



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A.

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الارض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques

Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine Des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biotechnologie et protection des végétaux

Thème

**Modélisation des cycles de carbone et d'azote dans
le système d'association légumineuse – céréale
(Haricot – maïs)**

Présenté par :- DISSA Fatma
- REBBACHEHiba-Sabour

Devant le jury :

Président : Mme IZEMRANE Djamila M.A.B (Univ de B.B.A)

Encadrant : Mr LATATI Mourad M.C.B (Univ de B.B.A)

Examineur 1 : Mr AOUCHE Adel M.C.B (Univ de B.B.A)

Examineur 2 : Mr MAAMRI Khalifa M.A.A (Univ de B.B.A)

Année universitaire : 2014/2015

Résumé

L'association légumineuses-céréales est une pratique culturale importante pour l'amélioration de la disponibilité du Carbone et Azote dans le sol. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'effet bénéfique du système de culture « association haricot – maïs » sur l'amélioration de la biodisponibilité du C et N. Les différents flux du C et de N qui s'échangent entre l'atmosphère, la plante et le sol sous le système de culture d'association, sont modélisés par la validation du modèle MOMOS (Micro-Organisme et Matière Organique du Sol) sur la base de données CN collectées à partir des essais menés dans l'agroécosystème de Sétif. Le travail s'inscrit dans le contexte plus large de maintien et restauration de la fertilité des sols dans des systèmes méditerranéens de cultures céréalières. Le but est de maximiser les flux de C et N de l'atmosphère vers les plantes et le sol, et au contraire de minimiser les pertes de carbone et d'azote depuis le sol vers l'environnement. Les résultats de modélisation CN ont montré qu'en conditions de limitation du P et N dans le sol, la croissance journalière du maïs en association avec le haricot est positivement corrélée avec la transformation du CN microbien durant le cycle cultural. Ainsi, cette modélisation a bien révélé le rôle fonctionnel assuré par la symbiose rhizobienne dans le maintien de l'équilibre entre les différents échanges de C et N du sol vers l'atmosphère (CO_2) et de l'atmosphère vers le sol (N_2). Cette étude a bien confirmé l'avantage des légumineuses sur l'amélioration du rendement en biomasse et en grains chez les céréales en association dans les sols alcalins ou calcaires déficients en P.

Mots clés : Association – Maïs – Haricot – Modélisation – MOMOS .

1. Résultats

1.1. Evolution de l'humidité journalière du sol

La figure, montre un bon ajustement des valeurs simulées de l'humidité volumétrique du sol avec celles mesurées dans les deux couches du sol (supérieure et inférieure) durant l'ensemble des stades phénologiques du cycle végétatif. De petites différences entre les données mesurées et celles prédites peuvent exister à cause de la différence entre les couches de sol prises en compte lors de l'échantillonnage.

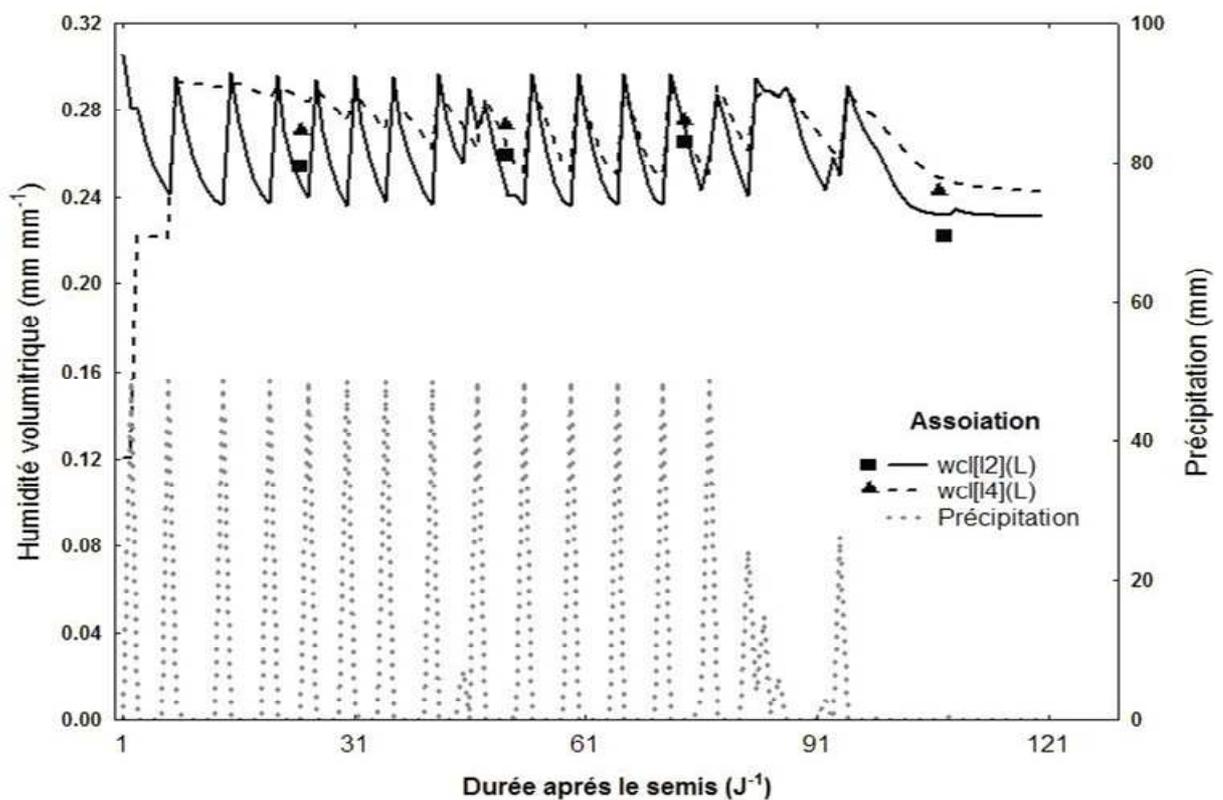


Figure 5 : Humidité journalière modélisée et mesurée dans la couche superficielle du sol (wcl_2 : 0-15 cm) et celle plus profonde (wcl_4 :15-30) durant le cycle de culture de l'association maïs-haricot.

Les données de l'humidité journalière du sol mesurées sur une couche de 0 à 5 cm dans notre expérimentation sont relativement proches des données prédites par le modèle SAHEL sur une couche de profondeur de 0 à 15 cm. Parallèlement, nous avons observé les mêmes résultats de simulation sur la couche plus profonde (15 à 30 cm) et qui sont bien ajustés avec les données d'humidité collectées sur la couche de 25 à 30 cm. Toutes

lessimulations de C et N dans les différents compartiments du sol sont effectuées sur une profondeur de 0 à 30 cm par

l'utilisation des valeurs moyennes simulées de l'humidité volumétrique sur les deux couches de profondeur 0-15 cm et 15-30 cm.

1.2. Production de la biomasse et transfert de C et N dans les différents organes de la plante

La figure 6 montre un ajustement significatif (Risque inférieur de 5%) d'après le test F entre les valeurs simulées de C et N transférées dans les différentes parties de la plante (racines, partie aérienne et nodules) et celles mesurées chez le maïs et le haricot en association. Cependant, le meilleur ajustement entre les données prédites et celles mesurées est observé pour le CN transférés dans la biomasse aérienne et nodulaire plus particulièrement chez le haricot en association (Fig.a, c et e), tandis que certaines valeurs simulées sont relativement écartées par rapport aux données mesurées dans le cas des racines (Fig. b, d).

Le transfert de C et N dans la partie aérienne et racinaire augmente depuis le semis jusqu'à la fin du cycle cultural (récolte). Le taux le plus élevé est constaté durant la période qui s'étale du début de la floraison (51 jours après le semis) jusqu'à fin floraison (71 jours après le semis). Par ailleurs, le CN transférés dans les nodules atteint son optimum ($N-BN=0.88 \text{ g m}^{-2}$ et $C-BN=0.06 \text{ g m}^{-2}$) durant le stade floraison (Fig. 6 e) puis diminue régulièrement jusqu'à la fin du cycle cultural (120 jours).

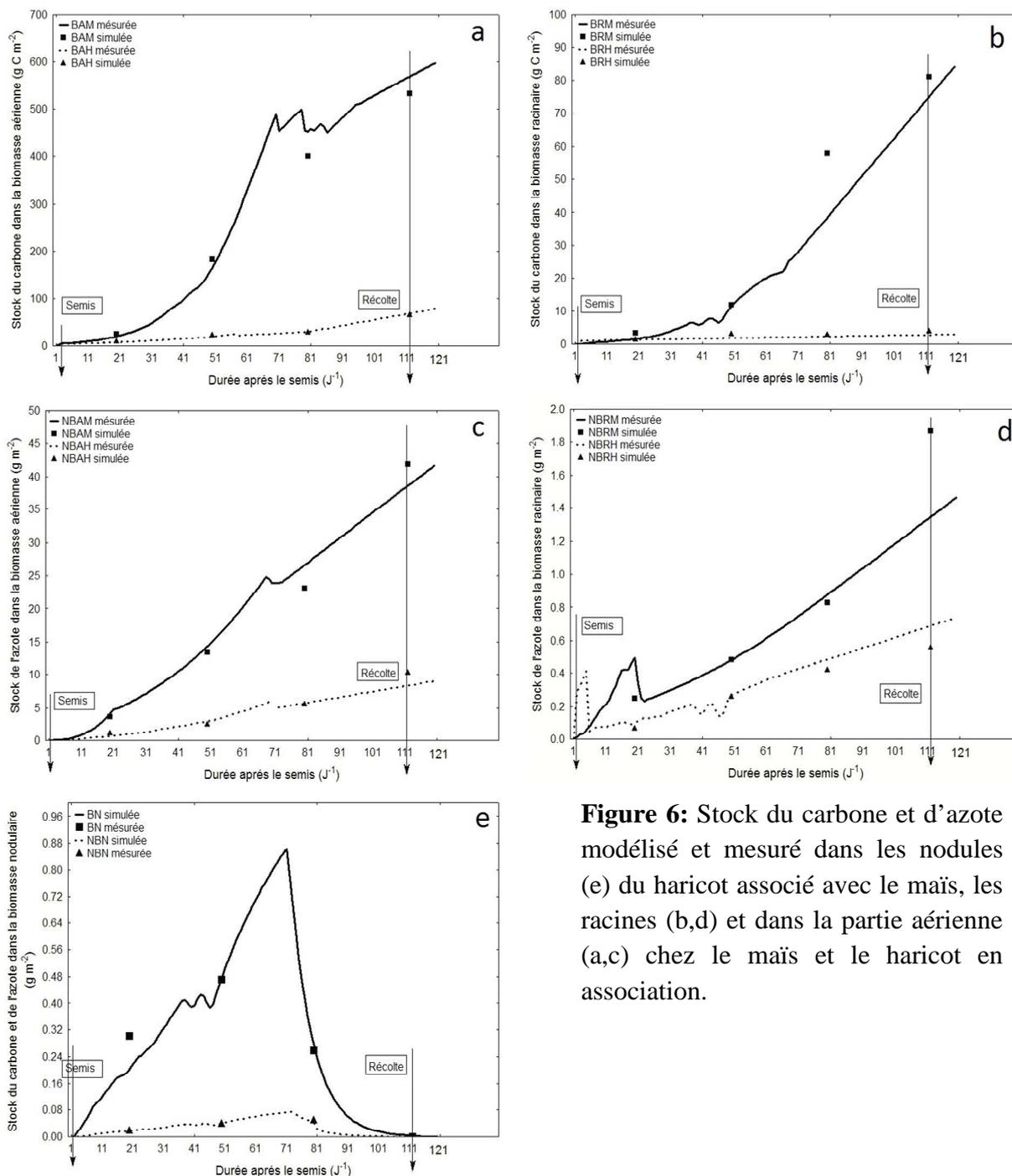


Figure 6: Stock du carbone et d’azote modélisé et mesuré dans les nodules (e) du haricot associé avec le maïs, les racines (b,d) et dans la partie aérienne (a,c) chez le maïs et le haricot en association.

1.3. Transfert de C et N dans le sol et vers la biomasse microbienne

La figure montre que les valeurs CN dans le sol ainsi que celles de la biomasse microbienne sont parfaitement (avec un risque de 2%) ajustées avec les données CN mesurées sur le terrain et qui sont totalement incluses dans l’intervalle de confiance à 95%. En outre, la dynamique du stock de C et N dans le sol (Fig. a) passe par deux phases d’évolution. La

première phase est caractérisée par une légère augmentation des stocks en C et N dans le sol durant la période qui s'étale du semis jusqu'à la fin floraison ; alors que la deuxième phase révèle une légère diminution de ces stocks a fin de floraison jusqu'à la récolte.

