

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش-الجزائر  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE  
EI-HARRACH –ALGER

*Thèse*

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3ème cycle LMD

Agronomiques

Option : Production et Amélioration végétales

*Thème*

**Evaluation de la résilience des systèmes de culture légumineuses - céréales face à la sécheresse : Analyse multi-échelle de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'azote par la validation des modèles biophysiques**

**Présentée par : M. KHERIF Omar**

Soutenu publiquement le 09-Mars-2022

**Membres de jury**

**Président :** M<sup>me</sup> LAOUR Meriem

Professeur, ENSA, Alger

**Directeur de thèse :** M. LATATI Mourad

Professeur, ENSA, Alger

**Examineurs :** M. MEKLIICHE Arezki

Professeur, ENSA, Alger

M. MEBARKIA Amar

Professeur, Université FERHAT Abbas  
Setif 1, Setif

M. KIROUANI Abderrezzak

Maitre Conférence A, Université Dr  
YAHIA Fares, Médéa

## ***DEDICACE***

Avec l'aide d'Allah le tout-puissant, j'ai pu achever ce travail que je dédie :

A mes très chers parents pour tout leur amour.

À ma femme, pour m'avoir soutenu et pour sa patience tout le long de cette thèse.

À mes trois anges Sophia, Camélia et Célia pour le temps que je leur ai volé.

À toutes les personnes qui ont participé, de loin ou de près, à la réalisation de ce travail.

## ***REMERCIEMENT***

Je remercie, tout d'abord, ALLAH, le tout puissant, de m'avoir aidé à achever ce travail.

A l'issue de ce travail, je tiens tout particulièrement à remercier M. LATATI Mourad (Professeur à l'ENSA) d'avoir dirigé avec beaucoup d'attention et de soin cette thèse, avec qui j'ai pu faire aboutir ce travail.

Je tiens à remercier vivement Mme LAOUR Meriem (Professeur à l'ENSA) pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Mes remerciements vont également à mon très cher enseignant M. MEKLICHE Arezki (Professeur à l'ENSA), pour avoir accepté de juger mon travail, Je lui suis très reconnaissant pour son soutien permanent, sa gentillesse et surtout ses qualités humaines.

Je remercie également M. MEBARKIA Amar (Professeur à l'université Ferhat Abbas de Sétif) et M. KIROUANI Abderrazzak (MCA à l'université de Médéa) pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer au jury de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à M. PANSU Marc (ex Directeur de Recherches à l'IRD) et M. JUSTES Eric (PHD, HDR, directeur du Département Persyst au CIRAD Montpellier) de nous avoir fait bénéficier de leurs expertise.

Je remercie Mme SELLOU Hafida pour le temps qu'elle m'a consacré pour la lecture et correction de ce document.

Je ne saurais oublier de remercier mon institut de rattachement « l'Institut technique des grandes cultures », Mr SAKHRI Mohammed El Hadi directeur général de L'institut de m'avoir autorisé à faire ma post-graduation.

Je remercie aussi M. Bouhaouchine Mustapha et M. LOUAHDI Nasreddine, directeurs des Fermes de démonstration et de production de semences d'Oued semar et Sétif respectivement, de m'avoir soutenu toute au long de la réalisation de ma thèse, aussi M. KHELLAF Hamoudi agriculteur qui ma ouvert la porte de son exploitation et pour ses qualités humaines.

J'exprime ma gratitude aux ingénieurs de laboratoires du département production végétales de l'ENSA (Farid, Asma, Amel), du laboratoire sol de l'ITGC et du laboratoire végétal de l'ITELV, sans oublier Mme DJOUADI Karima doctorante a l'ENSA pour son aide.

Un grand merci à mes amis et collègues FAHAS Amine et KIROUANI Hassane pour leurs soutien, aide et collaboration.

A Mon ami et conseillé de toujours Yekkour Amine, qui m'a soutenu, encouragé et guidé tout le long de ce périple.

Je remercie tous les mastérants qui ont interagies avec moi durant leurs projets de fin d'études (Amine, Fouzi, Amrane, Hani, Nadia, Amira et Romila, leur compagnie et les souvenirs partagés resteront gravés en ma mémoire,

Je remercie particulièrement M. BOUHANACHE Abderrahim un être exceptionnel (ex master-nant de l'ENSA), KESKES Mohammed Islam, SEGHOUANI Mounir et ZEMMOURI Bahia, Masterants à l'ENSA pour leurs contributions substantielles dans ce travail, sans oublier ma sympathie à M. GAMOUH Ramzy.

Je ne peux pas oublier le personnel de la station de L' ITGC d'Oued Semar pour leur aide et soutien durant les expérimentations (DAHMANI Amar, Djafar, Amine, Slimane, Bassata, Ali, ahmed et les trois Fatah)

*KHERIF Omar*

## ***LISTE D'ABREVIATION***

<b>AGB</b>	: Above-Ground Biomass (Biomasse aérienne)
<b>AGPN</b>	: Above-Ground Plant Nitrogen (Azote plante)
<b>ATER</b>	: Area Time Equivalent Ratio (Rapport d'équivalence temps surface)
<b>ATP</b>	: Adénosine triphosphate
<b>BBCH</b>	: <b>B</b> iologische <b>B</b> undesanstalt, <b>B</b> undessortenamt und <b>C</b> hemische Industrie, Echelle pour identifier des stades de développement phénologique
<b>BM</b>	: Microbial Biomass (Biomasse microbienne)
<b>CR</b>	: Competitive Ratio (Rapport de compétition)
<b>DAS</b>	: Days After Sowing (Nombre de jours après le semis)
<b>EF</b>	: Modeling Efficiency (Efficacité du modèle)
<b>HL</b>	: Humus labile
<b>HS</b>	: Humus stable
<b>LAI</b>	: Leaf Area Index (Indice de surface foliaire)
<b>LER</b>	: Land Equivalent Ratio (Rapport d'équivalence de surface)
<b>LF</b>	: Fraction légère du sol
<b>LUE</b>	: Land Use Efficiency (Efficacité de l'utilisation des terres)
<b>MADR</b>	: Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
<b>MCMC</b>	: Markov Chain Monte Carlo
<b>MD</b>	: Mean Deviation (Ecart moyen)
<b>MO</b>	: Matière organique
<b>MOMOS</b>	: Modélisation des transformations Organiques par les Micro-Organismes du Sols
<b>MOS</b>	: Teneur en matière organique du sol
<b>NRMSE</b>	: Normalized Root Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne normalisée)
<b><i>p</i></b>	: Probability value
<b>PP</b>	: Phosphore particulaire
<b>PPB</b>	: Productivité primaire brute
<b>PPN</b>	: Productivité primaire nette
<b>PS</b>	: Phosphore soluble

<b>PSB</b>	: Bactéries solubilisatrices de phosphore
<b>PT</b>	: Phosphore total
<b>R<sup>2</sup></b>	: Coefficient de corrélation de Pearson
<b>RA</b>	: Respiration Autotrophe
<b>RCBD</b>	: Randomized Complete Block Design (Randomisation en bloc aléatoire complet)
<b>RCC (K)</b>	: Coefficient d'encombrement relatif
<b>REI</b>	: Relative Efficiency Index (Indice d'efficacité relative)
<b>RMSE</b>	: Root Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne)
<b>SAHEL</b>	: Soils in semi-Arid Habitats that Easily Leach model
<b>SE</b>	: Erreurs standard
<b>SOC</b>	: Carbone organique du sol
<b>STICS</b>	: Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard
<b>TN</b>	: Azote total du sol
<b>VENSIM</b>	: Plateforme de simulation développée par Ventana Systems
<b>VL</b>	: Matières végétales labiles
<b>VS</b>	: Matières végétales stables
<b>wc12</b>	: Profondeur du sol 0-15 cm
<b>wc13</b>	: Profondeur du sol 15-30 cm

## ***LISTE DES TABLEAUX***

- Tableau 1** : Paramètres éco-physiologiques et valeurs initiales des compartiments C du sol des systèmes de culture du site 1 (S1).....50
- Tableau 2** : Paramètres éco-physiologiques et valeurs initiales des compartiments C du sol des systèmes de culture du site 2 (S2) .....51
- Tableau 3** : Paramètres éco-physiologiques et valeurs initiales d' N du sol des compartiments du système de culture en S1. Seules les valeurs de N maxy j sont mesurées sur le site ; les autres valeurs sont optimisées pour la meilleure prédiction de l'ensemble de données. ....52
- Tableau 4** : Paramètres éco-physiologiques et valeurs initiales des N compartiments du sol des systèmes de culture en S2. Seules les valeurs de N maxyj mesurées sur le site ; les autres valeurs sont optimisées pour la meilleure prédiction de l'ensemble de données.....53
- Tableau 5** : La corrélation ( $R^2$ ) entre les valeurs modélisées et mesurées et leurs valeurs  $p$  respectives à  $p < 0,05$  pour le maïs et le haricot commun en culture intercalaire et en monoculture pendant les deux saisons de croissance.....56
- Tableau 6** : Propriétés physiques et chimiques du sol des sites expérimentaux S1, S2 et S3. Les valeurs représentent la moyenne de 6 répétitions  $\pm$  SE (erreurs standard).....77
- Tableau 7** : Rendement céréalière et l'accumulation d'azote par les graines par le pois chiche, le blé dur et le mélange de cultures sous différents traitements culture  $\times$  N..... 83
- Tableau 8** : Valeurs NNI calculées sous différents traitements de niveau culture  $\times$  N pendant les phases de floraison et de récolte. ....85
- Tableau 9** : valeurs LER (pour le rendement grain et le N grain) et REI (biomasse aérienne sèche) calculées sous différents traitements (site  $\times$  N) et pendant la phase de récolte. ....87
- Tableau 10** : Valeurs ATER et LUE calculées sur le rendement et l'absorption d'azote sous différents traitements au niveau du site  $\times$  N et pendant la phase de récolte.....88
- Tableau 11** : Valeurs K calculées sur la composante de rendement sous différents traitements au niveau du site  $\times$  N et pendant la phase de récolte.....89
- Tableau 12** : Valeurs de CR (rendement en grain et rendement en N) par rapport au pois chiche et au blé dur calculées sur le rendement et l'absorption de N sous différents traitements au niveau du site  $\times$  N et pendant la phase de récolte.....90
- Tableau 13** : Description et définition des unités des paramètres optimisés pour le pois chiche et le blé dur cultivés en culture pure et en système de culture intercalaire.....103
- Tableau 14** : Description des différents processus de la simulation des données pour l'optimisation des paramètres, et les valeurs des paramètres calibrés dans STICS pour le pois chiche et le blé dur cultivés dans un système de culture pure et de culture intercalaire.....106

## ***LISTE DE FIGURES***

<b>Figure 1</b> : Evolution de la production des céréales à l'échelle nationale.....	6
<b>Figure 2</b> : Carte des zones de céréaliculture à l'échelle nationale.....	6
<b>Figure 3</b> : Evolution de production céréalière internationale (utilisation et stocks).....	7
<b>Figure 4</b> : Consommation humaine mondiale de légumineuses par habitant.....	9
<b>Figure 5</b> : les différentes interactions dans le système d'association des cultures.....	12
<b>Figure 6</b> : Schéma du cycle de N dans le sol. ....	16
<b>Figure 7</b> : Schéma de transfert de l'Azote (N) entre légumineuses et céréales.....	18
<b>Figure 8</b> : Quantité d'azote transféré du pois au blé.....	18
<b>Figure 9</b> : Schéma représentatif des formes du phosphore.....	20
<b>Figure 10</b> : Effet du pH de la solution du sol sur les formes solubles du phosphore.....	21
<b>Figure 11</b> : Schéma du cycle simplifié de P dans un écosystème cultivé présentant les flux possibles entre les différents réservoirs de P.....	23
<b>Figure 12</b> : Cycle du carbone dans le système sol-plante-atmosphère-hydrophère.....	28
<b>Figure 13</b> : Structure du modèle MOMOS.....	42
<b>Figure 14</b> : La teneur en eau prévue et mesurée et les précipitations quotidiennes et cumulées dans les couches de sol de 0 à 15 cm (wcl2) et de 15 à 30 cm (wcl3) en S1 et S2 au cours du cycle de culture.....	54
<b>Figure 15</b> : Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et les stocks de C des pousses prévus pour les monocultures de maïs et de haricots communs et les cultures associées de maïs et de haricots communs; stocks d'azote des pousses prévus pour les monocultures de maïs et de haricots communs et de cultures associées de maïs et de haricots communs au niveau de S1 en 2012 et 2013.....	57
<b>Figure 16</b> : Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et les stocks de C de pousses prévus pour les monocultures de maïs et de haricots communs et les cultures associées de maïs et de haricots communs ; stocks d'azote des pousses prévus pour les monocultures de maïs et de haricots communs et de maïs et de haricots communs au niveau de S2 en 2012 et 2013.....	58
<b>Figure 17</b> : Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et les stocks C et N des nodules prévus pour les haricots communs monocultures et intercalés en S1 et S2 ; prédiction de la fixation cumulée de l'azote par les mixtures des monocultures et inter-cropping en S1et S2.....	61
<b>Figure 18</b> : Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et les stocks de C-MB prévus en S1 pour les monocultures de maïs et de haricot commun et de maïs et de haricot commun . Et prévu les stocks de N-MB en S1 pour les monocultures de maïs et de haricots communs, et de cultures associées de maïs et de haricots communs en 2012 et 2013.....	63

<b>Figure 19</b> : Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et les stocks de C-MB prévus en S1 pour les monocultures de maïs et de haricot commun et de maïs et de haricot commun. Et prévu les stocks de N-MB en S2 pour les monocultures de maïs et de haricots communs, et de cultures associées de maïs et de haricots communs en 2012 et 2013.....	64
<b>Figure 20</b> : Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et la respiration quotidienne prévue (micro-organismes, nodules et racines) pour la monoculture de maïs à S1 et S2, la monoculture de haricots communs et les cultures intercalaires de maïs et de haricots communs.....	65
<b>Figure 21</b> : Températures et précipitations mensuelles sur les saisons 2018-2019 et moyennes de la période 1981-2017 pour les trois sites expérimentaux.....	76
<b>Figure 22</b> : Comparaison du LAI, de la biomasse aérienne (AGB) et du rendement en grains observés et simulés par STICS pour un ensemble des données calibrées du blé dur et le pois chiche cultivés en monoculture et en cultures intercalaires.....	110
<b>Figure 23</b> : Comparaison de N plante (AGPN) observé et simulé par STICS pour un ensemble de données calibrées sur le blé dur et le pois chiche cultivés en monoculture et en cultures intercalaires.....	111
<b>Figure 24</b> : Comparaison de la teneur en azote et en eau du sol et de la profondeur racinaire observées) et simulées par STICS de la calibration des données du blé dur et du pois chiche cultivés en monoculture et en cultures intercalaires.....	112
<b>Figure 25</b> : Exemple d'une simulation de la dynamique (ligne bleue) de l'indice LAI et du rendement en grains pour l'ensemble des données calibré, pour une culture pure de pois chiche pendant les deux Campagnes 2018/2019 et 2019/2020.....	114
<b>Figure 26</b> : Exemple d'une simulation de la dynamique de l'azote végétal (AGPN) et de la teneur en eau du sol pour l'ensemble des données calibré, pour une culture pure de pois chiche pendant les deux Campagnes 2018/2019 et 2019/2020.....	115
<b>Figure 27</b> : Exemple d'une simulation de la dynamique de la LAI, du rendement en grains, de la biomasse aérienne (AGB) et de la teneur en eau du sol pour l'ensemble des données calibré, pour une culture pure de blé dur pendant les deux Campagnes 2018/2019 et 2019/2020.....	117
<b>Figure 28</b> : Exemple d'une simulation de la dynamique de la biomasse aérienne (AGB), du rendement en grains, de l'azote végétal aérien (AGPN). pour l'ensemble des données calibré, pour une culture associée de blé dur-pois chiche durant les deux Campagnes 2018/2019 et 2019/2020 .....	119

# SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etat de l'art.....	4
1 Généralités sur les céréales et les légumineuses .....	4
1.1 Historique de la céréaliculture.....	4
1.2 Importance et utilisation des céréales.....	4
1.3 Production nationale et internationale de céréales et légumineuses.....	5
1.4 Généralités sur les légumineuses.....	7
1.5 Intérêt des légumineuses.....	8
1.6 Utilisation des légumineuses .....	8
2 Les associations de cultures : .....	9
2.1 Définition et historique :.....	9
2.2 Types d'associations de cultures : .....	10
2.3 Les associations légumineuses-céréales : .....	10
2.4 Avantages de l'association des cultures : .....	11
2.4.1 Utilisation efficace des ressources et amélioration du rendement : .....	11
2.4.2 Réduction des dégâts causés par les maladies et les parasites : .....	12
2.4.3 Contrôle des mauvaises herbes : .....	12
2.4.4 Amélioration et conservation de la fertilité du sol : .....	13
2.5 Inconvénients de l'association des cultures : .....	13
3 Cycles biochimiques de l'azote, phosphore et carbone.....	14
3.1 L'azote.....	14
3.1.1 L'azote dans la plante et dans le sol.....	14
3.1.2 Fixation symbiotique de l'azote atmosphérique .....	15
3.1.3 Processus de transfert et d'assimilation de l'azote.....	16
3.1.4 Rôle des associations dans la fertilisation biologique.....	19
3.2 Le phosphore .....	19
3.2.1 Le phosphore dans la plante.....	19
3.2.2 Sources et formes des matières phosphorées .....	20
3.2.3 Facteurs influençant la disponibilité du phosphore dans le sol.....	20
3.2.4 Facteurs influençant les prélèvements du phosphore par la plante.....	24
3.2.5 Pertes de phosphore .....	26
3.2.6 Conséquence de la déficience en phosphore sur la plante .....	26
3.3 Carbone.....	28
3.3.1 C dans le végétale .....	29
3.3.2 Le C dans le sol.....	29
3.3.3 Matière organique du sol.....	29
3.3.4 Rôle de la biomasse microbienne dans la séquestration du carbone.....	30
3.3.5 Respiration du sol.....	30
3.3.6 Mécanisme du stockage du C dans le système complexe sol-plante-microorganismes .....	31
4 La résilience des systèmes de culture : .....	31
4.1 La résilience face aux changements globaux : .....	32
4.2 Améliorer la résilience des systèmes de culture à travers la diversité : .....	32
5 Evaluations des systèmes de culture : .....	33
5.1 Les modèles biophysiques (chapitre II & IV) : .....	33
5.1.1 Étapes de la modélisation.....	34

5.2	Indices de compétitivité agro-écologiques (chapitre III) :.....	36
Chapitre II : Modélisation agro écologique des transferts d'azote et de carbone entre les micro-organismes décomposeurs, les symbiotes végétaux, le sol et l'atmosphère dans un système de culture intercalaire .....		
		37
1	Introduction .....	37
2	Matériaux et méthodes .....	40
2.1	Expérimentation et collecte de données .....	40
2.2	Structure et système d'équation MOMOS et paramétrage du modèle.....	41
2.3	La formulation mathématique de la production végétale .....	45
2.4	Processus d'étalonnage et d'optimisation MOMOS.....	48
3	Résultats .....	54
3.1	Teneur quotidienne en eau du sol .....	54
3.2	Transferts de C et N entre les plantes et les symbiotes microbiens.....	55
3.3	Echanges microbiens C et N.....	61
3.4	C respirations du sol et des plantes vers l'atmosphère.....	64
4	Discussion .....	66
4.1	Robustesse du modèle paramétré et validé.....	66
4.2	Echanges C et N et production végétale.....	66
4.3	Transfert de C et N vers des nodules symbiotiques.....	67
4.4	Contrôle microbien et équilibre des échanges sol-plante-atmosphère .....	68
5	Conclusions .....	71
Chapitre III : Comprendre la réponse de la culture associée blé-pois chiche à la fertilisation azotée en utilisant des indices de compétitivité agro-écologiques dans des conditions pédoclimatiques contrastées. ....		
		73
1	Introduction .....	73
2	Matériels et méthodes.....	76
2.1	Site expérimental et conditions pédoclimatiques .....	76
2.2	Dispositif expérimentale et choix des espèces .....	77
2.3	Échantillonnage et mesures des plantes et des sols .....	78
2.4	Calculs. ....	79
2.5	Analyses statistiques.....	81
3	Résultats .....	82
3.1	Rendement en grains et en azote .....	82
3.2	Indice de nutrition azoté et état azoté des sols et des cultures.....	84
3.3	Rapport d'équivalence des terres et indice d'efficacité de rayonnement : .....	86
3.4	Ratio d'équivalent-temps et efficacité de l'utilisation des terres:.....	87
3.5	Coefficient d'encombrement relatif .....	88
3.6	Ratio compétitif .....	89
4	Discussion .....	90
5	Conclusion.....	94
Chapitre 4 : Première calibration du modèle sol-plante STICS sur un système de culture intercalaire à base de pois chiche en conditions méditerranéennes .....		
		95
1	Introduction .....	95
2	Matériel et méthodes .....	98
2.1	Caractéristiques climatiques et pédologiques.....	98
2.2	Système de culture et conception des parcelles de terrain.....	99
2.3	Échantillonnages et mesures des plantes et du sol .....	99
2.4	Aperçu du modèle.....	100

2.5	Données d'entrée et options de simulation .....	101
2.6	Calibration de STICS.....	101
2.6.1	Culture du pois chiche.....	101
2.6.2	La culture du blé dur .....	107
2.6.3	Culture intercalaire blé dur-pois chiche .....	107
2.7	Analyse statistique et évaluation du modèle.....	108
3	Résultats .....	108
3.1	Estimation, optimisation et mesure des paramètres du sol et des cultures .....	108
3.2	Accord entre les données prédites et observées.....	109
3.2.1	Croissance de la culture, rendement en grain et absorption de N .....	109
3.2.2	Profondeur d'enracinement et stocks d'eau et d'azote du sol.....	111
3.3	Dynamique temporelle de la croissance des plantes, du rendement et de l'acquisition d'azote et d'eau.....	113
3.3.1	Pois chiche en monoculture .....	113
3.3.2	Monoculture de blé dur .....	116
3.3.3	Système de culture intercalaire pois chiche-blé dur.....	118
4	Discussion .....	120
4.1	La précision de la prédiction dans la calibration de nouvelles cultures et de nouveaux cultivars .....	120
4.2	La crédibilité dans la reproduction de la dynamique des variables de la plante et du sol .....	122
4.3	STICS comme outil robuste pour concevoir et évaluer des systèmes de culture innovants .....	123
5	Conclusion.....	125
	Conclusion générale .....	126
	Références bibliographiques .....	130
	Annexe 1(photos).....	156
	Publications.....	165

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les contraintes agro-climatiques naturelles, conjuguées aux effets plus récents du changement climatique, pèsent sur le développement de l'agriculture algérienne, contraignant les agriculteurs à l'adoption de systèmes de culture extensifs dans les zones d'agriculture pluviale. Ainsi, en 2017, plus de la moitié de la SAU est consacrée au système céréales-jachère. On recense en Algérie plus 1,2 million d'exploitations, disposent en majorité d'une superficie inférieure à 10 hectare (ha) (Bessaoud *et al.*, 2019), la disponibilité en ressource hydrique ne dépassant pas les 600 m<sup>3</sup> /habitant/an, quand on sait que la banque mondiale fixe le seuil de pauvreté en eau à 1000 m<sup>3</sup> /habitant/an (Mozas *et al.*, 2013).

En plus le système céréales/jachère est confronté à une conduite sur des sols souvent carencés en phosphore (P) (Alkama, 2010), avec des pH alcalins réduisant ainsi la biodisponibilité de P, sachant que les réserves de ce minerais sont en phase d'épuisement dans le monde et que la rupture peut se produire dans une cinquantaine d'année (Cordell *et al.*, 2009).

L'accroissement des rendements de céréales par l'irrigation de complément et par les apports d'engrais azotés ont été toujours suggérés comme leviers essentiels (Boussen *et al.*, 2005). Toutefois, au-delà du coût élevé de ces pratiques et des risques de pollution de l'environnement (Guarda *et al.*, 2004), une question demeure autour de l'efficacité des pratiques d'irrigation et de fertilisation azotée dans un contexte marqué par l'irrégularité de la pluie (Tilman *et al.*, 2002). L'amélioration de ces efficacités pourrait être obtenue par des pratiques agricoles permettant l'accroissement des rendements et la réduction des pertes dans l'environnement (eau et air).

La majorité des chercheurs et d'acteurs du domaine des sciences agronomiques en Algérie misent sur la forte implication des conditions du milieu en zones semi-arides (agriculture tributaire des précipitations, ces dernières sont rares et mal réparties dans le temps) dans la situation actuelle du secteur agricole. Ce dernier est caractérisé par une viabilité économique faible où le rendement moyen d'une culture comme les céréales, ne dépasse guère les 15 qx/ha (MADR, 2018).

La dégradation des terres et la fragilité de la situation socio-économique des agriculteurs accentuent davantage l'état agonique de ce secteur. Une partie du problème est alors expliquée par les composantes du milieu : sol et climat, éléments relativement statiques. L'autre partie du problème est à chercher dans les éléments mouvant du continuum sol, climat, et système de culture ; ce dernier représente l'ensemble des techniques et des pratiques mises en œuvre par l'agriculteur dans son processus de production. Avec trois éléments rotation,

assolement et itinéraire technique, le système de culture peut servir comme réacteur de nouvelles méthodes de production répondant mieux à nos conditions climatiques (Latreche, 2020).

Les dernières recherches soulignent l'importance de concevoir des systèmes de cultures utilisant les principes écologiques et les services éco-systémiques pour consolider la durabilité des agro-écosystèmes (Clergue *et al.*, 2005, Moonen et Bàrberi. 2008, Wezel *et al.*, 2014). Dans cette voie la réintroduction des légumineuses dans les systèmes de cultures actuelles semble jouer un rôle important notamment lorsqu'elles sont cultivées en association avec les céréales (Drevon et Ounane. 2009).

Des recherches récentes montrent l'avantage de l'association légumineuses-céréales sur le rendement en grains et l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des ressources en P et en azote (N) par les légumineuses et les céréales en association (Devau *et al.*, 2011b; Latati *et al.*, 2019a ; Kherif *et al.*, 2021a). Ces derniers auteurs ont confirmé que la facilitation des ressources en éléments nutritifs au profit des céréales en association, est assurée *via* la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique (FSN) par les légumineuses, faisons intervenir divers mécanismes rhizosphériques définis par plusieurs processus biochimiques autour des racines (Hinsinger *et al.*, 2011).

Gong *et al.* (2020) ont rapporté que la culture intercalaire du millet-haricot combinée à la fertilisation azotée améliorerait l'efficacité photosynthétique des feuilles du millet en facilitant l'ouverture stomatique et permet une augmentation du rendement. Selon les mêmes auteurs la culture associée réduit le taux d'application d'engrais chimique et augmente la productivité des cultures. Betencourt *et al.* (2012) ont prouvé une meilleure efficacité d'utilisation du P et de N par le blé dur cultivé en association avec le pois-chiche.

Dans le but d'évaluer et estimer les performances des cultures associées en termes d'utilisation et de stockage des ressources (en particulier les nutriments C et N), une approche combinant l'analyse de données expérimentales et la modélisation quantitative des indicateurs agro-écologiques est appliquée pour relier les cycles C, P et N (Gårdenäs *et al.*, 2011; Latati *et al.*, 2020)

Notre étude propose plusieurs approches pour l'évaluation des différents systèmes de cultures céréales-légumineuse dans le temps et dans l'espace, structurée en trois chapitres :

En effet le chapitre II « **Modélisation agro écologique des transferts d'azote et de carbone entre décomposeurs de micro-organismes, de symbiotes végétaux, de sol et d'atmosphère dans un système de culture intercalaire** » ; Est une étude du système de culture intercalaire d'été (haricot-maïs), notre travail consistera en une estimation des échanges quotidiens de C et N microbiens, de la perte de C par la respiration du sol, et des flux de C et N nécessaire pour la croissance des plantes ; mais aussi des nodules et la quantité quotidienne de N fixée par les symbiotes nodulaires du haricot commun, à l'aide du modèle MOMOS, et ceci après avoir amélioré les équations de la croissance des plantes du modèle, introductions des paramètres du système et validation du modèle dans deux contextes pédoclimatiques différents.

Le chapitre III « **Comprendre la réponse de la culture associée blé-pois chiche à la fertilisation azotée à l'aide d'indices de compétitivité agro écologiques dans des conditions pédoclimatiques contrastées** » comportera l'essentiel d'une expérimentation (essai factoriel) sur l'association de culture hivernale blé dur-pois chiche afin d'évaluer cette association en termes d'avantages agronomiques par un calcul d'indices tels que le rapport d'équivalence de surface (LER) , le rapport d'équivalence temps-surface (ATER) et l'efficacité de l'utilisation des terres (LUE). Puis nous évaluerons l'efficacité de l'utilisation de l'azote par chaque système de culture afin d'identifier la dose de fertilisation optimale. Enfin nous mettrons en évidence la compétitivité entre les deux espèces intercalées en estimant les indices REI (Indice d'efficacité relative), CR (rapport de compétition) et RCC (indice de surpeuplement relatif). Cette évaluation permettra de fournir de meilleures décisions pour aider les agriculteurs à optimiser l'utilisation des terres et l'application d'azote.

Le chapitre IV « **Première calibration du modèle sol-Plante STICS sur un système de culture intercalaire à base de pois chiche en conditions méditerranéennes** » se concentrera sur l'évaluation des effets combinés des pratiques culturales, de la gestion du sol et du climat sur les indicateurs agro-environnementaux d'une association d'hiver (blé dur-pois chiche) à l'aide d'un modèle de culture. Nous avons réalisé la première calibration du modèle STICS (v 9.2) sur du pois chiche cultivé sous des niveaux d'azote contrastés (faible niveau, modéré et un niveau élevé d'apport d'azote) pendant deux saisons (2018/2019 et 2019/2020). Cette calibration nous a permis de simuler une large gamme de scénarios agronomiques (climat, fertilisation N et système de culture) pour optimiser la gestion des cultures intercalaires (blé dur-pois chiche).

## **CHAPITRE I : ETAT DE L'ART**

### **1 Généralités sur les céréales et les légumineuses**

#### **1.1 Historique de la céréaliculture**

Les céréales représentent la base de l'alimentation humaine mais également animale. Elles apportent l'énergie nécessaire au travail musculaire ainsi qu'au fonctionnement plus général de l'organisme.

Pour l'alimentation humaine les céréales constituent 45% des apports énergétiques. Il existe trois groupes de céréales majeures qui correspondent à 75% de la consommation céréalière mondiale. Un premier grand groupe de céréales est formé par le blé, l'orge, le seigle et l'avoine, ce groupe, émerge dans le croissant fertile, berceau des civilisations occidentales qui ont donc leur point de départ au Moyen Orient et au Proche Orient. Un deuxième grand groupe est formé par le maïs qui est originaire d'Amérique centrale, il est à la base des civilisations amérindiennes. Le maïs a été importé en Europe par les explorateurs du Nouveau-Monde à la fin du XVème siècle (Clerget, 2011). Un troisième grand groupe est ordonné autour du riz, qui est une plante originaire des régions chaudes et humides de l'Asie du Sud-est. Sa domestication s'est faite de façon synchrone avec la domestication du blé plus à l'Ouest. Le riz est à la base des civilisations orientales (Clerget, 2011).

#### **1.2 Importance et utilisation des céréales**

Dans le monde entier, les céréales sont le premier produit alimentaire, ainsi le monde entier dépend des céréales. En Suisse, les habitants produisent principalement du blé, alors qu'en Afrique, c'est le millet. En Asie, c'est le riz et en Amérique du Sud c'est le maïs, céréale qui vient en tête des quantités produites dans le monde devant le riz et le blé (IseliTrösch, 2019).

Les céréales, socle historique de la diète méditerranéenne, occupent encore aujourd'hui une place prépondérante à la fois dans la production agricole et agroalimentaire de l'Algérie et dans la consommation alimentaire des ménages (Rastoin et Benabderrazik, 2014).

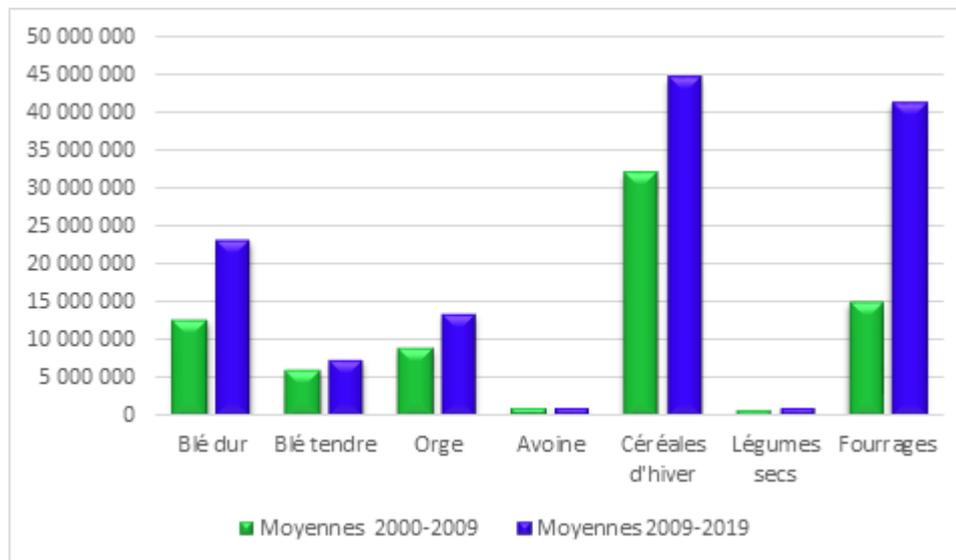
D'après (Abecassis et Vermeersch, 2006) les principaux usages des grains et graines sont les suivants :

- Alimentation animale : graines (et pailles) de céréales en plus des légumineuses, issues de mouture, tourteaux d'oléo-protéagineux ;
- Alimentation humaine : farine, pain et biscuit (blé tendre), semoule, pâte alimentaire, couscous et blé précuit (blé dur), polenta (maïs), riz blanc ou étuvé ;

- Boissons : bière (malt et orge) ;
- Huiles de table (colza, tournesol) ;
- Ingrédients alimentaires : amidonnerie et glutennerie (blé, maïs) ;
- Industries non alimentaires : biocarburants, industrie chimique (glucides, lipides).

### **1.3 Production nationale et internationale de céréales et légumineuses**

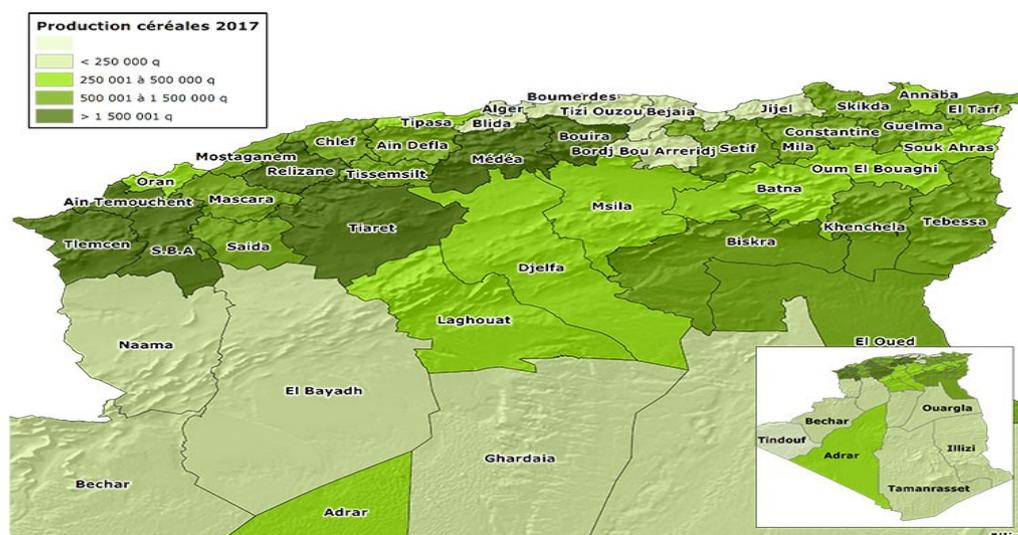
La filière céréales et dérivés constitue une des bases importantes de l'agroalimentaire en Algérie. Importance qui résulte, notamment, de la place prépondérante qu'occupent les céréales et leurs dérivés dans l'alimentation humaine, notamment la semoule et la farine, comme pour l'alimentation animale (sons et farines basses) (Kherch Medjden et Bouchafaa, 2012). En Algérie, la production des céréales présente une caractéristique fondamentale depuis l'indépendance à travers l'extrême variabilité du volume des récoltes (MADR, 2019). Cette particularité témoigne d'une maîtrise insuffisante de cette culture et de l'incidence des aléas climatiques (pluviométrie faible et irrégulière). Cette production est conduite en extensif et elle est à caractère essentiellement pluvial (Kherch Medjden et Bouchafaa, 2012). En plus d'occuper une place importante dans le système alimentaire, les produits céréaliers occupent une place stratégique dans l'économie nationale. Durant les deux périodes 2000-2009 et 2010-2019, la superficie des céréales occupe en moyenne annuelle 40% de la superficie agricole utile (SAU). La superficie ensemencée en céréales durant la décennie 2000-2009 est évaluée à 3,2 millions d'ha, desquelles, le blé dur et l'orge occupent la majeure partie de cette superficie avec 74% de la sole céréalière totale. Durant la période 2010-2019, cette superficie a atteint en moyenne 3,38 millions d'ha, en évolution de 6% par rapport à la période précédente (2000-2009).



**Figure 1 :** Evolution de la production des céréales à l'échelle nationale (MADR, 2018).

La production réalisée en céréales au cours de la période 2010-2019 est estimée à 44.6 Millions de quintaux en moyenne, soit un accroissement de 27% par rapport à la décennie 2000-2009 où la production est estimée en moyenne à 32.6 Millions de quintaux. La production est constituée essentiellement du blé dur et de l'orge, qui représente respectivement 51% et 29% de l'ensemble des productions de céréales en moyenne 2010- 2019 (Figure 1) (MADR, 2019).

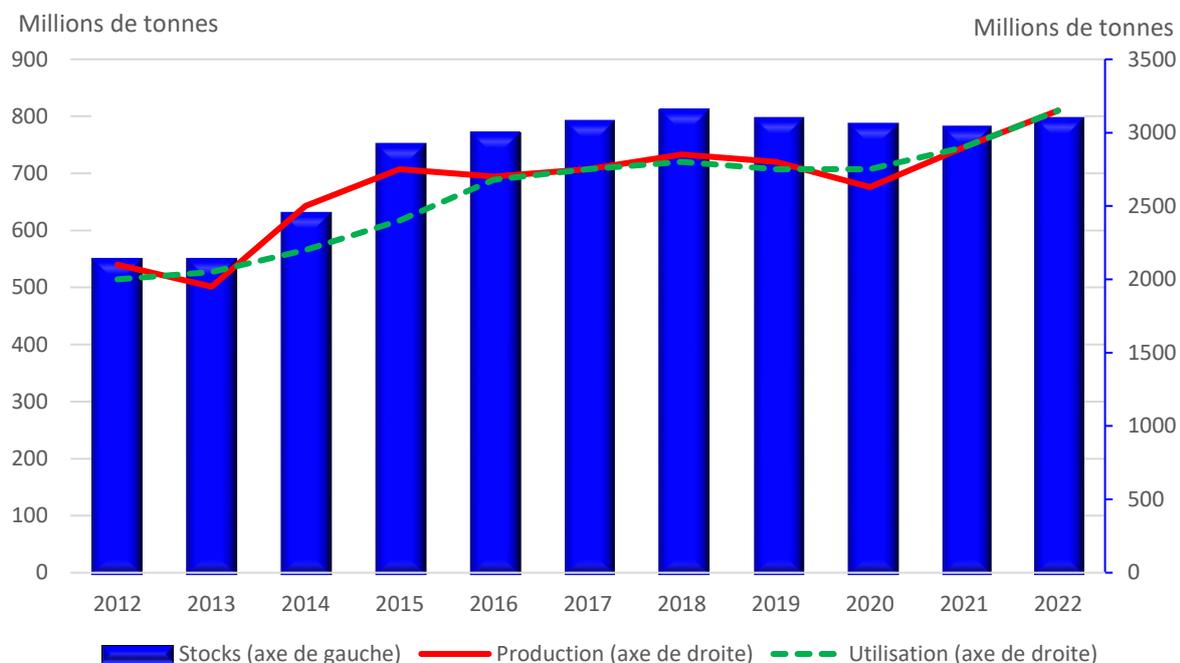
La production des céréales par zone de tout le territoire national (données statistiques 2017) est illustrée ci-dessous (Figure 2), selon le ministère de l'agriculture et du développement rural (MADR, 2019)



**Figure 2 :** Carte des zones de céréaliculture à l'échelle nationale (MADR, 2019).

Le nord de l'Algérie occupe toujours une place prépondérante en volume de production des céréales, toute fois l'investissement dans cette filiale dans les régions du sud algerien (Ghar-daïa, Adrar et el oued) pourra fortement contribuer à la hausse de cette production.

La production mondiale de céréales pour la dernière décennie (2010 - 2022) est illustrée dans la figure ci-dessous (Figure 3) (FAO, 2021).



**Figure 3 :** Evolution de production céréalière internationale (utilisation et stocks).

La production de céréales devrait atteindre le niveau record de 2 800 millions de tonnes en 2021, soit une hausse de 1,1% par rapport au résultat enregistré en 2020. Toutefois, à ce niveau, la production serait toujours inférieure aux besoins de consommation prévus pour 2021-2022, ce qui entraînerait une diminution des stocks mondiaux.

#### 1.4 Généralités sur les légumineuses

Les légumineuses, avec 19500 espèces répandues dans le monde entier (Dupont et Guignard, 2015), sont des plantes dicotylédones qui représentent la troisième famille des plantes compte tenant du nombre d'espèces après les composées (Astéracées) et les orchidées et la deuxième famille en importance économique après les Poacées (Schneider et *al.*, 2015). Une des particularités des légumineuses est de pouvoir fixer l'azote atmosphérique grâce à une symbiose avec des bactéries qui sont logées dans des nodosités fixées sur leurs racines, il s'agit des bactéries fixatrices de l'azote de l'air, du genre rhizobium, d'où leur importance économique pour leur richesse en matières azotées (Zongo et *al.*, 2021)

## **1.5 Intérêt des légumineuses**

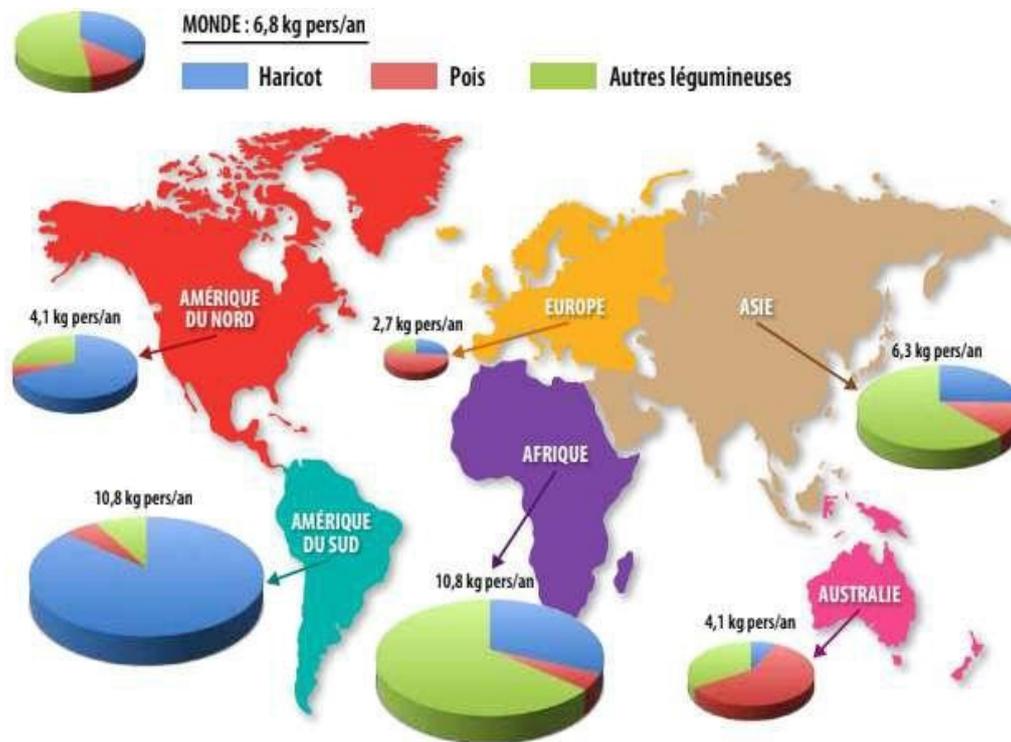
Les légumineuses alimentaires constituent une très importante source de protéines végétales qui peuvent corriger le déficit en protéines animales. En plus de leur importance dans le régime alimentaire des êtres humains, elles ont un intérêt particulier dans le concept de l'agriculture durable dans la mesure où leur introduction dans l'assolement instaure la rotation des cultures, la diversification des productions et la protection de l'environnement contre la pollution par les engrais azotés, les pesticides et les désherbants chimiques. L'introduction de ces espèces dans un système de culture est impérativement tributaire de l'amélioration de ses performances agronomiques (Benmebark *et al.*, 2013). Les légumineuses ou légumes secs, comme on les surnomme la viande du pauvre (Ait Saada *et al.*, 2016) sont des aliments qui se décomposent en trois grandes catégories: les lentilles (verte, corail, noires, etc.), les haricots (blancs, rouges, noirs, fèves, etc.) et les pois secs (pois chiches, pois cassés, etc.). Ces aliments ont des propriétés digestives en raison de leur richesse en fibres. Elles exercent également une action coupe-faim tout en étant pauvres en matières grasses et en ayant un faible index glycémique (Robert-Hoarau, 2014)

## **1.6 Utilisation des légumineuses**

La présence et l'utilisation des légumineuses dans les systèmes agricoles peuvent être des défis majeurs de la durabilité de systèmes de production agricole et de systèmes agroalimentaires, elle contribuant à la production de la matière première en quantité et qualité suffisante.

Selon Schneider *et al.* (2015) cette production assurera :

- La performance économique et la satisfaction sociale des acteurs de la production et de la transformation, répondant ainsi aux attentes des consommateurs ;
- L'efficacité énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre et des produits phytosanitaires
- Une meilleure maîtrise des pertes de phosphore et nitrates ;
- Le maintien de la biodiversité au sein des écosystèmes naturels et cultivés tout en continuant à améliorer le bilan environnemental des industries de l'aval et de la sécurité des approvisionnements. Parmi les bienfaits des légumineuses, c'est leur stockage pour une longue période sans qu'elles perdent de leur valeur nutritive, dont beaucoup de légumineuses s'adaptent à la sécheresse et aux environnements marginaux (Figure 4).



**Figure 4 :** Consommation humaine mondiale de légumineuses par habitant (FAO, 2020).

## 2 Les associations de cultures :

### 2.1 Définition et historique :

Selon Ofori et Stern, (1987), l'association est la culture simultanée de deux ou plusieurs espèces dans le même champ pendant une saison de croissance. Appelée aussi culture intercalaire ou « intercropping », l'association représente la diversité planifiée dans l'espace. Hauggaard-Nielsen et Jensen, (2005) ont considéré cette technique comme application pratique des principes écologiques de base tels que la concurrence et la facilitation. Elle peut permettre l'intensification d'un système agricole, conduisant à une augmentation de la productivité générale et de la biodiversité dans les champs intercalés par rapport aux monocultures (Vandermeer, 1989).

L'association est peut-être aussi ancienne que l'agriculture sédentaire et fait partie d'un processus de domestication des espèces (Anders *et al.*, 1995). Les activités de culture intercalaire ont toujours été identifiées dans de nombreuses régions du monde, par exemple les mélanges de céréales dans les régions tempérées (Francis *et al.*, 1975). Les associations sont particulièrement importantes et continuent d'être largement pratiquées sous les tropiques. Mais, avec l'avènement de l'agriculture moderne, elles ont commencé à disparaître de nombreux pays industrialisés. Cette tendance était motivée par la mécanisation et la spécialisation (Anders *et al.*, 1995).

## **2.2 Types d'associations de cultures :**

L'association de cultures peut inclure: des plantes annuelles avec des plantes annuelles, des plantes annuelles avec des plantes pérennes et plantes pérennes avec des plantes pérennes (Eskandari *et al.*, 2009). D'après Ofori et Stern, (1987) elle comprend quatre types :

- **Les cultures associées en rangés** : 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.
- **Les cultures associées en vrac (mixture)** : culture simultanée de deux ou plusieurs cultures sans disposition de rangs distincte. Ce type de culture peut convenir aux associations des légumineuses avec les cultures fourragères.
- **Les cultures associées en bandes** : elles consistent 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.
- **Les cultures associées en relais** : consistent à cultiver deux ou plusieurs cultures simultanément pendant une partie du cycle de vie, dont la deuxième est plantée après que la première culture a atteint son stade de reproduction mais avant qu'elle soit prête pour la récolte.

L'association des légumineuses et des céréales pourra être une réelle alternative aux systèmes actuels, que nous allons évaluer dans cette étude.

## **2.3 Les associations légumineuses-céréales :**

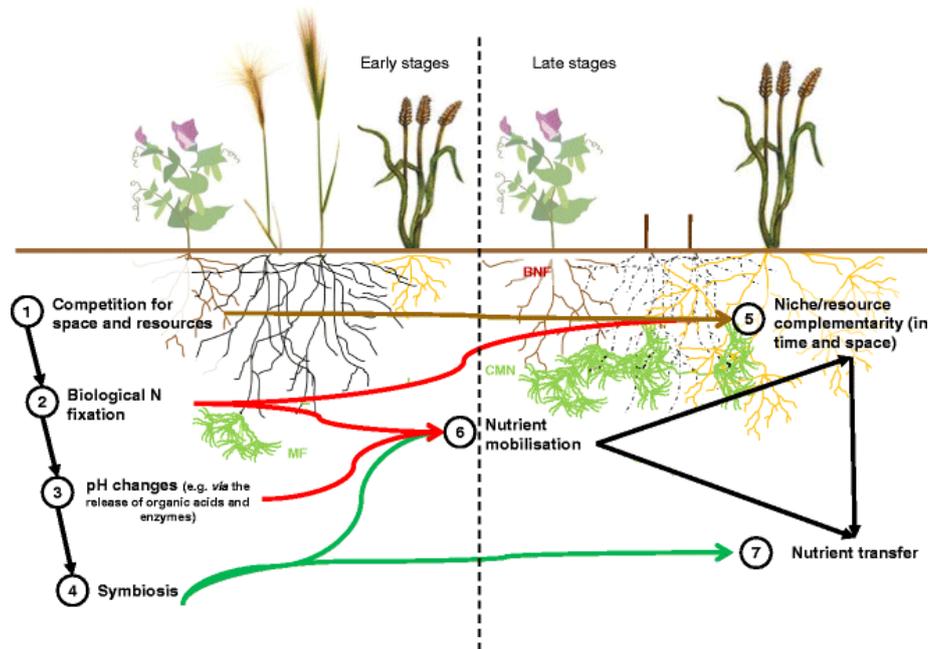
L'association de culture incluant une légumineuses est une pratique ancienne et répandue dans les systèmes à faibles intrants (Willey, 1979). C'est une méthode importante pour le développement de systèmes de production alimentaire durables (Adesogan *et al.*, 2002). Dans les systèmes d'élevage à faibles intrants et autosuffisants, les associations légumineuses- céréales sont intéressantes pour la production de fourrage grossier et de concentrés de haute qualité. En raison de l'utilisation restreinte d'engrais minéraux, ces systèmes de culture bénéficient en particulier de la fixation de l'azote par les légumineuses (Huňady et Hochman, 2014). Les rendements totaux en grains et les teneurs en azote de plantes peuvent souvent être augmentés. Les avantages de l'association par rapport à la monoculture sont souvent attribués aux effets complémentaires des cultures composantes, comme une meilleure utilisation totale des ressources disponibles (Fujita *et al.*, 1992). D'après le même au-

teur, selon les espèces associées, les avantages de rendement peuvent varier considérablement en raison de plusieurs facteurs, notamment les différences d'architecture de la plante, les schémas d'enracinement, les avantages concurrentiels et la capacité potentielle de fixation de l'azote de la légumineuse. Celles-ci déterminent à leur tour l'optimum densité de la population végétale, moment du semis et la quantité d'engrais azoté. Il est généralement admis que les combinaisons d'une légumineuse et d'une céréale sont plus courantes chez les agriculteurs des régions semi-arides (Eskandari, 2012) où l'utilisation de l'eau revêt une grande importance pour la détermination de l'utilisation des ressources, de nombreuses études qui ont rapporté une efficacité accrue de l'utilisation de l'eau dans ces associations (Anders *et al.*, 1995).

## **2.4 Avantages de l'association des cultures :**

### **2.4.1 Utilisation efficace des ressources et amélioration du rendement :**

Des efficacités dans l'utilisation des ressources deviennent effectives lorsque deux ou plusieurs cultures sont présentes dans le même champ au cours de la même période. Si les espèces composantes de l'association utilisent différemment les sources environnementales de manière à pouvoir se "compléter" dans le temps et dans l'espace, elles peuvent utiliser ces ressources plus efficacement que si elles étaient cultivées en monoculture et produire peut-être un rendement plus élevé (Willey, 1979). En termes de compétition, cela signifie que les composants ne sont pas en concurrence pour les mêmes niches écologiques et que la concurrence interspécifique est plus faible que la concurrence intraspécifique pour un facteur donné. Ces avantages ont été démontrés dans de nombreux systèmes d'association (Vandermeer, 1989). Francis et Decoteau, (1993) ont signalé que le rendement en maïs sucré était accru grâce à son association avec le pois et résultant d'une meilleure utilisation des ressources environnementales. Ils ont également noté que la concurrence entre espèces de l'association était inférieure à celle des monocultures. Wahua, (1983) a également constaté que l'absorption d'éléments nutritifs par l'association de maïs et de niébé était supérieure aux monocultures et que les composants de cette association étaient complémentaires dans l'utilisation des ressources. Une production supérieure de matière sèche dans l'association de blé et d'haricot par rapport à leur culture pure avait été signalé par Ghanbari et Lee, (2002). Une autre étude de Martin et Snaydon, (1982) a rapporté que le rendement en grains et en matière sèche dans l'association haricot/orge était supérieur à leurs monocultures. Justes *et al.*, (2021) affirme que les associations de cultures ont le potentiel d'augmenter et de stabiliser les rendements et d'améliorer la concentration en protéines des grains de céréales par rapport aux systèmes de culture traditionnels.



**Figure 5** : les différentes interactions dans le système d'association des cultures (Ehrmann, J., 2013).

#### 2.4.2 Réduction des dégâts causés par les maladies et les parasites :

Un avantage important de l'association est sa capacité à réduire les dommages causés par les parasites et les maladies (Mousavi et Eskandari, 2011). Des effets sur la dynamique de la population des ravageurs qui peuvent réduire leurs dommages aux cultures ont été observés (Perrin et Phillips, 1978). Dans une revue de Francis, (1989), l'association a réduit l'effet du ravageur dans 53% des expériences par rapport à la culture pure. Latigo-Ogenga *et al.*, (1993) ont enregistré que l'infestation de la culture du haricot par les aphidés noirs (*Aphis fabae*), est considérablement réduite lorsque le haricot est en association avec le maïs et cela grâce aux tiges longues du maïs qui ralentissent la colonisation des aphidés. En outre, Dans des recherches phénoménologiques comparant les maladies chez les monocultures et l'association, principalement dues aux champignons foliaires, l'association a réduit les maladies dans 73% dans plus de 200 études (Boudreau, 2013).

#### 2.4.3 Contrôle des mauvaises herbes :

Les modèles d'associations sont plus efficaces que la monoculture dans la suppression des mauvaises herbes (qui concurrencent les cultures principales sur l'utilisation des ressources), mais leur efficacité varie considérablement (Girjesh et Patil, 1991). Ils peuvent présenter des avantages pour la lutte contre les mauvaises herbes par rapport aux monocultures, à la fois en augmentant le rendement et en réduisant la croissance des mauvaises herbes en utilisant leurs ressources, ainsi qu'en supprimant la croissance des mauvaises herbes par des ef-

fets allélopathiques (production de substances biochimiques, influençant la survie et la reproduction) (Yih, 1983). Une réduction de la matière sèche et de la densité des mauvaises herbes a été enregistrée dans l'association blé tendre-pois chiche (Banik *et al.*, 2006). Une autre étude de Szumigalski et Van Acker, (2005) a montré une tendance à produire une suppression plus efficace des mauvaises herbes chez les associations blé-canola et blé-canola-pois par rapport aux monocultures, ce qui indique une synergie entre les cultures associées en ce qui concerne la suppression des mauvaises herbes.

L'association peut fournir d'autres services, le concept de durabilité des systèmes de culture passera évidemment par le maintien du sol (érosion) et son amélioration en termes de fertilité (richesse en élément nutritif, bonne activité biologique).

#### **2.4.4 Amélioration et conservation de la fertilité du sol :**

La conservation de la fertilité des sols dans les associations est une forme de rotation (dans l'espace) (Mousavi et Eskandari, 2011). Wang *et al.*, (2014) ont rapporté que les associations maïs / féverole, maïs / soja, maïs / pois chiche et maïs / navet ont conservé la majorité des propriétés de fertilité du sol pendant au moins trois à quatre ans, avec augmentation de taux de la matière organique sous l'association maïs / pois chiche. Ainsi, des résultats ont indiqué que l'association maïs-niébé peut augmenter les éléments nutritifs et améliorer la conservation de la fertilité du sol par rapport à la monoculture de maïs, par l'augmentation des quantités d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K) (Dahmardeh *et al.*, 2010).

#### **2.5 Inconvénients de l'association des cultures :**

L'association des cultures peut présenter certains inconvénients :

- La gestion pratique est difficile, en particulier lorsque le degré de mécanisation est élevé ou lorsque les engrais, les herbicides et les pesticides sont très accessibles.
- La récolte reste un gros problème et peut avoir un coût supplémentaire pour la séparation des grains mélangés, ce problème est résolu lorsque l'association est destinée pour le fourrage ou le pâturage (Lithourgidis *et al.*, 2011).
- Réduction du rendement et perte de productivité essentiellement dus à la concurrence (Gliessman, 1998) et besoin important de main-d'œuvre surtout dans les régions où la main-d'œuvre est rare et coûteuse (Lithourgidis *et al.*, 2011).

### **3 Cycles biochimiques de l'azote, phosphore et carbone**

Différents processus chimiques et biologique sont à l'origine de la fertilité des sols conséquence est la bio disponibilité des éléments nutritifs (N, P et C) pour les plantes. Nous allons nous intéresser aux cycles biochimiques de ces éléments et leur importance dans les systèmes étudier

#### **3.1 L'azote**

L'azote (N) se mobilise selon un cycle biogéochimique au cours duquel il se transforme entre la forme organique et la forme minérale. La plupart des transformations d'azote impliquent l'oxydation et/ou la réduction de l'atome d'azote par des processus biologiques et physicochimiques. Dans l'atmosphère, l'azote existe principalement sous la forme moléculaire ( $N_2$ ) qui correspond à 78% des gaz atmosphériques. La transformation de  $N_2$  en d'autres formes nécessite de l'énergie pour briser la liaison  $N=N$  (Jego, 2008a). 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).

