le pédoncule est de longueur mixte. Les veines foliaires sont de couleur verte.

Le groupe 5 est composé des variétés Express CR-XV-00059, Plaine des Grègues CR-XV-00067, Manioc Jaune CR-XV-00009, Graine Tangué CR-XV-00015, Filant CR-XV-00005, Graine 6 CR-XV-00019, Graine Cabri CR-XV-00016, Manioc Blanc CR-XV-00006, CO9 Mkudu, Brède CR-XV-00013 et MG6 Menatana (figure 45). Ces variétés sont caractérisées par de fortes valeurs pour les variables CYANF (cyanure feuille), PJFA (pubescence des jeunes feuilles apicales) et RDT3 (rendement à la date de récolte 3) et de faibles valeurs pour les variables TETB (texture externe du tubercule) et CETB (couleur externe du tubercule). Ce sont des variétés productives, plutôt non précoces, car l'optimum de production est en date de récolte 3. Les jeunes feuilles apicales sont pubescentes et la teneur en cyanure des feuilles est élevée (en comparaison des autres groupes de variétés de l'étude mais faible par rapport à la littérature).

La couleur externe du tubercule est claire (blanche à jaune) et la texture est lisse à intermédiaire (tableau 3).

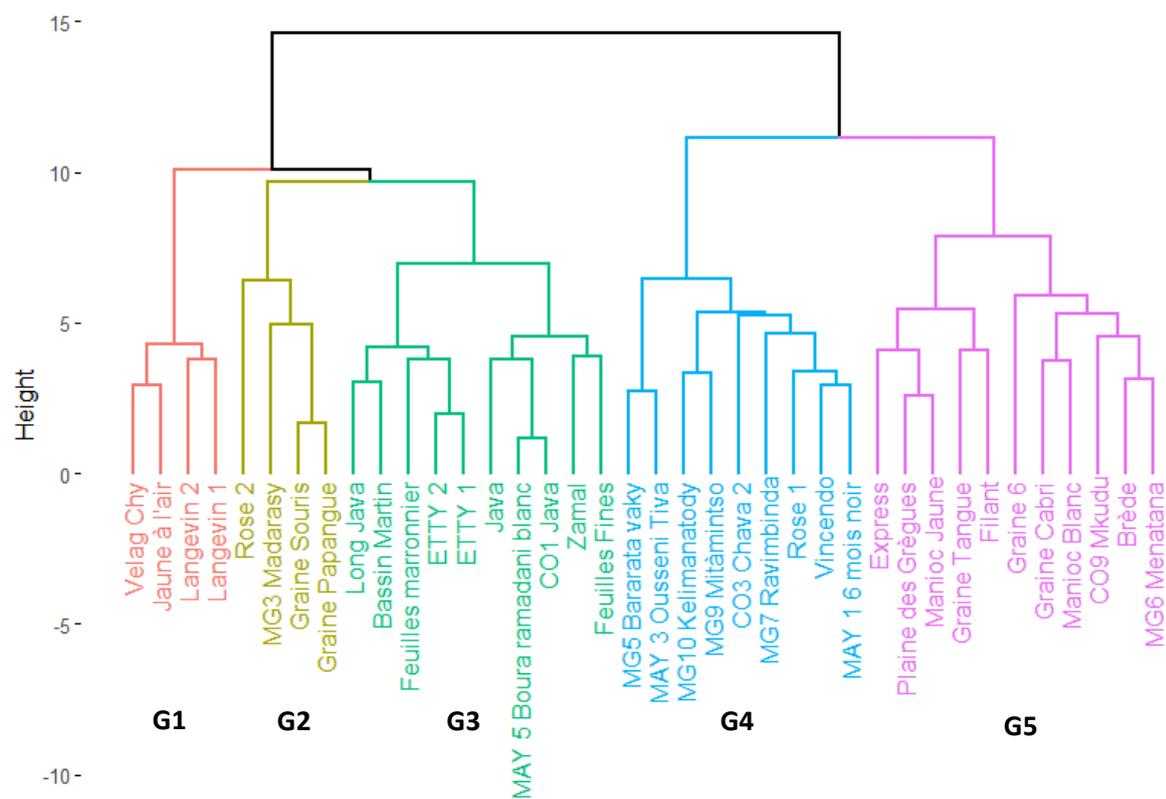


Figure 45 : diagramme de clustering (dendrogramme) construit à partir de la méthode de Ward illustrant la relation entre les variétés de manioc évaluées (réalisé à partir de la méthode « ward.D2 » de la fonction hclust, package stats). Avec G1 = groupe 1, G2 = groupe 2, G3 = groupe 3, G4 = groupe 4, G5 = groupe 5.

Tableau 3 : caractéristiques des 5 groupes issus de la classification ascendante hiérarchique.