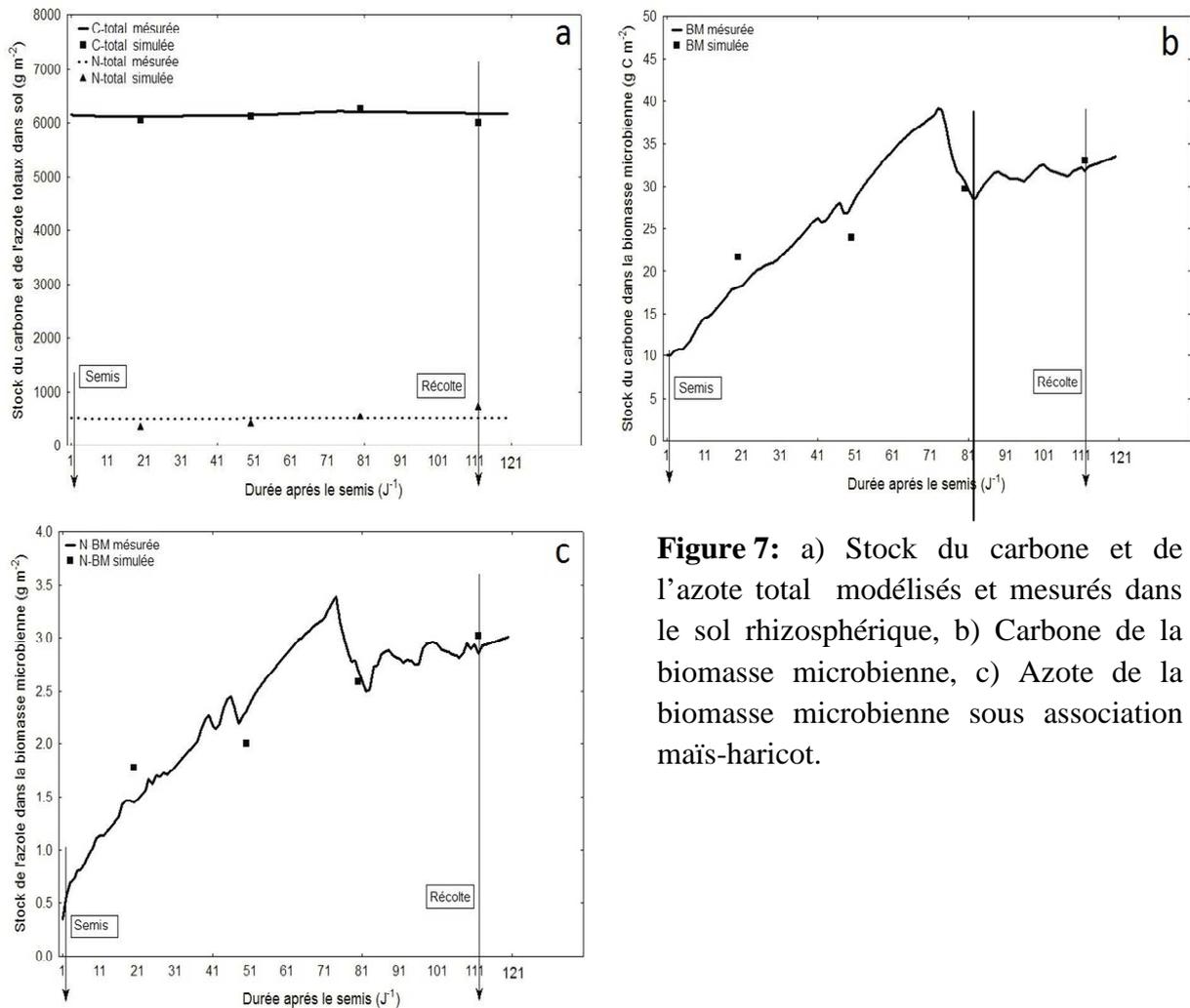


Figure 7: a) Stock du carbone et de l'azote total modélisés et mesurés dans le sol rhizosphérique, b) Carbone de la biomasse microbienne, c) Azote de la biomasse microbienne sous association maïs-haricot.

La diminution du stock en C et N dans le sol chez le maïs et le haricot en association est justifiée par le transfert de ces derniers éléments vers la biomasse de la tige et des racines chez le maïs et le haricot particulièrement en phase de formation et de remplissage des graines. Comparativement à l'évolution plus ou moins stable des stocks CN dans le sol, les stocks CN de la biomasse microbienne dans sol expriment une évolution assez importante et rapide particulièrement au stade floraison qui a enregistré la valeur maximale de C-BM (40 g m⁻²) et de N-BM (3.5 g m⁻²). En revanche, le CN de la biomasse microbienne connaît une chute remarquable particulièrement à partir de la fin floraison jusqu'au début formation des

graines (83 jours après le semis) et qui est accompagnée par une diminution des stocks CN dans les nodules durant la même période probablement due à la disparition des nodosités après leur sénescence (Fig. b).

1.4. Le transfert du C par la respiration totale du sol

La figure 8 montre les données de flux du CO₂ mesurées sur le terrain sous la culture d'association maïs-haricot. L'ensemble des respirations composant cette respiration (respiration des nodules, des racines des deux espèces et la respiration microbienne) sont simulées à partir la respiration totale du sol. Les valeurs mesurées de la respiration totale sont parfaitement ajustées avec les données journalières simulées durant le cycle végétatif.

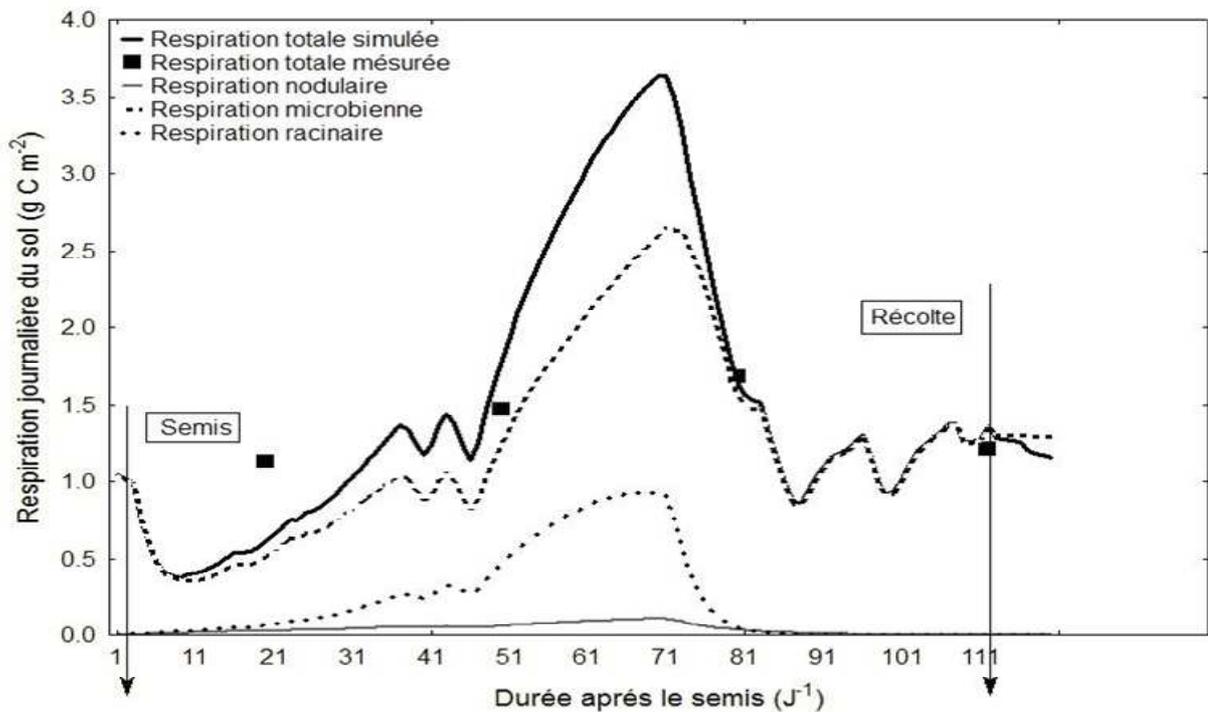


Figure 8: Respiration totale du sol mesurée et modélisée avec les valeurs modélisées de la respiration nodulaire, racinaire et microbienne sous le système de culture d'association maïs-haricot.

Une légère différence de simulation de la respiration totale a pour cause une surestimation des données mesurées durant la première période d'échantillonnage (21 jours après le semis). Cette différence peut être expliquée par la présence des mauvaises herbes sur le champ expérimental pendant le stade levée.

Par ailleurs, la respiration autotrophe (respiration racinaire et nodulaire) et hétérotrophe (respiration microbienne) augmentent fortement entre le semis et la fin floraison

où l'on observe les valeurs maximales de cette activité. En revanche une diminution de la respiration du sol est observée durant la même période (83 jours après le semis) traduisant une baisse des stocks en CN microbiens (Fig 8).

La diminution de la respiration totale du sol ainsi que la baisse des stocks du C dans le sol sont accompagnées d'une forte séquestration du C dans la partie aérienne et racinaire du maïs et du haricot sous la culture de l'association particulièrement durant la phase de formation et de remplissage des graines(Fig 8).

1.5. Effet de la croissance nodulaire sur l'accumulation de la biomasse et les échanges C et N entre le sol et l'atmosphère

Afin de déterminer la nature et le degré de divergence entre les différents pools de C pouvant affecter la fixation de N₂ chez le haricot associé avec le maïs, nous avons étudié les relations entre le C dans le pool nodulaire et celui séquestré dans la partie aérienne du maïs et du haricot en association. Par ailleurs la relation entre le C séquestré dans les nodules et les échanges CN de ces derniers avec l'atmosphère *via* la fixation symbiotique de N₂ et la respiration nodulaire est examinée depuis l'apparition des nodules (21 jours après le semis) jusqu'à la fin floraison (81 jours après le semis).

La figure 9a et b montre une corrélation significative et positive entre le C séquestré dans les nodules et celui stocké dans la biomasse de la partie aérienne du haricot ($r^2=0.53^*$) et du maïs ($r^2=0.51^*$) en association. Ces corrélations positives confirment d'une part, l'efficacité de la symbiose rhizobienne chez le haricot en association et d'autre part, la contribution des nodules dans la facilitation des processus de séquestration de C dans la biomasse aérienne du maïs lorsque il est associé avec le haricot (Fig9).

Parallèlement, le C séquestré dans la biomasse nodulaire présente une forte corrélation positive très hautement significative ($r^2=0.99^{***}$) avec le flux de C dégagé par respiration nodulaire (Fig.c). De même, l'azote fixé est corrélé positivement ($r^2=0.69^{**}$) avec le C séquestré dans les nodosités (Fig. d). Cette corrélation confirme l'efficacité de la symbiose rhizobienne chez le haricot dans le système de culture en association et par conséquent l'augmentation des transferts de N dans les différents compartiments (la biomasse microbienne, la tige et les nodules) particulièrement durant la période de floraison (Fig9).

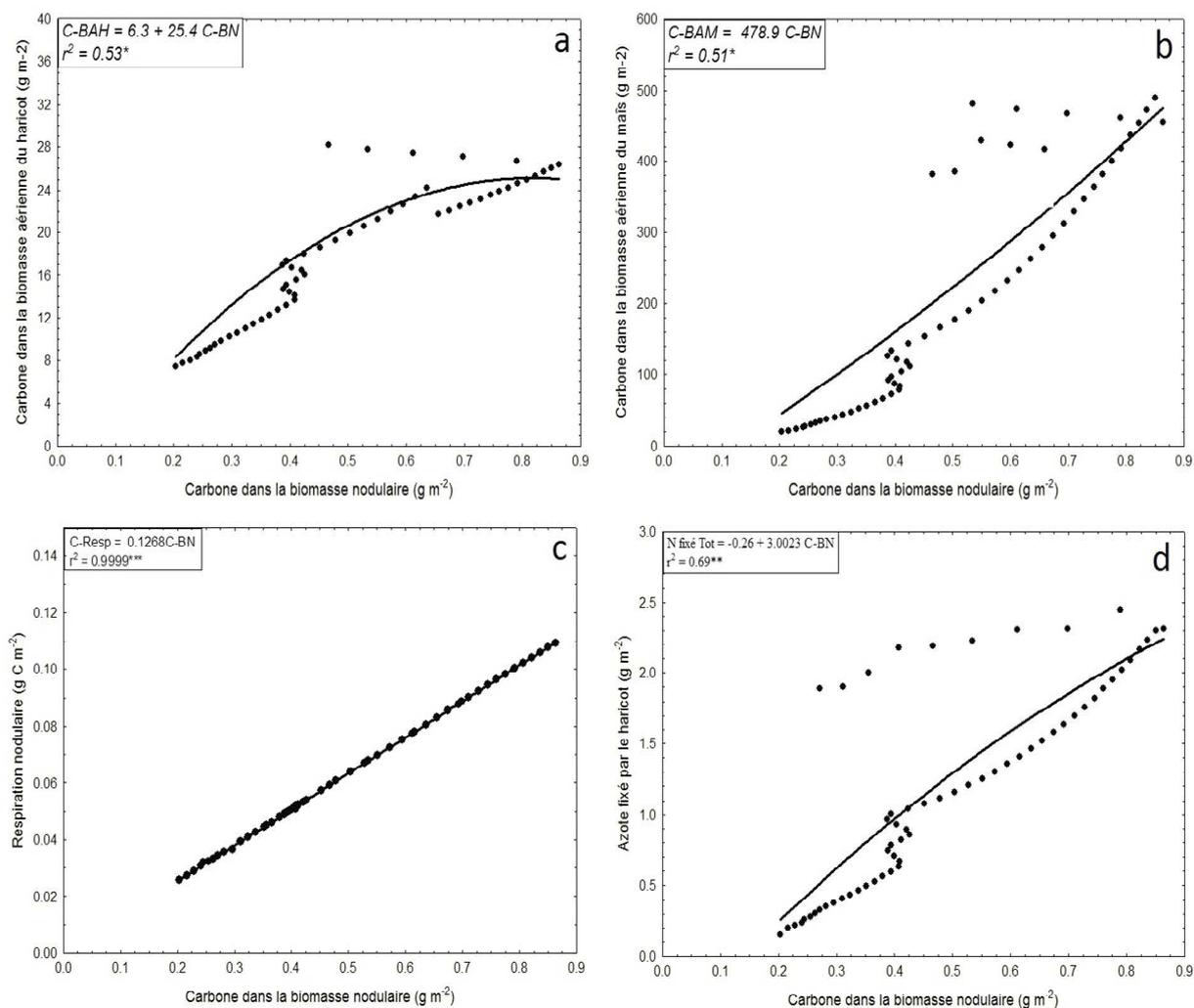


Figure 9 : Corrélation des valeurs modélisées du C séquestré dans les nodules avec le C séquestré dans la partie aérienne du haricot (a) et du maïs (b), la respiration nodulaire (c) et avec le N fixé par le haricot en association.