##### **3.1.1 L'azote dans la plante et dans le sol**

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

- La multiplication des chloroplastes.
- 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 ;

C'est un facteur de rendement, et parfois de qualité, puisqu'il augmente la teneur en protéines des céréales en plus qu'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 : jeune, croissance, reproduction et de la mise en réserve (Soltner, 2007).

La première source d'azote dans les sols provient essentiellement de la matière organique (MO) endogène (humifiée), des résidus de récolte, des cultures intermédiaires et des produits

organiques exogènes (Jego et al, 2008b). On considère que l'azote organique représente 98% de l'azote total des sols, il varie beaucoup suivant les régions et les types de sol (Ncolardot et al., 2001). L'azote organique est un compartiment clef 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 facilement disponible pour les cultures (Schleper, 2008).

En outre, l'azote joue un rôle clef dans l'équilibre de la rhizosphère puisqu'il s'agit du nutriment le plus prélevé (près de 70% sur la totalité des cations-anions prélevés) par la plupart des espèces végétales (Raoul, 2003). Ainsi, un apport d'azote sous forme de nitrate entraînera une alcalinisation de la rhizosphère. A l'inverse, un apport sous la forme d'ammonium, entraîne une acidification.

### **3.1.2 Fixation symbiotique de l'azote atmosphérique**

La fixation biologique de l'azote est effectuée par des microorganismes soit autonomes soit en symbiose avec des plantes supérieures. C'est un processus qui permet de produire des substances protéiques à partir de l'azote gazeux présent dans l'atmosphère et l'environnement. C'est le processus de réduction enzymatique de  $N_2$  en  $NH_3$  (azote ammoniacal, ou ammoniac). Cette forme d'azote combinée représente la fin de la réaction de fixation et le début de l'incorporation de l'azote fixé dans le squelette carboné. Ce processus est comparable à celui de la photosynthèse qui permet de produire des substances glucidiques à partir du gaz carbonique ( $CO_2$ ) de l'atmosphère (Bergersen, 1966).

L'interaction Rhizobium-Légumineuse est caractérisée par la spécificité avec laquelle elle s'établit. En général, chaque légumineuse ne peut être infectée que par un nombre restreint de souches de *Rhizobia* et réciproquement, chaque souche de *Rhizobia* ne peut infecter qu'un nombre limité de genres de légumineuses (Tatiana, 2008).

Cette interaction entraîne la formation de structures particulières appelées nodosités ou nodules au niveau des racines, aux seins desquels les bactéries fixent l'azote. Selon Downie (2005), le complexe enzymatique d'origine bactérienne appelé nitrogénase, catalyse le processus de la fixation (réduction de  $N_2$  sous forme ammoniacale) comme représenté dans la figure 6.

### 3.1.3 Processus de transfert et d'assimilation de l'azote

#### 3.1.3.1 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 microorganismes comprennent une grande diversité d'espèces (bactéries, d'actinomycètes ou de champignons) de sorte que l'ammonification est un processus sans exigence écologique particulière quelles que soient les conditions de l'environnement (Dommergues, 1968).

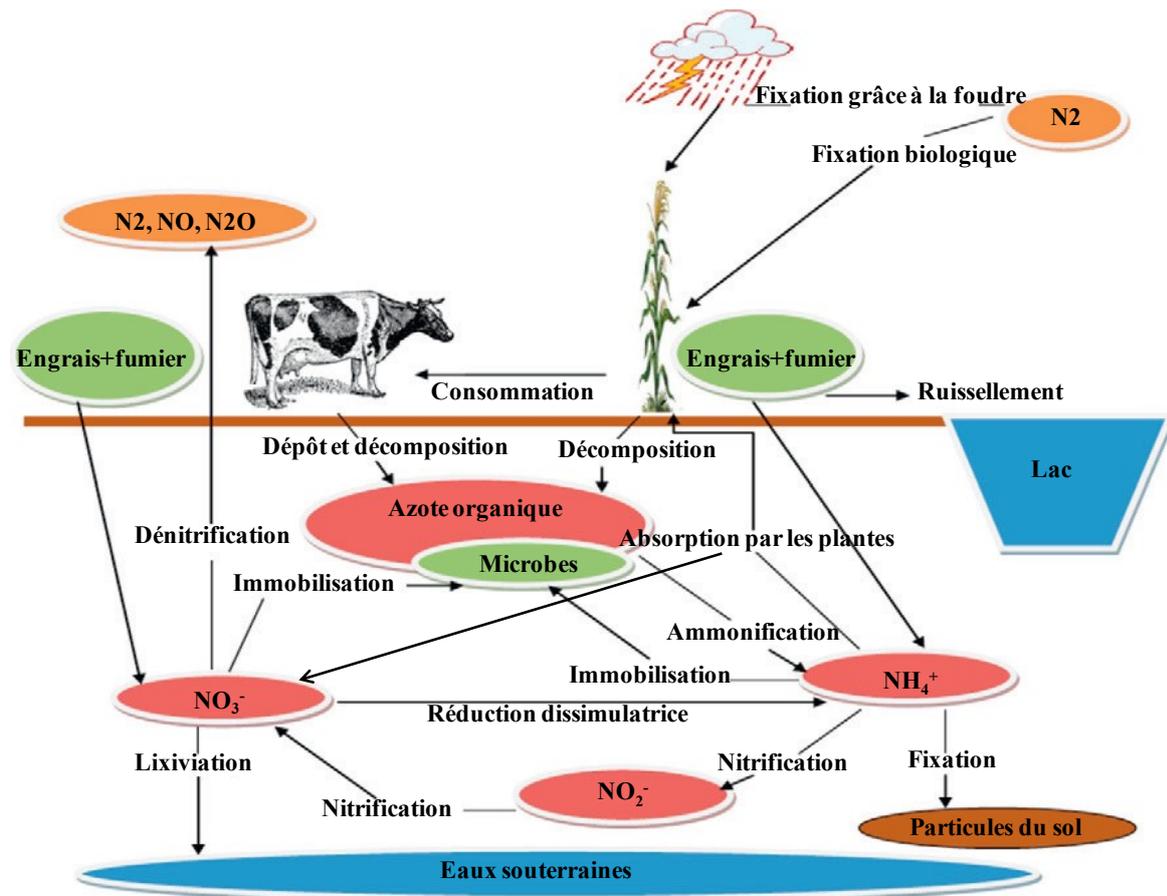


Figure 6 : Schéma du cycle de N dans le sol (Luce *et al.*, 2011)

#### 3.1.3.2 La nitrification

La nitrification est un ensemble de réactions microbiologiques complexes de nature autotrophe ou hétérotrophe qui consistent en l'oxydation de l'ammoniac en azote nitreux (nitration ou nitrosation) et dans son oxydation ultérieure en azote nitrique (nitration).

#### 3.1.3.3 La dénitrification

La dénitrification représente les processus par lesquels les nitrates et à moindre taux les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) sont réduits à l'état de produits gazeux (Figure 6), ainsi perdus pour le sol

(Dommergues, 1968). Les conditions d'humidité élevée favorisent cette réduction. Le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) est émis en général en même temps que N<sub>2</sub> en proportion très variables (Firestone et Davidson, 1989). Deux autres types de processus de réduction des nitrates et qui sont évidemment les processus de dénitrification aboutissant effectivement à la perte d'azote, qui présentent le plus d'enjeux agronomiques :

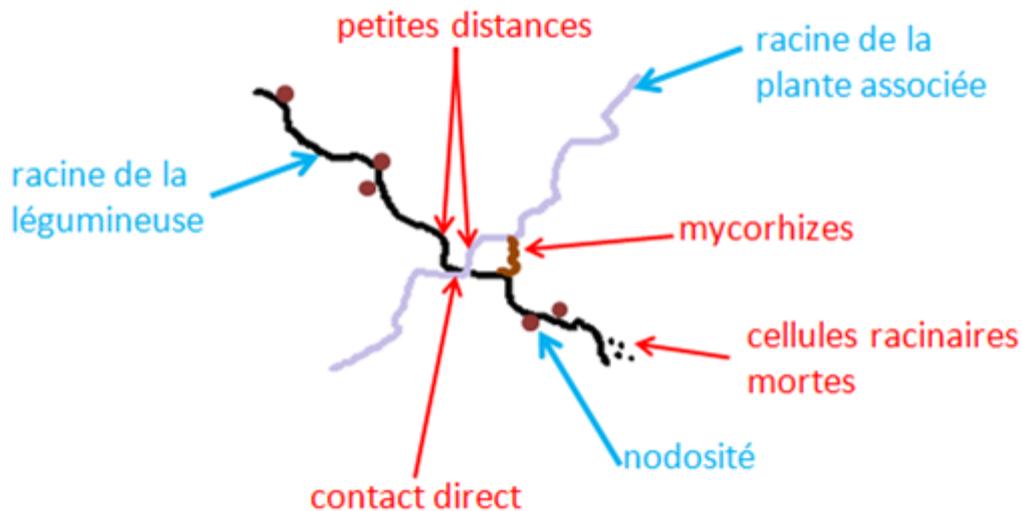
- La réduction dissimilatrice qui conduit à la formation de nitrites ;
- La réduction assimilatrice qui conduit à la formation d'ammonium, composé qui entre dans la constitution des protéines et autres constituants azotés des organismes vivants.

#### ***3.1.3.4 Effet de l'association légumineuses-céréales sur la biodisponibilité d'azote :***

La combinaison de céréales et de légumineuses offre une possibilité particulière de développer une agriculture durable et économe en énergie, en raison de la capacité de fixation de l'azote et de la fourniture de protéines sous forme de grain ou de fourrage (Lithourgidis et *al.*, 2011). Lorsque l'engrais azoté est limité, la fixation biologique de l'azote est la principale source d'azote dans les systèmes de culture mixte légumineuses-céréales. Le transfert d'azote à la céréale augmente le rendement du système de culture et l'efficacité d'utilisation de l'azote (Fujita et *al.*, 1992). La céréale peut bénéficier d'un accès à une plus grande proportion d'azote inorganique du sol lorsqu'elle est associée à une légumineuse, ainsi son acquisition d'azote et la teneur en protéines dans ses grains peut augmenter significativement (Bedoussac et Justes, 2010). En parallèle, plusieurs études ont rapporté une fixation accrue de N<sub>2</sub> par les légumineuses en association, conséquence de la compétition avec la céréale (Jensen, 1996; Li et *al.*, 2009; Naudin et *al.*, 2010).

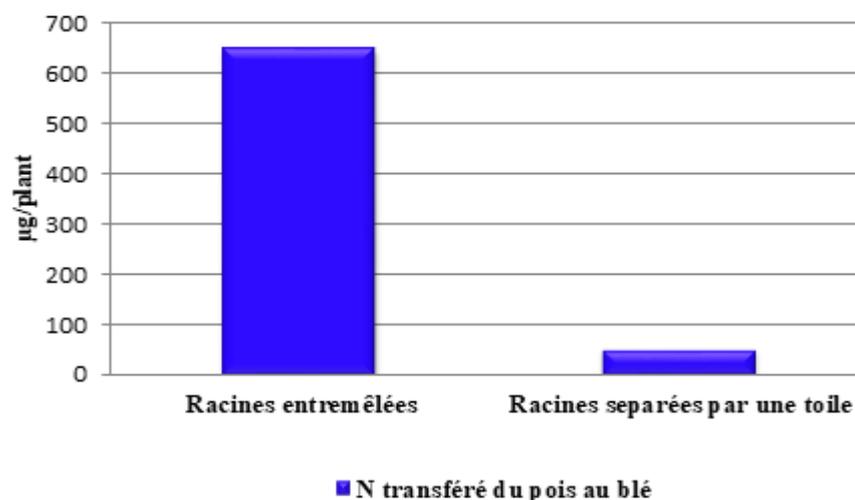
#### ***3.1.3.5 Mécanismes de transfert de l'azote entre légumineuses et céréales***

Une quantité importante d'azote fixé par la légumineuse est transférée à la céréale durant le cycle de l'association légumineuses-céréales. En effet, les légumineuses apportent au sol des composés organiques riches en azote tout au long de leur cycle par leurs racines. On peut supposer qu'une partie de cet azote peut être transférée à la céréale après minéralisation par les microorganismes du sol (Figure 7) (Bedoussac, 2012).



**Figure 7 :** Schéma de transfert de l'Azote (N) entre légumineuses et céréales (Sierra J et al., 2019).

L'enchevêtrement des racines est nécessaire pour favoriser les transferts d'azote entre la légumineuse et la céréale. En effet, les transferts sont négligeables lorsque les racines sont séparées par une toile ne les laissant pas passer. Donc, l'exemple de l'association pois-blé dur demarque une forte corrélation entre la quantité d'azote contenu dans les racines du pois et la quantité d'azote transféré au blé dur (Figure 8).



**Figure 8 :** Quantité d'azote transféré du pois au blé (Fustec, 2012)

Au cours de la culture, les transferts du pois au blé dur s'amplifient du stade végétatif à la fin de la floraison du pois, puis se stabilisent jusqu'à maturité de la légumineuse.

### **3.1.4 Rôle des associations dans la fertilisation biologique**

Le rôle des associations céréales-légumineuses, est de piéger le nitrate pour permettre d'augmenter le rendement et la teneur en protéines de la céréale lors des années pluvieuses. Lors de l'association blé-légumineuse, le rendement du blé est réduit mais la teneur en protéines est significativement augmentée et le rendement mixte (blé + légumineuse) est plus élevé que son équivalent en monoculture. Ainsi, les cultures associées sont plus efficaces pour utiliser les ressources azotées. Il reste cependant à optimiser les itinéraires techniques de ces systèmes de culture et déterminer la place des associations au sein des rotations et analyser leur effet pour la gestion des bio-agresseurs (Justes et *al.*, 2009).

## **3.2 Le phosphore**

Le phosphore est l'un des éléments essentiels au bon fonctionnement du métabolisme végétale et animale Le phosphore (P) est le 11<sup>ème</sup> élément le plus abondant sur Terre et il entre dans la composition de toutes les cellules des organismes vivants (Zapata et Roy, 2004). Dans l'environnement, le phosphore est présent sous différentes formes. On distingue les formes dissoutes des formes particulières.

### **3.2.1 Le phosphore dans la plante**

La matière sèche végétale renferme environ 1 % de phosphore. Il est réparti entre les voies métaboliques (cytoplasme et les chloroplastes) et non métabolique sous forme inorganique au sein des vacuoles (Etchebest, 2000). Ses rôles métaboliques sont :

- Structurel, entrant dans la constitution de phospholipides et acides nucléiques.
- Régulateur des voies métaboliques par sa répartition entre chloroplaste et cytoplasme ;
- Energétique (ATP) ;

Ainsi, le phosphore joue un rôle primordial dans la floraison et la formation des graines, la maturation, stimule la croissance des racines et améliore la fixation N<sub>2</sub> chez les légumineuses.

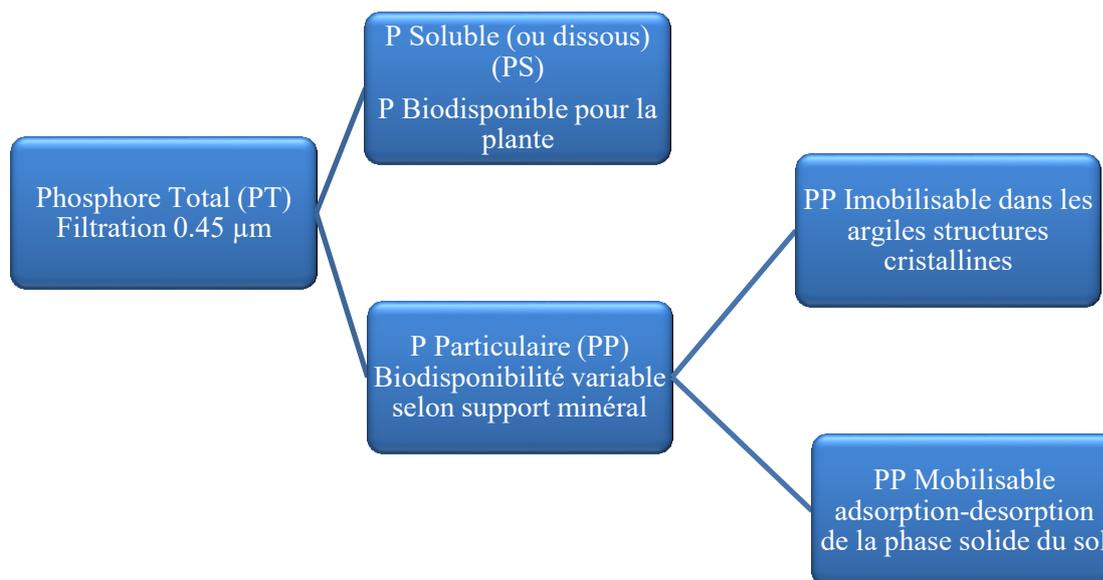
Une déficience en P cause un retard de croissance, qui se manifeste souvent par une couleur vert foncé (concentration plus élevée en chlorophylle) et une coloration rougeâtre (augmentation de la production d'anthocyanes) (Zapata et Roy, 2004).

### 3.2.2 Sources et formes des matières phosphorées

Le phosphore dissous (ou soluble) est présent dans l'eau et la solution du sol sous forme minérale ou organique (Lemerrier, 2003) :

- Formes minérales : ions orthophosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) libres ou associés à de la matière organique ou non sous forme de colloïdes, les différents anions de l'acide phosphorique  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$  et les polyphosphates ;
- Formes organiques : trioses phosphates, acides nucléiques, phospholipides, acides phosphoriques de sucre et leurs formes dégradées.

D'après, Tate (1984) le phosphore particulaire (Figure 9) regroupe toutes les formes de phosphore liées aux minéraux, à des débris divers ou incorporées dans les organismes. Les phytines ou phytates (inositols polyphosphates) constituent la principale forme de phosphore organique particulaire dans les sols. Le phosphore microbien représenterait 2 à 24% du phosphore organique du sol (Lefebvre S., 2003).



**Figure 9.** Schéma représentatif des formes du phosphore (Lefebvre S., 2003).

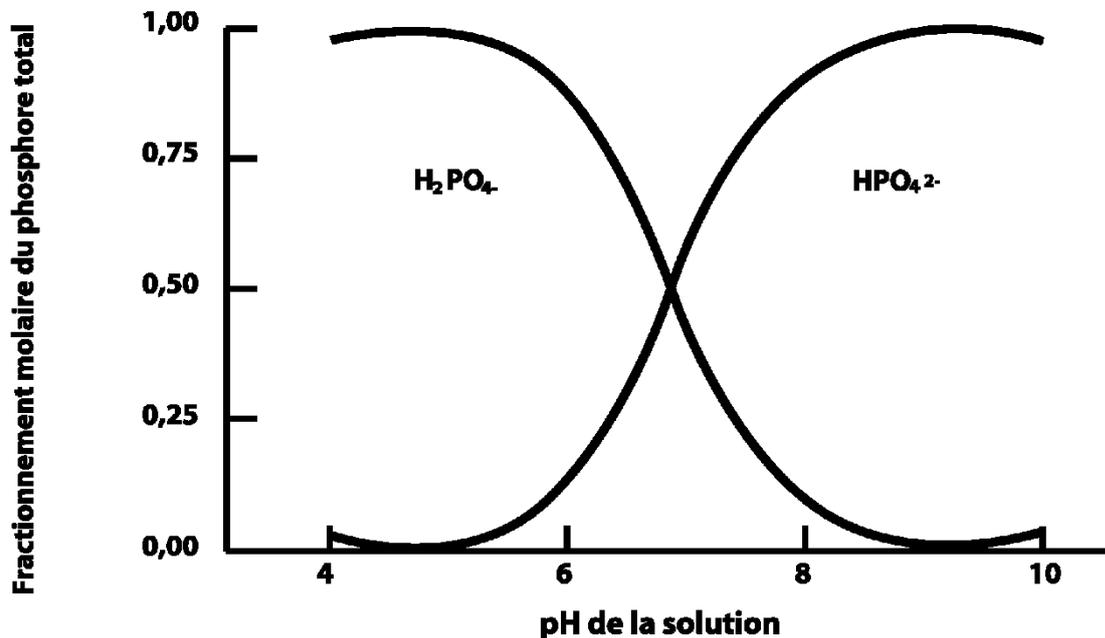
### 3.2.3 Facteurs influençant la disponibilité du phosphore dans le sol

#### 3.2.3.1 Effet du pH du sol

L'utilisation du phosphore par les plantes est déterminée par les formes ioniques de cet élément. Cette forme est déterminée par le pH de la solution dans laquelle l'ion est fondu.

Le phosphore est soit sous forme d'anion ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) ou ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), tous deux facilement disponibles dans la solution du sol pour la nutrition de la plante (Hountin, 1996). Pour un pH du

sol inférieur à 6,8 la forme de phosphore qui domine est le mono phosphate, l'anion monovalent ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) est une forme facilement absorbée par les racines des plantes. Pour un pH entre 6,8 et 7,2 la forme prédominante est le  $\text{HPO}_4^{2-}$ , forme d'ion phosphorique faiblement assimilable par la plante (Hopkins, 2003) (Figure 10).



**Figure 10.** Effet du pH de la solution du sol sur les formes solubles du phosphore (Barber, 1995)

La disponibilité du phosphore pour les plantes est maximale à un pH proche de la neutralité (Figure 9) ; tout changement de pH, dans les deux sens, provoque sa diminution (Storia et *al.*, 2013). Le calcaire dans le sol influe sur son pH qui influe à son tour sur l'assimilation du phosphore. Dans le même contexte, Comifer (2002) indique que les réactions réduisant la disponibilité du phosphore se produisent à toutes les valeurs de pH mais sont plus prononcées à  $\text{pH} > 7,3$  et dans les sols acides ayant un  $\text{pH} < 5,5$  ; d'où la faible réponse des cultures aux engrais phosphatés dans les sols acides et calcaires (Storia et *al.*, 2013).

### 3.2.3.2 Effet du calcaire

Dans les sols calcaires, riches en  $\text{Ca}^{2+}$ , la forme dominante du phosphore est celle du Ca-P (phosphate lié au calcium) (Zheng et *al.*, 2003 ; Samadi, 2006), caractérisée par une faible labilité (Gachon et Triboi, 1988).

Aslam et *al.* (2000) montre que le maximum de phosphore est fixé par le sol qui présente une teneur de  $\text{CaCO}_3$  libre maximale. Naseri et *al.* (2010), indique que la carence en phosphore est très répandue dans les sols calcaires ; et c'est le principal facteur limitant des rendements des cultures annuelles dans les sols acides et alcalins (Fageria, 2001).

### **3.2.3.3 Effet de la texture du sol**

La disponibilité du phosphore dépend du pouvoir fixateur des sols, lié à la nature et à la finesse des constituants du sol (Pellerin et *al.*, 2006). La teneur en phosphore d'un sol croît avec la finesse de la texture, l'argile en contient plus que le sable (Bayens, 1967). Par conséquent, le phosphore est moins soluble dans les sols argileux que dans les sols sableux. Des corrélations entre l'adsorption du phosphore et le taux d'argile ont été observées (Soon, 1991 ; Sanyal et *al.*, 1993). Selon Badraoui et *al.* (1997), le type d'argile influe aussi. La kaolinite et les oxydes de fer et d'aluminium retiennent beaucoup plus de phosphore que les argiles de type 2/1 (montmorillonite).

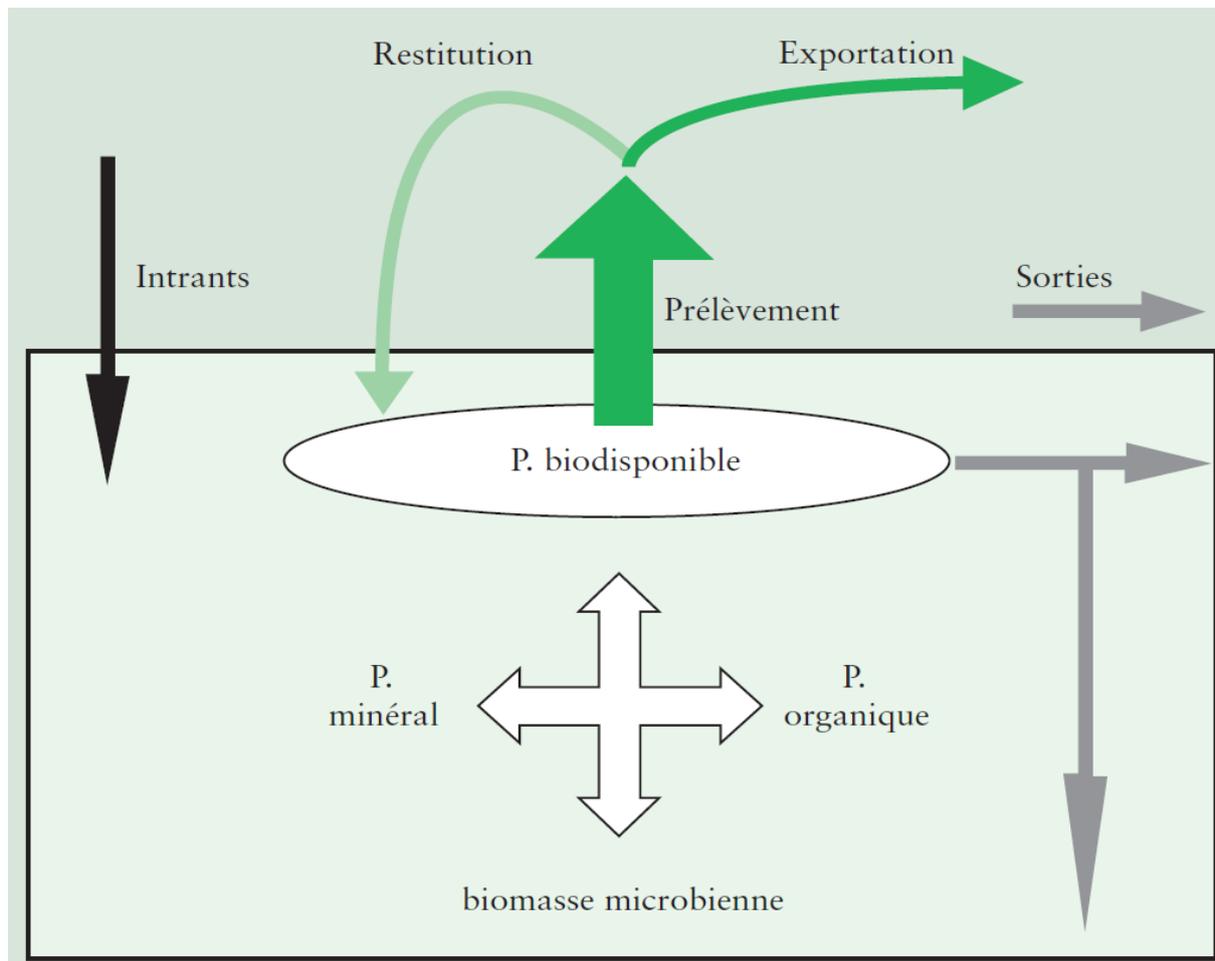
### **3.2.3.4 Effet de la matière organique**

La matière organique constitue une source appréciable d'ions phosphoriques pour la plante. D'après Triboi (1988), elle représente une réserve de phosphates adsorbés sur les sites humiques.

L'absorption et la disponibilité du phosphore dans le sol dépendent de plusieurs facteurs tels le pourcentage de la matière organique, la biologie du sol (Ghazanshahi et Jaouich., 2001). La prépondérance de la minéralisation de P par rapport à sa mobilisation dépend de la proportion C/P du sol :

- C/P < 200 : minéralisation nette, d'où libération de phosphore organique,
- C/P = 200 à 300 : absence de gain et perte de phosphore inorganique disponible pour la plante,
- C/P > 300 : immobilisation nette.

L'apport de substances organiques se révèle bénéfique dans la mobilisation du phosphore du sol (Dutil, 1976 ; Triboi, 1988). Selon Gervy (1970), les acides organiques tels que les citrates, les oxalates et les lactates, issus de la décomposition de la matière organique dissolvent les phosphates de fer, d'aluminium et de calcium. Fardeau (1993) indique dans le même contexte que les quantités de phosphates fixés par la plante diminuent lorsque le contenu en matière organique croît. Donc la disponibilité phosphorique est d'autant meilleure que les sols sont mieux pourvus en matière organique, ce qui laisse supposer que l'adsorption ou les liaisons au niveau des composés humiques constituent une possibilité de mise en réserve non négligeable (Dutil, 1976).



**Figure 11** : Schéma du cycle simplifié de P dans un écosystème cultivé présentant les flux possibles entre les différents réservoirs de P (Morel *et al.*, 2006). Les flèches en gris signalent les flux de sorties de P vers l'environnement par érosion, ruissellement, écoulement hypodermique et migration en profondeur

### 3.2.3.5 Effet du type d'engrais

Seulement 10 à 20 % du phosphore des engrais apportés annuellement sont utilisés par les cultures (Gahoonia *et al.*, 1992). L'ajout de nutriments dans des formes efficacement utilisées par les plantes peut favoriser la croissance des plantes et augmenter la production agricole, par conséquent, les quantités d'engrais et les risques environnementaux seront réduits (Elgharbaly *et al.*, 2010).

Les différentes sources d'azote contribuent dans le changement de pH du sol au niveau de la rhizosphère. Gahoonia *et al.* (1992) indiquent que l'apport d'azote sous forme  $\text{NH}_4\text{-N}$  favorise la solubilisation du phosphore par rapport au  $\text{NO}_3\text{-N}$ .

### **3.2.3.6 Effet des micro-organismes sur la solubilisation du phosphore**

Les communautés microbiennes de la rhizosphère occupent un rôle important dans la croissance et le développement des plantes. Les bactéries solubilisatrices de phosphore (PSB) sont un maillon important du cycle biogéochimique de P, en effet grâce à l'acidification, la chélation, les réactions d'échange et la formation de polymères le phosphore passe vers des formes solubles (Khan *et al.*, 2010).

Les rhizobia est un exemple de bactéries solubilisatrices capable de former une symbiose avec les légumineuses, elles facilite la croissance des plantes en synthétisant des régulateurs de croissance tout en solubilisant la fraction insoluble du phosphore (Zaidi *et al.*, 2003). En outre, l'inoculation du sol avec ces bactéries devrait être considérée non seulement pour leur potentiel de fixation du N<sub>2</sub>, mais aussi pour leur capacité à solubiliser le P (Zaidi *et al.*, 2009).

## **3.2.4 Facteurs influençant les prélèvements du phosphore par la plante**

### **3.2.4.1 Effet de l'état hydrique du sol**

La disponibilité du phosphore est affectée par l'eau du sol (Rahim *et al.*, 2007). Une certaine humidité est toujours nécessaire pour l'absorption des ions phosphatés par les plantes, car la sécheresse affecte négativement la solubilité des phosphates. Elle est également nécessaire pour le processus de diffusion, un moyen important de transport du phosphore de la solution jusqu'à la surface racinaire (Barker et Pilbeam, 2007).

En effet, le maintien du sol à une capacité de rétention entre 75 % et 80 %, influence significativement le rendement en biomasse et les prélèvements du phosphore par les plants de blé (Gutiérrez et Thomas., 1998).

### **3.2.4.2 Température du sol**

Une forte libération du phosphore est corrélée aux températures élevée, elle accélère la minéralisation de la matière organique.

Blanchet (1959) indique que la température a un effet sur les réactions chimiques concernant le phosphore dans la solution du sol. Elle affecte les réactions qui régissent la dissolution, l'adsorption et la diffusion du phosphore (Barker et Pilbeam, 2007).

### **3.2.4.3 Effet de la morphologie et exsudats racinaire**

Les racines fines et ramifiées des graminées présentant de nombreux poils absorbants ils sont capables de prélever le P plus rapidement que les racines moins fines et plus courtes des légumineuses (Evans, 1977). Otani et *al.* (1996) ont trouvé qu'en conditions de disponibilité du phosphore non limitées, les prélèvements du phosphore par différentes espèces végétales sont corrélés à la longueur des racines.

D'autre part, les plantes absorbent la plupart des nutriments minéraux à travers la rhizosphère, où les micro-organismes interagissent avec les exsudats racinaires des végétaux. Selon Djadjaglo et Richter (2008), cette mobilisation est décrite comme une augmentation de prélèvement des éléments nutritifs à la suite des modifications des paramètres chimiques dans les rhizosphères provoquées par les sécrétions des racines ou des microorganismes.

Les exsudats racinaires sont constitués d'un mélange complexe d'acides organiques, de glucides, de vitamines, d'acides aminés (composés utilisés comme aliments par les microorganismes du sol), d'ions inorganiques ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}^+$ ), de molécules gazeuses ( $\text{CO}_2$ ) et d'enzymes qui ont des effets importants sur l'acquisition des éléments minéraux nécessaires à la croissance de la plante (Dakora et Philips, 2002).

Les acides organiques des exsudats racinaires peuvent solubiliser le phosphore lié au calcium, fer et l'aluminium dans le sol (Zhang et *al.*, 1997 ; Lopez-Bucio et *al.*, 2000 ; Dakora et Philips, 2002

Araújo et *al.* (2008) indiquent que l'activité des phosphatases et phytases augmente lorsque les plants de haricot (*Phaseolus vulgaris*) sont placés dans des conditions de déficience en phosphore.

Les éléments nutritif sont dans un système et toujours en interaction, les différents proportions de ces éléments influe souvent leurs disponibilités.

### **3.2.4.4 Interaction phosphore, azote et potassium :**

L'interaction entre les éléments nutritifs chez les plantes cultivées se produit lorsque l'alimentation de l'un des éléments affecte l'absorption et l'utilisation d'autres éléments (Fagerria, 2001). L'apport d'azote sous forme d'ion ammonium augmente l'absorption du phosphore (Griffith., 2006). L'application du potassium à des doses optimales contribue également à l'absorption d'azote et du phosphore chez différentes variétés de blé (Laghari et *al.*, 2010). Une sous-alimentation en phosphore peut induire une mauvaise valorisation de

l'azote et du potassium (Soins et Vaysse, 1999). En conséquent il faudrait raisonner les applications NPK et veiller à leurs équilibres.

### **3.2.5 Pertes de phosphore**

Deux phénomènes pourront causer des pertes de phosphore au sein des agro-systèmes : le lessivage et l'érosion (Fardeau, 1993).

Ses phénomènes ne sont significatifs que dans les cas où les apports d'engrais phosphaté sont supérieurs aux exportations des cultures et où le pouvoir fixateur du sol est limité (Fardeau, 1993).

### **3.2.6 Conséquence de la déficience en phosphore sur la plante**

La plante développe des mécanismes morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires fortement spécialisés pour acquérir et utiliser le P de l'environnement dans les cas d'un bas niveau de phosphore du sol, l'augmentation de la disponibilité de P dans la rhizosphère, ainsi que son prélèvement par la plante sont la conséquences de ces mécanisme (Raghothama, 1999).

#### ***3.2.6.1 Modification morphologique***

D'après Raghothama, (1999) en conditions de carence en phosphate, les modifications morphologiques suivantes permettront à la plante de s'adapter à ces conditions :

- Augmentation du rapport partie souterraine-partie aérienne ;
- Changements de la morphologie et de l'architecture des racines avec une augmentation de nombre des poils racinaires et leurs élongations ;
- Formation des protéides racinaires.

#### ***3.2.6.2 Modification physiologique***

Différentes modification sur le plant physiologique

##### ***a- Influence sur la croissance du système racinaire et aérien***

Des travaux montrent que la déficience en P entraîne une diminution du rapport parties aérienne /racinaire chez le haricot (Bernal *et al.*, 2005; Alkama, 2010). Aussi Tang *et al.*, (2001) confirme que la carence prolongée en P des racines induit la formation de radicaux libres et la modification de la composition de la membrane cytoplasmique en phospholipides.

***b- Influence sur les nodosités***

Il est maintenant bien établi que la biomasse nodulaire est fortement corrélée à la disponibilité en P de la plante (Alkama, 2010). La carence en P diminue le nombre de nodosités par plante (Mullen *et al.*, 1988).

Dans le cas des légumineuses, environ 20% du P total de la plante est assigné aux nodules (Gunawardena *et al.*, 1992).

La disponibilité du P dans le sol et sa mobilisation par les légumineuses ont un effet direct sur leur capacité à fixer l'azote atmosphérique (Raghothama *et al.*, 1998).

Plusieurs travaux indiquent que l'application de P augmente le contenu en azote dans les graines de légumineuses comme la luzerne et le soja (Drevon et Hartwing, 1997). Il se trouve que l'activité de la nitrogénase varie selon la concentration en P, elle augmente de 10 à 20 fois dans les nodules des plantes cultivées en comparaison avec celle des plantes cultivées sans apport de P.

***c- Modification biochimique***

Les changements dans les processus biochimiques qui se produisent dans les cellules végétales sous déficience en phosphore ont été étudiés (Plaxton, 1996).

Les niveaux d'ATP et de l'ensemble des nucléotides sont considérablement réduits sous stress phosphaté. (Duff *et al.*, 1994). Une limitation du P a également comme conséquence l'activation d'une voie respiratoire alternative provoquant ainsi une diminution du taux de la photosynthèse et de la conductivité stomatique. (Hinsinger *et al.*, 2001).

***d- Modification Moléculaire***

L'accumulation différentielle des protéines sous la déficience en P est indicative des changements étendus de l'expression de gènes et/ou la synthèse des protéines (Carswell *et al.*, 1997).

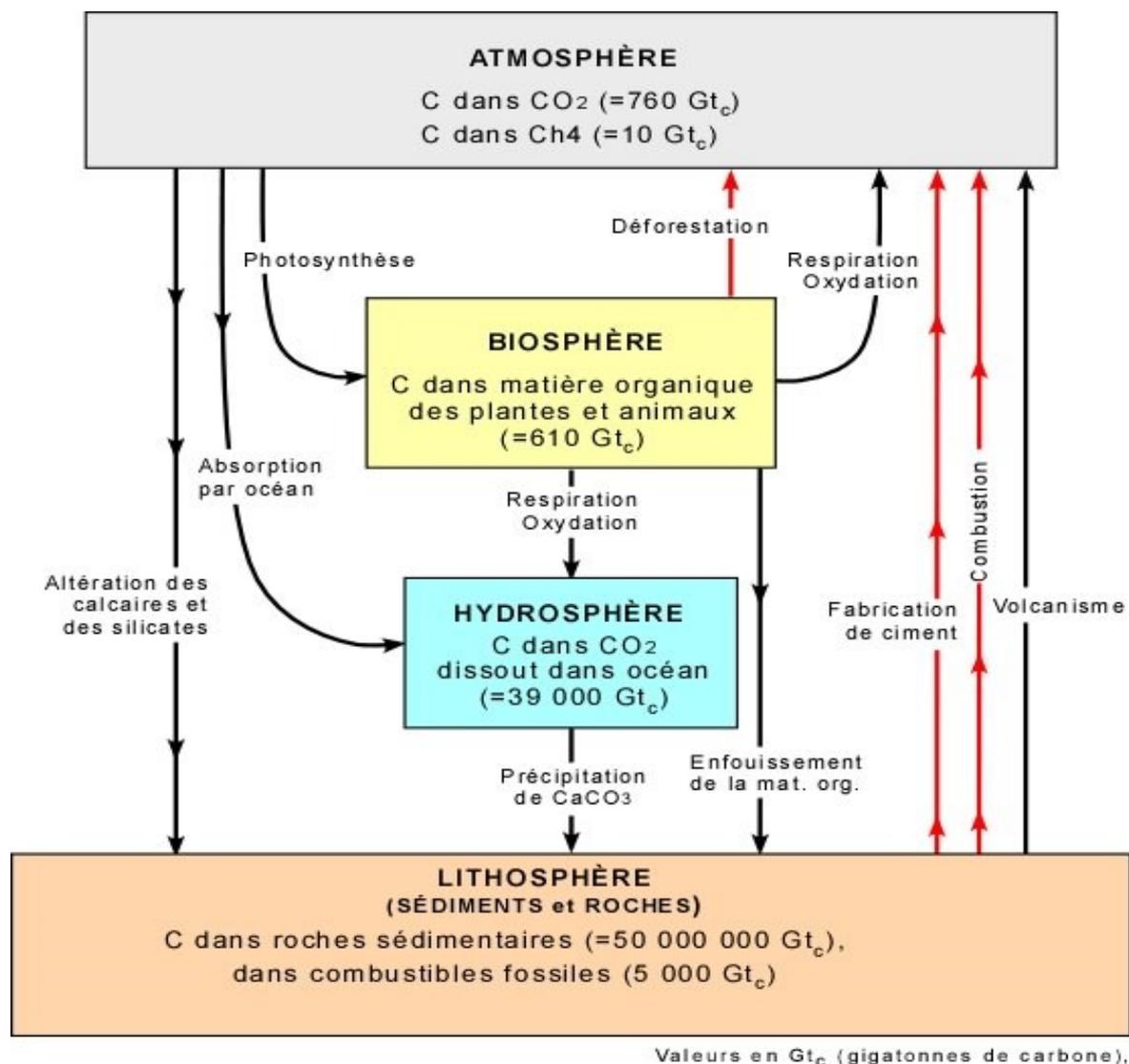
Ainsi, à titre d'exemple la synthèse de plusieurs types de protéines, y compris RNases, phosphatases augmente sous la déficience en P (Hawkesford et Belcher, 1991).

Plusieurs gènes sont impliqués dans l'adaptation des plantes à la déficience en P. Une parties de ces gènes peuvent avoir des rôles spécifiques en permettant aux plantes d'acquérir et d'utiliser le P efficacement, tandis que d'autres peuvent être impliqués dans la régulation de l'expression des gènes induits par la déficience en P (Bariola *et al.*, 1994).

### 3.3 Carbone

Le cycle global du carbone (C) (Figure 12) est un des cycles important, par son impact direct sur plusieurs systèmes physiques et biologiques ainsi que la variation globale des différents gradients de températures. En effet le réchauffement planétaire est lié à la hausse des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, Il s'est accru considérablement au cours des dernières décennies (Denman *et al.*, 2007). Et sa séquestration dans les plantes et les micro-organismes du sol est considéré comme un phénomène majeur contre le réchauffement climatique (Latati *et al.*, 2019a)

Le C se retrouve sous différentes formes minérales ou organique dans l'ensemble de notre environnement. On distingue quatre réservoirs de C : l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère, la lithosphère. La biosphère terrestre est formée par différents compartiments, la végétation et l'épaisseur de sol impliquée dans le cycle global du C.



**Figure 12 :** Cycle du carbone dans le système sol-plante-atmosphère-hydrosphère (berner *et al.*, 1996, kump *et al.*, 1999)

### **3.3.1 C dans le végétale**

Les végétaux sont des photoautotrophe (élabore leur propre matière organique en utilisant la lumière comme source d'énergie et le CO<sub>2</sub> comme source de carbone), La quantité de C assimilée grâce à la photosynthèse est la productivité primaire brute (PPB). 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) qui est la quantité d'énergie accumulée dans la biomasse de la plante (croissance et reproduction) (Renaudat, 2005). Grace aux microorganismes la matière végétale morte se décompose dans le sol.

### **3.3.2 Le C dans le sol**

Le 2/3 du C terrestre est un carbone organique du sol (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 et augmenter le rendement (Diels *et al.*, 2004). Les stocks de carbone sont affecté par l'action des techniques de gestion des sols, en effet, la réduction du travail du sol contribue à la séquestration du C dans le complexe organique grâce aux résidus végétaux laissés sur le sol (van Groenigen *et al.*, 2011).

### **3.3.3 Matière organique du sol**

La matière organique (MO) est la principale source d'alimentation et d'énergie pour les organismes vivant du sol. Elle est formée principalement par la décomposition de la matière fraîche des végétaux et des microorganismes. (Gardiner et Miller., 2004). 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 reste un indicateur de la qualité des sols, pour le secteur agricole et pour des fonctions environnementales (séquestration du carbone et la qualité de l'air). Plusieurs facteurs influent la qualité de la MO tel que le pH du sol, l'humidité, la température, la texture et spécialement l'activité des microorganismes (Samahadthai *et al.*, 2010).

### **3.3.4 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). Malgré un taux faible de la BM (C microbien de 0,05 à 5 % de C total), celle-ci est caractérisée par un turnover rapide en comparaison avec les autres constituants de la MO, la BM renseigne sur le fonctionnement biologique du sol et répond rapidement aux changements des pratiques culturales (Pendall et King, 2007).

### **3.3.5 Respiration du sol**

La « respiration du sol » est la somme des respirations autotrophes (racines) et hétérotrophes (microorganismes de la rhizosphère, du sol et des autres groupes minéralisateurs du sol tels que la macro et la méso-faune du sol) (Raich et Schlesinger, 1992). Dans le système complexe sol-plante-atmosphère, la respiration est sous deux formes :

- *La photorespiration* ou respiration à la lumière, 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 (Maisongrande, 1996).

### **3.3.6 Mécanisme du stockage du C dans le système complexe sol-plante-microorganismes**

Le carbone organique alimente le sol *via* la litière et les racines des plantes. Des émissions de C du sol sous forme de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère sont dues essentiellement à 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. La quantification de ces émissions reste assez peu documentée. Elles sont surtout très variables dans le temps et l'espace (Beyer, 1991).

Selon Ayanaba et Jenkinson (1990) les apports de C extérieur au compartiment du sol sont vite minéralisés. L'action physique des racines vivantes et des microorganismes de la rhizosphère ainsi qu'un effet chimique (production de métabolites secondaires aux propriétés agrégeantes), ont un effet de stockage dans le compartiment (Jastrow *et al.*, 1998)

Les propriétés physiques du sol influenceront le stockage du carbone. La porosité fine des sols argileux influe positivement le stock de C, et le laisse peu accessible aux décomposeurs du sol (Hassink, 1997).

Nous allons à présent, discuter comment les systèmes de cultures avec les différents mécanismes qui les régissent, peuvent mettre à profit leur capacité à s'adapter aux différents chocs environnementaux.

## **4 La résilience des systèmes de culture :**

Dérivée du mot latin « *resilere* » qui signifie rebondir Utilisé pour la première fois en sciences physiques. Il se rapporte à la capacité d'un métal à résister aux pressions et à reprendre sa forme initiale après avoir été déformé (Ngono, 2019). En écologie, Holling, (1973) désignât un écosystème capable d'absorber les effets d'une perturbation; il persiste sans changement qualitatif de sa structure. La résilience peut être donc définie comme la capacité d'un système à conserver sa structure organisationnelle (Holling, 1973) , sa productivité et sa capacité d'auto-organisation en absorbant les effets de stress et de changements suite à une perturbation (Altieri *et al.*, 2015). Ainsi, un agro-écosystème résilient continuera à fournir les services essentiels tel que la production alimentaire s'il est menacé par une grave sécheresse ou par une réduction importante des précipitations (Lin, 2011).

La littérature scientifique soulignent l'importance de quelques facteurs déterminants de l'augmentation de la résilience (Dauphiné et Provitolo, 2007). Les plus fréquemment cités sont: la diversité, l'auto organisation et l'apprentissage (Dauphiné et Provitolo, 2007; Bousquet et Botta, 2017). Aussi, divers facteurs réduisent la résilience telle que l'opposition à l'innovation (Dauphiné et Provitolo, 2007).

Inversement à la résilience, la vulnérabilité peut être définie comme le risque de perte de biodiversité, de sol, d'eau ou de la productivité d'un agro-écosystème lorsqu'il est confronté à une perturbation ou à un choc externe.

Bien qu'elle soit devenue un concept transdisciplinaire, la résilience reste difficile à mesurer. Par contre, de nombreuses solutions sont disponibles telles que : les mesures disciplinaires simples, les mesures systémiques et les mesures par des indicateurs (Dauphiné et Provitolo, 2007).

#### **4.1 La résilience face aux changements globaux :**

Les changements environnementaux peuvent affecter de nombreux aspects de la production agricole (Lin, 2011). Nous constatons actuellement que les écosystèmes gérés ne réagissent souvent pas correctement aux changements et pressions externes ce qui nous a conduit à davantage de recherches sur les changements de régimes écologiques, les seuils et la résilience (Folke *et al.*, 2004). Le développement de systèmes agricoles résilients est un sujet d'étude essentiel car de nombreuses communautés dépendent énormément des services écosystémiques fournis par ces systèmes (nourriture, fourrage, carburant) pour leur subsistance (Altieri, 1999). En l'occurrence les agro-écosystèmes traditionnels qui peuvent servir de fondement à la conception de systèmes agricoles adaptés (Altieri *et al.*, 2015).

#### **4.2 Améliorer la résilience des systèmes de culture à travers la diversité :**

Aujourd'hui, 80% des terres arables de la planète sont de plus en plus plantées avec une gamme réduite d'espèces (Adams *et al.*, 1971), dont la majorité sont cultivées avec des «systèmes de monoculture modernes» qui, en raison de leur homogénéité écologique, sont particulièrement vulnérables au changement climatique ainsi qu'aux différentes stress biotiques et abiotiques (Heinemann *et al.*, 2014). Il est clair que ces systèmes de monoculture ont besoin d'une adaptation (Altieri *et al.*, 2015), Favoriser la diversité des champs et l'hétérogénéité des paysages est une stratégie qui représente un moyen robuste d'accroître la productivité, la durabilité et la résilience de la production agricole (Altieri, 2002; De Schutter, 2014).

Selon Altieri *et al.*, (2015) et Loreau *et al.*, (2001) les agro-systèmes se distinguent par différentes catégories de diversités : fonctionnelle qui désigne la diversité des organismes et des services éco-systémiques qu'ils fournissent au système par son bon fonctionnement. Mais encore la diversité de réponses aux changements environnementaux. Un agro-écosystème comportant une grande diversité de réponses sera plus résistant aux divers types et degrés de chocs (Cabell et Oelofse, 2012).

La diversité des systèmes de culture réduit leurs vulnérabilités face aux chocs environnementaux, En effet, l'association de cultures permet aux agriculteurs de produire simultanément différentes cultures et de minimiser les risques (Vandermeer, 1992). Natarajan et Willey, (1986) Affirme que le taux de surperformance des polycultures augmente avec le stress hydrique, de sorte que les différences relatives de productivité entre monocultures et polycultures s'accroissent avec l'accroissement du stress

## **5 Evaluations des systèmes de culture :**

### **5.1 Les modèles biophysiques (chapitre II & IV) :**

En Agriculture, un modèle biophysique est par définition, est un modèle capable de simuler la croissance et le développement des plantes, en faisant une reconstruction approximative des phénomènes réels et une intégration des processus naturels dans des formules mathématiques (Bellocchi *et al.*, 2011). Les conditions écologiques, pédologiques, météorologiques et hydrologiques dans les systèmes en question sont en effet le produit de multiples processus simultanés, où de multiples facteurs interagissent à différentes échelles, chacune examinée par différentes disciplines (Parker *et al.*, 2003).

Il existe plusieurs types de modèles, qu'on peut classer selon leur complexité. Ainsi on parle de modèle empirique quand il s'agit d'une description directe d'un phénomène, généralement sous la forme d'une régression linéaire avec un seul paramètre, tel que la réponse d'une culture à la fertilisation azotée. Alors qu'on parle de modèle mécaniste quand ceux-ci se basent sur les mécanismes et processus qui gouvernent le fonctionnement des systèmes. Ils peuvent aussi être classés selon le fait qu'ils prennent ou non en considération la variable temps, en modèles dynamiques et modèles statiques. Une autre typologie dépend de la prise en compte de variations et de l'incertitude où l'on distingue les modèles déterministes qui ne prennent en compte d'aucun élément aléatoire, variance ou distribution probabiliste, ce qui fait que les résultats ne varient pas entre deux simulations, en contraste avec les modèles stochastiques. Pour cette dernière typologie, il est conseillé de passer à une approche stochastique que lorsque les résultats obtenus par l'approche déterministe ne sont pas satisfaisants, car il est souvent difficile de contrôler un modèle stochastique (Oteng-Darko *et al.*, 2013).

Les modèles de cultures ont de nombreuses applications et utilités. Ainsi la modélisation offre un cadre pour l'intégration de connaissances multidisciplinaires, encourageant la collaboration scientifique tout en réduisant le coût de la recherche. Elle permet aussi d'avoir une meilleure compréhension des processus gouvernant les systèmes et de déterminer les zones d'ombre afin d'avoir une recherche plus ciblée. Ils sont donc utilisés aussi bien pour

l'optimisation des systèmes de cultures déterminant ainsi les meilleures pratiques agricoles, que pour des travaux de sélections afin de comprendre la relation entre génotype et environnement. Ils sont également utilisés pour tester des nouvelles cultures dans des régions où elles n'ont pas été introduites, pour évaluer l'impact environnemental des cultures, aussi pour identifier les causes de la variabilité du rendement (Oteng-Darko et *al.*, 2013). Ces modèles sont aussi nécessaires pour pouvoir étudier la complexité du changement climatique liée à celle des agroécosystèmes (Yang et *al.*, 2017), car ils permettent de simuler les impacts agronomiques et environnementaux de la variabilité climatique, tout en tenant compte des différentes pratiques culturales (Meinke and Stone, 2005).

Les approches par couplage de modèles de croissance de plantes avec des modèles économiques (ou de modèles décisionnels) sont maintenant de plus en plus fréquentes dans le contexte agricole. Les modèles biophysiques sont utilisés de manière à simuler le processus de croissance des cultures pour différents itinéraires techniques, leurs sorties servent alors d'entrée à un modèle économique qui décrit le comportement de maximisation de la fonction « objectif » de l'agriculteur (Reynaud, 2009). Selon le même auteur, cette approche est utilisée surtout pour évaluer les possibilités d'adaptation de l'agriculture au risque de sécheresse et de changement climatique.

### **5.1.1 Étapes de la modélisation**

Differentes étapes sont necessaire pour une utilisation efficace d'un modèle, de la formulation arrivee a la validation du model.

#### **5.1.1.1 Formulation du modèle**

Le modèle est formulé qualitativement selon les diagrammes de Forrester (Jay Forrester). Le diagramme ne contient pas des équations mais montrent les objets et les interrelations entre les différents compartiments du système étudié, selon les hypothèses posées. Ils servent comme base pour la formulation quantitative.

Differents transferts d'énergie et de matière entre les différents compartiments d'un système doivent être représentés lors de la formulation qualitative.

La réalisation de diagramme qualitatif nécessite l'utilisation du code de Forrester qui illustre la manière de configuration schématique de toutes les interactions entre l'ensemble des variables (compartiments) du système étudié (FORRESTER, 1994).

La formulation quantitative du modèle est ensuite necessaire et consiste à décrire quantitativement à l'aide des équations mathématiques (équation linéaire :  $y = a x + b$ ), tout flux de

transfert entre chaque deux variables du système (variable d'état: compartiment ou une variable auxiliaire: un paramètre ou une constante) (FORRESTER, 1968).

### **5.1.1.2 Calibration du modèle**

La calibration d'un modèle est le processus d'estimation de ses paramètres. La détermination de paramètres nécessite : (i) le recours à la littérature dont les paramètres ont été déjà défini dans des travaux de recherche antérieurs ; (ii) cependant, les paramètres du modèle peuvent être optimisé quand nous disposons des données réels du comportement des variables d'état au cours du temps. Dans ce dernier cas, les données sont réellement générées à partir d'une expérimentation.

L'optimisation a pour but de chercher le ou les paramètres qui minimisent la distance entre les prédictions du modèle et les données observées sur terrain afin d'améliorer la justesse du modèle. A cet effet, plusieurs méthodes mathématiques et statistiques sont utilisées pour minimiser l'erreur qui représente la différence entre les données simulées par le modèle calibré et celles observées par l'expérimentateur (BALZTER, 2000).

### **5.1.1.3 Validation**

La validation des modèles est un processus pour tester les modèles par rapport à la validité de ses hypothèses, degré de simplification et exactitude des paramètres à travers la confrontation avec des données réelles. La principale différence entre calibration et validation est que la validation n'est pas faite pour calculer les paramètres mais pour tester le modèle.

De plus la validation du modèle se fait généralement dans diverses conditions environnementales (Ex. des essais de culture multi-locaux, observations de certaines variables physiologiques chez une espèce donnée dans divers milieux écologiques).

Cependant, la calibration du modèle vise à optimiser les paramètres du modèle sous des conditions expérimentales relativement contrôlées (Dawo et al., 2021).

Nous devons prendre en compte plusieurs facteurs pour la validation :

- Indépendance des données : Les données doivent être indépendantes de celles utilisées pour construire ou calibrer le modèle.
- Nombre de réponses du système : Variables d'état qui vont être utilisées pour la validation (une ou plusieurs).
- Nombre de points au cours du temps : Un ou plusieurs points au cours du temps.
- Degré de répétitions : Les tests statistiques ont besoin d'un certain degré de variabilité.

## **5.2 Indices de compétitivité agro-écologiques (chapitre III) :**

Il existe de nombreux indices d'interaction utilisés dans la littérature pour évaluer l'avantage potentiel des cultures intercalaires et pour comparer les interactions intra spécifiques et inter spécifiques.

Différents indices peuvent être utilisés pour évaluer les cultures intercalaires tels que le rapport d'équivalence de surface (LER), le coefficient d'encombrement relatif (K), le ratio de compétitivité (CR) en plus de l'indice de nutrition azotée (NNI) (Mead et al., 1980, Hiebsch et al., 1887, Mason et al., 1986, De Wit et al., 1960, Connolly et al., 1990, Plénet, al., 1999).

Le choix de ces indices, leur utilisation et leur signification sont cruciaux pour faire des interprétations correctes.

En effet, l'analyse des cultures associées (chapitre 3) à travers ces indices de compétitivité agro-écologiques permet un diagnostic intégratif (c'est-à-dire la biomasse, le rendement et la dynamique de croissance) du statut de l'azote dans les cultures intercalaires (Kherif et al., 2021b).

## **CHAPITRE II : MODELISATION AGRO ECOLOGIQUE DES TRANSFERTS D'AZOTE ET DE CARBONE ENTRE LES MICRO-ORGANISMES DECOMPOSEURS, LES SYMBIOTES VEGETAUX, LE SOL ET L'ATMOSPHERE DANS UN SYSTEME DE CULTURE INTERCALAIRE**

### **1 Introduction**

Comme déjà vu dans le chapitre I, le système de monoculture légumineuses et de céréales est le plus couramment utilisé pour la production de légumineuses et de céréales dans la plupart des écosystèmes agricoles dans le monde (Peoples et *al.*, 2019). Le remplacement de l'actuel système de monoculture par des cultures associées pourrait augmenter la diversité des espèces au fil du temps (en rotation avec les céréales, en remplacement de la jachère) et dans l'espace (en culture intercalaire), et améliorera l'efficacité d'utilisation des ressources (Latati et *al.*, 2016 ; Messaoudi et *al.*, 2020). L'intensification agro écologique du système agricole basée par une forte diversification des espèces peut améliorer les services écosystémiques (Justes et *al.*, 2017 ; Glaze-Corcoran et *al.*, 2020). En effet les systèmes de culture intercalaire céréales-légumineuses sont plus efficaces dans l'utilisation des ressources nutritives (C, N et P (phosphore)) que les systèmes simples actuellement utilisés (Duru et *al.*, 2015a ; Latati et *al.*, 2019a). En outre, la culture intercalaire améliore la complémentarité fonctionnelle, les interactions biologiques bénéfiques et les synergies entre les espèces végétales et les micro-organismes au sein de l'agro écosystème, à la fois dans le temps et dans la gestion de l'espace au sein du champ (Latati et *al.*, 2017 ; Peoples et *al.*, 2019)).