Variables	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
PJFA	0,0	1,0	0,1	0,4	0,9
CVF	5,0	4,0	4,6	3,0	4,3
CETG	4,0	4,3	7,3	6,4	5,9
LPR	5,0	3,5	3,0	4,6	3,9
CETB	3,0	2,5	3,6	3,8	2,0
TETB	6,0	4,5	6,4	6,8	4,6
CPR	2,3	1,0	1,2	1,0	1,0

PCF	4,5	3,0	4,0	4,3	4,6
HP	130,4	113,7	151,8	175,2	144,7
RDT1	1,7	0,5	1,0	3,3	2,1
RDT2	3,6	2,0	3,1	6,6	4,8
RDT3	3,5	2,0	2,4	7,4	6,2
NTR	10,1	7,2	6,1	11,2	8,7
LP	30,8	20,0	26,3	30,9	30,8
CYANF	10,0	39,5	19,3	12,3	44,9
DMT	40,9	33,2	43,0	51,2	48,0

Avec PJFA : pubescence des jeunes feuilles apicales, CVF = couleur des veines foliaires, CETG = couleur externe de la tige, LPR = longueur du pédoncule racinaire, CETB = couleur externe du tubercule, TETB = texture externe du tubercule, CPR = couleur de la pulpe racinaire, PCF = proéminence des cicatrices foliaires, HP = hauteur de la plante (en cm), RDT1 = rendement à la date de récolte 1 (en kg), RDT2 = rendement à la date de récolte 2 (en kg), RDT3 = rendement à la date de récolte 3 (en kg), NTR = nombre de tubercules récoltés, LP = longueur du pétiole (en cm), CYANF = cyanure de la feuille (en mg d'HCN/kg), DMT = diamètre moyen du tubercule (en cm)

5-3-4) Identification de potentiels doublons

Les descriptions agro-morphologiques permettent d'émettre l'hypothèse qu'il existe de potentiels doublons parmi les variétés évaluées dans l'essai.

Les variétés Langevin 1 et Langevin 2 pourraient être des doublons ; en effet, elles partagent de nombreuses caractéristiques morphologiques communes : jeunes feuilles apicales de couleur vert-foncé et non pubescentes, folioles centrales de forme lancéolée, couleur du pétiole rouge, couleur de la feuille vert-foncé, couleur externe de la tige jaune-vert, couleur externe des tubercules brun foncé, texture externe des tubercules rugueuse, couleur de la pulpe racinaire crème, couleur du cortex racinaire jaune, 7 lobes foliaires, couleur des lobes vert-rouge sur moins de la moitié du lobe, mode de croissance de la tige Zig-zag, plante à un seul niveau d'embranchement, port de la plante compact, mode de ramification trichotomique. Aussi, la productivité, la hauteur de la plante, la teneur en matière sèche de la

chair, la teneur en cyanure des tubercules et des feuilles sont très semblables entre les 2 variétés. Une analyse génétique pourrait être réalisée pour voir s'il s'agit de doublons ou de variétés distinctes.

Les variétés ETTY 1 CR-XV-00084 et ETTY 2 CR-XV-00085 pourraient être des doublons ; en effet, elles présentent plusieurs caractéristiques agro-morphologiques similaires : jeunes feuilles apicales non pubescentes et de couleur vert-foncé, forme de la foliole centrale lancéolée, couleur du pétiole rouge, couleur de la feuille vert-clair, couleur externe de la tige grise, couleur externe du tubercule brun foncé, texture externe de la tige rugueuse, couleur de la pulpe racinaire blanche et couleur du cortex racinaire rose. Aussi, la hauteur de la plante et la productivité des deux variétés sont proches. Une analyse génétique pourrait être réalisée pour confirmer ou pour infirmer l'hypothèse de doublons entre les deux variétés.

Les variétés Feuilles Fines CR-XV-00004 et Zamal CR-XV-00012 pourraient être des doublons ; en effet, elles partagent de nombreuses caractéristiques morphologiques communes, en particulier la forme de la foliole centrale qui est linéaire. Elles ont également, toutes deux, des jeunes feuilles apicales violettes non pubescentes, des pétioles de couleur rouge, des feuilles de couleur vert-foncé, une couleur externe des tubercules brun-clair, une couleur de la chair crème, une couleur du cortex racinaire rose, 7 lobes foliaires, un port de la plante de type parapluie et un mode de ramification trichotomique. Une analyse génétique pourrait être réalisée pour voir si ces deux variétés sont des doublons.

Les variétés C01 Java et MAY 5 Boura ramadani blanc pourraient être des doublons ; en effet, elles partagent plusieurs caractères morphologiques communs : des jeunes feuilles apicales violettes non pubescentes, un pétiole de couleur vert-jaune, des feuilles de couleur vert-foncé, une couleur externe du tubercule brun-foncé, une couleur de la chair blanche, une couleur du cortex racinaire jaune, 7 lobes foliaires, une couleur externe de la tige grise et un mode de ramification trichotomique. Les deux variétés présentent également des productivités proches aux trois dates de récolte. Par ailleurs, la proximité de ces deux variétés est illustrée dans le dendrogramme (figure 45). Une analyse génétique pourrait être réalisée pour déterminer s'il s'agit de doublons ou de variétés distinctes.