2. Discussion

2.1. Rôle du modèle MOMOS dans la caractérisation de la dynamique de C et N au niveau des systèmes agro-écologiques

Cette étude a démontré la possibilité de prédiction des échanges journaliers de C et N entre les différents organes de la plante, le sol et l'atmosphère, par la modélisation du rôle fonctionnel des micro-organismes notamment les bactéries rhizobiennes fixatrices de N₂. Le modèle MOMOS définit la croissance microbienne par assimilation des compartiments labiles et stables des résidus végétaux et de l'humus ainsi que des exsudats racinaires avec une simulation des flux du C et de N dans les différents pools du système sol-plante-microorganismes (Pansu *et al.*, 2009).

La nouvelle application (validation) du modèle MOMOS sur la base de données CN dans le système de culture d'association maïs-haricot a permis de mettre en relation l'ensemble des paramètres de MOMOS et leurs relations avec le climat, la nature des entrées en C et N et la texture du sol qui caractérisent le système de culture céréalière en Algérie. A cet effet, le modèle MOMOS devient de plus en plus un modèle générique depuis sa première application dans des écosystèmes tropicaux (Pansu *et al.*, 2004, 2010), puis sa validation dans les conditions méditerranéennes sous le système de culture d'association blé dur-féverole (Ibrahim *et al.*, 2013, Latati, 2015).

Les différents résultats de simulation pour toutes les variables étudiées ont montré un très fort ajustement (le test F a présenté un risque inférieur à 5%) des données mesurées sur le terrain avec celles simulées par le modèle MOMOS. Dans ce contexte, le modèle MOMOS apparaît comme un outil puissant pour collecter et analyser les paramètres éco-physiologiques, qui sont difficiles à obtenir par les méthodes expérimentales dans divers systèmes agro-écologiques.

2.2. Répartition de C et N dans les différents pools du système plante-sol-microorganismes

Après 21 jours du semis et jusqu'au stade floraison et malgré une augmentation des stocks en C et N dans les biomasses de la partie aérienne et racinaire du maïs et du haricot en association (Fig6.), le stock de C et N totaux dans le sol reste relativement stable (avec certains légers changements) durant la même période d'évolution. Cette dynamique des flux

CN dans les compartiments du sol et de la biomasse est identique à la dynamique rapportée dans d'autres expérimentations décrivant la répartition de C et N assimilé dans la plante et le sol (Butler *et al.*, 2004 ; Ibrahim *et al.*, 2014 ; Latati, 2015).

L'augmentation des flux journaliers de CN dans la biomasse est accompagnée par une forte accumulation de ces deux derniers éléments dans la biomasse des nodules (Fig6) et celle des microorganismes du sol (Fig7) particulièrement durant le stade floraison. A cet effet, la modélisation journalière des échanges CN entre la plante et le sol a bien révélé le rôle principal joué par les microorganismes du sol dans la stimulation des transferts CN dans les tissus du maïs et du haricot en système d'association. En revanche, les entrées en C et N totaux n'ont pas changé directement les stocks CN au cours du cycle végétatif. La biomasse microbienne renseigne sur le fonctionnement biologique du sol et répond rapidement aux changements des pratiques culturales (Marchand, 2003). Les indicateurs de la qualité des sols, basés sur le dosage de la biomasse microbienne sembleraient plus réactifs que ceux basés sur les caractéristiques physico-chimiques (Jenkinson, 1987).

Les micro-organismes de la rhizosphère exercent également une force de puits importante, attirant le C et le N de la plante. Le C et le N constituent pour les micro-organismes une source d'énergie, qui stimule leur croissance et leur activité. Les micro-organismes en retour stimulent la rhizodéposition et dans ce cas, c'est le C qui est le plus rapidement disponible qui est transféré à la rhizosphère afin qu'il soit assimilé par les micro-organismes (Bret-Harte et Silk, 1994; Bazot *et al.*, 2005a).

Les résultats de simulation des flux journaliers de N durant la période de floraison semblent confirmer la forte concentration de l'azote observée dans les biomasses aériennes et racinaires et dans le sol rhizosphérique chez les deux espèces en association (Latati *et al.*, 2013). Ces auteurs ont signalé une forte stimulation de la croissance du haricot associé avec le maïs grâce à l'activité des bactéries rhizobiennes *via* la fixation symbiotique de N₂.

La biomasse microbienne est caractérisée par un turnover rapide en comparaison des autres constituants de la MO particulièrement le C et le N totaux (Sparling, 1998). C'est un indicateur sensible de l'évolution des systèmes de cultures en fonction des pratiques culturales appliquées de manière durable notamment dans le système d'association maïs-haricot.

2.3. Echange du C via la respiration du sol

C'est pour sa croissance et sa maintenance que la plante respire le plus (Amthor, 1997). Les résultats obtenus dans la figure, montrent une augmentation significative de la respiration totale du sol sous association maïs-haricot. La respiration augmente du fait d'une augmentation de la production de biomasse (Schapendonk *et al.*, 1997; Casella et Soussana, 1997; Aeschlimann, 2003). En revanche, la diminution des différentes composantes de la respiration du sol durant le stade maturité peut être expliquée par la mortalité du système racinaire qui représente la respiration majoritaire de la respiration totale. (Bazote *et al.*, 2005a).

Nos résultats sont en accord avec ceux publiés par Thornton *et al.* (2004), sur la culture de ray grass sous l'hydroaéroponie. Sous un système d'association légumineuse (féverole)-céréale (blé dur), Ibrahim *et al.* (2013) ont rapporté une augmentation de la respiration du sol durant toute la période du cycle cultural, ce qui contredit nos résultats notamment au cours du dernier stade de développement de la culture.

Nos résultats montrent que l'évolution de la respiration microbienne ainsi que celle des nodules est proportionnelles avec l'évolution de la biomasse microbienne durant toute la période de floraison. Le rythme d'évolution identique observé entre la biomasse et la respiration microbienne peut être justifié par l'évolution croissante des différentes communautés de microorganismes y compris celles des *Rhizobia*. Ces derniers résultats confirment ceux rapportés par Pansu *et al.* (2007, 2009) au cours de la validation du modèle MOMOS sur six agro-écosystèmes contrastants vis-à-vis du gradient altitudinal.

2.4. Rôle de la symbiose rhizobienne dans les échanges CN entre la plante et l'atmosphère

Les résultats de simulation montrent une relation positive entre les valeurs prédites de C de la biomasse nodulaire avec le stock de C dans la biomasse aérienne soit du haricot ou du maïs en association (Fig9). Cependant, l'estimation de l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS) définie par le rapport entre le C simulé de la biomasse des nodules et de la partie aérienne, a montré une EURS relativement faible (faible coefficient de détermination, $r^2=0.53$) par rapport à celle mesurée en plein champ (Latati *et al.*, 2013, 2014; Bargazet *et al.*, 2012) et en hydroaéroponie par (Alkama *et al.* 2009). Ces derniers auteurs ont

rapporté des corrélations entre la biomasse des nodules et celle de la partie aérienne avec un $r^2 > 0,7$.

Des recherches récentes ont mis en évidence l'effet positif de la fixation de N_2 par les légumineuses en association avec les céréales. Elle se traduit par l'accumulation de la biomasse et l'augmentation du rendement grâce à la facilitation des ressources en N particulièrement pour la céréale associée (Zhang *et al.*, 2004; Betencourt *et al.*, 2012; Latatiet *al.*, 2013).

Plusieurs travaux ont concerné l'interaction entre la perméabilité nodulaire à l'oxygène (respiration nodulaire) et la biomasse nodulaire. Ils ont pu montrer, dans un milieu contrôlé en hydroaéroponie, que la perméabilité nodulaire à l'oxygène est accrue sous déficience en P (Saberet *al.*, 2008; Alkamaet *al.*, 2009).

L'application du modèle MOMOS permet la simulation de la respiration nodulaire ainsi que la quantité de N fixé durant la phase critique de fixation symbiotique de N_2 .

Les résultats de simulation montrent d'une part, une forte corrélation ($r^2=0.69$) de N fixé avec le C stocké dans la biomasse nodulaire et d'autre part, une très forte corrélation ($r^2=0.99$) de la respiration nodulaire avec le C de la biomasse nodulaire. Il a été démontré que l'augmentation de la respiration nodulaire dépend de la fixation symbiotique de l'azote. Alkama (2010) rapporte que la respiration nodulaire chez le haricot est corrélée positivement avec la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Les mêmes auteurs ont constaté que les racines nodulées du haricot excrètent dans leur rhizosphère une quantité d' H^+ qui est corrélée à la perméabilité nodulaire (respiration des nodules).

La validation du modèle MOMOS sur les données CN du système d'association maïs-haricot dans un sol déficient en P a révélé deux mécanismes, à savoir les processus d'échanges de C (respiration nodulaire) et N (fixation symbiotique de N_2). Ces mécanismes peuvent expliquer le comportement physiologique du maïs et du haricot en association en matière de stimulation de l'EURS (Latatiet *al.*, 2013) et d'acidification de la rhizosphère (Latatiet *al.*, 2014) qui sont relativement liée à la respiration des nodules chez le haricot en association.

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la force, le courage, la persistance et nous a permis d'exploiter les moyens disponibles afin d'accomplir ce modeste travail. Merci de nous avoir éclairées le chemin de la réussite.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadreur Mr LATATI. M d'avoir accepté de diriger avec beaucoup d'attention et de soin ce mémoire.

Nous lui sont très reconnaissantes pour sa disponibilité, son soutien permanent, sa gentillesse, sa sympathie, sa compréhension et surtout ses qualités humaines.

Nous offrons nos plus sincères remerciements à Mme IZEMRANE. Dde nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à Mr AOUICHE. Apour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de faire partie du jury, malgré ses nombreuses occupations.

Nos remerciements vont également à Mr MAAMRI. K qui nous a fait l'honneur d'examiner ce travail et pour ces précieux conseils.

Nous adressons un grand merci à tous les enseignants du département des sciences de la nature

et la vie et des sciences de la terre et de l'univers de l'université Mohamed

el Bachir el Ibrahimi.

Nos vifs et sincères remerciements s'adressent tout particulièrement à notre Université Mohamed el Bachir el Ibrahimi, qui nous a procuré une bonne formation.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

DISSA Fatma et REBBACHE Hiba-sabour

1. Mesures réalisées

1.1. Dosage du carbone

➤ **Sur le sol**

La teneur en C organique est déterminée par la méthode Anne. Son principe est basé sur l'oxydation par voie humide de la MO par un mélange de $K_2Cr_2O_7$ (8%) et de H_2SO_4 Concentré en présence de NaF et de diphénylamine comme catalyseurs. Ensuite, l'excès des ions bichromate est titré par une solution de sels ferreux à 8% (sels de Mohr).

➤ **Sur le végétal**

La teneur en carbone est obtenue à partir de la MO, cette dernière est exprimée en % de la MS. Elle est obtenue par la différence entre la matière sèche et la matière minérale: (AFNOR, 1985).

1.2. Dosage d'azote

Pour le dosage de l'azote dans le sol et le végétal, nous avons utilisé la méthode de KJELDAHL décrite par Lambert (1975). Elle s'effectue en trois étapes : la minéralisation de l'échantillon, la distillation de la solution minéralisée et enfin, la titration de la solution distillée par l'acide sulfurique 0,05 N.