Pour évaluer et estimer les performances des cultures intercalaires en termes d'utilisation et de stockage des ressources (en particulier les nutriments C et N), une approche systémique intégrant l'analyse de données empiriques et la modélisation quantitative des indicateurs agro écologiques a été appliquée pour relier les cycles C et N (Gärdenäs et *al.*, 2011 ; Todd Brown et *al.*, 2012 ; Latati et *al.*, 2020). Cette approche de modélisation donne une vue détaillée des échanges continus de C (Van der Heijden et *al.*, 2008 ; Ibrahim et *al.*, 2016) et N (Corre-Hellou et *al.*, 2009 ; Pansu et *al.*, 2018)) entre les organismes vivants, le sol et l'atmosphère. La teneur en matière organique du sol (MOS) est l'un des principaux indicateurs biogéochimiques qui doivent être évalués dans une analyse de la fertilité des sols (Xu et *al.*, 2013). La disponibilité des ressources en C et N du sol dépend en grande partie de la composition et de la structure de la communauté microbienne corrélée au stade de croissance des plantes et des conditions environnementales (Cotner et *al.*, 2006 ; Sikorski, 2015 ; Latati et *al.*, 2017). La bio disponibilité de C et N pour les cultures rendu possible grâce au micro-organismes, sont considérés comme une source substantielle à court et à long terme (Tang et *al.*, 2014).

Cependant, les systèmes de culture peuvent être gérés de manière durable dans le temps (par rotation et en utilisant des périodes de jachère) et dans l'espace (cultures intercalaires et cultures de couverture) pour augmenter les stocks de biomasse microbienne (MB) de C et N (C-MB et N-MB) (Cong et al., 2014 ; Blesh et al., 2018 ). Ceci souligne la complexité des échanges de C et N et la nécessité des modèles pour analyser les transferts de C et N entre les micro-organismes, les compartiments du sol et l'atmosphère, en particulier pour les systèmes de culture intercalaire.

Au cours des dernières décennies, plus de 250 modèles ont été développés pour décrire les processus biogéochimiques dans les agro écosystèmes (Manzoni et Porporato, 2009).

Cependant, peu d'entre eux relient les cycles N et C à l'écologie fonctionnelle des systèmes plante / microorganisme (Pansu et al., 2009, 2010, 2014, 2018 ; Jensen et al., 2010 ; Ibrahim et al., 2013, 2016 ; Latati et al., 2019a). Les échanges continus de stocks de C ou de N ont été récemment modélisés pour de nombreuses cultures dans des systèmes de monoculture à moyen terme (Romanyaa et al., 2000 ; Garten et al., 2010) et à long terme (Palosuo et al., 2012). Ceux-ci excluent la modélisation à court terme, et peu d'informations sont disponibles pour les systèmes de culture intercalaire céréales-légumineuses (e.g. Corre-Hellou et al., 2009 ; Sikorski, 2015 ; Ibrahim et al., 2016 ; Pansu et al., 2018).

Au cours des dix dernières années, le modèle MOMOS (Modélisation des transformations organiques par les micro-organismes des sols) a été l'un des modèles à court terme le plus mécanistes disponibles pour simuler les échanges quotidiens et continus de C et N entre les organes végétaux et les symbiotes, les micro-organismes décomposeurs, les compartiments de l'atmosphère et du sol.

Les versions 2 à 6 de MOMOS sont les plus récentes et ont été développées à partir des modèles originaux MOMOS-C (Sallih et Pansu, 1993) et MOMOS-N (Pansu et al., 1998). Ces modèles ont été développés à partir d'études utilisant des traceurs isotopiques ( $C^{14}$  et  $N^{15}$ ) dans des conditions de laboratoire contrôlées et dans des sacs de terre sur le terrain.

MOMOS utilise la même approche conceptuelle, centrée sur le rôle fonctionnel de la biomasse microbienne du sol (Pansu et al., 2009). Cependant, MOMOS a évolué en termes de complexité à travers diverses formulations, mais aussi des définitions des différents compartiments du modèle, de processus biogéochimiques et de niveaux de paramétrage. Le compartiment microbienne de MOMOS C a été calibrée dans la région sèche de Puna en Bolivie et dans les páramo vénézuéliens plus humides (Pansu et al., 2004) puis validée dans six sites tropicaux sur une large gamme d'altitudes et de climats (Pansu et al., 2010) . Ensuite étendu

pour inclure le cycle d'azote (Pansu et *al.*, 2014). Plus récemment, le modèle MOMOS a relié les transformations microbiennes à la croissance des plantes et validé sur des données collectées à partir d'expériences de terrain dans un système de culture intercalaire céréales-légumineuses (féverole-blé dur) en conditions méditerranéennes françaises pour simuler les échanges continus de C ( Ibrahim et *al.*, 2016 ) et N ( Pansu et *al.*, 2018 ) entre les organes végétaux, les micro-organismes vivants, les compartiments du sol et l'atmosphère (Latati et *al.*, 2020). Ce Chapitre sous forme d'article vise à étendre ces études pour simuler les échanges continus de C et N entre les compartiments utilisant la dernière version de MOMOS (Pansu et *al.*, 2018). A travers ce chapitre et grace au modele MOMOS nous envisageons de :

- Améliorer le système d'équations pour la croissance des plantes (avec de nouvelles formulations mathématiques) en tant que nouvel outil pour simuler les échanges quotidiens de C et N entre les symbiotes végétaux, la biomasse microbienne, le sol et l'atmosphère en utilisant des données collectées sur deux parcelles agricoles avec des sols calcaires à faible taux de phosphore (P).
- Paramétrer et valider le modèle MOMOS pour deux conditions pédoclimatiques très différentes, en se concentrant sur les données collectées pour un système de culture intercalaire d'été (haricot commun-maïs) sur deux saisons de croissance successives.
- Estimer les échanges quotidiens de C et N microbiens des Micro-organismes décomposeurs , la perte de C par la respiration du sol, et estimer les flux de C et N nécessaire pour la croissance des plantes, des nodules et la quantité quotidienne de N fixée par les symbiotes nodulaires du haricot commun.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Expérimentation et collecte de données

Les données des plantes-sol ont été recueillies suite à une expérience de terrain décrite en détail par Latati et *al.* (2017). L'expérimentation sur le terrain a été réalisée durant les Campagnes 2012 et 2013 sur deux parcelles agricoles de l'agro écosystème céréalier de la région de Sétif (300 km à l'est d'Alger). Ces deux sites sont très différents sur le plan de la disponibilité en phosphore (P) du sol avec le Site 1 (S1, 35 ° 58.11'N, 5 ° 14.90'E) déficient en P du sol (5,5 mg de P kg<sup>-1</sup>) et le Site 2 (S2, 35 ° 53.37'N, 5 ° 37.01'E) étant suffisamment riche en phosphore (21,8 mg P kg<sup>-1</sup>) (Photos 8, Annexe 1). Les deux sites sont caractérisés par des sols argilo-limoneux alcalins (pH environ 8), calcaires (teneur en CaCO<sub>3</sub> est de 22% et 25% respectivement pour S1 et S2). La teneur totale en carbone (C) était de 19 g kg<sup>-1</sup> pour S1 et 27 g kg<sup>-1</sup> pour S2, concernant la teneur totale en azote (N) était de 1 g kg<sup>-1</sup> pour S1 et 2,3 g kg<sup>-1</sup> sur le S2.

Sur les deux sites, le haricot commun et le maïs ont été cultivés dans trois systèmes de culture (quatre répétitions au champ), aucune application chimique n'a été appliquée (engrais et dés-herbants) cette pratique est couramment utilisée depuis de nombreuses années au niveau des exploitations agricole de la wilaya. Les systèmes de culture étaient (i) la monoculture de maïs (*Zea mays* cv. Filou) à une densité de 15 ± 3 plantes m<sup>-2</sup> (ii) la monoculture de haricot commun (*Phaseolus vulgaris* cv. El Djadida) à une densité de 24 ± 3 plantes m<sup>-2</sup> et (iii) maïs et haricot commun en culture associée à une densité de 12 ± 3 plantes m<sup>-2</sup> pour chaque espèce. Ces densités de plantation ont été recommandées par les agriculteurs locaux suivant leurs pratiques habituelles. Le plan expérimental est une randomisation en bloc aléatoire complet (RCBD) avec quatre répétitions. Des échantillons de sol et de plantes ont été prélevés pendant cinq périodes phénologiques (semis : 0 jour après le semis (DAS), croissance : 21 et 51 DAS ; floraison : 81 DAS et stade de récolte : 120 DAS). Dix plantes choisies au hasard au milieu de chaque sous-parcelle ont été récoltées pour chaque étape d'échantillonnage. Les pousses ont été séparées des racines au niveau du nœud cotylédonaire. Les nodules ont été séparés des racines, comptés et pesés séparément. Le sol adhérant aux racines des plants du haricot commun et de maïs sélectionnés a été échantillonné en brossant les agrégats inférieur à 4 mm. Ensuite, ils ont été soigneusement mélangés et regroupés pour faire 5 échantillons composites de rhizosphère pour chaque sous-parcelle. Les échantillons de rhizosphère ont ensuite été conservés à 4 ° C pendant 72 h jusqu'à l'analyse. La respiration du sol (CO<sub>2</sub>-C) a été estimée par absorption de CO pendant une journée dans 20 ml de solution de NaOH à l'intérieur de cylindres de polychlorure de vinyle, précipitant les carbonates et

titrant le NaOH restant avec une solution aqueuse standard de 0,25 mol L<sup>-1</sup> de HCl (Latati et al., 2014).

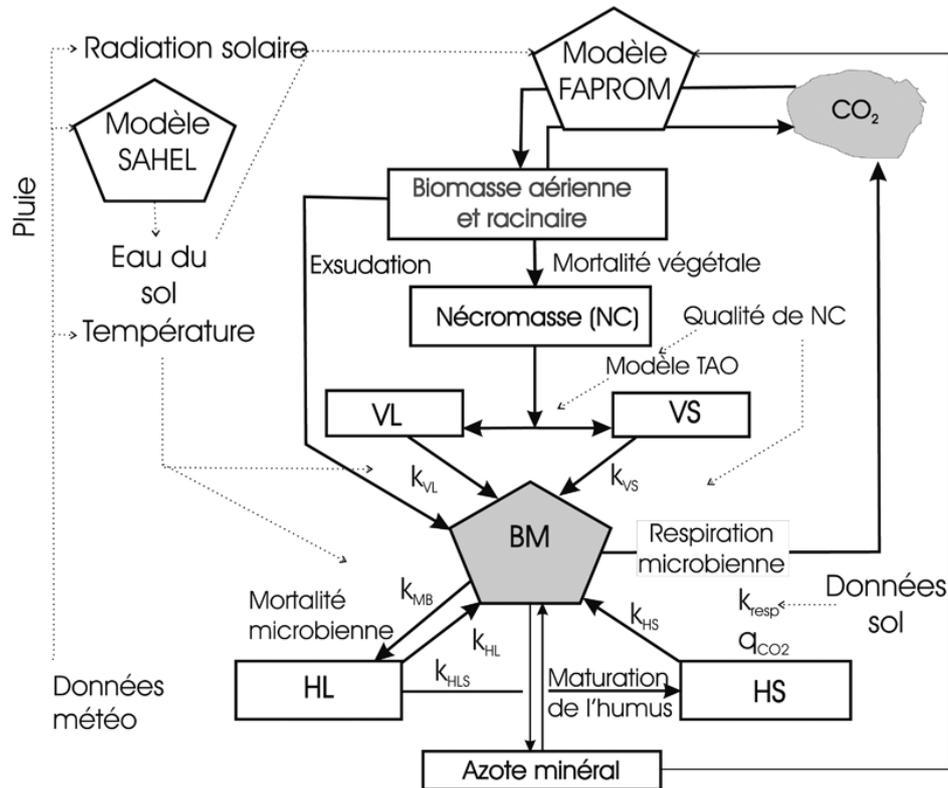
Les mesures de C et N de la MB, tissus végétaux (Pousses, racines et nodules) et de la rhizosphère ont été décrites en détail dans (Latati et al., 2017). Toutes les concentrations de C et N dans les pousses, les racines, les nodules et la rhizosphère (g plantes<sup>-1</sup> et g kg<sup>-1</sup> sol) ont été converties en stocks (g C m<sup>-2</sup>, g N m<sup>-2</sup>) dans la couche de 0 à 30 cm en utilisant les méthodes rapportées par Ibrahim et al. (2016) et Pansu et al. (2018).

## **2.2 Structure et système d'équation MOMOS et paramétrage du modèle**

La structure sur laquelle le modèle MOMOS est basé (figure 13) est proche des modèles linéaires dans sa structure. Cependant, seule l'expression de la respiration microbienne est non linéaire : elle est une fonction quadratique du pool de biomasse microbienne au carré (Ibrahim et al., 2016). Il est donc composé de cinq compartiments dont la biomasse microbienne est le centre des échanges entre les différents flux des compartiments de la MO fraîche (nécromasse stable et labile) et ceux de l'humus stable et labile.

De plus, MOMOS peut être couplé à différents modèles de production agricole ainsi qu'à différents modèles de physique du sol et de l'eau :

Le modèle de gestion de l'eau du sol SAHEL (Penning de Vries et al., 1989) permet d'estimer l'humidité journalière du sol à partir de données climatiques (température max et min, vitesse du vent, ensoleillement...). TAO (Transformation of Added Organic materials) : modèle conçu pour estimer les fractions de nécromasse labile et stable prises en charge par la MB (Ibrahim et al., 2016). Modèle FAPROM de production primaire de la jachère (Martineau et Saugier, 2006), son couplage avec MOMOS permet de comprendre et de prévoir le retour de la fertilité azotée par la jachère, apparaissant ainsi comme un outil de prévision indispensable à la durabilité des écosystèmes (Pansu et al., 2006).



**Figure 13** : structure du modèle MOMOS (Pansu et *al.*, 2006).

MOMOS a été le premier modèle dans lequel tous les paramètres sont des taux du premier ordre (Pansu, 2006). Il existe sept paramètres de taux (unités jour) qui dépendent de la qualité des intrants organiques (Bottner et *al.*, 2006), de la texture du sol, humidité du sol, température (Ibrahim et *al.*, 2013 ) et de la fixation symbiotique de N par la légumineuse.

L'équation (Eq.) générale MOMOS est non linéaire :

$$\text{Eq (1): } \dot{x} = f(T)f(\theta)Ax + B$$

Où  $x$  est le vecteur des concentrations de C et N dans les cinq compartiments du modèle (biomasse aérienne et racinaire, biomasse microbienne, nécro masse, humus stable et humus labile) et  $\dot{x}$  est le vecteur des premières dérivées de  $x$ .

$A$  : est la matrice des paramètres pour chaque élément, et  $B$  est un vecteur des entrées C et N externes.

$(T)$  : est une fonction exponentielle de la température : (Pansu et *al.*, 2004, 2010 ; Ibrahim et *al.*, 2016 ).

$$\text{Eq (2): } f(T) = Q_{10}^{(T-T_{opt})/10}$$

Où T est la température quotidienne réelle du sol (couche de 0 à 10 cm) fixée égale à la température de l'air;  $T_{opt}$  est la température de décomposition optimale fixée à 28 ° C, température souvent utilisée pour effectuer des expériences de décomposition au laboratoire dans des conditions optimales (Thuriès et al., 2002 ; Pansu et al., 2010 )  $Q_{10}$  est la fonction  $f(T)$  pour une augmentation de T de 10°C , fixé à 2.2 lors de la validation du modèle MOMOS par Pansu et al. (2010) et  $f(\theta)$  est la fonction de l'évolution de l'humidité journalière du sol, elle est définie par l'équation 3 normalisée à la capacité de rétention d'eau WHC (Pansu et al, 2010 ; Ibrahim et al, 2016)

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

La teneur en humidité du sol ( $\theta$ ) a été simulée en couplant MOMOS au modèle SAHEL (Penning de Vries et al., 1989 ), Pour cette étude, nous avons utilisé une version mise à jour prenant en compte la vitesse du vent, la pression de vapeur d'eau, les précipitations et le rayonnement solaire. Ces données ont été collectées à partir d'une station météorologique de la région de Sétif. De plus, nous avons utilisé des paramètres physiques du sol, y compris ca teneur en humidit, mesurés à chaque stade de croissance à partir des couches de sol de 0 à 15 cm et de 15 à 30 cm. Comme C et N sont étroitement associés dans les organismes vivants (Pansu et al., 2014), la modélisation du cycle de l'azote MOMOS-N est réaliser de la même manière que le cycle du carbone MOMOS-C (Pansu et al., 2010).

MOMOS-C et MOMOS-N ont modélisé cinq compartiments : matières végétales labiles (VL), matières végétales stables (VS), biomasse microbienne (MB), humus labile (HL) et humus stable (HS).

Pour le carbone MOMOS-C, la matrice modèle A est la suivante (Eq.4) :

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

Où le terme central de la matrice définit la respiration microbienne avec  $q_{CO_2}$  représentant le quotient métabolique du MB :

$$\text{Eq (5): } q_{CO_2} = k_{resp} \frac{x_{MB}}{C_{MB}^0}$$

$C_{MB}^0$  est une estimation de la biomasse C à l'état d'équilibre.  $K_{resp}$  est le coefficient de respiration ( $j^{-1}$ ) ajusté à la fraction de texture du sol 0-20  $\mu m$  ( $F_{0-20}$ ). (Ibrahim et al., 2016):

**Eq (6) :  $k_{resp} = -0.0008 F_{0-20} + 0.062$**

Concernant MOMOS-N, la matrice de modèle A (Eq 7) est :

$$A_N = \begin{bmatrix} -k_{VL} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{VS} & 0 & 0 & 0 \\ k_{VL} & k_{VS} & -(f(x_{C,MB} \cdot x_{N,MB}) / f(T) f(\theta) x_{N,MB} + k_{MB}) & k_{HL} & k_{HS} \\ 0 & 0 & k_{MB} & -(k_{HL} + k_{HLS}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{HLS} & -k_{HS} \end{bmatrix}$$

Où le terme central d' $A_N$  définit les échanges avec N inorganique par une fonction ( $X_{C, MB}$ ,  $X_{N, MB}$ ) des teneurs en C et N de la biomasse microbienne. Les deux matrices partagent les taux de digestion enzymatique des matières végétales labiles ( $k_{VL}$ ) et stables ( $k_{VS}$ ) optimales ainsi que le taux de mortalité microbienne ( $k_{MB}$ ). Ces paramètres ont été trouvés liés à un autre facteur qui détermine la décomposition des matières organiques qui est  $\eta_{NC}$ , représentent le rapport C/N de la nécro masse d'entrée (NC) de chaque organe végétal, ce qui affecte également les taux de décomposition de la MO.

**Eq (8) :  $k_{VL} = \text{MAX} (0.65 - 0.0019 \eta_{NC}, 0.1)$**

**Eq (9) :  $k_{VS} = \text{MAX} (0.0037 - 0.000026 \eta_{NC}, 0.00005)$**

**Eq (10) :  $k_{MB} = \text{MIN} (0.42 + 0.0012 \eta_{NC}, 0.8)$**

Pour le carbone MOMOS-C, le vecteur modèle x est :

**Eq (11):  $x = \begin{bmatrix} x_{C\ VL} \\ x_{C\ VS} \\ x_{C\ MB} \\ x_{C\ HL} \\ x_{C\ HS} \end{bmatrix}$**

Où  $X_{CVL}$ ,  $X_{CVS}$ ,  $X_{CMB}$ ,  $X_{CHL}$  et  $X_{CHS}$  représentent la teneur en C des compartiments VL, VS, MB, HL et HS, respectivement.

Pour MOMOS-N le vecteur modèle  $x$  est :

$$\text{Eq (12): } x = \begin{pmatrix} x_{NVL} \\ x_{NVS} \\ x_{NMB} \\ x_{NHL} \\ x_{NHS} \end{pmatrix}$$

Où  $x_{NVL}$ ,  $x_{NVS}$ ,  $x_{NMB}$ ,  $x_{NHL}$  et  $x_{NHS}$  représentent la teneur en N des compartiments VL, VS, MB, HL et HS, respectivement.

Pour chaque période d'incubation, le dérivé du C total est :

$$\text{Eq (13): } \dot{C} = \sum_{i=1}^5 x_{i,c} = -f(\theta) f(T) x_{C,MB} q_{CO2}$$

Pour chaque période d'incubation, la dérivé du N organique total est le négatif de la dérivé du N inorganique total exprimé par

$$\text{Eq (14): } \dot{N} = \sum_{i=1}^5 x_{i,N} = -(x_{C,MB}, x_{N,MB}) = -(x_{N,MB} - \frac{x_{C,MB}}{\eta_{MB}^{lim}})$$

$(x_{C,MB}, x_{N,MB})$  est défini en termes de  $\eta_{MB}^{lim}$  la valeur cible du rapport C/N du MB ( $\eta_{MB}$ ).

Les valeurs positives de la fonction correspondent à la minéralisation N du N microbien et les valeurs négatives correspondent à l'immobilisation microbienne de N. inorganique.

### 2.3 La formulation mathématique de la production végétale

Le module suppose que la croissance des plantes est également contrôlée par (T) et ( $\theta$ ), le facteur de correction climatique utilisé pour le fonctionnement microbien (Eq. (1)), et par le taux de carbone (C) de la biomasse aérienne, qui est basée sur la surface foliaire de chaque espèce végétale. Pour tenir compte du lien entre C et N dans le processus de photosynthèse, nous avons mis en relation les stocks aériens de N avec la production quotidienne de C (DCP)  $\frac{dDCP^j}{dt}$ , donc l'équation mise à jour est :

$$\text{Eq (15): } \frac{dDCP^j}{dt} = f(T) f(\theta) \tau y_{CA}^j \sqrt{y_{NA}^j (1 - y_{CA}^j / \max y^j)}$$

Une autre nouvelle approche a été adoptée pour le stockage de l'azote. De nouveaux paramètres ont été introduits dans une nouvelle équation (Eq.16) pour réguler la production quo-

tidienne d'azote (DNP)  $\frac{dDNP^j}{dt}$  ou  $\tau_{NPN}^j$  est le taux de production nette d'azote,  $N_{maxy}^j$  traduit le taux de N maximum dans les biomasses qui sont directement liés au cycle du carbone à travers le stock maximum du carbone dans les biomasses totale.

$$\text{Eq (16) : } \frac{dDNP^j}{dt} = f(T) f(\theta) \tau_{CA}^j (1 - y_{CA}^j / \text{maxy}^j) (\tau_{NPN}^j y_{NA}^j) (1 - y_{NA}^j) / N_{maxy}^j$$

Les stocks de N et C des graines semées étaient considérés comme la première ressource de croissance des plantes jusqu'à la production de leurs premières feuilles, organes responsables de la photosynthèse et des racines, organes responsables de l'absorption des nutriments du sol. Ces ressources ont été allouées à la biomasse aérienne et aux racines en utilisant la constante **fsa**.

Toute la production de C et N a été partiellement allouée aux racines (R) en utilisant les taux d'allocation  $\tau_{AR}^j$  pour l'allocation C et  $\tau_{NRS}^j$  pour l'allocation N. Une autre partie a été transférée à la production de céréales en utilisant la fonction dépendante du temps  $f_1^j$  avec les mêmes taux d'attribution  $\tau_{AG}^j$  pour les stocks C et N.

Cette nouvelle formulation était différente du système d'équations utilisé dans la version précédente de MOMOS, dans laquelle le taux d'allocation  $\tau_{NAG}^j$  réglementé le transfert de N vers les grains. Cela supposait que le rapport C / N pour les nouveaux grains était le même que pour les graines initiales pour chaque plante j.

Pour la mortalité naturelle et pendant la récolte, le C et le N produits ont également été transférés à la litière par le taux de mortalité quotidien  $\tau_{Am}^j$  et taux de coupe  $\tau_H^j$  avec les fonctions de temps  $f_1^j$  et  $f_2^j$  respectivement.

On considère que la litière est incorporée dans les 0–30 cm de la macrofaune du sol à un taux quotidien constant  $\tau_{incorp}$ . Pour la légumineuse, les transferts de C vers les nodules ont été considérés provenir uniquement de la photosynthèse. Pour modéliser ce processus une partie du DCP a été transférée aux nodules avec taux d'allocation  $\tau_{nod}^j$  en fonction du temps  $f_1^j$

Les stocks C et N des parties aériens de chaque plante, ont ensuite été intégrés :

$$\text{Eq (17)} : \frac{dy_{CA}^j}{dt} = C \text{ semis}^j \text{ fsa}^j \frac{dDCP^j}{dt} (1 - \tau_{AR}^j - f_1^j(t, \tau_{AG}^j) - f_3^j(t, \tau_{nod}^j)) - y_{CA}^j (f_1^j(t, \tau_{Am}^j) + f_2^j(t, \tau_H^j))$$

$$\text{Eq (18)} : \frac{dy_{NA}^j}{dt} = N \text{ semis}^j \text{ fsa}^j + \frac{dDNP^j}{dt} + dy_{NR}^j \tau_{NRS}^j - y_{NA}^j (f_1^j((t + \tau_{Am}^j) + (t + \tau_{AG}^j)) + f_2^j(t, \tau_H^j))$$

Les stocks de C des graines de chaque plante ont ensuite été intégrés

$$\text{Eq (19)} : \frac{dy_{CG(j)}^j}{dt} = f_1^j(t, \tau_{AG}^j) \frac{dDCP^j}{dt} - f_2^j(t) y_{CH}^j$$

Où  $y_{CH}^j$  était le taux de C exporté par les graines de chaque espèce au moment de la récolte.

Une nouvelle équation (Eq. (20)) a également été formulée pour cette version du model MO-MOS afin de calculer les stocks de N graines de chaque espèce :

$$\text{Eq (20)} : \frac{dy_{NG(j)}^j}{dt} = (f_1^j(t, \tau_{AG}^j) \frac{dDCP^j}{dt}) N \text{ semis}^j C \text{ semis}^j - f_2^j(t) y_{NH}^j$$

Le stock journalier de C contenu dans la litière de chaque plante a été intégré :

$$\text{Eq (21)} : y_{CL}^j = y_{CA}^j (f_1^j(t + \tau_{Am}^j) + f_1^j(t + \tau_H^j)) - y_{CL}^j \tau_{incorp}^j$$

$y_{NL}^j$  Est le stock journalier de N contenu dans la litière de chaque plante exprimé comme suit :

$$\text{Eq (22)} : y_{NL}^j = y_{NA}^j (f_1^j(t + \tau_{Am}^j) + f_1^j(t + \tau_H^j)) - y_{NL}^j \tau_{incorp}^j$$

Les stocks de C racinaire ont été déterminés initialement par le stock de C dans les graines,  $C \text{ semis}^j (1 - \text{fsa}^j)$ , avec les apports quotidiens de la production nette de C et les sorties par la respiration  $\tau_{Rr}^j$  des racines et la mortalité des racines  $\tau_{Rm}^j$  :

$$\text{Eq (23)} : \frac{dy_{CR}^j}{dt} = C \text{ semis}^j (1 - \text{fsa}^j) \tau_{AR}^j \frac{dDCP^j}{dt} - y_{CR}^j (\tau_{Rm}^j + \tau_{Rr}^j)$$

Les stocks de N racinaire ont été déterminés initialement par le stock de N des graines,  $N \text{ semis}^j (1 - \text{fsa}^j)$ , les apports quotidiens de N étant absorbés par les racines, avec le taux d'allocation  $\tau_{NRA}^j$  en fonction de temps  $f_4^j$ , et N fixé par les nodules, avec un taux de transfert  $\tau_{NRR}^j$  et un taux de restitution quotidiens au sol  $\tau_{Rm}^j$  du aux mortalité et enfin N transfert aux racines au taux  $\tau_{NRS}^j$

$$\text{Eq (24)} : \frac{dy_{NR}^j}{dt} = N_{semis}^j (1 - f_{sa}^j) + f_4^j(t, \tau_{NRA}^j) y_{CR}^j + \tau_{NRR}^j y_{N\ nod}^j y_{NR}^j (\tau_{NRS}^j + \tau_{Rm}^j)$$

La teneur en azote dans les nodules  $y_{C\ nod}^j$  d'une plante donnée j a été déterminée par :

$$\text{Eq (25)} : \frac{dy_{C\ nod}^j}{dt} = f_3^j(t, \tau_{nod}^j) \frac{dDCP^j}{dt} - y_{C\ nod}^j (f_1^j(t, \tau_{rnod}^j + t, \tau_{mnod}^j))$$

$f_3^j(t, \tau_{nod}^j)$  régle l'attribution par la plante de la production de C aux nodules. Les autres termes représentent les pertes du stock C nodulaire des légumineuses par mortalité

$f_1^j(t, \tau_{rnod}^j)$  et par la respiration  $f_1^j(t, \tau_{mnod}^j)$ .

Le stock de N dans les nodules symbiotiques a été déterminé par :

$$\text{Eq (26)} : \frac{dy_{N\ nod}^j}{dt} = \tau_{NNF}^j y_{C\ nod}^j f_3^j(t) - y_{N\ nod}^j (\tau_{mnod}^j + \tau_{NRR}^j)$$

Où le premier terme sur le côté droit exprime les stocks de N fournie par la fixation symbiotique  $\tau_{NNF}^j$  en fonction du stock de C nodulaire  $f_3^j$  ; Le deuxième terme exprime la perte de N nodulaire  $\tau_{NRR}^j$  et de la litière  $\tau_{mnod}^j$ .

**aiN** est le taux des échanges quotidiens de N inorganique, il dépend des apports due a la minéralisation nette de MB et d'engrais, il varie aussi grâce a l'absorption racinaire par chaque plante (j) et de la perte globale de N inorganique dans l'environnement ( $\tau_{Nloss}$ ).

$$\text{Eq (27)} : \frac{d_{inorg\ N}}{dt} = (X_{C, MB}, X_{N, MB}) + f_5^j(t, aiN) - \sum_j f_4^j(t, \tau_{NRA}^j) y_{CR}^j - \tau_{Nloss} inorgN$$

## 2.4 Processus d'étalonnage et d'optimisation MOMOS

Avant de valider le modèle MOMOS, il a été calibré pour déterminer les valeurs des paramètres du modèle qui donnent le meilleur ajustement entre les prédictions du modèle et les données mesurées.

Dans cette étude, toutes les prédictions MOMOS ont été optimisées simultanément dans le logiciel VENSIM en utilisant la méthode de gradient conjugué de Powell pour minimiser un gain défini comme la somme des résidus au carré entre les prédictions du modèle et les données mesurées. Les poids attribués aux résidus étaient proportionnels aux écarts-types (erreur prédite) des données correspondantes.

Selon la fonction d'optimisation de VENSIM, tous les paramètres de transfert ont été optimisés pour mieux déterminer les valeurs de constantes optimales. Après avoir défini le gain,

nous avons sélectionné les paramètres à modifier pour minimiser ce dernier. Les valeurs des paramètres trouvés lors de l'optimisation ont une certaine incertitude et la sensibilité du gain a été testée autour de l'optimum pour déterminer cette incertitude. Les limites de confiance à 95 % ont été obtenues par la méthode MCMC (Markov Chain Monte Carlo)

Nous nous sommes servis de la dernière version à jour du modèle MOMOS (version développée par Pansuet *al.* (2018)), tous les paramètres ont été optimisés avec le système d'équations proposé (voir 2.3.ci-dessus). Les tableaux 1, 2, 3 et 4 montrent les valeurs des meilleurs ajustements des paramètres éco physiologiques et les propriétés initiales du sol pour C et N en S1 et S2.

VENSIM Professional pour Windows version 5.10d (<http://www.vensim.com/>) a été utilisé pour explorer le comportement du modèle et analyser le modèle tout au long du processus de construction. VENSIM a également été utilisé pour la simulation quotidienne de la teneur en humidité avec le modèle SAHEL (Penning de Vries et *al.*, 1989).

**Tableau 1 :** Paramètres éco-physiologiques et valeurs initiales des compartiments C du sol des systèmes de culture du site 1 (S1).

Fonction	Paramètres		Unités	Système de culture					
				2012			2013		
	Symbole	Description		Maïs	Haricot commun	interc	Maïs	Haricot commun	interc
Paramètres de croissance	$\tau$	Taux de croissance	day <sup>-1</sup>	0.408294		0.594403	0.57384		0.522375
jE [Maïs]	$\tau_{AR}$	Taux d'attribution aux racines	-	0.459851		0.540346	0.683576		0.534751
	$\tau_{AG}$	Taux de transfert au grain	-	0.315711		0.49663	0.589347		0.474562
	maxy	Production maximale	g.C.m <sup>-2</sup>	1793,9821		1586,5817	1311,5349		1195,1697
Mortalité	$\tau_{Rm}$	Taux de mortalité racinaire	d <sup>-1</sup>	0.1		0.1	0.0670016		0.1
	$\tau_{Am}$	Taux de mortalité aérienne	d <sup>-1</sup>	0.174515		1.954e-006	0.0001	0.626283	0.0001
	$\tau_{Rr}$	Racine resp. taux, céréale	d <sup>-1</sup>	0.0999953		0.1	0.1	0.302914	0.099881
Respiration	$\tau$	Taux relatif de croissance	d <sup>-1</sup>		0.662117	0.542415		0.701774	0.63315
Paramètres de croissance	$\tau_{AR}$	Taux d'attribution aux racines	-		0.255014	0.194375		0.00073	0.241549
jE [haricot commun]	$\tau_{AG}$	Taux de transfert au grain	-		0.999999	0.460602		493,35119	0.542187
	$\tau_{nod}$	Taux d'attribution aux nodules	-		0.00073	0.0006615		0.1	0.001310
	maxy	Production maximale.	g.C.m <sup>-2</sup>		664,85360	216,80494		0.0001	184,509160.1
Mortalité	$\tau_{Rm}$	Taux de mortalité racinaire	d <sup>-1</sup>		8.269e-005	0.1		0.1	0.136566
	$\tau_{Am}$	Taux de mortalité aérienne	d <sup>-1</sup>		0.0380716	0.141842		0.1	0.1
	$\tau_{mod}$	Taux de mortalité des nodules	d <sup>-1</sup>		0.1	0.1			0.1
Respiration	$\tau_{Rr}$	Taux de resp racine, légumineuse	d <sup>-1</sup>		0.0763211	0.1			
Incorporation de litière	$\tau_{incorp}$	Taux d'incorporation	d <sup>-1</sup>					1	1
jE [Maïs]		de la litière au sol		0.0025669		0.0025669	0.0003		0.9997
jE [haricot commun]					0.0721242	0.776859			0.192897
Fonction de temps f1 (t) jE [Maïs]	$Ot^j$	Croissance optimale du grain	day.	0.192897		0.192897	0.192897	0.192897	98.2022
	$Dt^j$	Dev. e croissance du grain de temps	d	77.4571		100.205	91.9069	88.7221	0.192897
jE [haricot commun]					0.192897	0.171297		8.21552	83.4665
					71.7393	83.6754		0.0187525	25.2556
Fonction temps f'3 (t) nodules	$Od_{nod}^j$	Croissance des nodules en temps optimal	d		5	21.5778			0.0363329
	$Dd_{nod}^j$		d		0.0190014	0.0241174		26,52	38,18
MB jE [Maïs]	$C_{MB}^0$	Croissance des nodules en temps de développement	g.C.m <sup>-2</sup>	1,018		1,079	0,4199		60
jE [haricot commun]					60	30,01			4066
x valeurs initiales		MB-C à l'état d'équilibre				495,05			438,76
humus jE [maïs]	HL		g.C.m <sup>-2</sup>	590,93		154,11	453,85	14,69	73,99
	HS	Humus labile	g.C.m <sup>-2</sup>	92,58	261,81	547,71	40,45	287,12	159,62
jE [haricot commun]		Humus stable			2725	538,36			150
						0			50
x valeurs initiales	VSI		g.C.m <sup>-2</sup>	64,2224		50	5		5
débris végétaux	VS2	de racines de céréales	g.C.m <sup>-2</sup>	50		0	50		50
jE [Maïs]	VS3	de racines de légumineuses	g.C.m <sup>-2</sup>	51,9987		50	0	50	50
	VS4	de litière de céréales	g.C.m <sup>-2</sup>	50	50	50	50	250	249,932
jE [haricot commun]		de litière de légumineuses			180,505	74,3095		50	50
					50	50		234,734	123,774
					250	23,426			

**Tableau 2** : Paramètres éco-physiologiques et valeurs initiales des compartiments C du sol des systèmes de culture du site 2 (S2)

Fonction	Paramètres			Système de culture					
	Symbole	Description	Unité	2012			2013		
				Maïs	Haricot commun	interc	Maïs	Haricot commun	interc
Paramètres de croissance	$\tau$	Taux relatif de croissance	day <sup>-1</sup>	0.408294		0.292701	0.578086		0.19575
jE [Maïs]				0.459851					
	$\tau_{AR}$	Taux d'attribution aux racines	-			0.198952	0.737044		0.30918
				0.315711					
	$\tau_{AG}$	Taux de transfert au grain	-	2396,4574		0.911046	0.720066		0.73094
	maxy	Production maximale	g.C.m <sup>-2</sup>	0,042518		2146,5199	1805,4444		1739,64
Mortalité									
	$\tau_{Rm}$	Taux de mortalité racinaire	d <sup>-1</sup>	0,0212283		0.0197883	0.0999364		0.01288
							0.0999364		
	$\tau_{Am}$	Taux de mortalité aérienne	d <sup>-1</sup>	0,1		0.103249			0.04409
							5.364e-006		
	$\tau_{Rr}$	taux resp Racinaire de la céréale	d <sup>-1</sup>			0.0442501			0.04873
Respiration									
	$\tau$	Taux relatif de croissance	d <sup>-1</sup>		0.285687	0.281214		0.380171	0.40022
Paramètres de croissance									
	$\tau_{AR}$	Taux d'attribution aux racines	-		0.322161	0.315416		0.405036	0.43845
jE [haricot commun]									
	$\tau_{AG}$	Taux de transfert au grain	-		0.762608	0.551716		0.89801	0.99980
	$\tau_{nod}$	Taux d'attribution à Nodule	-		0.0195036	0.0013104		0.0017432	0.00131
	maxy	Production maximale.	g.C.m <sup>-2</sup>		493,88102	487,74411		429,92734	439,566
Mortalité									
	$\tau_{Rm}$	Taux de mortalité racinaire	d <sup>-1</sup>		0.1	0.1		0.0697939	0.1
	$\tau_{Am}$	Taux de mortalité aérienne	d <sup>-1</sup>		0.013827	0.1		0.373444	2.0e-005
	$\tau_{mod}$	Taux de mortalité des nodules	d <sup>-1</sup>		0.1	0.1		0.1	0.1
Respiration									
	$\tau_{Rr}$	Taux de resp racine, légumineuse	d <sup>-1</sup>		0.1	0.1		0.1	0.093158
Incorporation de litière									
	$\tau_{incorp}$	Taux d'incorporation de la litière au sol	d <sup>-1</sup>	0,536596					
jE [Maïs]							0.005		
						0.0006539			1,00E-05
jE [haricot commun]									
				0,192897	0.999866	1		1.059e-006	1.002e-006
Fonction de temps fl (t)							0.192897		
	$Ot^i$	Croissance optimale du grain	day.	97,7392		0.192897			0.171297
jE [Maïs]							101.558		
	$Dt^i$	Devlp. croissance du grain de temps	d			86.5532			79.6299
jE [haricot commun]									
					0.192897	0.1294989.		0.192897	0.129494
					91.3891	75.81		84.408	107.503
Fonction temps f'3 (t) nodules									
	$Ot_{nod}^i$	Croissance des nodules en temps optimal	d		1.66909	29.8152		5	30
MB jE [Maïs]									
	$Dt_{nod}^i$		d	1	0.0368646	0.0288928		0.028075	0.0359853
jE [haricot commun]							1		
	$C_{MB}^0$	Croissance des nodules en temps de développement	g.C.m <sup>-2</sup>			60			60
x valeurs initiales				3253	60	1,996		1,001	8,362
humus jE [maïs]							569,18		
	HL	MB-C à l'état d'équilibre	g.C.m <sup>-2</sup>	1120		394,38		3852	27,45
		Humus labile							
	HS		g.C.m <sup>-2</sup>			602,26			299,19
jE [haricot commun]									
		Humus stable			0,0405	124,54		50,01	21,13
				160,3	904,74	479,33		32,64	290,42
x valeurs initiales							210,947		
	VS1	de racines de céréales	g.C.m <sup>-2</sup>	50		118.232			10
débris végétaux									
	VS2	de racines de légumineuses	g.C.m <sup>-2</sup>	246.059		50		50	50

**Tableau 3 :** Paramètres éco-physiologiques et valeurs initiales d' N du sol des compartiments du système de culture en S1. Seules les valeurs de N maxy j sont mesurées sur le site ; les autres valeurs sont optimisées pour la meilleure prédiction de l'ensemble de données.

Function	Parameter			Cropping system						
				2012			2013			
				Symbol	Description	Units	Maize	Common bean	interc	Maize
Growth parameters	$\tau_{NRA}$	Inorganic N absorption rate	$g^{-1}root\ C\ d^{-1}$	0.0185		0.0863525	0.0740481			0.1
j? [Maize]	Nmaxy	Maximal N production	$d^{-1}$	59,572212		66,228668	53,671781			35,453833
	$\tau_{NRS}$	N transfer rate to shoots	$d^{-1}$	0.564497		0.691083	0.355113			0.403944
	$i_{NPN}$	N net production	$d^{-1}$	1.235e-005		0.0001	0.0008546			0.0001624
Growth parameters	$\tau_{NRA}$	Inorganic N absorption rate	$g^{-1}root\ C\ d^{-1}$		0.0677254	0.0004227		0.0739965	0.0045841	
j? [Common bean]	Nmaxy	Maximal N production	$d^{-1}$		48,761185	18,808593		43,025570	13,323133	
	$\tau_{NRS}$	N transfer rate to shoots	$d^{-1}$		0.537191	0.553035		0.990001	0.53868	
	$i_{NPN}$	N net production	$d^{-1}$		8.054e-006	1.06e-006		8.06e-006	0.000262	
	$\tau_{DNF}$	Rate of symbiotic fixation	$g^{-1}N\ d^{-1}$		0.0004752	0.0008261		0.0010605	0.0016268	
	$\tau_{DNR}$	N transfer rate from nodules to root	$d^{-1}$		0.934026	0.934026		0.929653	1	
	$\tau_{MB}^0$	MB-N at steady state	$g.N.m^{-2}$	0,0705		0,086	0,0145			0,0956
					2,17	1,299		4,845	5,274	
NBM	N HL	N of Labile humus		48,38		6,805	17,1			105,28
										11,43
j? [Maize]	N HS	N of Stable humus	$g.N.m^{-2}$	4,629		3,082	1,759			
					75,82			0,0351	1,427	
j? [Common bean]			$g.N.m^{-2}$		45,42			1654	96,39	
						286,274				11.6633
C:N ratios j? [Maize]	$\tau_{MB}$	MB C:N threshold ratio for mineralization/immobilization		14.5569		12.5184	24.2031			
					12.3851			21.3738	11.1829	
j? [Common bean]			-			23.098				

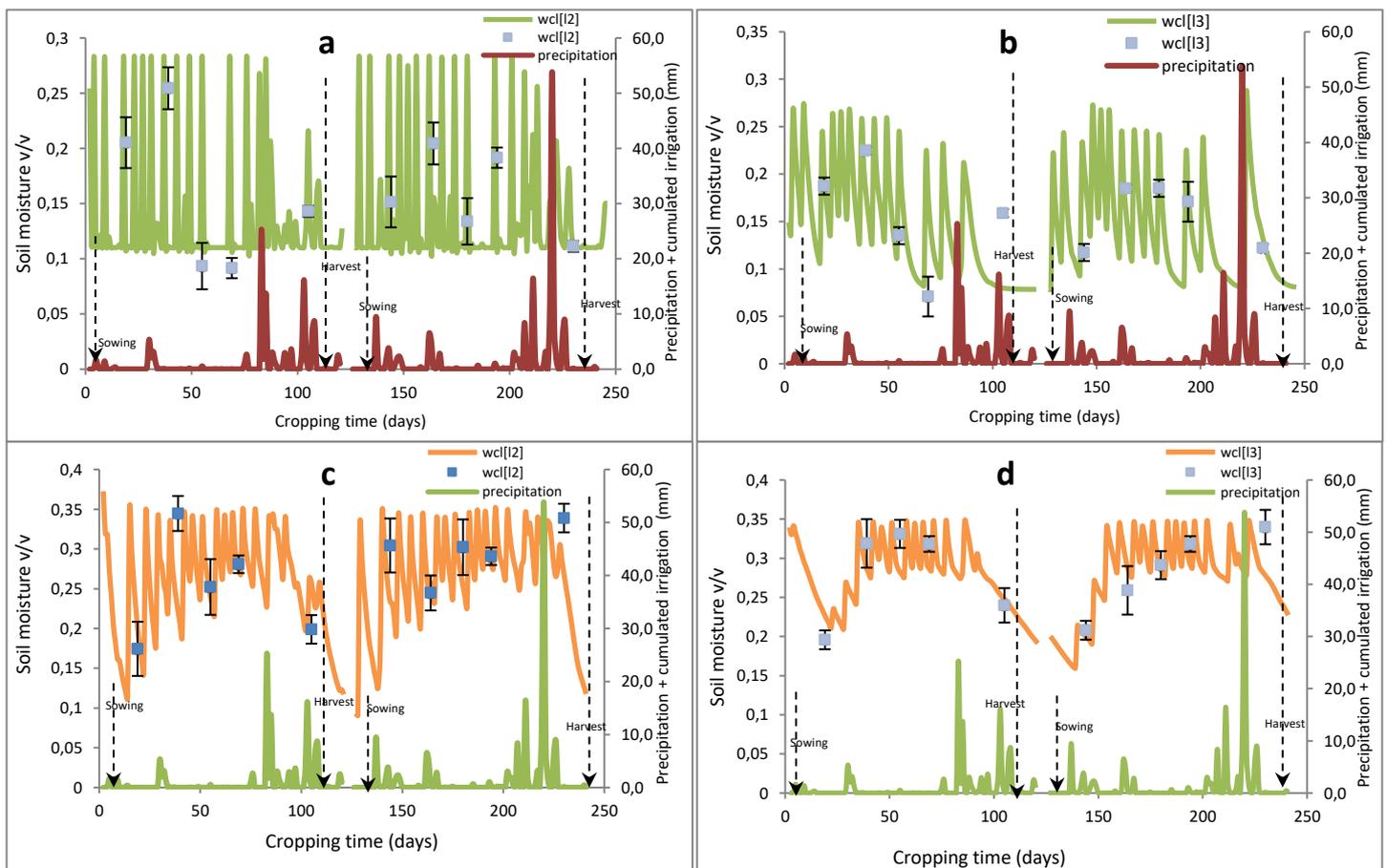
**Tableau 4** : Paramètres éco-physiologiques et valeurs initiales des N compartiments du sol des systèmes de culture en S2. Seules les valeurs de N maxyj mesurées sur le site ; les autres valeurs sont optimisées pour la meilleure prédiction de l'ensemble de données.

Function	Parameter			Cropping system					
				2012			2013		
				Symbol	Description	Units	Maize	Common bean	interc
Growth parameters	$\tau_{NRA}$	Inorganic N absorption rate	$g^{-1}root\ C\ d^{-1}$	0,0519776		0.0708273	0,012077		0.0505991
j? [Maize]	$N_{maxy}$	Maximal N production	$d^{-1}$	99,16639		73,473986	75,692763		59,147276
	$\tau_{NRS}$	Allocation rate to shoots	$d^{-1}$	0.988871		0.506017	0,140332		0.53562
	$i_{NPN}$	N net production	$d^{-1}$	0,0011246		0.0007275	0.025935		0.00014
						0.0014304			
Growth parameters	$\tau_{NRA}$	Inorganic N absorption rate	$g^{-1}root\ C\ d^{-1}$	0.00118		0.0280959	0.0013868		
j? [Common bean]	$N_{maxy}$	Maximal N production	$d^{-1}$	49,404378		42,068523	43,945444		36,488246
	$\tau_{NRS}$	Allocation rate to shoots	$d^{-1}$	0.979823		0.640205	0.525554		
	$i_{NPN}$	N net production	$d^{-1}$	1.06e-006		1,00E-05	1.096e-006		
	$\tau_{NRF}$	Rate of symbiotic fixation	$g^{-1}N\ d^{-1}$	0.0111623		0.0026919	0.0004790		
	$\tau_{NRR}$	N transfer rate from nodules to root	$d^{-1}$	1		0.934026	0.935963		
	$\tau_{NMB}^0$	MB-N at steady state	$g.N.m^{-2}$	0,064		4,873	4,576		
						0,126	0,6499		
						3,832	0,0894		
NBM	N HL	N of Labile humus	$g.N.m^{-2}$	106,43		14,03	24,16		
						28,35	5,986		
j? [Maize]	N HS	N of Stable humus	$g.N.m^{-2}$	18,66		77,05			
						0,3932	0,0689		
j? [Common bean]						0,1604	0,2235		
						496,77	217,87		
						13213	49,83		
						22.2492	12.2835		
C:N ratios j? [Maize]	$\tau_{NMB}$	MB C:N threshold ratio for mineralization/immobilization	-	15,6308		22,0261			
						15.8151	15.0422		
j? [Common bean]						15.9635	11.2426		

### 3 Résultats

#### 3.1 Teneur quotidienne en eau du sol

Les valeurs mesurées de la teneur en eau des couches du sol (5–10 cm, wcl2) et (15–30 cm, wcl3) dans chaque parcelle ont été utilisées pour estimer la teneur quotidienne en eau du sol [f( $\theta$ )] (Figure.14). Ces valeurs estimées ainsi que la température journalière [f(T)] ont ensuite été liées aux paramètres du modèle (croissance végétale et transformations microbiennes). La plupart des teneurs en eau mesurées concordent avec les valeurs prévues par le modèle SAHEL pour les deux sites, S1 (Figure. 14a : wcl 2 et b : wcl3) et S2 (Figure. 14 c : wcl 2 et d : wcl3) sur l'ensemble du cycle de culture. On a estimé que la couche de wcl2 contenait 0,11-0,29 mm/mm<sup>-1</sup> d'eau pour S1 et 0,11–0,37 mm/mm<sup>-1</sup> pour S2. Pour l'horizon wcl3 0,078 à 0,27 mm/mm<sup>-1</sup> d'eau en S1 et 0,01–0,35 mm/mm<sup>-1</sup> pour S2.



**Figure 14 :** La teneur en eau prévue et mesurée et les précipitations quotidiennes et cumulées dans les couches de sol de 0 à 15 cm (wcl2) et de 15 à 30 cm (wcl3) en S1 (a et b) et S2 (c et d) au cours du cycle de culture.

### 3.2 Transferts de C et N entre les plantes et les symbiotes microbiens

Pour les organes végétaux, le modèle prédit avec précision les stocks quotidiens de C et N dans les compartiments des pousses ( $Y_{CA}$ ,  $Y_{CA}$ ) et des nodules ( $Y_{Cnod}$ ,  $Y_{Nnod}$ ) à  $p < 0,05$  pendant le cycle de culture (voir les valeurs  $p$  et  $R$  dans le tableau 5), sauf pour C en S1 et N en S2 dans les nodules de la monoculture d'haricots communs (tableau. 5). Cela confirme que les stocks de C et N peuvent être simulés dans les organes végétaux pour des cycles de culture courts (maïs et haricots communs).

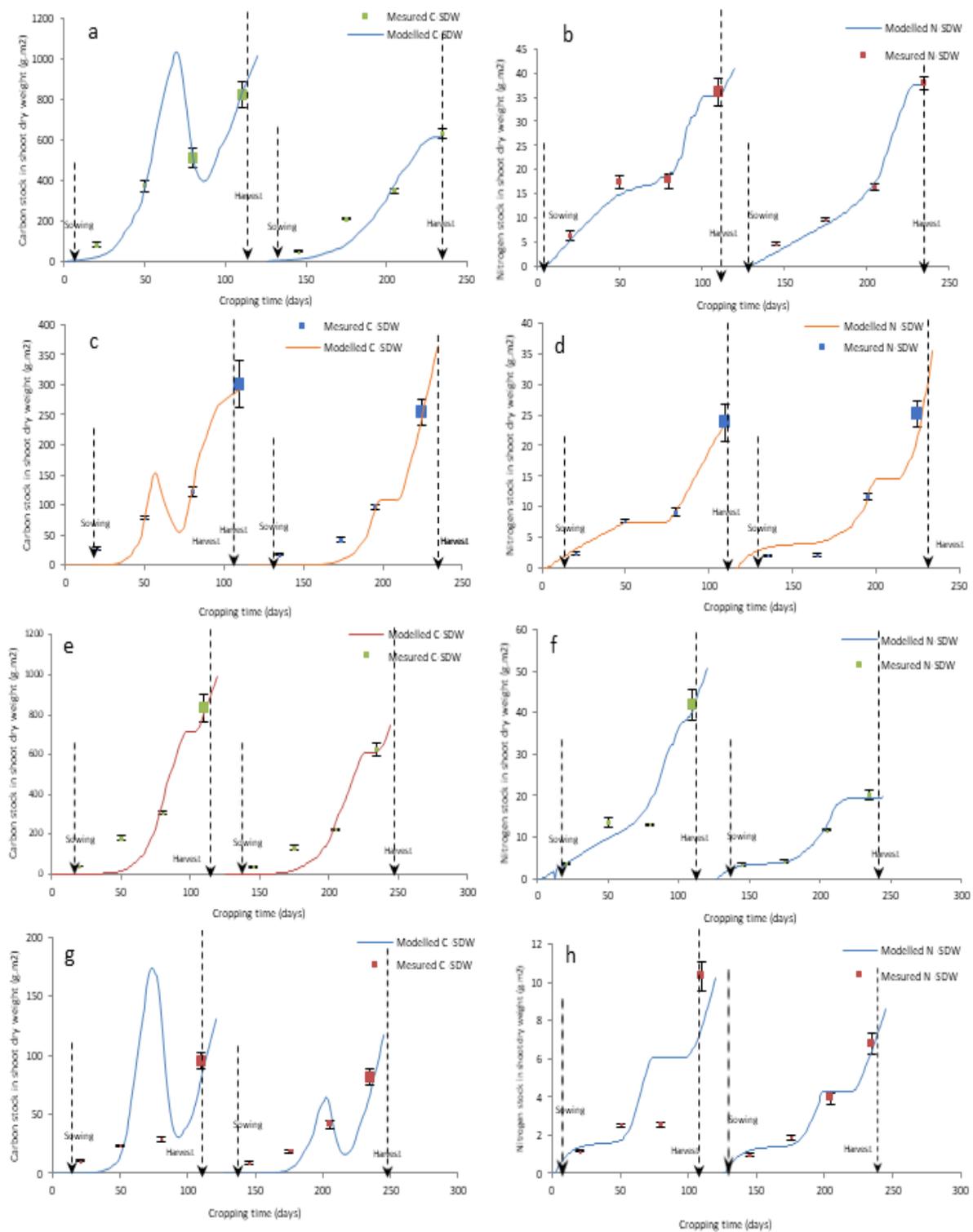
Le transfert de C et N vers les pousses (Figure.15, Figure.16) dépendait fortement du système de culture, du site expérimental et de la Campagne de culture. Après le semis, les stocks C et N commencent à augmenter progressivement durant toute la phase végétative du cycle de culture. Au stade de la floraison, le taux de transfert de C et N des racines aux pousses étaient clairement à leurs valeurs maximales. Des stocks plus élevés de C et N sont particulièrement noté pour les monocultures des deux espèces en S1 et S2. Pour le maïs en culture intercalaire, il y a eu une augmentation du stock de C (Figure 15 e et g) en S2 (sol suffisant en P).

Le taux de croissance était affecté par le système de culture et le niveau de P du sol. Il était plus élevé pour le maïs en culture intercalaire ( $+0,2 \text{ g}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ ) que pour la monoculture de maïs à S1 (déficient en P) (tableau 1), cependant, le taux de croissance était nettement plus faible pour le maïs en culture intercalaire ( $-0,4 \text{ g}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ ) que pour la monoculture de maïs à S2 (P suffisant) (Tableau 2).

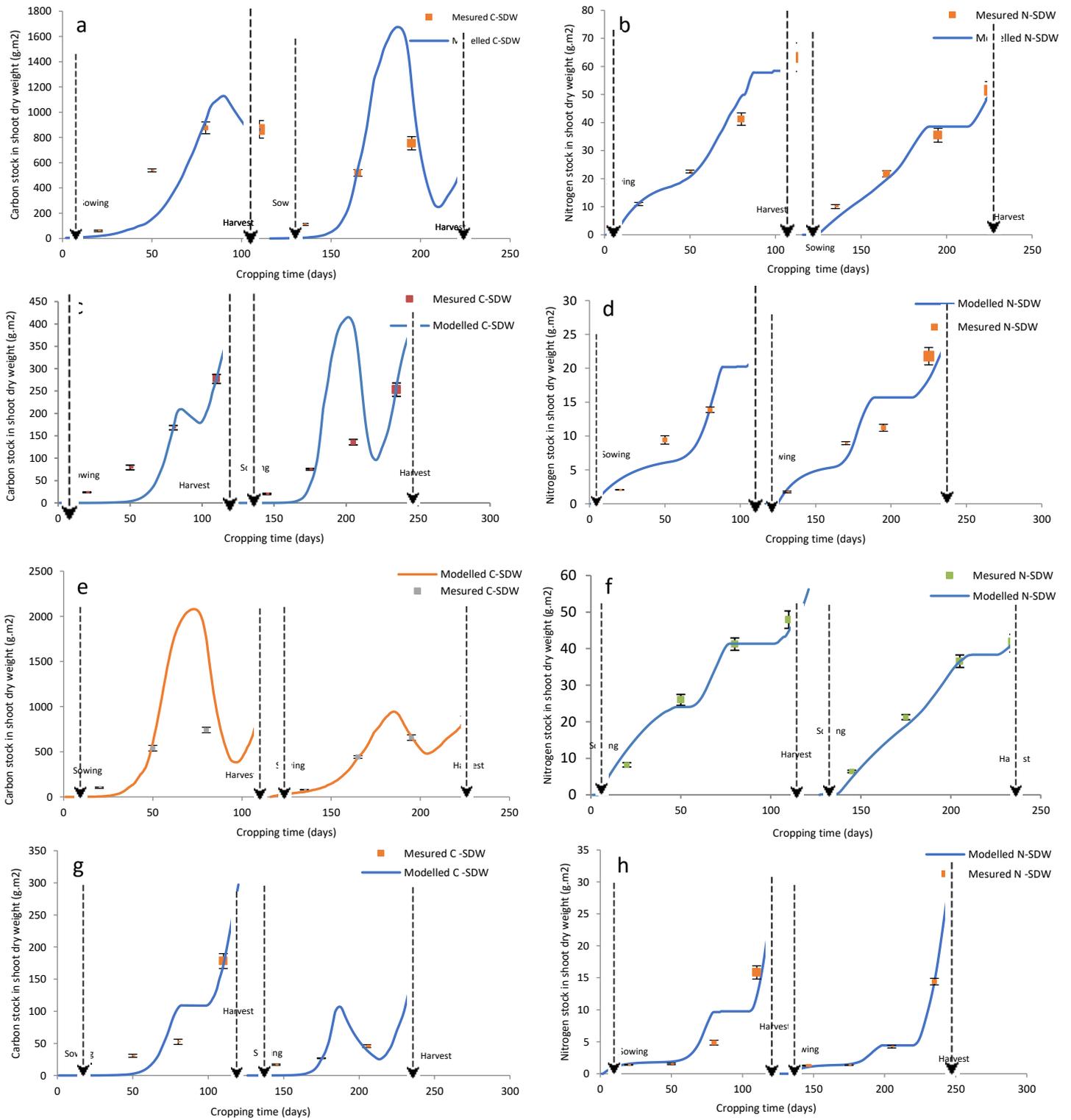
Concernant le haricot commun le taux de croissance était beaucoup plus élevé en monoculture à S1 (déficient en P) et également légèrement supérieur en S2 (P-suffisant) (tableau 2). Le taux de transfert du C aux racines était également plus élevé ( $+15 \text{ g}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ ) pour le maïs en culture associée en S1 lors de la première saison de culture (tableau 1). De plus, les taux de transfert de C aux grains de maïs étaient plus élevés ( $+0,6 \text{ g}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ ) pour les cultures associées que pour la monoculture, principalement en (S1) (tableau 2). Cependant, l'effet inverse a été observé pour les cultures de haricots communs au cours des deux années. Les taux d'absorption de l'azote inorganique par les racines étaient plus élevés pour le maïs en culture intercalaire ( $+0,060$  et  $+0,037 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{racine}} \text{ jour}^{-1}$ , respectivement en S1 et S2), alors qu'il était plus faible ( $-0,069$  et  $-0,027 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{racine}} \text{ jour}^{-1}$ , respectivement en 1 et 2) pour les haricots communs des cultures associées (Tableau 3 et 4). Le même effet a été observé pour l'attribution de N aux compartiments aériens des plantes, pour lesquels le taux de transfert de N aux pousses était plus élevé pour les cultures associées uniquement pour le maïs en S1 (2012 et 2013) et S2 (2013).

