

MINISTÈRE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE,
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
(M.E.S.S.R.S)

BURKINA FASO
Unité – Progrès – Justice

.....
UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE DE
BOBO-DIOULASSO (U.P.B)

.....
INSTITUT DU DEVELOPPEMENT
RURAL (I.D.R)

.....
DEA Gestion Intégrée des Ressources
Naturelles (GIRN)



MEMOIRE

Présenté par :

DABIRE Anthierley Prosper

Pour l'obtention du :

**Diplôme d'Etudes Approfondies en Gestion Intégrée des
Ressources Naturelles**

Spécialité : Systèmes de production végétale

Option : Sciences des sols

Thème :

*Evaluation du Potentiel Infectieux Mycorhizogène de sols du
Burkina Faso par la mesure de la nodulation rhizobienne et
l'activité fonctionnelle de la microflore mycorhizosphérique*

Soutenu le 27 Mars 2007, devant le Jury composé de :

Président :

Prof. Michel P. SEDOGO, Directeur de Recherche, CNRST/INERA

Membres :

Prof. Victor HIEN, Directeur de Recherche, CNRST / INERA

Dr. Robin DUPONNOIS, Directeur de Recherche, IRD

Dr. Antoine SOME, Maître Assistant, Université de Bobo-Dioulasso

Dr. Bismarck H. NACRO, Maître Assistant, Université de Bobo-Dioulasso

TABLE DES MATIERES.

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
SIGLES ET ABREVIATIONS.	III
LISTES DES TABLEAUX.	IV
LISTES DES FIGURES.	V
LISTES DES FIGURES.	V
RESUME	VI
SUMMARY	VII
INTRODUCTION.	1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE.	3
I. NOTION SUR LA FERTILITE DU SOL.	3
1.1. Concepts et définitions.	3
1.2. Fertilité physique.	4
1.3. Fertilité chimique.	4
1.4. Fertilité biologique.	5
II. CHAMPIGNONS MYCORHIZIENS ET FERTILITE DU SOL.	5
2.1. Concepts et définitions.	5
2.2. Rôle agronomique et écologique des champignons mycorhiziens.	7
2.3. Actions des mycorhizes sur les propriétés physico-chimiques du sol.	8
2.4. Actions sur les propriétés biologiques du sol.	9
2.4.1. Effets des microorganismes rhizosphériques sur les MVA.	9
2.4.2. Effets des CMA sur les microorganismes mycorrhizosphériques.	10
2.4.3. Interactions Rhizobium-CMA.	10
III. INDICATEURS DE LA FERTILITE BIOLOGIQUE DES SOLS.	11
3.1. Notion d'indicateur biologique.	12
3.2. Principaux indicateurs biologiques.	12
3.2.1. La biomasse microbienne du sol.	12
3.2.2. La diversité microbienne.	13
3.2.3. Les activités microbiennes.	13
3.3. Le Potentiel Infectieux Mycorrhizogène (PIM).	13
CHAPITRE II: MATERIEL ET METHODES D'ETUDES.	14
I. CONTEXTE DE L'ETUDE.	14
1.1. Zone de Ouagadougou.	14
1.2. zone de Ouahigouya (Province du Yatenga).	14
1.3. Objectifs et hypothèse de travail.	15
1.4. Résultats attendus.	16

III. MATERIEL D'ETUDE.	17
3.1. Les sols.	17
3.2. Le matériel végétal.	17
3.3. L'inoculum fongique.	18
IV. METHODES D'ETUDES.	18
4.1. Détermination du PIM.	18
4.1.1. Détermination du PIM par le test biologique : Méthode de Plenchette.	18
4.1.2. Extraction des spores de champignons.	19
4.2. Mise en évidence de relations entre le PIM, les caractéristiques physico-chimiques et les profils cataboliques de chaque sol testé.	19
4.2.1 Réceptivité du sol à la mycorhization.	19
4.2.2. Détermination des profils de diversité catabolique.	20
4.3. Mise en évidence de relations entre le PIM et le développement de la nodulation chez une légumineuse.	20
4.4. Analyses statistiques	20
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION.	21
I. RESULTATS.	21
1.1. Détermination du PIM des sols.	21
1.2. Réceptivité du sol à la mycorhization et relation entre PIM et caractéristiques physico-chimiques du sol.	23
1.3. Mise en évidence de relation entre PIM et activité catabolique microbienne.	27
1.4. Mise en évidence de relation entre le PIM et la nodulation rhizobienne.	30
1.5. Mise en évidence de relations entre l'inoculation mycorhizienne et l'activité catabolique microbienne.	32
1.6. Identification d'indicateurs pour l'évaluation du PIM des sols.	33
RECAPITULONS.	35
II. DISCUSSION.	36
CONCLUSION GENERALE.	40
BIBLIOGRAPHIE.	42

DEDICACE

A mon Epouse Denise OUATTARA
Et
A mon père Sié Didier DABIRE

« Le peu que je sache, je veux le faire connaître, afin qu'un autre, meilleur que je suis, découvre la vérité, et que l'œuvre qu'il poursuit sanctionne mon erreur. Je m'en réjouirai pour avoir été, malgré tout, cause que cette vérité se fasse jour. » Albrecht Dürer

REMERCIEMENTS

Le présent document est le fruit d'un dur labeur, le couronnement des efforts et sacrifices de mes encadreurs. J'ai appris à travers ce long chemin de la connaissance, qu'en plus de la volonté et de la soif du savoir, l'apport et le soutien des autres est d'une importance capitale. C'est à cet effet que j'aimerais adresser mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce travail.

- Au Dr Robin DUPPONOIS et Dr Victor HIEN, j'adresse ma reconnaissance pour leur confiance et leurs sages conseils, critiques et suggestions. Je salue le sacrifice consenti malgré leurs multiples occupations ;
- A Ardiouma DIALLO, Chef de la scolarité de l'IDR, je salue sa bienveillance et son amour. Lui qui n'a point hésité à me soutenir dans les moments critiques de cette année de DEA, je lui dois tout pour m'avoir permis de sauver l'année ;
- Mes reconnaissances au Dr Dominique MASSE qui m'a permis de découvrir beaucoup de choses en suscitant en moi la réflexion et la curiosité ;
- Je remercie le Dr Ablassé BILGO pour sa sympathie et ses observations constructives ;
- Mes remerciements à Théodore KABORE pour son soutien moral, ses conseils et pour avoir accepté corriger mon document ;
- Ma reconnaissance à Michaël Magloire KABORE qui malgré ses occupations a bien voulu lire et corriger le document ;
- Je salue l'enthousiasme, la convivialité et la sympathie du personnel de l'IRD, particulièrement Sékou SY, BARRY, Pascal ZAN, Sadaré Prosper SAVADOGO, Sibiri SIRI. Ils ont été d'un grand soutien dans mes manipulations ;
- Je salue la collaboration franche de Scheik SANGARE, mon compagnon de lutte. Nous avons partagé ensemble joies et souffrances et je le suis reconnaissant pour son soutien dans les moments difficiles ;
- Au Dr Bismark NACRO, je suis reconnaissant pour ses encouragements, ses conseils lors de ses passages à l'IRD, notre lieu de stage ;
- J'adresse mes sincères remerciements aux frères et sœur du Bon Berger pour leur soutien constant dans la prière ;

Je ne saurai citer tous les noms, mais à tous ceux qui ont œuvré de près ou de loin, j'adresse mes sincères gratitude. Que Le Tout Puissant bénisse vos efforts, Amen

SIGLES ET ABREVIATIONS.

CMA : Champignon Mycorhizien à Arbuscules

FM : Fréquence Mycorhizogène

Mg : Magnesium

MSA : Matière Sèche Aérienne

MSR : Matière Sèche Racinaire

MVA : Mycorhizes à Vésicules et Arbuscules

N : Azote

P : Phosphore

PCR : Polymerase Chain Reaction

PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobia

PIM : Potentiel Infectieux Mycorhizogène

S : Souffre

LISTES DES TABLEAUX.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques des sols désinfectés ou non. -----	17
Tableau 2 : Correlation de Pearson montrant les relations entre les différents types de spores et les caractéristiques physico-chimiques du sol. -----	22
Tableau 3 : Determination du PIM des sols après deux semaines de culture sous serre avec le mil comme plante test. -----	22
Tableau 4 : Valeurs moyennes de la matière sèche aérienne, racinaire et de la frequence mycorhizogène apres 2 mois de culture sous serre avec du mil inoculé par <i>G. intraradices</i> . -----	24
Tableau 5 : Effet du nombre de propagules infectives sur la croissance et la mycorhization du mil apres 2 mois de culture sous serre. -----	24
Tableau 6 : Degagement cumulé de CO ₂ , richesse catabolique, indice de diversité et équitabilité de l'activite catabolique dans les sols. -----	27
Tableau 7 : Coefficient de correlation (R ²) entre les différents groupes d'acides organiques, le CO ₂ cumule et les caractéristiques physico-chimiques du sol non désinfecté -----	30
Tableau 8 : Croissance du niébé inoculé ou non avec <i>G. intraradices</i> après 2 mois de culture sous serre. -----	31
Tableau 9 : Degagement cumulé de CO ₂ , richesse catabolique, indice de diversité et équitabilite de l'activité catabolique dans les sols. -----	33
Tableau 10 : degagement cumule de CO ₂ , richesse catabolique, indices de diversite et équitabilite de l'activite catabolique dans des sols sous niebe inocules ou non apres 2 mois de culture sous serre. -----	33
Tableau 11 : droites de regression lineaire entre le pim et quelques composantes physico-chimiques et biologiques du sol. -----	34

LISTES DES FIGURES.

Figure 1 : Représentation schématique des interactions possibles dans la mycorrhizosphère.	11
Figure 2 : Répartition des types de spores et leur cumul après extraction avec 100g de sol.	-21
Figure 3 : Relation entre le nombre de propagules, la fréquence mycorrhizogène, la matière sèche aérienne et racinaire.	-----25
Figure 4 : Relation entre le PIM et les caractéristiques physico-chimiques du sol non désinfecté.	-----26
Figure 5 : Réponse catabolique des sols aux différents substrats organiques après 4h d'incubation.	-----28
Figure 6 : Relation entre le PIM des sols et les différents groupes de substrats organiques.	-29
Figure 7 : Relation entre le PIM des sols et le cumul de l'activité biologique.	-----29
Figure 8 : Relation entre la nodulation rhizobienne, la fréquence mycorrhizogène et le PIM des sols.	-----32
Figure 9 : Schéma récapitulatif de l'ensemble des résultats montrant les relations entre PIM, spore du sol, activité catabolique, nodulation rhizobienne et caractéristiques physico-chimiques du sol.	-----35

RESUME.

Les microorganismes occupent une place importante dans les processus biologiques régissant le cycle des éléments nutritifs. Parmi ces microorganismes, les champignons mycorhiziens jouent un rôle fondamental. Le but de notre étude est d'évaluer le potentiel mycorhizien de sols du Burkina Faso par la mesure de la nodulation rhizobienne et l'activité fonctionnelle de la microflore mycorhizosphérique.

L'étude a été conduite sous serre au sein de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD Ouaga). Nous avons utilisés sept sols provenant des environs de Ouagadougou (4 sols : un amendé pendant plusieurs années avec des déchets organiques (KBS A+), un pendant une année (KBS A), un sous couvert herbacé (GPL) et un sous culture de niébé (KBSn)) et des sols de Gourga (Ouahigouya : 3 sols : un sol nu (SN), un sous zaï cultivé (ZCS) et sous zaï forestier (ZF)). Le Potentiel Infectieux Mycorhizogène (PIM) a été déterminé par un test biologique avec le mil (*Pennisetum sp*) comme plante teste, couplé avec l'extraction des spores. L'activité fonctionnelle a été évaluée via l'établissement des profils cataboliques (CPRs). La nodulation rhizobienne a été déterminée avec *Vigna unguiculata* inoculé ou non avec *Glomus intraradices*. Des analyses chimiques de sols et l'utilisation d'une régression linéaire ont permis de déterminer des indicateurs susceptibles d'évaluer le PIM des sols tropicaux. Les paramètres mesurés étaient le PIM₅₀, le nombre de spores dans les sols, le nombre et le poids sec des nodules, le dégagement de CO₂, la richesse et la diversité catabolique, la fréquence mycorhizogène, la matière sèche aérienne et racinaire. Les relations susceptibles d'exister entre les paramètres mesurés ont été analysées par des tests de corrélation.

Les résultats ont montré que les spores les plus élevés se trouvaient dans KBS A+ (719) et ZCS (425). Ces sols ont le PIM₅₀ le plus bas (KBS A+ 25,3 et ZCS 45,42). La plus forte colonisation racinaire est observée avec 100 propagules dans KBS A+(15,06%). L'inoculation a eu des effets positifs sur le nombre de nodules (-8 à +58%), le poids sec des nodules (+22 à +170%), la matière sèche aérienne (+5 à +79%), la matière sèche racinaire (+7 à +61%) et la fréquence mycorhizogène (+7 à +228%). La richesse catabolique et la diversité fonctionnelle étaient plus élevées dans KBS A (19 et 2,80) et dans KBS A+ (17 et 2,47). Dans les sols inoculés avec *Glomus intraradices*, la richesse catabolique était élevée : 20 contre 18 dans les non inoculés avec une augmentation de l'activité respiratoire de +1,2% par rapport aux non inoculés. On observe une corrélation entre le PIM des sols et le nombre total des spores, la teneur en éléments chimiques, et l'activité catabolique des microorganismes. Par contre aucune corrélation n'a été constatée entre le PIM et le nombre de nodule. Le nombre total de spores, l'activité catabolique et les éléments chimiques pris isolément expliquent plus de 60% de la variabilité du PIM avec des risques d'erreur allant de 2 à 7%. Ces résultats montrent que le PIM des sols varie selon la richesse et l'activité catabolique de la microflore mycorhizosphérique.

Mots clés : PIM, activité catabolique, nodulation rhizobienne, *Glomus intraradices*, Burkina Faso.

SUMMARY

The microorganisms have an important place in the biological processes governing the cycle of the nutritive elements. Among these microorganisms, the mycorrhiza fungi play a fundamental role. The purpose of this study is to evaluate the mycorrhiza potential of soils of Burkina Faso by the measurement of the rhizobia nodulation and the functional activity of the mycorrhizosphere microflora.

The study was conducted under greenhouse in the Institute of Research for Development (IRD Ouaga). We used seven soils coming from the surroundings of Ouagadougou (4 soils: one amended during several years with organic waste (KBS A+), during one year (KBS A), under herbaceous cover (GPL) and under culture of bin (KBSn)) and Gourga (Ouahigouya: 3 soils: a naked soil (SN), under zaï cultivated (ZCS) and zaï forest (ZF)). The Mycorrhiza Potential Infectiveness (MPI) was determined by a biological test with the millet (*Pennisetum* sp) as plant tests; coupled with spores extraction. The functional activity was evaluated via the establishment of the catabolic profiles (CPRs). The rhizobia nodulation was evaluated with *Vigna unguiculata* inoculated or not with *Glomus intraradices*. Chemical analyses of soils and the use of a linear regression made it possible to determine indicators to evaluate the MPI of the tropical soils. The measured parameters were the PIM50, the number of spores in the soils, the number and the dry weight of the nodules, the CO₂ respiration, the richness and catabolic diversity; the mycorrhiza colonisation, the leaf and root dry weight. The relations likely to exist between the measured parameters were analysed by correlation tests.

The results showed that the highest spores were in KBS A+ (719) and ZCS (425). These soils have the low PIM50 (KBS A+: 25,3 and ZCS: 45,42). Strongest root colonization is observed with 100 propagules fungi in KBS A+ (15,06%). The inoculation had positive effects on the number of nodules (-8 to +58%), the dry weight of the nodules (+22 to +170%), the leaf dry weight (+5 to +79%), the root dry weight (+7 to +61%) and the mycorrhiza colonisation (+7 to +228%). The catabolic richness and functional diversity were higher in KBS A (19 and 2,80) and in KBS A+ (17 and 2,47). In the soils inoculated with *Glomus intraradices*, the catabolic richness was high: 20 against 18 in not inoculated with an increase in the respiratory activity (+1,2%) compared to not inoculated. One observes a correlation between the MPI of the soils and the total number of the spores, the chemical elements, and the catabolic activity of the microorganisms. On the other hand, no correlation was noted between the MPI and the number of nodule. The total number of spore, the catabolic activity and the chemical elements taken only explains more than 60% of the variability of the PIM with risks of error from 2 to 7%. These results show that the MPI of the soils varies according to the richness and the catabolic activity of the mycorrhizosphere microflora.

Key words: MPI, catabolic activity, coring rhizobia nodulation, *Glomus intraradices*, Burkina Faso.

INTRODUCTION.

Dans la plupart des zones arides et semi-arides, les conditions climatiques particulières (irrégularité des pluies, longue saison sèche) sont souvent considérées comme les premiers facteurs influençant la productivité agricole (Duponnois et *al.*, 2004a). Les températures très élevées associées aux fortes précipitations sont à l'origine du lessivage des éléments minéraux du sol et de la dégradation très rapide de la matière organique. Il en résulte que ces sols sont très souvent fortement déséquilibrés, très vulnérables et éminemment fragiles. Ce déséquilibre et cette fragilité sont les facteurs limitants les plus importants de ces sols, accentués le plus souvent par un système de production traditionnel lié à des pratiques agricoles itinérantes et à une agriculture de subsistance.