Les variétés Rose 1 CR-XV-00001 et Vincenzo CR-XV-00102 pourraient être des doublons ; en effet, elles ont en commun de nombreuses caractéristiques morphologiques : des jeunes feuilles apicales violettes non pubescentes, un pétiole de couleur rouge, des feuilles de couleur vert-clair, une couleur externe du tubercule brun clair à brun foncé, une texture externe du tubercule rugueuse, une couleur de la pulpe racinaire blanche, une couleur du cortex racinaire rose, 5 lobes foliaires, une couleur externe de la tige dorée, des cicatrices proéminentes, une couleur des veines foliaires verte, 3 niveaux d'embranchement, un port de la plante compact et un mode de ramification trichotomique. Une analyse génétique pourrait être réalisée sur ces deux variétés pour confirmer ou pour infirmer l'hypothèse de doublons.

5-3-5) Identification de potentielles nouvelles variétés

Les variétés prospectées sur l'île de La Réunion, Langevin 1 et Langevin 2, ont été comparées à celles conservées dans la collection du CRB Vatel. Ces deux variétés ont la particularité d'avoir la chair interne du tubercule de couleur colorée (crème à jaune). Dans la collection du CRB Vatel, il existe 4 variétés à chair interne colorée : Jaune à l'air CR-XV-00010, Velag Chy CR-XV-00068, Zamal CR-XV-00012 et Feuilles Fines CR-XV-00004. Les variétés Langevin 1 et Langevin 2 diffèrent des variétés Velag Chy CR-XV-00068 et Jaune à l'air CR-XV-00010 par la couleur externe du tubercule (couleur brun foncé pour Langevin 1 et Langevin 2, couleur jaune pour Velag Chy CR-XV-00068 et Jaune à l'air CR-XV-00010). Les variétés Langevin 1 et Langevin 2 se démarquent des variétés Zamal CR-XV-00012 et Feuilles Fines CR-XV-00004 par la forme de la foliole centrale (lancéolée à obovale lancéolée pour Langevin 1 et Langevin 2, linéaire pour Zamal CR-XV-00012 et Feuilles Fines CR-XV-00004).

Les variétés Langevin 1 et Langevin 2 sont donc bien distinctes au niveau phénotypique des variétés conservées dans le CRB Vatel. Il serait intéressant de pouvoir les intégrer dans le CRB Vatel ou le cas échéant, d'en intégrer l'une des deux s'il est avéré par l'analyse génétique que Langevin 1 et Langevin 2 sont des doublons.

5-3-6) Les variétés intéressantes pour les agriculteurs

Les variétés intéressantes pour les agriculteurs sont celles des groupes 4 et 5 du dendrogramme de la figure 45.

Les variétés du groupe 4 (MG5 Bararata vaky, May 3 Ousseni Tiva, MG10 Kelimanatody, MG9 Mitàminsto, CO3 chava 2, MG7 Ravimbinda, Rose 1 CR-XV-00001, Vincenzo CR-XV-00102 et

MAY 1 6 mois noir) peuvent être bénéfiques pour les agriculteurs qui recherchent des variétés productives et précoces et dont les tubercules sont de couleur brun clair à brun foncé et de texture rugueuse. Parmi ces variétés, la variété MG10 Kelimanatody apparaît particulièrement intéressante de par son très grand potentiel de production (figure 18), de par sa tolérance modérée à la détérioration physiologique post-récolte des tubercules (figures 32 et 33) et de par sa faible teneur en cyanure dans les tubercules et dans les feuilles (figures 21 et 27). Dans la même optique, la variété MG7 Ravimbinda présente un fort potentiel de production (figure 18), une susceptibilité modérée à la PPD (figures 32 et 33) et une faible teneur en cyanure dans ses tubercules et dans ses feuilles (figures 21 et 27). Les variétés Vincenzo CR-XV-00102 et Rose 1 CR-XV-00001 sont aussi intéressantes, car elles ont un bon potentiel de production, elles produisent des tubercules de forme et de taille homogènes, leurs tubercules et leurs feuilles ont une faible teneur en cyanure (figures 21 et 27) et elles sont adaptées aux conditions écologiques de La Réunion.

Les variétés du groupe 5 (Express CR-XV-00059, Plaine des Grègues CR-XV-00067, Manioc Jaune CR-XV-00009, Graine Tangué CR-XV-00015, Filant CR-XV-00015, Graine 6 CR-XV-00019, Graine Cabri CR-XV-00016, Manioc Blanc CR-XV-00006, CO9 Mkudu, Brède CR-XV-00013 et MG6 Menatana) peuvent être bénéfiques pour les agriculteurs qui recherchent des variétés productives et dont les tubercules sont de couleur blanc à jaune et de texture lisse à intermédiaire. Parmi ces variétés, la variété Express CR-XV-00059 apparaît intéressante car elle a une productivité déjà élevée 7,5 mois après la plantation (figure 18) et les tubercules produits sont de forme et de taille homogènes. La variété Manioc Jaune CR-XV-00009 apparaît elle aussi intéressante, notamment de par sa forte productivité à 10,5 mois et à 13,5 mois après la plantation (figure 18).