2. Modélisation proposée

2.1. Modèle MOMOS

Le modèle proposé MOMOS est couplé avec les modèles d'eau du sol SAHEL et le modèle de production végétale des jachères FARPROM (Pansu *et al.*, 2009) ; VL et VS représentent respectivement la nécromasse végétale (NC) labile et stable ; HL et HS représentent l'humus labile et stable ; BM représente la biomasse microbienne ; qCO_2 est le quotient métabolique de BM ; k_{resp} est le taux de respiration de BM ; k_{VL} , k_{VS} , k_{HL} , k_{HS} sont les taux d'ingestion respectifs par BM de VL, VS, HL et HS ; k_{HLS} est le taux de stabilisation de HL en HS. Le partage de NC en VL et VS est régulé par le modèle TAO (Transformation des Apports Organiques) (Thuriès *et al.*, 2002). La structure diagrammatique du modèle MOMOS est représentée dans la synthèse bibliographique (figure 4).

1.1. Formulation mathématique de MOMOS

Tous les paramètres du modèle MOMOS sont connectés à l'humidité du sol (θ) et la température (T) dont il est probablement l'un des modèles les plus sensibles aux changements climatiques, l'équation générale de MOMOS est:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(T) f(\theta) \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \dots\dots\dots 1$$

\mathbf{x} est le vecteur de la variable qui représente la concentration de C et N dans les cinq compartiments du modèle (Biomasse aérienne et racinaire, biomasse microbienne, nécromasse, humus stable et l’humus labile), \mathbf{A} est la matrice des paramètres de modèle. \mathbf{B} est le vecteur qui représente les entrées du C et N d’origine des plantes en culture. $f(T)$ est la fonction de la température et qui est donnée par l’équation 2 (Pansu *et al.*, 2008).

$$f(T) = Q_{10}^{(t-t_{opt})/10} \dots\dots\dots 2$$

T est la température du sol à une couche de profondeur de 0-30 cm et qui est simulée à partir de la température de l’aire, T_{opt} est la température de décomposition optimale de la MO fixée à 28°C, (Thuriès *et al.*, 2001), Q_{10} est la fonction $f(T)$ pour une augmentation de T de 10°C, il est fixé à 2.2 lors de la validation du modèle MOMOS par Pansu *et al.* (2010), $f(\theta)$ est la fonction de l’évolution de l’humidité journalière du sol, elle est définie par l’équation 3 (Pansu *et al.*, 2010).

$$f(\theta) = \text{MIN}\left(\frac{\theta}{WHC}, 1\right) \dots\dots\dots 3$$

L’humidité du sol est simulée à partir du modèle SAHEL (Penning de Vries *et al.*, 1989), en utilisant des données météorologiques recueillies à la station de l’ONM de la région de Sétif. Les données incluses sont la température de l’air, les précipitations, le rayonnement solaire, la vitesse du vent et l’humidité de l’air. Mais, afin de valider le modèle SAHEL sur le climat de la zone d’étude, certains paramètres physiques du sol, à savoir : le point de flétrissement (PF) à la capacité au champ (PF 2.5) et au point de flétrissement temporaire (PF 4.5). L’humidité du sol est également mesurée au cours des différentes périodes d’échantillonnage. Les mesures du PF et de l’humidité volumétrique du sol sont effectuées au niveau de la couche superficielle du sol (0 à 15 cm) et au niveau de la zone d’enracinement et qui est plus profonde (15 à 30 cm) (Pansu *et al.*, 2009).

La matrice \mathbf{A} du vecteur \mathbf{x} (Eq. 1) est représentée ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} -k_{VL} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{VS} & 0 & 0 & 0 \\ k_{VL} & k_{VS} & -(q_{CO_2} + k_{MB}) & k_{HL} & k_{HS} \\ 0 & 0 & k_{MB} & -(k_{HL} + k_{HS}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{HLS} & -k_{HS} \end{bmatrix}$$

Avec \mathbf{x} :

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{VL} \\ x_{VS} \\ x_{MB} \\ x_{HL} \\ x_{HS} \end{bmatrix}$$

La teneur en C de chaque compartiment du modèle (\dot{c}) à chaque jour du cycle cultural est donnée par la formule suivante :

$$\dot{c} = \sum_{i=1}^5 \dot{x}_i = -q_{CO_2} x_{MB} \dots \dots \dots 5$$

Où le q_{CO_2} représente le quotient métabolique de la biomasse microbienne et qui est donné par l'équation 6 :

$$q_{CO_2} = k_{resp} \frac{x_{MB}}{C_{MB}^0} \dots \dots \dots 6$$

Le C_{MB}^0 est une estimation initiale de la biomasse microbienne. Cependant, le k_{resp} est le coefficient de respiration ajusté sur une fraction du sol, avec une texture de 0-20 μm (F_{0-20}). Ce dernier paramètre est ajusté par Pansu *et al.* (2010) lors de la validation du modèle MOMOS sur six sites expérimentaux dans l'agro-écosystème des Andes.

Les précédentes études sur la validation du modèle MOMOS (Pansu *et al.*, 2008, 2010) avec l'utilisation des marqueurs isotopiques (^{14}C et ^{15}N) ont permis seulement la quantification de la matrice A représentée dans l'Eq. 1. Cependant, la valeur du vecteur B et qui représente l'évolution des entrées en C et N d'origine de la dégradation de la nécromasse est totalement ignorée ($B=0$) au cours des dernières applications du modèle MOMOS. Par ailleurs, dans la présente étude, l'évolution journalière des différentes entrées de la MO (CN nécromasse) est estimée durant le cycle végétatif, au niveau des quatre compartiments des deux espèces en association (CN dans la racine et la partie aérienne du maïs et du haricot) ainsi que la biomasse nodulaire (CN nodules). A cet effet, l'Eq. 1 est devenue :

$$\dot{\mathbf{x}} = f(T)f(\theta) \mathbf{A} \mathbf{x} + \sum_{j=1}^5 \mathbf{B}_j \dots\dots\dots 7$$

L'estimation du vecteur B_j nécessite:

- L'estimation quantitative de chaque entrée en nécromasse pour chaque organe chez les deux espèces (céréale et légumineuse);
- L'estimation quantitative de chaque entrée en nécromasse de la fraction labile et stable de l'humus lors de la décomposition de la MO.

Tableau I : Paramètres du modèle MOMOS et leurs liaisons proposées à la calibration avec le climat, la qualité des apports et la texture des sols.

Paramètre MOMOS jour-1	Définition du paramètre	Valeurs et relations proposées	Définition des relations
kVL	Taux d'assimilation de VL par BM	$f(T)f(\theta) \text{ MAX}(0,65-0,0019/NC, 0,1)$	Climat ($f(T)f(q)$) et rapport C:N de la nécromasse (ηNC)
kVS	Taux d'assimilation de VS par BM	$f(T)f(\theta) \text{ MAX}(0,0037-0,000026/NC, 0,00005)$	Climat et rapport C:N de la nécromasse
kMB	Taux de mortalité de BM	$f(T)f(\theta) \text{ MIN}(0,42 -0,0012/NC, 0,8)$	Climat et rapport C:N de la nécromasse
kHL	Taux d'assimilation de HL par BM	$0,05 f(T)f(\theta)$	Climat
kHS	Taux d'assimilation de HS par BM	$0,00005 f(T)f(\theta)$	Climat
Kresp	Taux de respiration de BM	$f(T)f(\theta) \text{ MAX}(0,127-0,0021F, 0,01)$	Climat et fraction 0-20 μm du sol (F)
kHLS	Taux de maturation de l'humus	$0,0003 f(T)f(\theta)$	Climat

kVL ,kVS ,kHL , kHS : sont les taux d'ingestion respectifs par la biomasse .

kMB : taux de mortalité de biomasse microbienne.

kresp : taux de respiration de biomasse microbienne.

kHLS : taux de maturation de l'humus.

2. Traitement des données et outils de calcul

Toutes les concentrations du C et N et celles de la BM dans le sol (C-total mg g⁻¹ et C-BM μg ml⁻¹) sont converties en stock de C et N dans la couche de 0 à 30 cm par l'application de l'équation suivante :

$$\text{C ou N total en g C m}^{-2} = 300 \times bd \times (CN)(1-Wp)(1-Cf)$$

$$\text{MB-C en g C-BM m}^{-2} = 9 \times bd \times \text{MB-CN} \times (1-Wp)(1-Cf)/ms$$

D'où : **bd** : Densité du sol ; **wp** : Humidité du sol ; **cf** : Proportion de la fraction grossière du sol ; **CN** : Concentration de C et N totaux (mg g⁻¹) ; **ms** : Poids de l'échantillon de sol utilisé dans la solution d'extraction (10 g).

La simulation de l'humidité journalière du sol est réalisée par le modèle SAHEL. Le modèle SAHEL de gestion de l'eau du sol, est basé sur deux versions de calcul de l'évapotranspiration potentielle selon les données climatiques disponibles collectées au niveau de la station météorologique de Sétif. Dans ce contexte, deux versions du modèle SAHEL sont utilisées : Une version simplifiée utilisant les données des températures maximales et minimales journalières. Ainsi, une autre version plus élaborée prenant en plus en compte la vitesse du vent et la pression de vapeur d'eau (Pansu *et al.*, 2007).

En outre, la simulation de l'humidité journalière du sol est réalisée par le modèle SAHEL (PenningdeVries*et al.*, 1989). Par ailleurs, la prédiction journalière de l'évolution du cycle de C et N durant le cycle végétatif sur le modèle MOMOS couplé avec celui de TAO est établie sur la plate forme de modélisation VENSIM 5.9 (<http://www.vensim.com/>) sous la licence 8082006 CIRAD.

Durant la phase d'optimisation, nous avons utilisé les mêmes valeurs du poids de PAY-OFF (poids de contribution de chaque compartiment de modèle) que celles utilisées dans le système d'association blé dur-féverole par Ibrahim *et al.* (2013). Une exception est faite pour le C de la partie aérienne du maïs dont les valeurs sont relativement grandes par rapport à celles du blé dur. A cet effet, nous avons ajusté le PAY-OFF à des valeurs plus faibles afin d'optimiser les paramètres initiaux du modèle. Par ailleurs, les comparaisons de justesse entre

les données simulées et celles mesurées sont établies par des tests F sur les sommes des carrés des résidus entre valeurs mesurées et prédites.

Liste des figures

Figure 1. Cycle de N dans le sol.....	11
Figure 2. Cycle globale de N dans le système sol-plante-atmosphère.....	12
Figure 3. Cycle du carbone dans le système sol-plante-atmosphère.....	16
Figure 4. Diagramme relationnel de la Modélisation des Transformations Organiques par les Microorganismes du Sol: MOMOS.....	19
Figure 5. Humidité journalière modélisée et mesurée dans la couche superficielle du sol (w_{cl_2} : 0-15 cm) et celle plus profonde (w_{cl_4} :15-30) durant le cycle de culture de l'association maïs-haricot.....	27
Figure 6. Stock du carbone et d'azote modélisé et mesuré dans les nodules (e) du haricot associé avec le maïs, les racines (b,d) et dans la partie aérienne (a,c) chez le maïs et le haricot en association.....	39
Figure 7. a) Stock du carbone et de l'azote total modélisés et mesurés dans le sol rhizosphérique, b) Carbone de la biomasse microbienne, c) Azote de la biomasse microbienne sous association maïs-haricot.....	30
Figure 8. Respiration totale du sol mesurée et modélisée avec les valeurs modélisées de la respiration nodulaire, racinaire et microbienne sous le système de culture d'association maïs-haricot.....	31
Figure 9. Corrélation des valeurs modélisées du C séquestré dans les nodules avec le C séquestré dans la partie aérienne du haricot (a) et du maïs (b), la respiration nodulaire (c) et avec le N fixé par le haricot en association.....	33

Liste des abréviations

BM : Biomasse microbienne.

C : Carbone

CO₂ : Di-oxyde de carbone

EURS : L'estimation de l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne .

FSN : Fixation symbiotique de l'azote

GPP : Gross primary productivity.

LF : Fraction légère du sol .

MO : Matière organique.

MOMOS : Micro-organismes et matière organique du sol

MOS : Matière organique du sol .

N : Azote

N₂ : Azote moléculaire.

NO₃⁻ : Nitrates

NH₄⁺ : Ammonium

NPP : Net primary productivity.

P : Phosphore

PAY-OFF : Poids de contribution de chaque compartiment de modèle.

PPB : Productivité primaire brute.

PPN : Productivité primaire nette.

RA : Respiration Autotrophe.

RuDP : Enzyme de fixation de carbone atmosphérique.

SOC : Carbone organique du sol.

TN : Azote total du sol.

Introduction

A l'instar des échanges sol-plante-atmosphère, les couches superficielles du globe terrestre contiennent la plus grande réserve de carbone organique (Corg) et d'azote (N) potentiellement disponible pour la croissance des plantes (Ladd *et al.*, 1992).