Au Burkina Faso, la dégradation du sol prend de plus en plus de l'ampleur avec l'augmentation de la population. Nombreux sont les organismes qui interviennent dans la conservation et la restauration des sols. Ces programmes se sont succédés sans succès parce que mal adaptés aux conditions écologiques et socio-économiques des populations locales (Roose et *al.*, 1993). La dégradation des conditions pluviométriques constatée et la forte pression anthropique sur les ressources naturelles ont entraîné une dégradation des sols et une baisse notable des rendements. Ce qui met en péril toute capacité de développement endogène. *de quoi ?*

La restauration de la productivité des sols est une condition sine qua non pour un développement agricole durable. La jachère naturelle qui était jadis le moyen le plus utilisé pour recouvrer la fertilité des sols, est raccourci et souvent abandonnée à cause de la pression sur la terre. L'une des méthodes préconisées pour réhabiliter les sols est l'utilisation de la matière organique (Piéri, 1989 ; Celik et *al.*, 2004). Cependant, la gestion de la matière organique se pose avec acuité en terme de production (en quantité et en qualité) et d'utilisation (restitution aux sols, besoin énergétiques...). Par ailleurs les processus biologiques et certains organismes du sol ne sont pas encore mis en exergue. *est-ce la seule condition*
Or, il a été démontré que certains microorganismes en l'occurrence les champignons mycorhiziens jouaient un rôle important dans la réhabilitation des sols et la nutrition des végétaux ; d'où l'intérêt de l'association plante-champignon. Les champignons mycorhiziens semblent jouer un rôle significatif dans la production agricole (Strullu, 1994), dans la restauration et la fertilité des sols (Hamel, 1991 ; Munyanziza et *al.*, 1997). *ex plique ?* *de quoi ?* *!!*

Les recherches ont permis de définir le rôle-clé de la symbiose mycorhizienne dans les processus biologiques régissant le biofonctionnement du sol. En effet, le développement du champignon mycorhizien dans le sol va fragmenter la microflore du sol en différents compartiments microbiens, caractérisés par des spécificités structurales et fonctionnelles. En plus de leurs impacts sur la mobilisation d'éléments nutritifs et sur l'agrégation du sol, cette hétérogénéité microbienne du milieu a des répercussions significatives dans l'évolution de la flore épigée (successions végétales). En conséquence, la maîtrise de la symbiose mycorhizienne et la compréhension des mécanismes impliqués dans ces interactions biologiques sont de première importance dans les opérations de réhabilitation ou de conservation des écosystèmes terrestres. (Fortin et al., 2002).

La plupart des sols tropicaux contiennent des champignons mycorhiziens sous forme de spores, racines et hyphes. Leur abondance et leur effectivité dépendent du sol, des espèces présentes et des pratiques culturales (Plenchette, 2000). Mais le facteur le plus significatif limitant potentiellement l'effet des champignons mycorhiziens semble être la nature physique de la matrice du sol (Drew et al., 2005).

La compréhension des facteurs du sol déterminant l'établissement de la symbiose mycorhizienne sera d'une grande importance en agriculture. Notre étude intitulée « *Evaluation du Potentiel Infectieux Mycorhizogène de sols du Burkina Faso par la mesure de la nodulation rhizobienne et l'activité fonctionnelle de la microflore mycorhizosphérique* » s'inscrit dans ce contexte général.

Le présent mémoire s'articule autour des chapitres suivants : (1) revue de la littérature, (2) matériel et méthodes d'étude et (3) résultats et discussion.

des végétaux, (ii) de régulariser et de répartir l'écoulement de l'eau dans l'environnement, et (iii) de jouer un rôle de tampon naturel. Les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol se combinent pour rendre ce dernier apte à remplir ces fonctions.

La qualité inhérente ou naturelle d'un sol est déterminée par les matériaux géologiques et les processus (notamment chimiques et physiques) de formation du sol qui se combinent pour le produire. Les caractéristiques d'un sol naturel peuvent être modifiées par l'activité humaine, y compris les pratiques d'utilisation des terres. Divers processus de dégradation peuvent affecter la qualité inhérente du sol, dont l'érosion, la perte de matière organique, le compactage et la désertification. Par ailleurs, on peut maintenir ou même améliorer la qualité du sol en y ajoutant régulièrement des matières organiques, en recourant à des méthodes culturales de conservation, en pratiquant la rotation des cultures, en cultivant des légumineuses et des plantes mycotrophiques, etc.

Ces définitions, non exhaustives, renferment des notions purement qualitatives et ne permettent pas d'appréhender l'effet des microorganismes, pourtant considérés comme les acteurs principaux de la qualité des sols (Chaussod, 1996 ; Schloter et *al.*, 2003 ; Johansson et *al.*, 2004).

1.2. Fertilité physique.

La composante physique de la fertilité d'un sol fait appel à la notion de structure. L'unité de base de la structure est l'agrégat qui détermine les propriétés mécaniques et physiques du sol comme la porosité, le statut hydrique : paramètres étroitement corrélés. La formation des agrégats est un facteur important dans la croissance des racines. De nombreuses études ont montré que la stabilité des agrégats était étroitement liée à la nature et à la qualité de la matière organique et que les microorganismes jouaient également un rôle déterminant. Piéri (1989) propose un indicateur de stabilité structurale basé sur le rapport entre le taux de matière organique du sol (MOS) et le taux de particules fines du sol.

1.3. Fertilité chimique.

Elle fait appel à la notion de richesse et de biodisponibilité en éléments minéraux (CAH, CEC). L'évolution du taux de matière organique accroît le potentiel bionutritionnel du sol car sa minéralisation libère des éléments entrant dans sa constitution (P, N, Mg, S). Elle est de loin la plus étudiée. Les résultats des analyses classiques de sol constituent des indicateurs

précieux. Ces indicateurs présentent cependant le défaut d'être peu sensibles et peu utilisables pour la prévision de l'évolution de la fertilité. Leur interprétation doit tenir compte du contexte pédoclimatique.

1.4. Fertilité biologique.

La composante biologique de la fertilité des sols était peu étudiée jusqu'à ces dernières années. Pourtant on sait depuis longtemps, notamment depuis Dommergues et Manganot (1970), que la fertilité d'un sol procède d'une loi fondamentale d'écologie suivant laquelle, dans un écosystème donné, les communautés d'êtres vivants ne sont pas seulement soumises aux facteurs de l'environnement, mais aussi modifient les caractéristiques de cet environnement. Mais cette prise de conscience au delà des cercles de la Recherche, d'un fonctionnement écologique du sol, est récente.

Pour les sols tropicaux, Pieri (1989) souligne l'importance des processus biologiques de régulation qui permettent aux sols ferrugineux et ferrallitiques, pourtant chimiquement et physiquement défavorisés, d'obtenir des niveaux de production relativement élevés en compensant ces handicaps apparents. De manière générale, la fertilité biologique est appréciée par l'activité microbienne.

II. CHAMPIGNONS MYCORHIZIENS ET FERTILITE DU SOL.

2.1. Concepts et définitions.

➤ Définition et types de mycorhize.

Une mycorhize peut être définie comme un organe résultant de l'association intime d'une racine et d'un champignon qui réalisent ensemble une symbiose vraie, mutualiste ou une eu-symbiose (Dommergues et Manganot, 1970; Strullu, 1991). Cette symbiose est caractérisée par un mouvement bi-directionnel des éléments où le carbone et des éléments de croissance circulent vers le champignon et les nutriments inorganiques vers la plante.

Les structures générées par l'association mycorhizienne peuvent être classées sur la base de critères écologiques, morphologiques et physiologiques. On distingue ainsi plusieurs types de mycorhizes : les endomycorhizes à vésicules et arbuscules (MVA) ; les ectomycorhizes ; les ectendomycorhizes ; les mycorhizes arbustoïdes, monotropoïdes, et orchidoïdes. Les

mycorhizes les plus connues et couramment rencontrés sont les ectomycorhizes et les endomycorhizes.

- Les ectomycorhizes.

Leur surface est recouverte d'un manchon mycélien dense : le manteau d'où partent des filaments rayonnants ou synemas. Le mycélium progresse entre les cellules du cortex racinaire pour former le réseau de Hartig. Les champignons ectomycorhiziens (Basidiomycètes et Ascomycètes) sont associés à de nombreuses espèces forestières. Les arbres dépendant de cette symbiose ne représentent que 3 à 5% des taxa végétaux, mais constituent les essences dominantes des forêts des régions tempérées et en altitude dans la zone équatoriale (Dommergues et Mangenot., 1970; Strullu, 1991).

-Les endomycorhizes.

Elles se caractérisent par l'absence du manteau fongique et du réseau de Hartig. Contrairement aux ectomycorhizes, elles sont très fréquentes et sont associées à environ 80 à 95% des espèces végétales (Strullu, 1991). Au contact de la cellule racinaire, l'hyphe forme un appressorium intercellulaire. Les endomycorhizes possèdent des suçoirs très développés dans le parenchyme cortical des cellules de la racine.

Les champignons endomycorhiziens sont pour la plupart des champignons inférieurs (Phycomycètes) de la famille des Endogonacées (Zygomycètes). On rencontre également des Ascomycètes et des Basidiomycètes. Les plantes hôtes sont généralement autotrophes, capables d'assurer elles-mêmes leur nutrition en absence de champignons endomycorhiziens. La symbiose favorise l'absorption des nutriments, améliorant ainsi la croissance des plantes (Founoune, 2001). Ce type de symbiose est le plus répandu dans le monde végétal.

La symbiose mycorhizienne induit indirectement des modifications physiologiques et/ou morphologiques de la racine, aboutissant ainsi à un nouvel équilibre microbien et une compartimentation du sol dont il convient de préciser certains concepts : la rhizosphère et la mycorhizosphère.

➤ Définition de rhizosphère et mycorrhizosphère.

- La rhizosphère.

Elle est définie comme le volume de sol entourant les racines. Elle est caractérisée par une augmentation de l'activité microbienne stimulée par l'exsudation et la sécrétion de composés organiques par les racines (Johansson et *al.*, 2004). Elle a été divisée en deux parties : le rhizoplan, fraction du sol directement en contact avec la surface racinaire, et la rhizosphère proprement dite qui est la fraction du sol immédiatement environnante. La rhizosphère diffère du sol par plusieurs facteurs : un pH souvent moins élevé, une pression partielle d'oxygène faible et surtout une forte concentration de composés carbonés simples.

Cependant, les plantes des écosystèmes arides et semi-arides ^{été} sont généralement mycorhizées, le concept de rhizosphère a été élargi pour inclure la composante fongique de la symbiose mycorhizienne connue sous le terme mycorrhizosphère.

- La mycorrhizosphère.

C'est la zone du sol sous l'influence directe à la fois des champignons mycorhiziens et des racines et des autres champignons partenaires. Elle inclue une zone spécifique, la mycosphère ou hyphosphère qui fait référence au volume de sol entourant chaque hyphes mycélien (Johansson et *al.*, 2004). L'hyphosphère renferme les différents groupes de bactéries en plus de ceux de la mycorrhizosphère. Ces organismes peuvent modifier les fonctions des CMA (absorption d'eau et d'éléments nutritifs) (Duponnois et *al.*, 2004b).

2.2. Rôle agronomique et écologique des champignons mycorhiziens.

Le rôle de la symbiose mycorhizienne dans la croissance et la nutrition des plantes ne fait l'objet d'aucun doute. De nombreux travaux l'ont mis en évidence et plusieurs synthèses bibliographiques ont été publiées à ce sujet. ^(biblio) Nous nous limiterons donc aux aspects essentiels.

➤ **amélioration de la nutrition phosphatée et azotée.**

La plupart des études ont mis en évidence la stimulation de la nutrition phosphatée par les mycorhizes. L'endomycorhization se traduit par une augmentation du flux de phosphore vers la plante hôte. Il ne s'agit pas seulement d'une diffusion passive, mais d'une mobilisation active de cet élément par les hyphes mycéliens (Nouain et Chaussod, 1996 ; Schachtman et *al.*, 1998). La symbiose mycorhizienne interviendrait dans la solubilisation des phosphates

naturels (Duponnois et *al.*, 2004b) et dans la mobilisation du phosphore des formes organiques (Celik et *al.*, 2004).

L'intervention des mycorhizes dans la nutrition azotée a été très peu étudiée. Mais il convient de ne pas négliger le rôle indirect des endomycorhizes dans la fixation et dans la minéralisation de l'azote (Hamel, 2004). La fixation d'azote ne peut être pleinement efficace que si la nutrition phosphatée de la plante est satisfaisante. Des travaux ont mis en évidence l'interaction entre la symbiose endomycorhizienne et la fixation symbiotique de l'azote chez les légumineuses (Albrecht et *al.*, 1999 ; Biro et *al.*, 2000 ; Andrale et *al.*, 2004).

➤ **amélioration de l'alimentation hydrique.**

La disponibilité en eau dépend des précipitations et de l'infiltration du sol, mais aussi de la faculté des plantes à prélever cette eau. L'augmentation de la surface d'absorption racinaire permet à la plante hôte de mieux résister au stress hydrique. L'effet des mycorhizes dans l'alimentation hydrique des plantes est très contrasté. Nouain et Chaussod (1996) et Augé (2000) dans leur synthèse révèle cela. Mais on peut retenir que de façon directe ou indirecte, la symbiose mycorhizienne intervient dans l'alimentation hydrique des plantes.

➤ **réhabilitation des terres et biodiversité.**

De plus en plus, l'impact écologique des mycorhizes est reconnu. Les sols impropres à l'agriculture (du fait qu'ils sont pollués ou dégradés) sont exploitables grâce à la symbiose mycorhizienne (Munyanziza et *al.*, 1997 ; Quilambo, 2003). La diversité des champignons mycorhiziens détermine la diversité des plantes, la variabilité et la productivité des écosystèmes (Marcel et *al.*, 1998 ; Miranda et *al.*, 2003).

Les champignons mycorhiziens jouent de nombreux rôles qu'on ne pourra pas tout énumérer ici. Mais il faut signaler que l'un des impacts qui fait l'objet d'investigations dans ces derniers temps, est le rôle des mycorhizes dans la qualité des sols (Hamel, 2004). De ce fait, comprendre les relations complexes qui existent entre les mycorhizes, les autres composantes de la microflore et la plante est un préalable pour un développement agricole durable.

2.3. Actions des mycorhizes sur les propriétés physico-chimiques du sol.

Les travaux actuels font état de l'effet direct des mycorhizes à arbuscules dans la stabilité et dans la restauration graduelle de la fertilité des sols. L'effet des mycorhizes à arbuscules dans l'agrégation des sols est le mieux documenté. Cet impact serait dû au mécanisme de fixation

des hyphes. La contribution des CMA dans l'agrégation du sol a été attribuée (i) à la croissance des hyphes extramatricielles dans le sol, créant ainsi une structure squelettique qui prend ensemble les particules du sol, (ii) à la création des conditions nécessaires à la formation des microagrégats et (iii) à la cimentation des microagrégats par les hyphes mycéliens et les racines pour former les macroagrégats (Munyanziza et *al.*, 1997 ; Caravaca et *al.*, 2000).

Des études récentes ont montré que les CMA sécrètent une glycoprotéine : la glomaline qui pourrait stabiliser la structure du sol, influencerait l'hydrophobicité du sol et serait susceptible d'affecter les relations sol-eau-plante (Feeney et *al.*, 2004). Auge (2004) dans son étude sur les mycorhizes à arbuscules et leurs liens avec la teneur en eau dans le sol ou la plante, a montré qu'on observe une légère mais significative incidence des mycorhizes à arbuscules sur la courbe des paramètres hydriques du sol.

L'organisation spatiale des racines et des hyphes et leur influence sur la microflore tellurique, laissent penser que les champignons mycorhiziens pourraient modifier les réactions biochimiques dans le sol y compris la minéralisation et la nitrification de la matière organique, et donc réguler le taux de matière organique dans le sol (Hamel, 2004).

2.4. Actions sur les propriétés biologiques du sol.

Les microorganismes du sol, en particulier ceux de la rhizosphère sont impliqués dans la plupart si non dans tous les échanges sol-plante. Il existe une complexité d'associations qui jouent un rôle dans la stabilité naturelle des écosystèmes.

2.4.1. Effets des microorganismes rhizosphériques sur les MVA.

L'influence des microorganismes telluriques sur le développement des champignons mycorhiziens et sur l'établissement de la symbiose n'est pas clairement définie. On note des réponses négatives, positives et neutres. L'impact négatif sur les CMA inclut la réduction des spores et leur germination, la baisse de la colonisation racinaire et de l'activité métabolique des hyphes. L'effet positif concerne la stimulation de la symbiose par des bactéries (PGPR) (Hodge, 2000).

Il apparaît donc que les microorganismes rhizosphériques ont des effets variés sur les CMA, contrôlés par les produits du métabolisme microbien (Fortin et *al.*, 2002). Ces interactions pour la plupart ont été étudiés *in vitro*, ce qui ne reflètent pas la réalité *in vivo*. Néanmoins ces

études éclairent et renseignent sur la complexité des interactions rhizosphériques et mycorrhizosphériques.

2.4.2. Effets des CMA sur les microorganismes mycorrhizosphériques.

La colonisation des racines par les champignons mycorrhiziens induit des modifications dans la structure de la communauté microbienne de façon directe ou indirecte. Les interactions directes concernent le transport des composés carbonés synthétisés par la plante hôte dans la mycorrhizosphère via les hyphes mycéliens, le changement du pH mycorrhizosphérique induit par les champignons, la compétition pour les nutriments et les exsudations des champignons. Quant aux interactions indirectes, elles incluent les exsudations racinaires, l'effet des mycorrhizes sur la plante hôte et sur la structure du sol.

