

La fertilité en zones tropicales humides et le manioc

RAFFAILLAC Jean-Pierre

CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier cedex, France

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : ~~Bx~~ 94 17 Ex: 1

Résumé : Le manioc, cinquième des productions végétales mondiales, est avant tout cultivé pour l'alimentation humaine dans des systèmes de culture demeurés traditionnels avec peu ou pas d'intrants. L'Afrique assure 48 % du volume mondial. Ses potentialités de rendement sont élevées : 30 tonnes de matière sèche par hectare et par an. Le rendement mondial de trois tonnes, observé en 1994, est depuis longtemps largement dépassé par les résultats en stations de recherche et plusieurs approchent ce potentiel. Le schéma général d'élaboration du rendement du manioc se décompose en trois phases. La première correspond à la mise en place des aériens et du système racinaire, chaque racine émise étant potentiellement un site de remplissage. La deuxième phase est la phase d'initiation de la tubérisation d'un certain nombre d'axes racinaires qui deviennent alors des sites effectifs de stockage des réserves hydrocarbonées. La troisième phase est la phase de remplissage, rythmée par les facteurs et les conditions du milieu sur une durée de cycle de six à plus de trente mois. Le rendement final se décompose en un nombre de tubercules utiles, un poids moyen et un nombre de plants par unité de surface, la teneur en matière sèche du tubercule étant un critère qualitatif primordial. Les composantes les plus marquantes de la fertilité dans les zones tropicales humides sont abordées tour à tour à partir d'une revue bibliographique détaillée pour situer leurs rôles et leurs effets sur chacune de ces étapes et sur la qualité des tubercules de manioc.

Analyser la fertilité du milieu en terme de fonction que celui-ci doit remplir pour fabriquer de la matière sèche, c'est passer par les plantes cultivées organisées en systèmes de culture. Cette fertilité doit obligatoirement se raisonner par rapport au système de production car c'est bien ce dernier qui définit le degré des contraintes que font subir à une exploitation agricole telle ou telle caractéristique du milieu. Pour le manioc, comme pour les autres plantes cultivées, ce problème de fertilité du milieu ne s'abordera donc pas de la même façon selon l'intensification plus ou moins poussée du système de culture et les objectifs de production.

C'est à partir du schéma d'élaboration du rendement, qui coordonne les connaissances disponibles concernant le fonctionnement du peuplement végétal au sein du milieu, que l'on peut dégager des éléments pertinents pour juger ce dernier et pour les hiérarchiser en vue d'orienter la culture. L'analyse de l'élaboration du rendement, où l'on reconstitue l'histoire du peuplement végétal, permet d'établir un

diagnostic sur la culture dans un milieu et donc d'en définir les aptitudes. Juger un milieu donné revient ainsi à définir ses aptitudes culturales dans le cadre d'un système de culture. Il convient d'examiner les fonctions que le milieu doit remplir par rapport à une application possible des techniques disponibles pour gérer la parcelle cultivée. A chaque fonction correspond une caractéristique du milieu : c'est une des composantes de la fertilité qui sert à examiner les aptitudes culturales. Selon le système de culture, il existe une hiérarchie différente dans les problèmes techniques à résoudre pour corriger le milieu, capables de lever des limitations plus ou moins fortes des composantes dans le processus de production.

Après un aperçu général sur le manioc, sa production à l'échelle mondiale et les potentialités de cette plante, nous présenterons successivement le schéma général d'élaboration du rendement à travers ses composantes puis ses réactions face aux principaux facteurs de la fertilité du milieu, et enfin le niveau du système de culture.

Le manioc : origine et production à travers le monde

Origine de la plante et diffusion

Il existe en Amérique du Sud trois espèces sauvages de manioc présentes au Brésil, en Bolivie, au Pérou, au Venezuela, en Guyane et au Surinam (Allem, 1994). L'une des trois est domestiquée et inclut tous les cultivars connus en culture : *Manihot esculenta* subsp. *esculenta* Crantz. L'utilisation du manioc sur ce continent est ancienne : on trouve des sites archéologiques datant de 1800 ans avant J.-C. sur la côte ouest du Pérou contenant des restes de tubercules.

La diffusion en Afrique puis en Asie a débuté au XVI^e siècle par les navigateurs portugais. Son extension est liée à l'ouverture d'axes de pénétration à l'intérieur du continent africain à partir de la côte au niveau des comptoirs et les



migrations avant le XX^e siècle l'ont favorisée (Carter *et al.*, 1992). Il semble que le remplacement de l'igname par du manioc ne soit pas réellement dû à une baisse de fertilité mais plutôt à une plus grande facilité de la culture ainsi qu'à une demande urbaine. Les politiques commerciales coloniales du XX^e siècle ont renforcé son expansion : preuve en est de certains noms locaux donnés à des variétés diffusées, voire imposées par les administrations (Moundele-pakou au Congo, Yovovi au Togo... signifiant "hommes blancs"). Très tôt, le manioc apparaît comme une culture destinée non seulement à l'auto-consommation mais destinée, en grande partie, à l'approvisionnement des marchés urbains (au moins pour l'Afrique centrale et de l'Ouest). La souplesse du calendrier culturel par rapport au cycle climatique, ses faibles besoins en technicité et l'existence d'une production là où nombre d'autres cultures vivrières ne peuvent plus être cultivées sont les principaux atouts qui ont favorisé son adoption dans de nombreux systèmes de culture à travers le monde (Cock, 1979). Ses emplois dans d'autres domaines (agro-industrie, alimentation animale...) ont amplifié sa répartition dans la zone tropicale humide.

En résumé, les caractères particuliers du manioc (bois stockable pour la propagation, échelonnement de la récolte — longue conservation des tubercules dans le sol, bonnes adaptations aux contraintes — sécheresse, fertilité du sol, maladies et parasites), combinés aux conditions écologiques, aux facteurs socio-culturels et aux politiques économiques locales ont favorisé sa diffusion en Afrique et plus récemment en Asie.

Production mondiale

Le continent africain assure 48 % de la production mondiale, estimée à 152 millions de tonnes de tubercules frais par la FAO en 1994 (figure 1a). Parmi les dix premiers pays producteurs (figure 1b), on trouve cependant un pays d'Amérique du Sud (Brésil) et quatre pays d'Asie (Inde, Thaïlande, Indonésie et Chine). Le Nigéria et le Zaïre fournissent à eux deux plus de la moitié de la production africaine (figure 1c). Il existe une forte corrélation positive entre la densité de population au kilomètre carré et la quantité de manioc produit dans les différentes régions agroécologiques en Afrique (Carter *et al.*, 1992).

Les quantités de manioc produites dans la zone tropicale humide sont parfois fortement dépendantes de la politique agricole des pays dès lors qu'il s'agit de culture de rente. C'est le cas de la Thaïlande qui est passé de 3 à 15 millions de tonnes entre 1970 et 1980, principalement en raison du commerce avec la CEE, le manioc étant destiné à l'alimen-

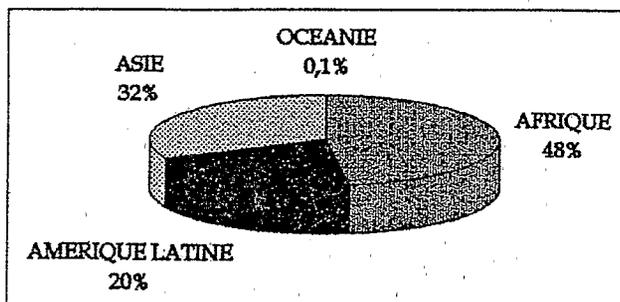


Figure 1a. Répartition de la production mondiale de manioc en 1994 (total : 152,5 millions de tonnes - Données FAO).

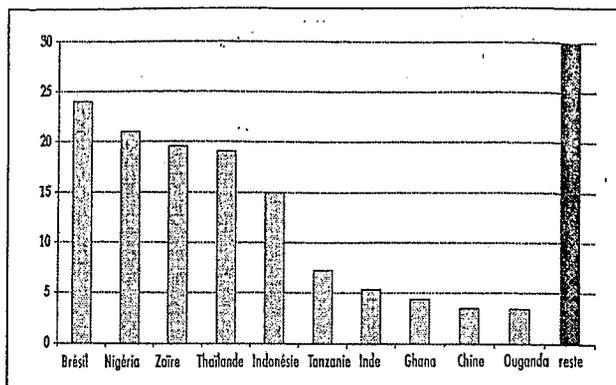


Figure 1b. Les dix premiers pays producteurs de manioc en 1994 (en millions de tonnes) - Données FAO.

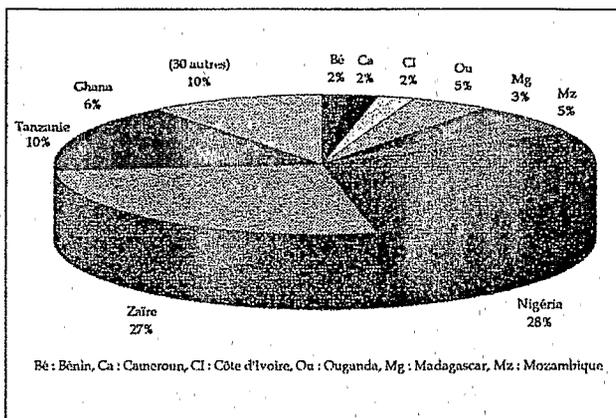


Figure 1c. Répartition de la production de manioc entre les quarante pays africains producteurs en 1994 (les dix premiers producteurs produisent 65 des 73 millions de tonnes - Données FAO).

tation animale. Cependant, avec les nouveaux accords du GATT et les limitations d'importation décidées par la CEE, ce pays a été obligé de revoir sa planification et sa stratégie commerciale ; en particulier, il encourage actuellement les producteurs à réduire leur surface de plantation alors qu'on observe une baisse régulière des rendements. Entre 1983 et 1992, ils sont passés de 18 à 14 tonnes par hectare, en l'absence de fertilisation (Titapiwatanakun, 1995). Le Brésil et l'Australie donnent un autre exemple de l'avenir de la culture du manioc : suite au renchérissement brutal du prix des hydrocarbures fossiles dans les années 70, ils ont été conduits à lancer des programmes importants de plantations de manioc et de canne à sucre au Nordeste et au Queensland pour produire de l'éthanol-carburant (Cock, 1985). Mais depuis, la régulation des prix du pétrole a conduit à réviser ces programmes à la baisse.