Les variétés du groupe 1 (Langevin 1, Langevin 2, Jaune à l'air CR-XV-00010, Velag Chy CR-XV-00068) et les variétés Zamal CR-XV-00012 et Feuilles Fines CR-XV-00004 peuvent aussi être proposées aux agriculteurs. La productivité de ces variétés est moyenne mais leur chair colorée peut être valorisée auprès de consommateurs et/ou de restaurateurs qui souhaitent se démarquer dans leur préparation culinaire. Aussi, elles pourraient intéresser certains transformateurs qui souhaiteraient, par exemple, fabriquer de la farine, des cossettes ou des granulés de manioc de couleur jaune.

IV) Conclusion et perspectives

Cet essai d'évaluation variétale avait pour objectif de décrire 38 variétés de manioc provenant de différents territoires de l'océan Indien, de La Réunion principalement (CRB Vatel et prospection) mais aussi de Madagascar, des Comores et de Mayotte afin d'identifier des groupes homogènes et d'éventuels doublons et de proposer des variétés intéressantes pour les agriculteurs. De plus, une évaluation de la teneur en cyanure des tubercules et des feuilles a été réalisée pour savoir si les maniocs évalués sont doux. La détérioration physiologique post-récolte des tubercules a également été mesurée pour refléter l'aptitude à la conservation des variétés.

L'étude a mis en évidence 5 groupes de variétés homogènes au profil agro-morphologique variable. Les variétés du CRB Vatel sont présentes dans chacun des 5 groupes ce qui témoigne de la diversité phénotypique conservée. Parmi les 5 groupes, 2 groupes sont constitués de variétés productives et 3 groupes de variétés faiblement à moyennement productives. Les variétés des 2 groupes productifs peuvent être proposées aux agriculteurs. Les variétés à chair colorée présentes dans deux des trois autres groupes pourraient aussi intéresser des agriculteurs. Elles sont de productivité moyenne, mais elles peuvent être valorisées après de consommateurs, de restaurateurs ou de transformateurs qui chercheraient à se démarquer du manioc à chair blanche pour la préparation de plats ou pour la commercialisation de produits transformés.

Sur les 38 variétés évaluées, 5 potentiels doublons de variétés (composés de deux variétés par doublon) ont été identifiés. Une analyse génétique doit être réalisée pour confirmer ou pour infirmer l'hypothèse de doublons entre les variétés.

Les variétés Langevin 1 et Langevin 2 sont distinctes des variétés conservées dans le CRB Vatel. Ces deux variétés, ou l'une de ces deux variétés, le cas échéant, s'il s'agit de doublons, pourraient être intégrées dans la collection du CRB Vatel dans l'optique de maintenir un maximum de diversité phénotypique et génétique.

La grande majorité des variétés évaluées se sont avérées être des variétés dites douces que ce soit pour les tubercules ou pour les feuilles. Pour certaines variétés le caractère non doux pourrait provenir du stress physiologique généré par le cyclone BELAL et par la tempête

tropicale CANDICE qui ont touché la parcelle d'expérimentation en janvier 2024. Une nouvelle évaluation de la teneur en cyanure des tubercules et/ou des feuilles pourrait être réalisée sur ces variétés. Pour les tubercules, il conviendrait d'effectuer l'échantillonnage sur au moins deux tubercules par plante et ce idéalement, sur différentes plantes de la même variété pour réduire la variabilité intra-variétale. Pour les feuilles, l'échantillonnage devra concerner strictement la partie centrale de la feuille pour limiter la variabilité de cyanure intra-feuille. L'acquisition d'une variété de manioc amer serait par ailleurs judicieuse pour avoir un témoin de référence.

Les résultats de lecture au papier picrate et de lecture au spectrophotomètre ont été bien corrélés dans la détermination de la teneur en cyanure des tubercules et des feuilles. La méthode semi-quantitative au papier picrate peut ainsi être proposée aux territoires ne disposant pas de spectrophotomètre. D'autant qu'elle est facile à mettre en œuvre, rapide d'utilisation et ne nécessite pas de matériel coûteux.

Au niveau de la détérioration physiologique post-récolte (PPD) des tubercules, l'étude a mis en évidence une variabilité génétique. Une variété a été classée comme hautement tolérante à la PPD, 14 variétés comme modérément tolérantes à la PPD, 2 variétés comme modérément sensibles à la PPD et 21 variétés comme sensibles à la PPD. Pour cette mesure, il apparaît nécessaire d'utiliser au moins 5 tubercules par variété et par date d'échantillonnage pour réduire la forte variabilité intra-variétale. Aussi, la manipulation des tubercules après la récolte doit être précautionneuse pour limiter les blessures et donc les risques d'augmentation non-intentionnelles de la PPD.

Il serait intéressant de poursuivre le présent travail d'évaluation variétale par la mise en place d'essais multi-locaux en conditions contrastées, notamment d'altitude, pour identifier les variétés les mieux adaptées aux différentes conditions écologiques de La Réunion. En corollaire, il serait souhaitable de tester des variétés chez des agriculteurs pour en faciliter l'adoption ultérieure et pour voir l'impact éventuel de l'itinéraire technique sur les performances. Enfin, une évaluation de la qualité visuelle et de la qualité gustative des variétés compléterait le travail de caractérisation de terrain et donnerait une idée de la potentielle acceptabilité des variétés auprès des consommateurs.