Nombreuses sont les études qui ont mis en évidence un effet sélectif des champignons sur la population et l'activité bactérienne de la rhizosphère (Fortin et *al.*, 2002 ; Wamberg et *al.*, 2003 ; Duponnois et *al.*, 2004b ; Johansson et *al.*, 2004). Les champignons mycorrhiziens réduiraient la population de nématodes (Fortin et *al.*, 2004) et l'effet des champignons pathogènes (Hodge, 2000 ; Johansson et *al.*, 2004). Les mécanismes intervenant dans ces interactions mycorrhizosphériques ne sont pas clairement définis. Mais les résultats montrent que les substances secrétées par les CMA sont le facteur principal qui explique la différence de croissance observée chez les organismes.

2.4.3. Interactions *Rhizobium*-CMA.

L'interaction entre CMA et *Rhizobium* a suscité une attention considérable en raison de la demande relativement élevée de phosphore et de la fixation d'azote. Les deux symbioses agissent de façon synergique au niveau des racines de légumineuses sous l'influence d'un facteur appelé facteur Nod (Albrecht et *al.*, 1999).

De plus en plus, on s'intéresse à cette double symbiose pour la mise en valeur des sols tropicaux reconnus pour leur déficience en phosphore et en azote. Il faut donc des plantes capables de fixer à la fois l'azote et de mieux explorer le sol, par l'intermédiaire de l'endophyte (Biro et *al.*, 2000 ; Andrale et *al.*, 2003 ; Lekberg et Koide, 2005).

Comme nous venons de le montrer, les CMA représentent un interface directe entre le sol et les racines et un lieu d'échange des éléments nutritifs. Ils sont de loin les plus dominants de la microflore rhizosphérique avec 25% de la biomasse totale (Hamel et *al.*, 1991). Ils occupent

donc du point de vue écologique un rôle important et déterminant dans les processus biologiques et biochimiques du sol. La figure 1 résume les différentes interactions possibles dans la mycorrhizosphère. Les CMA au regard de leur position centrale pourraient être utilisé comme indicateur biologique de la qualité des sols.

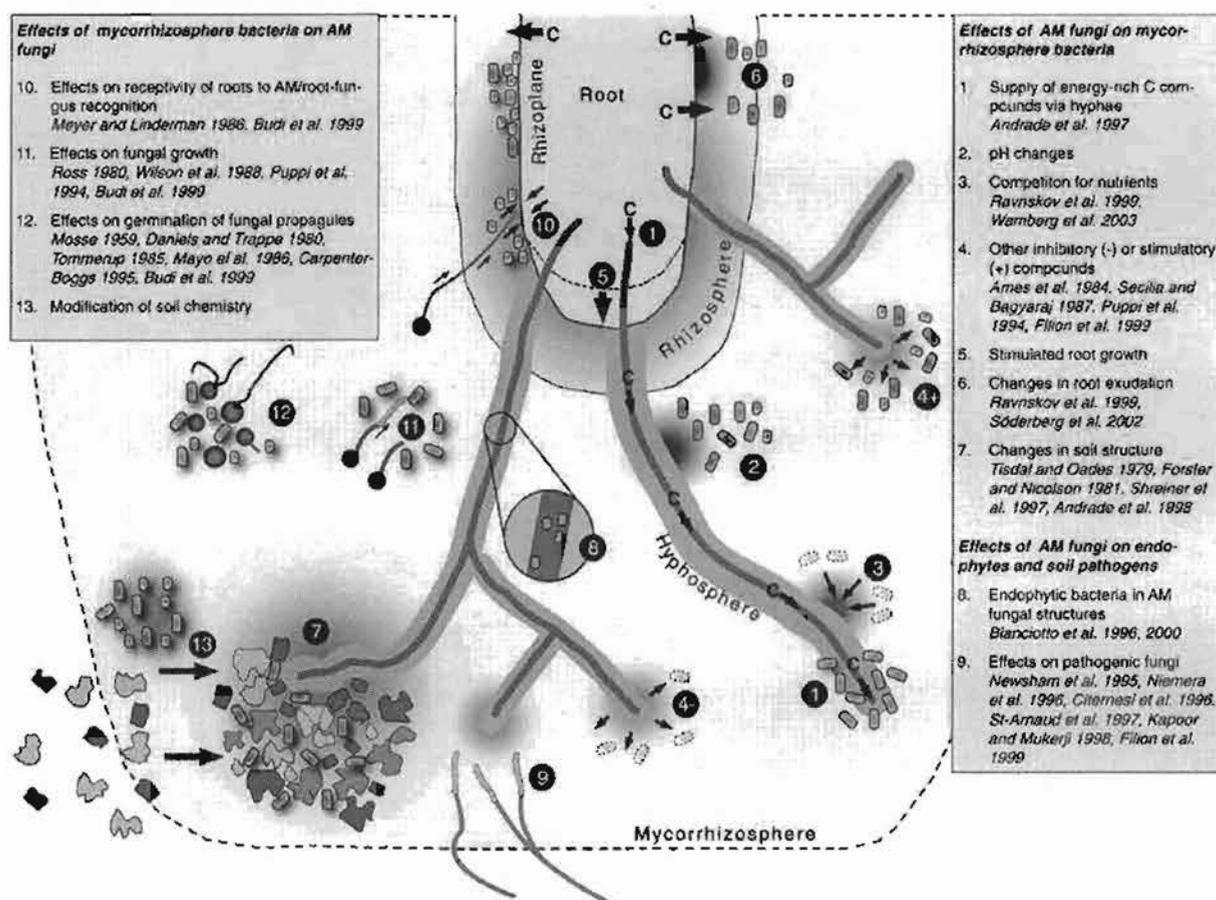


Figure 1 : Représentation schématique des interactions possibles dans la mycorrhizosphère.

Source : Johansson et al. (2004).

III. INDICATEURS DE LA FERTILITE BIOLOGIQUE DES SOLS.

Il n'y a pas de mesure unique de la qualité du sol. Malgré l'impossibilité d'une mesure directe, on peut quand même faire des inférences ou des estimations, en mesurant certaines propriétés du sol (comme le pH ou la teneur en matière organique) et en observant certaines conditions comme la fertilité, la structure et l'érodabilité.

Les pédologues ont récemment reconnu la nécessité de mettre au point une méthode fiable et systématique pour évaluer la qualité des sols. Une possibilité prometteuse réside dans l'établissement d'un indice de la qualité des sols, autrement dit, un relevé de l'état de santé du

sol qui permet de suivre l'évolution de cet état au fil du temps et de prévoir les effets des pratiques agricoles. L'indice reposerait sur la mesure de certaines propriétés, fonctions et conditions représentant des indicateurs utiles de la qualité du sol. Des recherches se déroulent actuellement dans plusieurs pays pour établir des indicateurs de qualité adéquats et élaborer des méthodes de mesure efficaces et fiables.

3.1. Notion d'indicateur biologique.

L'appréciation de la qualité biologique du sol suppose que l'on dispose pour chacune de ces composantes, d'indicateurs pertinents, mesurables, fiables et interprétables. On pourrait définir un indicateur biologique, comme un paramètre biologique mesurable pouvant rendre compte d'évolutions présentant potentiellement un impact sur le fonctionnement du sol. Il doit être suffisamment sensible pour déceler des déséquilibres, avant que cela n'entraîne des effets irréversibles (Chaussod, 1996).

Un groupe de microorganismes peut être utilisé comme indicateur biologique. Dans ce cas, il faut que ces microorganismes forment le groupe le plus dominant et qu'ils soient présents sur tous les types de sol, qu'ils soient abondants et diversifiés et qu'ils jouent un rôle dans le fonctionnement du sol (Schloter et *al.*, 2003).

Les indicateurs de base et le nombre requis dans l'évaluation de la qualité biologique des sols ne fait pas l'unanimité. Toutefois, le programme national et international de normalisation de la qualité des sols inclut présentement la biomasse microbienne, la respiration du sol, la diversité microbienne et l'activité fonctionnelle de la microflore du sol (Chaussod, 1996 ; Schloter et *al.*, 2003).

3.2. Principaux indicateurs biologiques.

3.2.1. La biomasse microbienne du sol.

Elle peut être définie comme l'ensemble des organismes vivants dans le sol, généralement petits avec une taille approximativement égale à 10µm. Elle peut être quantifiée par la méthode de fumigation-extraction. La proportion de carbone totale sous forme vivante est un bon indicateur du statut organique des sols. Toutes les méthodes utilisées pour quantifier le carbone de la biomasse microbienne dans différents sols ne révèlent aucune corrélation avec la qualité des sols (Schloter et *al.*, 2003).

3.2.2. La diversité microbienne.

Le dénombrement des populations microbiennes est l'une des plus anciennes méthodes de caractérisation de la qualité des sols. Peu d'organismes du sol sont connus car il est difficile d'isoler, de cultiver et de caractériser la majorité des espèces microbiennes. De nos jours, la diversité fonctionnelle tend à être abandonnée au profit d'études sur la diversité génotypique et phénotypique (rDNA, PCR).

3.2.3. Les activités microbiennes.

Elles sont appréciées à travers les activités enzymatiques des microorganismes permettant d'apprécier le fonctionnement des différents groupes. La difficulté que l'on rencontre à ce niveau c'est de pouvoir dire quelle activité enzymatique est la plus importante, car il est difficile de mesurer toutes les activités microbiennes. Certains auteurs (Schloter et *al.*, 2003) proposent d'utiliser la minéralisation de l'azote et du carbone.

L'énorme diversité et la complexité des communautés microbiennes, rendent difficile l'utilisation de ces paramètres comme indicateurs de la qualité biologique des sols. Il est donc indispensable de choisir des organismes indicateurs qui sont corrélés à la qualité du sol comme par exemple les CMA et les rhizobium (Schloter et *al.*, 2003).

3.3. Le Potentiel Infectieux Mycorhizogène (PIM).

Comme nous l'avons vu, les CMA constituent un groupe d'organismes que l'on peut utiliser comme indicateur biologique. Le Potentiel Infectieux Mycorhizogène (PIM) du sol représente sa capacité à initier la formation d'associations mycorhiziennes à partir d'une quantité d'inoculum présent dans le sol sous forme de spores, de mycélium et de débris de racines portant des vésicules (Duponnois et *al.*, 2001a). Il exprime en quelque sorte la richesse du sol en propagules aptes à générer les mycorhizes. Il est considéré comme un indicateur biologique de l'état de dégradation d'un sol. De plus en plus, des chercheurs s'attèlent à développer des méthodes permettant de mieux déterminer le PIM des sols.

En somme, les champignons mycorhiziens occupent une place importante dans les processus biologiques du sol. De ce fait, il est indispensable de les valoriser pour une agriculture productive et durable. La maîtrise de cette symbiose passe d'abord par la détermination et la caractérisation des espèces mycorhiziens, mais aussi par la détermination de leur potentiel (PIM). D'où l'intérêt de notre étude.

CHAPITRE II: MATERIEL ET METHODES D'ETUDES.

I. CONTEXTE DE L'ETUDE.

Il s'agit ici de présenter succinctement les différentes zones sur lesquelles les sols ont été prélevés en précisant brièvement les conditions agro-pédologiques et les pratiques agricoles.

1.1. Zone de Ouagadougou.

Ouagadougou est situé dans la zone soudanaise du sahel. Les températures varient de 25° en moyenne en janvier à 32° en Avril. La moyenne d'humidité de l'air varie, elle, de 21% en février à 79% en Août. Les précipitations moyennes totales sont de 800 mm par an. Les sols sont dans leur majorité des sols minéraux bruts - peu évolué et à sesquioxydes de fer et/ou de manganèse (Bunasols, 1998). Ce sont des sols généralement bruns à structure massive à peu développée. La texture est en générale limono (argilo) sableuse, sablo-limoneuse (argileuse) en surface et argilo-limono-sableuse ou limono-argilo-sableuse en profondeur. L'agriculture est du type péri-urbaine dominée par la culture du sorgho avec apport ou pas de déchets organiques et ménagers.

Les sols ont été prélevés dans trois localités (Gampéla, Kamboinsé et Toubwéogo). A Gampéla (GPL), le sol provenait du site expérimental de l'IRD. Le prélèvement s'est fait dans des zones sans traitements où poussaient des adventices (*Zornia glozidiata*, *Pennisetum pedicellatum*, *Cyperus sp*, *Digitaria sp*, ...). (Dabiré, 2004). A Kamboinsé (KBSn), le prélèvement s'est effectué dans la station de l'INERA. A ce niveau était cultivé du niébé sans aucun fertilisant. Il faut signaler que le niébé était la troisième culture (arachide en première année et sorgho à la deuxième année). A Toubwéogo, les prélèvements se sont effectués dans des parcelles amendées avec les déchets et ordures ménagers. Une parcelle était amendée pendant plusieurs années (KBS A+) et l'autre pendant une année (KBS A). Ces parcelles contenaient comme culture le sorgho.

1.2. zone de Ouahigouya (Province du Yatenga).

La province du Yatenga est soumise à un climat continental sec soudano-sahélien caractérisé par deux (2) saisons : une saison sèche de novembre à avril et une saison pluvieuse de mai à octobre. Cette durée est variable d'une année à une autre. Les amplitudes thermiques sont aussi très variables : les températures maximales atteignent 45° C (en avril) et les minimales 15°C (en février). Sur le plan pluviométrique, les précipitations sont peu abondantes et

irrégulières dans le temps et dans l'espace avec des coupures brusques (juin-juillet). Les hauteurs d'eau varient entre 300 mm et 600 mm.

La majorité des terres dans la province du Yatenga sont pauvres en éléments nutritifs. En effet, les terres sont peu fertiles (pauvres en matières organiques), marquées par de nombreuses croûtes battantes (sols blanchis ou « zipellé »), résultant de l'érosion des sols par les principaux facteurs qui sont : -l'eau; -le vent; -action de l'homme (surpâturage, mauvaises pratiques agricoles). On peut classer les sols en 3 catégories: les sols minéraux bruts, les sols peu évolués d'érosion et les sols ferrugineux lessivés. Ils sont peu fertiles et à faible pouvoir de rétention d'eau. Les sols ferrugineux sont les plus dominants et les plus cultivés. En plus de leur pauvreté en matière organique et éléments majeurs, ils présentent de sérieuses limitations pour leur exploitation agricole (mauvaise stabilité structurale, forte érodibilité, faible CEC...). Pour leur mise en valeur, les paysans pratiquent ce qu'on appelle le « zaï ».

Au niveau de Ouahigouya, les sols ont été prélevés à Gourga, une localité à environ 8Km de Ouahigouya (où l'IRD mène des expérimentations). Il s'agit d'un sol nu (sans végétation : SN), d'un sol provenant d'un champ où est pratiqué le zaï avec comme culture le sorgho (ZCS) et un sol provenant d'un zaï forestier (ZF).

1.3. Objectifs et hypothèse de travail.

Le Potentiel Infectieux Mycorhizogène (PIM) d'un sol constitue un indicateur pertinent du niveau de fertilité biologique d'un sol. Sa mesure est généralement obtenue par la mise en place d'expériences en conditions contrôlées dont l'interprétation des résultats est généralement longue et complexe.

En partant de l'hypothèse que « *l'état de mycorhization d'une légumineuse est généralement corrélée au nombre et à la biomasse totale des nodules rhizobien par plant et que le développement de la symbiose mycorhizienne conditionne les caractéristiques fonctionnelles de la microflore du sol* », le principal objectif de cette étude sera d'évaluer indirectement le PIM de différents sols à travers la mesure de ces deux paramètres biologiques préalablement cités.

A la fin de la page

1.4. Résultats attendus.

Les différentes expériences permettront d'évaluer :

- (i) les relations entre les caractéristiques physico-chimiques d'un sol et sa réceptivité à l'inoculation mycorhizienne ;
- (ii) les relations entre le PIM et les caractéristiques fonctionnelles de la microflore telluriques déterminées via l'établissement de profils cataboliques ;
- (iii) les relations entre le PIM et le développement de la nodulation chez *Vigna unguiculata* ;
- (iv) l'identification d'indicateurs pertinents susceptibles d'évaluer facilement le PIM des sols en milieu tropical.

III. MATERIEL D'ETUDE.

3.1. Les sols.

Sept (07) sols différents ont été prélevés dans deux régions du pays (Ouahigouya, Ouagadougou) à la profondeur de 0,20 m. Dans chaque parcelle, le prélèvement s'est effectué de manière aléatoire dans trois parties et mélangés pour avoir un échantillon composite. Ces sols ont été tamisés à 2 mm, désinfectés (140°C, 2h) ou non avant leur utilisation dans les différentes expériences. Leurs caractéristiques physico-chimiques avant et après désinfection sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques des sols désinfectés ou non.

Traitement	Sol	Paramètres mesurés					
		pH H ₂ O	pH KCl	Nt (%)	Ct (%)	C/N	P. ass (mg/Kg)
Non désinfecté	GPL	4,50	4,23	0,022	0,267	12	1,75
	KBS A+	7,58	7,48	0,115	1,891	16	276,69
	KBS A	6,64	6,59	0,033	0,411	12	9,60
	KBSn	4,21	4,06	0,023	0,306	13	42,37
	SN	5,53	5,44	0,06	0,514	9	4,36
	ZCS	5,39	4,85	0,076	1,077	14	2,18
	ZF	5,02	4,79	0,050	0,570	11	0,44
Désinfecté	GPL	4,78	4,43	0,021	0,255	12	2,62
	KBS A+	7,72	7,54	0,084	1,430	17	283,67
	KBS A	6,90	6,84	0,041	0,563	14	18,33
	KBSn	4,52	4,12	0,019	0,196	10	34,04
	SN	6,36	5,28	0,053	0,476	9	5,67
	ZCS	5,34	5,09	0,070	0,958	14	4,80
	ZF	5,12	4,72	0,053	0,641	12	2,62

Nt : azote total ; Ct : carbone total ; P.ass : phosphore assimilable ou soluble. GPL : Gampéla ; KBS A+ : Kamboinsé amendé pendant plusieurs années ; KBS A : Kamboinsé amendé pendant une année ; KBSn : Kamboinsé sous culture niébé ; SN : Sol nu ; ZCS : Zaï cultivé sous sorgho ; ZF : Zaï forestier.