Dans le cas de l'alimentation humaine, les productions de manioc restent sous l'étroite dépendance des débouchés : la commercialisation sur les villes de produits finis ou semi-finis devient un facteur régulateur des quantités produites, en étroite relation avec l'aspect qualitatif issu de la transformation artisanale ou industrielle des tubercules (Nweke *et al.*, 1994b).

Les quantités de tubercules frais, produites par pays, rapportées à la population classent en premier le Paraguay avec 528 kilogrammes par habitant suivi du Zaïre (425), du Ghana (354), du Tonga (306), de la Thaïlande (304), du Nigéria (285), du Congo (250), du Bénin (223), du Mozambique (212) et de Centrafrique (192).

Potentialités et rendement réel

Sur la base de données en Indonésie, les potentialités du manioc ont été évaluées en 1930 à 71 tonnes de matière fraîche par hectare et par an (Vries *et al.*, 1967). A l'aide d'un modèle, Cock *et al.* (1979) ont estimé le rendement potentiel à 90 tonnes de matière fraîche par hectare et par an sur la base de données obtenues au CIAT en Colombie, ce qui représente environ 30 tonnes par ha et par an de matière sèche.

La FAO donne pour 1994 un rendement frais moyen de 9,6 tonnes de matière fraîche par hectare au niveau mondial, avec des pays produisant moins de 3 tonnes (Centrafrique, Angola, Malawi) et d'autres plus de 16 tonnes (Inde, Cameroun). Il faut cependant noter que les données de la FAO restent parfois en dessous des estimations mentionnées par d'autres études : c'est le cas pour certains des pays africains concernés par le réseau COSCA (Nweke *et al.*, 1994a).

Le tableau I réunit un certain nombre de rendements maximums obtenus dans des essais agronomiques conduits dans les sept classes de la zone tropicale humide définies par

Tableau I. Les meilleurs rendements frais (RF) et (ou) sec (RS) en tonnes par hectare obtenus en essais agronomiques conduits dans différentes classes de la zone tropicale humide et rendement frais moyen (RFm) dans le pays correspondant estimé par la FAO en 1994.

| ZTH | PAYS | RF maxi | RS maxi | Cycle | Référence auteurs | RFm-FAO 94 |
|-----|-----------------|-------------|-------------|-------|---------------------|------------|
| 1 | Madagascar | 36 | ? | 12 | Dulong (1971) | 6,7 |
| 1 | Malaisie | 44 | ? | 10 | Williams (1972) | 10,5 |
| 1 | Nigéria | 22 | 9,4 | 13 | Kang (1984) | 10,5 |
| 1 | Pérou | 27 | ? | 12 | Benites (1993) | 10,5 |
| 2 | Cameroun | 40 | ? | 12 | White (1987) | 16,3 |
| 2 | Colombie | 38 | ? | ? | Howeler (1990) | 10,0 |
| 2 | Côte d'Ivoire | 37 | ? | 12 | Miège (1957) | 4,5 |
| 2 | Côte d'Ivoire | 54 | 18,2 | 14 | Raffailac (1986) | 4,5 |
| 2 | Libéria | 43 | ? | 12 | Lockard (1985) | 6,7 |
| 2 | Nigéria | 43 | 24,0 | 12 | Kayode (1983) | 10,5 |
| 3 | Colombie | 66 | 21,0 | 12 | Cock (1985) | 10,0 |
| 3 | Colombie | 57 | 19,1 | 16 | Irikura (1979) | 10,0 |
| 3 | Hawaï | 48 | ? | 8 | Van der Zaag (1979) | ? |
| 3 | Inde | 82 | 29,2 | 10 | Ramanujam (1990) | 22,8 |
| 3 | Madagascar | 79 | ? | 20 | Dulong (1971) | 6,7 |
| 3 | Tanzanie | 85 | 30,7 | 15 | Enyi (1973) | 10,4 |
| 3 | Thaïlande | 33 | 9,9 | 12 | Hagens (1990) | 13,1 |
| 3 | Rwanda | 54 | ? | ? | Alvarez (1991) | 7,0 |
| 4 | Colombie | 43 | ? | 11 | Howeler (1990) | 10,0 |
| 4 | Colombie | 60 | 19,7 | 16 | Irikura (1979) | 10,0 |
| 4 | Madagascar | 55 | ? | 14 | Dulong (1971) | 6,7 |
| 4 | Sri-Lanka | 45 | 13,5 | ? | Howeler (1991) | 8,9 |
| 4 | Trinidad | 63 | ? | 12 | Wilson (1994) | 10,6 |
| 5 | Australie | ? | 14,4 | 9 | Tsay (1989) | ? |
| 5 | Australie | 26 | 9,0 | 12 | Keating (1982) | ? |
| 6 | Sierra Leone | 40 | 12,1 | 13 | das Gupta (1976) | 4,2 |
| 6 | Sierra Leone | 29 | ? | 8 | Enyi (1972) | 4,2 |
| 7 | Bénin | ? | 07,5 | 11 | Leihner (1990) | 8,2 |
| 7 | Togo | 39 | 12,0 | 11 | Eglé (1992) | 5,5 |
| 7 | Togo | 60 | 19,1 | 13 | Raffailac (1994) | 5,5 |
| X | Madagascar | 26 | ? | 12 | Dulong (1971) | 6,7 |
| X | Sénégal | 19 | ? | 18 | Tardieu (1961) | 02,8 |
| | Moyennes | 46,4 | 16,8 | | X | 8,8 |

ZTH = classes 1 à 7 selon la classification de Labrousse (1993)
cycle = durée en mois

Labrousse (1993). Il s'agit là de rendements qui correspondent aux meilleurs traitements des essais agronomiques au champ portant sur différents aspects de la culture (comparaison variétale, fertilisation, préparation du sol, culture associée, densités de plantation...). La moyenne des maximum en essai est plus de cinq fois supérieure aux estimations de rendement FAO de 1994 : ce tableau montre qu'il est partout possible de produire des quantités très importantes à l'unité de surface. C'est en Inde et en Tanzanie que les meilleurs rendements en essais ont été obtenus : ils sont très proches des potentialités calculées par le modèle de Cock.

L'élaboration du rendement

Cultivé pour ses racines qui tubérisent en stockant de l'amidon, à partir d'une bouture de tige suffisamment lignifiée, le manioc doit satisfaire en fin de cycle à deux conditions :

- offrir en fin de cycle un appareil aérien bien développé d'où seront issues les boutures (sur les tiges aoûtées) destinées à reproduire un nouveau cycle ;
- donner une quantité suffisante de racines tubérisées, en nombre et/ou en taille, répondant le plus souvent à des exigences fortes concernant la qualité (teneur en eau, en fibres, amertume...).

Ces deux objectifs sont en partie contradictoires quant à la gestion de la parcelle. En effet, il existe une compétition permanente entre parties aériennes et racines pour la redistribution des assimilats, et nombreux sont les facteurs techniques, en interaction avec le géotype et le milieu naturel, qui favorisent l'un de ces deux compartiments souvent au détriment de l'autre.

Selon le type de filière, le choix variétal pourra alors être différent. Dans une filière de type agro-industriel, l'organisation de la production de boutures pourra trouver sa place pour fournir aux producteurs du matériel végétal de qualité (bois vigoureux et sains) de variétés à index de récolte élevé. Par contre, dans un système de culture paysan, des variétés disposant de tiges bien développées (à index de récolte de 0,50 et moins) seront préférées pour assurer, sans risque, la reproductibilité de cycles culturels successifs.

On peut distinguer trois étapes dans l'élaboration du rendement du manioc (figure 2).

La mise en place du système aérien (une ou plusieurs tiges principales par plant) et du système racinaire sur une bouture de tige. L'ensemble des racines, d'origine nodale et basale, constitue des sites potentiels de stockage pour des réserves amylacées que la plante va élaborer au cours de son cycle cultural : toutes ces racines possèdent en effet la même anatomie et sont susceptibles de tubériser (Lowe *et al.*, 1982). Le nombre total d'axes primaires est généralement fixé au cours des premières semaines (Raffaillac, 1995).

L'initiation de la tubérisation d'un certain nombre de racines (principalement la partie des axes racinaires primaires située à proximité de la bouture) qui débute dès les premières semaines du cycle (sites réels). Le nombre de racines concernées dépend de la variété, des techniques

culturelles et des facteurs du milieu. Par exemple, la mosaïque africaine du manioc (maladie virale) peut diminuer de moitié le nombre de racines concernées par la tubérisation (Raffaillac et Nédélec, 1986). Avec une densité de plantation à 6 000 plants à l'hectare, 72 % des racines du plant tubérisent contre seulement 24 % avec 15 000 plants par hectare.