V) Bibliographie

Adegbola, O.O., Abayomi, L.A., Obadina, A.O., Adebowale A.A., Adegunwa, M.O., Sanni, L.O., 2018. Effect of variety, age at maturity and drying method on physicochemical properties of high quality cassava flour (HQCF). *Food Chain*, 7(2), 100-111

Allem, A.C., 2002. The origins and taxonomy of cassava. In: R.J. Hillocks, et al. (eds.), *Cassava: Biology, production and utilisation*. CABI, Wallingford, UK. p. 1- 6.

Amelework, A.B., Bairu, M.W., Maema, O., Venter, S.L., Amelework, M.L., 2021. Adoption and Promotion of Resilient Crops for Climate Risk Mitigation and Import Substitution: A Case Analysis of Cassava for South African Agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 1-14

Anna, B., Gleadow, R., Cliff, J., Anabela, Z., 2010. Cassava: The Drought, War and Famine Crop in a Changing World. *Sustainability*, 2(11), 3572-3607

Bayata, A., 2019. Review on Nutritional Value of Cassava for Use as a Staple Food. *Science Journal of Analytical Chemistry*, 7(4), 83-91

Bradbury, M.G., Egan, S.V., Bradbury J.H., 1999. Picrate paper kits for determination of total cyanogens in cassava roots and all forms of cyanogens in cassava products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(4), 593-601

Bradbury, J.H., Denton I.C., 2014. Mild method for removal of cyanogens from cassava leaves with retention of vitamins and protein. *Food Chemistry*, 158(1), 417-420

Burns, A.E., Bradbury J.H., Cavagnaro, T.R., Gleadow, R.M., 2012. Total cyanide content of cassava food products in Australia. *Journal of Food Composition and Analysis*, 25(1), 79-82

De Bruijn, G.H., 1971. Étude du caractère cyanogénique du manioc (*Manihot esculenta* Crantz). [internal PhD, WU]. Veenman. <https://doi.org/10.18174/193576>

EcophytoPIC, 2025. Dephy - Concevoir son système - Site CIRAD - STOP. Disponible sur internet : <https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/site-cirad-stOp#accordeon-34363> [consulté le 24/08/2024].

Fukuda, W.M.G., Guevara, C.L., Kawuki, R., Ferguson, M.E., 2010. *Selected morphological and agronomic descriptors for the characterization of cassava*. International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria. Disponible sur Internet : https://www.cassavabase.org/static_content/Fukuda_et_al_2010.pdf [consulté le 10/10/2023].

Fulgence, T.D.H., Daouda, K., Epa N'da Ghislain N., 2024. Quelle variété de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) est la plus adaptée aux zones sèches de production agricole ? Une étude agromorphologique des variétés de manioc dans la Région du PORO, au nord de la Côte d'Ivoire. *Science de la vie, de la terre et agronomie*, 12(1), 56-61

García J, A., Sánchez T., Ceballos H., Alonso L., 2013. Non-destructive sampling procedure for biochemical or gene expression studies on post-harvest physiological deterioration of cassava roots. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 529-535

Gómez, G., Valdivieso, M., Noma, A.T., 1985. The influence of cultivar and plant age on the chemical composition of field-grown cassava leaves and roots. *Plant Foods for Human Nutrition*, 35, 109-119

Hular-Bograd J., Sarobol Ed., Rojanaridpiched C., Sriroth K., 2011. Effect of Supplemental Irrigation on Reducing Cyanide Content of Cassava Variety Kasetart 50. *Agriculture and Natural Resources*, 45(6), 985-994

Jackson J., Chiwona-Karlton L., Gordon A., 2020. Food safety and quality considerations for cassava, a major staple containing a natural toxicant. *Food Safety and Quality Systems in Developing Countries*, 343-366

Lê, S., Josse, J., Husson, F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>

Lebot, V., 2008. Tropical Root and Tuber Crops: Cassava, Sweet Potato, Yams and Aroids. *Crop Production Science in Horticulture no. 17*. UK: CABI Publishing.

Luna, J., Dufour, D., Tran, T., Pizarro, M., Calle F., Domínguez, M.G., Hurtado, I.M., Sánchez, T., Ceballos H., 2020. Post-harvest physiological deterioration in several cassava genotypes over sequential harvests and effect of pruning prior to harvest. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(3), 1322-1332

Morante N., Sánchez T., Ceballos H., Calle F., Pérez J.C., Egesi C., Cuambe C.E., Escobar, Ortiz D., Chávez A.L., Fregene M., 2010. Tolerance to Postharvest Physiological Deterioration in Cassava Roots. *Crop Science*, 50-4, 1333-1338

Muyinza, H., Nuwamanya, E., Matovu, M., Wanda, K., Waigumba, S.P., Kwagala, I., Nyamutoka, P., Menya, G., Aceng, S., Nyakaisiki, E., Kaliisa, R., Abass, A., 2016. Technical report : Postharvest Physiological Deterioration (PPD) tolerance of selected Ugandan cassava varieties. Extending the shelf-life of fresh cassava roots for increased incomes and postharvest losses reduction. Kampala (Uganda). CGIAR RTB. 21 p.