**Tableau 5 :** La corrélation ( $R^2$ ) entre les valeurs modélisées et mesurées et leurs valeurs  $p$  respectives à  $p < 0,05$  pour le maïs et le haricot commun en culture intercalaire et en monoculture pendant les deux saisons de croissance.

		BM		N BM		Respiration		$Y_{CA}$		$Y_{Cnod}$		$Y_{Nnod}$		$Y_{NA}$		
		Haricot commun	Maïs	Haricot commun	Maïs	Haricot commun	Maïs	Haricot commun	Maïs	Haricot commun	Maïs	Haricot commun	Maïs	Haricot commun	Maïs	
<b>S1</b>	Intercrop	$R^2$	0,99	0,78	0,75	0,7	0,64	0,91	0,38	0,95	0,72	–	0,98	–	0,71	0,96
		$p$ -Value	$\leq 0,001$	0,01	0,01	0,01	0,02	$\leq 0,001$	0,1	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	–	$\leq 0,001$	–	0,01	$\leq 0,001$
	Sole crop	$R^2$	0,86	0,48	0,97	0,07	0,95	0,99	0,99	0,98	0,27	–	0,84	–	0,98	0,99
		$p$ -Value	$\leq 0,001$	0,04	$\leq 0,001$	0,52	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	0,2	–	0,01	–	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$
<b>S2</b>	Intercrop	$R^2$	0,98	0,96	0,93	0,91	0,54	0,98	0,89	0,58	0,95	–	0,98	–	0,86	0,97
		$p$ -Value	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	0,03	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	0,03	$\leq 0,001$	–	$\leq 0,001$	–	0,01	$\leq 0,001$
	Sole crop	$R^2$	0,89	0,99	0,95	0,96	0,94	0,99	0,56	0,76	0,64	–	0,58	–	0,87	0,95
<b><math>p</math>-Value</b>	<b><math>p</math>-Value</b>	<b><math>\leq 0,001</math></b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,03</b>	–	<b>0,08</b>	–	<b><math>\leq 0,001</math></b>	<b><math>\leq 0,001</math></b>						



**Figure 15 :** Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et les stocks de C des pousses prévus pour les monocultures de maïs et de haricots communs (a et c) et les cultures associées de maïs et de haricots communs (e et g); stocks d'azote des pousses prévus pour les monocultures de maïs et de haricots communs (b et d) et de cultures associées de maïs et de haricots communs (f et h) à S1 en 2012 et 2013.



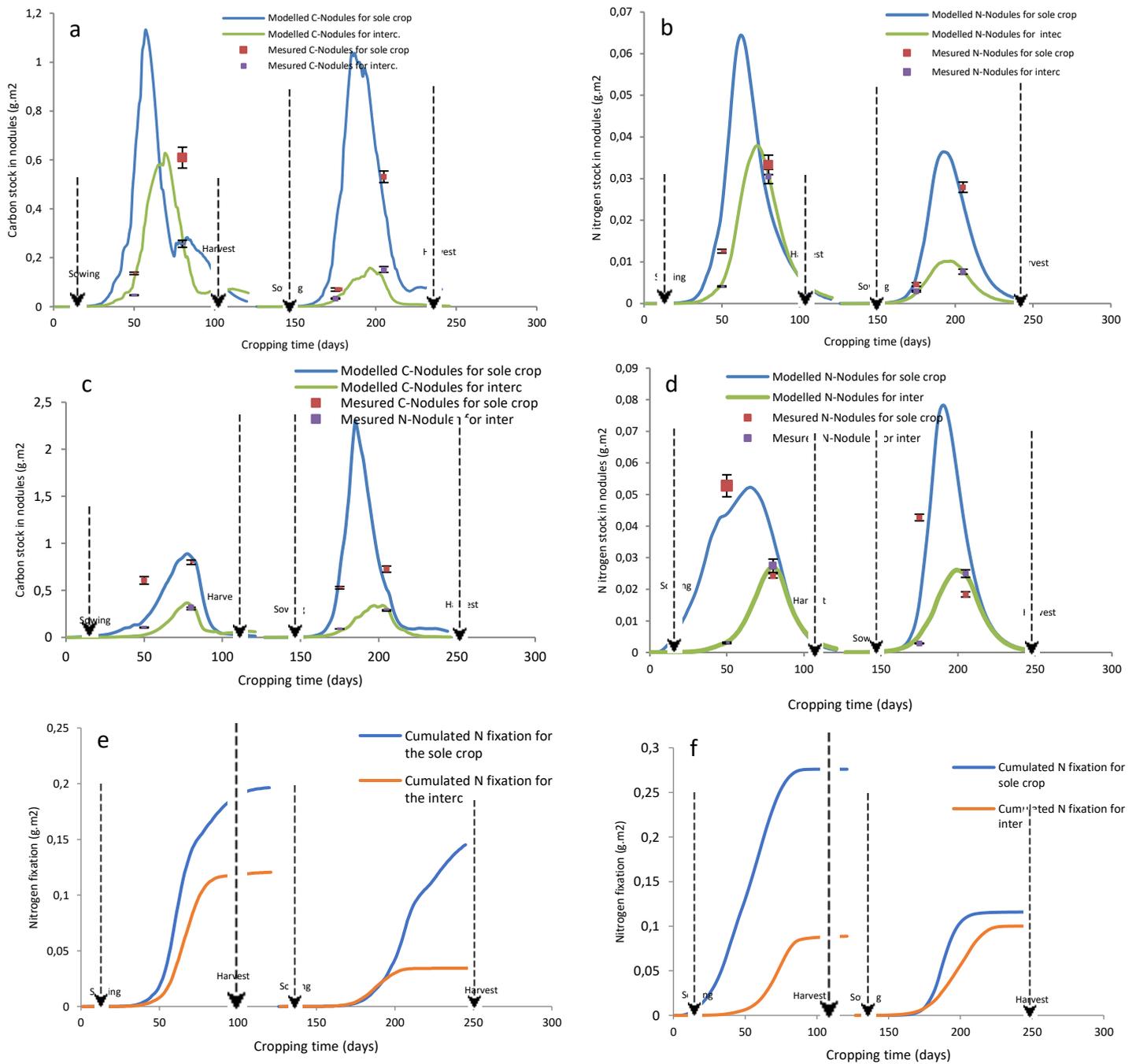
**Figure 16 :** Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et les stocks de C de pousses prévus pour les monocultures de maïs et de haricots communs (a et c) et les cultures associées de maïs et de haricots communs (e et g); stocks d'azote des pousses prévus pour les monocultures de maïs et de haricots communs (b et d) et de maïs et de haricots communs (f et h) à S2 en 2012 et 2013.

La Figure 17 a, c, b et d montre les stocks quotidiens de C et N dans les nodules des racines de haricot commun. Tous les stocks de C et de N prédits correspondaient au stock mesuré (tableau 5) dans les deux systèmes de culture pendant les deux années, à l'exception des stocks de C du site S1 en 2012. Les valeurs prédites étaient généralement plus faibles pour les cultures associées que pour les monocultures, alors qu'elles étaient égales au début de la floraison (81 DAS). La fixation cumulée de l'azote a également été prévue pour les haricots communs en culture intercalaire et en monoculture (Figure 17 e et f). Les valeurs prédites les plus élevées ont été noté au niveau des nodules de haricots communs en monocultures (0,19 et 0,28 g N m<sup>-2</sup>, respectivement en S1 et S2). Les paramètres de flux de N (tableaux 3 et 4), montre que le taux de fixation du N atmosphérique variait de 0,4 à 11 mg N g<sup>-1</sup> nod par jour en fonction des systèmes et sites de culture. Dans des conditions de sol déficientes en P (S1), le taux de fixation de N pour le haricot commun était plus élevé pour les cultures associées que pour la monoculture de plus de 0,4 mg N g<sup>-1</sup> nod (tableau 3).

Le taux de croissance était affecté par le système de culture et le niveau du P du sol. Il était plus élevé pour le maïs en culture intercalaire (+0,2 g<sup>-1</sup> jour<sup>-1</sup>) que pour la monoculture de maïs à S1 (déficient en P) (tableau 1), cependant, le taux de croissance était nettement plus faible pour le maïs en culture intercalaire (-0,4 g<sup>-1</sup> jour<sup>-1</sup>) que pour la monoculture de maïs à S2 (P suffisant) (tableau 2). Le taux de croissance du haricot commun était beaucoup plus élevé en monoculture à S1 (déficient en P) et également légèrement supérieur en S2 (P-suffisant) (tableau 2). Le taux d'allocation du C aux racines était également plus élevé (+15 g<sup>-1</sup> jour<sup>-1</sup>) pour le maïs en culture associée en S1 lors de la première saison de végétation (tableau 1). De plus, les taux de transfert de C aux grains de maïs étaient plus élevés (+0,6 g<sup>-1</sup> jour<sup>-1</sup>) pour les cultures associées que pour la monoculture, principalement en (S1) (tableau 2). Cependant, l'effet inverse a été observé pour les cultures de haricots communs au cours des deux années. Les taux d'absorption de l'azote inorganique par les racines étaient plus élevés pour le maïs en culture intercalaire (+0,060 et +0,037 g<sup>-1</sup> racine jour<sup>-1</sup>, respectivement à 1 et 2), alors qu'il était plus faible (-0,069 et -0,027 g<sup>-1</sup> racine jour<sup>-1</sup>, respectivement à 1 et 2) pour les haricots communs de cultures associées (Tableau 3 et 4). Le même effet a été observé pour l'attribution de N aux compartiments aériens des plantes, pour lesquels le taux de transfert de N aux pousses était plus élevé pour les cultures associées uniquement pour le maïs à S1 (2012 et 2013) et S2 (2013).

La Figure 17 a, c, b et d montre les stocks quotidiens de C et N dans les nodules de racine de haricot commun. Tous les stocks de C et de N prévus sont étroitement ajustés aux mesures (tableau 5) dans les deux systèmes de culture et les deux années, à l'exception des stocks de C en S1 en 2012. Les valeurs prédites étaient généralement plus faibles pour les cultures associées

que pour les monocultures, alors qu'elles étaient égales au début de la floraison (81 DAS). La fixation cumulée de l'azote a également été prévue pour les haricots communs en culture intercalaire et en monoculture (Figure 17e et 17f). Les valeurs prédites les plus élevées ont été trouvées dans les nodules des monocultures du haricot commun (0,19 et, 28 g N m<sup>-1</sup>, respectivement à S1 et S2). Les paramètres de flux N (tableaux 3 et 4), montre que le taux de fixation du N atmosphérique variait de 0,4 à 11 mg N g<sup>-1</sup> de nodule (Nod) par jour à travers les systèmes et sites de culture. Dans des conditions de sol déficientes en P (S1), le taux de fixation de N pour le haricot commun était plus élevé pour les cultures associées que pour la monoculture de plus de 0,4 mg N g<sup>-1</sup> de nod (tableau 3).



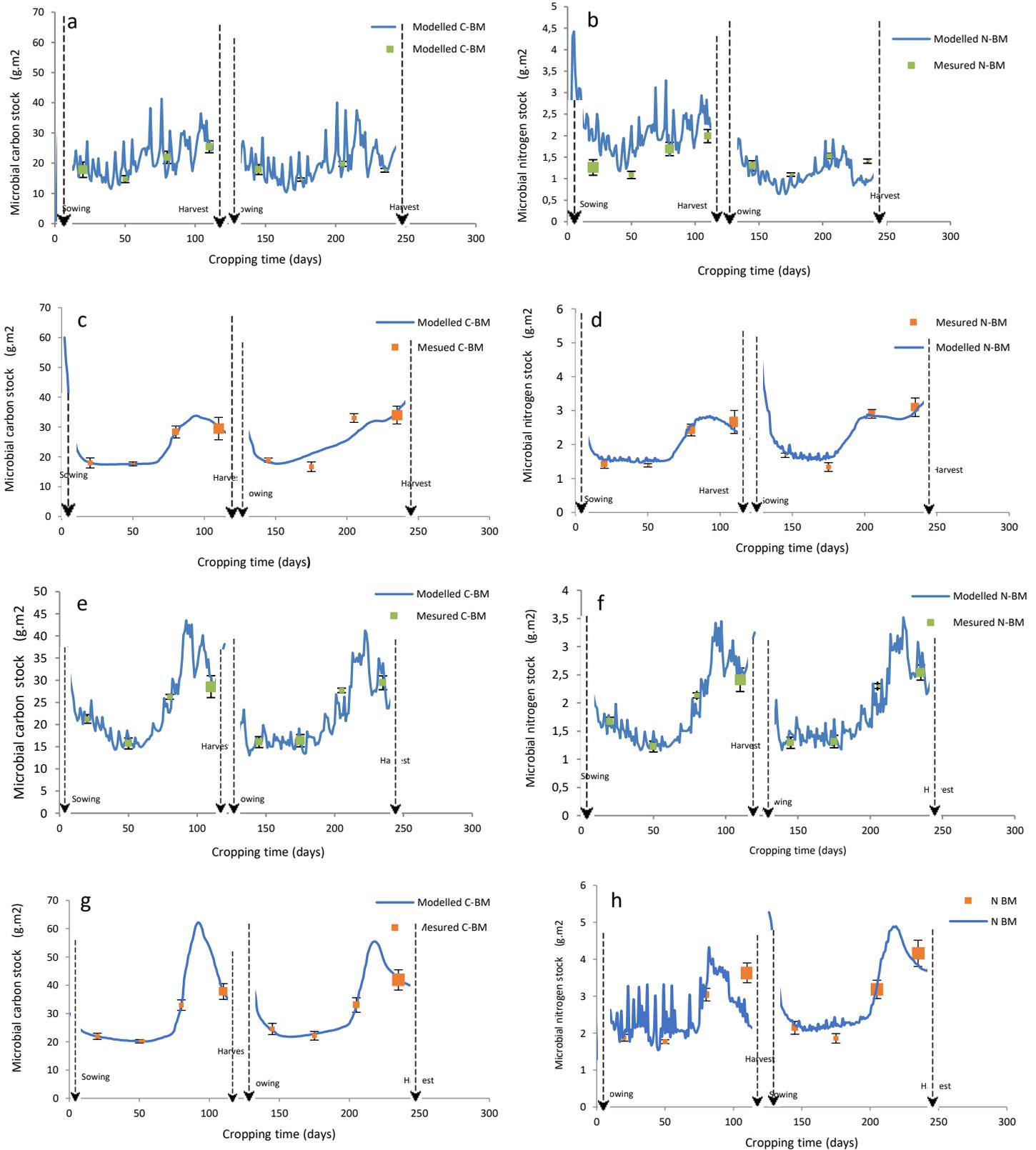
**Figure 17 :** Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et les stocks C et N des nodules prévus pour les haricots communs monocultures et intercalés en S1 (a et b) et S2 (c et d) ; prédiction de la fixation cumulée de l'azote par les mixtures des monocultures et intercropping en S1 et S2 (e et f).

### 3.3 Echanges microbiens C et N

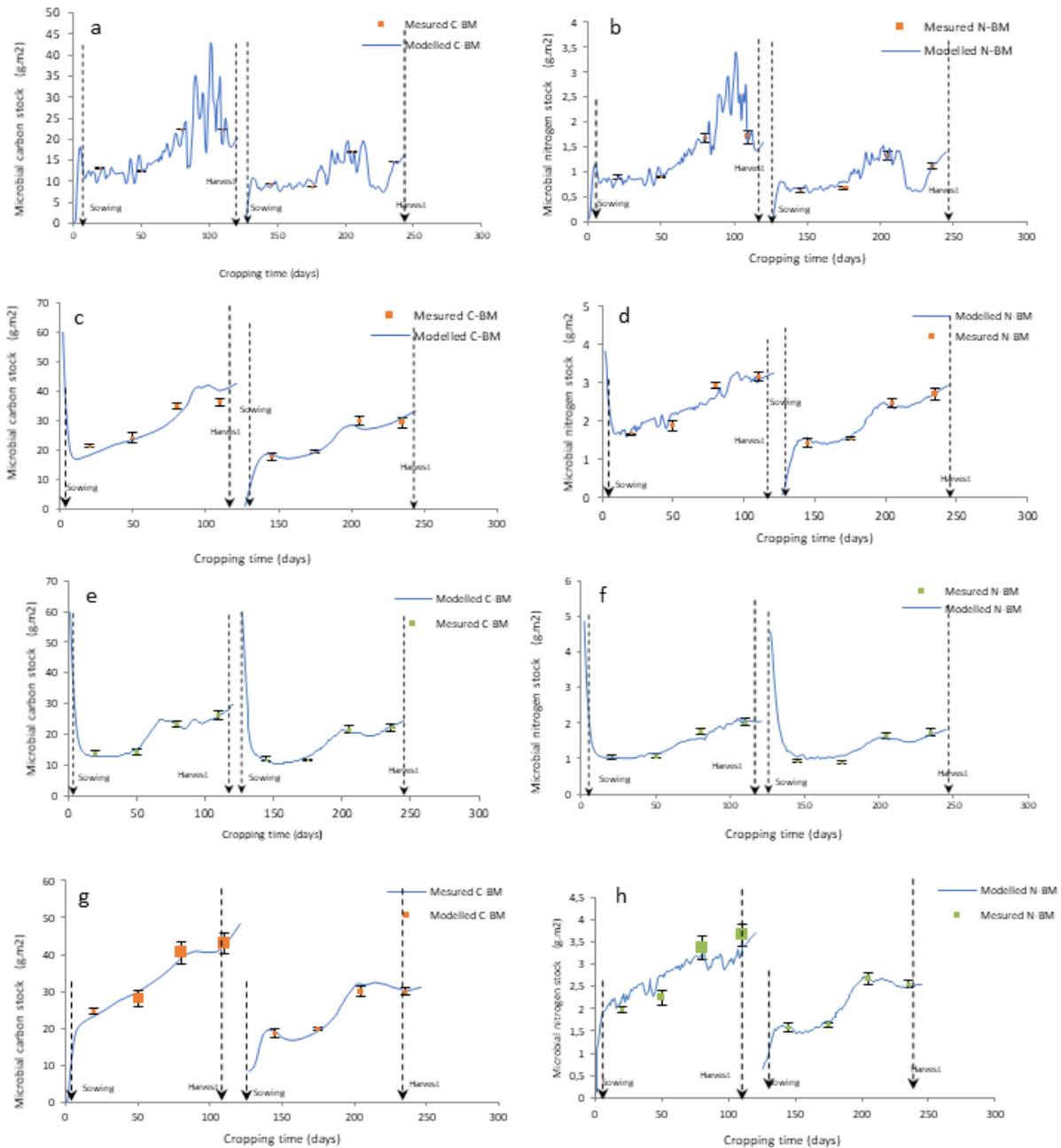
Les Figure 18 et 19 montrent les valeurs mesurées et prévues des stocks microbiens de C et N pour les deux systèmes de culture et les deux sites au cours de l'expérience de deux ans. Il y avait un ajustement significatif ( $p \leq 0,05$ ) entre les valeurs prédites et mesurées (voir les valeurs de R dans le tableau 5) pour les deux systèmes de culture et les deux sites. La plupart des valeurs prédites de CN-MB montrent une légère diminution quelques jours seulement après le semis.

Cela pourrait être lié au travail du sol qui perturbe les communautés microbiennes. À environ 51 DAS, le CN-MB prévu a augmenté pour atteindre en moyenne 15 à 45 g C m<sup>-2</sup> et 1 à 3 g N m<sup>-2</sup> (51 à 112 DAS) pour C-BM et N-MB, respectivement. Pour les deux Campagnes de culture, les valeurs maximales de C-MB et N-MB étaient beaucoup plus élevées pour les deux espèces associées en S1 (déficient en P) (Figure. 18 e-h). Cette augmentation apparaît plus prononcée pour le haricot commun (+51 et + 34%, respectivement pour C-BM et N-MB) que pour le maïs (Figure. 18 c, d, g et h). De plus, l'étalonnage a donné un bon ajustement pour la minéralisation et l'immobilisation du N inorganique (tableaux 3 et 4). Le rapport C/N (minéralisation / immobilisation) prévu pour les micro-organismes vivants était plus élevé dans les monocultures que dans les cultures associées en S1, sauf pour la monoculture de haricot commun en 2012 (tableau 3). Pour S1, les valeurs les plus élevées de N labile dans l'humus (N HL) concernaient les monocultures des deux espèces en 2012 et les cultures associées en 2013 (tableau 3). Le contraire a été trouvé pour les haricots communs en 2012.

Cependant, les valeurs prédites de N HL étaient nettement plus élevées (+28,1 et +4,9 g N m<sup>-2</sup> en 2012 et 2013 respectivement) pour le haricot commun en culture intercalaire à S2 (tableau 4). Le N stable dans l'humus (N HS) prévu était beaucoup plus élevé pour les cultures associées (de 4 à 21 et de 45 à 286 g C m<sup>-2</sup> pour le maïs et les haricots communs, respectivement) en S1 Campagne 2012. Cependant, il était plus faible pour les cultures associées pour les deux espèces (de 1,75 à 1,42 et de 165 à 96 pour le maïs et les haricots communs, respectivement) en 2013 (tableau 3).



**Figure 18 :** Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et les stocks de C-MB prévus en S1 pour les monocultures de maïs et de haricot commun (a et c) et de maïs et de haricot commun (e et g). Et prévu les stocks de N-MB en S1 pour les monocultures de maïs et de haricots communs (b et d), et de cultures associées de maïs et de haricots communs (f et h) en 2012 et 2013.



**Figure 19 :** Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et les stocks de C-MB prévus en S1 pour les monocultures de maïs et de haricot commun (a et c) et de maïs et de haricot commun (e et g). Et prévu les stocks de N-MB en S2 pour les monocultures de maïs et de haricots communs (b et d), et de cultures associées de maïs et de haricots communs (f et h) en 2012 et 2013.

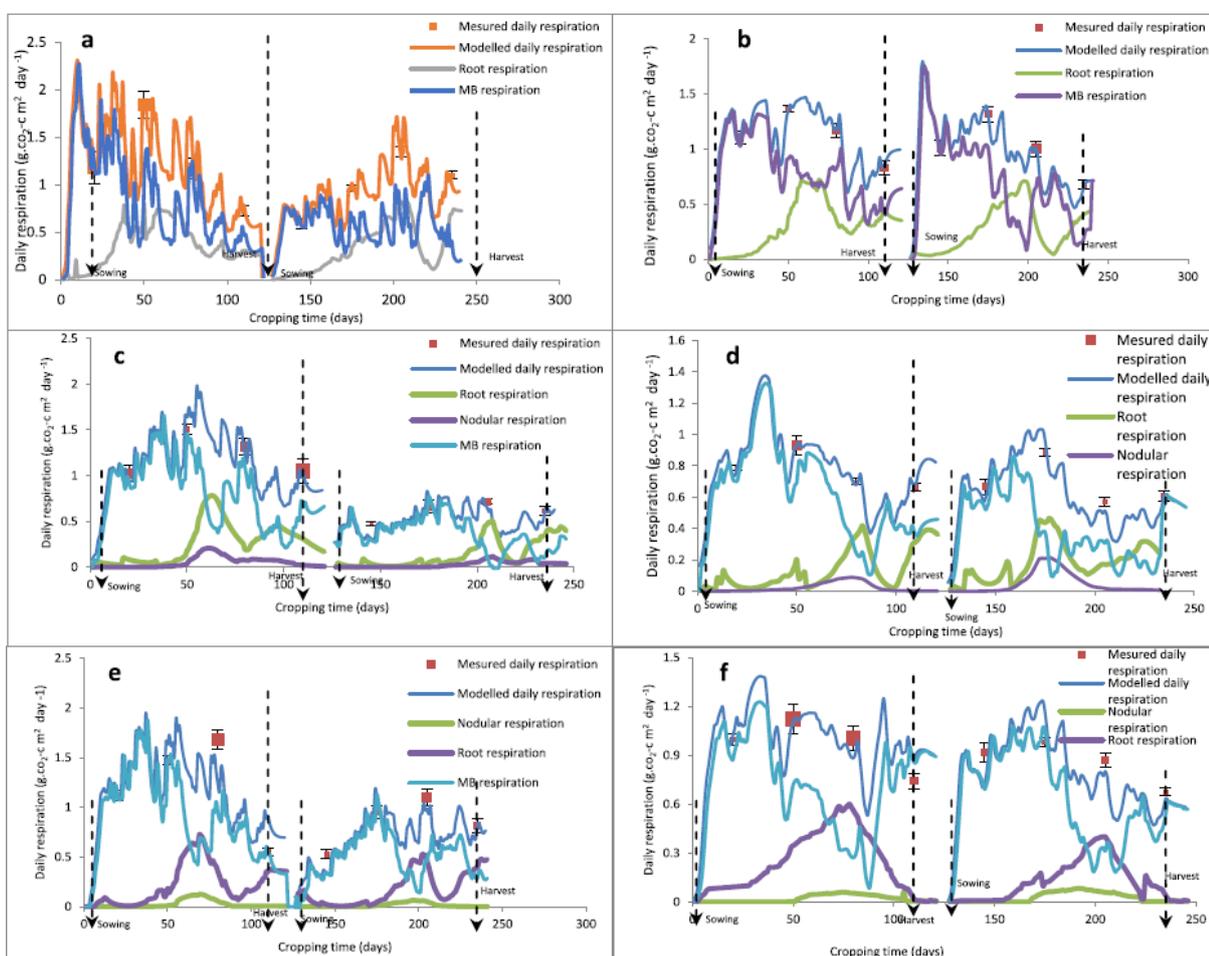
### 3.4 C respirations du sol et des plantes vers l'atmosphère

Les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de la surface du sol vers l'atmosphère sont considérées comme un indicateur clé pour évaluer l'activité biologique des micro-organismes du sol et des symbiotes végétaux. La Figure 20 montre le flux mesuré de CO<sub>2</sub> du sol et la respiration prévue des organes végétaux (nodule et racine) et des micro-organismes. Les données mesurées

sur les deux périodes correspondaient significativement à la simulation du modèle à  $p < 0,001$  ( $R = +0,90$ ) pour les deux systèmes de culture et les deux sites (tableau 5).

Pour les deux espèces, la respiration microbienne prédite a augmenté progressivement du semis au début de la floraison. De la floraison au stade de formation des grains (51 à 100 DAS), la respiration microbienne prédite a diminué, sauf à S1 en 2012 (Figure 20 a, 20 c et 20 e), tandis que la respiration prédite des racines et des nodules a fortement augmenté pendant la floraison.

Période (51 à 81 DAS), et il était beaucoup plus élevé pour les monocultures que pour les cultures associées (Figure. 20). La respiration des racines prévue était beaucoup plus faible (moins de  $0,064 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ ) à la fois pour le maïs en culture intercalaire en S2 et le haricot commun en S1, en particulier en 2012 (Tableau 1 et 2).



**Figure 20 :** Les valeurs mesurées, les intervalles de confiance à 95% et la respiration quotidienne prévue (micro-organismes, nodules et racines) pour la monoculture de maïs à S1 et S2 (a et b), la monoculture de haricots communs (c et d) et les cultures intercalaires de maïs et de haricots communs (e et f).

## 4 Discussion

### 4.1 Robustesse du modèle paramétré et validé

Le paramétrage du modèle est considéré comme l'étape la plus importante de l'approche de modélisation. La plupart des modèles agro écologiques développés au cours des dernières décennies ne sont pas basés sur des processus mécanistes plausibles décrivant les transferts microbiens de C et N entre les compartiments de l'agro écosystème (Philippot et *al.*, 2013 ; Wu et *al.*, 2012 ; Pansu et *al.*, 2018 ). Les articles de recherche récents ont proposé des méthodes de modélisation comme une nouvelle façon de simuler les flux de C et N avec des modèles validés sur des données collectées auprès de diverses espèces de cultures. Cependant, on sait peu de choses sur l'extrapolation de ces modèles sur le terrain, en particulier pour les systèmes de cultures associées céréales-légumineuses (Corre-Hellou et *al.*, 2009 ; Ibrahim et *al.*, 2013 ; Pansu et *al.*, 2018 ). En tant que premier modèle basé sur le fonctionnement agro écologique du système plante-microorganisme, la robustesse du modèle MOMOS a été confirmée en milieu tropical acide (Pansu et *al.*, 2014 ) et récemment en conditions alcalines méditerranéennes (Ibrahim et *al.*, 2016 ; Pansu et *al.*, 2018 ). Cet article donne la première paramétrisation et validation du modèle MOMOS à l'échelle des parcelles agricoles dans le bassin sud méditerranéen. La prédiction des échanges globale de C et N pour chaque compartiment (plante, sol et microorganismes) correspondait aux valeurs mesurées à  $p < 0,05$ . Cela a été confirmé sur les deux sites et les deux systèmes de culture au cours de deux saisons de croissance successives. Les améliorations dans les prédictions du modèle étaient probablement le résultat de la nouvelle formulation (équations (16) et (20) et des équations d'optimisation 15, 17, 18, 23, 24 et 26) de certaines équations du modèle, qui a été proposé par Ibrahim et *al.* (2016) et Pansu et *al.* (2018). Le modèle avec les paramètres éco physiologiques les mieux adaptés (tableaux 1 à 4) a prédit avec succès toutes les variables d'état (flux de C et N) mesurées à différents stades de croissance du maïs et haricot commun en culture intercalaire.

### 4.2 Echanges C et N et production végétale

Le taux de croissance prévu pour le maïs et le haricot en association était plus élevé que celui prévu pour le blé dur et la féverole par Ibrahim et *al.* (2016), ce qui est probablement dû (i) à leur faible fertilité des sols, dans lesquels la féverole et le blé ont été cultivés en association dans des parcelles qui n'avaient pas été fertilisées depuis 13 ans ; (ii) la féverole et le blé ayant des taux de C de photosynthèse inférieurs à ceux du maïs ou du haricot commun (Ibrahim et *al.*, 2016), respectivement. Dans un sol déficient en P, le taux d'absorption de N inorganique ( $\tau_{NRA}^j$  dans les tableaux 3 et 4) par le maïs en culture intercalaire était plus élevée ( $> +0,037 \text{ g}^{-1} \text{ C racinaire jour}^{-1}$ ) que le maïs monoculture et l'allocation de C aux racines ( $\tau_{AR}^j$  dans les tableaux

1 et 3) était également plus élevée, indiquant que le maïs en culture intercalaire mobilisait le C pour la croissance des racines afin de rechercher des nutriments. Pour le maïs, le taux d'absorption de N inorganique était plus élevé pour les cultures intercalaires à la fois en S1 et en S2, ce qui indique également une augmentation de l'allocation de C aux racines, en particulier dans les sols déficients en P.

Ceci confirme que le C issu de la photosynthèse était préférentiellement utilisé pour favoriser la croissance des racines, pour améliorer la nutrition azotée des céréales associées. Les meilleurs taux d'allocation de C photosynthétique étaient en accord avec ceux rapportés pour la luzerne (El-Metwally et Abdelhamid, 2008), la féverole et le blé dur (Ibrahim et *al.*, 2016). L'allocation C aux graines ( $\text{grains}\tau_{AG}^j$ ) était également plus élevée pour le maïs en culture associée, probablement en raison de l'absorption plus élevée de N par les racines, qui a été transféré plus rapidement des racines aux pousses dans les céréales associées que dans les légumineuses associées, puis des pousses aux graines. Ceci montre la demande plus élevée de N par la céréale intercalaire qui n'était pas satisfaite par la fixation biologique de N (faible fixation de N pour la culture intercalaire, Figure. 17 e et 17 f).

L'augmentation du rendement en grains des céréales associées a été récemment signalée lors de la culture associée de niébé et de maïs (Latati et *al.*, 2014), de féverole et de blé dur (Messaoudi et *al.*, 2020) et de luzerne et de maïs (Sun et *al.*, 2019).

### **4.3 Transfert de C et N vers des nodules symbiotiques**

Les stocks de C et N prévus dans les nodules symbiotiques étaient plus élevés pour la monoculture de haricot commun sur les deux sites (Figure. 17). Pour les systèmes et les sites de culture, la fixation symbiotique de N par les haricots communs a été prévue comme étant à son apogée de 51 à 81 DAS. Cependant, les stocks de C et N dans les nodules commencent à s'égaliser dans les deux systèmes de culture à la fin de la pleine floraison (81 DAS). Le meilleur ajustement du taux de fixation  $\text{N}_2$  ( $\tau_{NNF}^j$ ) était beaucoup plus élevée pour les monocultures de haricots communs ( $0,012 \text{ g}^{-1} \text{ N jour}^{-1}$ ) cultivés dans un sol suffisamment P. Cependant, les valeurs les plus élevées de  $\tau_{NNF}^j$  ont été trouvées pour la culture associée ( $0,0008 \text{ g}^{-1} \text{ N jour}^{-1}$ ) dans un sol déficient en P (tableaux 3 et 4). Les meilleures valeurs de  $\tau_{NNF}^j$  concordent avec les mesures des cultures intercalaires de pois chiches et de blé dur (Betencourt et *al.*, 2012) ainsi que ceux du soja et blé dur (Bargaz et *al.*, 2017).

La méthode de calcul des stocks de N des nodules, le facteur  $\tau_{\text{NNF}}^j$  appliqué aux stocks C des nodules (Eq. (26)), pourrait expliquer le faible stock de N dans les nodules des haricots communs en culture intercalaire en S1 (sol déficient en P). Les valeurs de fixation journalière de N (Figure. 17 e et 17 f), montrent une valeur seuil pendant la période de fixation maximale (51 à 81 DAS). La fixation totale de  $\text{N}_2$  a été estimée à 26,31 g N m<sup>-2</sup> pour la monoculture de haricot commun en S2 (P-suffisant). Cela correspond à 263,1 kg N ha<sup>-1</sup>.

Dans cette étude, le transfert de N des nodules symbiotiques était mieux ajusté en utilisant la nouvelle formulation (Éq. (24) et (26)) du modèle MOMOS. Cela pourrait expliquer la surestimation de la fixation de N ( $\tau_{\text{NNF}}$ ) dans la version précédente par Pansu et *al.* (2018).

Dans l'ensemble, dans cette expérience, les valeurs du meilleur ajustement du paramètre  $\tau_{\text{NNR}}$  (transfert de N des nodules aux racines) étaient proches de 0,74 (2012) et de 0,75 (2013) pour le haricot commun en culture intercalaire en S1 (P-défficient). Cela indique que le N restant dans les nodules (non transféré aux racines) était d'environ de 24 à 25%. Cependant, ce pourcentage n'était que de 7 à 8% pour la monoculture de haricot commun sur le même site (tableau 3). En S2, les valeurs de  $\tau_{\text{NNR}}$  étaient proches de 1 (0% restant) pour la monoculture de haricot commun en 2012 et 2013, et elles étaient proches de 0,93 (7% restant) pour la culture intercalaire les deux années (tableau 4). Cela implique qu'une partie considérable (25%) du N fixé par les nodules a probablement été transférée vers les autres compartiments (par exemple les microorganismes) lorsque les nodules sont morts. Ce transfert n'a été confirmé que pour le haricot commun en culture intercalaire dans un sol déficient en P (S1). Ceci est en désaccord avec les conclusions de Pansu et *al.* (2018), qui ont suggéré de supprimer  $\tau_{\text{NNR}}$  du modèle car leurs valeurs étaient proches de 1 là où les féveroles étaient cultivées en culture intercalaire ou en monoculture. Des expériences récentes sur le terrain suggèrent que la fixation symbiotique du N pourrait être considérée comme une source bénéfique de N pour les microorganismes dans les rhizosphères des légumineuses, en particulier dans les sols déficients en P (Cong et *al.*, 2014 ; Glaze-Corcoran et *al.*, 2020 ).

#### **4.4 Contrôle microbien et équilibre des échanges sol-plante-atmosphère**

Les allocations de C provenant de la photosynthèse et de l'absorption des compartiments organiques sont considérées comme les principaux transferts qui contrôlent la production d'azote par les plantes et les micro-organismes, respectivement (Pansu et *al.*, 2018 ; Latati et *al.*, 2020 ). Dans cette étude, les stocks de C et N étaient beaucoup plus élevés dans la MB dans la rhizosphère des plantes associées (Figure 18 et 19). Les réserves organiques de N dans l'humus stable (HS) étaient plus élevées pour les cultures associées en 2012 (tableau 3), et elles étaient

significativement plus faibles en 2013. Cela pourrait être la plus grande réserve de C et N organiques d'origine microbienne pour soutenir les processus vitaux des micros organismes.

Ces résultats pour les cultures associées en S1 (sol déficient en P) étaient associés à (i) une augmentation du N HL d'origine microbienne, en particulier en 2013, (ii) un taux de fixation de N plus élevé ( $\tau_{NNF}$ ) avec 24% de stocks fixes de N restant dans le nodule de haricot commun en association avec un  $\tau_{NNR}$  de 76%, (iii) une diminution du seuil du rapport C/N des MB pour le maïs en culture intercalaire (MB C/N: 11,66 vs 18,20) et les haricots communs (MB C/N: 11,18 vs 15,37), indiquant une minéralisation nette en 2013, (iv) des taux d'allocation plus élevés de C photosynthétique aux racines, pousses et grains de maïs en culture intercalaire et (v) diminution des pertes de C des racines, des nodules et de la respiration du MB dans les parcelles associées. Des études récentes ont rapporté une augmentation à la fois de la fixation de l'azote et de l'azote inorganique provenant du bromure de méthyle dans la rhizosphère des cultures intercalaires de légumineuses et de céréales dans les sols déficients en P (Bargaz et al., 2017 ;Latati et al., 2017 ).

De plus, la diminution continue du N-BM de la fin de la pleine floraison à la récolte (81 à 120 DAS : 2012) confirme la minéralisation nette à court terme de la réserve de N-HS par des microorganismes décomposeurs pour les espèces intercalées. La valeur seuil de N-HS était significativement plus basse la deuxième année, ce qui indique une augmentation du N potentiellement disponible sur le long terme (300 jours). En parallèle, les meilleures valeurs prédites de la mortalité des racines du maïs ( $0,012$  à  $0,1 \text{ g}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ ) étaient inférieures à celles des racines de haricot commun correspondantes ( $0,2$  à  $0,7 \text{ g}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ ).

La carence en P (S1) double la mortalité des racines et quadruple la mortalité des nodules, en particulier pour les haricots communs en culture intercalaire. Cela pourrait conférer à la mortalité des racines et des nodules un rôle clé en fournissant une source d'énergie pour la croissance des micro-organismes (Amthor, 2000 ; Ibrahim et al., 2016 ). Cependant, les plus faibles pertes de C dues à la respiration du sol (racines, nodules et micro-organismes) dans les parcelles intercalaires peuvent probablement être dues à une efficacité d'utilisation élevée du C par les microorganismes (liée à un faible ratio de seuil C/N MB), en particulier dans les sols déficitaires en P (S1). Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés pour les études en laboratoire par Manzoni (2017) et les études de terrain par Ibrahim et al. (2016). La présente étude illustre la robustesse du modèle MOMOS, qui pourrait être considéré comme un nouvel outil pour relier les cycles N et C aux mécanismes de régulation contrôlant le fonctionnement agro écologique

des micro-organismes dans l'agro écosystème. Les investigations et les approches méthodologiques de notre étude de terrain compléteront nos connaissances existantes sur la modélisation des cycles C et N à l'échelle cellulaire (Gras et *al.*, 2011 ; Todd-Brown et *al.*, 2012).

Dans l'ensemble, la formulation actuelle du modèle semble être complémentaire de celles développées précédemment pour les cycles C (Ibrahim et *al.*, 2016 ) et N ( Pansu et *al.*, 2018 ) pour la culture intercalaire féverole-blé dur dans le nord-méditerranéen. Les nouvelles équations et l'amélioration de certaines équations de la version précédente de MOMOS ont donné un meilleur ajustement pour certains paramètres éco physiologiques, en particulier  $\tau_{NNR}$  et  $\tau_{NNF}$ .

## 5 Conclusions

Les objectifs généraux énumérés dans l'introduction ont été atteints. Le paramétrage de MOMOS a été grandement amélioré par des mesures des variables d'état (intrants végétaux, sol et météo) régulant les transferts de C et N dans deux sites agricoles aux conditions pédoclimatiques très différentes. L'extension de la partie décomposition du modèle MOMOS à l'échelle régionale (agro écosystème Sétif) a été validée avec succès en conditions alcalines méditerranéennes juste après celles réalisées à la station expérimentale de l'agro écosystème de Mauguio (Ibrahim et *al.*, 2016). Les nouvelles équations qui ont été formulées dans cette étude pour la production journalière de N et les stocks de N grains Eq. (16) et (20) sont complémentaires de celles utilisés dans les plus récentes versions publiées du modèle Ibrahim et *al.*, 2016 ;Pansu et *al.*, 2018 ). Autres équations relatives à l'échange de C et N entre les organes végétaux (Eq. (15), 17, 18, 23, 24 et (26) ont été soigneusement révisés pour améliorer les paramètres régissant les taux de transfert de C et N pour la production végétale.

Ces améliorations ont été effectuées avec un nombre limité de paramètres (par exemple, le taux de transfert de N à partir des nodules, l'allocation et la perte de C par la respiration des racines) pour s'assurer que le système d'équation n'était pas sur-paramétré.

Dans les conditions de terrain de notre expérience, cette étude donne la première estimation des taux d'échange de C et N entre les plantes, le sol, la biomasse microbienne et les symbiotes (tableaux 1 à 4) qui sont difficiles à estimer par d'autres méthodes expérimentales. Cela a permis de valider les modèles calibrés actuels (MOMOS-C et MOMOS-N) à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire, en particulier pour les espèces associées à un cycle de culture court (3 à 4 mois).

Les résultats montrent que tous les échanges quotidiens de C et N entre les organes végétaux et les micro-organismes variaient fortement entre les stades phénologiques. La variation la plus élevée se situait au stade de la floraison (50 à 81 DAS) lorsque les stocks les plus élevés de C et N des nodules et de pousses se produisaient simultanément pour les deux monocultures, en particulier dans un sol déficient en P (S1). Les transferts de C et N des nodules recommencent à augmenter à la fin de la floraison pour les deux espèces associées, en particulier dans les sols carencés en P (S1). Par la suite, les stocks de N dans les microorganismes décomposeurs ont augmenté de façon marquée avant que le N ne soit libéré par la minéralisation de nodules du haricot commun mort, stimulés principalement par la haute disponibilité de C (provenant de la mortalité des nodules) pour les activités microbiennes. Cela confirme que, dans le système de culture intercalaire, une partie considérable du N fixé est de préférence stockée dans les nodules

de la légumineuse intercalée favorisant le fonctionnement microbien, et ne bénéficiant pas à la croissance de l'une ou l'autre des espèces intercalées. La modélisation réalisée dans cette étude démontre avec succès la robustesse de cette version paramétrée MOMOS pour évaluer et analyser les mécanismes régulant les échanges globaux de C et N entre les symbiotes végétaux, le sol, la biomasse microbienne et l'atmosphère. Nous proposons donc que cette version paramétrée de MOMOS soit utilisée pour les futures études évaluant les transferts de C et N.

## **CHAPITRE III : COMPRENDRE LA REPONSE DE LA CULTURE ASSO-CIEE BLE-POIS CHICHE A LA FERTILISATION AZOTEE EN UTILI-SANT DES INDICES DE COMPETITIVITE AGRO-ECOLOGIQUES DANS DES CONDITIONS PEDOCLIMATIQUES CONTRASTEES.**

### **1 Introduction**

La culture intercalaire définie comme la culture de différentes espèces dans le même espace et au moins pendant une partie de leur saison de croissance. C'est ce système qui existait dans la nature. Cependant, la mécanisation de l'agriculture et la disponibilité de combustibles fossiles bon marché au milieu du XXe siècle ont entraîné une diminution de la prévalence de cette pratique. Attirés par les avantages à court terme et les machines modernes, les pays industrialisés ont abandonné les cultures intercalaires en échange des monocultures rationalisées (Glaze-Corcoran et *al.*, 2020), mais cela ne semble pas être un système durable, car les combustibles fossiles ont tendance à s'épuiser et ne sont pas renouvelables. De plus, la demande mondiale de production agricole et alimentaire est en constante augmentation (Latati et *al.*, 2019b) en outre, les pratiques agricoles modernes sont critiquées en raison de leurs effets destructeurs en affectant les services éco systémiques et la stabilité climatique (Loreau, et *al.*, 2012). Pour relever ces défis de la production agricole et alimentaire, un système de production novateur favorise la diversification des espèces plutôt que l'espace (c'est-à-dire le système de culture intercalaire légumineuses-céréales) pour promouvoir les services agro-écosystémiques et la résilience aux perturbations externes, aux changements agro-environnementaux et socio-économiques (Kherif et *al.*, 2021a).

Les systèmes de culture intercalaire légumineuses céréales sont considérés comme l'un des systèmes de culture les plus efficaces pouvant (i) améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources (en particulier l'eau et l'azote); (ii) accroître la résilience aux stress abiotiques tels que la sécheresse, et (iii) lutter contre les mauvaises herbes, les ravageurs et les maladies sans utilisation de pesticides (Peoples et *al.*, 2019). Grâce à la fixation des légumineuses du Diazote N<sub>2</sub> présent dans l'air, les céréales associées sont moins dépendantes des fertilisants azotés que les monocultures. En conséquence, les cultures intercalaires légumineuses-céréales font partie des solutions pour réduire les apports d'engrais azotés, plus particulièrement dans des sols à faible teneur en azote (Louarn et *al.*, 2021).

L'azote est considéré comme le principal facteur limitant après le déficit hydrique dans l'agriculture. La fertilisation azotée peut fournir un apport suffisant en N pour que la culture atteigne le rendement potentiel que les conditions climatiques réelles lui permettent (Lemaire et *al.*,

1997). Malgré une utilisation des engrais en générale, et azotés en particulier, la productivité et la qualité des cultures ne sont améliorées que lentement dans la plupart des agro écosystèmes mondiaux au cours des dernières décennies (Cai et *al.*, 2018). Une application excessive d'azote par les agriculteurs peut être liée (i) aux prix des engrais azotés qui sont relativement bon marché ; (ii) une surestimation par les agriculteurs de la quantité d'engrais azoté requise par rapport au rendement souhaitable et (iii) pertes de rendement des cultures dues au changement climatique, en particulier les changements de température et de précipitations (Wehmeye et *al.*, 2020).

Cela pourrait avoir des conséquences dramatiques sur l'environnement par la pollution des nappes phréatiques par lessivage des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ). Tout en tenant compte des effets du changement climatique, le coût des engrais azotés devrait être évalué en termes d'équivalent  $\text{CO}_2$  rejeté dans l'atmosphère par les usines d'engrais, et les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  des systèmes de culture devraient également être incluses (Lemaire et *al.*, 2008). La culture intercalaire pourrait résoudre ces problèmes car le mélange céréales-légumineuses a montré des avantages agronomiques et écologiques. La légumineuse fixe le Diazote ( $\text{N}_2$ ) grâce à la symbiose de la bactérie du genre *Rhizobia* au niveau des nodules racinaires, ce qui donne à la céréale suffisamment de N pour terminer son cycle en minimisant l'utilisation d'engrais azotés. Cela pourrait contribuer à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote par les cultures et à limiter l'utilisation excessive d'azote provenant de la fertilisation.

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur la croissance et le rendement de la culture en mélange, en particulier le taux de plantation, la disposition spatiale, la densité des plantes, le cultivar et la compétition entre les composants du mélange (Rezaei-Chianeh et *al.*, 2011). La concurrence est l'un des principaux facteurs qui affectent de manière significative à la fois la croissance et le rendement des espèces associées par rapport à la monoculture (Caballero et *al.*, 1995). Des rendements élevés sont obtenus avec les cultures associées lorsque la concurrence interspécifique est inférieure à la concurrence intra-spécifique (Zhang et *al.*, 2011). L'évaluation de la concurrence et des avantages agronomiques de la culture intercalaire dans la plupart des études a été réalisée en utilisant des indices de culture intercalaire tels que le rapport d'équivalence de surface (LER), le coefficient d'encombrement relatif (K) et le ratio de compétitivité (CR). Dans cette étude de recherche et en plus des indices cités précédemment nous avons utilisé l'indice de nutrition azotée (NNI) comme outil central pour évaluer le système de culture intercalaire.

Quelques travaux ont été réalisés sur la culture intercalaire blé-pois chiche, mais ils sont encore peu nombreux par rapport aux autres cultures intercalaires légumineuses-céréales. D'après la littérature récente, on sait peu de choses sur l'évaluation de l'intérêt des cultures intercalaires

sous différents niveaux d'engrais N appliqués dans des champs contrastés en termes de conditions pédoclimatiques.

Cette étude se concentre sur le diagnostic agro écologique des cultures de blé dur et de pois chiche, qui ont une place stratégique dans le système de production alimentaire. L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer le changement dynamique des indicateurs agro écologiques (c'est-à-dire le rendement, l'utilisation de l'espace et l'efficacité de l'utilisation de l'azote par les cultures) Nous supposons qu'en raison de la fixation biologique de N<sub>2</sub> par le pois chiche intercalé dans un sol à faible teneur en N et avec une disponibilité suffisante en eau, le rendement et l'efficacité de l'utilisation de l'azote par le blé dur intercalé peuvent être plus élevés que leurs respectifs dans la culture pure avec un faible apport d'engrais azoté.

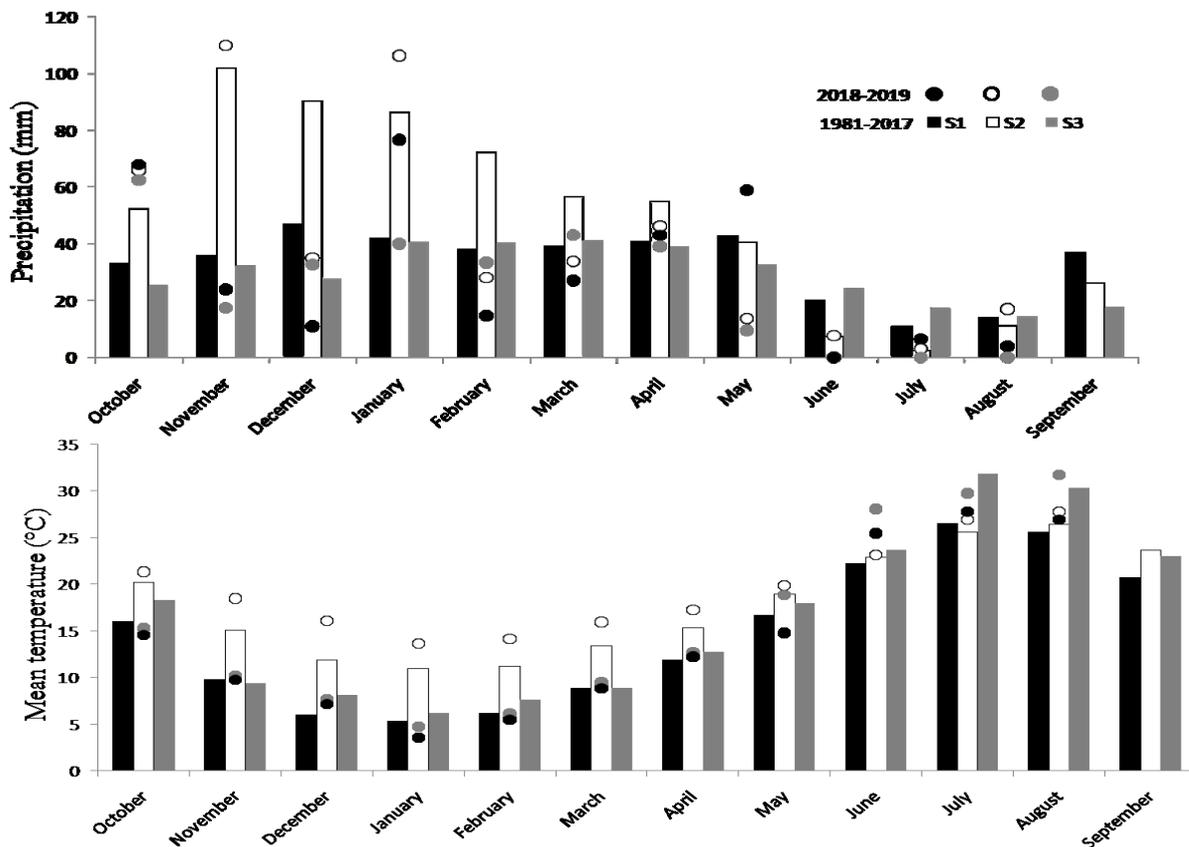
Pourrait ton fournir une meilleure décision qui peut aider les agriculteurs à optimiser l'utilisation des terres et l'application d'azote dans un système de monoculture ou de culture intercalaire ?

Afin d'apporter une réponse, cette étude se fixe trois sous-objectifs : i) Évaluer les cultures associées blé dur-pois chiches en termes d'avantages agronomiques en calculant des indices tels que le LER, Rapport d'équivalence temps surface (ATER) et l'efficacité de l'utilisation des terres (LUE) ii) Évaluer l'efficacité de l'utilisation de l'azote par chaque système de culture et identifier la dose de fertilisation optimale. iii) Mettre en évidence la compétitivité entre les deux espèces intercalées en estimant les indices REI (Indice d'efficacité relative), CR (rapport de compétition) et RCC (K) (indice de surpeuplement relatif).

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Site expérimental et conditions pédoclimatiques

Cette étude a été réalisée pendant la saison de culture de décembre 2018 à juin 2019, en plein champs sur trois sites expérimentaux : S2 est situé dans la région d'Oued Semar, au nord-est d'Alger (36 ° 42 ' N, 3 ° 09 ' E). Le S1 et le S3 sont situés respectivement au Nord (36 ° 06 ' N, 5 ° 20 ' E) et au Sud (35 ° 53 ' N, 5 ° 39 ' E) de la région de Sétif.



**Figure 21 :** Températures et précipitations mensuelles sur les saisons 2018-2019 et moyennes de la période 1981-2017 pour les trois sites expérimentaux.

Dans la Figure 21, nous avons constaté que pour S2, la somme des précipitations pendant la saison de culture était de 270,7 mm, les précipitations les plus élevées et les plus faibles ont été relevées en janvier et juin, respectivement (106,5 mm et 7,5 mm). Les températures variaient de 13,7 ° C à 23,2 ° C, avec la température la plus élevée en juin et la plus basse en janvier (27,72 ° C et 9,57 ° C, respectivement). Avec des températures variant pour les deux (S1 et S3) sites de 3,6 ° C et 4,77 ° C, respectivement en janvier jusqu'à 25,5 ° C et 25,2 ° C en juin.

La Figure 21 montre également les moyennes des précipitations et des températures sur la période 1981-2017. Nous avons remarqué les mêmes tendances des répartitions des températures et des précipitations durant la Campagne, mais avec des précipitations globalement plus faibles

et des températures plus élevées ; cela peut être lié au changement climatique et à la sécheresse de l'année.

**Tableau 6 :** Propriétés physiques et chimiques du sol des sites expérimentaux S1, S2 et S3. Les valeurs représentent la moyenne de 6 répétitions  $\pm$  SE (erreurs standard).

Sites	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	MO (%)	N assimilable		P assimilable		pH
						N Total (g kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	P Total (mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	
S1	42.5 $\pm$ 1 <sup>b</sup>	35.8 $\pm$ 1.2 <sup>a</sup>	21.7 $\pm$ 1 <sup>a</sup>	21.9 $\pm$ 0.8 <sup>a</sup>	1.2 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	1.4 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	22.9 $\pm$ 1.3 <sup>b</sup>	283.8 $\pm$ 20.4 <sup>b</sup>	9.32 $\pm$ 0.3 <sup>b</sup>	8.38 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>
S2	56.5 $\pm$ 1.4 <sup>a</sup>	35.2 $\pm$ 1.4 <sup>a</sup>	8.4 $\pm$ 0.7 <sup>b</sup>	1.1 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	1.8 $\pm$ 0.2 <sup>a</sup>	1.4 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	9 $\pm$ 0.7 <sup>c</sup>	155.6 $\pm$ 4.1 <sup>c</sup>	13 $\pm$ 0.7 <sup>a</sup>	7.9 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>
S3	49.2 $\pm$ 1.7 <sup>c</sup>	34.8 $\pm$ 1.9 <sup>a</sup>	16 $\pm$ 3.3 <sup>a</sup>	20.6 $\pm$ 0.5 <sup>a</sup>	1.9 $\pm$ 0.1 <sup>a</sup>	2.4 $\pm$ 0.2 <sup>a</sup>	35.8 $\pm$ 1.6 <sup>a</sup>	387.3 $\pm$ 10.1 <sup>a</sup>	5.37 $\pm$ 0.5 <sup>c</sup>	8.30 $\pm$ 0.07 <sup>ab</sup>
p-Value	$\leq$ 0.001	0.9	0.01	$\leq$ 0.001	0.004	$\leq$ 0.001	$\leq$ 0.001	$\leq$ 0.001	$\leq$ 0.001	0.02

Les propriétés physiques et chimiques du sol (Photo 4 et 7, Annexe 1) de chaque site étudié (tableau 6) étaient significativement différentes d'un site à l'autre, à l'exception du taux de limon. Les résultats ont montré que la proportion d'argile (de 42,5% à 56,5%) était plus élevée pour tous les sols des sites étudiés par rapport aux proportions de limon (de 34,8 à 35,8%) et de sable (de 8,4 à 21,7%). Le pH du sol variait de 7,9 à 8,38 et était beaucoup plus alcalin dans les sites expérimentaux de Sétif (S1 et S3). Le sol de S1 et S3 a également été classé comme un sol calcaire avec une teneur la plus élevée en CaCO<sub>3</sub> (de 20,6 à 21,9%) par rapport à S2 (1,1%). Les teneurs en N disponible (NH<sup>4+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et N total étaient également significativement différents d'un site à l'autre. La plus grande teneur en N a été observée au niveau du site 3 (2,4 g kg<sup>-1</sup>) et la plus faible teneur en N (1,4 g kg<sup>-1</sup>) a été mesurée à la fois sur S1 et S2. Les mêmes tendances ont été trouvées pour la matière organique du sol, le P total et la teneur en P disponible avec une différence significative entre les trois sites étudiés (tableau 6).