Le remplissage des tubercules, rythmé par les différents facteurs du milieu tout au long du cycle pour donner à la récolte un nombre de tubercules utiles. La récolte interviendra à des âges très variables (entre 6 et plus de 30 mois) en fonction de la variété, des facteurs du milieu, des besoins et exigences de qualité pour la transformation (teneur en eau, présence de fibres...) et des objectifs des producteurs.

Les deux premières étapes vont agir sur la composante du rendement "nombre de tubercules" à la récolte. En particulier, la première étape met en place un enracinement qui devra satisfaire à la fois les fonctions d'ancrage du plant, de nutrition minérale, d'absorption hydrique et de stockage de l'amidon. L'installation du peuplement végétal est donc particulièrement décisive pour la réussite de la culture. Par ailleurs, il n'y a pas de stade morphologique nettement identifiable au cours du cycle, la phase de maturité des tubercules n'est pas évidente et le problème de la qualité de la récolte reste prépondérant. La composante "poids moyen d'un tubercule" peut masquer de profonds écarts entre minimum et maximum.

Les composantes de la fertilité du milieu et la culture du manioc

Pour diagnostiquer l'aptitude à cultiver du manioc en un lieu donné, il est commode, en premier lieu, d'examiner chacune des composantes qui le définissent et d'en fixer si possible des valeurs limites en dehors desquelles la croissance et le développement seront trop fortement altérés pour envisager la culture. Mais c'est à partir de la combinaison de ces critères, relatifs aux composantes qui caractérisent ce milieu, raisonnée au sein du système de culture et du système de production, que l'on peut véritablement parler de fertilité du milieu. Les objectifs de production, qu'ils soient quantitatifs ou/et qualitatifs, varient en effet considérablement d'un système de production à l'autre.

La photopériode et le rayonnement global

Le manioc est une plante de jours courts : des éclaircissements supérieurs à 12 heures limitent le nombre et le poids des tubercules. Selon Lowe *et al.* (1976), l'initiation de la tubérisation est plus précoce en jours courts mais le nombre de racines tubérisées n'est pas modifié ; seul le poids total de tubercules est favorisé par les jours courts. L'effet stimulant des jours longs est observé en Côte d'Ivoire sur la floraison ; la sensibilité du manioc serait grande puisque l'écart existant entre les jours les plus longs et les jours les plus courts est d'environ 35 minutes.

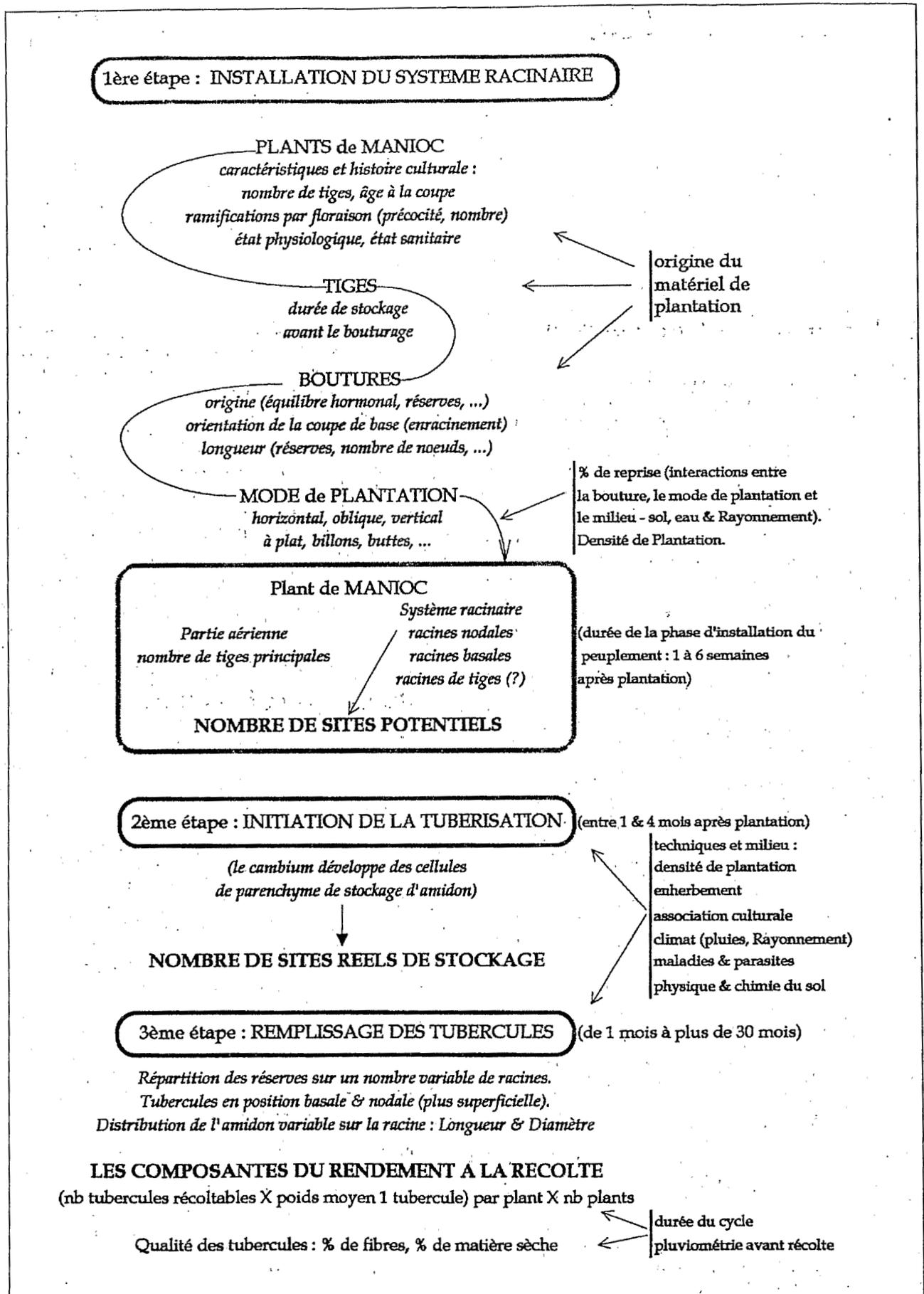


Figure 2. Schéma d'élaboration du rendement du manioc.

L'augmentation de la durée du jour favorise la croissance des parties aériennes ; elle réduit le grossissement des racines sans changer le poids total sec du plant (Hunt *et al.*, 1977). Un ombrage retarde de 40 jours la formation des tubercules (Kasele *et al.*, 1983). Le tubercule est un compétiteur faible pour les assimilats élaborés : la réduction expérimentale de l'éclaircissement en Australie limite l'indice de surface foliaire (*Leaf area index* = LAI) par diminution de l'émission des feuilles et ralentit la tubérisation, entraînant en fin de cycle un index de récolte faible (Fukai *et al.*, 1984). Un ombrage pendant deux mois réduit de 35 % le poids sec des tubercules et seulement de 8 % celui des aériens en Colombie (Cock *et al.*, 1979). Si la plantation a lieu alors que la nébulosité se prolonge pendant plusieurs semaines en Inde, la vitesse de croissance relative est

ralentie et conduit à des baisses de rendements (Ramanujam et Jos, 1984). En Côte d'Ivoire, la mise en place de la structure du peuplement végétal est modifiée par la quantité de rayonnement global reçue pendant les premières semaines qui suivent la plantation : on observe une bonne corrélation entre la quantité cumulée du rayonnement reçu pendant les 10 jours qui suivent la plantation de la bouture et le nombre moyen de tiges principales par plant (figures 3a et 3b) : avec une plantation à 10 000 plants/ha, le nombre de tiges par hectare passe ainsi de 15 000 à 33 000 selon l'époque de plantation au cours de l'année.

Lorsque la luminosité est réduite sur des périodes prolongées en raison de la nébulosité, il existe donc en premier lieu un risque de limiter la couverture du sol par les

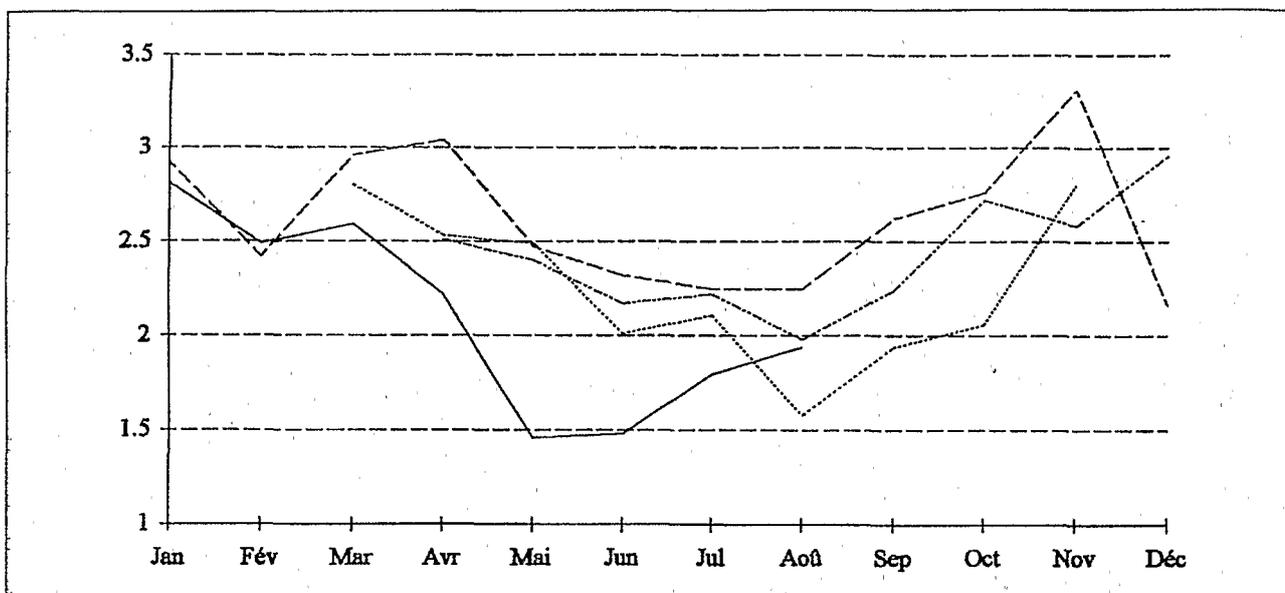


Figure 3a. Effets de la date de plantation sur le nombre de tiges principales par plant de manioc à Adiopodoumé (sud de la Côte d'Ivoire).