La matière organique du sol (MOS) joue un rôle primordial dans le maintien de la fertilité par ses effets sur les propriétés physiques, chimiques, biologiques et plus particulièrement sur la séquestration du C dans le sol (Ladd *et al.*, 1992). De même, la biomasse microbienne (BM) constitue une matrice de transformation pour la matière organique (MO) dans le sol et agit comme un réservoir labile de nutriments disponibles pour les végétaux notamment en matière des ressources en carbone (C) et en N (Srivastava et Singh, 1989).

L'importance des pools de MOS dépend des apports de la MO des cultures (résidus de récolte, déchets des racines et des mycorhizes ou des nodules et exsudats racinaires) et des pertes de C. Ces pertes sont causées soit par la respiration hétérotrophe pendant la décomposition de la MOS soit par la respiration autotrophe due à la respiration des bactéries symbiotiques (e.g. Ibrahim *et al.*, 2013; Latati, 2015).

Des pratiques culturales répandues couramment comme la fertilisation, les traitements avec les pesticides et la monoculture, provoquent la dégradation de la fertilité du milieu en réduisant la diversité biologique, et en augmentant la teneur de CO₂ séquestré dans l'atmosphère (Horrihan *et al.*, 2002). La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique est une source importante pour les céréales en association avec les légumineuses qui se traduit par l'accumulation de la biomasse et l'augmentation du rendement (Betencourt *et al.*, 2012; Latati *et al.*, 2013, 2014). Cet effet positif est confirmé pour les associations niébé-maïs (Latati *et al.*, 2014), pois chiche-blé-dur (Betencourt *et al.*, 2012) et haricot-maïs (Dahmardeh *et al.*, 2010, Latati *et al.*, 2013). Cependant, l'augmentation du rendement sous l'effet de l'association n'est pas due uniquement à l'augmentation des ressources en N pour la céréale en association *via* la fixation symbiotique de N₂, mais aussi à d'autres mécanismes qui restent inconnus (Betencourt *et al.*, 2012).

Pour mieux comprendre la dynamique de N et du C dans les sols méditerranéens, les modèles mécanistes peuvent répondre à plusieurs questions pertinentes. Ils permettent par

exemple de distinguer les compartiments d'origine végétale généralement situés dans des fractions grossières du sol, ou d'origine microbienne plutôt situés dans les fractions plus fines (Pansu *et al.*, 2009).

Dans les sols algériens, une première quantification de N, faisant suite à celle de C dans un système de production céréalière au niveau de l'agroécosystème de Sétif, a permis de mettre en évidence une fragilité des réserves, et la nécessité de managements préservatifs des terres et des pratiques agricoles (Latatiet *al.*, 2013). De nombreuses études de modélisation des variations de stocks de C et N sous plusieurs systèmes de production (Pansu *et al.*, 2004, 2008, 2009, 2010) sont disponibles et permettent de mieux appréhender et adapter les modèles sur plusieurs conditions environnementales

L'objectif de ce présent travail est d'étudier à court terme les cycles de C et N par la validation du modèle MOMOS (Micro-Organismes et Matière Organique du Sol) sur la base de données CN collectées dans l'agro-écosystème céréalière de Sétif. La finalité est de comprendre certains mécanismes physiologiques qui peuvent expliquer l'effet positif de l'association notamment en matière d'accumulation de la biomasse, d'efficacité de l'utilisation de la symbiose rhizobienne et le rendement. Ce travail comporte un défi majeur qui consiste à coupler les équations de décomposition de la MOS avec celles de l'eau et de la production végétale afin de prédire la dynamique globale de C et N à l'échelle du système d'association maïs-haricot dans un sol calcaire déficient en P.

DÉDICACE

AU NOM DU DIEU CLÉMENT ET MISÉRICORDIEUX ET QUE LE SALUT DE DIEU, SOIT
SUR SON PROPHÈTE MOHAMMED

À CEUX QUI M'ONT TOUT DONNÉ SANS RIEN EN RETOUR

À CEUX QUI M'ONT ENCOURAGÉE POUR CONTINUER MON CHEMIN UNIVERSITAIRE

ET CEUX À QUI JE DOIS TANT

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À CELLE QUI M'A DONNÉ LA VIE, LE SYMBOLE DE

TENDRESSE, QUI S'EST SACRIFIÉE POUR MON BONHEUR ET MA RÉUSSITE, À MA

MÈRE ...

À MON PÈRE, ÉCOLE DE MON ENFANCE, QUI A ÉTÉ MON OMBRE DURANT

TOUTES LES ANNÉES D'ÉTUDES, ET QUI A VEILLÉ TOUT AU LONG DE MA VIE

À M'ENCOURAGER, À ME DONNER L'AIDE ET À ME PROTÉGER.

QUE DIEU LES GARDE ET LES PROTÈGE.

À LA MÉMOIRE DE MES GRANDS-PÈRES MILOUD ET AISSA

À MES GRANDES MERESMALIKA ET NAIDJA

À MES ADORABLES SŒURS HANA ET MERIÈME

À MON FRÈRE AHMED YACINE

À MES DEUX FAMILLES REBBACHE ET BACHEBACHE

À MES AMIES : AMINA - FATIMA-SARA - ZAHIRA - MERIEM - KARIMA-SOUMIA -
HIBA

À CELUI QUI M'A AIDÉE DANS LA RÉALISATION DE CE MÉMOIRE MOHAMED EL
AMINE .

À TOUS CEUX QUI M'AIMENT.

À TOUS CEUX QUE J'AIME

HIBASABOUR



Dédicace

Au nom du Dieu clément et miséricordieux et que le salut de Dieu, soit sur son prophète Mohammed

A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour

A ceux qui m'ont encouragée pour continuer mon chemin universitaire

Et ceux à qui je dois tant

A mes très chers parents Aïssa et Messaouda pour leurs sacrifices et leurs encouragements durant toutes mes études.

Avec toute mon affection et mes remerciements.

A toute ma famille, mes frères Mourad et sa femme Zina, Sofiane et sa femme Nadjet, Fouad, Halim, mes sœurs Rabia et son mari Mustapha, Fahima et son mari Szedik, Souad et son mari Moussa, et surtout pour Yousra.

Avec toute mon estime et mon affection.

A tous leurs enfants : Lina, Razane, Wail, Aghane, Chahd, Mohammed, Arridj, Ritadj, Sohieb, Haytam, Siradjeldinne et Rawnak.

A mes amies Ghania, Karima, Sousou, Hiba, Nadia, Fifi, Lamia, Soumia, Karima, Nassima, Fatima .

Avec tout mon amour .

Ainsi qu'à tous les étudiants de ma promotion SNV.

Avec toute mon amitié.

Une mention spéciale pour : YASSINE

A ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce document, trouvent ici ma profonde reconnaissance et remerciements.

A tous ceux que j'ai cités ou je n'ai pas pu citer, toutes mes excuses, que Dieu vous bénisse et vous récompense, Amen . Fatma

Conclusion

Ce travail de modélisation est basé sur des essais en plein champ dans le système d'association maïs-haricot de l'agro-écosystème céréalier de Sétif lors des travaux de recherches réalisées par Latati et al. (2013, 2015). Dans ce travail qui porte sur le traitement par modélisation de ces données récolté en essais multilocaux, la validation du modèle MOMOS dans un sol calcaire déficient en P, a permis de mettre en évidence certains mécanismes qui contrôlent la séquestration de C et N entre les compartiments du système complexe sol-plante-atmosphère-microorganismes.

MOMOS est également le premier modèle dont les paramètres sont définis comme des taux de décroissance du premier ordre et qui sont liés à la température et à l'humidité du sol, ce qui le rend particulièrement sensible aux changements climatiques. Des fonctions de réponse sont ajustées pour relier le modèle aux données météorologiques, à la nature des apports et au type de sol. En outre, les résultats obtenus après une modélisation mécaniste permettent de définir certaines relations entre la biomasse microbienne et son alimentation par les compartiments des végétaux (racine, tige et nodules), la nodosité régissant l'échange de CO₂ du sol vers l'atmosphère et l'échange de N₂ de l'atmosphère vers le sol. Nos résultats montrent également le rôle crucial de la symbiose rhizobienne du haricot associé avec le maïs dans le maintien de l'équilibre entre les différents échanges CN particulièrement avec le sol et l'atmosphère.

Il est maintenant prouvé que la justesse du modèle MOMOS est parfaitement adapté dans l'étude de la dynamique de l'azote et du carbone dans les sols méditerranéens notamment les sols algériens qui sont relativement pauvres en MO. MOMOS a permis de prédire la restauration de la fertilité du sol en matière de C et N par le système d'association maïs-haricot, émergeant ainsi comme un outil prévisionnel puissant de premier plan de la durabilité des systèmes de culture.

1-Système de culture association légumineuses-céréales

1-1. Généralités sur les associations de culture

Une association de culture se définit par la culture simultanée d'au moins deux espèces dans un espace donné durant une période significative de leurs cycles de croissance sans nécessairement être semées et récoltées en même temps (Willey, 1979). Il en existe différents types selon les cultures associées (associations de cultures pérennes, associations de culture pérenne avec une culture annuelle ou pluriannuelle, ou encore association de deux cultures annuelles ou bisannuelles).

Les 50 dernières années l'agriculture tempérée des pays développés s'est intensifiée en termes de mécanisation et d'utilisation d'intrants de synthèse, ce qui a eu pour conséquence de faire disparaître les associations des systèmes de culture (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009) hormis sous formes de prairies dans les systèmes fourragers en polyculture-élevage (Anil *et al.*, 1998) et en agriculture biologique (avec ou sans élevage). Cependant, Vandermeer, (1989) a signalé qu'il existe deux grands types de mécanismes éco-physiologiques qui définissent l'interaction entre les deux espèces en association :

- **la facilitation** : lorsqu'une espèce modifie son environnement de façon favorable pour l'espèce partageant cet environnement. C'est le cas, par exemple d'une espèce qui va jouer un rôle de barrière à la propagation d'une maladie.

- **la compétition** : au contraire, il y aura compétition lorsqu'une espèce va modifier son environnement de façon défavorable à l'autre espèce. C'est le cas, par exemple, lorsqu'une espèce extrait une ressource du sol (l'azote ou eau par exemple) et que par conséquent cette ressource sera moins disponible pour l'autre espèce.

Une association est intéressante lorsque la compétition interspécifique est plus faible que celle intraspécifique. Cela est possible si les deux espèces utilisent les ressources à différents moments, dans différentes parties du profil du sol ou utilisent des niches différentes des ressources du milieu, il s'agit du phénomène de complémentarité entre espèces (Anil *et al.*, 1998; Jensen, 1996).

En outre, dans une association céréale-légumineuse, la légumineuse peut utiliser de l'azote issu d'une niche écologique différente que celle du blé si la compétition pour l'azote inorganique est trop importante et que les conditions pédoclimatiques le permettent (Latati *et*

al., 2014; Latati *et al.*, 2015; Corre Hellou *et al.* 2006 ; Ghaley , 2005 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001; Ofori and Stern, 1987).

Le Rhizobium va pouvoir fixer le N₂ pour la légumineuse, mais cette dernière devra lui fournir en échange des photosynthétats. Cette capacité est à l'origine de la complémentarité des ressources en azote dans une association céréale-légumineuse et présente donc un intérêt particulier dans les systèmes où l'azote minéral du sol est une ressource limitée. La fixation symbiotique de l'azote (FSN) dépend des conditions environnementales et notamment de la concentration en nitrates dans le sol. Dans un environnement riche en nitrates, la légumineuse privilégiera l'absorption racinaire ; au contraire, dans un sol pauvre en azote, la FSN sera favorisée (Jensen, 1996 ; Naudin *et al.*, 2010; Latati *et al.*, 2014).

1.2. Types d'association des cultures

L'association des cultures inclut : des plantes annuelles avec des plantes annuelles, des plantes annuelles avec des plantes pérennes et des plantes pérennes avec des plantes pérennes (Eskandari *et al.*, 2009a; Ghanbari , 2010). Elle comprend quatre groupes (Vandermeer, 1992)

• **Cultures associées en sillon** : il s'agit de planter simultanément deux ou plusieurs cultures dans des rangées régulières, cependant, une ou plusieurs cultures peuvent être plantées simultanément dans la même rangée ou en alternance avec la première culture.

• **Cultures associées en vrac** : pour ce type d'association deux ou plusieurs cultures sont semées simultanément mais sans ordre défini. Ce type est pratiqué en plus pour les associations des légumineuses avec les cultures fourragères.

• **Cultures associées en bandes** : elle consiste à cultiver deux espèces ou plus suivant différentes bandes suffisamment larges pour permettre une culture indépendante, mais suffisamment étroites pour que les cultures puissent se favoriser mutuellement.

• **Culture associée en relais** : la deuxième culture est installée après que la première ait atteint le stade floraison mais avant qu'elle atteigne le stade maturité.