## 2.2 Dispositif expérimentale et choix des espèces

L'étude a été réalisée avec les variétés de pois chiche (*Cicer arietinum* L.cv. FLIP 90/13 C\*) de blé dur (*Triticum turgidum* subsp. *durum* L.cv. VITRON\*\*) qui sont couramment cultivés par les agriculteurs algériens. La conception de l'expérience est un Bloc aléatoire complet, la parcelle a été divisée en trois blocs, chaque bloc étant divisé en neuf parcelles (neuf traitements) (figure 1, annexe 1). Le système de culture et les doses d'engrais azotés ont été combinés dans chaque parcelle. Trois niveaux ont été testés pour chacun facteurs étudiés ; blé dur et pois chiches cultivé seul (pure) le troisième niveau concerne l'intercalaire des deux espèces (Intercropping). Pour le deuxième facteur dose d'engrais azoté, trois niveaux ont été choisis : 30, 60 et 100 unités ha<sup>-1</sup> (N-30, N-60 et N-100). Chaque traitement (parcelle) était composé de trois parcelles répétées d'une superficie de 25 m<sup>2</sup> chacune. La superficie totale de l'expérience était

de 1311 m<sup>2</sup> bordures comprises. La densité des plantes a été choisie en fonction des pratiques culturale locale, 300 plants/ m<sup>2</sup> pour blé dur, 30 plants/m<sup>2</sup> pour le pois chiche, alors qu'il était respectivement de 130 et 18 plants pour le blé dur et le pois chiche en association correspondant à un ratio de 1:1. Les deux espèces ont été semées en association ligne par ligne, la distance inter-rangs était de 17 cm pour le blé dur en cultures pure, alors qu'elle était de 34 cm à la fois dans les parcelles de pois chiche et en culture intercalaire, l'expérimentation a été conduite sans irrigation ni traitements herbicides.

### **Matériel végétal :**

\*\* la variété « Vitron » largement cultivée en Algérie a été choisie. Une obtention du CIMMYT (Mexique) largement cultivée en Espagne. Elle a été introduite en Algérie par l'ITGC en 1986. C'est une variété, avec une production de paille moyenne, tolérante à la rouille et à la cécidomyie.

\* Pour le pois chiche (Flip 90-13 C), est une variété en multiplication de type KABULI, avec les caractéristiques suivantes : port semi érigé, semi-tardive, tolérante à l'anthracnose, à semis hivernale.

### **2.3 Échantillonnage et mesures des plantes et des sols**

Au cours du cycle de culture, des échantillons de sol et de plantes ont été prélevés pendant trois périodes d'échantillonnage correspondant au semis, la floraison (150 jours après le semis (DAS) pour S1 et S3 et 137 DAS pour S2) et au stade de la récolte (167 DAS pour S1 et S3 et 177 DAS pour le S2) du cycle de culture (photos 1, 2, 3, annexe 1).

Trois sous-échantillons (de 0,25 m<sup>2</sup>) ont été effectués dans chaque sous parcelle, dans laquelle toutes les plantes ont été récoltées puis séparées des racines au niveau du nœud cotylédonaire. La biomasse végétale et le rendement en grains ont été séchés pendant 24h à 105 ° C, et pesés avant et après chaque opération (photo 5, annexe 1).

L'analyse physico-chimique des sols de chaque site a été réalisée par des méthodes standard. La teneur en N dans les échantillons de sol et de plantes a été déterminée par la méthode de Kjeldahl (Lynch et *al.*, 1999). Le pH du sol a été mesuré dans la suspension de sol avec de l'eau distillé (rapport sol : eau = 1 : 2,5 avec un pH-mètre (Shen et *al.*, 1996). La méthode Olsen a été utilisée pour mesurer la disponibilité de P, tandis que la teneur totale en P du sol a été déterminée en utilisant la procédure au vert de malachite, après digestion mixte par les acides perchlorique et nitrique (Valizadeh et *al.*, 2003). La matière organique dans le sol a été mesurée avec la méthode ANNE (McBratney et *al.*, 2000), tandis que la proportion de carbonate de calcium

(CaCO<sub>3</sub>) dans le sol a été déterminé en mesurant le volume de CO<sub>2</sub> selon la méthode Horton et Newson (Leo,1963) ; La teneur de N dans la biomasse totale (N-biomasse) et l'absorption d'azote par les grains (N-rendement) en t ha<sup>-1</sup> ont été estimées en multipliant la biomasse totale et le rendement en grains par leurs teneur en azote respectifs La teneur moyenne en N des graines a été soustraite de la teneur totale en N de la biomasse et des grains (Photo 9, Annexe 1).

## 2.4 Calculs.

Afin d'apprécier et d'évaluer les cultures intercalaires de pois chiche et de blé dur, nous avons utilisé des indices de compétitivité parmi ceux rapportés dans la littérature.

Le **rapport d'équivalence de surface** (LER) indique un avantage de rendement entre les systèmes de culture intercalaire et pure dans des unités de surface similaires entre les deux systèmes (Eq.1)

$$\mathbf{LER_{ab} = Y_{ab}/Y_{aa} + Y_{ba}/Y_{bb}} \quad (1)$$

Ou Y<sub>aa</sub> et Y<sub>bb</sub> sont les rendements de la mono culture pour les espèces a et b et Y<sub>ab</sub> et Y<sub>ba</sub> sont les rendements en culture intercalaire pour les espèces a et b, respectivement. Si LER<sub>ab</sub> est > 1, il y a un avantage en culture associée. (Mead et al., 1980) le LER est actuellement l'indice le plus couramment utilisé dans l'évaluation des cultures associées; Dans cette étude, les valeurs LER ont été estimées pour tous les traitements afin de mieux évaluer les performances de la culture en termes de rendement en grains et en N.

Hiebsch et al. (1887) ont développé le ratio d'équivalent temps - surface : ATER pour prendre en compte la durée du cycle des deux espèces associées (Eq 2.) L'ATER est considéré comme un indice plus réaliste que le LER où la période du cycle de culture n'est pas la même entre la culture a et la culture b.

$$\mathbf{ATER = (ATER_a + ATER_b)} \quad (2)$$

$$\mathbf{ATER_a = Y_{ab}/Y_{aa} \times T_a/T_i} \quad (3)$$

$$\mathbf{ATER_b = Y_{ba}/Y_{bb} \times T_b/T_i} \quad (4)$$

T<sub>a</sub> et T<sub>b</sub> sont les durées du cycle de culture des cultures a et b, et T<sub>i</sub> du cycle de culture en intercalaire

**L'efficacité de l'utilisation des terres** (LUE) est un calcul basé sur LER et ATER qui permet une estimation plus précise de l'efficacité d'utilisation des terres, il a été calculé selon Mason et al. (1986). Équation (Eq 5.) :

$$\mathbf{LUE = (LER+ATER)/2} \quad (5)$$

**Coefficient d'encombrement relatif** (RCC ou K) est calculé pour chaque espèce de l'intercalaire, il représente la dominance relative d'un composant de l'intercalaire sur l'autre. Le calcul du RCC a été donné dans l'équation 6 (De Wit et *al.*, 1960):

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_{ab} \times \mathbf{K}_{ba} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_{ab} = \mathbf{Y}_{ab} \times \mathbf{Z}_{ba} / [(\mathbf{Y}_{aa} - \mathbf{Y}_{ab}) \times \mathbf{Z}_{ab}] \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_{ba} = \mathbf{Y}_{ba} \times \mathbf{Z}_{aa} / [(\mathbf{Y}_{bb} - \mathbf{Y}_{ba}) \times \mathbf{Z}_{ba}] \quad (8)$$

$Z_{ab}$  correspond au rapport des superficies occupées par les espèces a et b en culture associée et  $Z_{ba}$  au rapport opposé. De plus,  $K_{ab}$  et  $K_{ba}$  sont le coefficient d'encombrement relatif de chaque culture en cultures associées.

**Ratio de compétitivité** : le CR est un indice de compétitivité qui prend en compte le LER individuel et la proportion de mélange dans la culture associée. CR a été calculé selon les Eq 9 et 10 (Willey et *al.*, 1980):

$$\mathbf{CR}_a = (\mathbf{LER}_a / \mathbf{LER}_b) \times (\mathbf{Z}_{ab} / \mathbf{Z}_{ba}) \quad (9)$$

$$\mathbf{CR}_b = (\mathbf{LER}_b / \mathbf{LER}_a) \times (\mathbf{Z}_{ba} / \mathbf{Z}_{ab}) \quad (10)$$

**Indice d'efficacité relative** : le REI est calculé pour comparer la performance relative en matière d'accumulation de matière sèche des composants des cultures associées sur un intervalle de temps ( $t_1$  et  $t_2$ ) Eq. 11 (Connolly et *al.*, 1990).

$$\mathbf{REI} = \mathbf{REI}_a / \mathbf{REI}_b \quad (11)$$

$$\mathbf{REI}_a = \mathbf{DM}_a \ t_1 / \mathbf{DM}_a \ t_2 \quad (12)$$

$$\mathbf{REI}_b = \mathbf{DM}_b \ t_1 / \mathbf{DM}_b \ t_2 \quad (13)$$

$DM_a$  et  $DM_b$  sont le totale de la biomasse aerienne (matière sèche) accumulé par les espèces a et b, respectivement. Le  $REI_a$  et le  $REI_b$  se réfèrent au changement proportionnel des deux espèces en termes de matière sèche totale.

Le NNI (**Indice de nutrition azoté**) est calculé par le rapport (équation 14) entre le N ( $N_a$ ) réel de la culture et l'absorption critique de N ( $N_c$ ). L'estimation de  $N_a$  correspond au dosage de N de la biomasse réelle des cultures  $W_a$ , tandis que  $N_c$  a été défini comme l'absorption minimale de N pour l'accumulation maximale de biomasse (Éq. 15).

$$\mathbf{NNI} = \mathbf{N}_a / \mathbf{N}_c \quad (14)$$

$$\mathbf{N}_c = \mathbf{a}_c \mathbf{W} \ \mathbf{b}^{-1} \quad (15)$$

$a_c$  étant la concentration critique en N de la plante pour  $W = 1 \text{ t ha}^{-1}$ , les coefficients  $a_c$  et  $b$  ont été déterminés (respectivement 3,4 et 0,37 pour le blé dur et 5,1 et 0,32 pour le pois chiche) par Plénet et Lemaire (Plénet, *al.*, 1999).

## **2.5 Analyses statistiques**

Les données ont été testées pour l'homogénéité de la variance avant l'analyse statistique. Les effets du traitement sur toutes les variables mesurées et les indices calculés (système de culture, niveaux d'engrais azotés et sites) ont été testés à l'aide de l'analyse factorielle de la variance (ANOVA) à une signification de  $p\text{-value} = 0,05$ . Alors que, le test de Tukey a été effectué pour identifier si la différence entre les valeurs moyennes où les traitements affectent significativement les variables. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de Statistica 8 pour Windows.

### **3 Résultats**

#### **3.1 Rendement en grains et en azote**

Pour la plupart des traitements, l'accumulation d'azote par les graines (N-grain) a été significativement affectée par le système de culture, l'engrais azoté et le traitement des cultures  $\times$  engrais azoté dans les sites étudiés (tableau 7). Ainsi, la fourchette de rendement céréalier va de 0,54 t ha<sup>-1</sup> dans le traitement N-30 pour le blé intercalaire en S1 à 6,95 t ha<sup>-1</sup> pour N-100 en S3 pour le blé dur. Tandis que le rendement grains de pois chiche enregistre des valeurs allant de 0,21 t ha<sup>-1</sup> pour le traitement N-100 dans les parcelles intercalaires de S3 à 2,43 t ha<sup>-1</sup> pour les pois chiches monoculture sous traitement N-60 en S3.

Le rendement en grains des cultures mixtes a été significativement augmenté (+ 29%) dans les parcelles de culture intercalaire en S2 et dans des conditions de faible teneur en engrais azoté (N-30 et N-60), alors qu'il a diminué (-38%) dans les sites expérimentaux de Setif (S1 et S3). Nous notons des rendements céréaliers plus élevés avec la dose N-60 pour tous les traitements de culture, sauf pour le blé cultivé en monoculture, dans lequel la dose N-100 a donné les rendements céréaliers les plus élevés (tableau 7).

Dans le cas du N-grain, la monoculture augmente significativement l'absorption de N par la culture céréalière par rapport à la culture intercalaire. En revanche, tant pour le pois chiche que pour le blé dur respectivement cultivés en S1 et S3, où le rendement en N était plus élevé (+31 et + 55% pour le pois chiche et le blé, respectivement).

En mixture, le rendement en grain ainsi que le N-grain des espèces mixtes a été significativement augmentée dans les conditions S2 et S3 par rapport à ceux enregistré dans la monoculture, où l'augmentation très prononcée (+ 46%) a été trouvée dans S3 dans les deux applications faible et modérée d'azote (tableau 7). La tendance opposée a été observée en S1 avec une diminution du rendement en céréales ou en azote pour la culture intercalaire pour les cultures de pois chiches et de blé dur.

**Tableau 7 :** Rendement céréalier et l'accumulation d'azote par les graines par le pois chiche, le blé dur et le mélange de cultures sous différents traitements culture  $\times$  N.

Sites	système	Dose N	Pois Chiche		Blé Dur		Mixture	
			Rendement Grain (t ha <sup>-1</sup> )	N-Grain (Kg ha <sup>-1</sup> )	Rendement Grain (t ha <sup>-1</sup> )	N-Grain (Kg ha <sup>-1</sup> )	Rendement Grain (t ha <sup>-1</sup> )	N-Grain (Kg ha <sup>-1</sup> )
S1	Culture pure	N-30	0.34±0.02 <sup>c</sup>	7.81±0.5 <sup>c</sup>	2.09±0.1 <sup>b</sup>	93.55±4.1 <sup>b</sup>	1.21±0.06 <sup>b</sup>	50.67±2.7 <sup>bc</sup>
		N-60	0.97±0.1 <sup>a</sup>	32.65±2.2 <sup>a</sup>	3.01±0.5 <sup>ab</sup>	75.96±5.3 <sup>b</sup>	1.99±0.2 <sup>a</sup>	54.34±4.3 <sup>b</sup>
		N-100	0.71±0.1 <sup>ab</sup>	19.52±2.1 <sup>b</sup>	3.25±0.11 <sup>a</sup>	121.11±4.2 <sup>a</sup>	1.96±0.08 <sup>a</sup>	70.31±3.1 <sup>a</sup>
	Association	N-30	0.23±0.03 <sup>d</sup>	10.27±0.3 <sup>bc</sup>	0.54±0.05 <sup>c</sup>	23.41±2.5 <sup>c</sup>	0.75±0.07 <sup>b</sup>	33.71±2.4 <sup>c</sup>
		N-60	0.65±0.1 <sup>b</sup>	23.33±3.4 <sup>a</sup>	0.60±0.04 <sup>c</sup>	13.37±1.03 <sup>c</sup>	1.26±0.1 <sup>b</sup>	36.8±3.4 <sup>bc</sup>
		N-100	0.21±0.04 <sup>d</sup>	7.97±1.6 <sup>c</sup>	0.94±0.05 <sup>c</sup>	28.52±1.4 <sup>c</sup>	1.14±0.04 <sup>b</sup>	36.1±1.4 <sup>bc</sup>
	<i>p</i> -Value	<i>Crop</i>	≤0.001	0.02	≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.001
		<i>N level</i>	≤0.001	≤0.001	≤0.01	≤0.001	≤0.001	≤0.001
		<i>Crop</i> × <i>N level</i>	0.13	0.04	0.11	≤0.001	0.37	≤0.01
S2	Culture pure	N-30	0.92±0.1 <sup>b</sup>	20.91±2.3 <sup>bc</sup>	3.82±0.3 <sup>b</sup>	58.94±3.1 <sup>ab</sup>	2.37±0.1 <sup>c</sup>	39.92±2.1 <sup>c</sup>
		N-60	1.53±0.1 <sup>a</sup>	48.08±2.7 <sup>a</sup>	4.46±0.2 <sup>ab</sup>	71.97±2.4 <sup>a</sup>	3±0.2 <sup>b</sup>	60.03±2.5 <sup>b</sup>
		N-100	0.95±0.02 <sup>b</sup>	24.58±0.6 <sup>bc</sup>	4.80±0.2 <sup>a</sup>	68.61±1.3 <sup>a</sup>	2.87±0.1 <sup>bc</sup>	46.60±1.7 <sup>bc</sup>
	Association	N-30	0.61±0.08 <sup>b</sup>	12.28±1.3 <sup>c</sup>	2.05±0.06 <sup>c</sup>	31.51±0.8 <sup>d</sup>	2.65±0.04 <sup>bc</sup>	43.80±0.9 <sup>c</sup>
		N-60	1.09±0.05 <sup>a</sup>	25.59±1.2 <sup>b</sup>	2.79±0.08 <sup>c</sup>	51.25±1.2 <sup>b</sup>	3.88±0.2 <sup>a</sup>	76.84±2.5 <sup>a</sup>
		N-100	0.78±0.07 <sup>b</sup>	26.27±2.6 <sup>b</sup>	2.02±0.1 <sup>c</sup>	43.88±2.3 <sup>c</sup>	2.79±0.07 <sup>bc</sup>	70.16±2.9 <sup>ab</sup>
	<i>p</i> -Value	<i>Crop</i>	≤0.01	≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.01	≤0.001
		<i>N level</i>	≤0.001	≤0.001	≤0.01	≤0.001	≤0.001	≤0.001
		<i>Crop</i> × <i>N level</i>	0.52	≤0.01	0.02	0.62	≤0.01	0.02
S3	Culture pure	N-30	2.16±0.08 <sup>a</sup>	48.44±1.8 <sup>a</sup>	5.47±0.8 <sup>ab</sup>	40.89±3.6 <sup>d</sup>	3.82±0.3 <sup>b</sup>	44.67±2.7 <sup>c</sup>
		N-60	2.43±0.2 <sup>a</sup>	36.98±2.3 <sup>b</sup>	6.82±0.07 <sup>a</sup>	76.44±0.8 <sup>c</sup>	4.63±0.2 <sup>ab</sup>	56.71±2.5 <sup>bc</sup>
		N-100	1.11±0.05 <sup>b</sup>	22.94±1 <sup>c</sup>	6.95±0.4 <sup>a</sup>	97.35±4.3 <sup>b</sup>	4.04±0.1 <sup>ab</sup>	60.17±2.3 <sup>bc</sup>
	Association	N-30	0.36±0.02 <sup>c</sup>	7.13±1.1 <sup>d</sup>	3.21±0.3 <sup>c</sup>	64.57±3.6 <sup>cd</sup>	3.57±0.2 <sup>b</sup>	71.70±1.5 <sup>b</sup>
		N-60	0.48±0.01 <sup>c</sup>	6.11±0.8 <sup>d</sup>	4.45±0.2 <sup>b</sup>	105.35±32 <sup>a</sup>	4.93±0.3 <sup>a</sup>	111.12±2.1 <sup>a</sup>
		N-100	0.27±0.02 <sup>d</sup>	3.54±0.6 <sup>d</sup>	3.27±0.3 <sup>c</sup>	44.27±2.1 <sup>d</sup>	3.54±0.08 <sup>b</sup>	47.81±1.3 <sup>c</sup>
	<i>p</i> -Value	<i>Crop</i>	≤0.001	≤0.001	≤0.001	0.27	0.60	≤0.001
		<i>N level</i>	≤0.01	≤0.001	0.18	≤0.001	≤0.001	≤0.001
		<i>Crop</i> × <i>N level</i>	0.02	≤0.001	0.04	≤0.001	0.36	≤0.001

Dans une colonne, différentes lettres indiquent une différence significative à  $p < 0,05$ .

### **3.2 Indice de nutrition azoté et état azoté des sols et des cultures**

Les valeurs de NNI pour le pois chiche et le blé en culture pure et en association sont présentées dans le tableau 8.

A l'exception du traitement N-30 d'azote sur le site S3, au stade floraison pour le reste des sites d'expérimentation, le pois chiche cultivé en association avec le blé dur et sous n'importe quelle dose d'engrais azoté le NNI était supérieur à 1, cela indique des conditions optimales de disponibilité d'azote pour la croissance dans les parcelles intercalaires par rapport au niveau critique d'azote dans le sol.

Indépendamment des résultats de l'ANOVA, les valeurs de NNI ont été affectées de manière significative par l'interaction système de culture×niveau de N dans le cas du blé dur, sauf pendant le stade de la récolte dans S2. Cependant, aucun effet significatif n'a été observé pour le pois chiche, sauf en S2 et S3, respectivement pendant la floraison et la récolte (tableau 8).

Pour la récolte, les valeurs de NNI étaient significativement inférieures à 1 pour le pois chiche dans la plupart des parcelles cultivées en solitaire pour tous es traitement d'azote.

Au stade floraison, la disponibilité de l'azote dans le sol pour le pois chiche en culture intercalaire était supérieure de plus de 67 % aux conditions optimales de disponibilité (NNI=1) pour des applications d'azote faibles et modérées (N-30 et N60), à l'exception de N-30 appliqué en S3. (Tableau 8). Selon les valeurs NNI, la disponibilité élevée de N-sol au moment de la récolte a été observée sous un niveau d'engrais azoté modéré pour les deux systèmes de culture, et qui représente plus de 75% du niveau N-critique. Dans le cas du blé dur, à la fois pendant la floraison et la récolte, les valeurs de NNI étaient inférieures à 1 dans toutes les cultures, sites et niveaux de traitement d'engrais azotés, à l'exception du blé cultivé en cultures associées en S2 et S3 et sous application modérée d'azote (NNI : 1,13 et 1,66, respectivement pour S2 et S3 en période de récolte).

**Tableau 8 :** Valeurs NNI calculées sous différents traitements de système de culture × N pendant les phases de floraison et de récolte

Sites	Système	Doses N	Pois chiche		Blé dur	
			NNI Floraison	NNI Récolte	NNI Floraison	NNI Récolte
S1	Culture pure	N-30	0,48 $\pm$ 0,01c	0,58 $\pm$ 0,02bc	0,79 $\pm$ 0,02b	0,58 $\pm$ 0,01bc
		N-60	0,83 $\pm$ 0,04b	1,07 $\pm$ 0,005a	0,33 $\pm$ 0,01d	0,45 $\pm$ 0,03c
		N-100	0,79 $\pm$ 0,08b	0,86 $\pm$ 0,06ab	0,78 $\pm$ 0,08b	0,96 $\pm$ 0,05a
	Association	N-30	1,74 $\pm$ 0,1a	0,43 $\pm$ 0,01c	0,28 $\pm$ 0,002d	0,79 $\pm$ 0,08ab
		N-60	1,82 $\pm$ 0,08a	0,76 $\pm$ 0,05b	0,95 $\pm$ 0,08a	0,49 $\pm$ 0,05bc
		N-100	1,55 $\pm$ 0,02a	0,42 $\pm$ 0,03c	0,58 $\pm$ 0,02c	0,52 $\pm$ 0,02bc
	<i>p</i> -Value	<i>Crop</i>	$\leq 0.001$	$\leq 0.001$	0.55	0.28
		<i>N level</i>	$\leq 0.01$	$\leq 0.001$	0.12	0.03
		<i>Crop</i> × <i>N level</i>	0.28	0.17	$\leq 0.001$	$\leq 0.001$
S2	Culture pure	N-30	0,61 $\pm$ 0,04c	0,47 $\pm$ 0,02b	0,42 $\pm$ 0,02bc	0,60 $\pm$ 0,03c
		N-60	0,86 $\pm$ 0,09b	0,92 $\pm$ 0,05a	0,49 $\pm$ 0,03bc	0,69 $\pm$ 0,03b
		N-100	0,69 $\pm$ 0,06c	0,47 $\pm$ 0,03b	0,97 $\pm$ 0,03a	0,98 $\pm$ 0,1b
	Association	N-30	1,87 $\pm$ 0,09a	0,63 $\pm$ 0,05ab	0,37 $\pm$ 0,01c	0,68 $\pm$ 0,05b
		N-60	1,68 $\pm$ 0,1ab	0,75 $\pm$ 0,04ab	0,95 $\pm$ 0,04a	1,13 $\pm$ 0,09a
		N-100	1,39 $\pm$ 0,08b	0,51 $\pm$ 0,03b	0,56 $\pm$ 0,02b	0,79 $\pm$ 0,07b
	<i>p</i> -Value	<i>Crop</i>	$\leq 0.001$	0.88	0.22	$\leq 0.001$
		<i>N level</i>	0.57	$\leq 0.001$	0.04	$\leq 0.001$
		<i>Crop</i> × <i>N level</i>	0.45	0.04	0.03	0.62
S3	Culture pure	N-30	0,32 $\pm$ 0,04d	0,71 $\pm$ 0,01a	0,90 $\pm$ 0,1a	0,42 $\pm$ 0,02c
		N-60	0,82 $\pm$ 0,01bc	0,79 $\pm$ 0,08a	0,51 $\pm$ 0,06b	0,77 $\pm$ 0,01bc
		N-100	0,80 $\pm$ 0,08bc	0,54 $\pm$ 0,05a	0,84 $\pm$ 0,02a	0,80 $\pm$ 0,03b
	Association	N-30	0,50 $\pm$ 0,009c	0,43 $\pm$ 0,02a	0,53 $\pm$ 0,03b	1,05 $\pm$ 0,1b
		N-60	1,80 $\pm$ 0,08a	0,75 $\pm$ 0,05a	0,92 $\pm$ 0,04a	1,66 $\pm$ 0,05a
		N-100	1,05 $\pm$ 0,04b	0,68 $\pm$ 0,07a	0,96 $\pm$ 0,09a	0,93 $\pm$ 0,08b
	<i>p</i> -Value	<i>Crop</i>	$\leq 0.001$	0.44	0.95	$\leq 0.001$
		<i>N level</i>	$\leq 0.001$	0.13	0.40	$\leq 0.001$
		<i>Crop</i> × <i>N level</i>	$\leq 0.001$	0.15	$\leq 0.01$	$\leq 0.001$

Dans une colonne, différentes lettres indiquent une différence significative à  $p < 0,05$ .

En passant du stade de la floraison au stade de la récolte du blé dur, les valeurs de NNI indiquent que la disponibilité de l'azote du sol était significativement augmentée dans les parcelles mono et intercalaires, cette augmentation était plus prononcée dans des conditions de culture intercalaire avec de faible application de N (N-30 et N-60 tarifs).

### **3.3 Rapport d'équivalence des terres et indice d'efficacité de rayonnement :**

Selon les résultats repris dans le tableau 9, les valeurs LER étaient significativement affectées par le traitement au niveau du site combiné à la dose d'azote pour le rendement en grains et en N-grain. Ainsi, l'avantage de la culture intercalaire ( $LER > 1$ ) n'a été confirmé que sous N modéré en S1 (+ 14%) et en application de faible dose de N en S2 (+ 5%). Cependant, dans des sols à faible teneur en azote et dans des conditions pluviales élevées (S2), la culture intercalaire pois chiche-blé était significativement avantageuse en termes de rendement en grains sous les trois niveaux d'engrais azoté. Ce dernier avantage des cultures associées était plus prononcé (+ 35%) avec une application d'azote modérée (tableau 9). La même tendance a été observée pour LER N-grain, mais avec un avantage de culture intercalaire significatif en S1 et S3 pour les niveaux de N bas et modérés.

De plus, les valeurs REI étaient également significativement affectées par le traitement site  $\times$  dose de N. Les valeurs les plus élevées ont été observées sous une application élevée de N, tandis que les valeurs de REI les plus faibles ont été observées sous une application modérée de N dans tous les sites expérimentaux. nous avons enregistré les valeurs de REI les plus élevées sous S3 par rapport à S1 et S2, dans lesquelles le REI a été significativement augmenté de 50,9 % sous l'application N-100 par rapport au niveau N-60 (tableau 9).

**Tableau 9** : Valeurs LER (pour le rendement grain et le N-grain) et REI (biomasse aérienne sèche) calculées sous différents traitements (site × N) et pendant la phase de récolte.

Sites	Doses N	LER <sub>rendement</sub>	LER <sub>N-grain</sub>	REI <sub>c</sub>
S1	N-30	0.88±0.09b	1.23±0.1b	1.77±0.1cd
	N-60	1.14±0.05a	1.24±0.1b	0.67±0.05d
	N-100	0.58±0.005c	0.60±0.02c	3.46±0.4c
S2	N-30	1.22±0.1a	1.15±0.1b	2.82±0.2c
	N-60	1.35±0.08a	1.25±0.06b	1.79±0.1cd
	N-100	1.24±0.1a	1.57±0.1b	2.85±0.3c
S3	N-30	1.05±0.05b	1.78±0.08a	4.44±0.3b
	N-60	0.62±0.05bc	1.83±0.1a	4.34±0.08b
	N-100	0.64±0.05bc	0.52±0.01c	6.55±0.5a
<i>p</i> -Value	<i>Site</i>	≤0.001	0.12	≤0.001
	<i>N level</i>	0.03	≤0.01	≤0.001
	<i>Site×N level</i>	0.02	≤0.01	0.04

Dans une colonne, différentes lettres représentent les groupes homogènes suite au test de tukey à  $p < 0,05$ .

### 3.4 Ratio d'équivalent-temps et efficacité de l'utilisation des terres:

Selon le tableau 10, des différences significatives ont été trouvées pour toutes les valeurs ATER mesurées (c'est-à-dire le rendement en grains et N-Grain).

En termes de cycle de culture, l'avantage de la culture intercalaire à la fois sur le rendement et le rendement d'azote a été confirmé sous une application modérée et faible de N en S1 et S3, respectivement, et sous toutes les doses d'application de N en S2. Les valeurs les plus élevées de l'ATER en terme de rendement ont été enregistrées en S2 indiquant un avantage (18%) de la culture associée par rapport au système de culture unique. La même tendance a été observée pour le N-grain où le plus grand avantage est pour la culture intercalaire (19%) était significativement enregistré en S2 sous application modérée et élevée de N (tableau 10).

De plus, le système de culture intercalaire était plus efficace dans l'utilisation des terres (LUE) uniquement en de rendement en grain, Ceci a été observé sous une application de N modérée et faible respectivement dans S1 et S3. Alors que, pour N-Grain, la culture intercalaire pois chicke-blé était plus efficace à la fois dans les niveaux de N modéré et faible à la fois dans S1 et S3. Dans les conditions S2, la meilleure efficacité d'utilisation des terres en termes de rendement en céréales et en azote a été confirmée dans la culture intercalaire par rapport à la culture pure pour tous les taux d'application d'azote.

Pour la composante de rendement en grains, l'efficacité la plus élevée dans l'utilisation des terres par les cultures associées a été enregistrée en S2 (126,5%) avec une application modérée de N, alors qu'elle a été observée en S3 (142%) avec une application à faible teneur en N pour la composante de rendement en N (tableau 10 ).

**Tableau 10 :** Valeurs ATER et LUE calculées sur le rendement et l'absorption d'azote sous différents traitements au niveau du site × N et pendant la phase de récolte.

Site	Doses N	ATER <sub>Recolte</sub>	ATER <sub>N</sub>	LUE <sub>Recolte</sub> (%)	LUE <sub>N</sub> (%)
S1	N-30	0,83±0,07b	1,16±0,2a	85,5±9,03abc	119,5±15,88ab
	N-60	1,07±0,05ab	1,17±0,1a	110,5±5,81ab	120,5±13,59ab
	N-100	0,54±0,003c	0,58±0,03c	56±0,52c	59±2,62bc
S2	N-30	1,09±0,08ab	1,09±0,1b	115,5±15,4ab	112±14,26abc
	N-60	1,18±0,06a	1,19±0,1a	126,5±8,53a	122±7,35a
	N-100	1,17±0,1a	1,17±0,04a	120,5±14,55a	137±7,04a
S3	N-30	1,01±0,06b	1,06±0,09b	103±6,3abc	142±10,67a
	N-60	0,67±0,1c	0,96±0,1b	64,5±15,63bc	139,5±23,93a
	N-100	0,66±0,02c	0,51±0,01c	65±1,9bc	51,5±2,19c
p-Value	Site	≤0.001	≤0.01	≤0.001	0.10
	N level	0,04	≤0.001	0.04	≤0.001
	Site × N level	≤0.01	0,02	0.02	≤0.01

*Dans une colonne, différentes lettres représentent les groupes homogènes suite au test de tukey à p < 0,05.*

### 3.5 Coefficient d'encombrement relatif

Le tableau 11 montre les valeurs calculées de K pour les trois dose appliquées d'azote dans chaque site expérimental Pour tous les traitements site × dose de N, le blé semble être dominant (k blé > 1) sur S2 et S3 lorsque N est appliqué à des taux modérés et faibles.

**Tableau 11** : Valeurs K calculées sur la composante de rendement sous différents traitements au niveau du site  $\times$  N et pendant la phase de récolte.

Sites	Doses N	K Blé Dur	K Pois Chiche	K
S1	N-30	0.28 $\pm$ 0.03b	1.48 $\pm$ 0.43ab	0.43 $\pm$ 0.16c
	N-60	0.33 $\pm$ 0.05b	4.97 $\pm$ 0.12a	1.66 $\pm$ 0.18bc
	N-100	0.41 $\pm$ 0.05b	0.41 $\pm$ 0.05b	0.17 $\pm$ 0.005c
S2	N-30	1.31 $\pm$ 0.26ab	4.71 $\pm$ 1.11a	5.92 $\pm$ 0.23a
	N-60	1.94 $\pm$ 0.57a	1.93 $\pm$ 0.45ab	4.02 $\pm$ 1.98ab
	N-100	0.75 $\pm$ 0.14ab	3.02 $\pm$ 1.26ab	1.93 $\pm$ 0.52bc
S3	N-30	1.16 $\pm$ 0.39ab	0.13 $\pm$ 0.06b	0.12 $\pm$ 0.02c
	N-60	1.10 $\pm$ 0.35ab	0.28 $\pm$ 0.11b	0.39 $\pm$ 0.26c
	N-100	0.95 $\pm$ 0.2ab	0.34 $\pm$ 0.3405b	0.30 $\pm$ 0.04c
	<i>Site</i>	$\leq 0.01$	$\leq 0.001$	$\leq 0.001$
<i>p-Value</i>	<i>N level</i>	0.17	0.10	0.02
	<i>Site <math>\times</math> N level</i>	0.20	$\leq 0.01$	0.02

Dans une colonne, différentes lettres représentent les groupes homogènes suite au test de tukey à  $p < 0,05$ .

Pour le pois chiche, la dominance a été observée dans S1 sous un faible niveau de N, mais elle était plus élevée avec une application modérée de N où K était au maximum ( $K_{\text{pois chiche}} = 4,97$ ). La tendance dominante de pois chiche observée pour le  $K_{\text{pois chiche}}$  en S2 était similaire à celle obtenue en S3 pour tous les taux d'engrais azotés appliqués ; À l'inverse, le pois chiche était dominé par le blé dur associé pour les trois niveaux d'engrais azoté dans des conditions S3 où les valeurs de pois chiche étaient nettement inférieures à 1.

K est le produit de  $K_{\text{Blé Dur}}$  et  $K_{\text{Pois Chiche}}$ , un K supérieur à l'unité ( $k > 1$ ) nous renseigne sur l'avantage de rendement de la culture intercalaire ; cet avantage est confirmé uniquement sous une application modérée de N en S1 et sous tous les taux de N appliqués en S2. Cependant, les cultures associées indiquent un désavantage de rendement dans les conditions S3 avec les trois niveaux de N (tableau 11).

### 3.6 Ratio compétitif

Pour mieux comprendre les relations de compétition entre le blé et le pois chiche intercalés, le tableau 12 indique tous les rapports de compétitivité du grain récolté et le N-grain de chaque espèce. La compétitivité entre le pois chiche et le blé a été significativement modifiée par l'effet combiné du site et du traitement dose de N . Ainsi, le pois chiche était plus compétitif pour le rendement en grain que le blé en S1 et S2 et particulièrement extra-compétitif ( $RC=3.13$ ) en S1 sous une application modérée d'azote. En revanche, le blé dur était plus compétitif que le pois chiche uniquement dans les conditions S3 où leur compétitivité était plus prononcée ( $CR=3.38$ )

avec une faible application de N (tableau 12). La même tendance a également été observée pour la compétition sur l'acquisition de l'azote par les espèces en culture intercalaire dans les trois sites étudiés. En outre, le blé dur présente le plus haut niveau de compétitivité sur l'acquisition de l'azote (CR variant de 7,27 à 10,13) lorsqu'il est cultivé en association avec le pois chiche dans le site S3.

**Tableau 12 :** Valeurs de CR (rendement en grain et rendement en N) par rapport au pois chiche et au blé dur calculées sur le rendement et l'absorption de N sous différents traitements site × N et pendant la phase de récolte.

Sites	N level	CR-Yield Pois chiche	CR-Yield Blé dur	CR-N Pois chiche	CR-N Blé dur
S1	N-30	2.46 $\pm$ 0.2ab	0,41 $\pm$ 0,03c	3.92 $\pm$ 0,3a	0,25 $\pm$ 0,0017d
	N-60	3.13 $\pm$ 0,3a	0,32 $\pm$ 0,03c	2,91 $\pm$ 0,47ab	0,36 $\pm$ 0,069d
	N-100	1.03 $\pm$ 0,08bc	1.03 $\pm$ 0.19bc	1,94 $\pm$ 0,3bc	0,53 $\pm$ 0,08d
S2	N-30	1.25 $\pm$ 0,4bc	0,86 $\pm$ 1.77c	1,13 $\pm$ 0,21cde	0,95 $\pm$ 0,2d
	N-60	1.17 $\pm$ 0.16bc	0,88 $\pm$ 0,11bc	1,76 $\pm$ 0,1cde	1,35 $\pm$ 1,67d
	N-100	2.28 $\pm$ 0,75ab	0,52 $\pm$ 0,13c	1,68 $\pm$ 0,57bcd	0,72 $\pm$ 0,18d
S3	N-30	0,3 $\pm$ 0,01c	3.38 $\pm$ 0,22a	0,09 $\pm$ 0.004c	10.13 $\pm$ 0,42a
	N-60	0.6 $\pm$ 0,07c	1,7 $\pm$ 0,2bc	0,13 $\pm$ 0,004c	7,27 $\pm$ 0,22b
	N-100	0,53 $\pm$ 0,18c	2,42 $\pm$ 0,82ab	0,4 $\pm$ 0,16de	3,33 $\pm$ 1,02c
	<i>Site</i>	$\leq$ 0.001	$\leq$ 0.001	$\leq$ 0.001	$\leq$ 0.001
<i>p</i> -Value	<i>N level</i>	0.34	0,09	0,17	$\leq$ 0.001
	<i>Site</i> × <i>N level</i>	$\leq$ 0.001	$\leq$ 0.05	$\leq$ 0.001	$\leq$ 0.001

Dans une colonne, différentes lettres indiquent une différence significative à  $p < 0,05$ .

## 4 Discussion

La diversification des cultures dans l'espace (c.-à-d. la culture intercalaire légumineuses-céréales) est considérée comme une pratique résiliente et durable pour stimuler la fourniture des services de l'agroécosystème (Kherif et *al.*, 2021a, Daryanto et *al.*, 2019). Dans l'ensemble, nos résultats indiquent qu'il y a une augmentation significative du rendement du mélange pois chiche-blé dans la culture intercalaire à la fois dans des conditions de sol à faible teneur en azote et dans des conditions où la pluviométrie est assez élevée. Alors que l'acquisition d'azote par les espèces associées était plus importante que celle en monoculture, plus particulièrement dans les sites à faible pluviométrie (tableau 7). Ainsi, l'amélioration du rendement et de l'accumulation de N a été confirmée pour les faibles apports d'azote (N-30) ou modérée (N-60). Ces découvertes sont en accord avec celles faites récemment à l'échelle de la parcelle sur les cultures intercalaires légumineuses-céréales (Latati et *al.*, 2019b ; Abdulahi et *al.*, 2012), l'originalité de notre travail est d'avoir confirmé les résultats des travaux de recherche antérieurs

dans des contextes pédoclimatiques différents où les avantages de la culture intercalaire sont a présent clairement démontrés.

La principale nouveauté de notre recherche était d'analyser les processus de compétition interspécifique et de facilitation (c.-à-d. acquisition d'azote et rendement des cultures) entre le pois chiche et le blé cultivé en monoculture et en culture intercalaire. Cette évaluation a été réalisée à travers l'analyse des indicateurs agroécologiques les plus importants liés au système de culture intercalaire grâce au calcul de l'indice NNI et des indices de culture intercalaire.

Les valeurs calculées de NNI pour toutes les combinaison (systèmes de culture × traitements azoté) indiquent une découverte originale concernant la nutrition N pour les espèces associées. De même, le NNI du pois chiche n'était supérieur à 1 que dans la culture intercalaire au stade de la floraison, alors qu'il était inférieur à 1 dans les deux systèmes de culture au moment de la récolte (tableau 8). Cette constatation a été systématiquement démontrée en cas d'application faible et modérée de N dans tous les sites d'expérimentation. En effet dans un système de culture biologique sans fertilisation azotée, le NNI des légumineuses (haricot commun et féverole) et des céréales (maïs et blé dur) cultivées en intercalaire était supérieur à 1 (Latati et *al.*, 2016a, Kaci et *al.*, 2018).

L'évaluation du NNI dans les systèmes de cultures intercalaires n'a été étudiée que par ces deux derniers articles, alors qu'elle n'a jamais été réalisée dans des conditions d'application d'azote. Cela pourrait aider les agriculteurs et les chercheurs à planifier les systèmes de culture (le blé et le pois chiche) en fonction de la fertilisation azotée ou de la gestion de l'eau; Les valeurs de NNI étaient également supérieures à 1 pour le blé de culture intercalaire sous application modérée de N, mais contrairement à la culture intercalaire de pois chiches, cela a été observé à la période de récolte, une étude de recherche précédente a soutenu que la floraison est la principale étape phénologique au cours de laquelle la légumineuse fixe la quantité maximale de N par la fixation symbiotique de N<sub>2</sub> (Yong et *al.*, 2018, Latati et *al.*, 2018); ces derniers auteurs confirment qu'une forte disponibilité de N diminue significativement la fixation de N par les légumineuses. Ces résultats sont en accord avec les nôtres pour les cultures intercalaires légumineuses-céréales sous différentes application d'azote. L'augmentation de la disponibilité de l'azote dans le sol (NNI>1) par rapport au niveau critique d'azote (NNI=1) pour l'association pois chiche blé respectivement pendant la floraison et la récolte démontre l'opportunité d'une utilisation complémentaire de l'azote entre les deux espèces; Cela pourrait contribuer à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote par le blé intercalaire cultivé sous un apport élevé d'azote dans le sol (condition de culture pluviale faible : S3) ou en condition d' un apport faible d'azote dans le sol (condition de culture pluviale élevée : S2).

Les résultats de cette étude ont montré à travers l'indice LER (tableau 9.) un avantage significatif de la culture intercalaire blé-pois chiche par rapport à la monoculture, cet avantage a été prôné à la fois pour le rendement en céréales et en azote en raison de l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote par les espèces de cultures intercalaires avec des applications faibles à modérées d'engrais azotés ; Nos résultats sur l'avantage de la culture intercalaire en terme de rendement céréalière concordent avec une autre étude réalisée sur des mélanges de cultures arables (Song et *al.*, 2007).

Les résultats peu performant de la culture intercalaire sous forte application de N (N-100) dans des conditions de faible pluviométrie (S1 et S3) peuvent probablement être dû à un déficit en eau qui réduit la demande en azote, conséquence de la modification de la croissance; En revanche, l'avantage de la culture associée a été confirmé sous le taux le plus élevé (N-100) d'application de N en S2 où la culture associée était pratiquée dans des conditions pluviales élevées (Figure. 21) ; L'absorption de l'azote par les racines est systématiquement contrôlée par la disponibilité de l'eau (Gonzalez-Dugo et *al.*, 2005), tandis que la diminution de la demande d'azote par la culture à partir des engrais azotés est significativement associée à la diminution du taux de croissance en raison du manque d'eau (Gonzalez-Dugo et *al.*, 2010), de plus, le calcul du REI permet de mieux évaluer la croissance proportionnelle des deux espèces cultivées en intercalaire sur une période de leur cycle de culture.

Les valeurs REI étaient supérieures à 1 dans chaque combinaison site × de niveau N, sauf sous application modérée de N en S1, les valeurs les plus élevées de REI ont été clairement observées en S3 (tableau 9) indiquant une croissance rapide et robuste doublé par rapport au pois chiches dans l'association ceci peut être dû à des conditions météorologiques difficiles (c.-à-d. température estivale élevée, gel en hiver et température très basse) qui sont responsables de la limitation de la germination des pois chiches pendant la période de semis alors que le blé associé est moins sensible à cette contrainte climatique que le pois chiche ; Cet avantage du blé pour le rendement en grain reflété de manière significative par le calcul de l'indice CR (tableau 12.), Où le rendement du blé  $CR_{\text{grain}}$  et  $CR_N$  sont plus élevés que ceux du pois chiche en S3, indiquant que le blé était plus compétitif que le pois chiche, une tendance contrastée a été obtenue pour les deux espèces cultivées en association en S1 et S2.

Les capacités compétitives des espèces intercalées sont systématiquement contrôlées par le climat et le sol, différentes études confirment que l'agressivité et la compétition interspécifique entre les légumineuses et les céréales en association sont plus prononcées en cas de faible disponibilité en nutriments et en eau (Zhang et *al.*, 2011, Doubi et *al.*, 2016).

Dans le cas de notre étude, le taux de compétition n'a pas été affecté par la disponibilité des ressources nutritives (engrais azotés) mais il a été fortement modifié par l'effet combiné entre les conditions pédoclimatiques et le taux de N-application, ces résultats sont en désaccord avec ceux repris par Yu et *al.* (Yu et *al.*, 2015, Yu et *al.*, 2016) qui confirment un effet significatif de l'engrais N sur le LER et la concurrence pour les ressources souterraines et aériennes dans le système de culture intercalaire.

Selon le calcul du K (RCC) (tableau 11), l'avantage concurrentielle du pois chiche était plus forte que celui du blé uniquement dans les sites à faible teneur en N (S1 et S2), alors qu'il était plus faible que celui du blé associé en S3 ( $N_{sol}$  - élevé), ces derniers résultats fournis par les indices de concurrence (REI, CR et K) sont complémentaires de ceux obtenus pour NNI et LER, ceci pourrait s'expliquer par des mécanismes de facilitation (rendement céréalier et azoté) et de dominance concurrentielle qui résultaient de l'interaction positive entre espèces cultivées en intercalaires avec un effet plus marqué en S1 et S2 (faible disponibilité en N-sol avec des conditions pluviales modérées et élevées), cependant, dans les conditions S3 (faible pluviométrie et haute disponibilité de N-sol), le gain de rendement et en azote de la céréale était potentiellement lié à la fois à la domination de la concurrence et à l'effet de complémentarité. Ces résultats concordent avec la découverte majeure confirmée par les récentes recherches de Li et *al.* (2020), alors que nos conditions d'expérimentation sur le terrain fournissent plus de précisions et de nouvelles perspectives en termes de fertilisation azotée et de facteurs pédoclimatiques qui permettraient d'obtenir à la fois un rendement en grain et de  $N_{Grain}$  plus avantageux en culture intercalaire pois chiche-blé.

Concernant les résultats du calcul de l'ATER, il a permis de mieux vérifier et confirmer les valeurs LER quel que soit le temps de culture de chaque espèce intercalée, L'ATER était fortement corrélé avec le LER pour les systèmes de culture dans tous les sites étudiés, ce qui pourrait être dû à la petite différence (15 jours) dans le temps de cycle de culture des deux espèces associées, quand de récentes expérimentations de terrain ont confirmé une différence significative entre l'ATER et le LER dans les cultures intercalaires (Doubi et *al.*, 2016, Wang et *al.*, 2021).

De plus, tous les indices calculés dans les cultures associées étaient significativement liés à l'indice LUE indiquant une forte cohérence entre le rendement et l'acquisition de N par les graines, la culture intercalaire s'est avérée plus efficace dans l'utilisation des terres que la monoculture, en particulier dans le cadre d'une application d'une faible et modérée dose d'azote pour les parcelles de culture intercalaire qui reçoivent une pluviométrie modérée (S1) ou faible (S3).

Les principales conclusions de cette recherche sur le terrain démontrent que les cultures intercalaires sont une pratique prometteuse pour l'intensification agroécologique du pois chiche et du blé dur cultivé avec des apports faibles en azote ou en eau; Les résultats repris dans cette étude pourraient être considérés comme la première évaluation de la réponse des cultures associées avec différentes doses d'azote dans différentes conditions pédoclimatiques.

L'utilisation efficace des principaux résultats de cette étude sera un défi intéressant pour concevoir des systèmes de culture intercalaire optimisés, plus productifs et plus efficaces dans l'utilisation de l'azote et des ressources en eau.

## **5 Conclusion**

Les résultats rapportés dans cette étude (experimentation au champ) sont considérés comme les premiers résultats originaux sur l'évaluation agro-écologique du système de culture intercalaire pois chiche-blé dur, en utilisant des indices calculés.

La principale nouveauté de cette étude concerne le diagnostic intégratif (c'est-à-dire la biomasse, le rendement, le rendement et la dynamique de croissance) du statut de l'azote dans les cultures intercalaires dans des conditions pédoclimatiques et de fertilisation azotée contrastées.

Les résultats indiquent deux conditions qui rendent la culture intercalaire avantageuse. La première, qui est liée à l'apport d'azote, montre que le système est plus performant lorsque l'azote est suffisamment élevé pour maximiser la fixation symbiotique de N<sub>2</sub> tout en contribuant à la nutrition de la culture céréalière. Deuxièmement, le pois chiche doit être le composant le plus dominant de la culture, à condition que cette dominance soit modérée.

La compétition interspécifique entre le pois chiche et le blé dur a été directement affectée par les changements de conditions climatiques ou d'engrais N sur les sites, le blé intercalaire était plus compétitif que sa légumineuse respective dans des conditions de faible pluviométrie et d'application d'azote, Cependant, l'estimation d'indices économiques complétera et améliorera l'évaluation des avantages des cultures intercalaires, en particulier lorsque les avantages agronomiques ne sont pas corrélés au bénéfice économique.

## **CHAPITRE 4 : PREMIERE CALIBRATION DU MODELE SOL-PLANTISTICS SUR UN SYSTEME DE CULTURE INTERCALAIRE A BASE DE POIS CHICHE EN CONDITIONS MEDITERRANEENNES**

### **1 Introduction**

Pour répondre à la demande alimentaire croissante, les pratiques agricoles se sont orientées vers une intensification des cultures depuis l'adoption de la " révolution verte ". Cependant, cette agriculture intensive caractérisée par une forte simplification des agroécosystèmes a conduit à de nombreuses dégradations environnementales (Tribouillois et *al.*, 2016) et a contribué à une diminution significative des services écosystémiques notamment par ses impacts sur les ressources du sol et en eau (Glaze-Corcoran et *al.*, 2020). Afin de soutenir de nouveaux systèmes de culture durables, de nouvelles pratiques basées sur l'intensification agro-écologique sont proposées à l'échelle des champs et des exploitations (Pansu et *al.*, 2018). Dans ce contexte, la diversification des cultures (cultures intercalaires, cultures de couverture et les rotations) offre des solutions prometteuses au problème de l'utilisation inadéquate des ressources naturelles en agriculture (Peoples et *al.*, 2019), et qui répondent aux objectifs croissants de production et d'environnement (Duru et Therond, 2015b ; Gaba et *al.*, 2015). En particulier, en s'appuyant sur les effets de facilitation et de complémentarité, les systèmes de culture intercalaire céréales-légumineuses ont démontré des avantages agro-environnementaux et socio-économiques par rapport à leurs cultures pures correspondantes dans de nombreuses études antérieures (Bedoussac et *al.*, 2015 ; Daryanto et *al.*, 2019 ; Pelzer et *al.*, 2012 ; Rodriguez et *al.*, 2020). Par exemple, l'efficacité de l'utilisation de l'azote et de l'eau a été considérablement augmentée dans le blé dur cultivé en association avec le pois chiche (Latati et *al.*, 2019a), le pois fourrager (Tribouillois et *al.*, 2016) et la féverole (Messaoudi et *al.*, 2020).

Grâce à la fixation biologique de l'azote atmosphérique (N<sub>2</sub>), les légumineuses sont connues pour améliorer la stabilité des rendements, l'acquisition de l'azote et l'utilisation de l'eau lorsqu'elles sont cultivées en inter-culture plus particulièrement avec des céréales (Falconnier et *al.*, 2019). Elles peuvent également réduire la pollution de l'eau en diminuant le lessivage des nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dans le cadre de pratiques de cultures de couverture communes ou de cultures intercalaires (Plaza-Bonilla et *al.*, 2017). Cependant, les légumineuses sont sensibles à divers stress biotiques et abiotiques tels que : (i) une longue période de sécheresse pendant le stade de reproduction (Daryanto et *al.*, 2017), (ii) les dommages causés par le gel au stade du semis qui peuvent avoir un effet drastique sur la levée des graines en particulier pour les légumineuses d'hiver (Meyer et Badaruddin, 2001), (iii) le faible taux de fixation de N<sub>2</sub> en raison de la carence en phosphore du sol (Houassine et *al.*, 2019) et (iv) la concurrence des légumineuses par les

mauvaises herbes qui contribuent à la perte de rendement (Morishita, 2018). Ces facteurs limitants sont directement responsables de l'instabilité du rendement lorsque les agriculteurs adoptent des légumineuses dans les systèmes de cultures intercalaires (Latati *et al.*, 2016). En outre, le manque de diagnostic intégratif des indicateurs agroécologiques (biomasse, rendement, rendement en azote, bilan hydrique et dynamique de croissance) est l'une des principales raisons qui limitent la co-conception et la co-évaluation des systèmes de culture intercalaire à base de légumineuses (Kherif *et al.*, 2021b ; Watson *et al.*, 2017).

En ce qui concerne le diagnostic, les modèles sol-plante fournissent une vue détaillée pour mieux comprendre les contraintes agro-environnementales qui pourraient affecter la résilience et la durabilité des cultures (Hayman *et al.*, 2010 ; Todd-Brown *et al.*, 2012). Ce sont également des outils utiles pour concevoir et évaluer des mélanges innovants à base de légumineuses en termes de production et de résultats environnementaux et explorer les options de gestion (Latati *et al.*, 2019a ; Launay *et al.*, 2009 ; Malézieux *et al.*, 2009). Par conséquent, ces modèles sont capables d'intégrer l'analyse d'ensembles de données empiriques et de simuler avec succès les processus agroécologiques clés (la croissance, rendement, l'utilisation de l'eau et des nutriments) qui doivent être évalués dans les systèmes diversifiés (cultures de couverture et les cultures intercalaires). Depuis leur adaptation aux mélanges de cultures et en particulier aux cultures intercalaires, l'utilisation de modèles de culture tels que APSIM (Holzworth *et al.*, 2014), CROPSYS (Singh *et al.*, 2013), FASSET (Berntsen *et al.*, 2014) et STICS (Brisson *et al.*, 2004) pour simuler le bilan hydrique, l'acquisition des nutriments et le rendement à différents stades de croissance est de plus en plus rapportée dans la littérature (Ibrahim *et al.*, 2016 ; Malézieux *et al.*, 2009). Cependant, selon Gaudio *et al.* (2019), la modélisation des mélanges de cultures annuelles est toujours en cours de développement et représente le principal défi pour les modélisateurs de cultures en raison des difficultés à simuler l'hétérogénéité spatio-temporelle et le partage des ressources. Les efforts actuels pour améliorer la capacité des modèles à prendre en compte une large gamme de mélanges de cultures sont donc essentiels et permettront aux chercheurs et aux agriculteurs d'explorer virtuellement différents scénarios (espèces cultivées × sol × climat × pratiques) qui sont généralement coûteux et longs à mettre en œuvre lorsque on fait appel aux expérimentations du terrain (Knörzer *et al.*, 2011).

STICS est l'un des modèles de cultures qui reçoit des efforts considérables pour améliorer sa qualité prédictive en ce qui concerne les systèmes de cultures intercalaires au cours des dernières années (Justes *et al.*, 2021; Paff *et al.*, 2020). La simulation au pas de temps journalier de la croissance des cultures par STICS fournit une évaluation dynamique mécaniste des processus agro-physiologiques qui sont contrôlés par les pratiques culturales et les conditions pédo-

climatiques (Artru et *al.*, 2017). Ce modèle a été adapté aux systèmes de culture intercalaire en suivant une approche de modélisation basée sur une extension des modèles de culture pure, représentant deux espèces dans le système au lieu d'une seule (Brisson et *al.*, 2004). Des versions bi-spécifiques ont été appliquées pour évaluer l'effet de la gestion des cultures dans le système intercalaires à base de légumineuses. Ceci a notamment concerné la calibration du modèle STICS sur les cultures intercalaires orge-pois (Corre-Hellou et *al.*, 2009, Launay et *al.*, 2009), blé-fêtuque (Shili-Touzi et *al.*, 2010) et blé-pois (Malagoli et *al.*, 2020). De plus, le modèle est continuellement adapté à de nouvelles espèces de légumineuses telles que la soja (Jégo et *al.*, 2010) ; la féverole (Falconnier et *al.*, 2019) et le haricot commun (Paleari et *al.*, 2020). L'équipe STICS étend actuellement ses travaux et ses partenariats pour inclure dans le portefeuille de modèles de nouveaux systèmes de culture à base de légumineuses et de cultures intercalaires dans différentes conditions pédoclimatiques.

Après l'eau, la disponibilité de l'azote dans le sol est considérée comme le facteur clé qui contrôle la croissance et la variabilité du rendement des cultures intercalaires de céréales et de légumineuses (Naudin et *al.*, 2010). L'application d'azote a été largement pratiquée pour améliorer le rendement des cultures et la biomasse dans la plupart des agro-écosystèmes mondiaux au cours des cinquante dernières années (Cai et *al.*, 2018). Néanmoins, les agriculteurs considèrent que le taux d'application de N est difficile à ajuster, en particulier pour les cultures intercalaires (Malagoli et *al.*, 2020). Ceci est probablement dû à un large éventail de facteurs tels que ; (i) la proportion de chaque espèce dans le mélange et (ii) la variabilité des conditions pédo-climatiques. Des travaux récents de modélisation ont été réalisés pour fournir de meilleures décisions qui peuvent aider les agriculteurs à optimiser l'application de N dans la gestion des cultures intercalaires. Dans ce contexte, le modèle AZODYN IC a été récemment validé pour la première fois dans des conditions de fertilisation N dans un système de culture intercalaire pois-blé (Malagoli et *al.*, 2020). Cela pourrait aider à mieux simuler la grande variabilité des stratégies de fertilisation azotée (dose optimale d'azote pour le meilleur fonctionnement de la culture intercalaire) et à concevoir des systèmes innovants et résilients de culture intercalaire à base de légumineuses.