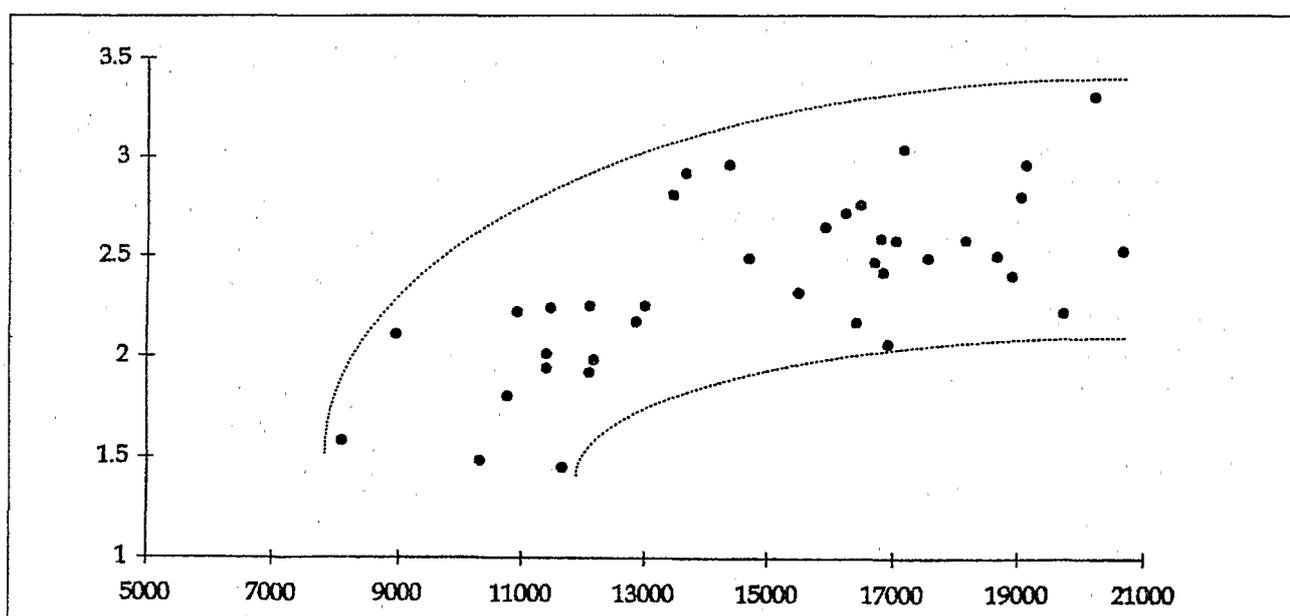


Figure 3b. Relation entre le cumul du rayonnement global sur les dix jours qui suivent la plantation de la bouture et le nombre de tiges principales développées sur le plant de manioc.

aériens, qu'il est possible de compenser en réduisant l'écartement entre plants, mais aussi un risque de baisse de rendement.

La température

Bien que non limitante pour la majeure partie de la zone tropicale humide, elle peut constituer une contrainte. Selon Keating *et al.* (1982), il n'y aurait pas de germination possible au dessous de 13°C en Australie ; la température et le rayonnement sont étroitement liés dans le Queensland et il n'est pas possible de distinguer leurs effets respectifs sur le taux maximum de croissance de la culture qui varie de 2,4 à 23,8 grammes par mètre carré et par jour selon la date de plantation. Dans cette zone, de hautes températures associées à des photopériodes longues et des LAI élevés diminuent la proportion d'assimilats dans les racines. En Colombie, le taux de photosynthèse nette à saturation est à son maximum à 25°C et diminue significativement au-delà de 29°C ; la surface des feuilles est fortement réduite à 20°C (Irikura *et al.*, 1979). Selon le lieu, ce taux présente un plateau entre 25°C et 40°C dans ce même pays, tombe à 0 pour 50°C et reste à 40 % du maximum à 12°C (El-Sharkawy *et al.*, 1984). La température optimale se situe entre 25 et 30°C au Venezuela. On trouve cependant des variétés bien adaptées à des zones où la température moyenne annuelle est de 16°C à 18°C et même sous des latitudes où la température diurne peut descendre à 10°C pour les mois d'hiver les plus froids. Lorsque la température passe à 0°C comme au sud du Brésil, la défoliation est totale (Cock *et al.*, 1985) : pour éviter que les plants meurent, les agriculteurs taillent la totalité des tiges avant l'arrivée du froid. Selon Manrique (1992) à Hawaï, le LAI diminue fortement en passant de 282 à 1097 mètres d'altitude, faisant passer la température moyenne de 22,4°C à 18°C. Le rendement est alors divisé par six : la température en serait en premier la cause plutôt que la baisse de rayonnement qui passe de 21 à 15 mégajoules par mètre carré. La température du sol au-delà de 30°C modifie la croissance des jeunes plants : en passant de 30 à 35°C, le poids sec des aériens est réduit de 50 % et le poids sec des racines de 40 %.

L'eau

Selon Cock *et al.* (1985), la bonne aptitude du manioc à survivre en cas de stress hydrique sévère est plus liée à ses capacités à conserver et à utiliser l'eau qu'à l'extension de son système racinaire. Les stomates sont très sensibles à la différence de pression de vapeur d'eau entre la feuille et l'air environnant. C'est ce mécanisme qui est le facteur clé de la capacité à survivre en cas de sécheresse. La sécheresse hâte le début de la phase de baisse du LAI (Hunt *et al.*, 1977). Cette baisse est liée avant tout, en Colombie, à la diminution de la surface des nouvelles feuilles dont le rythme d'émission est par ailleurs ralenti, mais pas à l'accélération de la chute des feuilles âgées (Connor *et al.*, 1981) : en cas de stress, la durée de vie de la feuille est plus grande. Il faut atteindre des stress hydriques très sévères pour obtenir la décoloration et l'abscission des feuilles de base (Ike *et al.*, 1981), la chute des feuilles n'est pas affectée par les besoins en hydrates de carbone des racines. Le plant de manioc réduit la croissance de ses aériens au début du stress hydrique, accompagné d'une

fermeture partielle des stomates, mais il maintient un taux de photosynthèse raisonnable avec accumulation de matière sèche dans les tubercules. La proportion de biomasse augmente dans les tubercules en cas de stress hydrique en Colombie et cette distribution préférentielle persiste après réhumectation du sol (El-Sharkawy, 1993). Lorsque le stress est appliqué à trois mois pendant dix semaines, le nombre de racines concernées par la tubérisation est réduit ; le pourcentage de matière sèche diminue après la suppression du stress. En Australie, la date d'apparition du stress influe plus ou moins le rendement (Baker *et al.*, 1989) : un stress en début de cycle a peu d'effet car le développement des aériens est aisé à la reprise des pluies alors qu'en fin de cycle cultural, les plants âgés recouvrent plus difficilement un LAI suffisant. La partie aérienne est toujours plus affectée que les tubercules et les réserves amyliacées emmagasinées dans les racines jouent un rôle important dans le processus de récupération qui suit le stress hydrique. En Inde, Ramanujam (1990) observe une diminution de 18 à 40 % du LAI, accompagné d'une baisse de rendement de 28 à 42 %. L'emploi d'un mulch qui maintient plus longtemps l'humidité du sol peut doubler le rendement. L'irrigation en excès entraîne une production supplémentaire de feuilles au détriment des tubercules (Hunt *et al.*, 1977).

Il n'existe pas véritablement de stade critique au cours du cycle végétatif du manioc vis-à-vis de la sécheresse, excepté peut-être lors de l'installation du nombre de racines primaires suivie de l'initiation de la tubérisation ; mais alors les possibilités de compensation (moins de racines tubérisées, ce qui équivaldra en fin de cycle à des poids individuels des tubercules plus élevés) pourront gommer les différences (Cock *et al.*, 1979). A la limite, pour certains objectifs de production comme une commercialisation de gros tubercules frais, cela peut devenir un atout intéressant. Le problème de l'eau et donc du calage du cycle cultural sur le cycle climatique est plus à étudier en rapport avec la qualité des tubercules lors de la récolte. La teneur en matière sèche du tubercule à la récolte pour une même longueur du cycle cultural est d'autant plus faible que le cumul de la pluviométrie dans les 60 jours qui précèdent l'arrachage des plants est élevé : en Côte d'Ivoire, elle passe de 18 % pour un cumul de 850 millimètres à 32 % pour 50 millimètres (Raffaillac, 1985). Au Togo, l'augmentation de la teneur en eau des tubercules en fin de cycle avec l'arrivée des pluies entraîne une diminution sensible de la qualité du produit transformé.