Nambisan, B., 2011. Strategies for elimination of cyanogens from cassava for reducing toxicity and improving food safety. *Food and Chemical Toxicology*, 49(3), 690-693

Ndubuisi, N.D., Chidiebere, A.C.U., 2018. Cyanide in Cassava: A Review. *International Journal of Genomics and Data Mining*, 2(1), 1-10

Nyaika, J., Abayomi, L., Parmar, A., Coast, O., 2024. Cyanide in cassava: Understanding the drivers, impacts of climate variability, and strategies for food security. *Food and Energy Security*, 13(523), 1-23

Ospina, M.A., Tran, T., Pizarro, M., Luna, J., Salazar, S., Londoño, L., Ceballos, H., Lopez-Lavalle L.A.B, Dufour, D., 2023. Content and distribution of cyanogenic compounds in cassava roots and leaves in association with physiological age. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 56(4), 4851-4859

Salcedo, A., Siritunga, D., 2011. Insights into the Physiological, Biochemical and Molecular Basis of Postharvest Deterioration in Cassava (*Manihot esculenta*) Roots. *Journal of Experimental Agriculture International*, 1(4), 414–431

Sánchez, T., Chávez, A.L., Ceballos, H., Rodriguez-Amaya D.B., Nestel, P., Ishitami, M., 2006. Reduction or delay of post-harvest physiological deterioration in cassava roots with higher carotenoid content. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(4), 634-639

Tumuhimbise, R., 2013. *Breeding and evaluation of cassava for high storage root yield and early bulking in Uganda*. Thèse de doctorat, sciences agronomiques. Université du KwaZulu-Natal, 182 p.

Tumuhimbise, R., Melis R., Shanahan, P., 2015. Genetic variation in cassava for postharvest physiological deterioration. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(9), 1333-1342

Venturini, M.T., Santos, V., Oliveira, E., 2015. Procedures for evaluating the tolerance of cassava genotypes to postharvest physiological deterioration. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(7), 562-570

Visalakshi, C., Sheelaa, M.N., Ravib V., Sreekumar J., Sankar, S.A., 2023. Varietal screening for identification of postharvest physiological deterioration tolerance in storage roots of cassava. *International journal of vegetable science*, 29(5), 403-414

Wei, T., Simko, V., 2024. R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix. (Version 0.95), <https://github.com/taiyun/corrplot>.

Wheatley, C., Gómez, G., 1985. Evaluation of some quality characteristics in cassava storage roots. *Plant Foods for Human Nutrition*, 35, 121-129

VI) Annexes

1) Lecture au papier picrate des échantillons de tubercules

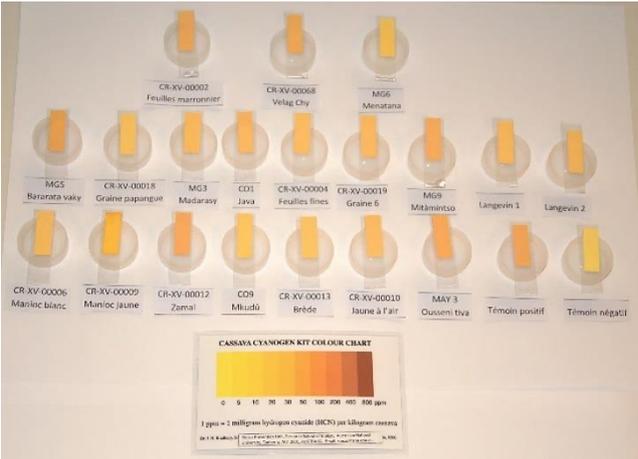


Figure 22 : lecture au papier picrate des échantillons de tubercules de manioc de la récolte date 2 (10,5 mois après la plantation) pour 19 des variétés évaluées, pour le témoin négatif (absence d'échantillon de tubercule de manioc) et pour le témoin positif (linamarine utilisée à la place d'un échantillon de tubercule de manioc correspondant à une concentration connue en cyanure de 55 ppm = mg d'HCN kg/poids frais).