Outre que la place stratégique des légumineuses à grains dans le système de production alimentaire, le pois chiche (*Cicer arietinum* L.) est la troisième légumineuse à grains cultivée dans le monde (Martinelli et *al.*, 2020). Cette espèce est considérée comme l'une des principales sources de protéines pouvant remplacer la viande dans les régions méditerranéennes, en particulier dans les pays d'Afrique du Nord (Cernay et *al.*, 2015). En outre, un système de culture intercalaire à base de pois chiche contribuerait à l'obtention d'un rendement et d'une nutrition en azote pour

les céréales intercalaires respectives grâce à la fixation biologique de N<sub>2</sub> (Lal et *al.*, 2019 ; Kherif et *al.*, 2021b). Cependant, comme pour la plupart des espèces de légumineuses, les contraintes abiotiques (sécheresse, carence en P, sol riche en N) et biotiques (par exemple, les mauvaises herbes, les ravageurs et les maladies) peuvent affecter la croissance du pois chiche et la fixation de N<sub>2</sub>, en particulier dans les conditions méditerranéennes où ces facteurs limitant sont plus prononcés (Laranjeira et *al.*, 2021).

Ce chapitre se concentre sur l'analyse de la réponse du système de culture de blé dur et de pois chiche à différents niveaux d'engrais N minéral, basé sur une expérimentation en plein champ dans le nord de l'Algérie et utilisant une approche de modélisation. Notre premier objectif était de calibrer et d'adapter le modèle STICS à la culture du pois chiche en conditions pluviales. Cette nouvelle et première calibration permettrait à STICS de prédire la réponse du pois chiche d'hiver à différents taux d'application d'azote. En parallèle, STICS a également été calibré pour le blé dur en utilisant un ensemble de paramètres communs dans les mêmes conditions de sol, de climat et de gestion des cultures. Le deuxième objectif était de tester et d'analyser la robustesse de STICS pour simuler les performances du système de culture intercalaire (la croissance des pousses et des racines, le rendement, l'acquisition de N par la plante et le bilan hydrique). Ainsi, nous avons exploré l'intérêt de l'approche de modélisation pour concevoir et évaluer des stratégies innovantes de fertilisation azotée (avec la combinaison du climat, du sol et du système de culture) qui pourraient fournir des règles de décision dans la gestion du mélange de cultures à l'échelle du champ.

## **2 Matériel et méthodes**

### **2.1 Caractéristiques climatiques et pédologiques**

Les données ont été collectées à partir d'une expérience de terrain réalisée dans une station agronomique dans la région d'Oued Smar, au nord-est d'Alger (Algérie) (36°42' N, 3°09' E). Cette expérience a été réalisée pendant deux Campagnes agricoles consécutives (2018-2019 et 2019-2020). Le climat peut être décrit comme méditerranéen subhumide avec une pluviométrie annuelle moyenne de 603 mm enregistrée au cours des quarante dernières années. Au cours la période d'étude, la température annuelle a varié entre 24,13 °C et 18,14 °C avec une moyenne annuelle de 18,14 °C. (S2, Figure 21, chapitre III) Ce climat est également caractérisé par des précipitations irrégulières en termes de fréquence et de quantité avec de longues périodes de sécheresse. Il existe un fort contraste entre les deux saisons de croissance, en termes de précipitations et de température. Ainsi, la première Campagne culturale (déc. 2018 - juin 2019) étant plus humide (cumul total des précipitations = 270,7 mm) et plus froide (température moyenne = 14,15 °C) que la deuxième année (déc. 2019 - juin 2020) pour laquelle le cumul total des

précipitations a atteint 189 mm et la température moyenne était d'environ 16,36 °C. Les propriétés de texture du sol, taux de calcaire (CaCO<sub>3</sub>) et le pH ont été mesurés (S2, Tableau 6, chapitre III). Le sol a une texture limono-argileuse dans la plupart des couches du sol (de 0 à 100 cm), avec des densités apparente variant de 1.16 à 1.56 selon les différentes couches du sol, les humidités au point de flétrissement et a capacité au champ sont respectivement de 0.13 et 0.25 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>. Le sol présente des conditions assez homogènes, sans pente. La croissance des racines n'est pas limitée car le sol est profond et aucune contrainte physique n'a été signalée. Le sol peut être décrit comme alcalin et non calcaire, avec une carence en N et P disponibles.

## **2.2 Système de culture et conception des parcelles de terrain**

Le détail du Dispositif expérimentale et le choix des espèces voir Chapitre III, page : 77-78

A noter que pendant la première Campagne, les rangs étaient orientés nord-sud (0 rad par rapport au nord), tandis qu'ils étaient orientés ouest-est (1,57 rad par rapport au nord) pendant la deuxième saison de croissance. L'expérience a été menée dans des conditions pluviales, avec seulement une seule irrigation complémentaire (en raison des conditions de sécheresse sévère) de 24,26 mm appliquée à toutes les parcelles pendant la deuxième Campagne.

## **2.3 Échantillonnages et mesures des plantes et du sol**

Nous avons enregistré les stades de développement des deux cultures avec une attention particulière aux dates d'émergence (BBCH = 09) et de floraison (BBCH = 65). Des échantillons de sol initiaux ont été prélevés à la date de semis de chaque saison de croissance, ce qui a servi, pour la caractérisation du sol et pour mesurer la teneur initiale du sol en eau et en azote. Les échantillons de plantes et de sol ont été prélevés au cours de cinq périodes d'échantillonnage pendant la première saison de croissance. Trois échantillons ont été prélevés pendant la phase végétative, un au stade de la floraison (110 DAS) et le dernier à la récolte. Pendant la deuxième Campagne agricole, il y a eu trois périodes d'échantillonnage, une pendant la phase végétative, une au stade de la floraison (107 DAS) et la dernière à la récolte.

Ces échantillonnages dynamiques ont été effectués sur les variables d'intérêt telles que : la profondeur des racines, la teneur en eau et en azote du sol, le LAI, la biomasse aérienne sèche et humide et l'absorption d'azote par la plante. Au moment de la récolte, le rendement, ses composantes et la hauteur maximale des plantes ont été mesurés. L'humidité du sol (à chaque 10 cm de profondeur) a été régulièrement mesurée en utilisant le Diviner 2000 (Photo 10, Annexe 1) pour tous les traitements sur une base quotidienne. Les valeurs d'humidité du sol recueillies (en unité de fréquence graduée) à partir des mesures du Diviner ont été calibrées (c'est-à-dire la

teneur en eau volumétrique du sol en unité  $m^3 m^{-3}$ ) selon les méthodes rapportées par Groves et *al.* (2004) et Haberland et *al.* (2014).

Les analyses physico-chimiques du sol ont été réalisées selon des méthodes standard. La teneur en azote du sol et des plantes a été déterminée par la méthode Kjeldahl (Lynch et *al.*, 1999). En effet, nous avons utilisé la procédure de la méthode du vert de malachite après digestion mixte par les acides perchlorique et nitrique pour mesurer la teneur en P du sol (Valizadeh et *al.*, 2003). La méthode Anne (McBratney et *al.*, 2000) a été utilisée pour mesurer la teneur en matière organique du sol. La méthode Horton et Nelson (Leo et *al.*, 1963) a été réalisée pour déterminer la proportion calcaire du sol en mesurant le volume de  $CO_2$ , tandis que le pH du sol a été mesuré dans la suspension du sol avec de l'eau déionisée (rapport sol: eau = 1:2,5) avec un pH-mètre (Shen et *al.*, 1996). L'absorption de N par la plante en  $t ha^{-1}$  a été estimée en multipliant la biomasse sèche par le taux de contenu en N dans la plante. Les données climatiques ont été fournies par la station météorologique de Dar Beida ( $36^{\circ}72' N$ ,  $3^{\circ}25' E$ ) qui est située à 5,5 km du site expérimental

## **2.4 Aperçu du modèle**

STICS est un modèle de culture à pas de temps journalier, dans lequel la phénologie est principalement déterminée par la température. (Brisson et *al.*, 2003). La plante est caractérisée par sa biomasse et son indice de surface foliaire (Brisson et *al.*, 2008). STICS simule dynamiquement le développement de la canopée, la biomasse et le développement des racines (y compris l'absorption de N et d'eau) (Falconnier et *al.*, 2019). La formation du rendement est décomposée en un processus qui calcule le nombre de grains produits, et de remplissage des grains. Ces processus définissent la simulation de la matière sèche et de l'azote accumulés dans le grain. Le modèle simule également les effets de l'azote, de l'eau, des contraintes thermiques et de l'anoxie. Les systèmes de cultures intercalaires peuvent être modélisés par STICS en utilisant une représentation simple du système divisé en : la canopée dominante et la canopée de sous-étage qui est divisée en une partie ombragée et une partie ensoleillée. Chaque canopée est définie par un microclimat lumineux estimé par un bilan radiatif qui pilote les différentes dynamiques des trois sous-systèmes (Brisson et *al.*, 2004). Le modèle propose deux options pour simuler l'interception du rayonnement : (i) une application directe de la loi de Beer, qui est utilisée pour les cultures homogènes, et une approche par transfert de rayonnement, qui est plus adaptée aux cultures en rangs (système de cultures intercalaires). Pour les besoins en eau des cultures, le modèle propose une approche par coefficient de culture pour laquelle l'évapotranspiration potentielle est définie comme une variable motrice. Cependant, cette approche n'est pas adaptée

lorsque la loi de Beer ne peut pas être appliquée directement (c'est-à-dire l'utilisation du formalisme de transfert radiatif). L'alternative est une approche résistive qui estime les besoins en eau des plantes et l'évaporation du sol en utilisant le modèle à pas de temps quotidien de Shuttleworth et Wallace (Brisson *et al.*, 1998a).

## **2.5 Données d'entrée et options de simulation**

STICS requiert comme entrée, des données pédologiques et climatiques, en plus des paramètres de gestion des cultures et des plantes. Nous avons paramétré la plupart des paramètres du sol directement à partir du résultat de l'analyse du sol et/ou par calcul direct dans le cas de certains paramètres du sol. Nous avons également paramétré la teneur initiale en eau et en azote du sol. Les données climatiques comprennent la température minimale et maximale de l'air, le rayonnement global, les précipitations, la vitesse du vent et l'humidité relative. Tous les systèmes de culture ont été réalisés dans les mêmes conditions pédoclimatiques. Pour chaque combinaison Campagne (2018/2019 et 2019/2020) × système de culture (blé seul, pois chiche seul, blé et pois chiche associé), nous avons paramétré un fichier de gestion des cultures (la densité des plantes, les dates et la profondeur des semis, ainsi que les dates respectives d'application de N et d'irrigation). Nous avons considéré une profondeur de 80 cm pour le calcul des stocks de N et d'eau du sol. La date de récolte a été simulée sur la base de la teneur en eau des graines. La densité d'émergence a été utilisée au lieu de la densité de semis, afin d'avoir une simulation plus réaliste. Cette dernière précaution a été adoptée pour mieux prendre en compte l'impact d'autres facteurs (par exemple le stress biotique) qui ne sont pas simulés par le modèle. Indépendamment de l'utilisation du formalisme de transfert radiatif lors de la simulation des cultures intercalaires, nous avons dû mentionner la largeur des inter-rangs et l'orientation des rangs. Le modèle de culture STICS nécessite également des fichiers de plantes spécifiques. Le modèle étant générique, nous avons calibré au cours de ce travail un fichier plante pour chaque système de culture. De plus, nous avons simulé six situations pour chaque culture. Chaque situation, appelée Unité de Simulation (USMs) dans STICS, représente une combinaison Climat×Sol×Gestion de la culture. Le total des USMs utilisées dans cette étude est de 18 USMs (3 systèmes de culture×3 niveaux de fertilisation×2 années de culture).

## **2.6 Calibration de STICS**

### **2.6.1 Culture du pois chiche**

STICS n'a jamais été calibré pour la culture du pois chiche. Ce travail est donc la première calibration jamais réalisée pour le pois chiche en utilisant le modèle de culture STICS. Cette procédure de calibration a été réalisée en trois étapes, elle est partiellement inspirée de l'approche adoptée pour la féverole par Falconnier *et al* (2019). La première étape a consisté en

une revue de la littérature. Le modèle est déjà calibré pour la culture du pois. En raison des similitudes physiologiques entre les deux espèces, nous avons conservé les mêmes formalismes et les mêmes valeurs initiales que le fichier de la plante de pois (Corre-Hellou et *al.*, 2009), à l'exception de l'option de calcul du LAI, pour laquelle nous avons choisi de simuler le LAI comme le solde net entre la croissance et la sénescence tel qu'il a été décrit par (Brisson et *al.*, (2008). Nous n'avons fixé qu'un seul paramètre issu de la littérature, à savoir  $k_{max}$  (Tableau 14) qui correspond au coefficient de la culture pour les besoins maximal en eau. Pour l'espèce pois chiche,  $k_{max}$  était égal à 1 selon Garofalo et *al.* (2009). Dans la deuxième étape, nous avons fixé les valeurs des paramètres directement à partir de l'ensemble des données expérimentales. Au total, 4 paramètres ont été déterminés de cette manière, notamment le nombre minimum et maximum de graines par unité de surface ( $nbgrmin$  et  $nbgrmax$ ), le poids maximum du grain ( $pgrainmaxi$ ) et la hauteur maximum de la culture ( $hautmax$ ). La dernière étape a consisté à optimiser les paramètres. Cette étape a suivi la méthodologie présentée par Guillaume et *al.* (2011). Ces auteurs ont divisé le travail d'optimisation en différentes étapes, où chaque étape représente un processus clé simulé par le modèle. Alors que les valeurs optimisées de l'étape précédente étant utilisées comme les valeurs par défaut de l'étape suivante.

Nous avons optimisé plusieurs paramètres, qui étaient liés aux différents processus pris en compte par le modèle : phénologie, croissance des racines, évolution de la surface foliaire, croissance des pousses, répartition de la biomasse dans les organes, absorption de l'azote, fixation de l'azote et formation du rendement (Tableau .13). Cependant, les paramètres d'émergence n'ont pas été optimisés car nous avons forcé le modèle à simuler l'émergence des plantes à chaque date observée. De plus, nous n'avons pas optimisé les paramètres contrôlant le stress dû au gel car il n'y a pas eu de gel pendant l'expérience au champ. Les optimisations ont été réalisées en utilisant les variables suivantes : (i) les dates des stades de développement observés (fin de la phase juvénile, floraison et stade de récolte), (ii) les variables temporelles des plantes et du sol (LAI, profondeur des racines, teneur en eau et en azote du sol à une profondeur de 80 cm, biomasse sèche aérienne et teneur en N de la plante) et (iii) les variables de rendement (nombre de grains par  $m^2$  et rendement en grains). L'optimisation a été réalisée à l'aide de l'outil d'optimisation Javastics, qui utilise l'algorithme simplex, basé sur le critère des moindres carrés (Wallach et *al.*, 2011).

**Tableau 13 :** Description et définition des unités des paramètres optimisés pour le pois chiche et le blé dur cultivés en culture pure et en système de culture intercalaire.

Processus	Paramètre	Définition	Unité
<b>Phénologie</b>	stlevamf	Cumul du temps thermal entre les stades LEV (levée) et AMF (accélération maximale de la croissance foliaire, fin de la phase juvénile)	degrés-jour
	stlevdrp	Cumul du temps thermal entre les stades LEV (levée) et DRP (début de remplissage du grain)	degrés-jour
	stamflax	Cumul du temps thermal entre les stades AMF (pleine croissance foliaire, fin de la phase juvénile) et LAX (LAI maximale, fin de la croissance foliaire)	degrés-jour
	stflodrp	Cumul du temps thermal entre les stades FLO (floraison) et DRP (début de remplissage du grain)	degrés-jour
	stdrpdcs	Cumul du temps thermal entre les stades DRP (début de remplissage du grain) et DES (début des changements dynamique de l'humidité dans le grain)	degrés-jour
	stdrpmat	Cumul du temps thermal entre les stades DRP (début de remplissage du grain) et MAT (Maturité)	degrés-jour
	<b>Croissance racinaire</b>	croirac	Vitesse d'élongation de l'apex racinaire
draclong		Taux maximum de production de longueur de racine par plante	cm.plante-1.degrés-jour-1
sensrec		Indice de sensibilité de la culture à la sécheresse (1=insensible)	SD
<b>Feuilles</b>	dlaimaxbrut	Taux maximum de production de la LAI	m2 feuille.plante-1.degrés-jour-1
	durvieF	Durée de vie maximale d'une feuille adulte	SD
	laicomp	LAI au-dessus duquel la compétition entre plantes commence	m2.m-2
	durvie-supmax	durée de vie relative supplémentaire due à l'excès de N dans la plante (NNI> 1)	SD
	adens	Paramètre de compétition inter-plante	SD
	bdens	Densité minimale au-dessus de laquelle la compétition inter plantes commence	m-2
	innturgmin	Paramètre de la fonction de stress azoté sur l'expansion foliaire (INNLAJ)	SD
	innsen	Paramètre de la fonction de stress azoté sur la sénescence (INNsenes)	SD
	rapsenturg	Seuil de teneur en eau du sol pour simuler le stress de sénescence hydrique en proportion du stress de turgescence	s.m-1
	hautmax	Hauteur maximale de la culture	m

<b>Interception de la lumière</b>	rapforme	Rapport épaisseur/largeur de la forme de la culture (négatif lorsque la base de la forme < haut)	SD
	adfol	Paramètre déterminant l'évolution de la densité foliaire au sein de la forme choisie	m-1
	dfolbas	Densité foliaire minimale au sein de la forme considérée	m <sup>2</sup> feuille.m <sup>-3</sup>
	dfolhaut	Densité foliaire maximale au sein de la forme considérée	m <sup>2</sup> feuille.m <sup>-3</sup>
	ktrou	Coefficient d'extinction du rayonnement photosynthétiquement actif à travers la culture	*
<b>Croissance aérienne</b>	efcroijuv	Efficacité maximale d'utilisation du rayonnement pendant la phase juvénile	g.MJ <sup>-1</sup>
	efcroiveg	Efficacité maximale d'utilisation des rayonnements pendant le stade végétatif	g.MJ <sup>-1</sup>
	efcroirepro	Efficacité maximale d'utilisation des rayonnements pendant la phase de remplissage des grains	g.MJ <sup>-1</sup>
<b>Partitionnement de la biomasse</b>	sea	Surface spécifique des enveloppes de fruits	cm <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>
	envfruit	Fraction de l'enveloppe du grain	SD
<b>Absorption de l'azote</b>	Vmax1	Taux d'absorption spécifique maximal de l'azote avec le système de transport à faible affinité	Åµmole.cm <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
	Vmax2	Taux d'absorption spécifique maximal de l'azote avec le système de transport à forte affinité	Åµmole.cm <sup>-1</sup> h <sup>-2</sup>
	inngrain2	NNI minimale pour une absorption nette nulle de l'azote pendant le remplissage des grains	SD
	Kmabs2	Constante d'affinité de l'absorption de l'azote par les racines pour le système à faible absorption	Åµmole.L <sup>-1</sup>
<b>Fixation de l'azote</b>	concNrac0	Concentration de nitrate-N ou quantité de nitrate-N au-dessus de laquelle la fixation de N est totalement inhibée	kg.ha <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup> ou kg.ha <sup>-1</sup> .cm <sup>-1</sup>
	concN-racN100	Concentration de nitrate-N ou quantité de nitrate-N au-dessous de laquelle la fixation de N est maximale	kg.ha <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup> ou kg.ha <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>
	fixmaxveg	Taux de fixation symbiotique maximal de l'azote par unité de taux de croissance végétative	kg.t <sup>-1</sup>
	fixmaxgr	Taux de fixation symbiotique maximal de l'azote par unité de taux de croissance des grains	kg.t <sup>-1</sup>
	stdnofno	Cumul du temps thermal entre le début et la fin de la nodulation	degrés-jour
<b>Eau</b>	kmax	Coefficient cultural maximal pour les besoins en eau (= MET/PET)	SD
	rsmin	Résistance stomatique minimale des feuilles	SD
<b>Formation des grains</b>	cgrain	Pente de la relation entre le nombre de grains et le taux de croissance	grains.g <sup>-1</sup> .d
	cgrainv0	Nombre de grains produits lorsque le taux de croissance est nul	grains.m <sup>-2</sup>

	nbjgrain	Nombre de jours utilisés pour calculer le nombre de grains viables	d
	irmax	Indice de récolte maximale	SD
	nbgrmin	Nombre minimum de fruits par surface	nb.m-2
	nbgrmax	Nombre maximum de fruits par surface	nb.m-2
<b>Remplissage des grains</b>	viticarb	Taux d'augmentation de l'indice de récolte (Carbone) en fonction du temps	g grain.g-1.d-1
	vitirazo	Taux d'augmentation de l'indice de récolte (Azote) en fonction du temps	g grain.g-1.d-1
	tmaxremp	Température maximale au-dessus de laquelle le remplissage des grains s'arrête	°C
	pgrainmaxi	Poids maximal des grains (à 0% de teneur en eau)	g

**Tableau 14:** Description des différents processus de la simulation des données pour l'optimisation des paramètres, et les valeurs des paramètres calibrés dans STICS pour le pois chiche et le blé dur cultivés dans un système de culture pure et de culture intercalaire.

Processus	Paramètres	Unité	Blé dur		Pois chiche	
			C seul	C associé	C seul	C associé
Phénologie	stlevamf	dégréé j	300	380	1100	1500
	stlevdrp	dégréé j	525	660	1350	1750
	stamflax	dégréé j	140	160	450	550
Croissance racinaire	croirac	cm degréé j <sup>-1</sup>	0.0524	0.039	0.035	0.025
	draclong	cm plt <sup>-1</sup> degréé j <sup>-1</sup>	423.09	380	376.68	523.4
	sensrec	Standard	0.115	0.129	0.027	0.031
Feuilles	dlaimaxbrut	m <sup>2</sup> plt <sup>-1</sup> degréé j <sup>-1</sup>	0.00028	0.0002	0.00052	0.0011
	durvieF	Standard	344.35	379.24	416.33	483.55
	laicomp	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	0.31	0.358	0.388	0.504
	durviesupmax	Standard	0.898	0.941	0.894	0.105
	adens	Standard	-0.12	-0.11	-0.05	-0.07
	bdens	m <sup>2</sup>	10.2	16.74	10.77	10.23
Croissance des pousses (tiges)	efcroijuv	g MJ <sup>-1</sup>	2.8	2.05	1.87	1.76
	efcroiveg	g MJ <sup>-1</sup>	4.33	4.45	3.48	4.11
	efcroirepro	g MJ <sup>-1</sup>	3.87	3.6	3.68	2.23
Répartition de la biomasse dans les organes	sea	cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	95.7	85.47	55.63	69.42
	envfruit	Standard	0.3	0.3	0.435	0.41
Interception des radiations	rapforme	Standard	-	4.14	-	2.63
	adfol	m <sup>-1</sup>	-	-1.22	-	1.16
	dfolbas	m <sup>2</sup> feuille m <sup>-3</sup>	-	3.48	-	6.98
	dfolhaut	m <sup>2</sup> feuille m <sup>-3</sup>	-	9	-	7.16
	ktrou	*	-	1.9	-	1.93
Absorption et Accumulation de l'azote	Vmax1	µmole cm <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	0.0036	0.0009	0.0019	0.0012
	Vmax2	µmole cm <sup>-1</sup> h <sup>-2</sup>	0.025	0.02	0.041	0.0047
	inngrain2	Standard	0.74	1.45	0.38	0.42
	Kmabs2	µmole L <sup>-1</sup>	37082	36337	4485.3	10222
	concNrac0	kg ha <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup>	-	-	1.2	1.2
	concNracN100	kg ha <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	-	-	0.4	0.4
	fixmaxveg	kg t <sup>-1</sup>	-	-	10	10
Eau	kmax	Standard	1.27	-	1	-
	rsmin	Standard	-	46.69	-	27.92
Rendement Formation du grain	cgrain	grains g <sup>-1</sup> j	0.045	0.059	0.048	0.095
	cgrainv0	grains m <sup>-2</sup>	0.00045	0.00092	0.022	0.07
	nbjgrain	J	30	30	19	19
	irmax	Standard	0.55	0.55	0.95	0.89
	viticarb	g grain g <sup>-1</sup> j <sup>-1</sup>	0.008	0.0125	0.057	0.054
	vitirazo	g grain g <sup>-1</sup> j <sup>-1</sup>	0.029	0.055	0.044	0.06
	tmaxremp	Degrée C°	35.63	39.83	37.46	39.48
	pgrainmaxi	G	0.0363	0.0363	0.3	0.3

### **2.6.2 La culture du blé dur**

Le blé dur est l'une des cultures les plus couramment calibrées par le modèle STICS. Il a été calibré pour une large gamme de cultivars par plusieurs études (Brisson *et al.*, 1998b et 2002). Cependant, cette recherche est considérée comme la première étude dans laquelle la calibration de STICS a été effectuée sur le cultivar Vitron, qui est couramment cultivé en Algérie dans des conditions méditerranéennes. Nous avons utilisé les valeurs initiales du cultivar Acalou (disponible dans la version 9.2 de STICS) car c'est le cultivar calibré le plus proche de Vitron. Pour ce faire, nous avons suivi la même méthode que celle adoptée pour la calibration du pois chiche (tous les formalismes restent les mêmes que dans le fichier initial, et aucun paramètre n'a été déterminé à partir de la littérature). La simulation de l'interception du rayonnement a été faite en utilisant la loi de Beer pour la culture pure du blé ainsi que pour le pois chiche. Nous avons utilisé l'approche des coefficients de culture telle que présentée dans (Brisson *et al.*, (2008) pour les besoins en eau des cultures). L'évapotranspiration potentielle a été calculée en utilisant la formule de Penman (Penman, 1948).

### **2.6.3 Culture intercalaire blé dur-pois chiche**

Le calibrage de la culture intercalaire a été effectué en utilisant les ensembles de données des cultures pures de chaque espèce, tandis que l'ensemble de données des cultures associées n'a été utilisé que pour l'évaluation du modèle. Les valeurs initiales des fichiers de plantes correspondent aux valeurs finales obtenues lors de la calibration des cultures uniques. Le modèle STICS pour le cas des cultures associées suppose que des forme géométrique simple (c'est-à-dire un rectangle ou un triangle) pour représenter un couvert végétale (Brisson *et al.*, 2008). Nous avons testé les deux formes pour les deux cultures, et il apparaît que la forme triangulaire donne les meilleurs résultats pour les canopées du blé et du pois chiche. Les procédures d'optimisation et de simulation du système de culture intercalaire ont été réalisées en utilisant le formalisme du transfert radiatif. Nous avons développé une étape supplémentaire dans les procédures d'optimisation des cultures intercalaires en utilisant la variable LAI. Les paramètres optimisés qui ont été générés à partir de ces procédures sont : *ktrou*, *rapforme*, *adfol*, *dfolbas* et *dfolhaut* (voir tableau 1). Le paramètre *rsmin* a également été optimisé et fait partie du formalisme de l'approche résistive qui a été activé pour simuler les besoins en eau des cultures dans les cultures intercalaires. L'évapotranspiration potentielle a été calculée en utilisant l'équation de Shuttleworth-Wallace.

## 2.7 Analyse statistique et évaluation du modèle

Nous évaluons le modèle à la fois graphiquement et quantitativement en utilisant plusieurs indicateurs statistiques : l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur quadratique moyenne normalisée du modèle (NRMSE), l'efficacité du modèle (EF) et le coefficient de corrélation de Pearson ( $R^2$ ). La RMSE (Eq. 1) permet de déterminer l'erreur de prédiction du modèle, nous essayons de minimiser cette valeur autant que possible pour maximiser la précision du modèle.

$$\text{RMSE} = \sqrt{(1/n) \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

NRMSE (Eq. 2) est la RMSE normalisée, qui facilite la comparaison en considérant différentes échelles.

$$\text{NRMSE} = (\text{RMSE}/\bar{O}) * 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

EF (Eq.3) est un indicateur précieux pour comparer les simulations de modèles avec différents paramètres.

$$\text{EF} = 1 - (\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2) / (\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2) \quad (\text{Eq. 3})$$

$R^2$  (Eq.4) est utilisé pour évaluer la précision de la régression linéaire entre les valeurs observées et simulées.

$$R^2 = [(\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})) / \sigma_S \sigma_O]^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec  $O_i$  et  $S_i$  étant respectivement les valeurs observées et simulées pour les ( $i$ ) mesures.  $\bar{O}$  et  $\bar{S}$  étant la moyenne des valeurs observées et simulées, et  $n$  le nombre total d'observations. La combinaison de ces quatre indicateurs a permis une évaluation détaillée du modèle. Nous avons utilisé la bibliothèque STICS eval R pour tracer tous les graphiques et calculer les critères statistiques présentés dans cette étude.

## 3 Résultats

### 3.1 Estimation, optimisation et mesure des paramètres du sol et des cultures

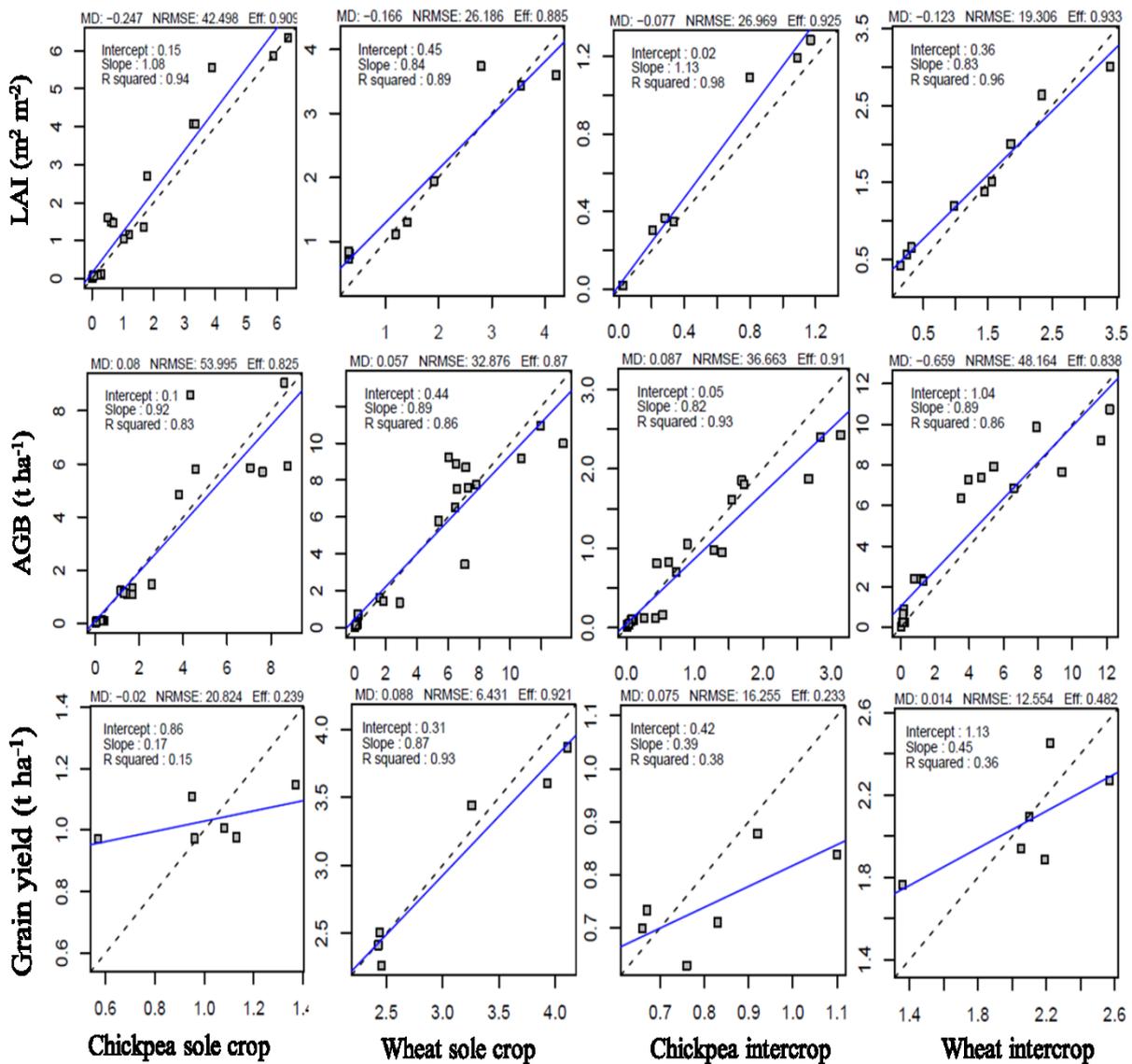
Parmi les processus agro-éco-physiologiques étudiés (Tableau 14), une seule valeur de paramètre ( $k_{\max}$ ) a été fixée à partir de la littérature. Les valeurs  $k_{\max}$  ont été obtenues en particulier pour le blé (1) et le pois chiche (1,27) cultivés en monoculture. De plus, le poids maximal du grain ( $p_{\text{grainmaxi}}$ ) pendant le remplissage du grain a été directement calculé à partir de mesures sur le terrain, il était compris entre 0,04 et 0,3 g, respectivement pour les cultures pures de blé et de pois chiche (Tableau 2). Cependant, tous les autres paramètres (plus de 37 paramètres) ont été optimisés avec OptimiSTICS en utilisant les valeurs des variables mesurées sur

le terrain. Tous ces paramètres ont été définis pour les deux espèces cultivées en monoculture et en système de culture intercalaire. Selon le Tableau 2, la première calibration du pois chiche montre une différence significative entre les valeurs optimisées pour le pois chiche en monoculture et en culture intercalaire. Cette différence était plus prononcée pour les paramètres de croissance des racines ( $d_{\text{laimaxbrut}}$ ), d'acquisition de l'azote ( $K_{\text{mabs2}}$ ) et de formation du rendement ( $c_{\text{grain}}$  et  $c_{\text{grain0}}$ ). En effet, les valeurs optimisées pour le pois chiche en culture intercalaire étaient plus élevées de plus de 50% par rapport au pois chiche en monoculture (Tableau 14). La tendance inverse a été observée avec les paramètres  $D_{\text{urviesupmax}}$ ,  $E_{\text{fcroirepro}}$ ,  $V_{\text{max}}$ ,  $V_{\text{max2}}$ , ou les valeurs optimisées soient plus élevées (+60%) pour le pois chiche en monoculture.

### **3.2 Accord entre les données prédites et observées**

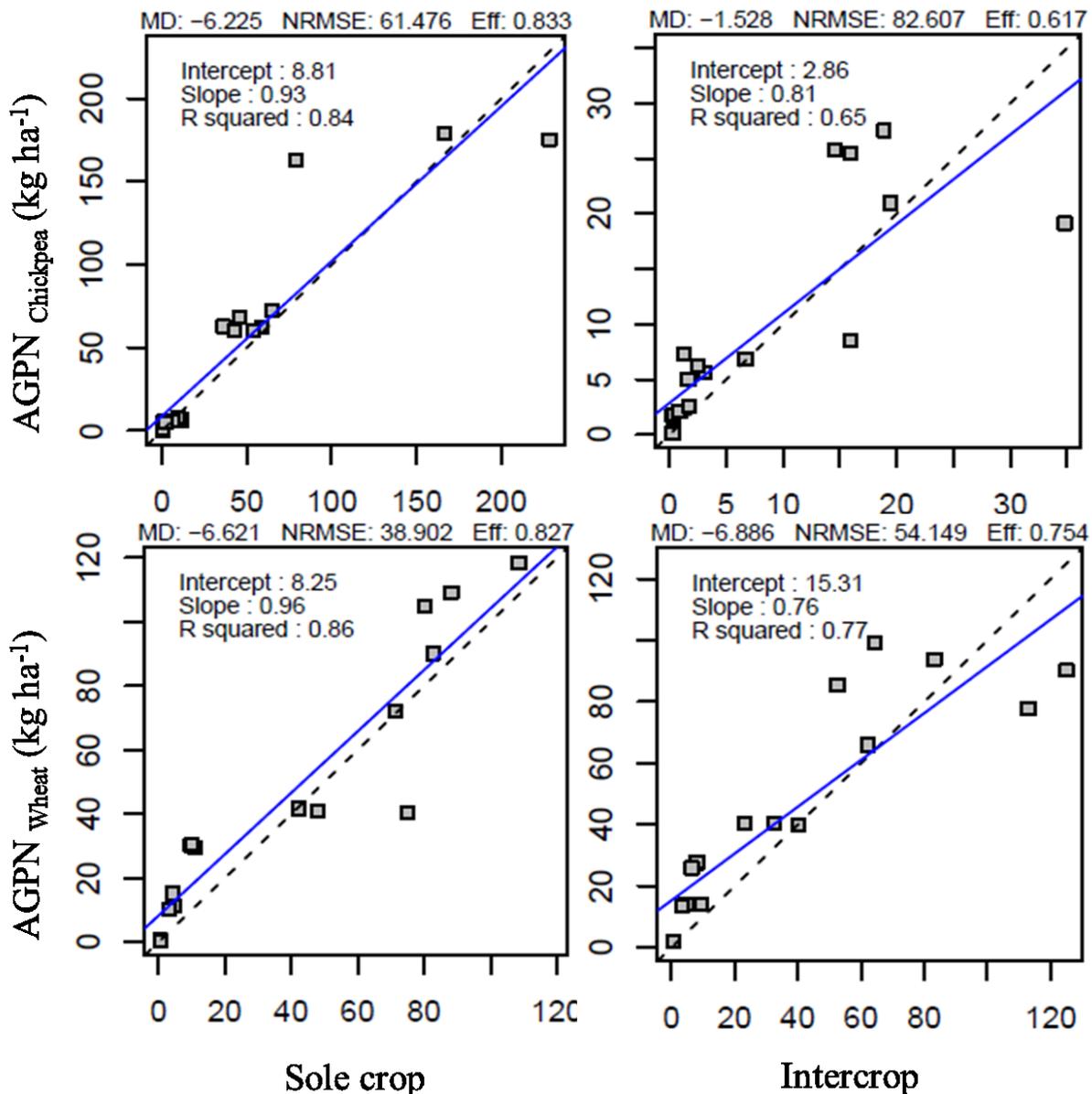
#### **3.2.1 Croissance de la culture, rendement en grain et absorption de N**

La calibration des paramètres (Tableau 14) liés à la croissance des plantes a conduit à une très bonne prédiction de la croissance du pois chiche et du blé dans les deux systèmes de culture. Ainsi, les valeurs prédites de la LAI et de l'AGB (biomasse aérienne) étaient en bon accord ( $0,82 > EF > 0,93$  et  $54 < \text{NRMSE} < 19,30$ ) avec les valeurs observées. Ceci a été observé pour les deux espèces cultivées dans des systèmes de culture intercalaire et de culture pure (Figure 22) pendant toutes les périodes phonologiques échantillonnées. Cette première calibration de l'espèce pois chiche montre que STICS a bien fonctionné pour prédire LAI ( $EF=0,91$  : monoculture et  $EF=0,93$  : culture associé) et AGB ( $EF=0,83$  : monoculture et  $EF=0,91$  : culture associé). De plus, la calibration du rendement a permis d'atteindre un accord satisfaisant entre les valeurs prédites et observées pour le blé en culture intercalaire ( $EF=0,48$  et  $\text{NRMSE}=12,6$ ) et en monoculture ( $EF=0,92$  et  $\text{NRMSE}=6,4$ ) (Figure 22). Cependant, comme pour la plupart des espèces de légumineuses,  $EF$  est resté faible ( $EF=+0,23$ ) dans le cas du rendement en grain du pois chiche avec une erreur de prédiction relativement plus faible ( $\text{NRMSE} = 16,2$ ) dans le système de culture intercalaire par rapport au système de culture pure ( $\text{NRMSE} = 20,8$ ) (Figure 22).



**Figure 22 :** Comparaison du LAI, de la biomasse aérienne (AGB) et du rendement en grains observés (axe X) et simulés par STICS (axe Y) pour un ensemble des données calibrées du blé dur et le pois chiche cultivés en monoculture et en cultures intercalaires. NRMSE = Erreur quadratique moyenne normalisé, EFF = efficacité du modèle, MD = écart moyen. La ligne bleue est la ligne 1:1. La ligne en pointillé représente la régression des valeurs simulées par rapport aux valeurs observées. Les symboles blancs correspondent à la fin de la saison de croissance.

Les valeurs de l'absorption de N (N acquis par la biomasse aérienne de la plante) par le pois chiche et le blé ont été simulées de manière satisfaisante avec une bonne EF à la fois dans les systèmes de culture intercalaire et de culture pure (Figure 23). L'EF était cependant plus grande pour les espèces en monoculture (EF=0,83 pour le pois chiche et le blé) par rapport aux espèces en cultures intercalaires (EF=+0,62 et 0,75, respectivement pour le pois chiche et le blé). Les valeurs de l'erreur de prédiction relative (NRMSE) étaient beaucoup plus grandes pour le pois chiche (61 et 82, respectivement dans la culture pure et la culture intercalaire) que pour le blé (38 et 54, respectivement dans la culture pure et la culture intercalaire) (Figure 23).



**Figure 23** : Comparaison de N plante (AGPN) observé (en abscisse) et simulé par STICS (en ordonnée) pour un ensemble de données calibrées sur le blé dur et le pois chiche cultivés en monoculture et en cultures intercalaires.

### 3.2.2 Profondeur d'enracinement et stocks d'eau et d'azote du sol

La calibration des paramètres du sol a fourni une prédiction acceptable ( $EF > 0.50$ ) de la teneur en eau du sol et de la profondeur d'enracinement (Photo 6, Annexe 1) pour toutes les espèces et systèmes de culture étudiés (Figure 24). Ceci était également associé à une faible erreur de prédiction relative qui se situait entre 8 et 9 et entre 30 et 36, respectivement pour le stock d'eau du sol et la profondeur d'enracinement. Cependant, les valeurs de la teneur en azote du sol ont été mal simulées, notamment dans les conditions de monoculture ( $EF \leq 0,28$  et  $NRMSE > 49$ ). Le stock d'eau prédit dans le sol était en accord avec les données observées sur le terrain dans les parcelles en monoculture et en interculture, bien que plus satisfaisant pour la culture du pois chiche ( $EF = 0,65$  et  $0,53$ , respectivement en monoculture et en interculture). Les performances

de STICS sont également satisfaisantes pour la prédiction de la profondeur d'enracinement. Cette prédiction était associée à des valeurs élevées de FE, supérieures à 0,50, pour le pois chiche et le blé cultivés dans des systèmes de cultures intercalaires ou de culture pure (Figure 24). En ce qui concerne la teneur en azote du sol, la qualité de la prédiction était relativement faible pour les deux espèces de cultures intercalaires avec la même valeur de FE (FE=0,44). Alors qu'une mauvaise simulation de la teneur en N du sol a été observée en particulier pour le pois chiche en culture pure (EF=-1,84) et du blé (EF=0,28) (Figure 24).

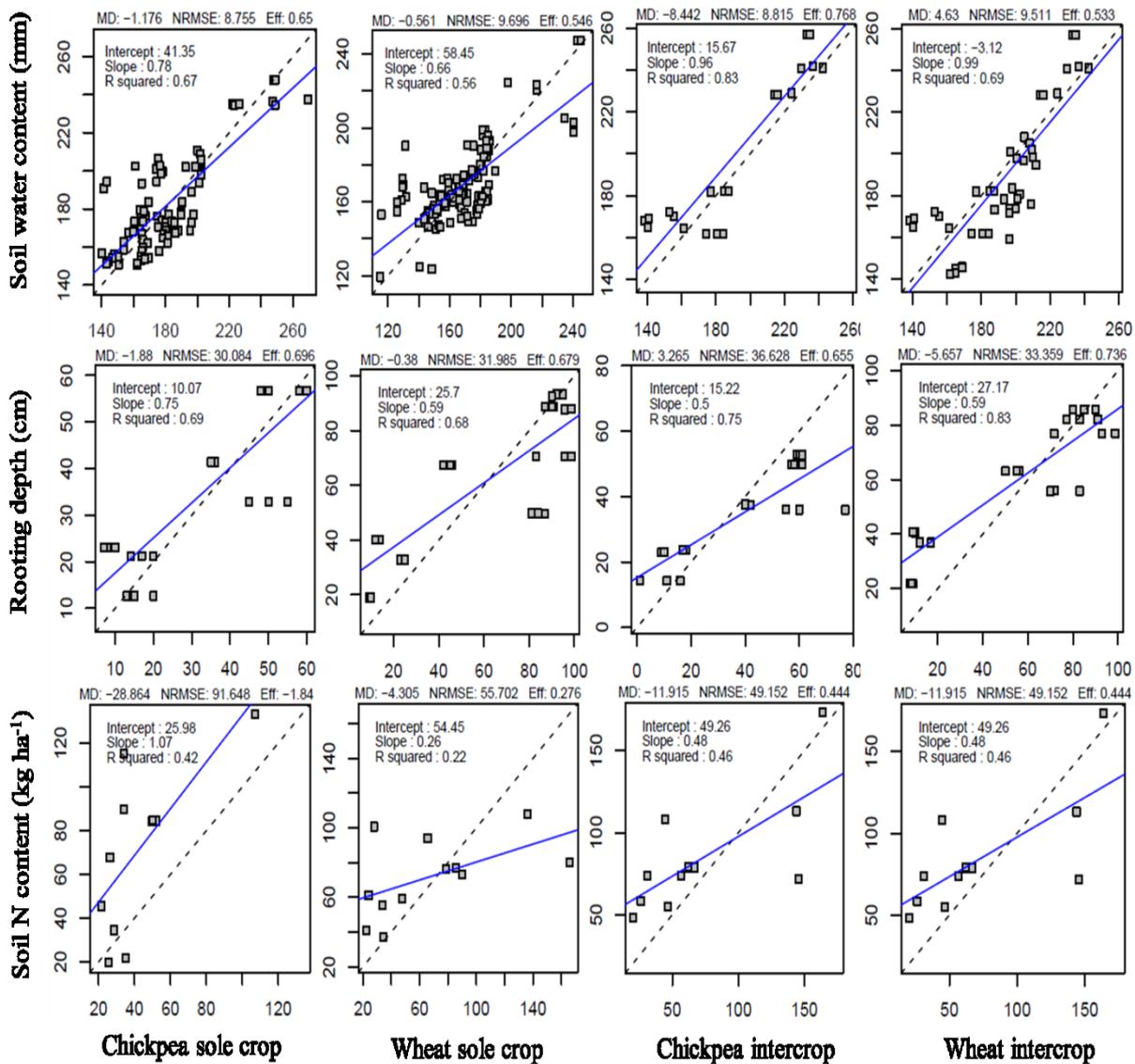
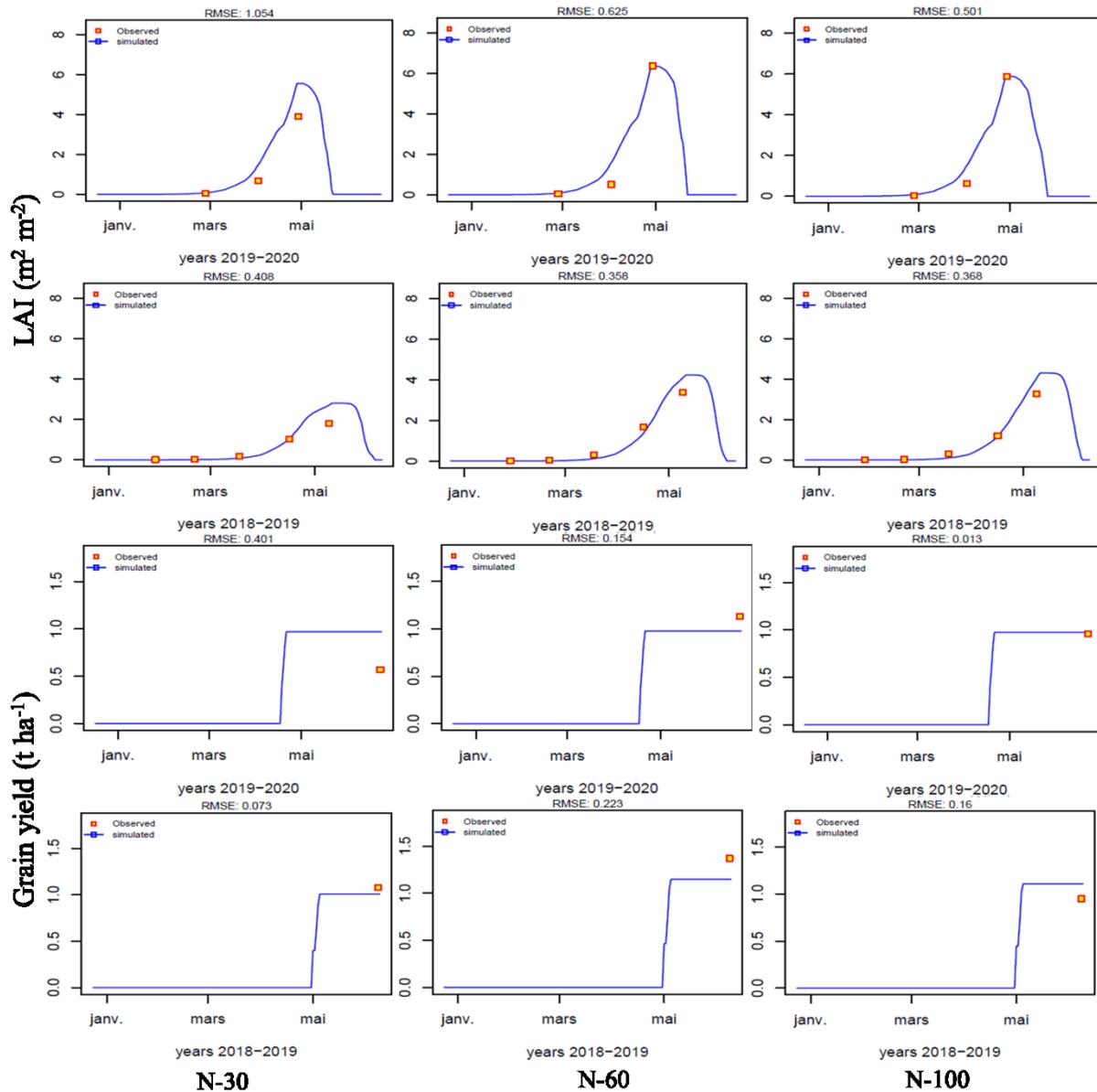


Figure 24 : Comparaison de la teneur en azote et en eau du sol et de la profondeur racinaire observées (en abscisse) et simulées par STICS (en ordonnée) de la calibration des données du blé dur et du pois chiche cultivés en monoculture et en cultures intercalaires.

### **3.3 Dynamique temporelle de la croissance des plantes, du rendement et de l'acquisition d'azote et d'eau**

#### **3.3.1 Pois chiche en monoculture**

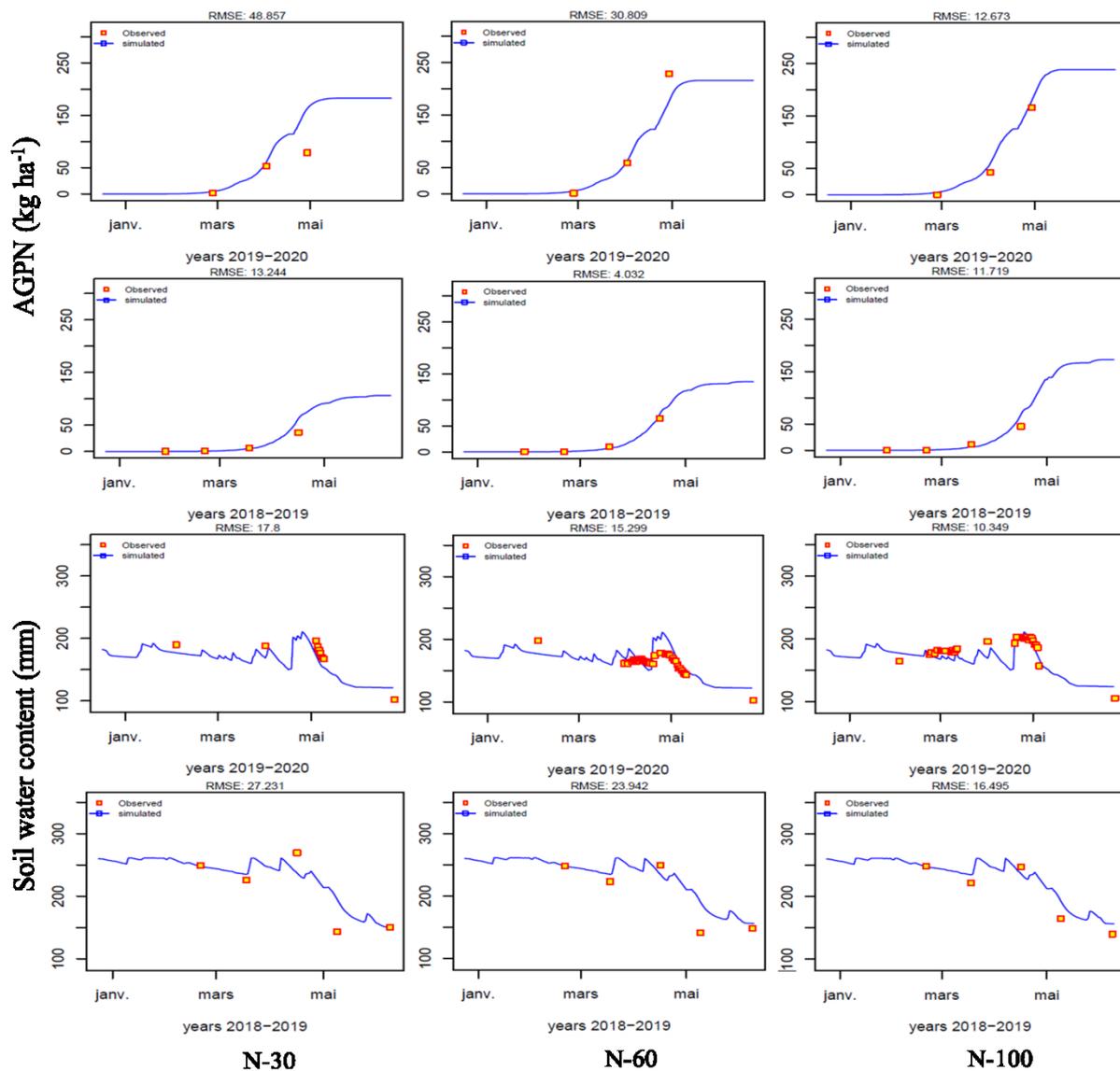
La dynamique temporelle du LAI et du rendement en grain a été bien reproduite parmi les deux saisons de croissance (2018/2019 et 2019/2020) avec une erreur relative de prédiction négligeable ( $RMSE < 1,1$ ). STICS a été capable de simuler parfaitement ( $RMSE$  compris entre 0,36 et 1,1) la dynamique du LAI pendant tous les jours de culture (de l'émergence à la récolte) et les années pour la gamme de doses d'engrais N contrastées (N-30, N-60 et N-100). La plus grande différence entre les valeurs de LAI simulées et observées a été notée pendant la formation des grains (début mai) sous une faible application de N (N-30). Cette variation était comprise entre 1,9 et 2,6  $m^2 m^{-2}$  et entre 4 et 5,5  $m^2 m^{-2}$ , respectivement pendant la première et la deuxième saison de croissance (Figure 25). Le STICS a également reproduit raisonnablement bien ( $RMSE$  de 0,013 à 0,40) la dynamique temporelle du rendement en grain pour le pois chiche cultivé en solitaire sous les trois doses d'engrais N appliquées. La prédiction satisfaisante du rendement du pois chiche a été observée au cours des deux saisons de croissance, sauf au cours de la saison 2018/2019 sous l'application de N-30 où le modèle a sur-estimé (0,96  $t ha^{-1}$ ) le rendement en grain par rapport aux valeurs observées (0,58  $t ha^{-1}$ ) (Figure 25). Cela pourrait s'expliquer par les attaques de pigeons à la période de récolte qui ont causé des pertes de rendement, en particulier pour la culture du pois chiche.



**Figure 25 :** Exemple d'une simulation de la dynamique (ligne bleue) de l'indice LAI et du rendement en grains pour l'ensemble des données calibré, pour une culture pure de pois chiche pendant les deux Campagnes 2018/2019 et 2019/2020. RMSE = erreur quadratique moyenne. Les carrés rouges représentent les observations.

La Figure 26 montre les résultats des valeurs simulées de l'absorption de N par la biomasse aérienne (AGPN) du pois chiche en monoculture et les stocks d'eau du sol sous les trois niveaux d'engrais N. Ces résultats indiquent la capacité du modèle STICS à reproduire correctement la variation temporelle de l'AGPN (RMSE compris entre 4 et 49) et des stocks d'eau du sol (RMSE compris entre 10 et 27) entre les saisons 2018/2019 et 2019/2020 (Figure 26). Les faibles valeurs de RMSE ont été particulièrement observées pour l'AGPN qui a été simulé sous une application modérée (N-60) et élevée (N-100) de N, où l'AGPN observé était moins grand ( $214 \text{ kg ha}^{-1}$ ) que l'AGPN simulé ( $236 \text{ kg ha}^{-1}$ ) dans les conditions de la saison N-60 pour la Campagne 2019/2020. Cependant, la différence entre l'AGPN simulé et observé était beaucoup plus grande (de  $81$  à  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ ) sous une faible application d'azote pendant la même saison de

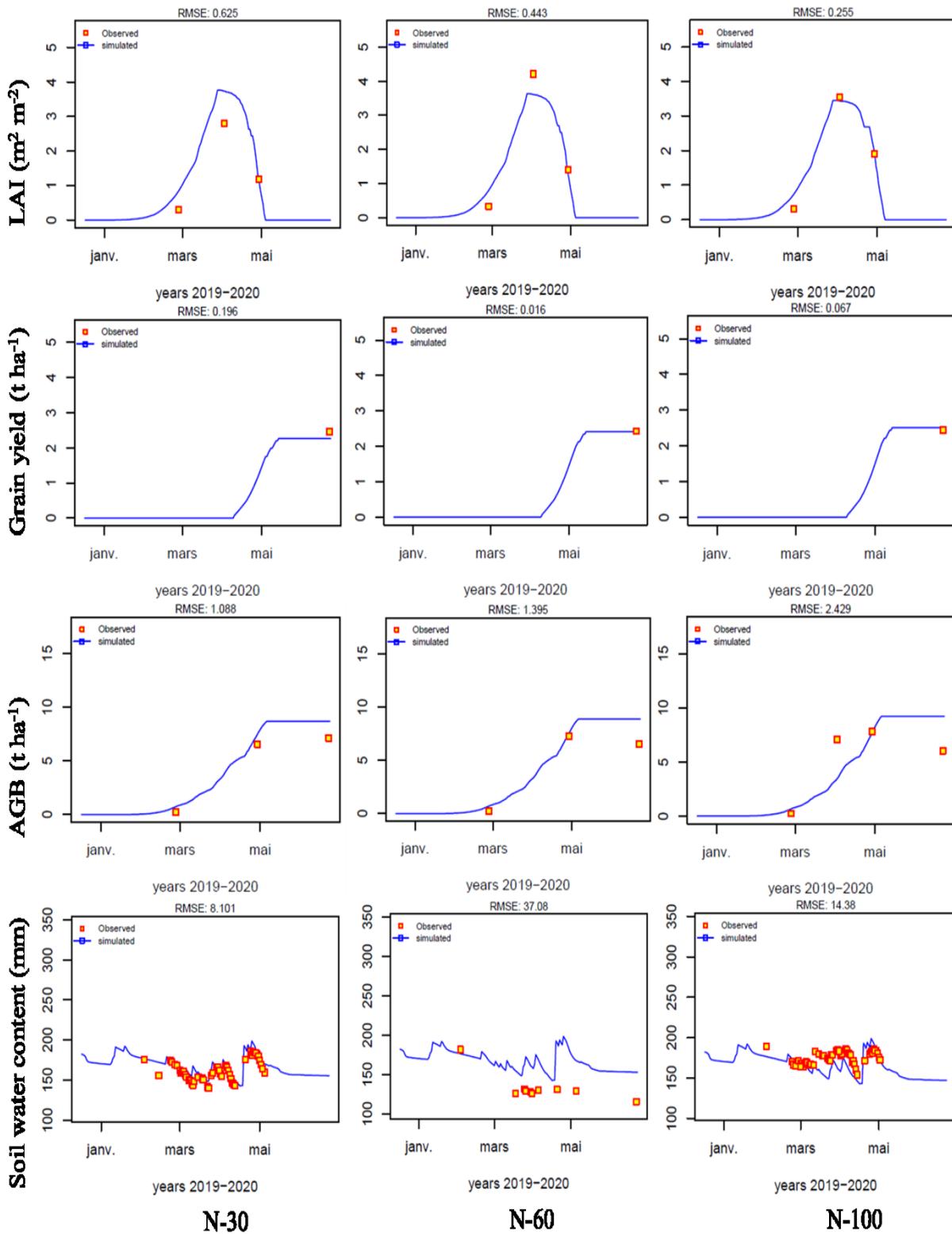
croissance (Figure 26). La même tendance a été observée dans la dynamique temporelle du stock d'eau dans les parcelles de pois chiche en culture pure avec une faible valeur RMSE (comprise entre 10 et 27). Les stocks d'eau simulés ont évolué de 120 (stade d'émergence) à 185 mm (stade de récolte) en 2019/2020 et de 148 à 265 mm au cours de la saison de croissance 2019/-2020 (Figure 26). En effet, la plus grande différence (48 mm) entre les valeurs observées et simulées a été particulièrement obtenue sous une faible application d'azote pendant la première saison de croissance.