Propriétés physiques du sol

Le travail en profondeur d'un sol sableux favorise la croissance des aériens mais ne modifie pas le rendement en tubercules. La culture en billons ne favorise pas le rendement sur ce même type de sol. Howeler *et al.* (1993) estiment inutile le travail d'un sol léger si le contrôle des adventices est correct ; par contre sur sol compacté, le rendement est augmenté avec un travail du sol et un billonnage. Toro (1979) préconise la culture systématique en billons lorsque la pluviométrie annuelle dépasse 1 200 millimètres pour éviter les pourritures sur les racines. La plantation sur billons réduit les attaques de termites et augmente le rendement au sud du Nigéria. La création de buttes s'avère indispensable pour éviter l'ennoyage au moment de la récolte au Nigéria.

Sur sol non travaillé, la situation des tubercules est superficielle, ce qui diminue la force nécessaire pour l'arrachage : le mode de plantation de la bouture permet de localiser les racines primaires à la surface du sol. L'absence de travail du sol en cas de culture associée au maïs au Cameroun augmente de 25 % le rendement du manioc (Hulugalle *et al.*, 1993). Sur sol compacté au Nigéria, Maduakor (1993) observe le développement préférentiel des aériens par augmentation de la production de feuilles et la limitation de la tubérisation. A Trinidad, Vine *et al.* (1987) notent une réduction du nombre de racines en liaison avec la réduction de l'aération du sol. Catano *et al.* (1983) obtiennent le meilleur rendement en Colombie avec un niveau intermédiaire de préparation du sol.

La composition granulométrique du sol, combinée au régime pluviométrique et à la pression parasitaire (champignons pathogènes, termites) impose dans certaines situations le mode de plantation de la bouture pour assurer leur reprise : elle sera horizontale pour un sol lourd avec risque d'ennoyage, verticale ou oblique pour un sol sableux avec risque de sécheresse en début de cycle (Raffaillac, 1992).

Si les risques d'érosion sont importants en début de cycle chez le manioc en raison de l'écartement élevé entre les plants et de la vitesse faible de couverture du sol, le problème ne se manifestera qu'une fois par an à l'inverse des plantes à cycle court lorsqu'il est possible de réaliser deux ou trois cycles de vivriers par an comme en Thaïlande ou en Colombie (Howeler, 1991). Sur sol érodé, les pertes de rendement atteignent jusqu'à 50 % pour certaines variétés. Les associations de culture constituent un bon moyen pour limiter ces risques d'érosion.

Propriétés chimiques du sol

L'acidité des sols

Il existe une diversité génétique pour la tolérance du manioc à l'acidité des sols (Edward *et al.*, 1978). Au Panama, avec des pH de 3,8, la présence de fortes concentrations d'aluminium limitent le développement des aériens et le rendement, mais certaines variétés présentent une assez bonne adaptation (Manrique, 1985). La culture sur tourbes acides en Malaisie est possible en supprimant l'excès d'eau et en remontant de un point le pH initial de 3,7 (Chew *et al.*, 1978). Au Nigéria, un apport modéré de chaux (1,6 tonnes) remonte le pH initial de 4,25 à 5,1 et permet d'augmenter le rendement mais des apports supérieurs le réduisent considérablement : de fortes carences en zinc sont alors évidentes. Pour Njoku et Enwesor (1991), la tolérance de certaines variétés de manioc à l'acidité du sol au Nigéria serait, en fait, plus à relier à l'efficacité à extraire le calcium qu'à une résistance aux fortes concentrations en aluminium. Pour ces auteurs, la réponse au chaulage serait avant tout une réponse au calcium en tant qu'élément nutritif.

Les éléments nutritifs

Le manioc est une plante à croissance relativement lente et ses besoins instantanés ne sont pas aussi importants que ceux de plantes à cycle court.

Les connaissances sur les effets des trois éléments majeurs N, P et K sont les plus avancées chez le manioc. L'azote ne

modifie pas la tubérisation en quantité mais il augmente le nombre de racines concernées par la tubérisation (Egle, 1992) : s'il n'y a pas d'apport potassique, l'apport seul d'azote réduit le diamètre et le poids du tubercule en limitant la taille et le nombre de cellules. La réponse à l'azote diffère selon la variété (Obigbesan *et al.*, 1976) : une variété améliorée répond mieux jusqu'à 150 unités mais au-delà, il y a diminution du rendement. L'apport d'azote diminue le taux d'acide cyanhydrique chez la variété améliorée mais l'augmente chez une variété traditionnelle. Buijn (1971) observe également une augmentation du taux d'HCN avec des apports d'azote. Kang et Okeke (1983) relèvent des augmentations de la partie aérienne mais pas des tubercules au Nigéria. Manrique (1990) note une diminution de la proportion de la matière sèche allouée aux racines à Hawaï. Howeler et Cadavid (1990) observent des gains de rendement avec une fertilisation azotée en Colombie sur sol sableux pauvre en matière organique. Une réponse positive à l'azote du rendement utile paraît ainsi contradictoire selon les études alors que l'augmentation de la partie aérienne est toujours soulignée.

Les besoins en phosphore du manioc sont faibles. La présence d'endomycorrhizes sur les racines aide la nutrition phosphatée ; celles-ci ont été décelées sur manioc en Côte d'Ivoire quel que soit le système de culture. Kang *et al.* (1980) situent les besoins de phosphore à 3,4 ppm P/BRAY pour obtenir de bons rendements ; le rendement est maximum avec une teneur à 8 ppm P/BRAY-1, correspondant à une teneur de 0,5 % de phosphore dans la feuille à trois mois. Ils observent que la présence de mycorrhizes dans le sol est forte sur sol dépourvu de phosphore et faible sur sols à fortes teneurs. Pour Howeler et Cadavid (1990) en Colombie, la valeur critique de phosphore au niveau du diagnostic foliaire est de 0,41 %.

Le potassium accélère le début de la tubérisation ; associé ou non à l'azote, il augmente le diamètre et le poids des tubercules, la taille des cellules de stockage et le rendement final (Kasele *et al.*, 1983). La réponse positive à la fertilisation potassique est observée au Nigéria lorsque la teneur en potassium du sol est inférieure à 0,15 meq/100 grammes de sol (Kang et Okeke, 1983). En essai de longue durée sur sol acide en Colombie, le potassium devient limitant dès la deuxième année en cas de culture continue, comme c'est le cas en plusieurs endroits en Asie (Howeler et Cadavid, 1990) : le niveau critique se situerait à 0,17 meq/100 grammes de sol (BRAY-2) et la teneur critique pour le diagnostic foliaire de 1,42 %.

Au Nigéria, les meilleurs rendements sont associés à des taux de 5 % d'azote, 0,4 % de phosphore et 2 % de potassium dans la plus jeune feuille complètement développée au stade 3 mois (Okeke *et al.*, 1982). Au Nigéria, Obigbesan (1978) note que les variétés traditionnelles répondent positivement à des quantités d'engrais potassiques plus élevées que les variétés améliorées : l'index de récolte est augmenté dans les deux cas. Les augmentations enregistrées vont de 6 à 18 kilogrammes de tubercules secs par kilogramme de K₂O apporté. En Côte d'Ivoire, le rapport N/K dans la feuille est corrélé négativement au rendement en tubercules (Raffaillac et Nédélec, 1985).

Les effets respectifs de l'azote et du potassium sont à mettre à profit soit pour favoriser la production de tubercules, soit pour assurer avant tout le développement des aériens au détriment du compartiment racines sur des parcelles séparées qui deviennent alors exclusivement parc à bois. Wholey (1980) note une amélioration sensible de la qualité

des boutures de cette façon en Colombie. Egle (1992) relève au Togo de profonds écarts dans la composition des boutures issues de parcelles dont le statut chimique est très différent.

A côté des effets sur le niveau des rendements, les propriétés chimiques du sol ont des répercussions sur la qualité des tubercules produits. L'apport de potassium diminuerait le taux d'HCN (Bruijn, 1971) ou serait sans effet (Obigbesan, 1978). Au Togo, un sol contenant 0,07 meq/100 g de potassium produit des tubercules à 35 % de matière sèche alors qu'une teneur de 0,45 meq/100 g détermine un taux de 29,5 % (Egle, 1992) : la perte de rendement observée est en partie compensée par une meilleure qualité. Par ailleurs, la morphologie des tubercules est affectée par la richesse du sol chez deux variétés testées : ainsi chez la variété 312-524, un tubercule de 500 grammes, produit sur un sol cultivé chaque année et sans fertilisant pendant 17 ans, a en moyenne une longueur de 46 cm et un diamètre de 40 mm ; sur ce même sol fertilisé chaque année, la longueur de cette catégorie de tubercules est de 37 cm et son diamètre est de 46 mm.

Pour les oligo-éléments, Chew *et al.* (1978) observent que sur un milieu particulier comme la tourbe, l'apport du cuivre est essentiel, à l'inverse des autres éléments Mn, Zn, Fe, Mo et B qui sont sans effet. Un apport de cuivre qui fait passer le taux de 7 à 14 ppm dans les feuilles triple le rendement.