3.2. Le matériel végétal.

Nous avons utilisé comme plantes testes dans les différentes expériences, le mil : *Pennissetum* sp. variété LKMP5 et le niébé : *Vigna unguiculata* variété K VX 414-22-2. Les semences nous ont été fournies par l'INERA.

à vérifier !!
 or the first one
 avec
 le
 résumé

3.3. L'inoculum fongique.

Le champignon mycorhizien à arbuscules *Glomus intraradices* Schenk & Smith (DAOM 181602, Ottawa Agricultural Herbarium) a été cultivé sur du mil (*Pennisetum sp.*) sous serre, pendant 4 mois sur du substrat composé de vermiculite, d'attapulgite et d'osmocote. Les plants de mil ont été déracinés et rincés délicatement. Leurs racines ont été coupées en morceaux de 2 mm de long contenant environ 250 vésicules cm^{-1} et conservées à 4°C. Ce sont ces morceaux de racines qui ont été utilisés comme inoculum fongique.

IV. METHODES D'ETUDES.

4.1. Détermination du PIM.

Il existe plusieurs méthodes pour estimer le PIM des sols (Plenchette *et al.*, 1989 ; Sieverding, 1991). Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé un test biologique au quel nous avons couplé l'extraction et le comptage des spores des sols.

4.1.1. Détermination du PIM par le test biologique : Méthode de Plenchette.

Le PIM de chaque échantillon de sol non désinfecté est évalué selon la méthode décrite par Plenchette *et al.* (1989). Le PIM d'un sol colonisé par un peuplement de champignons symbiotiques représente son aptitude à mycorhizer une population de plantes mycotrophes (Ex : mil). L'inoculum fongique est soumis à l'influence des composantes physico-chimiques et biologiques du sol. La mesure du PIM est réalisée à l'aide d'un test biologique permettant d'obtenir une régression de type dose (concentration de sol infesté par les symbiotes fongiques) réponse (pourcentage de plants mycorhizés). La résolution de cette régression ($Y = Ax + B$) pour une mycorhization de 50% de la population de plants mycorhizés aboutit à la détermination du nombre d'unités de potentiel infectieux mycorhizogène 50 (PIM₅₀) par gramme de sol.

Les échantillons de sol ont été mélangés aux mêmes sols préalablement stérilisés (140°C, 2h) à différentes concentrations (100- 48- 24- 12- 6 et 3%, v/v). Ces dilutions sont réparties dans des pots à raison de 100 g par pot où ont été déposées 10 graines de mil. Cinq répétitions par dilution sont réalisées suivant un dispositif aléatoire. La présence de structures mycorhiziennes est déterminée après 14 jours de semis en éclaircissant et en colorant les morceaux de racines par la méthode de Phillips et Hayman (1970). Les morceaux de racine sont ensuite déposés sur des lames et observées au microscope au grossissement 250 (Brundrett *et al.*, 1985).

4.1.2. Extraction des spores de champignons.

Cette opération est composée de 2 étapes : l'une consiste à isoler les spores du sol et l'autre va permettre de les concentrer. Cette extraction fait donc appel à 2 techniques. La première est basée sur le tamisage à l'eau des échantillons de sol et de leur décantation (Gerdemann et Nicholson, 1963). La deuxième consiste à concentrer les spores par une centrifugation sur une solution de saccharose (Brundrett et *al.*, 1985 et 1996).

➤ Isolement des spores (Tamisage à l'eau et décantation).

A partir de chaque échantillon de sol soigneusement homogénéisé, 100 g sont prélevés et tamisés sur une série de tamis (500 μm et 50 μm) sous un jet d'eau puissant. Le tamis est récolté sur le tamis de 50 μm puis transféré dans un bécher (200 ml) à l'aide d'une pissette d'eau. Le bécher est rempli d'eau et au bout de 15 minutes de sédimentation, les débris végétaux flottant à la surface sont éliminés.

➤ Concentration des spores.

La solution du bécher est centrifugée à 2000 rpm (tour par minute) pendant 5 minutes dans des tubes à centrifugation ($V = 50 \text{ ml}$). Le surnageant est récupéré et on ajoute une solution de saccharose à 50 % ($w : v$). La centrifugation est de nouveau réalisée (2000 rpm, 1 min). Le surnageant est filtré à travers un tamis fin (40 à 50 μm) afin de récupérer les spores. Les spores sont ensuite soigneusement lavées à l'eau du secteur puis conservées dans du liquide physiologique. Ces spores sont enfin dénombrées sous une loupe binoculaire (Grossissement : 40 x) et classées (et si possible identifiées) selon leur taille et leur couleur.

4.2. Mise en évidence de relations entre le PIM, les caractéristiques physico-chimiques et les profils cataboliques de chaque sol testé.

4.2.1 Réceptivité du sol à la mycorhization.

Des pots de 200 ml ont été remplis par chaque sol testé (désinfecté) à raison de 100 ml par pot. Il s'agit ici de tester la réponse d'une plante à la dose de propagules fongiques. Les fragments de racines mycorhizées ont été inoculés dans chaque pot à raison de 0- 3- 10- 30 et 100 fragments par pot. Après avoir placé une graine de mil dans chaque pot, ces derniers ont été placés dans une serre de culture. Pour chaque sol, il y avait 5 traitements (facteur « nombre de fragments inoculés ») avec 5 répétitions par traitement (dispositif aléatoire). Après deux mois

de culture sous serre, les plants ont été dépotés. Le taux de mycorhization, la biomasse aérienne et racinaire ont été déterminés.

4.2.2. Détermination des profils de diversité catabolique.

A ce niveau, nous avons utilisé les sols tels que ramenés des parcelles sans aucun traitement préalable. La diversité catabolique microbienne a été déterminée dans chaque sol par des profils de potentiel catabolique in situ des communautés microbiennes (Degens et Harris, 1997). Des substrats (33) comprenant des acides aminés (9), des hydrates de carbone (9), des acides organiques (10), des polymères (1) et des amides (4) ont été utilisés à des concentrations préalablement déterminées. Ces substrats, en suspension dans 0,5 ml d'eau distillée stérile, sont mélangés à 0,5 g de sol sec (West et Sparling, 1986) dans des tubes de 10 ml. La production basale de CO₂ a été mesurée pour chaque échantillon en mélangeant le sol à 0,5 ml d'eau distillée stérile. Après l'addition des substrats et de l'échantillon de sol dans les tubes, ces derniers sont immédiatement scellés et mis à incuber pendant 4 heures à la température ambiante. Le dégagement de CO₂ a été mesuré en utilisant un respiromètre IRGA (Polytron IR CO₂ Dräger™). Les résultats sont exprimés en $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ sol h}^{-1}$.

4.3. Mise en évidence de relations entre le PIM et le développement de la nodulation chez une légumineuse.

Dans cette partie de l'étude, les sols n'ont pas été désinfectés. La légumineuse, *Vigna unguiculata* a été utilisée comme plante teste. L'inoculum fongique a été apporté ou non à la dose de 25ml du substrat contenant les propagules dans chaque pot contenant 500ml de sol. On avait donc deux traitements (inoculé et non inoculé) avec trois répétitions par traitements. Après 2 mois de culture, les plants ont été dépotés et le nombre ainsi que la biomasse totale des nodules, des parties aériennes et racinaires par plant ont été mesurés. Des échantillons de sols ont été prélevés pour établir leur profil catabolique selon la méthode décrite ci-dessus (paragraphe 2.2.2) nous permettant d'apprécier l'influence du champignon mycorhizien sur la diversité fonctionnelle de la microflore tellurique.

4.4. Analyses statistiques

Les données obtenues sont traitées par une analyse de variance à un facteur contrôlé au seuil de 5%. Les relations susceptibles d'exister entre les différents paramètres mesurés seront analysées par des tests de corrélation. Le logiciel XLSTAT 7.5 a été utilisé.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION.

I. RESULTATS.

1.1. Détermination du PIM des sols.

Le PIM des sols a été déterminé en utilisant deux approches : l'extraction des spores et le test biologique. La figure 2a montre qu'on trouve 4 types de spores dans tous les sols selon la couleur, mais leur nombre varie considérablement en fonction des sols. Quelque soit le sol, les spores noires sont les plus dominantes (plus de 70%) sauf pour ZF et ZCS ou on trouve moins de 60%. Par contre, le nombre de spores jaunes est plus élevé dans ces sols : 28% dans ZCS et 25% dans ZF. En faisant le cumul des spores (Fig. 2b), on note que KBS A+ renferme le plus grand nombre de spores (719) suivi de ZCS (425) et de ZF (384). Le plus faible nombre de spores est observé dans SN (125). La diversité des spores calculée par l'indice de Shannon Wiener est faible et varie d'un sol à l'autre. On a 0,690 pour GPL ; 0,662 pour KBS A+ ; 0,747 pour KBS A ; 0,848 pour KBS n ; 1,085 pour ZCS ; 0,634 pour SN et 1,116 pour ZF.

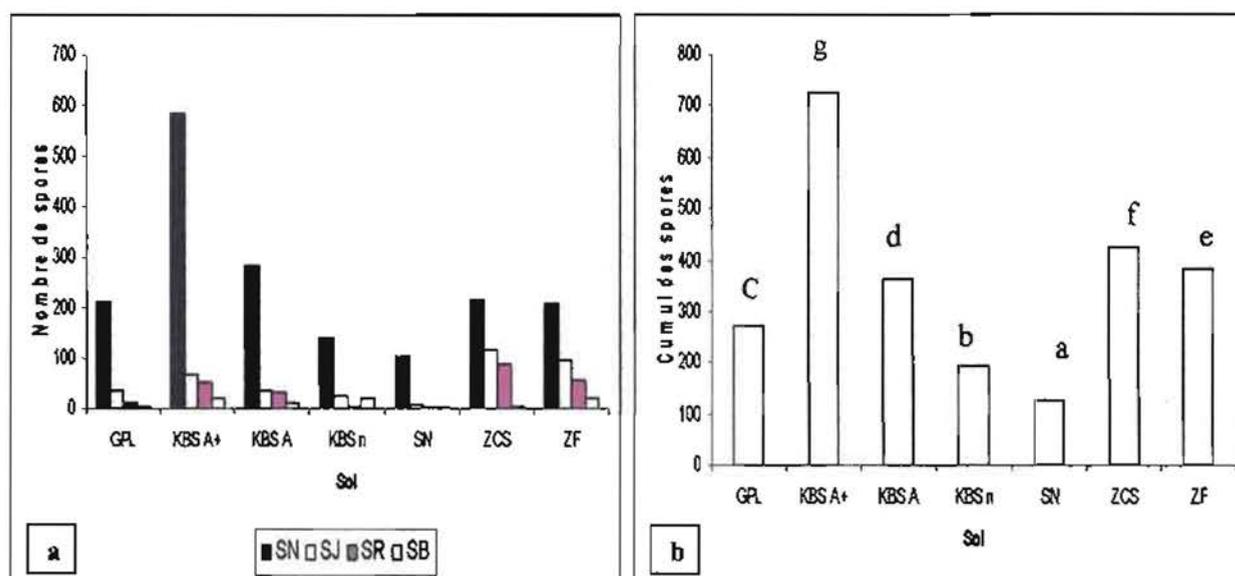


FIGURE 2 : Répartition des types de spores et leur cumul après extraction avec 100g de sol.

a) répartition des différents types de spores en fonction du sol, SN : spores noires, SJ : spores jaunes, SR : spores rouges, SB : spores blanches ; b) cumul des spores en fonction du sol.

Nous avons cherché à voir s'il existe une relation entre les types de spores et les caractéristiques physico-chimiques du sol. Le tableau 2 montre qu'il existe une relation significative entre le pH, le carbone total, le phosphore assimilable et les spores noires du sol.

Le nombre total de spore est positivement corrélé aux caractéristiques physico-chimiques du sol sauf avec le pH KCl.

Tableau 2 : Corrélation de Pearson montrant les relations entre les différents types de spores et les caractéristiques physico-chimiques dans le sol non désinfecté.

Type de Spore	Carbone total	Azote total	P.ass	pH H ₂ O	pH KCl
Noires	0,85*	0,75	0,90*	0,84*	0,82*
Jaunes	0,49	0,49	0,08	0,15	0,04
Rouges	0,63	0,64	0,19	0,38	0,28
Blanches	-0,06	-0,12	0,15	-0,15	-0,11
Total	0,89*	0,81*	0,75*	0,77*	0,72

* valeurs significatives au seuil alpha = 0,05 selon le test de similarité de Pearson.

Les spores sont des structures qui génèrent les mycorhizes et on est tenté de dire que les sols riches en spores auront le PIM le plus important. Ce potentiel a été estimé en utilisant des courbes de régression linéaire entre le pourcentage de plants mycorhizés en réponse à la dose croissante d'inoculum (sol non désinfecté) (Tableau 3) comme décrit par Plenchette et *al.* (1989).

Tableau 3 : Détermination du PIM des sols après deux semaines de culture sous serre avec le mil comme plante test.

Sol	$y = Ax + B$	R ²	PIM ₅₀ (g de sol)
GPL	$y = 13,881x - 9,5095$	0,89	72,75
KBS A+	$y = 13,389x + 6,738$	0,94	25,3
KBS A	$y = 7,6649x + 18,679$	0,87	59,5
KBS n	$y = 13,172x - 4,8877$	0,93	64,46
SN	$y = 19,144x - 21,925$	0,86	55,15
ZCS	$y = 10,408x + 10,274$	0,96	45,42
ZF	$y = 15,068x - 7,5458$	0,88	45,56

Le PIM₅₀ le plus faible est 25,3 pour KBS A+, suivi de ZCS et ZF ayant respectivement 45,42 et 45,56. Le plus élevé est 72,75 pour GPL (Tableau 3). Cela signifie que le PIM du sol de KBS A+ est trois fois plus élevé que celui de GPL c'est-à-dire que l'établissement de la colonisation dans le sol de KBS A+ nécessite trois fois moins d'inoculum que dans le sol de GPL, et deux fois moins que dans SN et KBSn. Le coefficient de corrélation (R²) qui représente le pourcentage de plants mycorhizés en fonction du logarithme népérien de la dilution, est supérieur à 0,80. Ce qui indique que plus la quantité de sol (non désinfecté) augmente, plus le pourcentage de plants mycorhizés est élevé. Par ailleurs on n'observe pas

de corrélation significative entre le PIM₅₀ et les différents types de spores. Par contre, il existe une corrélation significative entre le PIM₅₀ et le nombre total des spores dans le sol (non désinfecté) (coefficient de Pearson = -0,82 ; $p < 0,05$). Ce résultat montre que plus le sol est riche en spores, son PIM₅₀ est bas, donc un PIM élevé.

1.2. Réceptivité du sol à la mycorhization et relation entre PIM et caractéristiques physico-chimiques du sol.

Dans cette expérience, le sol a été désinfecté. La réponse des sols à l'inoculation varie significativement. Le sol a un effet significatif sur les paramètres mesurés ($P < 0.0001$) (Tableau 4). C'est au niveau de KBS A+ et ZCS que l'on a les valeurs les plus élevées. Pour ce qui est de la biomasse aérienne par plant, on a 0,297g et 0,243g respectivement pour KBS A+ et ZCS. Les mêmes tendances sont observées avec la biomasse racinaire. Durant les deux mois de culture sous serre, on a constaté une mortalité des plants (100%) au niveau du sol nu (SN) à la fin de l'expérience.

La densité de propagules a eu un effet significatif sur les paramètres de croissance sauf avec KBS A+ et KBS A. Cet effet est surtout marqué au niveau de ZCS et dans une moindre mesure avec KBSn. (Tableau 5). On observe une colonisation racinaire dans tous les sols, même si les valeurs restent faibles dans l'ensemble. Aucune colonisation n'a été observée avec les plants non inoculés. On note un effet significatif du sol ($p < 0,0001$), de l'inoculum fongique ($p < 0,0001$) et une interaction positive du sol et de l'inoculum ($p < 0,0001$) sur la colonisation racinaire. La plus forte colonisation est réalisée avec 100 propagules et ce dans KBS A+. (15,06%, Tableau 4). De manière générale, la colonisation augmente quand le nombre de propagules dans le sol est élevé. ($R^2 = 0,62$). Par contre, il n'existe pas de corrélation entre le nombre de propagules, la matière sèche aérienne et la matière sèche racinaire (Fig. 3).

Tableau 4 : Valeurs moyennes de la matière sèche aérienne, racinaire et de la fréquence mycorhizogène après 2 mois de culture sous serre dans des sols désinfectés avec du mil inoculé par *G. intraradices*.

Sol	MSA (g)	MSR (g)	FM (%)
GPL	0,072 a ⁽¹⁾	0,042 a ⁽¹⁾	5,86 a ⁽¹⁾
KBS A+	0,297 e	0,122 b	15,06 c
KBS A	0,110 b	0,047 a	8,13 b
KBS n	0,144 c	0,094 b	5,87 a
ZCS	0,237 d	0,096 b	12,66 bc
ZF	0,077 a	0,048 a	7,33 a

MSA : Matière Sèche Aérienne ; MSR : Matière Sèche Racinaire ; FM : Fréquence Mycorhizogène. (1) les chiffres suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5% selon le test de Newman-Keuls. *est de la colonne et de la ligne.*

Tableau 5 : Effet du nombre de propagules infectives sur la croissance et la mycorhization du mil après 2 mois de culture sous serre avec du sol désinfecté.