1.3. Avantage de l'association des cultures

1.3.1. Utilisation efficace des ressources et rendement meilleur

Le système d'association des cultures contribue considérablement à l'augmentation de la production des cultures par l'utilisation efficace des ressources, par rapport au système

monoculture (Zheng *et al.*, 2003). Cette efficacité d'utilisation est due à la différence de consommation des ressources (Eskandari, 2012b). En outre, s'il y a des effets complémentaires entre les cultures associées, la production augmente en raison de la réduction de compétition entre elles (Mahapatra, 2011; Zhang et Li, 2003; Latati *et al.*, 2013).

Plusieurs études ont montré l'augmentation du rendement des cultures associées; sorgho/soja (Elmore et Jackobs, 1986), blé/pois chiche (Mandal *et al.*, 1996), maïs/ fève (Li *et al.*, 1999), maïs/haricot commun (Latati *et al.*, 2013) et maïs/niébé (Latati *et al.*, 2014).

La production élevée des cultures associées peut être attribuée au taux élevé de croissance, à la réduction des mauvaises herbes, parasites et maladies et à l'utilisation efficace des ressources (Eskandari, 2012b).

1.3.2. Restauration de la fertilité du sol

L'association des céréales avec les légumineuses maintient et améliore la fertilité du sol. Les légumineuses fixent l'azote atmosphérique, qui peut être utilisé par les plantes associées ou peut être excrété des nodules dans le sol et être utilisé par d'autres plantes qui poussent tout près (Dahmardeh *et al.*, 2010). En outre, la décomposition des résidus des légumineuses améliore le sol en azote qui sera disponible pour les cultures de l'année suivante. En particulier, sous les sols pauvres en azote les avantages des légumineuses dans une association sont plus grands. Cependant, la facilitation interspécifique du prélèvement du P par les cultures associées a été rapportée chez le lupin blanc qui a amélioré la quantité du P prélevé quand il était associé avec le blé (Grierson, 2000), chez le pois chiche en améliorant le P prélevé par le maïs et le blé (Li *et al.*, 2004) et chez le haricot en améliorant le P prélevé par le maïs (Latati *et al.*, 2015).

1.3.3. Diminution des parasites et des maladies

L'association des cultures peut réduire l'apparition des parasites et des maladies. En comparaison avec les monocultures, les cultures en associations sont souvent moins endommagées par les ennemis de cultures (Trenbath, 1993).

D'après Francis (1989), des études sur 198 espèces végétales ont montré que pour 53% des expérimentations, l'association a réduit les parasites, pour 18% les parasites augmente, pour 9% il y avait pas de différence significative et pour 20% les résultats ont été variables.

Ogenga-Latigo *et al*(1993), ont enregistré que l'infestation de la culture du haricot par l'aphid noir (*Aphis Fabae*), est considérablement réduite lorsque le haricot est en association avec le maïs et cela grâce aux tiges longues du maïs qui ont ralenti la colonisation des aphids. Une autre étude menée par Fernandez-Aparicio *et al* (2007) a montré que l'infection de la culture de la fève ainsi que du pois par Orobanche crenata, réduit en association avec l'avoine.

1.3.4. Contrôle des mauvaises herbes

Dans les systèmes d'association, la diminution des mauvaises herbes se fait naturellement, en raison de la forte compétition sur les ressources disponibles avec les espèces cultivées (Olorunmaiye, 2010). Cet effet est observé chez le maïs en association avec des légumineuses, qui a réduit considérablement la densité des mauvaises herbes comparé au maïs pure et ce grâce à la diminution de la lumière disponible pour les mauvaises herbes (Bilalis *et al.*, 2010).

1.3.5. Stabilité et uniformité du rendement

Pour les agriculteurs qui ont des ressources limitées, le revenu et la stabilité du rendement des systèmes agricoles sont très importants. Quand plusieurs cultures peuvent être cultivées ensembles, l'échec de la production d'une culture pourrait être compensé par d'autres récoltes, ce qui réduit les risques. Le risque d'échec dans les systèmes d'association des cultures est inférieur aux systèmes des cultures pures (Eskandari *et al.*, 2009a).

1.3.6. Conservation du sol

L'association avec des légumineuses est une excellente pratique pour le contrôle de l'érosion du sol. l'association du sorgho avec le niébé a réduit le taux d'érosion de 20-30% en comparaison avec le sorgho pure et de 40-50% en comparaison avec le niébé pure (Zougmore , 2000).

1.3.7. Promouvoir la diversité

L'association est une manière de présenter plus de biodiversité dans les agro-écosystèmes. Cependant, plusieurs études sur l'association indiquent que l'augmentation de la diversité des cultures peut augmenter le nombre des services à fournir à l'écosystème (Russell, 2002).

En outre, l'association des espèces compatibles favorise la biodiversité en fournissant un habitat pour des variétés d'insectes et d'organismes du sol qui ne seraient pas présents dans un environnement de monoculture (Lithourgidis *et al.*, 2011).

Cependant, les systèmes naturels stables sont en général divers, contenant de nombreux genres d'espèces végétales, arthropodes, mammifères, oiseaux, et micro-organismes. Par conséquent, les manifestations des parasites sont rares en raison de leur contrôle naturel qui peut apporter les populations dans l'équilibre (Altieri, 1999). En outre, la biodiversité au niveau de l'exploitation agricole peut mener aux agro-écosystèmes capables de maintenir leur propre fertilité du sol, de régler la protection naturelle contre des parasites et d'améliorer la productivité (Scherr et McNeely, 2008).

1.4. Inconvénients de l'association des cultures

L'association des cultures peut présenter certains inconvénients, par exemple ;

- La réduction du rendement à cause de la concurrence pour la lumière, l'eau et les aliments qui peut se produire chez certaines cultures associées .
- la gestion pratique difficile, plus particulièrement lorsque les cultures exigent différents apports d'engrais, des herbicides et des pesticides.
- le coût additionnel pour la séparation des grains récoltés ainsi que les pertes pendant la récolte (Lithourgidis *et al.*, 2011).

1.5. Intérêts des associations

Les associations céréale-légumineuse peuvent connaître un regain d'intérêt et présenter des applications intéressantes en agriculture conventionnelle pour le développement de cultures multi services à faible niveau d'intrants, et en particulier azotés. En effet, en raison de complémentarités entre les deux espèces associées, les ressources disponibles (notamment azotées dans les associations céréale-légumineuse) sont mieux exploitées par l'association par rapport à des espèces pures (Corre-Hellou *et al.*, 2006).

En outre, les légumineuses dans l'association des cultures améliorent grandement l'azote dans ce système de culture et augmentent la productivité dans les sols à faibles N .

Les associations impliquant des cultures céréalières avec d'autres cultures en particulier les légumineuses alimentaires sont plus durables qu'une culture céréalière continue.

Elles constituent un moyen de lutte biologique contre plusieurs maladies, en diminuant l'incidence de la fusariose et du mildiou (Ahmed *et al.*, 2012).

1.6. Effet de l'association légumineuses-céréales sur la disponibilité de l'azote

L'association des cultures améliore la fertilité du sol en facilitant l'acquisition des nutriments y compris l'azote (Morris et Garrity, 1993). L'avantage que procurent les légumineuses concernant la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, est très important et même incontournable dans ces systèmes. De plus, les systèmes de l'association légumineuses/non-légumineuses est bénéfique pour l'environnement en réduisant l'accumulation du NO_3 dans le profil du sol (Li *et al.*, 2001) et en réduisant les entrées de N (Li *et al.*, 2001). Shen et Chu (2004) rapportent que les légumineuses peuvent transférer le N fixé aux céréales pendant la période de leur association.

L'association avec les légumineuses a pour effet d'augmenter la teneur en N dans les différentes parties de la plante associée (aérienne et souterraine). Betencourt *et al.* (2012) rapportent que la teneur en azote dans les parties aériennes et racinaires doubleur augmente sous l'effet de l'association avec le pois chiche. Parallèlement, l'association des céréales avec les légumineuses augmente la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par la nodosité des légumineuses (Latati *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2009).

2. Modélisation de la dynamique des cycles du carbone et de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère

2.1. Généralité sur l'azote

L'azote est l'un des éléments majeurs de la vie, il est le constituant principal de l'atmosphère terrestre (80 % d'azote) mais il reste l'élément nutritif le plus déficient dans les systèmes de productions agricoles et représente le facteur limitant majeur de la production agricole.

Malgré sa disponibilité dans la nature, les plantes n'ont pas la capacité de l'assimiler directement. Les plantes absorbent l'azote dans le sol sous forme de nitrates (NO_3^-) et d'ammonium (NH_4^+), l'importance relative de chacune de ces formes dépendant de l'espèce végétale et des conditions du milieu (Lazrek, 2008).

Dans la nature, l'azote est présent en abondance sous deux états :

- A l'état libre, dans l'air dont il représente les 4/5ème
- A l'état combiné, sous la forme minérale (ammoniaque, nitrate) ou organique.

Les animaux ne peuvent absorber ni l'azote de l'air, ni directement l'azote minéral. C'est les végétaux qui leur fournissent sous forme organique la plus grande partie de l'azote dont ils ont besoin (Burdass et Hurst, 2002).

2.2. L'azote dans la plante

La matière sèche de la plante renferme environ 2% d'azote. Un apport adéquat d'azote stimule une activité photosynthétique élevée, une croissance végétative vigoureuse et une coloration verte foncée des feuilles (Soltner, 2007). L'azote est un constituant essentiel du cytoplasme car il favorise :

- La synthèse des glucides grâce à l'augmentation du nombre de chloroplastes ;
- La constitution des réserves azotées dans les graines ;
- La multiplication cellulaire donc la croissance des tissus ;
- La multiplication des chloroplastes, puisque la chlorophylle est une substance azotée d'où la couleur verte foncée des plantes après un apport d'azote, c'est un facteur de rendement, et parfois de qualité, puisque il augmente la teneur en protéines des céréales et puis il est un des constituants de la chlorophylle qui commande l'opération fondamentale de la photosynthèse.
- L'azote est donc nécessaire à tous les stades de la plante: jeune, croissance, reproduction et mise en réserve (Soltner, 2007).

2.2.1. L'azote dans le sol

La première source d'azote des sols provient essentiellement de la matière organique endogène (humifiée), des résidus de récolte, des cultures intermédiaires et des produits organiques exogènes. On ne considère que l'azote organique représente 98% de l'azote total des sols, il varie beaucoup suivant les régions et les types de sol. L'azote organique est un compartiment clé du cycle biogéochimique de l'azote et joue un rôle très important dans la nutrition azotée des plantes.

L'azote inorganique du sol constitue la fraction disponible pour les cultures. Le sol en contient rarement plus de 10 % d'azote inorganique total.

L'azote organique est un compartiment clé du cycle biogéochimique de l'azote et joue un rôle déterminant dans le processus de pollutions des eaux et dans la synthèse de la matière vivante à partir de la matière minérale (Raoul, 2003).

2.3. Cycle de l'azote

Trois phases successives composent ce cycle : l'ammonification, la nitrification, et enfin la nitratisation.

- **L'ammonification**

Cette phase constitue la dégradation des protéines de tous les apports annuels provenant des végétaux et en moindre mesure d'animaux et de micro-organismes telluriques (Andreux et Monrozier, 1981). Les micro-organismes comprennent une grande diversité d'espèces (bactéries, d'actinobactéries ou de champignons) de sorte que l'ammonification est un processus sans exigence écologique particulière que les conditions de l'environnement (Dommergues, 1968).

- **La nitrification**

Il s'agit de l'oxydation de l'ammoniaque par des bactéries nitrifiantes pour arriver à l'état de nitrites. Les nitrites peuvent également être assimilés par les végétaux.

- **La nitratisation**

Il s'agit de l'oxydation des nitrites en nitrates par des bactéries aérobies. Les nitrates sont à la base de nombreux engrais pour plantes car il s'agit de la meilleure forme de l'azote assimilable (Voir figure 1) par les plantes (Ramade, 2008).