Facteurs biotiques (maladies et parasites, adventices)

En Afrique, certains des problèmes phytosanitaires parmi les plus sévères actuellement sont liés à leur introduction récente et accidentelle : ces maladies et parasites ont pu proliférer dans des agrosystèmes en l'absence de contrôles naturels ou d'équilibre entre eux et la plante et le milieu. Introduits au début des années 1970, la cochenille farineuse du manioc (*Phenacoccus manihoti*), les acariens verts (*Mononychellus tanajoa* ou *M. progresivus*) et la bactériose (*Xanthomonas campestris* pv. *manihotis*) sont les problèmes phytosanitaires les plus sérieux sur ce continent, à côté de la mosaïque africaine du manioc, maladie virale transmise par la mouche blanche *Bemisia tabaci*. Ces parasites et maladies peuvent se succéder ou s'associer au cours d'un même cycle cultural puisque les cochenilles se développent en saison sèche de même que les acariens, la bactériose intervenant en saison des pluies ; la mosaïque africaine présente les symptômes les plus sévères au moment des pluies bien qu'elle soit observable tout au long du cycle. Par ailleurs, des maladies fongiques peuvent localement causer de grosses pertes de rendement comme dans la région des plateaux du Togo.

Les estimations de pertes de rendement associées à l'une ou plusieurs de ces contraintes varient beaucoup selon les auteurs ; elles dépendent souvent des variétés employées, du calage du cycle cultural sur le cycle climatique et des conditions de culture. Lorsque la récolte intervient tôt après les dégâts occasionnés par la maladie ou le parasite, la perte de rendement enregistrée peut alors être très sévère car il y a utilisation des réserves amyliacées dans les racines pour la repousse de nouveaux aériens. Une fois la partie aérienne redevenue fonctionnelle pour l'élaboration de

nouvelles réserves pendant une période suffisante, les pertes peuvent être nulles.

Les méthodes de lutte ont d'abord fait appel à la sélection variétale et aux techniques culturales pour ensuite se tourner surtout vers la lutte biologique. Certaines des variétés créées par l'IITA présentent une très bonne tolérance aux maladies et parasites, telle TMS 30.572 qui offre par ailleurs l'avantage d'être bien acceptée par les producteurs contrairement à d'autres comme TMS 4(2)1425. Des lâchers d'un parasite de la cochenille, *Epidinocarsis lopezi*, découvert en Amérique du Sud et élevé au Bénin, ont donné des résultats économiques positifs au Ghana et en Côte d'Ivoire (IITA, 1992).

Les adventices qui se développent en début de cycle agissent plus ou moins fortement sur la mise en place de la culture de manioc (structure du peuplement, croissance...) selon leur nature. Godfrey-Sam-Agry (1978) note que la période critique pour désherber en Sierra Leone, où le problème majeur est *Rottboellia exaltata*, se situe à 45 jours après plantation ; le délai entre plantation et premier désherbage à la main combiné à la fréquence des interventions joue sur le nombre et le remplissage des racines. Au CIAT en Colombie, Doll et Piedrahita (1978) notent que la période critique pour supprimer toute compétition avec *Cyperus rotundus*, *Rottboellia exaltata*, *Sorghum alepense* et *Ipomoea* sp. se situe entre 60 et 120 jours selon les quantités. Au Nigéria, il n'y a pas de perte de rendement liée aux adventices au-delà de huit semaines après plantation. A côté de l'objectif de réduction des pertes de rendement, le contrôle précoce et régulier de l'enherbement est également essentiel pour produire un grand nombre de boutures de qualité pour le diamètre et le nombre de nœuds (Leihner, 1983).

La nature des adventices, le niveau de fertilité du sol, la densité de plantation et l'architecture des tiges du manioc sont les facteurs à prendre en compte pour limiter la compétition avec les adventices. Doll et Piedrahita (1978) classent l'application de diuron complétée par un sarclage manuel comme la meilleure façon de limiter les mauvaises herbes. Un traitement à la trifluraline ou à l'oxyfluorène donne les meilleurs résultats au sud de la Côte d'Ivoire où domine *Panicum maximum*, alors qu'en zone centre Côte d'Ivoire, le mélange atrazine + metolachlore est plus efficace.

Cultures associées

La plupart des recherches sur le fonctionnement du couvert et les systèmes de cultures ont porté sur des cultures pures de manioc. Cependant, l'association du manioc à d'autres vivriers est très répandue à travers le monde et peut modifier l'impact du milieu sur l'élaboration du rendement. Les associations doivent être appréciées par rapport aux objectifs des agriculteurs : calendrier des travaux, valorisation de la main-d'œuvre et de la terre, calendriers alimentaires, stratégies antirisque...

Dans ce domaine, les données de la littérature concernent surtout les problèmes de compétitions pour la lumière et la nutrition minérale. Au Nigéria en milieu paysan, une jachère de 3 à 5 ans après un à trois ans de culture associée manioc-maïs reste insuffisante pour maintenir des niveaux de production corrects sans fertilisation minérale (Aweto *et al.*, 1992). Le fait de rajouter du gombo et du melon dans l'association manioc-maïs ne modifie pas le rendement du

manioc ; par contre rajouter de l'arachide entraîne une diminution du rendement alors que l'association manioc-arachide est sans effet (Ikeorgu *et al.*, 1990). Pour d'autres conditions expérimentales, l'association d'une légumineuse ne modifie pas le rendement du manioc et diminue de 50 % le coût du désherbage (Ashokan *et al.*, 1985). Le port de la plante est important pour choisir la meilleure densité de plantation dans l'association manioc-maïs. Dans l'association manioc-soja en Australie, l'apport d'azote limite la tubérisation. Le soja réduit la croissance du manioc mais après la récolte du soja, la redistribution des assimilats est augmentée au profit des tubercules de telle sorte que le rendement final n'est pas affecté par rapport à la culture pure. Au Pérou, Benitès *et al.* (1993) observent également l'absence de réponse à l'azote du manioc en culture associée alors qu'en culture pure le gain de rendement est de 40 %. En Australie, l'apport d'azote améliore la compétitivité du manioc sur le pois d'Angole en favorisant le développement des aériens, sans augmentation de rendement. L'association avec du soja peut augmenter la tubérisation, mais l'apport d'azote favorise alors la partie aérienne sans gain de rendement tout en limitant le soja (Cenpukdee et Fukai, 1992). Au Nigéria, Hulugalle *et al.* (1994) observent qu'en culture associée manioc-maïs-melon sans travail du sol, l'infiltration de l'eau est favorisée et l'érosion reste négligeable ; le rendement du manioc est cependant réduit de 19 %. Zuofa *et al.* (1992) soulignent l'intérêt de rajouter melon, niébé et arachide à l'association manioc-maïs pour un meilleur contrôle de l'enherbement et réduire les risques d'érosion malgré la baisse de rendement du manioc. En Colombie, l'association manioc-niébé présente l'avantage de limiter les pertes de rendement dues aux attaques de l'aleurode *Aleurotrachelus socialis* (Gold *et al.*, 1989).

La durée du cycle cultural

Une fois arraché, le tubercule de manioc devient très rapidement périssable : il est nécessaire de le transformer dans les 72 heures. Il existe plusieurs méthodes pour prolonger la durée d'utilisation du tubercule frais ou sec. Mais la meilleure façon de conserver du manioc est le plus souvent de laisser la culture en place. Il n'y a en effet pas de stade de maturité bien déterminé : autour d'une date optimale quant aux critères de qualité souhaitée pour une même variété en un lieu donné (teneur en amidon, grosseur des grains pour l'industrie, pourcentage de fibres pour l'alimentation, teneur en eau, teneur en HCN), il existe une période de plusieurs semaines, voire plusieurs mois selon le milieu, pendant laquelle les caractéristiques des tubercules restent acceptables selon le degré des exigences. Ce sont surtout les problèmes post-récolte (accès aux marchés, besoins pour la consommation, possibilités d'usinage...) qui fixeront pour partie la date de récolte en interaction avec les temps de travaux. Nweke *et al.* (1994a) montrent ainsi que la durée du cycle du manioc est déterminée principalement par l'accès au marché et la pression démographique des villages pour plusieurs pays africains.

Cependant certaines caractéristiques du milieu exigent des récoltes à dates impératives : c'est le cas lorsqu'il y a développement de champignons pathogènes sur les tubercules à la reprise des pluies. La température est un facteur qui impose parfois la prolongation d'un cycle cultural sur deux années comme dans les zones à climat tropical d'altitude de Madagascar (lac Alaotra) où la saison froide (moyenne

minima de 14,5°C) et sèche dure de cinq à six mois. Dans ce cas, le choix variétal est très dépendant du milieu : les premiers travaux de sélection dans ce pays (Cours, 1951) se sont attachés à rechercher des variétés à cycles court (10 à 12 mois) ou long (24 à 27 mois) selon la zone de culture.

La diversité des systèmes de culture à base manioc

Entre des cultures de jardin comme en Indonésie, où l'on peut aisément tripler la production par des techniques sophistiquées comme la greffe de *Manihot glazowii* sur des variétés appréciées pour leur qualité (système Mukibat), et des grandes plantations agro-industrielles existant partout à travers le monde où la mécanisation s'impose pour tous les postes, la diversité des systèmes de culture à base manioc est grande, que les peuplements soient mono ou plurispécifiques.

La recherche d'un approvisionnement régulier et de qualité pour une transformation en usine conduit parfois les planificateurs à combiner des plantations paysannes plus ou moins encadrées et des unités agro-industrielles comme en région centre de la Côte d'Ivoire (Pouzet, 1989). En effet le déclin d'une production assurée uniquement par de petits producteurs sans encadrement peut contribuer à l'arrêt d'unités de transformation comme cela a été le cas au sud du Togo pour l'usine de Ganavé. Mais ce sont, bien avant tout, les débouchés offerts aux producteurs qui régleront les niveaux et les qualités de la production de manioc. Au Nigéria, ce sont des jeunes agriculteurs et des immigrés récents, produisant sur des superficies plus grandes du manioc pour la commercialisation, qui adoptent les nouvelles variétés productives et tolérantes aux maladies, telle TMS 30.572, alors que les petits producteurs n'assurent que les besoins familiaux sans pratiquer les nouvelles techniques (Polson et Spencer, 1991).