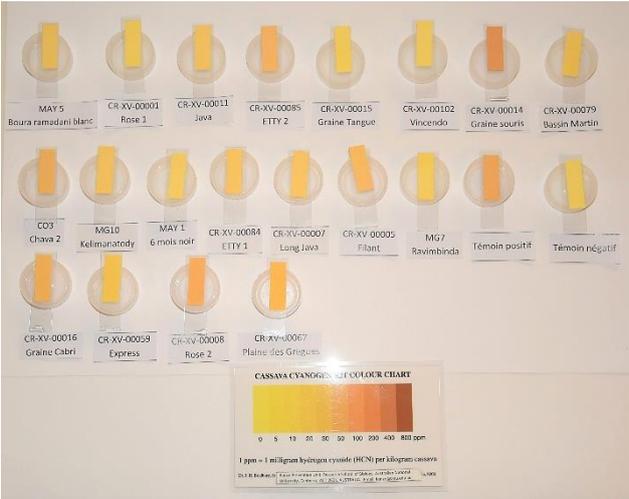


Figure 23 : lecture au papier picrate des échantillons de tubercules de manioc de la récolte date 2 (10,5 mois après la plantation) pour 19 des variétés évaluées (autres que celles de la

figure 22), pour le témoin négatif (absence d'échantillon de tubercule de manioc) et pour le témoin positif (linamarine utilisée à la place d'un échantillon de tubercule de manioc correspondant à une concentration connue en cyanure de 55 ppm = mg d'HCN kg/poids frais).

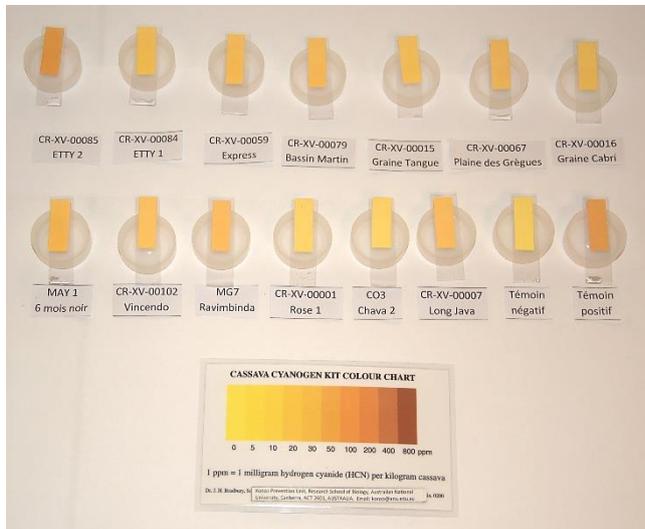


Figure 24 : lecture au papier picrate des échantillons de tubercules de manioc de la récolte date 3 (13,5 mois après la plantation) pour 13 des variétés évaluées, pour le témoin négatif (absence d'échantillon de tubercule de manioc) et pour le témoin positif (linamarine utilisée à la place d'un échantillon de tubercule de manioc correspondant à une concentration connue en cyanure de 55 ppm = mg d'HCN kg/poids frais).

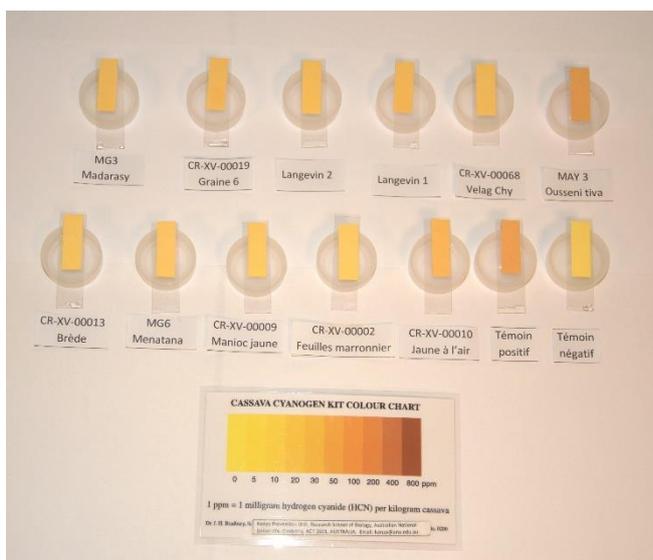


Figure 25 : lecture au papier picrate des échantillons de tubercules de manioc de la récolte date 3 (13,5 mois après la plantation) pour 11 des variétés évaluées, pour le témoin négatif (absence d'échantillon de tubercule de manioc) et pour le témoin positif (linamarine utilisée

à la place d'un échantillon de tubercule de manioc correspondant à une concentration connue en cyanure de 55 ppm = mg d'HCN kg/poids frais).



Figure 26 : lecture au papier picrate des échantillons de tubercules de manioc de la récolte date 3 (13,5 mois après la plantation) pour 14 des variétés évaluées, pour le témoin négatif (absence d'échantillon de tubercule de manioc) et pour le témoin positif (linamarine utilisée à la place d'un échantillon de tubercule de manioc correspondant à une concentration connue en cyanure de 55 ppm = mg d'HCN kg/poids frais).