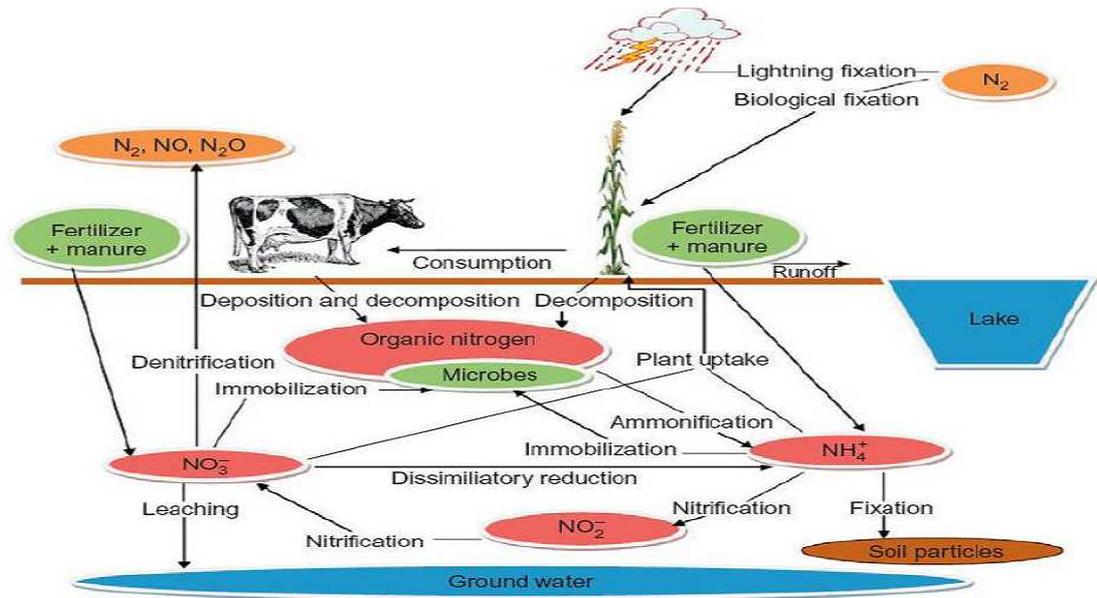


Figure 01 :Cycle de N dans le sol (Luce *et al.*, 2011)

2.3.1. Les pertes d'azote

2.3.1.1. Perte par lessivage

L'ion NO_3^- n'étant pas fixé par le complexe adsorbant du sol, a une très grande solubilité dans l'eau. Les nitrates se déplacent très facilement dans le sol, en raison de sa faible capacité de rétention en eau. Les pertes sont d'autant plus importantes que le sol est superficiel et que les doses apportées excèdent les besoins des plantes (Remy, *in* Mekliche, 1983).

2.3.1.2. Perte par voie gazeuse

Ces pertes englobent la volatilisation de l'ammoniac et la dénitrification.

- **Volatilisation de l'ammoniac**

Bien que fortement retenu par le complexe adsorbant, l'ammonium peut se volatiliser du sol sous forme de gaz ammoniac, surtout dans les premiers jours avant sa diffusion dans le sol ; l'intensité de la volatilisation dépend, de la concentration en ammonium de la solution du sol, de l'humidité du sol, de l'alcalinité du milieu et surtout de la nature d'engrais azotés apportés.

La technique d'apport peut faire varier les pertes lorsque les épandages d'engrais sont apportés sur des sols secs, surtout pour les apports automnaux (Remy, *in* Mekliche, 1983).

- **La dénitrification**

C'est une réduction des nitrates en oxydes nitreux puis en protoxydes d'azote et enfin en azote moléculaire. Les conditions favorables à la dénitrification sont l'anaérobie et la présence de nitrates, nitrite ou oxydes nitreux et les sources énergétiques carbonées facilement fermentescibles.

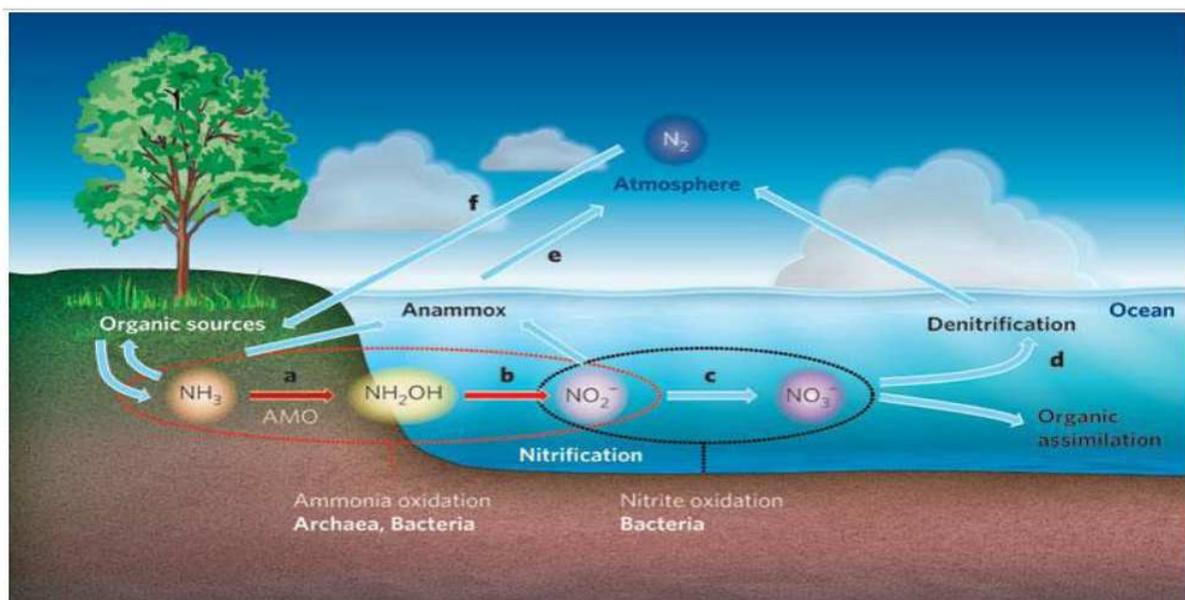


Figure 02: Cycle globale de N dans le système sol-plante-atmosphère (USDA, 2013)

2.3.2. Conséquences d'excès et de carence en azote

L'excès d'azote peut retarder la phase de maturité et entraîner des problèmes de verse. Les symptômes de carence des plantes en azote peuvent être : Rabougrissement de la plante entraînant un retard de croissance, diminution du nombre des tiges, coloration vert pâle des feuilles due à la perturbation de la synthèse chlorophyllienne, jaunissement prématuré et baisse de rendement (Soltner, 2007).

2.4. Dynamique des cycles du carbone dans le système sol-plante-atmosphère

2.4.1. Le cycle du carbone

Le cycle global de C est l'un des cycles les plus importants sur la planète, par son impact direct sur plusieurs systèmes physiques et biologiques ainsi que la variation globale des différents gradients de températures. Le cycle de C est considéré comme le phénomène le plus complexe qui relie les différents compartiments du système sol-plante-atmosphère (Petit *et al.*, 1999). Il s'est accru considérablement au cours des dernières décennies en raison du réchauffement planétaire lié à la hausse des émissions anthropiques de CO₂ dans la couche de l'atmosphère (Denman *et al.*, 2007).

2.4.1.1. Généralités

Le cycle du C est un processus dynamique fermé dans lequel le C est transféré par des forces identifiables entre des réservoirs distincts selon des flux mesurables, le bilan global des échanges entre les réservoirs étant nul. L'élément C représente environ 0,8% de l'écorce terrestre. Il se présente naturellement sous deux formes, cristalline (pure) et moléculaire. La forme cristalline, le graphite et le diamant, existe en quantité infinitésimale au regard de la forme moléculaire (Renaudat, 2005). Le C se retrouve dans l'ensemble de notre environnement dans l'atmosphère, sur terre, sous terre et dans les océans, sous forme minérale ou organique (vivante et morte). On distingue ainsi les grands réservoirs de C: l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère, la lithosphère. La biosphère terrestre est formée par la végétation et l'épaisseur de sol impliquée dans le cycle global du C.

2.4.1.2. Le C dans le pool végétal

La quantité de C assimilée par la photosynthèse des végétaux est appelée productivité primaire brute (PPB) ou gross primary productivity (GPP). Comme tous les organismes vivants, les plantes ont une respiration dite Respiration Autotrophe (RA), résidu des mécanismes de libération d'énergie dans les cellules afin d'assurer leur entretien et leur croissance. Le bilan net entre la productivité primaire brute et la respiration autotrophe est appelé productivité primaire nette (PPN) ou net primary productivity (NPP) (Renaudat, 2005). Chaque saison, une partie de la matière végétale meurt et se décompose dans le sol sous l'action de microorganismes tandis que le reste se répartit en C minéral et organique dont les temps de putréfaction varient de la décennie au siècle.

La quantité nette de C assimilé par la végétation (PPN) est estimée aux alentours de 60 GtC/an si l'on considère la totalité des surfaces continentales (Fung *et al.*, 1987), et parallèlement le sol libère dans l'atmosphère une quantité équivalente de C.

2.4.1.3. Le C dans le pool sol

Le carbone organique du sol représente approximativement 2/3 de l'ensemble du C terrestre et il est important dans la détermination des propriétés chimiques et physiques du sol (Schimel *et al.*, 1994; Oelbermann *et al.*, 2006b). Il peut être affecté par le taux de décomposition, le climat, et les caractéristiques du sol. Sa présence en quantité suffisante dans le sol peut réduire les risques d'érosion, renforcer la filtration des éléments polluants avant qu'ils n'atteignent l'eau souterraine, augmenter le rendement et diminuer l'émission de CO₂ dans l'atmosphère. Mais les techniques de gestions des terres affectent considérablement la quantité de carbone organique du sol. Par exemple, dans un agroécosystème complexe, la réduction du travail du sol et une augmentation des résidus végétaux laissés sur le sol, augmentent la teneur en carbone organique du sol et la séquestration de carbone (Diels *et al.*, 2004; Van Groenigen *et al.*, 2011). Une étude menée par Studdert et Echevrría (2000) montre que le carbone organique du sol au niveau des cultures en rotation de blé, maïs, soja, et tournesol diminue après 11 ans de pratique.

a) Matière organique du sol

La matière organique (MO) du sol est considérée comme un constituant important du sol, mais aussi la principale source d'alimentation et d'énergie pour les organismes vivant du sol. Cette dernière est formée principalement par la décomposition de la matière fraîche des végétaux et des microorganismes. (Gardiner et Miller 2008). Les principales composantes de la MO du sol sont : la fraction légère du sol (LF), le carbone organique du sol (SOC), et l'azote total du sol (TN). LF est considéré comme étant une forme labile de la MO du sol, tandis que le SOC et le TN sont considérés comme des éléments fondamentaux de la MO du sol (Gregorich *et al.*, 2008).

Par ailleurs, la MO a un rôle très important dans le sol. Elle est considérée comme l'indicateur principal de sa qualité, à la fois pour des fonctions agricoles et pour des fonctions environnementales (parmi elles la séquestration du carbone et la qualité de l'air). Cependant, la qualité et la teneur de la MO du sol sont influencées par certains facteurs, comme le pH du sol, la température, l'humidité, la texture, la qualité et la quantité des résidus ajoutés, et spécialement l'activité des microorganismes (Samahadthai *et al.*, 2010).

b) Rôle de la biomasse microbienne dans la séquestration du carbone

La biomasse microbienne (BM) constitue une matrice de transformation pour les matières naturelles organiques dans le sol et agit comme un réservoir labile de nutriments disponibles pour les végétaux (Ladd *et al.*, 1992). C'est un indicateur sensible de la

dynamique de la MO, car les changements de la fraction microbienne sont relativement rapides, et peuvent être détectés avant qu'ils se produisent dans la MO totale. Ainsi, la mesure de la BM est un outil précieux pour la compréhension et la prédiction des effets des changements de la fraction microbienne dans les sols.

De plus, la BM est un compartiment à la fois stockeur de constituants essentiels C, N et P et transformateur des nutriments. Elle est donc déterminante dans le cycle des nutriments et la régulation du compartiment sol de l'écosystème (Ladd *et al.*, 1992). Bien que dans le sol la BM ne représente qu'une faible proportion des éléments nutritifs (C microbien généralement dans une fourchette de 0,05 à 5 % de C total), celle-ci est un compartiment essentiel du fonctionnement biologique des sols, selon Jenkinson (1990), le trou de l'aiguille par où doit passer toute la MO.

c) Respiration du sol

La « respiration du sol » est la somme des respirations autotrophes (racines) et hétérotrophes (microorganismes de la rhizosphère et du sol et des autres groupes minéralisateurs du sol tels que la macro et la méso-faune du sol) (Raich et Schlesinger, 1992). La dynamique de la matière organique du sol (MOS) selon les modes d'occupation des terres connaît un intérêt grandissant à la fois dans les études de fertilité des sols (Jastrow *et al.*, 1996) et dans les études du cycle global du carbone (Dugas *et al.*, 1999). En effet, la MOS est très souvent reconnu comme un facteur déterminant des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et participe à l'émission de gaz à effet de serre (N_2O , CH_4 et CO_2) d'origine agricole, soit 20% des émissions gazeuses totales (Pendall et King, 2007). Dans le système complexe sol-plante-atmosphère, la respiration est sous deux formes :

- *La photorespiration* ou respiration à la lumière due à une concurrence entre le CO_2 et l' O_2 qui cherchent tous deux à se fixer sur le ribulose-1,5-diphosphate (RuDP : enzyme de fixation de carbone atmosphérique). Ce mécanisme se traduit par une consommation d'oxygène accompagnée d'un rejet de dioxyde de carbone et réduit donc l'efficacité de la photosynthèse (Maisongrande, 1996).
- *La respiration métabolique* a pour but de subvenir aux besoins métaboliques des plantes, en fournissant l'énergie nécessaire pour assurer les différents flux de matières et leur transformation au sein du végétal. Elle consiste à transférer l'énergie contenue dans les substrats glucidiques dans le but de la restituer sous forme d'ATP (USDA, 2013).