Le fait que le manioc tolère de grandes périodes de sécheresse et résiste relativement bien aux problèmes phytosanitaires de tous ordres conduit certains auteurs à promouvoir sa culture dans des zones marginales de l'est et du sud de l'Afrique, là où les autres vivriers ont tendance à disparaître, afin de mieux assurer la sécurité alimentaire (Romanoff et Lynam, 1992).

Références bibliographiques

- ALLEM A. C., 1994. The origin of *Manihot esculenta* Crantz (Euphorbiaceae). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 41, 133-150.
- ALVAREZ M. N., MULINDANGABO J., 1991. Production de manioc au Rwanda : techniques de pointes. In *Plantes-Racines Tropicales : les plantes racines et la crise alimentaire en Afrique. Troisième symposium ISTRC-branche Afrique, août 1986, Owerri, Nigeria*, éd. CRDI, 199-204.
- ASHOKAN P. K., VIKRAMAN NAIR R., SUDHAKARA K., 1985. Studies on cassava-legume intercropping systems for the Oxisols of Kerala State, India. *Trop. Agric. Trinidad*, 62 (4) : 313-318.

- AWETO A. O., OBE O., AYANNIYI O. O., 1992. Effects of shifting and continuous cultivation of cassava (*Manihot esculenta*) intercropped with maize (*Zea mays*) on a forest alfisol in south-western Nigeria. *J. of Agric. Sci., Cambridge*, 118 : 195-198.
- BAKER G. R., FUKAI S., WILSON G. L., 1989. The response of cassava to water deficits at various stages of growth in the subtropics. *Aust. J. Agric. Res.*, 40 : 517-528.
- BENITES J. R., MC COLLUM R. E., NADERMAN G. C., 1993. Production efficiency of intercrops relative to sequentially-planted sole crops in a humid tropical environment. *Field Crops Research*, 31, 1618.
- BRUIJN G. H. de, 1971. Etude du caractère cyanogénétique du manioc (*Manihot esculenta* Crantz). *Meded. Landbouwhogeschool, Wageningen*, 71-13, 140 p.
- CARTER S. E., FRESCO L. O., JONES P. G., 1992. An atlas of cassava in Africa. Historical, agroecological and demographic aspects of crop distribution. CIAT, Cali, Colombie, 86 p.
- CATANO A. H. O., PEREZ E. C. A., DIAZ D. A., 1983. Evaluation de tres sistemas de preparación del suelo para cuatro materiales de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Acta Agron.*, 33 (4) : 23-32.
- CENPUKDEE U., FUKAI S., 1992. Cassava/legume intercropping with contrasting cassava cultivars. 1- Competition between component crops under three intercropping conditions. *Field Crops Research*, 29 : 113-133.
- CHEW W. Y., JOSEPH K. T., RAMLI K., 1978. Influence of soil-applied micronutrients on cassava (*Manihot esculenta*) in Malaysian tropical oligotrophic peat. *Expl. Agric.*, 14 : 105-111.
- COCK J. H., EL-SHARKAWY M. A., 1985. The physiological basis of cassava to stress. in actes du 7ème Symposium ISTRC, Gosier, Guadeloupe, Juillet 1985, INRA éd., 10 p.
- COCK J. H., 1979. Cassava research. *Field Crops Research*, 2 : 185-191.
- COCK J. H., 1985. Cassava. New potential for a neglected crop. IADS series, CIAT, GTZ, Westview press, Boulder and London, 191 p.
- COCK J. H., FRANKLIN D., SANDOVAL G., JURI P., 1979. The Ideal Cassava Plant for Maximum Yield. *Crop Science*, 19 (3-4) : 271-279.
- COURS G., 1951. Le manioc à Madagascar. Mémoire de l'institut scientifique de Madagascar. Sér. B, tome III, Fascicule 2 : 203-400.
- DAS GUPTA D. K., 1976. Effects of cycocel on crop plants in Sierra Leone. II. Cassava (*Manihot esculenta*). *Expl. Agric.*, 12 : 321-328.
- DOLL J. D., PIEDRAHITA W. C., 1978. Methods of weed control in cassava. CIAT éd., 05EW-3, Cali, Columbia, 12 p.
- DULONG R., 1971. Le manioc à Madagascar. *L'Agronomie Tropicale*, 26 (8) : 791-828.
- EDWARDS D. G., KANG B. T., 1978. Tolerance of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) to high soil acidity. *Field Crops Research*, 1 : 337-346.
- EGLE K., 1992. Etude de la variabilité des composantes du rendement du manioc (*Manihot esculenta* Crantz, var. 312-524) en fonction de la fertilité du sol. Mémoire 91-08 d'Ingénieur Agronome, Ecole Supérieure Agronomique de l'Université du Bénin, ORSTOM, laboratoire d'agronomie, Lomé, Togo, 111 p.
- EL-SHARKAWY M. A., 1993. Drought-tolerant cassava for Africa, Asia, and latin-America. *Bioscience*, 43 (7) : 441-451.
- EL-SHARKAWY M. A., COCK J. H., HELD A. A., 1984. Photosynthetic responses of cassava cultivars (*Manihot esculenta* Crantz) from different habitats to temperature. *Photosynthesis Research*, 5 : 243-250.
- ENYI B. A. C., 1972. The effects of spacing on growth, development and yield of single and multi-shoot plants of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). 1. Root tuber yield and attributes. *East Afr. Agric., Forest*, 1 : 23-26.
- ENYI B. A. C., 1973. Growth rates of three cassava varieties (*Manihot esculenta* Crantz) under varying population densities. *J. agric. Sci., Camb.*, 81 : 15-28.
- FUKAI S., ALCOY A. B., LLAMELO A. B., PATTERSON R. D., 1984. Effects of solar radiation on growth of cassava (*Manihot esculenta* crantz.). I. Canopy development and dry matter growth. *Field Crops Research*, 9 : 347-360.
- GODFREY-SAM-AGREY W., 1978. Effects of delayed hand weeding on sole-crop cassava in Sierra Leone. *Expl. agric.*, 14 : 245-252.
- GOLD C. S., ALTIERI M. A., BELLOTI A. C., 1989. Effects of inter-crop competition and differential herbivore numbers on cassava growth and yields. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 26 : 131-146.
- HAGENS P., SITTIBUSAYA C., 1990. Short and long term aspects of fertilizer application on cassava in Thailand. in proceedings of the 8th symposium of ISTRC, nov. 1988, Bangkok, Thailand, p : 244-258.
- HOWELER R. H., CADAVID L. F., 1990. Short-and long-term fertility trials in Colombia to determine the nutrient requirements of cassava. *Fertilizer Research*, 26 : 61-80.
- HOWELER R. H., 1991. phosphore Long-term effect of cassava cultivation on soil productivity. *Field Crops Research*, 26 : 1-18.
- HOWELER R. H., EZUMAH H. C., MIDMORE D. J., 1993. Tillage systems for root and tuber crops in the tropics. *Soil, Tillage Research*, 27 (1-4) : 211-240.
- HULUGALLE N. R., NDI J. N., 1993. Effects of no-tillage and alley cropping on soil properties and crop yields in a typic kandiudult of southern Cameroon. *Agroforestry Systems*, 22 (3) : 207-220.
- HULUGALLE N. R., EZUMAH H. C., LEYMAN T., 1994. Changes in surface soil properties of a no-tilled tropical alfisol due to intercropping maize, cassava and egusi melon. *Field Crops Research*, 36 (3) : 191-200.
- HUNT L. A., WHOLEY D. W., COCK J. H., 1977. Growth physiology of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Field Crop Abstracts*, 30 (2) : 77-91.
- I.I.T.A., 1992. Lutte biologique contre la cochenille farineuse du manioc : l'IITA répond aux critiques. *Afrique Agriculture*, 189 : 43-44.
- IKE I. F., THURTELL G. W., 1981. Response of Indoor-Grown Cassava to Water Deficits and Recovery of Leaf Water Potential and Stomatal Activity after Water Stress. *Journal of Experimental Botany*, 32 (130) : 1029-1034.
- IKEORGU J. E. G., ODURUKWE S. O., 1990. Increasing the productivity of cassava/maize intercrops with groundnuts (*Arachis hypogaea* L.). *Trop. Agric. (Trinidad)*, 67 (2) : 164-168.
- IRIKURA Y., COCK J. H., KAWANO K., 1979. The physiological basis of genotype-temperature interactions in cassava. *Field Crops Research*, 2 : 227-239.
- KANG B. T., OKEKE J. E., 1983. Nitrogen and Potassium Responses of Two Cassava Varieties Grown an Alfisol in Southern Nigeria. Abstract in 6ème Symposium, ISTRC, Lima, Pérou, CIP, p. : 231-237.
- KANG B. T., 1984. Potassium and magnesium responses of cassava grown in Ultisol in Southern Nigeria. *Fertilizer Research*, 5 : 403-410.
- KANG B. T., ISLAM R., SANDERS F. E., AYANABA A., 1980. Effect of phosphate fertilization and inoculation with va-mycorrhizal fungi on performance of cassava (*Manihot esculenta* crantz) grown on an alfisol. *Field Crops Research*, 3 : 83-94.
- KASELE I. N., HAHN S. K., OPUTA C. O., VINE P. N., 1983. Effects of shade, nitrogen, and potassium on cassava. in *Tropical Root*

Crops: Proceedings of the second Triennial Symposium of ISTRC. Africa Branch, Cameroun, IDRC éd., p. : 55-58.