**Figure 26 :** Exemple d'une simulation de la dynamique (ligne bleue) de l'azote végétal (AGPN) et de la teneur en eau du sol pour l'ensemble des données calibré, pour une culture pure de pois chiche pendant les deux Campagnes 2018/2019 et 2019/2020. RMSE = erreur quadratique moyenne. Les carrés rouges représentent les observations.

### 3.3.2 Monoculture de blé dur

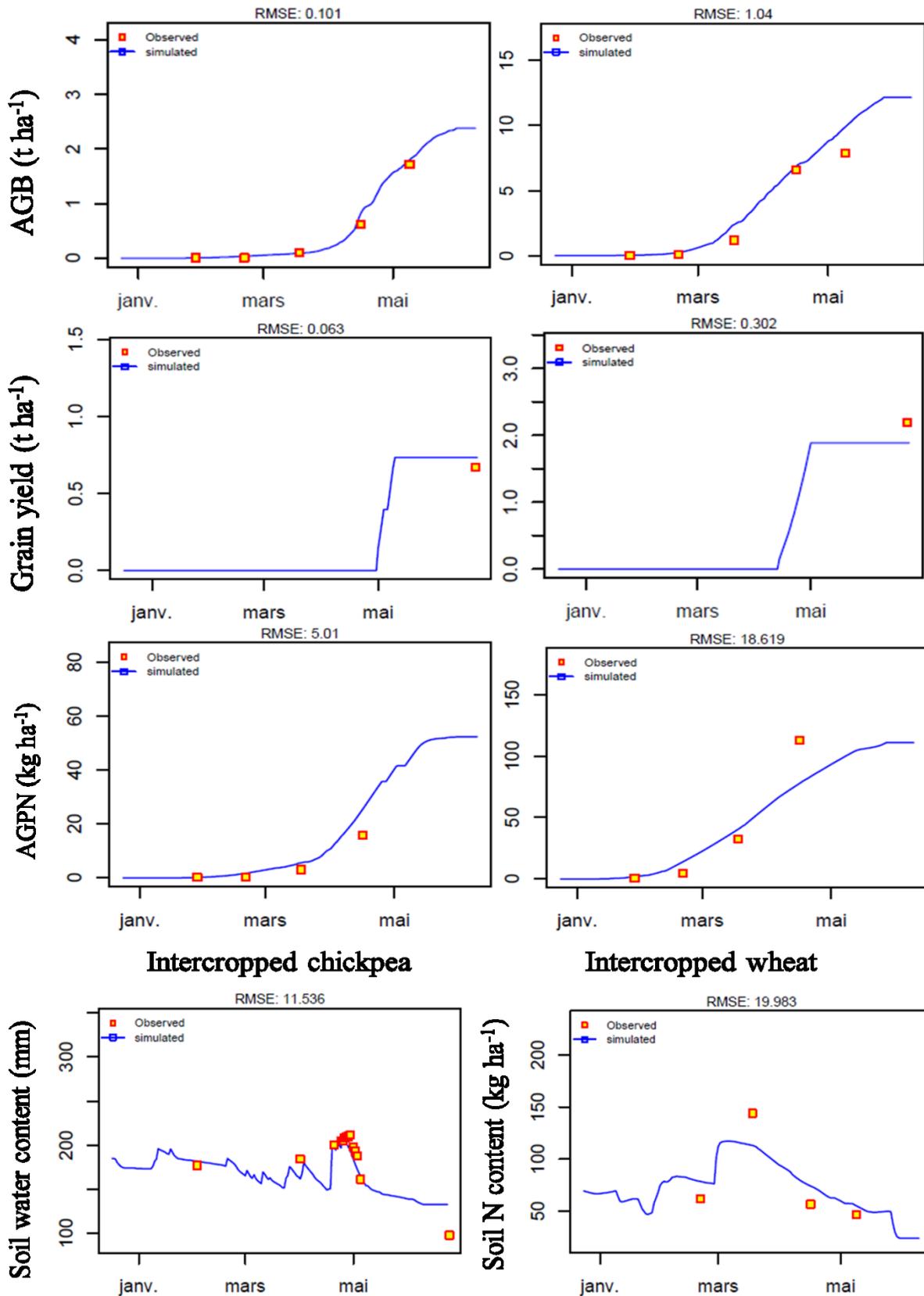
Comme le montre la Figure 27, le LAI et le rendement en grains ont été bien simulés avec une erreur négligeable ( $RMES < 1$ ) pour tous les taux d'engrais N pendant la saison de croissance 2019/-2020. Jusqu'à 76 jours après le semis, la valeur du LAI a été sous-estimée ( $-0,58 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ ) par le modèle sous la dose de N-60, alors qu'elle a été surestimée ( $+0,94 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ ) sous N-30 pendant la même période. Cependant, le rendement en grain a été parfaitement simulé dans toutes les conditions d'application de l'azote où la RMSE variait de 0,02 à 0,2 (Figure 27). En termes d'AGB, la calibration a également conduit à une simulation satisfaisante (RMSE compris entre 1,1 et 2,4) de l'ensemble des données dans la plupart des conditions d'application de l'azote. La plus grande différence ( $2,8 \text{ t ha}^{-1}$ ) entre les valeurs observées et simulées de l'AGB a été observée à la récolte dans les conditions N-100. A la fin de la Figure 27, nous constatons que STICS a également été capable de simuler des doses contrastées d'engrais N et leur effet sur les stocks d'eau dans le sol dans un système de culture de blé. Les stocks d'eau dans le sol ont été assez bien reproduits par le modèle STICS, en particulier dans le cas d'applications faibles ( $RMSE=8$ ) et élevées ( $RMSE=14$ ) d'engrais azotés. Cependant, l'erreur de simulation était relativement plus élevée ( $RMSE=37$ ) sous une application modérée de N (N-60). Cela était probablement dû à la mauvaise qualité des données collectées (parcelles N-60) par la sonde diviner 2000 (fuite d'air dans le tube PVC). Pour le blé cultivé en solitaire, le stock simulé d'eau du sol était relativement stable (entre 150 et 200 mm) pendant la période de culture, par rapport au blé en monoculture (voir Figure 26).



**Figure 27 :** Exemple d'une simulation de la dynamique (ligne bleue) de la LAI, du rendement en grains, de la biomasse aérienne (AGB) et de la teneur en eau du sol pour l'ensemble des données calibré, pour une culture pure de blé dur pendant les deux Campagnes 2018/2019 et 2019/2020. RMSE = erreur quadratique moyenne. Les carrés rouges représentent les observations.

### 3.3.3 Système de culture intercalaire pois chiche-blé dur

La Figure 28 montre les résultats de l'évaluation STICS en utilisant le jeu de données collectées sur le pois chiche et le blé en culture intercalaire (saison 2019/2020). Cette base de données n'a pas été utilisée lors des processus de calibration qui ont été réalisés sur le système de culture pure. Les résultats indiquent que STICS reproduit raisonnablement avec une faible erreur de prédiction la dynamique temporelle de l'AGB (RMSE<1,1), le rendement en grains (RMSE<0,63) et l'AGPN (RMSE<18,62) dans le système de culture intercalaire. Pour le pois chiche en culture intercalaire, la dynamique de ces variables a été simulée quotidiennement mieux ou aussi bien que pour celles du blé en culture intercalaire. Ainsi, les valeurs de RMSE variaient de 0,1 à 1, 0,06 à 0,3 et 5 à 18,6, respectivement pour l'AGB, le rendement en grain et l'AGPN (Figure 28). Cela peut s'expliquer par la calibration correcte et bien faite du pois chiche qui a été effectuée pour la première fois par la présente étude. La plus grande différence entre les valeurs simulées et observées a été notée pour le blé en culture intercalaire où le modèle sous-estimé (-16 kg ha<sup>-1</sup>) l'AGPN au début du remplissage des grains. La teneur en eau et en azote du sol a également été correctement simulée lors de la validation de STICS sur le système de culture intercalaire. Les valeurs simulées de la teneur en eau du sol sur l'ensemble du profil (0-1 m) ont varié de 135 à 200 mm. Les valeurs observées ont été correctement simulées sauf à la fin du cycle de culture où le modèle sur-estime (35 mm) le stock d'eau du sol. La teneur en azote du sol a été moins bien simulée, avec une erreur de prédiction relativement élevée (RMSE=20) par rapport au stock d'eau du sol (RMSE=11,5) dans les parcelles de blé-pois chiche en culture intercalaire. La plus grande différence entre les valeurs observées et simulées a été observée seulement à 83 jours après le semis où le modèle a sous-estimé (-34 kg ha<sup>-1</sup>) le stock de N du sol.



**Figure 28 :** Exemple d'une simulation de la dynamique (ligne bleue) de la biomasse aérienne (AGB), du rendement en grains, de l'azote végétal aérien (AGPN). Pour l'ensemble des données calibré, pour une culture associée de blé dur-pois chiche durant les deux Campagnes 2018/2019 et 2019/2020. RMSE = erreur quadratique moyenne. Les carrés rouges représentent les observations.

## 4 Discussion

### 4.1 La précision de la prédiction dans la calibration de nouvelles cultures et de nouveaux cultivars

La plupart des études de calibration de modèles ont été réalisées plus particulièrement sur de nouveaux cultivars que sur de nouvelles espèces (Loaiza Usuga et Pauwels, 2008). Dans ce cas de calibration, les paramètres des cultures peuvent être utilisés directement par les utilisateurs sans aucune modification mais il reste possible de les adapter uniquement sur les caractéristiques des nouveaux cultivars et les conditions spécifiques. Les méthodes d'adaptation pour calibrer les modèles sol-plante sur un nouveau cultivar et une nouvelle culture ont été peu documentées dans la littérature, en particulier pour les cultures de légumineuses à grains (Falconnier et *al.*, 2019). Au sein d'une large gamme de pratiques culturales combinées (système de culture vs gestion de la fertilisation azotée), la principale nouveauté de notre étude a été de réaliser la première calibration du modèle STICS sur la culture du pois chiche. Cette calibration était principalement basée sur une optimisation des paramètres en utilisant de multiples variables mesurées dans les compartiments de la plante (e.g. phénologie, croissance, utilisation des nutriments et rendement) et du sol (e.g. humidité, texture, teneur en eau et en azote). Ainsi, quelques paramètres ont été estimés à partir de la littérature, tandis que d'autres ont été directement mesurés lors d'expérimentations sur le terrain. Par conséquent, ce travail est l'occasion de tester une nouvelle méthode pour formaliser les étapes clés de l'adaptation de STICS aux cultures intercalaires à base de pois chiche en grandes cultures. L'outil principal de notre calibration était principalement basé sur l'optimisation mathématique, notamment pour les paramètres du pois chiche. Dans cette étude, nous avons choisi la méthode du simplexe (en utilisant l'outil d'optimisation Javastics) basée sur le critère des moindres carrés pour estimer tous les paramètres optimisés (Wallach et *al.*, 2011). Cette méthode a également été utilisée par Falconnier et *al.* (2019) pour une nouvelle calibration de STICS sur la culture de la féverole, à l'exception que ces auteurs ont choisi OptimiSTICS comme outil d'optimisation. L'approche d'optimisation a été adoptée dans cette étude pour plusieurs raisons : (i) une disponibilité limitée des données liées à la calibration de STICS sur la culture du pois chiche, (ii) peu d'informations sont disponibles sur les paramètres des légumineuses à grains qui sont actuellement définis par STICS (seulement la féverole et le haricot commun), (iii) la mesure directe n'est pas possible pour la plupart des paramètres de la culture et du sol du modèle STICS, (iv) nous visons à améliorer la calibration du modèle en estimant la plupart des paramètres dans des conditions similaires (sol, climat, variété de plante et environnement). Le nombre de paramètres STICS optimisés dans cette étude (+37 paramètres) était relativement plus élevé par rapport à certains travaux de recherche récents (Paleari et *al.*, 2020 ; Falconnier et *al.*, 2019 ; Watson et *al.*, 2017). Toutes ces

stratégies adoptées dans la procédure d'optimisation fournissent une approche efficace et adéquate pour bien calibrer STICS sur la culture du pois chiche et d'autres espèces de légumineuses à grains.

La procédure d'optimisation effectuée parmi les différents processus clés (c'est-à-dire la phénologie de la plante, la croissance des parties aériennes et des racines, le partage de la biomasse, l'interception du rayonnement) a conduit à une concordance satisfaisante et bonne entre les variables observées et prédites. Ceci a été confirmé pour les espèces de pois chiche et de blé cultivées dans des systèmes de culture pure et de culture intercalaire. Nos résultats indiquent une valeur élevée du coefficient d'efficacité du modèle ( $EF \geq 0.8$ ) pour la plupart des variables végétales (Figure 22 et 23), à l'exception du rendement du pois chiche en culture pure ( $EF=0.24$ ) et en culture intercalaire ( $EF=0.23$ ). Cependant, le rendement du blé a été prédit de manière satisfaisante ( $EF=0,5$  et  $0,9$ , respectivement dans la culture pure et le système de culture intercalaire) dans nos conditions de terrain (Figure 22). Indépendamment des études précédentes sur la calibration de STICS, le rendement a été mal simulé par STICS pour une large gamme d'espèces de cultures, en particulier pour les légumineuses à grain. Cela est dû principalement au déficit hydrique, aux ravageurs et aux maladies qui sont responsables de la réduction de l'accumulation de la biomasse des cultures céréalières (Donatelli et al., 2017). Par exemple, le rendement en grain du haricot commun a été mal calibré ( $EF=0,1$ ) (Paleari et al., 2020). Les faibles valeurs d'EF pour le rendement du pois chiche peuvent s'expliquer par des attaques de pigeons pendant l'apparition des grains qui contribuent à la réduction du rendement final du pois chiche. Pour la culture de la féverole et du pois, le modèle STICS a bien fonctionné ( $EF=0.61$ ) pour simuler le rendement en grain dans des conditions contrastées d'année et de sol (Falconnier et al., 2020).

La calibration STICS a également montré une bonne précision globale en termes de contenu en eau du sol et de profondeur d'enracinement pour les deux espèces cultivées en monoculture et en association des deux espèces (Figure 24). La teneur en eau du sol a été calibrée de manière satisfaisante pour tous les systèmes de culture ( $EF > 0,65$ ) et avec une faible erreur relative du prédiction ( $NRMSE < 10$ ). La même tendance a été observée pour la profondeur d'enracinement des cultures, mais avec une erreur relative élevée ( $NRMSE$  comprise entre 30 et 37). Des erreurs de calibration plus faibles pour la teneur en eau du sol ont été trouvées avec le modèle STICS (c'est-à-dire blé, féverole, pois, luzerne et orge d'hiver), où les valeurs RMSE étaient comprises entre 10 et 20 % (Falconnier et al., 2019, Coucheney et al., 2015). Les études précédentes ont rapporté que la calibration des paramètres liés au stock et au bilan hydrique du sol ne pouvait pas fournir des valeurs simulées correctes. Dans nos conditions de terrain, les mesures de l'eau

du sol ont été bien réalisées en termes de qualité (c'est-à-dire la mesure du Diviner sur cinq couches de sol) et de quantité de données collectées (c'est-à-dire de nombreuses mesures du semis à la récolte). Cela pourrait améliorer la précision de l'ensemble des données calibrées, en particulier les paramètres d'entrée clés du module de transfert d'eau. Dans cette étude, nous avons présenté les premiers résultats sur la calibration de la profondeur d'enracinement (pour le blé et le pois chiche) sous un système de culture et des taux d'application d'azote contrastés, ce qui n'a pas été rapporté dans la littérature précédente. Cependant, le stock de N dans le sol a été prédit de manière moins adéquate avec un EF négative (-1,84) et une FE faible (0,27), respectivement pour le pois chiche et le blé en monoculture. Ces résultats sont en accord avec ceux de Flaconnier et *al.* (2019) rapportés sur la féverole cultivée en solitaire. Cependant, cette variable a été modérément simulée pour les espèces en culture intercalaire où les valeurs de FE étaient d'environ 0,50. En fait, STICS n'a pas été en mesure de minimiser l'erreur de calibration entre le stock de N dans le sol observé et prédit (NRMSE allant de 49 à 91). Cela peut s'expliquer par la faible précision de la prédiction des différences entre l'année et le facteur de taux d'application d'azote.

## **4.2 La crédibilité dans la reproduction de la dynamique des variables de la plante et du sol**

La performance principale d'un modèle sol-Plante est uniquement liée à la précision globale des prédictions du modèle. Elle dépend également de la capacité du modèle à reproduire la dynamique temporelle des variables du sol et des plantes dans une large gamme de conditions (Kherif et *al.*, 2021a ; Wallach et *al.*, 2014). L'une des principales nouveautés de ce travail de recherche était d'évaluer le comportement et la crédibilité du modèle STICS en analysant comment les principales variables de sortie changent entre des systèmes de culture contrastés (i.e. culture intercalaire et monoculture) et la disponibilité de l'azote (taux d'application de l'azote : N-30, N-60 et N-100). Les résultats montrent que la dynamique temporelle a été bien reproduite pour les productions végétales selon le nouveau calibrage de la culture du pois chiche. Ainsi, l'effet prédit des taux d'application de N faible, modéré et élevé sur le LAI, le rendement en grain et l'AGPN était en accord satisfaisant avec l'effet observé pour le pois chiche cultivé seul. Cependant, les erreurs de prédiction ont été mieux minimisées sous les niveaux modérés et élevés de fertilisation N dans les deux saisons de croissance 2018/-2019 et 2019/-2020. Elles étaient inférieures à 0,6 m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup> (9%), 0,2 t ha<sup>-1</sup> (14%) et 30 kg ha<sup>-1</sup> (12%), respectivement pour le LAI, le rendement en grains et l'AGPN (Figure 25 et 26). La dynamique de la teneur en eau du sol a également été bien reproduite pour tous les taux d'application d'azote et pendant les deux années de culture. En conséquence, la RMSE était inférieure à 27 mm (<10%). Les mêmes

tendances ont été observées pour le blé cultivé en solitaire pendant la deuxième saison de croissance avec une erreur de prédiction très faible (<5%), en particulier pour la variable du rendement en grain (Figure 27). Le STICS a également été bien évalué sur les sorties des plantes et du sol (i.e. AGB, rendement en grain, AGPN et stock d'eau et d'azote dans le sol) et pour les deux espèces de cultures intercalaires. Par exemple, au cours de la première année d'expérimentation (2018/-2019) et sous une fertilisation N modérée (Figure 28) ; la dynamique temporelle a été généralement bien reproduite pour la plupart des variables d'intérêt. En outre, les valeurs les plus faibles de l'erreur de prédiction ont été observées pour le pois chiche en culture intercalaire. Ceci est probablement dû à la nouvelle calibration qui a été effectuée de manière adéquate sur la culture du pois chiche. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés sur la modélisation du partage de l'azote et de la lumière dans les cultures intercalaires de pois et de blé (Malagoli et al., 2020). Cette recherche récente a démontré que le STICS était capable de bien simuler la dynamique temporelle de différentes variables sol-Plante sous différents scénarios de fertilisation azotée.

### **4.3 STICS comme outil robuste pour concevoir et évaluer des systèmes de culture innovants**

Les résultats satisfaisants obtenus dans ce travail de calibration sous des conditions climatiques et de fertilisation azotée contrastées, confirment la robustesse de STICS qui a été rapportée précédemment pour 15 espèces calibrées (Coucheney et al., 2015). Nos principaux résultats démontrent que le modèle STICS peut reproduire avec précision une large gamme de variables dynamiques en même temps et les possibilités de l'étendre à de nouvelles espèces (i.e. pois chiche), de nouveaux systèmes de culture (i.e. culture intercalaire blé dur-pois chiche) et de nouvelles variables (i.e. profondeur des racines). Les résultats montrent également que le modèle fonctionne bien pour simuler les variables du sol, en particulier la teneur en eau jusqu'à une profondeur de 80 cm dans des conditions climatiques contrastées. Quand, ces variables n'ont été simulées que sur les 30 premiers centimètres de profondeur par la plupart des études de calibration précédentes (Paleari et al., 2020 ; Falconnier et al., 2019 ; Coucheney et al., 2015). Ces résultats démontrent la crédibilité et la robustesse de STICS dans le diagnostic des systèmes diversifiés ou monocultures. Le modèle peut donc être appliqué à des études analysant l'effet du changement climatique (Falconnier et al., 2020). STICS a également été considéré comme un outil solide pour évaluer la résilience et la durabilité des systèmes de culture innovants en simulant un large éventail d'indicateurs agro-environnementaux clés (c'est-à-dire le drainage de l'eau et le lessivage des nitrates) (Plaza-Bonilla et al., 2015). La calibration réussie de STICS dans cette étude offrira l'opportunité de concevoir et d'évaluer des systèmes de culture

innovants à base de pois chiche et d'autres légumineuses dans les conditions pluviales méditerranéennes. La sécheresse et la faible disponibilité de l'azote dans le sol sont considérées comme les principaux facteurs de stress de la variabilité du rendement dans la région méditerranéenne, lorsqu'un bon contrôle de la pression des ravageurs est appliqué (Karrou et Oweis, 2012 ; Mafakheri et *al.*, 2010).

Le modèle a été capable de reproduire efficacement les variables végétales pour les cultures uniques et les cultures intercalaires malgré des conditions climatiques contrastées (c'est-à-dire deux années de croissance différentes) et des taux de fertilisation azotée différents. Ainsi, nous pourrions utiliser STICS pour tester différentes stratégies de fertilisation azotée, en particulier pour les cultures associées où la fertilisation azotée reste peu documentée. Ainsi, la validation de STICS dans nos conditions de terrain fournit un outil utile qui pourrait aider les agriculteurs lors de la prise de décision concernant la fertilisation azotée dans les systèmes de cultures intercalaires céréales-légumineuses. Les travaux de calibration précédents ont donné de bons résultats dans la simulation de systèmes de cultures intercalaires (i.e. pois-orge) mais n'ont pas considéré la hauteur de la plante comme l'un des principaux facteurs qui définissent le partage de la lumière puisque les deux espèces ont une croissance en hauteur similaire (Corre-Hellou, 2009).

Dans notre étude, la culture intercalaire a été bien calibrée malgré le fait que le blé et le pois chiche présentaient des différences conséquentes en termes de hauteur des plantes. Cela peut s'expliquer par la faible erreur de prédiction (RMSE comprise entre 0,01 et 0,1 m) obtenue pour la variable hauteur. Le calibrage de la hauteur des plantes était crucial pour simuler avec précision l'interception du rayonnement et le microclimat dans les cultures intercalaires (Launay et *al.*, 2009). En outre, le modèle a bien fonctionné pendant les deux saisons de croissance malgré le fait que l'orientation des semis était très contrastée. Comme l'orientation des rangs affecte les parties ombragées dans les cultures intercalaires, nos résultats sont en bon accord avec ceux rapportés par Artru et *al.* (2017) sur la robustesse de STICS dans des conditions d'ombrage contrastées. Cela serait utile pour simuler (i) les délais de semis pour les deux cultures mixtes (Launay et *al.*, 2009), (ii) différentes structures de plantation (i.e. inter-rang et orientation) et pour évaluer différentes conditions de capture de la lumière, afin de concevoir des systèmes de culture diversifiés. Cette première étude de calibration de STICS a été réalisée principalement sur le pois chiche en culture pure et associé et sa validation sur la culture intercalaire. Il sera utile de simuler les principales performances de la culture intercalaire blé-pois chiche pour laquelle la littérature reste rare, afin d'améliorer ce système de culture innovant.

## 5 Conclusion

Sur la base d'une expérience de culture intercalaire sous trois niveaux contrastés d'application d'azote, nous avons calibré avec succès le modèle sol-Plante STICS pour la culture du pois chiche en conditions pluviales. Ceci est une originalité principale de la présente recherche et qui a été associée à la première validation du modèle STICS sur un système de culture intercalaire à base de pois chiche. Une calibration complète basée principalement sur une méthode d'optimisation transparente, en effet, la plupart des paramètres du modèle ont été directement optimisés à partir des variables mesurées sur le terrain. Les paramètres optimisés parmi tous les processus de culture inclus (c'est-à-dire l'émergence, la croissance de la plante, le développement de la culture, la formation du rendement et l'absorption de l'azote) ont conduit à une calibration satisfaisante des variables du sol et de la culture. La grande précision de la calibration a été confirmée statistiquement (c'est-à-dire EF, NRMSE, RMSE, R2) pour la plupart des variables d'intérêt, à l'exception du rendement en grain du pois chiche. La mauvaise performance de la calibration du rendement en grain du pois chiche était probablement due aux conditions locales de gestion des cultures (perte de rendement à la récolte). Les erreurs de prédiction relatives à la biomasse aérienne, LAI, rendement en grains et à l'absorption d'azote par la plante étaient assez similaires, avec un intervalle plus faible, à celles trouvées par d'autres études de calibration de STICS. Cependant, nous avons constaté que les erreurs de prédiction pour les variables du sol (stocks d'eau et de N dans le sol) étaient moins optimisées par rapport à celles obtenues par plusieurs études. Ceci est probablement dû à la large gamme de couches de sol (0-20, 20-40, 40-60 et 60-80 cm) dans lesquelles l'humidité du sol et la teneur en N ont été mesurées. De plus, nos résultats illustrent que la calibration effectuée a été capable de capturer la dynamique temporelle des variables les plus étudiées dans des situations contrastées (i.e. systèmes de culture, saisons de croissance et taux d'application de N). Enfin, cette étude de calibration permettra au modèle STICS de bien simuler des pratiques culturales innovantes basées sur la diversification des cultures (légumineuses à grains et céréales) et la gestion de la fertilisation azotée. Une perspective clé maintenant, pour mieux bénéficier de cette étude de recherche, est d'étendre cette nouvelle version calibrée (système de culture intercalaire à base de pois chiche) du modèle STICS impliquant la simulation d'une grande diversité de situations pédoclimatiques ou de pratiques culturales (i.e. système de culture innovant et conventionnel). Ceci serait en particulier très utile pour tester et évaluer la robustesse et la crédibilité de STICS dans des conditions encore plus contrastées à travers le monde.

## **CONCLUSION GENERALE**

L'objectif de notre travail consistait à évaluer et à estimer les performances des cultures intercalaires en termes d'utilisation et de stockage des ressources (en particulier de l'eau et des éléments C et N), et ainsi la résilience de ce système de culture face au changement climatique à différentes échelles spatiotemporelle. Pour ce nous avons adopté une approche systémique intégrant l'analyse de données empiriques, des indicateurs agro-écologiques et la modélisation quantitative.

Dans un premier temps nous avons réalisé la première estimation des taux d'échange de C et N entre les plantes, le sol, la biomasse microbienne et symbiotes nodulaire, qui sont difficiles à estimer avec des méthodes expérimentales. Cela a permis de valider les modèles calibrés actuels (MOMOS-C et MOMOS-N) à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation, et du territoire, en particulier pour les espèces associées (Haricot-Maïs) à un cycle de culture court (3 à 4 mois).

En effet, nous avons estimé les échanges quotidiens de C et N microbiens, la perte de C par la respiration du sol et des flux de C et N nécessaire pour la croissance (plantes et nodules) ; et la quantité quotidienne de N fixée par les symbiotes nodulaires du haricot commun à l'aide du Modèle.

Cette estimation n'était possible que quand nous avons amélioré les paramètres du modèle par les mesures des variables d'état (plante, sol et météo) régulant les transferts de C et N dans deux sites agricoles aux conditions pédoclimatiques très contrasté.

L'extension de la partie décomposition du modèle MOMOS à l'échelle régionale (agro écosystème Sétif) a été validée avec succès en conditions alcalines méditerranéennes juste après celles réalisées à la station expérimentale de l'agro écosystème de Mauguio en France.

De nouvelles équations ont été formulées pour la production journalière de N et les stocks de N grains, complémentaires de celles utilisés dans les plus récentes versions publiées du modèle MOMOS. D'Autres équations relatives à l'échange de C et N entre les organes végétaux ont été révisées pour améliorer les paramètres régissant les taux de transfert de C et N pour la production végétale.

Les résultats montrent que tous les échanges quotidiens de C et N entre les organes végétaux et les micro-organismes varient fortement entre les stades phénologiques. La variation la plus élevée se situe au stade de la floraison (50 à 81 DAS), lorsque les stocks les plus élevés de C et N des nodules et de pousses se produisent simultanément pour les deux monocultures, en particulier dans un sol déficient en P. Les transferts de C et N des nodules recommence à augmenter

à la fin de la floraison pour les deux espèces associées, en particulier dans les sols carencés en P.

Par la suite, les stocks de N dans les microorganismes décomposeurs ont augmenté de façon marquée avant que le N ne soit libéré par la minéralisation des nodules du haricot commun en fin de cycle, stimulés principalement par la haute disponibilité de C (provenant de la mortalité des nodules) profitable aux activités microbiennes.

Cela confirme que, dans le système de culture intercalaire, une partie considérable du N fixé est-préférentiellement stockée dans les nodules de la légumineuse intercalée, favorisant le fonctionnement microbien, mais ne bénéficiant pas à la croissance de l'une ou l'autre des espèces intercalées.

La modélisation réalisée dans cette étude démontre avec succès la robustesse de cette version paramétrée MOMOS pour évaluer et analyser les mécanismes régulant les échanges globaux de C et N entre les symbiotes végétaux, le sol, la biomasse microbienne et l'atmosphère.

Nous nous sommes également intéressé à l'association des cultures d'hiver « Blé dur-Pois chiche » ; à travers des essais expérimentaux sur deux Campagnes (2018-2020) consécutif dans des conditions pédoclimatiques et de fertilisation azotée contrastées.

Deux approches ont été adoptées pour l'évaluation de cette association de culture « Blé-Pois chiche » ; la première est l'évaluation grâce à des indices agro-écologique calculés, la deuxième approche a été réalisée à l'aide du modèle sol-Plante STICS.

La principale nouveauté de l'évaluation du système Blé-pois chiche en association grâce aux indices agroécologique, concerne le diagnostic intégratif (c'est-à-dire la biomasse, le rendement, le rendement et la dynamique de croissance) du statut de l'azote dans les cultures intercalaires dans différentes conditions pédoclimatiques et de fertilisation azotée.

Les résultats indiquent deux conditions qui rendent la culture intercalaire avantageuse. La première, qui est liée à l'apport d'azote, montre que le système est plus performant lorsque l'azote est suffisamment élevé pour maximiser la fixation symbiotique de N<sub>2</sub> tout en contribuant à la nutrition de la culture céréalière. La deuxième condition est relative à la composante en pois chiche qui doit être la plus dominante de la culture intercalaire.

La compétition interspécifique entre le pois chiche et le blé dur a été directement affectée par les changements de conditions climatiques ou d'engrais N sur les sites, le blé intercalaire était

plus compétitif que la légumineuse respective dans des conditions de faible pluviosité et d'application d'azote.

Dans un deuxième temps, nous avons calibré le modèle STICS avec succès pour la culture du pois chiche en conditions pluviales. Ceci est une originalité principale de la présente recherche, nous avons pu réaliser la première validation du modèle STICS sur un système de culture intercalaire à base de pois chiche.

Une calibration complète basée principalement sur une méthode d'optimisation est réaliser, en effet, la plupart des paramètres du modèle ont été directement optimisés à partir des variables mesurées sur le terrain. Les paramètres optimisés parmi tous les processus de culture inclus (l'émergence, la croissance de la plante, le développement de la culture, la formation du rendement et l'absorption de l'azote) ont conduit à une calibration satisfaisante des variables du sol et de la culture. La grande précision de la calibration a été confirmée statistiquement pour la plupart des variables d'intérêt, à l'exception du rendement en grain du pois chiche. La mauvaise performance de la calibration du rendement en grain du pois chiche est probablement due aux conditions locales de gestion des cultures (perte de rendement à la récolte). Les erreurs de prédiction relatives à la biomasse aérienne, LAI, rendement en grains et à l'absorption d'azote par la plante est assez similaires, avec un intervalle plus faible, à celles trouvées par d'autres études de calibration de STICS. Cependant, nous avons constaté que les erreurs de prédiction pour les variables du sol (stocks d'eau et de N dans le sol) étaient moins optimisées par rapport à celles obtenues par plusieurs études. Ceci est probablement dû à la large gamme de couches de sol (0-20, 20-40, 40-60 et 60-80 cm) dans lesquelles l'humidité du sol et la teneur en N ont été mesurées. De plus, nos résultats illustrent que la calibration effectuée a été capable de capturer la dynamique temporelle des variables les plus étudiées dans des situations contrastées (systèmes de culture, saisons de croissance et taux d'application de N). Enfin, cette étude de calibration permet au modèle STICS de bien simuler des pratiques culturales innovantes basées sur la diversification des cultures (légumineuses à grains et céréales) et la gestion de la fertilisation azotée.

Nos conclusions nous renvoient vers plusieurs perspectives :

La version paramétrée de MOMOS peut être utilisée pour les futures études évaluant les transferts de C et N,

Une estimation d'indices économiques pour compléter et améliorer l'évaluation des avantages des cultures intercalaires,

Concernant le modèle STICS, il serait souhaitable d'étendre la nouvelle version calibrée (système de culture intercalaire à base de pois chiche) en impliquant la simulation d'une plus grande diversité de situations pédoclimatiques ou de pratiques culturales (système de culture innovant et conventionnel). Ceci serait en particulier très utile pour tester et évaluer la robustesse de STICS dans des conditions encore plus contrastées à travers le monde.

A l'aide de la modélisation, divers scénarios peuvent être construits pour anticiper diverses situations futures en l'occurrence celles liées aux changements climatiques.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Adams, M. W., Ellingboe, A. H., & Rossman, E. C., 1971. Biological uniformity and disease epidemics. *BioScience*, 21(21), 1067-1070.
2. Adesogan, A. T., Salawu, M. B., & Deaville, E. R., 2002. The effect on voluntary feed intake, in vivo digestibility and nitrogen balance in sheep of feeding grass silage or pea-wheat intercrops differing in pea to wheat ratio and maturity. *Animal Feed Science and Technology*, 96(3-4), 161-173.
3. Ait Saada, D., Ait Chabane, O., Bouderoua, K. et Selselet-Attou, G., 2016. PLACE DES LEGUMES SECS DANS L'ALIMENTATION HUMAINE - ATOUTS NUTRITIONNELS ET IMPACTS SUR LA SANTE, Forum Régional pour le Développement des Légumineuses Alimentaires – Université de Mostaganem, Algérie, 5p.
4. Alkama, N., 2010. Adaptation de la symbiose rhizobienne chez le haricot à la déficience en phosphore (Doctoral dissertation, INA).
5. Altieri, M. A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. In *Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes* (pp. 19-31): Elsevier.
6. Altieri, M. Á., & Nicholls, C. I., 2012. Agroecología : única esperanza para la soberanía alimentaria y la resiliencia socioecológica. *Agroecología*, 7(2), 65-83.
7. Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., et Lana, M. A., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for sustainable development*, 35(3), 869-890.
8. Anders, M., Potdar, M., et Francis, C., 1995. Significance of intercropping in cropping systems. *Series on International Agricultural Research*, 3, 1-18.
9. Andreux, F., & Monrozier, J. L., 1981, July. Les apports de méthodes de séparation des substances humiques à la connaissance de la réserve organique azotée des sols. In *CR Colloque Humus et Azote*, 7-10.
10. Araújo, A. P., Plassard, C., & Drevon, J. J., 2008. Phosphatase and phytase activities in nodules of common bean genotypes at different levels of phosphorus supply. *Plant and soil*, 312(1), 129-138.
11. Artru, S., Garré, S., Dupraz, C., Hiel, M.-P., Blitz-Frayret, C., Lassois, L., 2017. Impact of spatio-temporal shade dynamics on wheat growth and yield, perspectives for temperate agroforestry. *Eur. J. Agron.* 82, 60–70. <http://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.004>.

12. Aslam, M., Rahmatullah, M. S., & Yasin, M., 2000. Application of Freundlich adsorption isotherm to determine phosphorus requirement of several rice soils. *Int J Agri Biol*, 2, 286-288.
13. Ayanaba, A., & Jenkinson, D. S., 1990. Decomposition of carbon-14 labeled ryegrass and maize under tropical conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 54(1), 112-115.
14. Badraoui, M., Soudi, B., Moujahid, Y., Bennani, F., Mikou, M., & Bouhlassa, S., 1997. Mineralogical considerations in soil fertility management in Morocco. In *Soil Fertility Workshop, Aleppo (Syria), 19-23 Nov 1995*. ICARDA.
15. Baeyens, J., 1967. *Nutrition des plantes de culture*. Éditions E. Nauwelaerts.
16. BALZTER, H., 2000 Markov chain models for vegetation dynamics. *Ecological modeling*, vol. 126, no 2-3, p. 139-154.
17. Banik, P., Midya, A., Sarkar, B., et Ghose, S., 2006. Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: advantages and weed smothering. *European Journal of Agronomy*, 24(4), 325-332.
18. Barber, S.A., 1995. *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. Second edition. John Wiley and Sons, 414 p.
19. Bargaz, A., Noyce, G.L., Fulthorpe, R., Carlsson, G., Furze, G.R., Jensen, E.J., Dhiba, D., Isaac, M.E., 2017. Species interactions enhance root allocation, microbial diversity and P acquisition in intercropped wheat and soybean under P deficiency. *Appl. Soil Ecol* 120, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.08.011>.
20. Bariola, P. A., Howard, C. J., Taylor, C. B., Verburg, M. T., Jaglan, V. D., & Green, P. J., 1994. The Arabidopsis ribonuclease gene RNS1 is tightly controlled in response to phosphate limitation. *The Plant Journal*, 6(5), 673-685.
21. Barker, A. V., & David, J. P., 2007. *Hand book of plant nutrition: Books in soil, plant and environment*, 177.
22. Bedoussac, L., et Justes, E., 2010. The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and Soil*, 330(1), 19–35. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0082-2>.
23. Bedoussac, L., Bernard, L., Brauman, A., Cohan, J. P., Desclaux, D., Fustec, J., et Triboulet, P., 2012. *Les Cultures Associées céréale/légumineuse en agriculture «bas intrants» dans le Sud de la France*. Plaquette issue du projet ANR PerfCom.

24. Bedoussac, L., Journet, E. P., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E. S., Prieur, L., Justes, E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for sustainable development*, 35(3), 911–935. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>.
25. Bellocchi, G., Rivington, M., Donatelli, M., & Matthews, K., 2011. Validation of biophysical models: issues and methodologies. *Sustainable Agriculture Volume 2*, 577-603.
26. Bergersen, F. J., 1966. Some properties of nitrogen-fixing breis prepared from soybean root nodules. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 130(2), 304-312.
27. Bergez, J.E., Raynal, H., Launay, M., Beaudoin, N., Casellas, E., Caubel, J., Chabrier, P., Coucheney, E., Dury, J., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Justes, E., Mary, B., Ripoche, D., Ruget, F., 2014. Evolution of the STICS crop model to tackle new environmental issues: New formalisms and integration in the modelling and simulation platform RECORD. *Environ. Model. Softw.* 62, 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.010>.
28. Bernal, L., Coello, P., & Martínez-Barajas, E., 2005. Possible role played by R1 protein in starch accumulation in bean (*Phaseolus vulgaris*) seedlings under phosphate deficiency. *Journal of plant physiology*, 162(9), 970-976.
29. Berner, U., & Faber, E., 1996. Empirical carbon isotope/maturity relationships for gases from algal kerogens and terrigenous organic matter, based on dry, open-system pyrolysis. *Organic Geochemistry*, 24(10-11), 947-955.
30. Berntsen, J., Hauggaard-Nielsen, H., Olesen, J. E., Petersen, B. M., Jensen, E. S., & Thomsen, A., 2004. Modelling dry matter production and resource use in intercrops of pea and barley. *Field crops research*, 88(1), 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.11.012>.
31. Bessaoud, O., Pellissier, J. P., Rolland, J. P., & Khechimi, W., 2019. Rapport de synthèse sur l’agriculture en Algérie (Doctoral dissertation, CIHEAM-IAMM).
32. Betencourt, E., Duputel, M., Colomb, B., Desclaux, D., Hinsinger, P., 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in low P soil. *Soil Biol. Biochem.* 46, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.015>.
33. Beyer, L., 1991. Intersite characterization and variability of soil respiration in different arable and forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 12(2), 122-126.

34. Blesh, J., 2018. Functional traits in cover crop mixtures: biological nitrogen fixation and multifunctionality. *J. Appl. Ecol.* 55, 38–48. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13011>.
35. Bottner, P., Pansu, M., Sarmiento, L., Hervé, D., Callisaya-Bautista, R., Metselaar, K., 2006. Factors controlling decomposition of SOM in fallow systems of the high tropical Andes: a field simulation approach using <sup>14</sup>C and <sup>15</sup>N labelled plant material. *Soil. Biol. Biochem.* 38, 2162–2177. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.029>.
36. Boudreau, M. A., 2013. Diseases in intercropping systems. *Annual review of phytopathology*, 51, 499-519.
37. Bousquet, F., Botta, A., Alinovi, L., Barreteau, O., Bossio, D., Brown, K., Caron, P., Cury, P., D'Errico, M., DeClerck, F., Dessard, H., Kautsky, E.E., Fabricius, C., Folke, C., Fortmann, L., Hubert, B., Magda, D., Mathevet, R., B. Norgaard, R., Quinlan, A., et Staver, C., 2016. Résilience and development : mobilizing for transformation. *Ecology and Society*, 21(3).
38. Boussen, H., Asr, N. Z., & Ben Mechlia, N., 2005. Efficacité d'utilisation de l'eau et de l'azote chez le blé dur : Etude comparative de deux variétés à haut potentiel de production. *Food Security Options and Perspective*, 1-11.
39. Brisson, N., Itier, B., L'Hotel, J.C., Lorendeau, J.Y., 1998a. Parameterisation of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models. *Ecological Modelling* 107, 159–169. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(97\)00215-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00215-9).
40. Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., others, 1998b. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346.
41. Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.-H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., Justes, E., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69–92. <https://doi.org/10.1051/agro:2001005>.
42. Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrè, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18, 309–332. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7).
43. Brisson, N., Bussièrè, F., Ozier-Lafontaine, H., Tournebize, R., Sinoquet, H., 2004. Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie* 24, 409–421. <https://doi.org/10.1051/agro:2004031>.

44. Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudoin, N., 2008. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model. Editions Quae.
45. Caballero, R., Goicoechea, E. L., & Hernaiz, P. J., 1995. Forage yields and quality of common vetch and oat sown at varying seeding ratios and seeding rates of vetch. *Field crops research*, 41(2), 135-140.
46. Cabell, J. F., & Oelofse, M., 2012. An indicator framework for assessing agroecosystem resilience. *Ecology and Society*, 17(1).
47. Cai, J., Xia, X., Chen, H., Wang, T., & Zhang, H., 2018. Decomposition of fertilizer use intensity and its environmental risk in China's grain production process. *Sustainability*, 10(2), 498.
48. Cai, M., Chen, Z., Zhou, J., Han, J., Shi, Q., 2018. Effects of long-term cultivation practices and nitrogen fertilization rates on carbon stock in a calcareous soil on the Chinese Loess. Plateau. *Journal of Arid Land*, 10(1), 129–139. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0019-1>.
49. Carswell, M. C., Grant, B. R., & Plaxton, W. C., 1997. Disruption of the phosphate-starvation response of oilseed rape suspension cells by the fungicide phosphonate. *Planta*, 203(1), 67-74.
50. Cernay, C., Ben-Ari, T., Pelzer, E., Meynard, J.-M., Makowski, D., 2015. Estimating variability in grain legume yields across Europe and the Americas. *Sci. Rep.* 5, 11171. <https://doi.org/10.1038/srep11171>.
51. Chekhma, M., Zahra, H. F., & Yasmine, A. I. B., 2020. Monoculture et culture en association (Céréales-légumineuses): Fertilisation minérale et biologique (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
52. Chenerry, C., 1998. Agriculture intensive et qualite des eaux. Paris : INRA editions.
53. Chu, M.W., Jagadamma, S., Walker, F.R., Eash, N.S., Buschermohle, M.J., Duncan, L.A., 2017. Effect of multi species cover crop mixture on soil properties and crop yield. *Agric. Env. Lett* 2:170030. <https://doi:10.2134/ael2017.09.0030>.
54. Clerget, Y., 2011. Biodiversité des céréales: Origine et évolution. Montbéliard. 17p.
55. Clergue, B., Amiaud, B., Pervanchon, F., Lasserre-Joulin, F., & Plantureux, S., 2009. Biodiversity: function and assessment in agricultural areas: a review. *Sustainable Agriculture*, 309-327.
56. Comifer., 2002. Les atouts décisifs du chaulage en terres de brande. *Perspectives agricoles*, 284 : 66-70.

57. Cong, W.F., Hoffland, E., Li, L., Six, J., Sun, J.H., Bao, X.G., Zhang, F.S., Van Der Wep, W., 2014. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Glob Chang Biol* 21, 1715–1726. <https://doi.org/10.1111/gcb.12738>.
58. Connolly, J., Wayne, P., & Murray, R., 1990. Time course of plant-plant interactions in experimental mixtures of annuals: density, frequency, and nutrient effects. *Oecologia*, 82(4), 513-526.
59. Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., Therond, O., 2015. The soil-crop-models STICS and AqYieldpredictyield and soil water content for irrigated crop equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.011>.
60. Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S., 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global environmental change*, 19(2), 292-305.
61. Corre-Hellou, G., Faure, M., Launay, M., Brisson, N., Crozat, Y., 2009. Adaptation of the STICS intercrop model to simulate crop growth and N accumulation in pea–barley intercrops. *Field Crops Res.* 113, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.007>.
62. Corre-Hellou, G., Faure, M., Launay, M., Brisson, N., Crozat, Y., 2009. Adaptation of the STICS intercrop model to simulate crop growth and N accumulation in pea–barley intercrops. *Field Crop. Res* 113, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.007>.
63. Cotner, J.V., Montoya, D.L., Winemiller, K.O., 2006. Seasonally variable riverine production in the Venezuelan llanos. *J. North Amer. Benthol. Soc.* 206, 171–184. [https://doi.org/10.1899/0887-3593\(2006\)25\[171:SVRPIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1899/0887-3593(2006)25[171:SVRPIT]2.0.CO;2).
64. Coucheney, E., Buis, S., Launay, M., Constantin, J., Mary, B., García de Cortázar-Atauri, I., Ripoche, D., Beaudoin, N., Ruget, F., Andrianarisoa, K.S., Le Bas, C., Justes, E., Léonard, J., 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. *Environ. Model. Softw.* 64, 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.024>.
65. Dahmardeh, M., Ghanbari, A., Syahsar, B., et Ramrodi, M., 2010. The role of intercropping maize (*Zea mays* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* L.) on yield and soil chemical properties. *African Journal of Agricultural Research*, 5(8), 631-636.
66. Dakora, F. D., & Phillips, D. A., 2002. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Food Security in Nutrient-Stressed Environments: Exploiting Plants' Genetic Capabilities*, 201-213.

67. Dawo, F., Eyerer, S., Pili, R., Wieland, C., Spliethoff, H., 2021, Experimental investigation, model validation and application of twin-screw expanders with different built-in volume ratios. *Applied Energy*, 282, 116139.
68. Daryanto, S., Wang, L., Jacinthe, P.-A., 2017. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agric. Water Manag.* 179, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.022>.
69. Daryanto, S., Jacinthe, P. A., Fu, B., Zhao, W., & Wang, L., 2019. Valuing the ecosystem services of cover crops: barriers and pathways forward. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 270, 76-78.
70. Dauphiné, A., & Provitolo, D., 2007. La résilience : un concept pour la gestion des risques. Paper presented at the *Annales de géographie*.
71. De Schutter, O., 2014. Report submitted by the Special Rapporteur on the Right to Food, Olivier De Schutter (Human Rights Council, 16th Session, Agenda item 3 No. A/HRC/16/49. Retrieved from.
72. De Wit, C.T. (1960), on competition. *Versl. Landbouw-Kundige Onderz*, 66, 1–28.
73. Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., Dickinson, R. E., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., Da Silva Dias, P.L., Wofsy, S.C., et Zhang, X.: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. *Climate change*, 18083-18129.
74. Devau, N., Hinsinger, P., Le Cadre, E., & Gérard, F., 2011. Root-induced processes controlling phosphate availability in soils with contrasted P-fertilized treatments. *Plant and Soil*, 348(1), 203-218.
75. Diels, J., Vanlauwe, B., Van der Meersch, M. K., Sanginga, N., & Merckx, R., 2004. Long-term soil organic carbon dynamics in a subhumid tropical climate: <sup>13</sup>C data in mixed C3/C4 cropping and modeling with RothC. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(11), 1739-1750.
76. Djadjaglo, D., & Richter, C., 2008. Efficacité de prélèvement du phosphore par les plantes *Sorghum bicolor* (L.) Moench et *Phaseolus vulgaris* L. *Agro Solution*, 19(2), 45-50.
77. Dommergues, Y., 1977. *La biologie des sols*. FeniXX.
78. Donatelli, M., Magarey, R.D., Bregaglio, S., Willocquet, L., Whish, J.P.M., Savary, S., 2017. Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agric. Syst.* 155, 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.019>.

79. Doubi, B. T. S., Kouassi, K. I., Kouakou, K. L., Koffi, K. K., Baudoin, J. P., & Zoro, B. I. A., 2016. Existing competitive indices in the intercropping system of *Manihot esculenta* Crantz and *Lagenaria siceraria* (Molina) Standley. *Journal of Plant Interactions*, 11(1), 178-185.
80. Downie, J. A., 2005. Legume haemoglobins: symbiotic nitrogen fixation needs bloody nodules. *Current biology*, 15(6), R196-R198.
81. Drevon, J. J., & Hartwig, U. A., 1997. Phosphorus deficiency increases the argon-induced decline of nodule nitrogenase activity in soybean and alfalfa. *Planta*, 201(4), 463-469.
82. Drevon, J. J., & Ounane, M. S., 2009. Coopération sur le thème : Efficacité d'utilisation du phosphore et fixation symbiorhizobienne d'azote dans la culture du haricot. Rapport de mission. Relation internationale. INRA, Paris, 6p.
83. Duff, S. M., Sarath, G., & Plaxton, W. C., 1994. The role of acid phosphatases in plant phosphorus metabolism. *Physiologia plantarum*, 90(4), 791-800.
84. Dupont, F., & Guignard, F., 2015. *Botanique : les familles de plantes*. Elsevier Health Sciences.
85. Duru, M., & Therond, O., 2015a. Designing agroecological transitions; a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1237–1257. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>.
86. Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M.A., Justes, E., Journet, E.P., Aubertot, J.N., Savary, S., Bergez, J.E., Sarthou, J.P., 2015b. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agron. Sustainable Dev.* 35, 1259–1281. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0306-1>.
87. Dutil, P., 1976. La fertilisation phosphatée des sols calcaires. *An. Agro. I.N.A.*, 6 (2) : 75-80.
88. Ehrmann, J., Ritz, K., 2013. Plant: soil interactions in temperate multi-cropping production systems. *Plant and Soil* 376, 1–29.
89. Elgharably, A., Marschner, P., & Rengasamy, P., 2010. Wheat growth in a saline sandy loam soil as affected by N form and application rate. *Plant and soil*, 328(1), 303-312.
90. El-Metwally, I.M., Abdelhamid, M.T., 2008. Weed control under integrated nutrient management systems in faba bean (*Vicia faba*) production in Egypt. *Planta Daninha* 26, 585–594. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582008000300014>.

91. Eskandari, H., Ghanbari, A., & Javanmard, A., 2009. Intercropping of cereals and legumes for forage production. *Notulae Scientia Biologicae*, 1(1), 07-13.
92. Eskandari, H., 2012. Intercropping of maize (*Zea mays*) with cowpea (*Vigna sinensis*) and mungbean (*Vigna radiata*): effect of complementarity of intercrop components on resource consumption, dry matter production and legumes forage quality. . *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(1), 355-360.
93. Etchebest, S., 2000. Croissance foliaire du maïs (*Zea mays* L.) sous déficience en phosphore. Analyse à l'échelle de la plante et à l'échelle de la feuille (Doctoral dissertation, Institut National Agronomique).
94. Evans, P. S., 1977. Comparative root morphology of some pastures grasses and clovers. *New Zealand journal of agricultural research*, 20(3), 331-335.
95. Fageria, V. D., 2001. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of plant nutrition*, 24(8), 1269-1290.
96. Falconnier, G.N., Journet, E.-P., Bedoussac, L., Vermue, A., Chlébowski, F., Beudoin, N., Justes, E., 2019. Calibration and evaluation of the STICS soil-crop model for faba bean to explain variability in yield and N<sub>2</sub> fixation. *Eur. J. Agron.* 104, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.001>.
97. Falconnier, G. N., Vermue, A., Journet, E. P., Christina, M., Bedoussac, L., Justes, E., 2020. Contrasted response to climate change of winter and spring grain legumes in southwestern France. *Field Crops Research*, 259,107967. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107967>.
98. FAO., 2021. Situation alimentaire mondiale : Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr>.
99. Fardeau, J. C., 1993. Le devenir du phosphore dans le sol et dans les systèmes sol plante. *Perspectives agricoles*, 181 : 17-22.
100. Firestone, M. K., & Davidson, E. A., 1989. Microbiological basis of NO and N<sub>2</sub>O production and consumption in soil. Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, 47, 7-21.
101. Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., et Holling, C. S., 2004. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 35, 557-581.
102. FORRESTER, JW., 1968, Industrial dynamics—a response to Ansoff and Slevin. *Management Science*, vol. 14, no 9, p. 601-618.

103. FORRESTER, J.W., 1994, System dynamics, systems thinking, and soft OR. System dynamics review, vol. 10, no 2-3, p. 245-256.
104. Francis, C. A., Flor, C., et Temple, S. R., 1975. Adapting varieties for intercropped systems in the tropics. American Society of Agronomy, 235-151.
105. Francis, C. A., 1989. Biological efficiencies in multiple-cropping systems. In Advances in Agronomy (Vol. 42, pp. 1-42) : Elsevier.
106. Francis, R., et Decoteau, D., 1993. Developing an effective southernpea and sweet corn intercrop system. HortTechnology (USA), 178-184.
107. Fujita, K., Ofosu-Budu, K. G., et Ogata, S., 1992. Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal cropping systems. Plant and soil, 141(1-2), 155-175.
108. Fustec, J. 2012. Les cultures associées céréales/légumineuses en agriculture « bas intrants » dans le Sud de la France, PerfCom – ANR, 27p.
109. Gärdenäs, A.I., Ågren, G.I., Bird, J.A., Clarholm, M., Hallin, S., Ineson, P., Köatterer, T., Knicker, H., Nilsson, S.I., N'asholm, T., Ogle, S., Paustian, K., Persson, T., Stendahl, J., 2011. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions e from molecular to global scale. Soil Biol. Biochem. 43 (4), 702–717. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.025>.
110. Gaba, S., Lescourret, F., Boudsocq, S., Enjalbert, J., Hinsinger, P., Journet, E. P., Navas, M., Wery, J., Louarn, J., Malézieux, E., Pelzer, E., Prudent, M., et Ozier-Lafontaine, H., 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. Agronomy for sustainable development, 35(2), 607–623. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0272-z>.
111. Gachon, L., & Triboi, E., 1988. Etude des methodes d'appréciation de l'offre phosphatée du sol. II. Détermination du phosphate labile du sol ou valeur L.
112. Gahoonia, T. S., Claassen, N., & Jungk, A., 1992. Mobilization of residual phosphate of different phosphate fertilizers in relation to pH in the rhizosphere of ryegrass. Fertilizer research, 33(3), 229-237.
113. Gardiner, D. T., & Miller, R. W., 2004. Soils in our environment. 126-165. NJ.
114. Garofalo, P., Vonella, A. V., Ruggieri, S., Rinaldi, M., 2009. Verification of crop coefficients for chickpeas in the Mediterranean environment. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 125, 493–502. <https://doi: 10.2495/WRM090441>.