Sol	Nombre de propagule	Paramètres mesurés		
		MSA (g)	MSR (g)	FM (%)
GPL	0	0.063 a ⁽¹⁾	0.035 a ⁽¹⁾	0 a ⁽¹⁾
	3	0.049 a	0.042 ab	4.66 ab
	10	0.072 a	0.042 ab	6.66 b
	30	0.108 b	0.058 b	10.66 b
	100	0.068 a	0.034 a	7.33 b
KBS A+	0	0.28 a	0.121 a	0 a
	3	0.27 a	0.109 a	3.33 ab
	10	0.32 a	0.113 a	11.33 b
	30	0.32 a	0.125 a	30.66 c
	100	0.29 a	0.145 a	29.99 c
KBS A	0	0.100 a	0.050 a	0 a
	3	0.097 a	0.047 a	6.66 b
	10	0.114 a	0.042 a	9.99 bc
	30	0.129 a	0.051 a	12.66 c
	100	0.108 a	0.049 a	11.33 c
KBS n	0	0.114 a	0.048 a	0 a
	3	0.170 c	0.077 b	3.99 b
	10	0.138 a	0.060 ab	5.99 bc
	30	0.142 abc	0.072 b	9.99 d
	100	0.158 bc	0.062 ab	9.33 cd
ZCS	0	0.174 a	0.061 a	0 a
	3	0.225 ab	0.103 b	5.33 b
	10	0.251 b	0.092 b	9.33 b
	30	0.276 b	0.101 b	21.99 c
	100	0.257 b	0.121 b	26.66 c
ZF	0	0.066 ab	0.046 ab	0 a
	3	0.072 ab	0.048 ab	2.66 ab
	10	0.057 a	0.039 a	6.66 bc
	30	0.088 bc	0.050 ab	10.66 c
	100	0.103 c	0.059 b	16.66 d

MSA : matière sèche aérienne, MSR : matière sèche racinaire, FM : fréquence mycorhizogène. (1) Les chiffres suivis d'une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5% selon le test de Newman-Keuls.

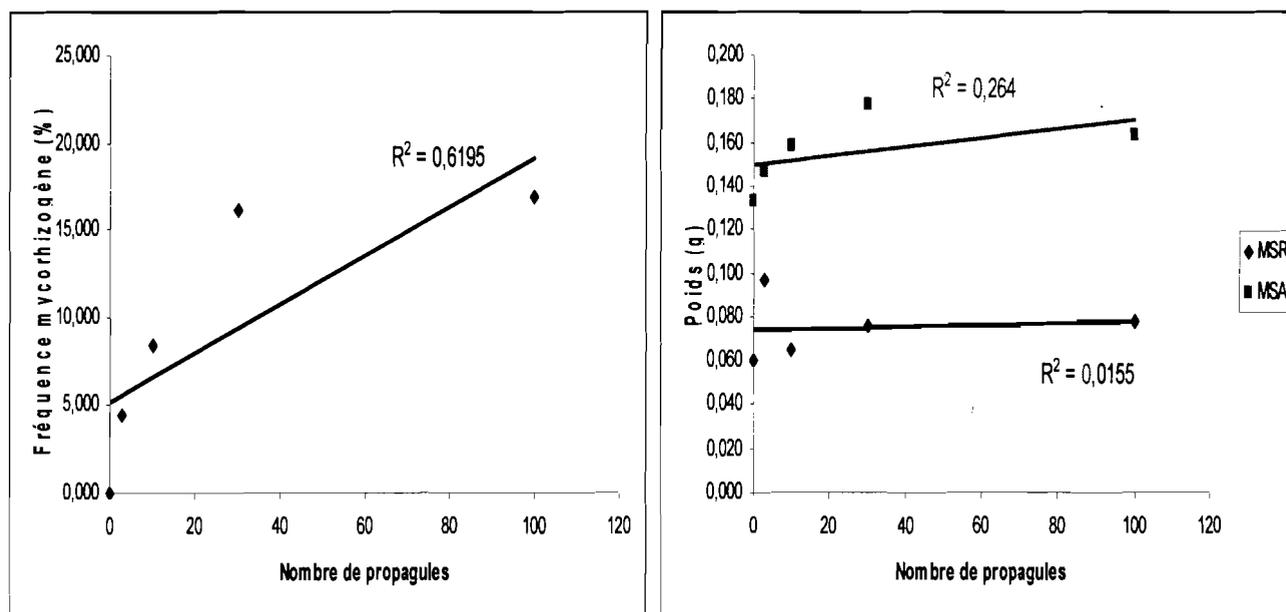


Figure 3 : Relation entre le nombre de propagules, la fréquence mycorrhizogène, la matière sèche aérienne et racinaire.

La figure 4 montre qu'il existe une corrélation significative ($p < 0,05$) entre le PIM_{50} et les caractéristiques physico-chimiques du sol. ($R^2 \geq 0,90$ pour l'azote totale et $R^2 \geq 0,80$ pour le carbone totale). Cette corrélation n'est pas significative avec le phosphore assimilable et le pH au niveau du sol. Les sols qui nécessitent un nombre de propagules élevés pour infecter 50% des plants (PIM_{50} élevé donc un PIM bas) ont des teneurs en azote et carbone total faibles.

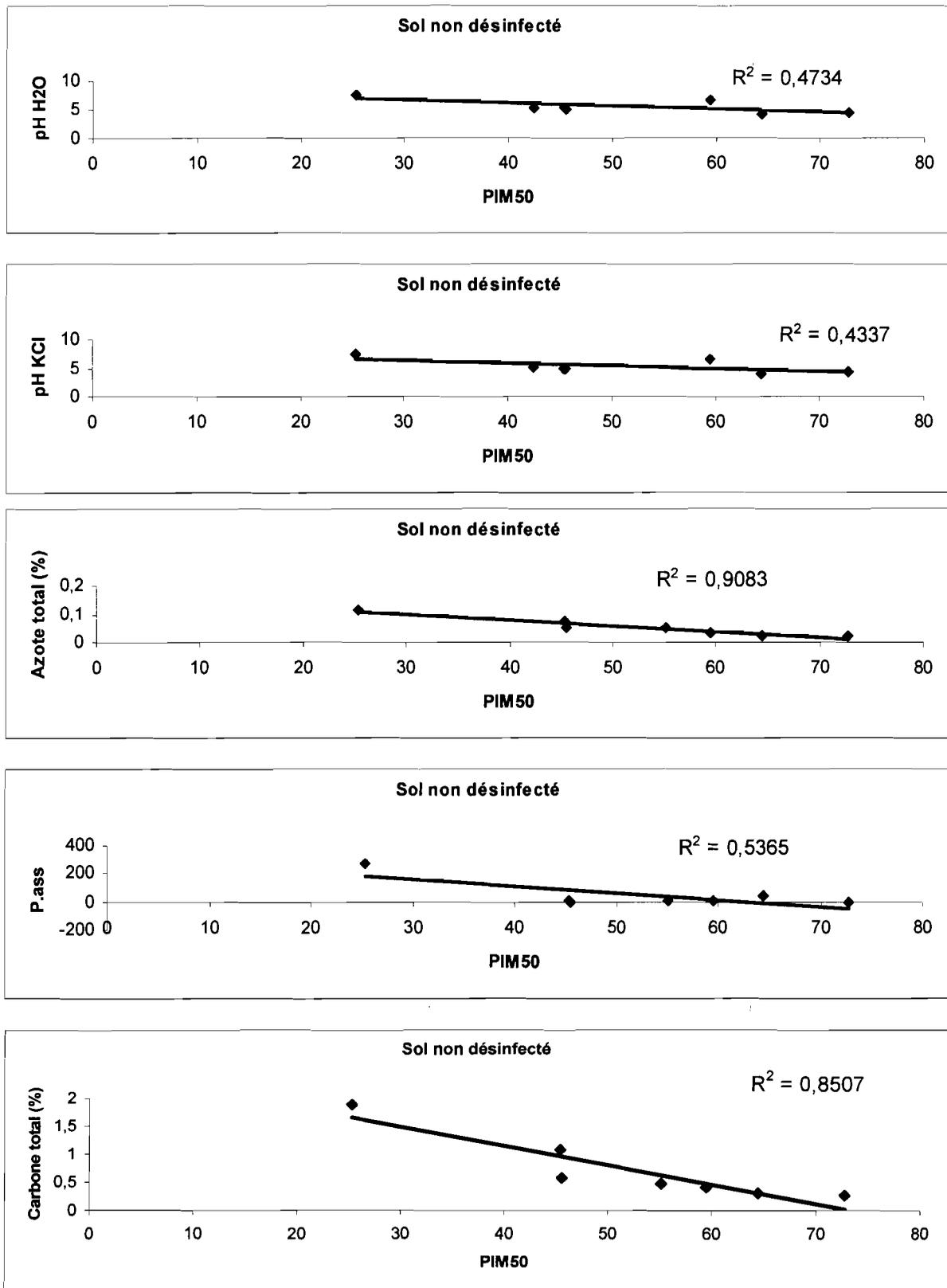


Figure 4 : Relation entre le PIM et les caractéristiques physico-chimiques du sol non désinfecté.

1.3. Mise en évidence de relation entre PIM et activité catabolique microbienne.

Pour ce qui est de l'activité catabolique des sols tels que ramenés des parcelles, on note que la richesse catabolique (nombre de substrats ayant induit une respiration significative) varie significativement ($p < 0,0001$) selon les types de sols. Plus de la moitié des substrats ont induit une respiration significative avec KBS A et KBS A+ ayant respectivement une richesse catabolique égale à 19 et 17 (Tableau 6). La diversité catabolique mesurée par l'indice de Shannon-Wiener est significative ($p < 0,0001$) et montre que cette diversité est élevée avec KBS A (2,80) et KBS A+ (2,47). Les mêmes tendances sont observées avec l'équitabilité qui montre une régularité plus élevée de la réponse des sols KBS A et KBS A+ aux différents substrats (Tableau 6).

Les acides carboxyliques sont les substrats qui ont induit une respiration significative. Parmi ces acides, l'acide ascorbique, l'acide oxalique, le 2-kétoglutaric acide et le 2-ketobutyric acide ont induit une respiration significative (Fig. 5). Les hydrates de carbones n'ont pas induit de respiration significative au niveau des sols. Pour ces mêmes substrats, on note que les valeurs les plus élevées sont observées avec KBS A+ suivi de KBS A et de ZCS. Les faibles respirations s'observent avec KBSn.

Tableau 6 : Dégagement cumulé de CO₂, richesse catabolique, indice de diversité et équitabilité de l'activité catabolique dans les sols.

Sol	Paramètres			
	Cumul CO ₂ (µg CO ₂ g-1 sol h-1)	Richesse catabolique	Indice de Shannon ⁽²⁾	Équitabilité ⁽³⁾
GPL	332,49 a ⁽¹⁾	5,33 ab ⁽¹⁾	2,06 ab ⁽¹⁾	0,61 ab ⁽¹⁾
KBS A+	8193,79 b	17,33 c	2,47 b	0,73 b
KBS A	1297,84 a	19,00 c	2,80 b	0,83 b
KBSn	108,56 a	3,33 a	2,29 b	0,68 b
SN	678,56 a	4,33 a	1,55 a	0,46 a
ZCS	563,49 a	8,00 b	2,06 ab	0,61 ab
ZF	244,38 a	3,67 a	2,24 b	0,66 b

⁽¹⁾ les valeurs suivies d'une même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 0,5% selon le test de Newman-Keuls

⁽²⁾ Indice de Shannon (H') = $-\sum p_i \cdot \ln p_i$

⁽³⁾ Équitabilité (E) = $H' / \ln S$ avec S = nombre total de substrats

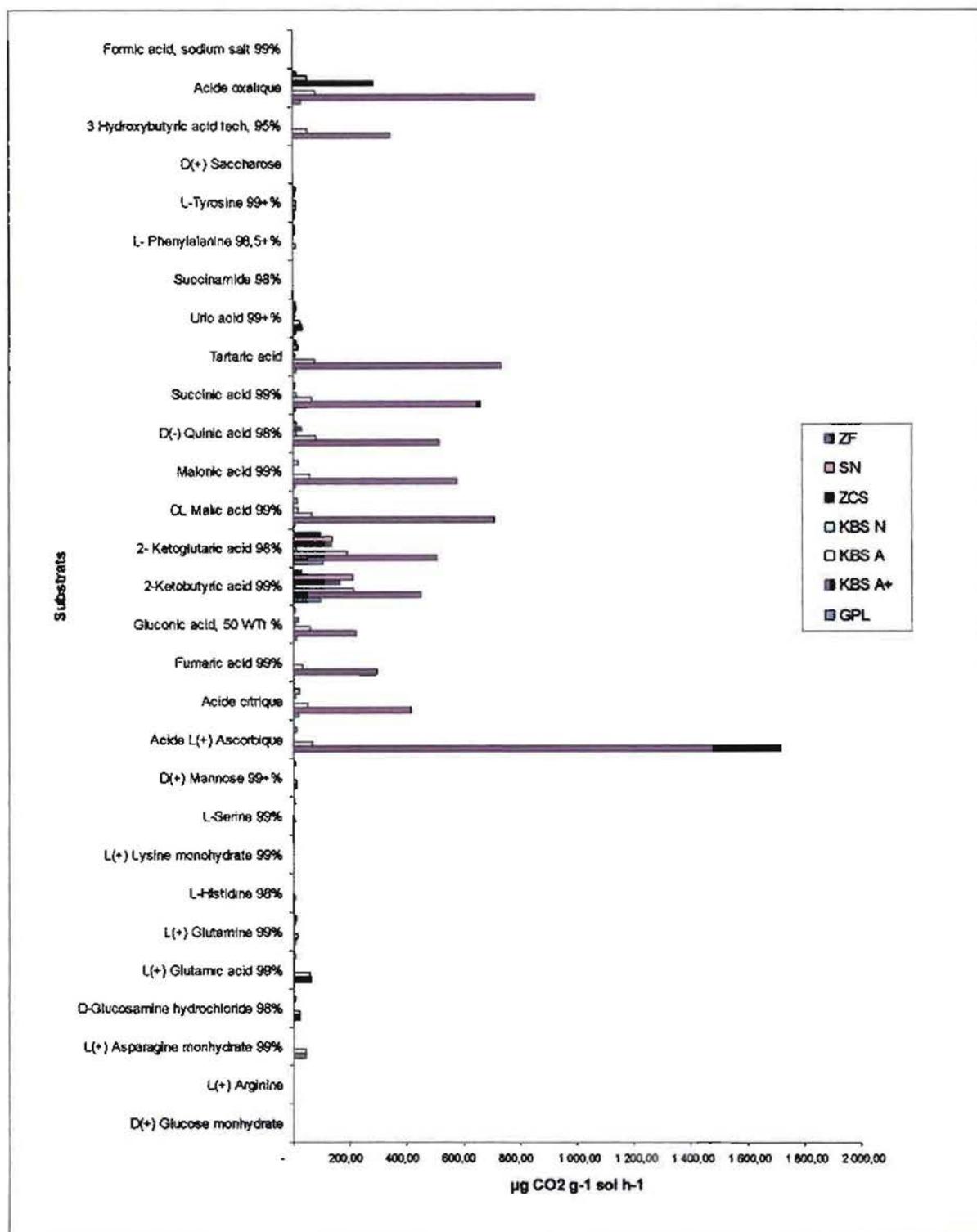


Figure 5 : Réponse catabolique des sols aux différents substrats organiques après 4h d'incubation.

La figure 6 montre qu'il existe une corrélation significative entre le PIM₅₀ et l'activité catabolique induite par le groupe des hydrates de carbone et celui des acides carboxyliques ($R^2 \geq 0,60$). Ce résultat signifie que les sols ayant induit une respiration significative avec ces

groupes de substrats ont une valeur de PIM_{50} faible (donc une richesse en propagules infectives élevée). On note également une corrélation significative entre le PIM_{50} et le cumul de l'activité induite par les substrats ($R^2 = 0,60$) (Fig.7).