2) Lecture au papier picrate des échantillons de feuilles

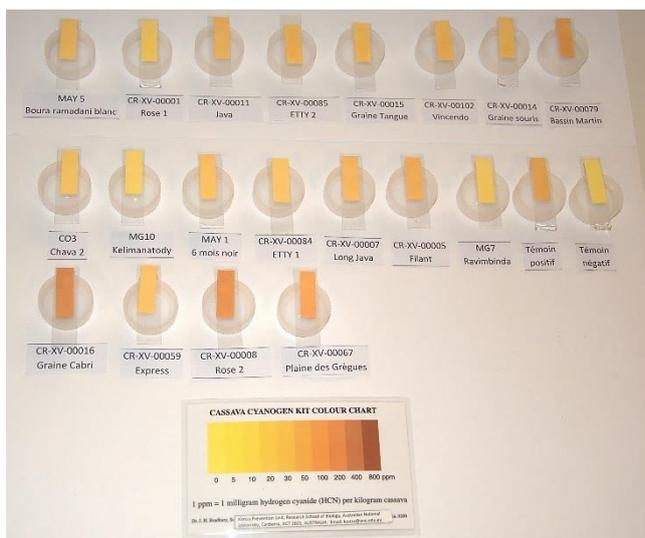


Figure 28 : lecture au papier picrate des échantillons de feuilles de manioc prélevés le 8 août 2024 (11,5 mois après la plantation) pour 19 des variétés évaluées, pour le témoin négatif (absence d'échantillon de feuille de manioc) et pour le témoin positif (linamarine utilisée à la

place d'un échantillon de feuille de manioc correspondant à une concentration connue en cyanure de 60 ppm = mg d'HCN kg/poids frais).

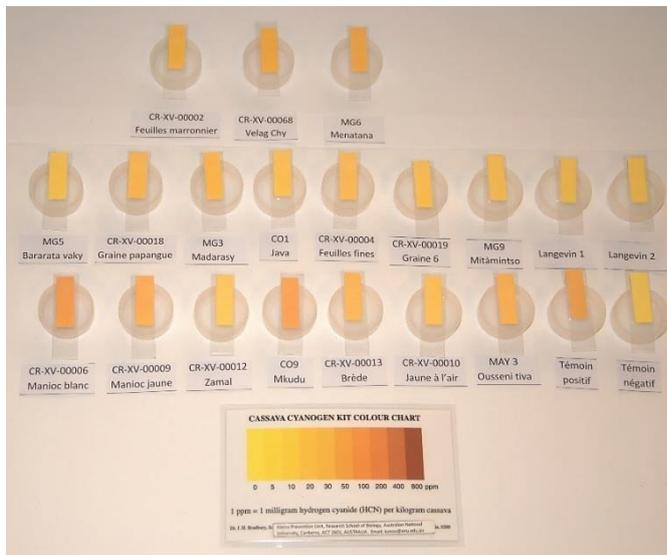


Figure 29 : lecture au papier picrate des échantillons de feuilles de manioc prélevés le 8 août 2024 (11,5 mois après la plantation) pour 19 des variétés évaluées, pour le témoin négatif (absence d'échantillon de feuille de manioc) et pour le témoin positif (linamarine utilisée à la place d'un échantillon de feuille de manioc correspondant à une concentration connue en cyanure de 60 ppm = mg d'HCN kg/poids frais).

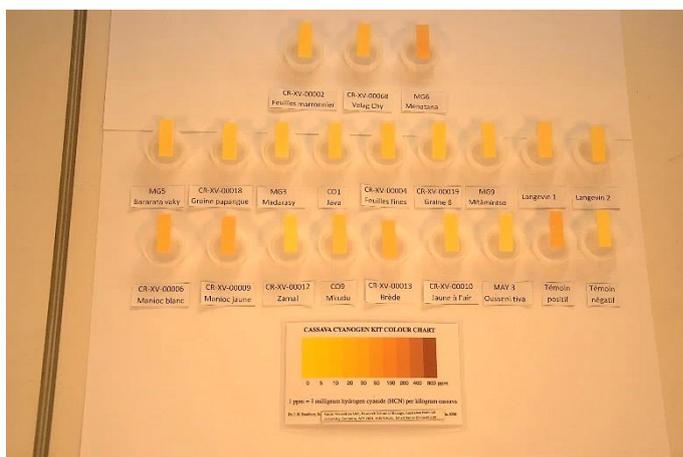


Figure 30 : lecture au papier picrate des échantillons de feuilles de manioc prélevés le 4 septembre 2024 (12,5 mois après la plantation) pour 19 des variétés évaluées, pour le témoin négatif (absence d'échantillon de feuille de manioc) et pour le témoin positif (linamarine utilisée à la place d'un échantillon de feuille de manioc correspondant à une concentration connue en cyanure de 60 ppm = mg d'HCN kg/poids frais).



Figure 31 : lecture au papier picrate des échantillons de feuilles de manioc prélevés le 4 septembre 2024 (12,5 mois après la plantation) pour 19 des variétés évaluées, pour le témoin négatif (absence d'échantillon de feuille de manioc) et pour le témoin positif (linamarine utilisée à la place d'un échantillon de feuille de manioc correspondant à une concentration connue en cyanure de 60 ppm = mg d'HCN kg/poids frais).

VII) Acronymes

Cirad : centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CRB : centre de ressources biologiques

GPS : géo-localisation par satellite

HCN : acide cyanhydrique

IITA : Institut international d'agriculture tropicale

VIII) Abréviations

g : gramme

ha : hectare

ml : millilitre

mg : milligramme

mm : millimètre

kg : kilogramme

ppm : partie par million

°C : degré Celsius