2.4.1.4. Mécanisme du stockage du C dans le système complexe sol-plante-microorganisme

L'activité photosynthétique des plantes permet l'entrée de C organique dans le sol *via* la litière et les racines de la plante. La respiration des racines des plantes, la minéralisation de C organique par la microflore et la respiration de la méso- et macro- faune du sol sont les causes majeures des émissions de C du sol sous forme de CO₂ vers l'atmosphère. La quantification de ces émissions reste assez peu documentée. Elles sont surtout très variables dans le temps et l'espace (Beyer, 1991).

Les apports de C exogène dans le sol sont vite minéralisés, par exemple 92 % du C apporté sous forme de feuille de maïs sont minéralisés sur une année (Ayanaba et Jenkinson, 1990). Les racines vivantes et les organismes associés de la rhizosphère (microorganismes, myceliums) contribuent par des effets physiques « effet filet » ou chimiques (production de métabolites secondaires aux propriétés agrégeantes), à l'agrégation du sol (Jastrow *et al.*, 1998). Les entrées de C récentes dans le sol sous forme de débris végétaux ou animaux, plus ou moins transformés par les actions de décomposition des microorganismes, sont progressivement intégrées dans la structure du sol.

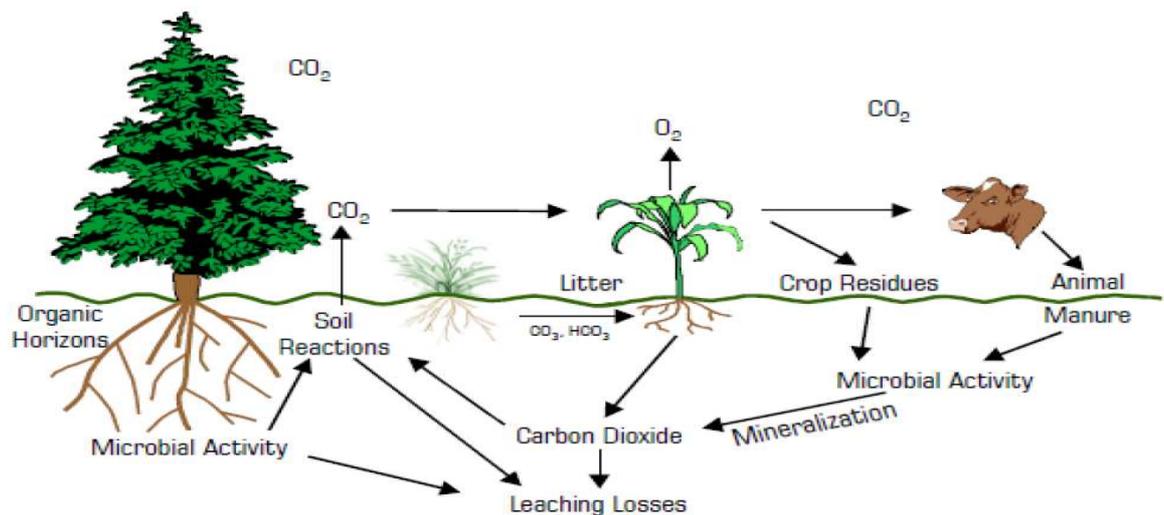


Figure 3: Cycle du carbone dans le système sol-plante-atmosphère (USDA, 2013)

Par ailleurs, d'autres propriétés physiques du sol telles que l'épaisseur et la texture du sol peuvent influencer le stockage du C. Un sol est souvent corrélé positivement à la texture

(teneur en éléments fins 0-20 microns). Les sols argileux, de porosité fine, auraient davantage de site de protection du C, le C étant ainsi peu accessible aux décomposeurs du sol serait alors stocké en plus grande quantité que dans un sol sableux (Hassink, 1997).

2.5. Modélisation des cycles C et N dans le système de production végétale

La dynamique du C et de N influence potentiellement la qualité et la productivité des sols. Elle a été depuis longtemps un des objectifs importants de la science du sol. Avec l'amélioration de la méthodologie expérimentale, les scientifiques ont accumulé de précieux renseignements sur la dynamique du C et de N dans le sol et ils ont amélioré la gestion agronomique des intrants (DeBusket *al.*, 2001). D'après la littérature, les modèles conceptuels qui concernent les cycles du C et N dans les sols sont toujours en développement (Molina and Smith, 1998). L'exemple classique d'un des premiers modèles traitant l'aspect cyclique du C et N par minéralisation potentielle de la MO est celui de Stanford et Smith (1972).

Cependant, parmi les plus grandes révolutions dans l'étude des cycles C et N dans les 30 dernières années apparu le développement des modèles de simulations mécanistes, et la liaison des processus avec l'écosystème. Ceci a été rendu possible par l'introduction de l'outil informatique avec des capacités de calcul et de mémoire suffisantes pour permettre la simulation des systèmes complets et intégrés entre les compartiments sols-plante-atmosphère.

2.5.1. Modèles de décomposition

La MOS joue un rôle fondamental dans le maintien de la fertilité *via* ses effets sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. L'importance des pools de MOS dépend des apports de la MO (grâce aux résidus après récolte, au turnover des racines et des mycorhizes et aux exsudats racinaires), et des pertes de C, principalement via la respiration hétérotrophe due à la décomposition de la MOS. A cet effet, de nombreux modèles compartimentaux de décomposition des matières organiques ont été élaborés, parmi lesquels on peut classer :

a) Modèle linéaire

Les flux de sortie d'un compartiment sont liés uniquement au contenu de ce compartiment selon une cinétique d'ordre 1. Dans la littérature le plus grand nombre de modèles de décomposition sont de ce type, on peut citer parmi les plus connus Century (Parton *et al.*, 1987), Roth-C (Jenkinson *et al.*, 1987), Daisy (Hansen *et al.*, 1991) ou CO₂ Fixé (Masera *et al.*, 2003).

Cependant, le flux de respiration est affecté par ces limitations, par contre celui de minéralisation nette d'azote ne l'est pas en général. Le traitement de ces deux flux est particulier et varie d'un modèle à l'autre. La respiration est proportionnelle à la biomasse microbienne mais dans des modèles ils considèrent une perte lors de chaque flux de décomposition, par contre la minéralisation est liée au rapport C/N.

b) *Modèle non linéaire*

La sortie de chaque compartiment est proportionnelle à la fois à son contenu et à la croissance des décomposeurs ou de leurs enzymes. Les microorganismes produisent des enzymes extra-cellulaires qui dégradent la MO. Les microorganismes absorbent le carbone dissous par les enzymes, de ce fait il y a une voie indirecte entre les biomasses microbiennes et la MO du sol. Enfin, la conception de ces modèles de décomposition de matières varie en fonction des objectifs de chaque modèle. Dans les dernières décennies, différents modèles mathématiques avec des niveaux de complexité distincts sont développés pour décrire des processus biogéochimiques dans le sol. La plupart de ces modèles sont basés sur la cinétique et les taux stœchiométriques qui intègre les éléments cycliques au sein du sol, les nutriments, et les échanges de carbone avec la végétation et l'atmosphère (Manzoni et Porporato, 2009).

2.5.2. Le modèle MOMOS

MOMOS (Micro-Organismes et Matière Organique du Sol) est un modèle de décomposition qui explique l'écologie fonctionnelle de la biomasse microbienne. Il a été conçu de manière à limiter les paramètres principalement à des taux de transferts entre les compartiments qui ont pu être ajustés grâce à des expériences d'incubation avec traçage isotopique (Pansu *et al.*, 2006, 2007, 2010), mais aucune application à des systèmes complexes ouverts avec des flux réguliers n'a encore été publiée à l'exception du travail réalisé par Ibrahim *et al.* (2013).

2.5.3. Structure du modèle MOMOS

Le modèle MOMOS est proche des modèles linéaires dans sa structure. Cependant seule l'expression de la respiration microbienne est non-linéaire : elle est fonction du pool de biomasse microbienne au carré ce qui rend le fonctionnement du modèle centré sur le pool de la biomasse microbienne. Cette particularité rend le flux de respiration très sensible aux apports et aux conditions climatiques pour un niveau de biomasse microbienne relativement constant (Pansu, 2004).

MOMOS est constitué de deux pools de MO fraîche (NC labile et NC stable), de deux pools d'humus (labile et stable). Un pool de biomasse microbienne contrôle la plupart des flux de et vers ces pools. Le modèle TAO (Thuriès *et al.*, 2002) est utilisé pour séparer les résidus végétaux entrants en une fraction labile et une fraction stable. Par ailleurs, le modèle MOMOS est couplé avec le modèle SAHEL qui permet de déterminer l'humidité journalière du sol.

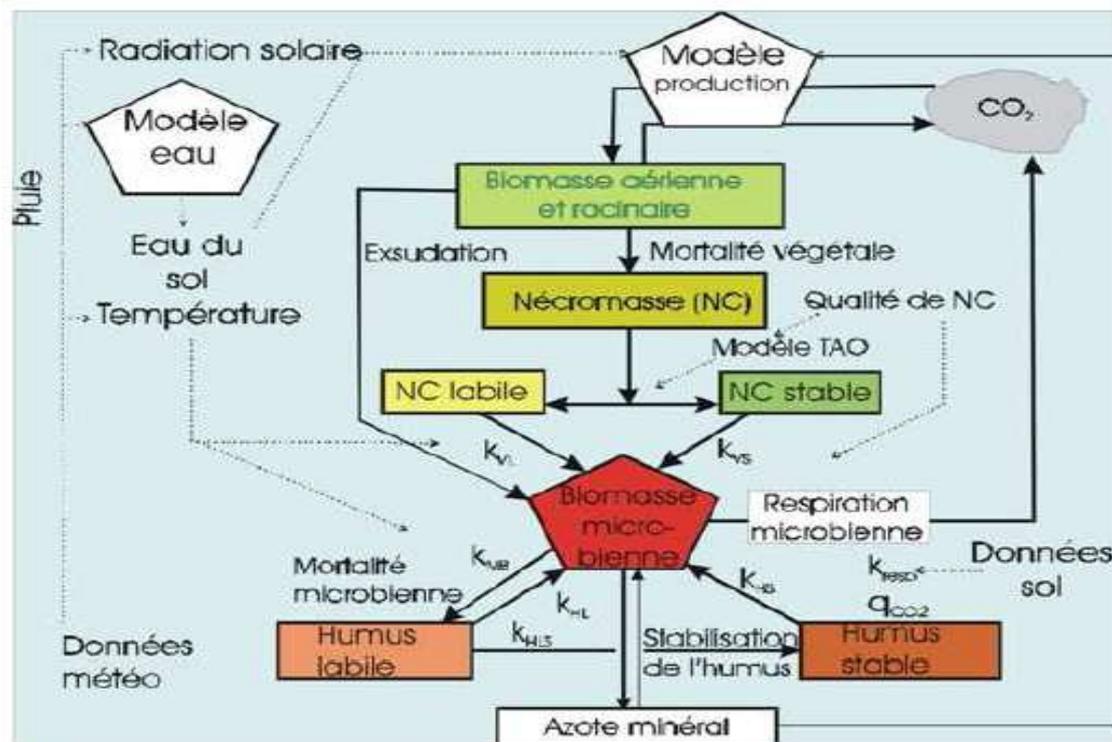


Figure 4: Diagramme relationnel de la Modélisation des Transformations Organiques par les Microorganismes du Sol: MOMOS, (Pansu *et al.*, 2010).

2.5.4. MOMOS est un modèle centré sur la biomasse microbienne

Le modèle définit la croissance microbienne par assimilation des compartiments labiles et stables des résidus végétaux et de l'humus ainsi que des exsudats racinaires (Pansu *et al.*, 2009).

Le modèle couplé visera à prédire simultanément les flux du C et de N de l'atmosphère, respectivement par les stomates des plantes et les rhizobiums, et leur translocation vers les tiges et les racines, les flux de C et N restitués par les plantes aux microorganismes du sol, le flux de C vers atmosphère par la respiration microbienne, les flux de N entre les microorganismes et la phase minérale (minéralisation et immobilisation

microbienne), l'absorption de l'azote minéral par les racines et sa translocation vers les parties aériennes pour chaque plante.

Il intégrera les entrées N par restitution et fertilisation ainsi que les pertes éventuelles par les agro-systèmes vers l'atmosphère et les eaux souterraines.

2.5.5. Application de modèle MOMOS dans le système légumineuse-céréales

D'après Ibrahim *et al.* (2013) et Latati (2015), le modèle MOMOS est utilisé pour clarifier la dynamique de N et C au niveau de l'agro-écosystème céréales-légumineuses, sa validation a pour but de répondre à plusieurs questions de recherche sur le système légumineuses-céréales, à savoir :

- Les légumineuses et les céréales en monoculture ou en association, sont-ils des sources ou des puits de carbone ?
- Les légumineuses fixatrices peuvent-elles constituer des sources suffisantes d'azote pour les céréales en association ou rotation? Dans quelle mesure le phosphore limite-t-il la fixation d'azote ?
- A quelle échelle de temps, les sources en N et C sont-elles disponibles ? comment assurent-elles la fertilité et la durabilité des systèmes ?