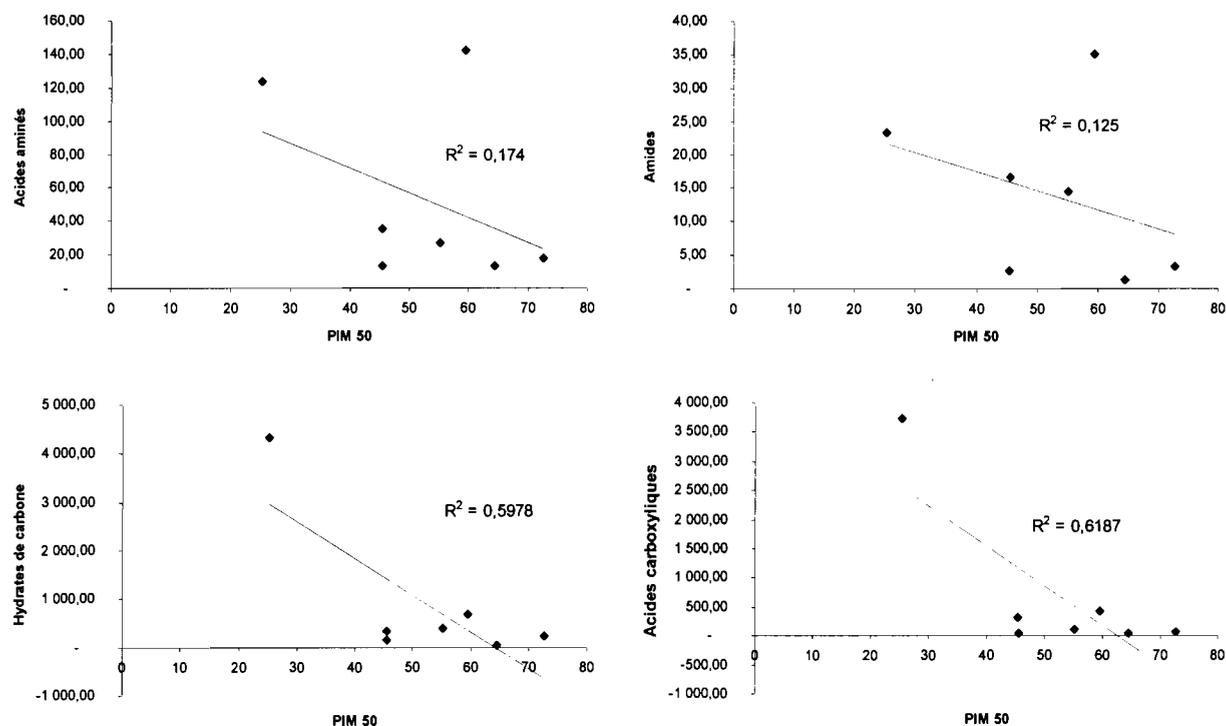


Figure 6 : Relation entre le PIM des sols et les différents groupes de substrats organiques.

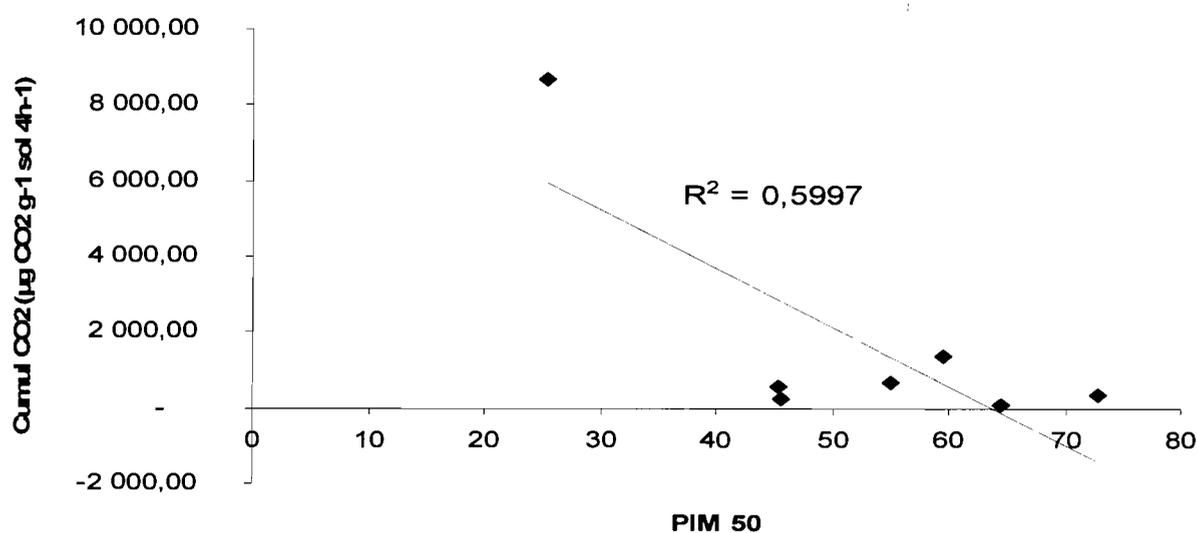


Figure 7 : Relation entre le PIM des sols et le cumul de l'activité biologique.

Le tableau 7 montre que les caractéristiques physico-chimiques du sol ont une influence sur l'activité catabolique microbienne. La somme cumulée de CO₂ dégagé est fortement corrélée au carbone total du sol ($R^2 = 0,79$). On note également une corrélation positive entre le groupe des hydrates de carbone ($R^2 = 0,79$), le groupe des acides carboxyliques ($R^2 = 0,82$) et la teneur en carbone totale des sols. Le groupe des acides aminés est également corrélé au pH KCl ($R^2 = 0,84$) et au pH H₂O ($R^2 = 0,78$) des sols. En somme, le pH influence l'activité catabolique du sol quelque soit le groupe de substrats utilisé (Tableau 7).

Tableau 7 : coefficient de corrélation (R^2) entre les différents groupes d'acides organiques, le CO₂ cumulé et les caractéristiques physico-chimiques du sol non désinfecté

Substrat	Azote total	Carbone total	pH H ₂ O	P. ass	pH KCl
Acides aminés	0,13	0,18	0,78*	0,29	0,84*
Hydrates de carbone	0,68	0,79*	0,69*	0,95*	0,68*
Acides carboxyliques	0,70	0,82*	0,67*	0,96*	0,65*
Amides	0,059	0,052	0,62*	0,09	0,69*
CO ₂ cumulé	0,68	0,79*	0,70*	0,95*	0,68*

* valeur significative au seuil de 0,05 selon le test de similarité de Pearson.

1.4. Mise en évidence de relation entre le PIM et la nodulation rhizobienne.

De manière générale, l'inoculation avec *Glomus intraradices* a entraîné une augmentation du nombre de nodules, du poids sec des nodules, de la matière sèche aérienne et racinaire quelque soit le sol, sauf pour ZF en ce qui concerne le nombre de nodule. Au niveau de ZF, bien qu'on observe une baisse de 8% du nombre de nodule dans les sols inoculés, on note cependant une augmentation de plus de 170% du poids sec des nodules dans les sols inoculés comparés aux non inoculés. Par ailleurs, aucun nodule n'a été observé au niveau de SN (inoculé ou non). Pour ce qui concerne la fréquence mycorhizogène, la plus grande stimulation a été observée avec SN (+228%). L'effet de *Glomus intraradices* dans la colonisation racinaire dans ce sol est très important, alors qu'il contient le plus faible nombre de spores (125). Ce qui laisse suggérer que les sols à faible potentiel mycorhizogène seraient plus aptes à l'inoculation.

Dans cette expérience, en considérant isolement chaque sol, on constate que l'inoculation a eu des effets variables sur la nodulation rhizobienne. L'inoculation a eu un effet significatif sur le nombre de nodules uniquement avec GPL et ZCS ($p < 0,05$). Un effet significatif de l'inoculation est observé sur le poids sec des nodules avec KBS n, ZCS et ZF ($p < 0,05$). Un

effet significatif de l'inoculation est observé sur la MSA sauf avec KBS A, SN et ZCS. On note une colonisation racinaire chez les plants non inoculés ce qui témoigne de la présence des spores dans ces sols. (Tableau 8). L'effet de *Glomus intraradices* dans la colonisation racinaire est significatif avec GPL, SN et ZF (Tableau 8).

Présence de l'arbuscule (seulement) et de couronnes

Tableau 8 : Croissance du niébé inoculé ou non avec *G. intraradices* après 2 mois de culture sous serre.

Sol	Traitement	Paramètres mesurés				
		Nombre nodule	Poids sec nodule	MSA (g)	MSR (g)	FM (%)
GPL	NI	25 a (1)	0,027 a (1)	0,92 a (1)	0,30 a (1)	31,11 a (1)
	I	35 b	0,038 a	1,25 b	0,36 a	38,89 b
KBS A+	NI	25,67 a	0,070 a	1,63 a	0,22 a	29,99 a
	I	33,33 a	0,070 a	2,63 b	0,4 a	32,22 a
KBS A	NI	16,67 a	0,04 a	1,44 a	0,37 a	23,33 a
	I	25 a	0,06 a	1,55 a	0,38 a	46,66 a
KBS n	NI	15,33 a	0,06 a	1,91 a	0,51 a	18,89 a
	I	16,67 a	0,08 b	2,11 b	0,58 a	41,11 a
SN	NI	-	-	1,18 a	0,26 a	7,78 a
	I	-	-	1,30 a	0,34 b	25,55 b
ZCS	NI	13,67 a	0,027 a	1,35 a	0,33 a	18,89 a
	I	21,67 b	0,033 b	1,63 a	0,38 a	21,11 a
ZF	NI	11,67 a	0,002 a	0,96 a	0,23 a	27,78 a
	I	10,67 a	0,019 b	1,38 b	0,40 b	47,78 b

NI = non inoculé, I = inoculé ; (1) les chiffres suivis d'une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Newman-Keuls.

La figure 8 montre qu'il n'existe pas de corrélation entre le PIM₅₀ et le nombre de nodules ni entre la fréquence mycorhizogène et le nombre de nodules dans les sols inoculés. Par contre, il existe une corrélation significative ($R^2 = 0,76$) entre la fréquence mycorhizogène et le nombre de nodules dans les sols non inoculés.

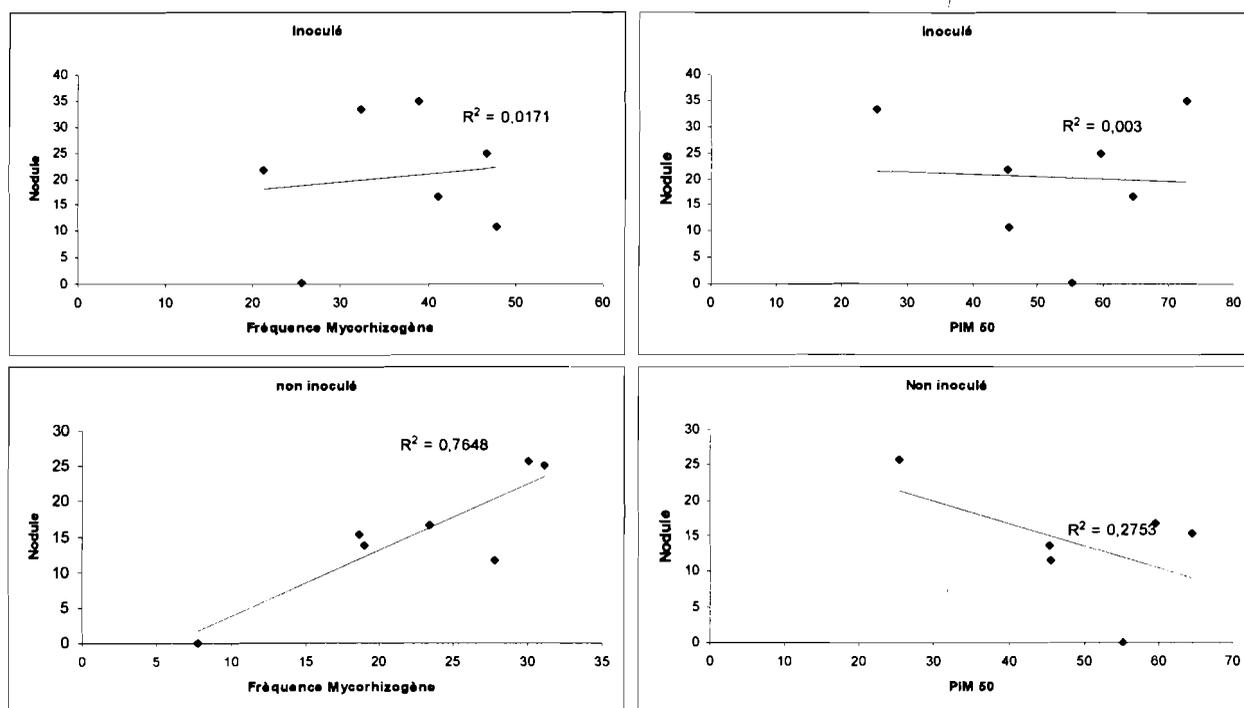


Figure 8 : Relation entre la nodulation rhizobienne, la fréquence mycorrhizogène et le PIM des sols.

1.5. Mise en évidence de relations entre l'inoculation mycorhizienne et l'activité catabolique microbienne.

Après deux mois de culture sous serre avec le niébé inoculé ou non avec *G. intraradices*, des échantillons de sols ont été prélevés pour mesurer leur profil catabolique. Le but est de savoir s'il existe une interaction entre la nodulation, la symbiose mycorhizienne et les profils cataboliques.

En cumulant le dégagement de CO₂, on constate que les sols sont significativement différents en ce qui concerne leur réponse aux différents substrats organiques. La plus forte réponse est observée avec KBS A+ suivi de KBS A et la plus faible avec SN. On signale que c'est dans ces sols que l'on trouve des teneurs élevées en carbone. La richesse catabolique est élevée et significativement différente selon le type de sol ($p < 0,0001$). Quelque soit le sol, on observe que 50% des substrats on induit une réponse catabolique significative. On note que KBS A et KBS A+ sont les sols qui ont une richesse plus élevée (au moins 22 substrats) ; la plus faible est observée avec ZF (16 substrats). La diversité fonctionnelle (H') est par contre plus élevée au niveau de ZF et ZCS (3,27 et 3,26 respectivement)(Tableau 9).

Tableau 9 : Dégagement cumulé de CO₂, richesse catabolique, indice de diversité et équitabilité de l'activité catabolique dans les sols.

Sol	Paramètres			
	Cumul CO ₂ (µg CO ₂ g-1 sol h-1)	Richesse catabolique	Indice de Shannon (H')	Équitabilité
GPL	552,05 d ⁽¹⁾	20 d ⁽¹⁾	3,21 b ⁽¹⁾	0,919 b ⁽¹⁾
KBS A+	4103,85 g	22,5 e	2,77 a	0,792 a
KBS A	653,003 f	23 e	3,24 c	0,927 c
KBSn	426,63 a	13,5 a	3,21 b	0,928 c
SN	484,53 c	18 c	3,21 b	0,919 b
ZCS	572,47 e	20,5 d	3,26 d	0,931 d
ZF	466,24 b	16,5 b	3,27 e	0,936 e

Les chiffres suivis d'une même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 0,5% selon le test de Newman-Keuls.

Par ailleurs, le cumul de CO₂ dégagé, la richesse catabolique et la diversité fonctionnelle étaient significativement différents dans les traitements inoculés. Cet effet est observé dans ZCS, SN, KBSn, ZF. De façon générale, l'inoculation avec *G. intraradices* a modifié significativement l'activité catabolique de la microflore tellurique. En moyenne, la richesse catabolique est de 20 substrats pour les traitements inoculés contre 18 pour les non inoculés (Tableau 10). La diversité catabolique (réponse des sols aux différents substrats organiques) est significativement élevée dans les traitements inoculés par rapport aux non inoculés. Ceci montre que l'inoculation stimule l'activité des microorganismes, mais que cela entraîne également une diversification fonctionnelle de la communauté microbienne mycorrhizosphérique.

Tableau 10 : Dégagement cumulé de CO₂, richesse catabolique, indice de diversité et équitabilité de l'activité catabolique dans des sols sous niébé inoculés ou non après 2 mois de culture sous serre.

Traitements	Cumul CO ₂ (µg CO ₂ g-1 sol h-1)	Richesse catabolique	Indice de Shannon	Équitabilité
Non inoculé	1030,79 a ⁽¹⁾	18,28 a ⁽¹⁾	3,158 a ⁽¹⁾	0,909 a ⁽¹⁾
Inoculé	1043,19 b	20 b	3,178 b	0,903 b
Écart-type	1269,582	3,565	0,169	0,048
SCE ⁽²⁾	2866,059	18,750	0,001	0,0001
Probabilité du modèle	0,0003	<0,0001	<0,0001	<0,0001

⁽¹⁾Les chiffres suivis d'une même lettre dans une colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 0,5% selon le test de Newman-Keuls. ⁽²⁾ SCE : Somme des Carrées des Ecarts.

1.6. Identification d'indicateurs pour l'évaluation du PIM des sols.

Une meilleure évaluation du PIM des sols permettra une gestion conséquente de la composante fongique. Ceci permettra de mieux valoriser les symbiotes indigènes ou de réussir

l'inoculation par les symbiotes exogènes. Il sera question dans cette partie d'utiliser une régression linéaire pour identifier les indicateurs susceptibles d'évaluer le PIM des sols en milieu tropical. Cette partie se veut une ébauche à la modélisation du PIM des sols. Nous considérons les paramètres liés au sol non désinfecté.

Le tableau 11 montre que les spores totales du sol, l'activité respiratoire cumulées, les différents groupes de substrats organiques et les éléments chimiques du sol (Pass., CT, NT) permettent d'évaluer le PIM des sols. Pris isolément, plus de 60% de la variabilité du modèle est expliqué par ces composantes avec un risque d'erreur variant entre 2 et 7%.

Le nombre de nodules ne contribue qu'à expliquer 0,5% de la variabilité du modèle avec un risque d'erreur très élevé ($p = 0,88$). Dans ce cas, il ne semble pas être un bon indicateur pour l'estimation du PIM des sols.

En combinant les différents éléments (spores totales, cumul de CO₂ dégagé, éléments chimiques), on note que 98% de la variabilité peut être expliqué par ces composantes mais avec un risque d'erreur de 23%.

Tableau 11 : Droites de régression linéaire entre le PIM et quelques composantes physico-chimiques et biologiques du sol.