KAYODE G. O., 1983. Effects of various planting and harvesting times on the yield, HCN, dry-matter accumulation and starch content of four cassava varieties in a tropical rainforest region. J. agric. Sci., Camb., 101 : 633-636.

KEATING B. A., EVENSON J. P., FUKAI S., 1982. Environmental effects on growth and development of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.). III. assimilate distribution and storage organ yield. Field Crops Research, 5 : 293-303.

LABROUSSE, 1993. Typologie des problèmes spécifiques à la Zone Tropicale Humide (écologie, systèmes agraires). Caisse française de Développement, BDPA-SCETAGRI-GRET, Paris, 74 p.

LEIHNER D. E., 1983. The Production of Planting Material in Cassava : Some Agronomic Implications.- Abstract in 6ème Symposium ISTRC, Lima, Pérou, CIP, p. : 247-255.

Leihner D. E., Ernst R., Kang B. T., 1990. Effect of alley cropping with *Leucocephala* and *Cajanus cajan* on growth and yield of cassava in Bénin, West Africa. in proceedings of the 8th symposium of ISTRC, nov. 1988, Bangkok, Thailand, p. : 278-286.

LOCKARD R. G., SAQUI M. A., WOUNUAH D. D., 1985. Effects of time and frequency of leaf harvest on growth and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in Liberia. Field Crops Research, 12 : 175-180.

LOWE S. B., MAHON J. D., HUNT L. A., 1976. The effect of day-length on shoot growth and formation of root tubers in young plants of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). Plant Science Letters, 6 : 57-62.

LOWE S. B., MAHON J. D., HUNT L. A., 1982. Early development of cassava (*Manihot esculenta*). Can. J. Bot. 60 : 3040-3048.

MADUAKOR H. O., 1993. Effect of Soil Compaction on Leaf, Stem and Fibrous Root Growth of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz). Soil, Tillage Research, 26 (1) : 69-78.

MANRIQUE L. A., 1985. Effect of extreme soil acidity conditions on plant growth and yield of cassava. Commun. in soil Sci. Plant Anal., 16 (9) : 959-970.

MANRIQUE L. A., 1990. Effects of nitrogen fertilization on growth and yield of cassava in Hawaii : I.- Dynamics of soil nitrogen. II.- Dry matter production. Commun in Soil Sci. Plant Anal. 21 (13-1) : 1803-1816.

MANRIQUE L. A., 1992. Growth and yield performance of cassava grown at three elevations in Hawaii. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 23 (1-2) : 129-141.

NJOKU B. O., ENWEZOR W. O., 1991. Differential response of four cassava cultivars (*Manihot esculenta*) to liming of two acid soils in pot and field experiments. Field Crops Research, 28 : 163-172.

NWEKE F. I., DIXON A. G. O., ASIEDU R., FOLAYAN S. A., 1994a. Cassava varietal needs of farmers and the potential for production growth in Africa. COSCA working paper 10, IITA, Ibadan, Nigeria, 239 p.

NWEKE F. I., OKORJI E. C., NJOKU J. E., KING D. J., 1994b. Expenditure elasticities of demand for major food items in South-East Nigeria. Trop. Agric., 71 (3) : 229-234.

OBIGBESAN G. O., FAYEMI A. A. A., 1976. Investigations on Nigerian root and tuber crops. Influence of nitrogen fertilization on the yield and chemical composition of two cassava cultivars (*Manihot esculenta*). J. agric. Sci., Camb., 86 : 401-406.

OBIGBESAN G. O., 1978. Recherches sur les plantes à tubercules du Nigéria : effet du potassium sur la croissance, le rendement, les teneurs en amidon, en cyanure (HCN), sur l'absorption des éléments nutritifs chez diverses variétés de manioc (*Manihot esculenta*). Revue de la Potasse, 27/85 (11) : 1-11.

OKEKE J.E., KANG B. T., OBIGBESAN G. O., 1982. Effects of fertilizers and plant age on distribution of nutrients in nigerian cassava (*Manihot esculenta*). Expl. Agric., 18 : 403-411.

POLSON R. A., SPENCER D. S. C., 1991. The technology adoption process in subsistence agriculture : the case of cassava in South-western Nigeria. Agricultural Systems, 36 : 65-78.

POUZET D., 1989. Amélioration de la culture mécanisée du manioc en Côte d'Ivoire. Collection mémoires, travaux du CIRAD-CA/IRAT, Paris, 212 p.

RAFFAILLAC J. P., NÉDÉLEC G., 1985. Fertilisation du manioc en Basse Côte d'Ivoire : étude de cas. in actes du séminaire IMPHOS sur la production, le maintien de la fertilité des sols, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, IMPHOS éd., Casablanca, Maroc, p. : 223-231.

RAFFAILLAC J. P., NÉDÉLEC G., 1986. Comportement de 10 clones de manioc dans les conditions édapho-climatiques du sud de la Côte d'Ivoire. Document ORSTOM multigraphié, Adiopodoumé, Côte d'Ivoire, 19 p.

RAFFAILLAC J. P., NÉDÉLEC G., 1987. Quelques effets de la mosaïque africaine du manioc sur les premiers stades de croissance du manioc. in La Mosaïque Africaine du Manioc, son contrôle. collection colloques, séminaires, ORSTOM, CTA éd., actes du séminaire de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, mai 1987, p. : 267-275.

RAFFAILLAC J. P., 1985. Pluviométrie, qualité de la production chez le manioc dans le sud de la Côte d'Ivoire. in Eau, Développement Agricole, ORSTOM, Adiopodoumé, Côte d'Ivoire, p. : 78-81.

RAFFAILLAC J.-P., 1992. Enracinement de la bouture de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) au cours des premières semaines de croissance. L'Agronomie Tropicale, 46 (4) : 273-281.

RAFFAILLAC J.-P., 1995. Le rôle de la densité de plantation dans l'élaboration du rendement d'une parcelle de manioc. Communication au séminaire de la sous-commission agronomie de l'ORSTOM, Montpellier, sept. 1994, à paraître dans la collection ORSTOM colloques, séminaires.

RAFFAILLAC J.-P., AKAKPO K. E., EGLE K., TOUGNON K., 1994. Rapport de synthèse du programme DRS 103 sur l'adaptabilité variétale du manioc, de la patate douce à 5 zones écologiques du Togo. Partie 1 : le manioc. Doc. DRS/INCV/ORSTOM, Lomé, Togo, 10 p.

RAMANUJAM T., JOS J. S., 1984. Influence of light intensity on chlorophyll distribution and anatomical characters of cassava leaves. Turrialba, 34 (4) : 457-471.

RAMANUJAM T., 1990. Effect of moisture stress on photosynthesis and productivity of cassava. Photosynthetica, 24 (2) : 217-224.

ROMANOFF S., LYNAM J., 1992. Commentary. Cassava and african food security : some ethnographic examples. Ecology and Food Nutrition, 27 : 29-41.

TARDIEU M., FAUCHE J., 1961. Contribution à l'étude des techniques culturales chez le manioc. L'Agronomie Tropicale, 16 (4) : 375-386.

TITAPIWATANAKUN B., 1995. Ten years down the road : the cassava starch industry in Thailand. cassava Newsletter, 19 (1) : 4-5.

TORO J. C. M., 1979. Three Years Of Cassava Technology Evaluation In Colombia. Field Crops Research, 2 : 291-308.

TSAY J. S., FUKAI S., WILSON G. L., 1989. Growth and yield of cassava as influenced by intercropped soybean and by nitrogen application. Field Crops Research, 21 : 83-94.

VINE P. N., AHMAD N., 1987. Yield development in cassava under different soil physical conditions. Field Crops Research, 17 : 175-198.

VRIES DE C. A., FERWERDA J. D., FLACH M., 1967. Choice of food crops in relation to actual and potential production in the tropics. *Neth. J. Agric. Sci.*, 15 : 241-248.

WHOLEY D. W., 1980. Fertilize cassava to produce better quality planting material ? *Tropical Root and Tuber Crops Newsletter*, 11 : 17-20.

WHYTE J. B. A., 1987. Breeding cassava for adaptation to environmental stress. In *Cassava breeding: a multidisciplinary review*. Pro-

ceedings of a workshop held in the Philippines, march 1985, C. H. HERSHLEY ed., CIAT, Cali; Colombia, p. : 147-176.

WILLIAMS C. N., 1972. Growth and productivity of tapioca (*Manihot Utilissima*). III. Crop Ratio, Spacing and Yield. *Exp. Agric.*, 8 : 15-23.

ZUOFA K., TARIAH N. M., ISIRIMAH N. O., 1992. Effects of groundnut, cowpea and melon on weed control and yields of intercropped cassava and maize. *Field Crops Research*, 28 : 309-314.

Pôle 4

MODAC = E et D CIRAD

Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides



CIRAD ■ Ministère de la coopération

Actes du séminaire
13-17 novembre 1995
Montpellier, France

Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides

Editeurs scientifiques :
Jean Pichot, Nicole Sibelet, Jean-Joseph Lacœuilhe

Centre de coopération internationale en recherche agronomique
pour le développement
Ministère de la coopération

Actes du séminaire
13-17 novembre 1995, Montpellier, France