Composante	Droite de régression	R ²	Probabilité
Spores du sol	$PIM_{50} = 76,14 - 0,041*SN - 0,66*SR + 0,33*SJ - 0,64*SB$	0,75	0,42
	$PIM_{50} = 75,91 - 0,066*ST$	0,67	0,02*
Respiration du sol	$PIM_{50} = 57,87 - 0,11*AC + 0,083*HC + 0,61*AA + 2,66*A$	0,96	0,07
	$PIM_{50} = 59,34 - 0,0041*Cumul\ CO_2$	0,61	0,03*
Elements	$PIM_{50} = 76,98 + 8,48*CT - 561,99*NT - 0,012*Pass.$	0,91	0,04*
Chimiques	$PIM_{50} = 118,41 - 41,17*pH_2O + 30,39*pHKCl$	0,62	0,14
Nodulation	$PIM_{50} = 54,54 - 0,108*Nod$	0,005	0,88
Facteurs Combinés	$PIM_{50} = 96,48 - 0,073*ST + 0,0066*Cumul\ CO_2 + 67,60*CT - 1271,94*NT - 0,198*Pass.$	0,98	0,23

SN : Spores Noires ; SR : Spores Rouges ; SJ : Spores Jaunes ; SB : Spores Blanches ; ST : Spores Totales ; Nod : Nodules ; CT : Carbone Total ; NT : Azote Total ; Pass. : Phosphore assimilable ; AC : Acides Carboxyliques ; HC : Hydrates de Carbone ; AA : Acides Aminés ; A : Amides. * Valeurs significatives au seuil de 5%.

II. DISCUSSION.

Les spores de champignons mycorrhiziens à arbuscules (CMA) sont souvent considérées comme la principale réserve de propagules dans les sols. La caractérisation morphologique est la première étape pour apprécier la diversité des CMA dans les agrosystèmes. Dans notre cas, nous avons utilisé le critère couleur des spores ; ce qui nous a permis de distinguer 4 « morphotypes » sur cette base. Mais il nous est difficile de déterminer la diversité des spores avec ce seul critère. Des analyses moléculaires pourraient permettre de déterminer et de caractériser la diversité des spores. Le nombre de spores viables est très faible dans les écosystèmes arides. En effet, le nombre de spores dans les sols que nous avons utilisés varie de 125 à 719 comparés à certains écosystèmes où l'on dénombre souvent plus de 6000 spores (Zhiwei, 2005). Mais comparés à certains agrosystèmes, nous pouvons dire que ces sols sont relativement riches en spores. En effet, Requena et al (1995) ont trouvé 20 à 40 spores et Azcon-Aguilar et al. (2002) entre 10 à 160 spores sur des sols en Espagne. Ces résultats montrent que le nombre des spores varie énormément selon les écosystèmes (Zhiwei, 2005, Plenchette, 1987), les conditions édaphiques (Kernaghan, 2005) et les pratiques agricoles (Plenchette et al, 2004). En effet le sol KBS A+ ayant reçu des amendements organiques pendant plusieurs années s'est avéré avoir le PIM et le nombre de spores les plus élevés. On a constaté que la colonisation, le nombre de propagules et la diversité des CMA étaient élevés avec la matière organique (Gosling et al., 2005). Dans le zaï forestier que l'on peut comparer à une jachère, le remplacement graduel des graminées et des herbacées par les arbustes n'ont pas contribué au maintien des CMA (Plenchette et al., 2004). L'absence de végétation (sol nu) n'est guère propice au développement des champignons. Les CMA étant des symbiotes obligatoires, ont besoin de plantes hôtes pour leur maintien dans les sols.

Les spores représentent une fraction de la communauté mycorrhizienne fonctionnelle. Le faible nombre de spores serait lié à des problèmes de sporulation liée aux conditions édaphiques (An et al, 1997). Dans notre cas, on pourrait suspecter l'acidité du sol. (pH = 5 en moyenne). Gosling et al. (2005) ont montré en effet que le pH influence la dominance des spores. Azcon-Aguilar et al. (2003) et Winding et al. (2005) ont montré que le nombre total de spores était relativement bas dans les écosystèmes arides et n'était pas significativement corrélé au potentiel mycorrhizogène des sols. Contrairement à ces auteurs, nous avons trouvé que le nombre total des spores était corrélé au PIM des sols. Ceci peut se comprendre si l'on estime que ce sont les spores qui après fructification colonisent les racines des plantes.

Cependant Azcon-Aguilar et *al.* (2003) ont montré que le nombre de spores de certaines espèces particulières était corrélé au PIM. Les corrélations entre le PIM₅₀ et les spores noires ($R^2 = 0,38$) et les spores rouges ($R^2 = 0,36$) mêmes si elles restent faibles sont significativement différentes de celles qui lient le PIM₅₀ aux autres types de spores. Ceci indique la contribution des spores de certains CMA dans le PIM des sols et suppose aussi que les spores ne sont pas la principale source de mycorhization ou que d'autres facteurs y interviennent.

On constate que les caractéristiques chimiques du sol influencent le PIM des sols. L'azote et le carbone total ont un effet net sur le PIM₅₀ ($R^2 = 0,90$). En fait le carbone joue un rôle important dans l'établissement de la mycorhization comme source d'énergie pour les hyphes mycéliens. Les sols ayant des teneurs élevées en carbone total sont ceux qui ont un PIM et des taux de mycorhization élevés. Les éléments nutritifs issus des sources de matière organique tels que les résidus de récolte, le compost, le fumier peuvent stimuler la mycorhization (Panja et Chaudhuri, 2004 ; Celik et *al.*, 2004 Gosling et *al.*, 2005). Mais il faut noter que l'effet de l'amendement organique sur la mycorhization est imprédictible car des amendements à forte concentration de phosphore par exemple peuvent entraîner une baisse de la fréquence mycorhizogène (Gosling et *al.*, 2003). La fertilité initiale du sol est un facteur déterminant dans l'établissement de la symbiose mycorhizienne. Les études à ce jour montrent que les sols pauvres sont les plus favorables à la mycorhization (Hayman 1975 ; Strullu, 1991), mais ces études ne précisent pas de façon claire quel est l'effet de chaque élément sur le niveau de colonisation racinaire. Paradoxalement, nous n'avons pas trouvé de relations entre la fréquence mycorhizogène et les caractéristiques physico-chimiques des sols. Le niveau en phosphore est souvent cité comme facteur déterminant dans l'établissement de la symbiose mycorhizienne. Seulement, on ne précise pas souvent s'il s'agit de la teneur du sol en phosphore total ou soluble. Dans notre cas, il n'existe pas de relation significative entre PIM et phosphore assimilable du sol. Les études ont montré que les fortes teneurs en phosphore étaient défavorables à la colonisation racinaire (Plenchette et *al.*, 1983 ; Sylvia et *al.*, 1993). Mais ceci n'est vérifié que si le pouvoir fixateur du sol est faible. Cependant, on note un effet significatif variable de l'inoculum exogène *G. intraradices* sur la biomasse et sur le taux de mycorhization dans les sols. Cela témoigne néanmoins de l'efficacité de *G. intraradices* et de l'aptitude de certains sols à répondre à l'inoculation : on parle de réceptivité du sol à la mycorhization (en anglais mycorrhizal soil receptiveness : MSR). La différence de réponse observée entre les sols ne peut s'expliquer que par les caractéristiques des sols. Il se pourrait

que certains paramètres non pris en compte soient à l'origine de ces variations comme la teneur en calcium (Khaled et *al.*, 2003). En effet la salinité du sol peut réduire le taux de colonisation racinaire et rendre critique la réussite de la mycorhization.

Parmi les facteurs qui interagissent avec la communauté fongique, il existe la communauté microbienne mycorhizosphérique. La différence de réponse aux substrats organiques reflète des différences dans le recyclage et la teneur en carbone. Une baisse en C organique entraîne une baisse du CO₂ dégagé (Degens et *al.*, 2000 ; Graham et Haynes, 2005). Les fortes respirations sont observées avec les sols ayant une teneur élevée en carbone et où il y a eu apport de matières organiques (KBS A+, KBS A, ZCS). Le sol nu a enregistré une respiration globale supérieure à GPL>ZF>KBSn. Ces résultats confirment que la teneur en carbone détermine la diversité fonctionnelle de la communauté microbienne, car la teneur en carbone dans le sol nu (0,476%) est supérieure à GPL (0,267%), à KBSn (0,306%) mais inférieure à ZF (0,57%). Cette faible teneur en carbone dans les agrosystèmes peut être liée à la texture et à la structure du sol. Mais en général, l'activité catabolique microbienne est plus importante dans les sols sous pâture ou sous végétation indigène que dans les sols sous céréales/maïs/plantes d'horticulture (Degens et *al.*, 2000) Ceci suppose que les microorganismes peuvent être présents dans les sols, mais pas nécessairement fonctionnels (Degens et *al.*, 2000) et que l'ajout de substrats peut stimuler cette activité (Teklay et *al.*, 2006). La baisse de l'activité catabolique est liée à une baisse de la teneur en carbone du sol ; à un changement dans l'utilisation des terres (Degens et *al.*, 2001 ; Stevensen et *al.*, 2005). Les sols ayant reçu des amendements organiques (donc des teneurs en C organique élevées) ont eu une réponse catabolique significative. Les résultats ont montré que ces sols ont un fort potentiel mycorhizogène. Contrairement à Wamberg et *al.* (2003), on observe que l'inoculation a entraîné une augmentation de l'activité respiratoire de la rhizosphère dans certains sols, effet lié certainement à la production de certains métabolites ayant un effet stimulateur sur les microorganismes. On pourrait citer le groupe des acides carboxyliques et des hydrates de carbones avec lesquels on a constaté une corrélation positive ($R^2 = 0,82$ et $0,79$ respectivement) influencée par la teneur en carbone total des sols. Ces résultats sont conformes à ceux de Winding et *al.* (2005) qui ont trouvé que le CO₂ dégagé était corrélé avec les CMA. Le PIM est positivement corrélé à l'activité respiratoire globale ($R^2 = 0,60$), ce qui indique une interaction entre les deux communautés mycorhizosphériques (champignons mycorhiziens et microorganismes). Ceci témoigne de la nécessité de prendre en compte la composante des microorganismes mycorhizosphériques dans la détermination du PIM des

sols. Le PIM peut permettre ainsi de mettre en évidence l'état biologique des agrosystèmes et être utilisé comme indicateur biologique de gestion de la fertilité des sols.

Aucune relation n'a été observée entre le PIM des sols et le nombre des nodules ni le poids sec des nodules de rhizobiums. Cependant, on a constaté que la fréquence mycorhizogène était corrélée aux nombres de nodules dans le sol non désinfecté. Ceci met en évidence l'effet synergique entre mycorhizes et rhizobium. L'absence de nodules dans le sol nu (SN) pourrait expliquer cette absence de relation avec le PIM. Comme nous l'avons dit précédemment, il se pourrait qu'une salinité élevée dans ce sol limite d'une manière sévère la fixation symbiotique de l'azote et affecte ainsi négativement le processus de nodulation et l'activité respiratoire des bactéroïdes (Khaled et *al.*, 2003). L'antagonisme supposé entre les deux micro-symbiotes ainsi que l'inhibition inter-endophytes seraient le résultat d'éventuelles compétitions entre CMA et rhizobium, notamment vis-à-vis des hydrates de carbones solubles dans les racines de la plante hôte et non pas à une compétition pour les sites d'infection. Par ailleurs l'effet synergique souvent mis en évidence est le résultat d'une double inoculation. Dans notre cas, il n'y a pas eu apport d'inoculum rhizobien. L'effet synergique ici constaté dépend largement des types de rhizobium présents dans chaque sol. L'intensité des effets de l'interaction entre micro-symbiotes serait liée à la combinaison champignon-bactérie.

L'estimation du PIM des sols par la mesure de la nodulation rhizobienne dans le cas de notre étude est très délicate. Par contre, il est possible d'estimer le PIM en utilisant l'activité fonctionnelle de la microflore mycorhizosphérique ($p = 0,03$, $R^2 = 0,61$), les spores totales du sol ($p = 0,02$, $R^2 = 0,67$) et les éléments chimiques du sol ($p = 0,04$, $R^2 = 0,91$). Pour ce qui concerne la nodulation rhizobienne, il serait important de prendre en compte l'espèce nodulante. Il était en fait prévue l'utilisation d'une espèce à très large gamme vis-à-vis des bradyrhizobia tropicaux (le siratro : *Macropodium atropurpureum*). Malheureusement, nous n'avons pas pu obtenir des semences de cette plante. Le niébé utilisé est une variété sélectionnée donc pas nécessairement efficace au regard de sa capacité à noduler. Il se pourrait qu'il soit limité vis-à-vis des bradyrhizobia de ces sols qui du reste devrait être déterminés. La connaissance de ces bradyrhizobia pourrait permettre d'utiliser un facteur de correction par rapport à leur efficacité et leur efficacité vis-à-vis de l'hôte. Par ailleurs, la figure 9 qui résume les résultats, montre que l'estimation du PIM en utilisant la composante chimique, la composante fongique, l'activité catabolique du sol et la nodulation rhizobienne est déjà assez complexe pour qu'un simple modèle linéaire puisse rendre compte des multiples interactions.

CONCLUSION GENERALE.

La pression démographique et la dégradation de l'environnement ont entraîné une réévaluation des systèmes agricoles actuels dans plusieurs parties du monde. L'agriculture doit désormais s'orienter vers des pratiques plus durables. Ceci ne sera possible que par une meilleure connaissance et maîtrise des interactions biologiques dans les agro-systèmes. Le rôle des mycorhizes dans l'agriculture ne fait l'objet d'aucun doute. Cependant, son utilisation en agriculture reste toujours faible et cela du fait de la méconnaissance de leur importance et de leurs effets sur la croissance des plantes en milieu naturel. Cela est lié à une non maîtrise des interactions mycorhizes-microorganismes, mycorhizes-fertilité du sol, mycorhizes-plantes hôtes.

Dans notre étude, il a été question d'une part d'évaluer le PIM de différents sols et d'autre part de déterminer les relations pouvant exister entre le PIM et les caractéristiques physico-chimiques du sol, l'activité fonctionnelle de la microflore tellurique et la nodulation rhizobienne.

Les résultats ont montré que les spores les plus élevés se trouvaient dans KBS A+ (719) et ZCS (425). Ces sols ont le PIM₅₀ le plus bas (KBS A+ 25,3 et ZCS 45,42). La plus forte colonisation racinaire est observée avec 100 propagules dans KBS A+(15,06%). L'inoculation a eu des effets positifs sur le nombre de nodules (-8 à +58%), le poids sec des nodules (+22 à +170%), la matière sèche aérienne (+5 à +79%), la matière sèche racinaire (+7 à +61%) et la fréquence mycorhizogène (+7 à +228%). La richesse catabolique et la diversité fonctionnelle étaient plus élevées dans KBS A (19 et 2,80) et dans KBS A+ (17 et 2,47). Dans les sols inoculés avec *Glomus intraradices*, la richesse catabolique était élevée : 20 contre 18 dans les non inoculés avec une augmentation de l'activité respiratoire de +1,2% par rapport aux non inoculés. On observe une corrélation entre le PIM des sols et le nombre total des spores, la teneur en éléments chimiques, et l'activité catabolique des microorganismes. Par contre aucune corrélation n'a été constatée entre le PIM et le nombre de nodule. Le nombre total de spore, l'activité catabolique et les éléments chimiques pris isolément explique plus de 60% de la variabilité du PIM avec des risques d'erreur allant de 2 à 7%. Ces résultats montrent l'interdépendance et la complexité des phénomènes biologiques dans l'écosystème édaphique, ce qui rend difficile le choix d'un indicateur pour l'évaluation du PIM des sols tropicaux

Il est connu que les sols tropicaux sont pauvres en phosphore et azote, limitant ainsi la productivité agricole. L'un des moyens pour améliorer le rendement des cultures est de jouer sur les processus biologiques de régulation en mettant l'accent sur un certain nombre de microorganismes comme les mycorhizes et les rhizobia. En effet, les mycorhizes améliorent la nutrition phosphatée des plantes et les rhizobia, la nutrition azotée. Il sera donc question de valoriser la symbiose tripartite (mycorhize-rhizobium-légumineuse) pour la restauration de la fertilité des sols en milieu tropical.

Le défi pour la recherche sera d'une part de déterminer la diversité des CMA des sols tropicaux, d'identifier les symbiotes qui ont un effet significatif sur les productions, de déterminer les facteurs influençant le PIM des sols et d'autre part d'identifier les pratiques culturales qui optimisent l'effet de la symbiose et d'inventorier les plantes tropicales mycotrophiques pour leur utilisation dans la rotation culturale en vue d'une meilleure gestion du PIM des sols. Tout cela devrait aboutir à long terme à la modélisation des processus mycorhiziens.

- ↳ quel intérêt ?
- + Son application pratique pour les producteurs
Amoyens. ?
 - + choix des sols. ?
 - + Remercier le membre du jury
 - + Féliciter l'étudiant pour sa présentation orale
 - + Faire ressortir les elts clés — pertinence pour le plan
scientifique → Applications.

BIBLIOGRAPHIE.

Albrecht C., Geurts R., Bisseling T. (1999). Legume nodulation and mycorrhizae formation; two extremes in host specificity meet. *The EMBO Journal* Vol. 18.No. 2 pp. 281-288.

An Z. Q., Guo B. Z., Hendrix J. W. (1997). Viability of soilborne spores of glomalean mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 30 No. 8/9 pp. 1133-1136, 1998.

Andrade S. A. L., Abreu C. A., de Abreu M. F., Silveira A. P. D. (2004). Influence of lead additions on arbuscular mycorrhiza and *Rhizobium* symbioses under soybean plants. *Applied Soil Ecology* 26 (2004) 123-131.

Augé R. M. (2004). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Canadian Journal of Soil Science* 84: 373-381.

Augé R. M. (2000). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* (2001) 11: 3-42.

Azcon-aguilar C., Palenzuela J., Roldan A., Bautista S., Vallejo R., Barea J. M. (2003). Analysis of the mycorrhizal potential in the rhizosphere of representative plant species from desertification-threatened Mediterranean shrublands. *Applied soil Ecology* 22 (2003) 29-37.

Bethlenfalvay, G.J. (1992). Mycorrhizae in crop productivity. In: Bethlenfalvay, G.J., Linderman, R.G. (Eds). *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*. American Society of Agronomy. Madison, WI, pp. 1 – 27 (Special Publication Number 54).

Biro B., Köves-Péchy K., Vörös I., Takacs T., Eggenberger P., Strasser R.J. (2000). Interrelations between *Azospirillum* and *Rhizobium* nitrogen-fixers and arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of alfalfa in sterile, AMF-free or normal soil conditions. *Applied Soil Ecology* 15 (2000) 159-168.

Brundrett, M.C., Piche, Y., Peterson, R.L. (1985). A developmental study of the early stages in vesicular-arbuscular mycorrhizal formation. *Canadian Journal of Botany.*, 63: 184-194

Brundrett M., Boucher N., Dell B., Grove T., Malajczuk N. (1996). Working with Mycorrhizas in Forestry and Agriculture. ACIAR Monograph 32. 374 +xp.

Caravaca F., Barea J.M., Figueroa D., Roldán A. (2000). Assessing the effectiveness of mycorrhizal inoculation and soil compost addition for enhancing reforestation with *Olea europaea* subsp. *sylvestris* through changes in soil biological and physical parameters. *Applied Soil Ecology* 20 (2002) 107-118.

Celik I., Ortas I., Kilic S. (2004). Effects of compost mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil & tillage Research* 78 (2004) 59-67.

Chaussod R. (1996). La qualité biologique des sols: Evaluation et implications. Forum « le Sol, un patrimoine menacé ? » paris, 24 octobre 1996. Numéro spécial.

Dabiré A. P. (2004). Etude des composantes biotiques et abiotiques régissant la capacité d'un sol à altérer un phosphate naturel au Burkina Faso : cas de la symbiose mycorrhizienne. Mémoire de fin d'études. Option Agronomie. UPB, IDR, 61p + Annexes.

Degens, B.P., Harris, J.A. (1997). Development of a physiological approach to measuring the catabolic diversity of soil microbial communities. *Soil Biology & Biochemistry*, 29: 1309-1320.

Degens B. P., Schippers I. A., Sparling G. P., Vojvodic-Vukovic M. (2000). Decreases in organic C reserves in soils can reduce the catabolic diversity of soil microbial communities. *Soil Biol. Biochem.* 32, 189-196.

Duponnois, R., Cadet, P. (1994). Interactions of *Meloidogyne javanica* and *Glomus* sp. on growth and N₂ fixation of *Acacia seyal*. *Afro-Asian Journal of Nematology*, 4 (2), 228-233.

Duponnois, R., Plenchette, C., Bâ, A.M. (2001a). Growth stimulation of seventeen fallow leguminous plants inoculated with *Glomus aggregatum* in Senegal. *European Journal of Soil Biology*, 37: 181-186

Duponnois, R., Plenchette, C., Thioulouse, J., Cadet, P. (2001b). The mycorrhizal soil infectivity and arbuscular mycorrhizal fungal spore communities in soils of different aged fallows in Senegal. *Applied Soil Ecology*, 17: 239-251.

Foy, C.D. (1992). Soil chemical factors limiting plant root growth. *Advances in Soil Science*, 19: 87-149.

Duponnois R., Founoune H., Masse D., Pontanier R. (2004a). Inoculation of *Acacia holosericea* with ectomycorrhizal fungi in a semiarid site in Senegal: growth response and influences on the mycorrhizal soil infectivity after 2 years plantation. *Forest Ecology and Management* 207 (2005) 351–362

Duponnois R., Paugy M., Thioulouse J., Masse D., Lepage M. (2004b). Functional diversity of soil microbial community, rock phosphate dissolution and growth of *Acacia seyal* as influenced by grass-litter-and soil-feeding termite nest structure amendments. *Geoderma*. Article in Press.

Duponnois, R., Colombet, A., Hien, V., Thioulouse, J. (2004c). The mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* and rock phosphate amendment influence plant growth and microbial activity in the rhizosphere of *Acacia holosericea*. *Soil Biology & Biochemistry*. In press.

Dommergues Y., Mangenot F. (1970). *Ecologie microbienne du sol*. Paris Fr, Masson et Cie, 802p.

Drew E. A., Murray R. S., Smith S. E (2005). Functional diversity of external hyphae of AM fungi: Ability to colonise new hosts is influenced by fungal species, distance and soil conditions. *Applied Soil Ecology*. Article in Press.

Feeney D. S., Daniell T., Hallett P. D., Illian J., Ritz K., Young I. M. (2004). Does the presence of glomalin relate to reduce water infiltration through hydrophobicity? *Canadian Journal of Soil Science* 84: 365-372.

Founoune H. (2001). La symbiose ectomycorhizienne des acacias australiens en Afrique de l'Ouest : Impact sur le développement de la plante hôte et sur le biofonctionnement du sol. Thèse de doctorat en Biologie. Université MOULAY ISMAIL, 186p.

Fortin J. A., Bécard G., Declerck S., Dalpé Y., Marc St. A., Coughlan A. P., Piché Y. (2002). Arbuscular mycorrhiza on root-organ cultures. *Can. J. Bot.* 80 : 1-20 (2002).

Frey-Klett, P., Chavatte, M., Clause, M.L., Courrier, S., Le Roux, C., Raaijmakers, J., Martinotti, M.G., Pierrat, J.C., Garbaye, J. (2005). Ectomycorrhizal symbiosis affects functional diversity of rhizosphere fluorescent pseudomonads. *New Phytologist*. In press.

Gerdeman J.W., Nicolson T.H. (1963). Spore of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 46, 235-244.

Gosling P., Hodge A., Goodlass G., Bending G. D. (2005). Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Article in Press.

Graham M. H., Haynes R. J. (2005). Catabolic diversity of soil microbial communities under sugarcane and other land uses estimated by biolog and substrate-induced respiration methods. *Applied Soil Ecology* 29 (2005) 155-164.

Hamel C. (2004). Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on N and P cycling in the root zone. *Canadian Journal of Soil Science*. 84: 383-395.

Hayman D.S (1975). The occurrence of mycorrhiza in crops as affected by soil fertility. In: Sanders F.E, Mosse B., Tinker P.B. (Editors), *Endomycorrhizas*. Academic Press, London, pp. 409-509.

Hodge A. (2000). Microbial ecology of the arbuscular mycorrhiza. *FEMS Microbiology Ecology* 32 (2000) 91-96.

Johansson J. F., Paul L. R., Finlay R. D. (2004). Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiology Ecology* 48 (2004) 1-13.

Khaled L. B., Gómez A. M., Ouarraqi El M., Oihabi A. (2003). Reponses physiologiques et biochimiques du trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.) à la double association Mycorrhizes-rhizobium sous une contrainte saline. *Agronomie* 23 (2003) 571-580.

Kernaghan G. (2005). Mycorrhizal diversity: Cause and effect? International Symposium on impacts of soil biodiversity on biogeochemical process in ecosystems, Taipei, Taiwan, 2004. *Pedobiologia*. Article in Press.

Lekberg Y., Koide R. T. (2005). Arbuscular mycorrhizal fungi, rhizobia, available soil p and nodulation of groundnut (*Arachis hypogaea*) in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 110 (2005) 143-148.

Marschner, H. (1991). Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant & Soil*, 134: 83-93.

Marcel G. A., Van der H., Klironomos J. N., Ursic M., Moutoglis P., Streitwolf-Engel R., Boller T., Wiemken A., Sanders L. R. (1998). Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, Vol 396/5.

Miranda M. H., Reader R. j., Klironomos J. N. (2003). Plant coexistence mediated by arbuscular mycorrhizal fungi. *Trends in Ecology and Evolution*. Vol. 18 No. 8 August 2003.

Munyanziza E., Kehri H. K., Bagyaraj D. J. (1997). Agricultural intensification, soil biodiversity and agro-ecosystem function in the tropics : the role of mycorrhiza in crop and trees. *Applied Soil Ecology* 6 (1997) 77-85.

Nouaim R., Chaussod R. (1996). Rôle des mycorhizes dans l'alimentation hydrique et minérale des plantes, notamment des ligneux de zones arides. In. *La mycorhization des plantes forestières en milieu aride et semi-aride et la lutte contre la désertification dans le bassin méditerranéen CIHEAM-IAMZ*, 1996. p. 9-26.

Panja B.N., Chaudhuri C. (2004). Exploitation of soil arbuscular mycorrhizal potential for AM-dependent mandarin orange plants by pre-cropping with mycotrophics crops. *Applied Soil Ecology* 26 (2004) 249-255.

Phillips, J.M., Hayman, D.S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55: 158-161.

Pieri C. (1989). Fertilité des terres de savanes : Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au Sud du Sahara. 444p + Annexes.

Plenchette C., Furlan V., Fortin J.A. (1983). Responses of endomycorrhizal plants grown in a calcined montmollironite clay to different levels of soluble phosphorus. II. Effect on nutrient uptake. *Can. J. Bot.* 61, 1384-1391.

Plenchette, C., Perrin, R., Duvert, P. (1989). The concept of soil infectivity and a method its determination as applied to endomycorrhizas. *Canadian Journal of Botany*, 67: 112-115.

Plenchette C. (2000). Receptiveness of some tropical soils from banana fields in Martinique to the arbuscular fungus *Glomus intraradices*. *Applied Soil Ecology* 15 (2000) 253-260

Plenchette C., C-Dauphin C., Meynard J. M., Fortin J. A. (2004). Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Can. J. Plant Sci.* 85: 31-40.

Quilambo O. A. (2003). The vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *African Journal of Biotechnology* Vol. 2 (12), pp. 539-546.

Redhead, J.F. (1980). Mycorrhiza in natural tropical forest. In: *Tropical Mycorrhiza Research* (Ed: Mikola, P.), Claredon Press, Oxford, 127 – 142. Duponnois et al., 2001

Rillig M. C., Steinberg P. D. (2002). Glomalgin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification? *Soil Biology & Biochemistry* 34 (2002) 1371-1374.

Roose E., Kaboré V., Guenat C. (1993). Le zaï : Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVIII, no 2, 1993 : 159-173.

Sebilotte M. (1989). Fertilité et système de production In. Chaussod R. La qualité des sols : Evaluation et implications. Forum « le Sol, un patrimoine menacé ? » paris, 24 octobre 1996. Numéro spécial.

Schachtman D. P., Reid R., J., Ayling S. M. (1998). Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. Plant physiology. Vol.. (1998) 116: 447-453.

Schloter M., Dilly O., Munch J.C. (2003). Indicators for evaluating soil quality. Agriculture, Ecosystems and Environment 98 (2003) 255-262.

Stevenson B. A., Sparling G. P., Schipper L. A., Degens B. P., Duncan L. C. (2004). Pasture and forest soil microbial communities show distinct patterns in their catabolic respiration responses at a landscape scale. Soil Biology & Biochemistry 36 (2004) 49-55.

Strullu D. G. (1991). Les mycorhizes des arbres et plantes cultivées. 3^e Ed., 250p.

Sylvia, D.M., Williams, S.E. (1992). Vesicular-arbuscular mycorrhizae and environmental stress. In: Bethlenfalvay, G.J., Linderman, R.G. (Eds). Mycorrhizae in Sustainable Agriculture. American Society of Agronomy. Madison, WI, pp. 101-124.

Sylvia D.M., Wilson D.O., Graham J.H., Maddox J.J., Millner P., Morton J.B., Skipper H.D., Wright S.F., Jarstfer A.G. (1993). Evaluation of vesicular arbuscular mycorrhiza fungi in diverse plants and soil. Soil Biology and Biochemistry, vol 25, issue 6, pp. 705-713.

Tao L., Zhiwei Z. (2005). Arbuscular mycorrhizas in a hot and arid ecosystem in southwest China. Applied Soil Ecology 29 (2005) 135-141.

Teklay T., Nordgren A., Malmer A. (2005). Soil respiration characteristics of tropical soil from agricultural and forest land-uses at Wondo Genet (Ethiopia) in response to C, N and P amendments. Soil Biology & Biochemistry. Article in Press.

Wamberg C., Christensen S., Jakobson I., Müller A. K., Sorensen S. J. (2003). The mycorrhizal fungus (*Glomus intraradices*) affects microbial activity in the rhizosphere of pea plants (*Pisum sativum*). Soil Biology & Biochemistry 35 (2003) 1349-1357.

West, A.W., Sparling, G.P. (1986). Modifications to the substrate-induced respiration method to permit measurements of microbial biomass in soils of differing water contents. J. Microbiological Methods, 5: 177-189.

Winding A., H-Rinke K., Rutgers M. (2005). The use of microorganisms in ecological soil classification and assessment concepts. Ecotoxicology and Environment Safety 62 (2005) 230-248.

ERRATA

Thème : « Evaluation du Potentiel Infectieux Mycorrhizogène de sols du Burkina Faso par la mesure de la nodulation rhizobienne et l'activité fonctionnelle de la microflore mycorrhizosphérique »

Nous nous excusons pour les erreurs et les fautes qui se sont glissées dans le document. Nous présentons ici celles qui peuvent porter à confusion. Le reste sera pris en compte dans le document final

Merci.

Page ii

Ligne 6 : lire DUPONNOIS au lieu de DUPPONOIS

Page iii

Ligne 6 : lire et au lieu de te

Ligne 9 : lire Chain au lieu de Chaîne

Page vi

Ligne 19 : lire les nombres de spores au lieu de les spores

Page vii

Ligne 2 : lire arbuscular mycorrhizal au lieu de mycorrhiza ; key au lieu de fundamental

Ligne 4 : lire rhizobial au lieu de rhizobia

Ligne 12 : lire catabolic patterns au lieu de catabolic profiles

Ligne 20 : lire recorded au lieu de observed

Ligne 25 : lire 20 compared 18 au lieu de 20 against 18

Page 5

Ligne 28 : lire arbutoïdes au lieu de arbustoïdes

Page 6

Ligne 2 : lire mycorhizes au lieu de mycorhiezes

Page 9

Ligne 3 : lire rassemble au lieu de prend ensemble

Page 11

Ligne 13 : lire standardisée au lieu de systématique

Page 14

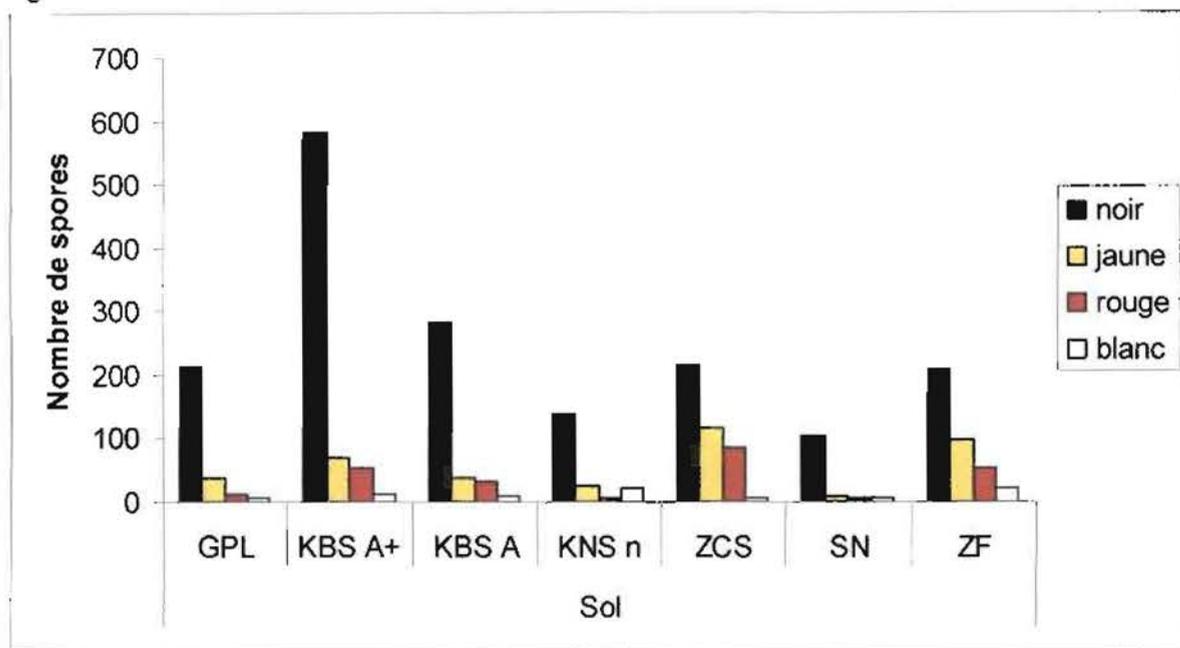
Ligne 6 : lire soudano- sahélienne au lieu de soudanaise du sahel

Page 18

Ligne 3 : lire multiplié au lieu de cultivé

Ligne 4 : lire vermiculite et d'attapulгите au lieu de vermiculite, attapulгите et d'osmocote

Figure 2 a



Ligne 1 : lire récapitulatif au lieu de récapitulons

Ligne 17 : lire corrélés à au lieu de élevés avec

Ligne 15 : lire aléatoire au lieu de imprédictible

Ligne 10 : lire l'antagonisme au lieu de l'antagoniste