115. Garten, C.T., Smith, J.L., Tyler, D.D., Amonette, J.E., Bailey, V.L., Brice, D.J., Castro, H. F., Graham, R.L., Gunderson, C.A., Izaurralde, R.C., Jardine, P.M., Jastrow, J.D., Kerley, M.K., Matamala, R., Mayes, M.A., Metting, F.B., Miller, R.M., Moran, K.K., Post IIIa, W.M., Sands, R.D., Schadt, C.W., Phillips, J.R., Thomson, A.M., Vugteveen, T., West, T.O., Wullschleger, S.D., 2010. Intra-annual changes in biomass, carbon, and nitrogen dynamics at 4-year old switchgrass field trials in west Tennessee. *Agric. Ecosyst. Environ* 136, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.12.019>.
116. Gaudio, N., Escobar-Gutiérrez, A. J., Casadebaig, P., Evers, J. B., Gérard, F., Louarn, G., Colbach, N., Munz, S., Launay, M., Marrou, H., Barillot, R., Hinsinger, P., Bergez, J.E., Combes, D., Durand, J.L., Frak, E., Pagès, L., Pradal, C., Saint-Jean, S., Van Der Werf, W., Justes, E., 2019. Current knowledge and future research opportunities for modeling annual crop mixtures. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0562-6>.
117. Gervy, R., 1970. *Les phosphates et l'agriculture*. Edition DUNOD, Paris. 298p.
118. Ghanbari, A., et Lee, H., 2002. Intercropped field beans (*Vicia faba*) and wheat (*Triticum aestivum*) for whole crop forage: effect of nitrogen on forage yield and quality. *The Journal of Agricultural Science*, 138(3), 311-315.
119. Ghazanshahi, D., & Jaouich, A., 2001. Effet du pH sur la solubilité du phosphore dans les sols calcaires du nord de Varamine (Iran). *Compte rendu de recherche en agroenvironnement*, 21.
120. Girjesh, G., et Patil, V., 1991. Weed management studies in groundnut and sunflower intercropping system. *J. Oilseeds Res*, 8, 7-13.
121. Glaze-Corcoran, S., Hashemi, M., Saghpour, A., Jahnazad, E., Afshar, R.K., Liu, X., Herbert, S.J., 2020. Understanding intercropping to improve agricultural resiliency and environmental sustainability. *Adv. Agron.* 162, 199–256. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.004>.
122. Gliessman, S., 1998. *Agro-ecological processes in sustainable agriculture*. In : *Sleeping Bear Press*, Chelsea, MI.
123. Gong, X., Dang, K., Lv, S., Zhao, G., Tian, L., Luo, Y., & Feng, B., 2020. Interspecific root interactions and water-use efficiency of intercropped proso millet and mung bean. *European journal of agronomy*, 115, 126034.
124. Gonzalez-Dugo, V., Durand, J. L., Gastal, F., & Picon-Cochard, C., 2005. Short-term response of the nitrogen nutrition status of tall fescue and Italian ryegrass swards under water deficit. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11), 1269-1276.
125. Gonzalez-Dugo, V., Durand, J. L., & Gastal, F., 2010. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. *Agronomy for sustainable development*, 30(3), 529-544.

126. Gras, A., Ginovart, M., Valls, J., Baveye, P.C., 2011. Individual-based modelling of carbon and nitrogen dynamics in soils: parameterization and sensitivity analysis of microbial components. *Ecol. Model.* 222, 1998–2010. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.03.009>.
127. Gregorich, E. G., Rochette, P., St-Georges, P., McKim, U. F., & Chan, C., 2008. Tillage effects on N<sub>2</sub>O emission from soils under corn and soybeans in Eastern Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 88(2), 153-161.
128. Griffith, B., 2010. Efficient fertilizer use—Phosphorus. McMillan Co. Amsterdam, Netherland, 1-7.
129. Groves, S.J., Rose, S.C., 2004. Calibration equations for Diviner 2000 capacitance measurements of volumetric soil water content of six soils. *Soil Use and Management*, 20(1), 96–97. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00343.x>.
130. Guarda, G., Padovan, S., & Delogu, G., 2004. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *European Journal of Agronomy*, 21(2), 181-192.
131. Guillaume, S., Bergez, J.-E., Wallach, D., Justes, E., 2011. Methodological comparison of calibration procedures for durum wheat parameters in the STICS model. *Eur. J. Agron.* 35, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.05.003>.
132. Gunawardena, S. F. B. N., Danso, S. K. A., & Zapata, F., 1992. Phosphorus requirements and nitrogen accumulation by three mungbean (*Vigna radiata* (L) Welzek) cultivars. *Plant and Soil*, 147(2), 267-274.
133. Gutiérrez-Boem, F. H., & Thomas, G. W., 1998. Phosphorus nutrition affects wheat response to water deficit. *Agronomy Journal*, 90(2), 166-171.
134. Haberland, J., Gálvez, R., Kremer, C., Carter, C., 2014. Laboratory and field calibration of the Diviner 2000 probe in two types of soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(4), 04014004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000687](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000687).
135. Hassink, J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant soil* 191:77-87.
136. Hauggaard-Nielsen, H., & Jensen, E. S., 2005. Facilitative root interactions in intercrops. In *Root physiology: From gene to function* (pp. 237-250. Springer, Dordrecht.

137. Hawkesford, M. J., & Belcher, A. R., 1991. Differential protein synthesis in response to sulphate and phosphate deprivation: Identification of possible components of plasma-membrane transport systems in cultured tomato roots. *Planta*, 185(3), 323-329.
138. Hayman, P.T., Whitbread, A.M., Gobbett, D.L., 2010. The impact of El Niño Southern Oscillation on seasonal drought in the southern Australian grainbelt. *Crop Pasture Sci.* 61, 528–539. <https://doi.org/10.1071/CP09221>.
139. Heinemann, J. A., Massaro, M., Coray, D. S., Agapito-Tenzen, S. Z., Wen, J. D., 2014. Sustainability and innovation in staple crop production in the US Midwest. *International journal of agricultural sustainability*, 12(1), 71-88.
140. Hiebsch, C. K., & McCollum, R. E., 1987. Area- $\times$ -Time Equivalency Ratio: A Method for Evaluating the Productivity of Intercrops<sup>1</sup>. *Agronomy Journal*, 79(1), 15-22.
141. Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and soil*, 237(2), 173-195.
142. Hinsinger, P., Brauman, A., Devau, N., Gérard, F., Jourdan, C., Laclau, J.-P., Le Cadre, E., Jaillard, B., Plassard, C., 2011. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant and Soil*, 348(1-2), 29. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y>.
143. Holling, C. S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1), 1-23.
144. Holzworth, D.P., Huth, N.I., De Voil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., Van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A.D., Brown, H., Whish, J.P.M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L.W., Peake, A.S., Poulton, P.L., Hochman, Z., Thorburn, P.J., Gaydon, D.S., Dalgliesh, N.P., Rodriguez, D., Cox, H., Chapman, S., Doherty, A., Teixeira, E., Sharp, J., Cichota, R., Vogeler, I., Li, F.Y., Wang, E., Hammer, G.L., Robertson, M.J., Dimes, J.P., Whitbread, A.M., Hunt, J., Van Rees, H., McClelland, T., Carberry, P.S., Hargreaves, J.N.G., MacLeod, N., McDonald, C., Harsdorf, J., Wedgwood, S., et Keating, B.A., 2014. APSIM—evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, 62, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>.
145. Hopkins W. G., 2003. *Physiologie végétale*. Ed. de Boeck, Belgique, 514p.
146. Houassine, D., Latati, M., Nazih, Y., Gérard, F.R., 2019. Phosphorus acquisition processes in the field: study of faba bean cultivated on calcareous soils in Algeria. *Archives of Agronomy and Soil Science*. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1605166>.

147. Hountin, J. A., 1996. Capacité d'adsorption du phosphore et distribution des éléments C, N et P dans un sol agricole traité avec du lisier de porc pendant 14 ans. Thèse Doctorat en sciences de l'eau et de l'environnement, NRS-EAU, Québec (CANADA), 166p.
148. Huňady, I., et Hochman, M., 2014. Potential of legume-cereal intercropping for increasing yields and yield stability for self-sufficiency with animal fodder in organic farming. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 50(2), 185-194.
149. Ibrahim, H., Hatira, A., Pansu, M., 2013. Modelling the functional role of microorganisms in the daily exchanges of carbon between atmosphere, Plants and Soil. *Procedia Environ. Sci.* 19, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.011>.
150. Ibrahim, H., Pansu, M., Blavet, D., Hatira, A., McDonald, P., Bernoux, M., Drevon, J.-J., 2016. Modelling the continuous exchange of carbon between living organisms, the soil and the atmosphere. *Plant and Soil* 398, 381–397. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2665-4>.
151. Iseli-trösch, K., (2019). Les céréales suisses. Agence d'information agricole romande (AGIR. Lausanne, Suisse, 15p.
152. Jastrow, J. D., 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(4-5), 665-676.
153. Jégo, G., 2008a, Influence des activités agricoles sur la pollution nitrique des eaux souterraines. Analyse par modélisation des impacts des systèmes de grande culture sur les fuites de nitrate dans les plaines alluviales. Thèse Doctorat, Université de Toulouse, Paul Sabatier, 211 p.
154. Jégo, G., Martinez, M., Antigüedad, I., Launay, M., Sanchez-Pérez, J.M., Justes, E., 2008b. Evaluation of the impact of various agricultural practices on nitrate leaching under the root zone of potato and sugar beet using the STICS soil-crop model. *Sci. Tot. Environ.* 394, 207–221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.01.021>.
155. Jégo, G., Pattey, E., Bourgeois, G., Morrison, M.J., Drury, C.F., Tremblay, N., Tremblay, G., 2010. Calibration and performance evaluation of soybean and spring wheat cultivars using the STICS crop model in Eastern Canada. *Field Crops Res.* 117, 183–196. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.03.008>.
156. Jensen, E. S., 1996. Grain yield, symbiotic N<sub>2</sub> fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*, 182(1), 25–38.
157. Jensen, E.S., Peoples, M.B., Hauggaard-Nielsen, H., 2010. Faba bean in cropping systems. *Field Crop. Res.* 115, 203–216. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.008>.

158. Justes, E., Bedoussac, L., et Prieur, L., 2009. Est-il possible d'améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé en Agriculture Biologique au moyen de cultures intermédiaires ou de cultures associées ? *Innovations Agronomiques*, 165–176.
159. Justes, E., 2017. *Cover Crops for Sustainable Farming*. Springer, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-0986-4>.
160. Justes, E., Vezy, R., Munz, S., Paff, K., Bedoussac, L., Gaudio, N., Lecharpentier, P., Ripoche, D., Launay, M. (2021, January). Recent advances in intercropping modelling: the new version of the STICS soil-crop model simulates consistently a wide range of bi-specific annual intercrops. In Conference on Intercropping for sustainability. Research developments and their application.
161. Justes, E., Bedoussac, L., Dordas, C., Frak, E., Louarn, G., Boudsocq, S., Journet, E-T., Lithourgidis, A., Pankou, C., Zhang, C., Carlsson, G., Jensen, ES, Watson, C., Li, L. (2021). The 4C approach as a way to understand species interactions determining intercropping productivity. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2021414>.
162. Kaci, G., Blavet, D., Benlahrech, S., Kouakoua, E., Couderc, P., Deleporte, P., Desclaux, D., Latati, M., Pansu, M., Antoine, M., Drevon, J.J., Ounane, S. M., 2018. The effect of intercropping on the efficiency of faba bean–rhizobial symbiosis and durum wheat soil-nitrogen acquisition in a Mediterranean agroecosystem. <https://doi.org/10.17221/9/2018-PSE>.
163. Karrou, M., Oweis, T., 2012. Water and land productivities of wheat and food legumes with deficit supplemental irrigation in a Mediterranean environment. *Agric. Water Manag.* 107, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.014>.
164. Khan, M.S., Zaidi, A., Musarrat. J., 2010) *Microbes for Legume Improvement*. Ed. Springer. Wien New York, Printed in Germany, 535p.
165. Kherch-Medjden, H., Bouchafaa, B., 2012. *La politique céréalière en Algérie*, 13p.
166. Kherif, O., Keskes, M.I., Pansu, M., Ouaret, W., Rebouh, Y.N., Dokukin, P., Kucher, D., 2021a. Latati, M. Agroecological modeling of nitrogen and carbon transfers between decomposer micro-organisms, plant symbionts, soil and atmosphere in an intercropping system. *Ecol. Model.* 440, 109390. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109390>.
167. Kherif, O., Seghouani, M., Zemmouri, B., Bouhenache, A., Keskes, M. I., Yacer-Nazih, R. Latati, M., 2021b. Understanding the Response of Wheat-Chickpea Intercropping to Nitrogen Fertilization Using Agro-Ecological Competitive Indices under Contrasting Pedo climatic Conditions. *Agronomy*, 11(6), 1225. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061225>.
168. Knörzer, H., Grözinger, H., Graeff-Hönninger, S., Hartung, K., Piepho, H.-P., Claupein, W., 2011. Integrating a simple shading algorithm into CERES-wheat and CERES-

- maize with particular regard to a changing microclimate within a relay-intercropping system. *Field Crops Res.* 121, 274–285. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.12.016>.
169. Kump, L. R., & Arthur, M. A., 1999. Interpreting carbon-isotope excursions: carbonates and organic matter. *Chemical Geology*, 161(1-3), 181-198.
170. Ladd, J. N., Jocteur-Monrozier, L., & Amato, M., 1992. Carbon turnover and nitrogen transformations in an alfisol and vertisol amended with [U-14C] glucose and [15N] ammonium sulfate. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(4), 359-371.
171. Laghari, G. M., Oad, F. C., Shamasuddin, T., Gandahi, A. W., Siddiqui, M. H., Jagirani, A. W., & Oad, S. M., 2010. Growth, yield and nutrient uptake of various wheat cultivars under different fertilizer regimes. *Sarhad Journal of agriculture*, 26(4), 489-497.
172. Lal, B., Rana, K.S., Rana, D.S., Y.S. Shivay, Sharma, D.K., Meena B.P., Gautam, P., 2017. Biomass, yield, quality and moisture use of Brassica carinata as influenced by intercropping with chickpea under semiarid tropics. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.01.001>.
173. Laranjeira, S., Fernandes-Silva, A., Reis, S., Torcato, C., Raimundo, F., Ferreira, L., Carnide, V., Marques, G., 2021. Inoculation of plant growth promoting bacteria and arbuscularmycorrhizal fungi improve chickpea performance under water deficit conditions. *Applied Soil Ecology*, 164, 103927. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103927>.
174. Latati, M., Blavet, D., Alkama, N., Laoufi, H., Drevon, J. J., Gerard, F., Pansu, M., Ounane, S. M., 2014. The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. *Plant and Soil*, 385(1), 181-191. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2214-6>.
175. Latati, M., Aouiche, A., Tellah, S., Laribi, A., Benlahrech, S., Kaci, G., Ouarem, F., Ounane, S.M., 2017. Intercropping maize and common bean enhances microbial carbon and nitrogen availability in low phosphorus soil under Mediterranean conditions. *Eur. J. Soil Biol* 80, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.03.003>.
176. Latati, M., Bargaz, A., Belarbi, B., Lazali, M., Benlahrech, S., Tellah, S., Kaci, G., Drevon, J.J., Ounane, S.M., 2016. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. *European Journal of Agronomy* 72, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.015>.
177. Latati, M., Aouiche, A., Rebou, Y.N., Laouar, M., 2019a. Modelling the functional role of the micro-organisms in the daily exchanges of carbon and nitrogen in intercropping system under Mediterranean conditions. *Agron. Res.* 17 (2), 559–573. <https://doi.org/10.15159/AR.19.050>.

178. Latati, M., Dokukin, P., Aouiche, A., Rebouh, N.Y., Takouachet, R., Hafnaoui, E., Hamdani, F.Z., Bacha, F., Ounane, S.M., 2019b. Species interactions improve above-ground biomass and land use efficiency in intercropped wheat and chickpea under low soil inputs. *Agronomy*. 9, 765. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110765>.
179. Latati, M., 2020. Simulation of the daily exchange of carbon and nitrogen between microorganisms, plant and symbionts of intercropped legume with cereal in mediterranean agro ecosystem. *Microbial Mitigation of Stress Response of Food Legumes*. CRC Press, pp. 3-11. <https://doi.org/10.1201/9781003028413>.
180. LATRECHE, F., 2020. Évaluation et conception des systèmes de culture innovants en zones semi-arides algériennes.
181. Launay, M., Brisson, N., Satger, S., Hauggaard-Nielsen, H., Corre-Hellou, G., Kasynova, E., Ruske, R., Jensen, E.S., Gooding, M., 2009. Exploring options for managing strategies for pea-barley intercropping using a modeling approach. *Eur. J. Agron.* 31, 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.04.002>.
182. Lazrek-Ben Friha, F., 2008. Analyse de la diversité génétique et symbiotique des populations naturelles tunisiennes de *Medicago truncatula* et recherche de QTL liés au stress salin (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
183. Lefebvre, S., 2003. Interface eau-sédiments des cours d'eau en région agricole : Rôle dans les cycles biogéochimiques, Thèse de Doctorat, Université de Rennes, p288.
184. Lemaire, G., & Meynard, J. M., 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. In *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. pp. 45-55. Springer, Berlin, Heidelberg.
185. Lemaire, G., Jeuffroy, M. H., & Gastal, F., 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *European Journal of agronomy*, 28(4), 614-624.
186. Leo, M.W.M., 1963. Determination of soil carbonates by a rapide gasometric method. *J. Agric. Food Chem.* 11, 452–455.
187. Li, C., Hoffland, E., Kuyper, T. W., Yu, Y., Li, H., Zhang, C., Zhang, F., van der Werf, W., 2020. Yield gain, complementarity and competitive dominance in intercropping in China: A meta-analysis of drivers of yield gain using additive partitioning. *European Journal of Agronomy*, 113, 125987. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125987>.

188. Li, Y. Y., Yu, C. B., Cheng, X., Li, C. J., Sun, J. H., Zhang, F. S., Lambers, H., et Li, L., 2009. Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N<sub>2</sub> fixation of faba bean. *Plant and Soil*, 323(1), 295-308.
189. Lin, B. B., 2011. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience*, 61(3), 183-193.
190. Lithourgidis, A. S., Dordas, C. A., Damalas, C. A., & Vlachostergios, D., 2011. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian journal of crop science*, 5(4), 396-410.
191. LoaizaUsuga, J.C., Pauwels, V.R.N., 2008. Calibration and multiple data set-based validation of a land surface model in a mountainous Mediterranean study area. *J. Hydrol.* 356, 223–233. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.018>.
192. Lopez-Bucio, J., Nieto-Jacobo, M. F., Ramirez-Rodriguez, V., & Herrera-Estrella, L., 2000. Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. *Plant Science*, 160(1), 1-13.
193. Loreau, M., et Hector, A., 2001. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412(6842), 72.
194. Loreau, M., Sapijanskas, J., Isbell, F., & Hector, A., 2012. Niche and fitness differences relate the maintenance of diversity to ecosystem function: comment. *Ecology*, 93(6), 1482-1487.
195. Louarn, G., Bedoussac, L., Gaudio, N., Journet, E. P., Moreau, D., Jensen, E. S., & Justes, E., 2021. Plant nitrogen nutrition status in intercrops—a review of concepts and methods. *European Journal of Agronomy*, 124, 126229.
196. Luedeling, E., Smethurst, P.J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N.I., van Noordwijk, M., Ong, C.K., Mulia, R., Lusiana, B., Muthuri, C., Sinclair, F.L., 2016. Field-scale modeling of tree–crop interactions: challenges and development needs. *Agric. Syst.* 142, 51–69. <http://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.11.005>.
197. Lynch, J.M., Barbano, D.M., 1999. Kjeldahl nitrogen analysis as a reference method for protein determination in dairy products. *J. AOAC Int.* 82, 1389–1398. <http://doi.org/10.1093/jaoac/82.6.1389>.
198. MADR., 2019. Statistique Agricoles. <http://madrp.gov.dz>.
199. Maisongrande, P., 1996. Modélisation du cycle du carbone dans la biosphère terrestre : intégration de données satellitaires (Doctoral dissertation, Toulouse, INPT).

200. Malagoli, P., Naudin, C., Vrignon-Brenas, S., Sester, M., Jeuffroy, M. H., Corre-Hellou, G., 2020. Modelling nitrogen and light sharing in pea-wheat intercrops to design decision rules for N fertilisation according to farmers' expectations. *Field Crops Research*, 255, 107865. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107865>.
201. Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., Tourdonnet, S., Valantin-Morison, M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 43–62. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_22).
202. Manzoni, S., Porporato, A., 2009. Soil carbon and nitrogen mineralization: theory and models across scales. *Soil Biol. Biochem.* 41, 1355–1379. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.02.031>.
203. Manzoni, S., 2017. Flexible carbon-use efficiency across litter types and during decomposition partly compensates nutrient imbalances—Results from analytical stoichiometric models. *Front. Microbiol.* 8, 661. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00661>.
204. Martin M.P.L.D., Snaydon R.W., (1982): Root and shoot interactions between barley and field beans when intercropped. *J. Appl. Ecol.*, 19: 263–272.
205. Martinelli, F., Ollero, F. J., Giovino, A., Perrone, A., Bekki, A., Sikora, S., El Nabbout, R., Bouhadida, M., Yucel, D., Bazzicalupo, M., Mengoni, A., Pérez-Montaña, F., 2020. Proposed Research for Innovative Solutions for Chickpeas and Beans in a Climate Change Scenario: The Mediterranean Basin. *Sustainability*, 12(4), 1315. <https://doi.org/10.3390/su12041315>.
206. Mason, S. C., Leihner, D. E., & Vorst, J. J., 1986. Cassava-Cowpea and Cassava-Peanut Intercropping. I. Yield and Land Use Efficiency] 1. *Agronomy journal*, 78(1), 43-46.
207. Mbarek, K. B., Boubaker, M., & Hannachi, C., 2013. Modélisation du rendement grain du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) du type «kabuli» sous les conditions édapho-climatiques du semi-aride supérieur Tunisien. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1(2), 16-28.
208. McBratney, A.B.; Odeh, I.O.A.; Bishop, T.F.A.; 2000. Dunbar, M.S.; Shatar, T.M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 293–327. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00043-4).
209. Mead, R., & Willey, R., 1980. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture*, 16(3), 217-228.
210. Meinke, H., & Stone, R. C., 2005. Seasonal and inter-annual climate forecasting: the new tool for increasing preparedness to climate variability and change in agricultural planning and operations. *Climatic change*, 70(1), 221-253.

211. Messaoudi, H., Gérard, F., Dokukin, P., Djamai, H., Rebouh, N.Y., Latati, M., 2020. Effects of intercropping on field-scale phosphorus acquisition processes in a calcareous soil. *Plant Soil* 449, 331–334. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04491-7>.
212. Meyer, D.W., Badaruddin, M., 2001. Frost tolerance of ten seedling legume species at four growth stages. *Crop science*. 41 (6), 1838–1842. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.1838>.
213. Moonen, A. C., & Bàrberi, P., 2008. Functional biodiversity: An agroecosystem approach. *Agriculture, ecosystems & environment*, 127(1-2), 7-21.
214. Morel, C., Le Clech, B., Linères, M., Pellerin, S., 2006) Gare à la baisse de la biodisponibilité du phosphore. *Alter Agri* 79 : 21-23.
215. Morishita, D.W., 2017. Impact of glyphosate resistant sugarbeet. *Pest ManagSci*, 74 (5), 1050–1053. <https://doi.org/10.1002/ps.4503>.
216. Mousavi, S. R., et Eskandari, H., 2011. A general overview on intercropping and its advantages in sustainable agriculture. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 1(11), 482-486.
217. Mozas, M., & Ghosn, A., 2013. État des lieux du secteur de l'eau en Algérie. Institut de Perspective Économique du Monde Méditerranéen (IPMED).
218. Mullen, M. D., Israel, D. W., & Wollum, A. G., 1988. Effects of *Bradyrhizobium japonicum* and soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) phosphorus nutrition on nodulation and dinitrogen fixation. *Applied and environmental microbiology*, 54(10), 2387-2392.
219. Naseri, A. A., Hoseini, Y., Moazed, H., Abbasi, F., & Samani, H. M. V., 2010. Determining of soil phosphorus requirement with application of Freundlich adsorption isotherm. *Asian Journal of Agricultural Research*, 4(4), 226-231.
220. Nasrolahzadeh, S., Salmasi, S. Z., & Pourdad, S. S., 2012. Evaluation of wheat-chickpea intercrops as influenced by nitrogen and weed management. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 7(4), 447-460.
221. Naudin, C., Corre-Hellou, G., Pineau, S., Crozat, Y., Jeuffroy, M.H., 2010. The effect of various dynamics of N availability on winter pea–wheat intercrops: crop growth, N partitioning and symbiotic N<sub>2</sub> fixation. *Field Crop Res* 119:2–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.06.002>.
222. Ngono, J. P. N., 2019. Imbrications ethnographiques de la résilience chez les Baka du sud-est Cameroun. 15p.

223. Nicolardot, B., Recous S., Mary, B, (2001) Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C : N ratio of the residues. *Plant Soil* 83: 83-103.
224. Oelbermann, M., Voroney, R. P., Kass, D. C., & Schlönvoigt, A. M., 2006. Soil carbon and nitrogen dynamics using stable isotopes in 19-and 10-year-old tropical agroforestry systems. *Geoderma*, 130(3-4), 356-367.
225. Ofori, F., & Stern, W. R., 1987. Cereal–legume intercropping systems. *Advances in agronomy*, 41, 41-90.
226. Otani, T., Ae, N., & Tanaka, H., 1996. Phosphorus (P) uptake mechanisms of crops grown in soils with low P status: II. Significance of organic acids in root exudates of pigeon-pea. *Soil Science and Plant Nutrition*, 42(3), 553-560.
227. Oteng-Darko, P., Yeboah, S., Addy, S. N. T., Amponsah, S., & Danquah, E. O., 2013. Crop modeling: A tool for agricultural research—A review.
228. Paff, K.; Munz, S.; Vezy, R.; Gaudio, N.; Bedoussac, L.; Justes, E., 2020. Calibration and Evaluation of the STICS Intercrop Model for Two Cereal–legume Mixtures. In *Proceedings of the ICROPM 2020-Crop Modelling for the future*, Montpellier, France, 3–5 February 2020; <https://hal-sde.archives-ouvertes.fr/hal-02565235/>
229. Paleari, L., Vesely F.M., Ravasi R.A., Movedi, E., Tartarini S., Invernizzi M., Confalonieri, R., 2020. Analysis of the Similarity between in Silico Ideotypes and Phenotypic Profiles to Support Cultivar Recommendation—A Case Study on *Phaseolus vulgaris* L. *Agronomy*.10, 1733; <https://doi.org/10.3390/agronomy10111733>.
230. Palosuo, T., Foereid, B., Svensson, M., Shurpali, N., Lehtonen, A., Herbst, M., Linkosalo, T., Ortiz, C., Rampazzo-Todorovic, G., Marcinkonis, S., Li, C., Jandl, R., 2012. A multi-model comparison of soil carbon assessment of a coniferous forest stand. *Environ. Model Softw* 35, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.02.004>.
231. Pansu, M., Sallih, Z., Bottner, P., 1998. Modelling of soil nitrogen forms after organic amendments under controlled conditions. *Soil Biol. Biochem.* 30, 19–29. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00087-4).
232. Pansu, M., Gautheyrou, J., 2006. *Handbook of Soil Analysis - Mineralogical. Organic and Inorganic Methods*. Springer, Berlin, Heidelberg, New-York.
233. Pansu, M., Bottner, P., Sarmiento, L., 2009. Micro-Organismes et Matière Organique du Sol (modèle MOMOS) : bilan de 20 ans de modélisation basée sur le traçage isotopique in situ. *Étude Gestion Sols* 16, 213–232.

234. Pansu, M., Machado, D., Bottner, P., Sarmiento, L., 2014. Modelling microbial exchanges between forms of soil nitrogen in contrasting ecosystems. *Biogeosciences* 11, 915–927. <https://doi.org/10.5194/bg-11-915-2014>.
235. Pansu, M., Sarmiento, L., Rujano, M.A., Ablan, M., Acevedo, D., Bottner, P., 2010. Modelling Organic transformations by Micro-Organisms of Soils in six contrasting ecosystems: validation of the MOMOS model. *Global Biogeochem. Cycles* 24, GB1008. <https://doi.org/10.1029/2009GB003527>.
236. Pansu, M., Ibrahim, H., Hatira, A., Brahim, N., Drevon, J.-J., Harmand, J.-M., Chotte, J.-L., Blavet, D., 2018. Modelling the continuous exchange of nitrogen between microbial decomposers, the organs and symbionts of plants, soil reserves and the atmosphere. *Soil Biology and Biochemistry* 125, 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.011>.
237. Parker, C. P., Baltes, B. B., Young, S. A., Huff, J. W., Altmann, R. A., Lacost, H. A., & Roberts, J. E., 2003. Relationships between psychological climate perceptions and work outcomes: a meta-analytic review. *Journal of Organizational Behavior: The International Journal of Industrial, Occupational and Organizational Psychology and Behavior*, 24(4), 389-416.
238. Pellerin, A., Parent, L. É., Fortin, J., Tremblay, C., Khiari, L., & Giroux, M., 2006. Environmental Mehlich-III soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Canadian Journal of Soil Science*, 86(4), 711-723.
239. Pelzer, E., Bazot, M., Makowski, D., Corre-Hellou, G., Naudin, C., Al Rifaï, M., Baranger, E., Bedoussac, L., Biarnès, V., Boucheny, P., Carrouée, B., Dorvillez, D., Foissy, D., Gaillard, B., Guichard, L., Mansard, M.C., Omon, B., Prieur, L., Yvergniaux, M., ustes, E., et Jeuffroy, M.H., 2012. Pea–wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy*, 40, 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.01.010>.
240. Pendall, E., & King, J. Y., 2007. Soil organic matter dynamics in grassland soils under elevated CO<sub>2</sub>: insights from long-term incubations and stable isotopes. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(10), 2628-2639.
241. Penman, H.L., (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A193 :120–146. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>.
242. Penning de Vries, F.W.T., Jansen, D.M., ten Berge, H.F.M., Bakema, A., 1989. Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops. Pudoc, Wageningen.

243. Peoples, M.B., Hauggaard-Nielsen, H., Huguenin-Elie, O., Jensen, E.S., Justes, E., Williams, M., 2019. The contributions of legumes to reducing the environmental risk of agricultural production. In *Agroecosystem Diversity*; Academic Press: Cambridge, UK, pp. 123–143. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811050-8.00008-X>.
244. Perrin, R., et Phillips, M., 1978. Some effects of mixed cropping on the population dynamics of insect pests. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 24(3), 585-593.
245. Petit, J., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J. M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V. Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E. et Stievenard, M., 1999. Climate and atmospheric history of the past, 420, 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.01.010>.
246. Philippot, L., Spor, A., Hénault, C., Bru, D., Bizouard, F., Jones, C.M., Sarr, A., Maron, P. A., 2013. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. *ISME J. Int. Soc. Microb. Ecol.* 13, 1609–1619. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.34>.
247. Plaxton, W. C., 1996. The organization and regulation of plant glycolysis. *Annual review of plant biology*, 47(1), 185-214.
248. Plaza-Bonilla, D., Nolot, J.-M., Raffaillac, D., Justes, E., 2015. Cover crops mitigate nitrate leaching in cropping systems including grain legumes: Field evidence and model simulations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 212, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.014>.
249. Plaza-Bonilla, D., Nolot, J.-M., Raffaillac, D., Justes, E., 2017. Innovative cropping systems to reduce N inputs and maintain wheat yields by inserting grain legumes and cover crops in southwestern France. *Eur. J. Agron.* 82, Part B, 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.05.010>.
250. Plénet, D., & Lemaire, G., 1999. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and soil*, 216(1), 65-82.
251. Raghothama, K. G., Muchhal, U. S., Kim, D. H., & Bucher, M., 1998. Molecular regulation of plant phosphate transporters. *CURRENT TOPICS IN PLANT PHYSIOLOGY*, 19, 271-280.
252. Raghothama, K. G., 1999. Phosphate acquisition. *Annual review of plant biology*, 50(1), 665-693.
253. Rahim, A., Abbassi, G. H., Rashid, M., & Ranjha, A. M., 2007. Methods of phosphorus application and irrigation schedule influencing wheat yield. *Pak. J. Agri. Sci*, 44(3), 420-423.

254. Raich, J. W., & Schlesinger, W. H., 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44(2), 81-99.
255. Raoul, C., 2003. Le sol propriétés et fonction, constitution et structure phénomène aux interfaces. Dunod, France agricole, Paris, 455p.
256. Rastoin J.L. et Benabderrazik E., 2014. Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb : Pour un co-développement de filières territorialisées, « Construire la Méditerranée », éd. Ipemed, Paris, France, 136p
257. Renaudat, J., 2005. Le cycle du carbone : une clé pour l'environnement. Mémoire de fin de formation à la haute qualité environnementale, Ecole d'Architecture de Lyon, Lyon. 60p.
258. Reynaud, A., 2009. Adaptation à court et à long terme de l'agriculture face au risque de sécheresse : une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques. *Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement-Review of agricultural and environmental studies*, 90(2), 121-154.
259. Rezaei-Chianeh, E., Nassab, A. D. M., Shakiba, M. R., Ghassemi-Golezani, K., Aharizad, S., & Shekari, F., 2011. Intercropping of maize (*Zea mays*. L) and faba bean (*Vicia faba*. L) at different plant population densities. *African Journal of Agricultural Research*, 6(7), 1786-1793.
260. Robert-Hoarau, C., 2014. Alimentation santé Alimentation plaisir une question d'équilibre : Alimentation plaisir une question d'équilibre. Fernand Lanore.
261. Rodriguez, C., Carlsson, G., Englund, J. E., Flöhr, A., Pelzer, E., Jeuffroy, M. H., Makowski, D., & Jensen, E. S., 2020. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 118, 126077. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126077>.
262. Romanyaa, J., Falloon, P., Coleman, K., Smith, P., 2000. Modelling changes in soil organic matter after planting fast-growing *Pinus radiata* on Mediterranean agricultural soils. *Eur. J. Soil. Sci.* 51, 627-641. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2000.00343.x>.
263. Sallih, Z., Pansu, M., 1993. Modelling of soil carbon forms after organic amendment under controlled conditions. *Soil Biol. Biochem.* 25, 1755-1762. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90180-J](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90180-J).

264. Samadi, A., 2006. Contribution of inorganic phosphorus fractions to plant nutrition in alkaline-calcareous soils.
265. Samahadthai, P., Vityakon, P., & Saenjan, P., 2010. Effects of different quality plant residues on soil carbon accumulation and aggregate formation in a tropical sandy soil in North-east Thailand as revealed by a 10-year field experiment. *Land Degradation & Development*, 21(5), 463-473.
266. Sanyal, S. K., Chan, P. Y., & De Datta, S. K., 1993. Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soils of south and Southeast Asia. *Soil Science Society of America Journal*, 57(4), 937-945.
267. Schleper, C., 2008. Metabolism of the deep. *Nature* 456: 712-714.
268. Schneider, A., & Huyghe, C., 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables (p. 512. éditions Quae.
269. Shen, A.L., Li, X.Y., Kanamori, T., 1996. Arao, T. Effect of long-term application of compost on some chemical properties of wheat rhizosphere and non-rhizosphere soils. *Pedosphere* 6, 355–363.
270. Shili-Touzi, I., De Tourdonnet, S., Launay, M., Dore, T., 2010. Does intercropping winter wheat (*Triticumaestivum*) with red fescue (*Festucarubra*) as a cover crop improve agronomic and environmental performance? A modeling approach. *Field Crops Research* 116, 218–229. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.11.007>.
271. Sierra, J., & Tournebize, R., 2019. Fixation symbiotique d'azote par les légumineuses en association. Résultats obtenus en Guadeloupe (Doctoral dissertation, Inconnu).
272. Sikorski, J., 2015. The prokaryotic biology of soil. *Soil Org* 87 (1), 1–28.
273. Singh, A. K., Goyal, V., Mishra, A. K., & Parihar, S. S., 2013. Validation of CropSyst simulation model for direct seeded rice–wheat cropping system. *Current science*, 1324–1331. <https://www.jstor.org/stable/24092507>.
274. Soing, P., & Vaysse, P., 1999. Fertilisation des vergers : environnement et qualité. Éditions Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes.
275. Soltner, D., 2007. Les bases de la production végétale. Tome 4. La plante et son amélioration. 7ème édition. Paris, 304 p.
276. Song, Y. N., Zhang, F. S., Marschner, P., Fan, F. L., Gao, H. M., Bao, X. G., Sun, G.H., et Li, L., 2007. Effect of intercropping on crop yield and chemical and microbiological properties in rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.), and

- faba bean (*Vicia faba* L. *Biology and Fertility of Soils*, 43(5), 565-574. <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0139-9>.
277. Soon, Y. K., 1991. Solubility and retention of phosphate in soils of the northwestern Canadian prairie. *Canadian Journal of Soil Science*, 71(4), 453-463.
278. Storia, C., A. Berbecea, N. Baghina, I. Gaica, M. Storia, I. Radulov. 2013. Phosphorus dynamics on acidic grassland soil. *Res. J. Agr. Sci.*, 45(1), 78-83.
279. Strullu, L., Beaudoin, N., Thiébeau, P., Julier, B., Mary, B., Ruget, F., Ripoche, D., Rakotovololona, L., Louarn, G., 2020. Simulation using the STICS model of C&N dynamics in alfalfa from sowing to crop destruction. *European Journal of Agronomy*, 112, 125948. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125948>.
280. Sun, B., Gao, Y., Yang, H., Zhang, W., Li, Z., 2019. Performance of alfalfa rather than maize stimulates system phosphorus uptake and overyielding of maize/alfalfa intercropping via changes in soil water balance and root morphology and distribution in a light chernozemic soil. *Plant Soil* 439, 145–161.
281. Szumigalski, A., et Van Acker, R., 2005. Weed suppression and crop production in annual intercrops. *Weed Science*, 53(6), 813-825.
282. Tang, C., Hinsinger, P., Drevon, J. J., & Jaillard, B., 2001. Phosphorus deficiency impairs early nodule functioning and enhances proton release in roots of *Medicago truncatula* L. *Annals of Botany*, 88(1), 131-138.
283. Tang, X., Bernard, L., Brauman, A., Daufresne, T., Deleporte, P., Desclaux, D., Souche, G., Placella, S.A., Hinsinger, P., 2014. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions. *Soil Biol. Biochem.* 75, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.04.001>.
284. Tate, K.R., 1984. The biological transformation of phosphorus in soils. *Plant soil*, 76: 245-256.
285. Tatiana, M., 2008. Studies on the characteristics of phosphorus efficiency of native soybean (*Glycine max* L.) germplasm: Differences in characteristics of phosphorus efficiency of shoot and root among soybean genotypes and correlation analysis. *J Chinese Oil Crop*, 22, 48-53.
286. Thuriès, L., Pansu, M., Larré-Larrouy, M. C., & Feller, C. (2002). Biochemical composition and mineralization kinetics of organic inputs in a sandy soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(2), 239-250.
287. Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., et Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677.

288. Todd-Brown, K.E.O., Hopkins, F.M., Kivlin, S.N., Talbot, J.M., Allison, S.D., 2012. A framework for representing microbial decomposition in coupled climate models. *Bio-geochemistry* 109, 19–33. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9635-6>.
289. Triboi, E., 1988. Evolution a long terme de la fertilité phosphatée d'un sol calcaire soumis à l'influence de fumures minérales ou organiques.
290. Tribouillois, H., Dürr, C., Demilly, D., Wagner, M.-H., Justes, E., 2016. Determination of Germination Response to Temperature and Water Potential for a Wide Range of Cover Crop Species and Related Functional Groups. *PLOS ONE* 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161185>.
291. Valizadeh, G.R., Rengel, Z., Rate, A.W., 2003. Response of wheat genotypes efficient in P utilization and genotypes responsive to P fertilisation to different P banding depths and watering regimes. *Aust. J. Agric. Res.* 54, 59–65. <http://doi.org/10.1071/AR02040>.
292. Van der Heijden, M.G.A., Bardgett, R.D., van Straalen, N.M., 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecol. Lett.* 11, 296–310. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01199.x>.
293. Van Groenigen, K. J., Hastings, A., Forristal, D., Roth, B., Jones, M., & Smith, P., 2011. Soil C storage as affected by tillage and straw management: An assessment using field measurements and model predictions. *Agriculture, ecosystems & environment*, 140(1-2), 218-225.
294. Vandermeer, J., 1989. *The Ecology of Intercropping*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi:10.1017/CBO9780511623523>.
295. Vandermeer, J. H., 1992. *The ecology of intercropping*: Cambridge University Press.
296. Wahua, T.A.T., 1983. Nutrient uptake by intercropped maize and cowpeas and a concept of nutrient supplementation index (NSI). *Exp. Agric.*, 19, 263-275.
297. Wallach, D., Buis, S., Lecharpentier, P., Bourges, J., Clastre, P., Launay, M., Bergez, J.E., Guerif, M., Soudais, J., Justes, E., 2011. A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. *Environmental Modeling & Software* 26, 386-394. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.09.004>.
298. Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W., Brun, F., 2014 *working with dynamic crop models: Methods, Tools and Examples for Agriculture and Environment*. Londres, GBR : Academic Press - Elsevier, 504 p.
299. Wang, Q., Bai, W., Sun, Z., Zhang, D., Zhang, Y., Wang, R., Evers, J.B., Stomph, T-J., van der Werf, W., Feng, C., et Zhang, L., 2021. Does reduced intraspecific competition

- of the dominant species in intercrops allow for a higher population density? *Food and Energy Security*, 10(2), 285-298. <https://doi.org/10.1002/fes3.270>.
300. Wang, Z.-G., Jin, X., Bao, X.-G., Li, X.-F., Zhao, J.-H., Sun, J.-H., Christie, P., et Li, L., 2014. Intercropping enhances productivity and maintains the most soil fertility properties relative to sole cropping. *PloS one*, 9(12), 113-984.
301. Watson, C.A., Reckling, M., Preissel, S., Bachinger, J., Bergkvist, G., Kuhlman, T., Lindstrom, K., Nemecek, T., Topp, C.F.E., Vanhatalo, A., Zander, P., Murphy- Bokern, D., Stoddard, F.L., 2017. Grain legume production and use in European agricultural systems. *Adv. Agron.* 144, 235–303. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.03.003>.
302. Wehmeyer, H., de Guia, A. H., & Connor, M., 2020. Reduction of fertilizer use in South China—impacts and implications on smallholder rice farmers. *Sustainability*, 12(6), 2240.
303. Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J. F., Ferrer, A., & Peigné, J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*, 34(1), 1-20.
304. Willey, R. W., 1979. Intercropping-its importance and research needs. *Agronomy and research approaches*. No. REP-2605. CIMMYT.
305. Willey, R. W., & Rao, M. R., 1980. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops. *Experimental Agriculture*, 16(2), 117-125.
306. Wu, H., Dannenmann, M., Wolf, B., Han, X.G., Zheng, X., Butterbach-Bahl, K., 2012. Seasonality of soil microbial nitrogen turnover in continental steppe soils of Inner Mongolia. *Ecosphere* 3 (34), 1–18. <https://doi.org/10.1890/ES11-00188>.
307. Xu, X., Thornton, P.E., Post, W.M., 2013. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Glob. Ecol. Biogeogr* 22, 737–749. <https://doi.org/10.1111/geb.12029>.
308. Yang, F., Liao, D., Wu, X., Gao, R., Fan, Y., Raza, M. A., Wang, X., Yong, T., Liu, W., Liu, J., Du, J., Shu, K., et Yang, W., 2017. Effect of aboveground and belowground interactions on the intercrop yields in maize-soybean relay intercropping systems. *Field Crops Research*, 203, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.007>.
309. Yih, W. k., 1983. Weeds, Intercropping, And Mulch in the Temperate Zones and the Tropics--some Ecological Implications for Low-technology Agriculture., (Ph.D), University of Michigan.
310. YONG, T. W., Ping, C. H. E. N., Qian, D. O. N. G., Qing, D. U., Feng, Y. A. N. G., WANG, X. C., LIU, W.G., et YANG, W. Y. (2018). Optimized nitrogen application

- methods to improve nitrogen use efficiency and nodule nitrogen fixation in a maize-soybean relay intercropping system. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(3), 664-676. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61836-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61836-7).
311. Yu, Y., Stomph, T. J., Makowski, D., & van der Werf, W., 2015. Temporal niche differentiation increases the land equivalent ratio of annual intercrops: a meta-analysis. *Field Crops Research*, 184, 133-144.
312. Yu, Y., Stomph, T. J., Makowski, D., Zhang, L., & van der Werf, W., 2016. A meta-analysis of relative crop yields in cereal/legume mixtures suggests options for management. *Field Crops Research*, 198, 269-279.
313. Zaidi, A., Khan, M. S., & Amil, M. D., 2003. Interactive effect of rhizotrophic microorganisms on yield and nutrient uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L. *European journal of agronomy*, 19(1), 15-21.
314. Zaidi, A., Khan, M., Ahemad, M., & Oves, M., 2009. Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria. *Acta microbiologica et immunologica Hungarica*, 56(3), 263-284.
315. Zapata, F., 2004. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable (No. 631.8 F54f v. 13. FAO.
316. Zhang, F. S., Ma, J., & Cao, Y. P., 1997. Phosphorus deficiency enhances root exudation of low-molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by radish (*Raghanus satiuvs* L.) and rape (*Brassica napus* L.) plants. *Plant and soil*, 196(2), 261-264.
317. Zhang, G., Yang, Z., & Dong, S., 2011. Interspecific competitiveness affects the total biomass yield in an alfalfa and corn intercropping system. *Field Crops Research*, 124(1), 66-73.
318. Zhang, J., Smith, D. L., Liu, W., Chen, X., & Yang, W., 2011. Effects of shade and drought stress on soybean hormones and yield of main-stem and branch. *African Journal of Biotechnology*, 10(65), 14392-14398.
319. Zheng, Z., Parent, L. E., & MacLeod, J. A., 2003. Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformations in Gleysolic soils. *Canadian journal of soil science*, 83(4), 395-403.
320. Zongo, K. F., Hien, E., Mare, B. T., & Guebre, D., 2021. Performance de l'association mixte sorgho-niébé sur les productivités du sorgho et des sols en zone Soudano-Sahélienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(3), 987-1005.

321. Zuckerkandl, E., & Pauling, L., 1965. Evolutionary divergence and convergence in proteins. In *Evolving genes and proteins*, pp. 97-166. Academic Press.

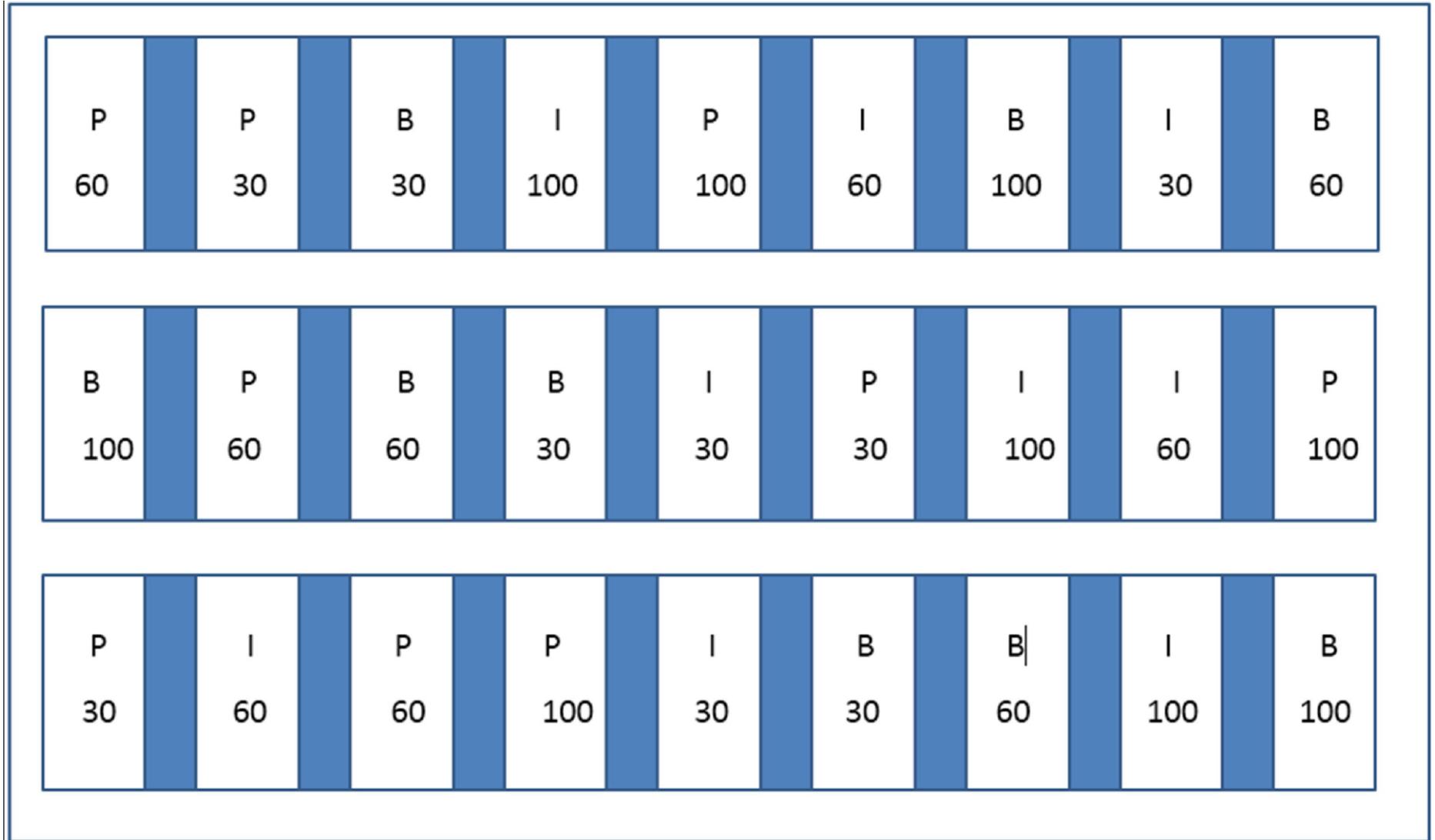


Figure 1 : Protocole expérimentale des essais d'association Blé – pois chiche



**Photo 1** : levée des cultures de l'association Blé pois chiche.



**Photo 2** : Floraison synchronisé du blé et du pois chiche.



**Photo 3** : Stade Recolte Blé-Pois chiche en association.



**Photo 4 :** Profil et échantillonnage du sol.



**Photo 5 :** Echontillonnage du végétale.



**Photo 6 :** Enracinement des cultures associé.



**Photo 7 :** Préparation des echontillons de sol pour analyses d'azote.



**Photo 8 :** Lecture des taux de phosphore par colorimetrie.



**Photo 9** : Distillateur Kjeldhal et Miniralisateur d'azote.



**Photo 10** : Lecture des humidites du sol a l'aide de Diviner 2000.

# **Publications**

## ملخص

إن تأثيرات التغيرات المناخية زادت من حدة الضغوط المناخية الطبيعية وتعرقل تنمية الفلاحة في الجزائر، ويبقى استخدام زراعة الحبوب متوقف على سقوط الأمطار على أراضي فقيرة، غير أن العوامل المقترحة (السقي الإضافي واستعمال الأسمدة الأزوتية) التي تزيد من مردود الحبوب، مكلفة، زيادة على النتائج البيئية التي تؤثر سلبا على النوعية الاقتصادية الفلاحية. وفي هذا الصدد وبفضل المبادئ البيئية وخدمات النظام البيئي، فأشراك البقوليات مع الحبوب، يسمح بتحسين استدامة النظم الفلاحية البيئية.

تهدف دراستنا إلى تقييم وتقدير نتائج الزراعات المشتركة في مجال استخدام الموارد وتخزينها، لا سيما عناصر (C وN)، على أن يستخدم منهج يجمع بين دراسة المعطيات التجريبية (عبر مؤشرات التنافسية الفلاحية والبيئية) والنمذجة (MOMOS و STICS) للمؤشرات الفلاحية والبيئية قصد جمع مراحل دورات (C وP وN).

لقد قمنا بتحقيق التقييم الأولي لمعدل التبادل لـ (C وN)، بين النباتات والأرض والكتلة الاحيائية للجراثيم والمتكفلات العقدية وتطوير ثوابت نموذج (MOMOS) بإجراء متغيرات الحالة (النبته، الأرض والمناخ)، وكذا إثبات النماذج العيارية الحالية (MOMOS-C و MOMOS-N)، على مقياس المساحة والمستثمرة والمحيط بالنسبة للأصناف المشتركة (الفاصوليا والذرة).

وعلى صعيد نظام الزراعة المشتركة، لاحظنا أن جميع التغيرات اليومية لـ (C وN) بين الأعضاء النباتية والأجسام المجهرية تختلف كثيرا بين المراحل، حيث أن جزء معتبر من N المثبت يكون مخزن تفضيلا على مستوى عقد البقولية في النظام المشترك، مساعدة على النشاط الجرثومي، وتأكدنا من قوة هذه النسخة الثابتة لـ MOMOS، قصد تقييم ودراسة الآليات التي تضبط التبادلات الشاملة لـ (C وN)، بين التكافل النباتي، والأرض والكتلة الجرثومية والجوية.

فيما يخص اشترك الزراعة الشتوية "القمح-الحمص"، ظهر إلى الواقع التقييم الأولي بمؤشرات تنافسية، شرطان يجعلان الزراعة الإضافية إيجابية: (1) إسهام استخدام الأزوت بصفة مرتفعة بقدر زيادة التنبيت التكافلي للأزوت للإسهام في تغذية زراعة الحبوب. (2) ينبغي أن تكون البقولية هي المكون الغالب في الاشتراك.

لقد أثرت التغيرات المناخية بصفة مباشرة على التنافس النوعي المشترك بين الحمص والقمح الصلب، من جهة، والأسمدة N من جهة أخرى، حيث ظهر القمح المضاف أكثر تنافس من البقولية عند نقص الأمطار واستخدام الأزوت.

إن معايرة واختيار نموذج STICS بالنسبة لزراعة الحمص في الظروف المطرية قد أنجزت بفضل تبني طريقة شاملة، حيث تم التأكد حسب الإحصائيات على تدقيق نوعي في المعايرة بالنسبة لمعظم المتغيرات المهمة، لقد تمكن هذا النموذج من جلب الحيوية الزمنية للمتغيرات التي تمت دراستها في الظروف المتباينة (نظم الزراعة، فصول النمو ونسب استخدام الأزوت).

في الأخير، تسمح طريقة المعايرة المستعملة لنموذج STICS بنقل الممارسات الزراعية الحديثة التي تقوم على تنوع الزراعات (بقوليات وحبوب) وتسيير التخصيب بفضل الأزوت

**الكلمات المفتاحية** أنظمة الزراعة، الزراعة البيئية، المرونة، النيتروجين، الماء، القمح الصلب، الذرة، الحمص، الفاصولياء الخضراء، النمذجة، MOMOS، STICS.

## Résumé

Les effets du changement climatique accentuent les contraintes agro-climatiques naturelles et pèsent sur le développement de l'agriculture algérienne. La pratique de la céréaliculture est souvent pluviale en extensif, sur des sols pauvres. Malheureusement les leviers (irrigation de complément et apports d'engrais azotés) proposés pour l'accroissement des rendements des céréales ont un coût élevé avec des impacts environnementaux certains qui pénalisent ainsi leur efficacité agro-économique. Dans ce contexte, et grâce aux principes écologiques et aux services écosystémiques qui en résultent, l'introduction d'une légumineuse dans un système d'association avec les céréales pourrait améliorer la durabilité des agro-écosystèmes.

Notre étude a pour but d'évaluer et d'estimer les performances des cultures associées en matière d'utilisation et de stockage des ressources (en particulier les éléments C et N). Une approche combinant l'analyse de données expérimentales (via les indices de compétitivité agro-écologiques) et la modélisation quantitative (modèles MOMOS et STICS) des indicateurs agro-écologiques a été appliquée pour relier les cycles C, P et N.

Nous avons effectué la première estimation des taux d'échange de C et N entre les plantes, le sol, la biomasse microbienne et les symbiotes nodulaire. Nous avons également amélioré les paramètres du modèle MOMOS par les mesures des variables d'état (plante, sol et météo) et validé les modèles calibrés actuels (MOMOS-C et MOMOS-N) à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation, et du territoire, pour les espèces associées (Haricot-Maïs).

Dans le système de culture intercalaire, nous avons constaté que tous les échanges quotidiens de C et N entre les organes végétaux et les micro-organismes varient fortement entre les stades phénologiques, une partie considérable du N fixé est préférentiellement stockée dans les nodules de la légumineuse intercalée, favorisant le fonctionnement microbien. Nous avons confirmé la robustesse de cette version paramétrée MOMOS pour évaluer et analyser les mécanismes régulant les échanges globaux de C et N entre les symbiotes végétaux, le sol, la biomasse microbienne et l'atmosphère.

Sur une association de cultures hivernale « blé dur-pois chiche » la première évaluation avec des indices de compétitivité a mis l'évidence sur deux conditions qui rendent la culture intercalaire avantageuse : (I) un apport d'azote suffisamment élevé pour maximiser la fixation symbiotique de N<sub>2</sub> et contribuer à la nutrition de la culture céréalière (II) la légumineuse doit être la composante dominante de l'association. La compétition interspécifique entre le pois chiche et le blé dur a été directement affectée par les changements de conditions climatiques de fertilisation N, le blé intercalaire était plus compétitif que la légumineuse dans des conditions de faible pluviométrie et d'application d'azote.

La calibration et la validation du modèle STICS pour la culture du pois chiche en conditions pluviales ont été réalisées, en se basant sur une méthode d'optimisation (algorithme simplex). Une grande précision de la calibration a été confirmée statistiquement pour la plupart des variables d'intérêt. Le modèle a été capable de reproduire la dynamique temporelle des variables étudiées dans des situations contrastées (systèmes de culture, saisons de croissance et taux d'application de N). Enfin, cette étude de calibration permet au modèle STICS de bien simuler des pratiques culturales innovantes basées sur la diversification des cultures (légumineuses à grains et céréales) et la gestion de la fertilisation azotée.

**Mots clés :** Systèmes de culture, cultures intercalaires, résilience, azote, eau, blé dur, maïs, pois chiche, haricot commun, modélisation, MOMOS, STICS.

## Abstract

The effects of climate change worsen natural agro-climatic constraints and limit the development of Algerian agriculture. Cereal crop cultivation is often undertaken on poor soils with extensive rain-fed practice. Unfortunately, the Means (supplemental irrigation and nitrogen fertilizers) proposed for increasing cereal yields have a high cost with environmental impacts, which thus penalize their agro-economic efficiency. In this context, with regard to ecological principles and the related ecosystem services, the introduction of a legume in an association system with cereals could improve the sustainability of agro-ecosystems.

Our study aims to assess and estimate the performance of associated crops in terms of the use and resources storage (especially C and N elements). An approach combining the analysis of experimental data (via the agro-ecological competitive indices) and quantitative modeling (MOMOS and STICS models) of agro-ecological indicators were applied to assess the C, P and N cycles.

First, we carried out the estimation of the exchange rates for C and N between plants, soil, microbial biomass and nodular symbionts. The parameters of the MOMOS model were also improved by the measurements of the state variables (plant, soil and weather) and validated the current calibrated models (MOMOS-C and MOMOS-N) at the plot, farm and territory scales, for the associated species (common bean-maize).

In the intercropping system, we found that all the daily exchanges of C and N between plant organs and microorganisms vary greatly between phenological stages, a considerable part of the fixed N is preferentially stored in the nodules of the associated legume, promoting microbial functioning. We have confirmed the robustness of this parameterized version of MOMOS to assess and analyze the mechanisms regulating global C and N exchanges between plant symbionts, soil, microbial biomass and the atmosphere.

On winter intercrop "wheat-chickpea" the first evaluation with competitive indices has demonstrated two conditions which make intercropping advantageous; (I) Sufficient supply of nitrogen to maximize symbiotic fixation of N<sub>2</sub> and contribute to the nutrition of the cereal crop; (II) with a dominance of the legume plants, interspecific competition between chickpea and durum wheat was directly affected by changes in climatic conditions or N fertilizer, the intercrop wheat was more competitive than legume under conditions of low rainfall and N application.

The calibration and validation of the STICS model for chickpea in rain-fed conditions were carried out, based on an optimization method (simplex algorithm). A high precision of the calibration was statistically confirmed for most of the variables of interest. The model was able to capture the temporal dynamics of the variables studied in contrasted situations (cropping systems, growing seasons and N application rate). Finally, this calibration work allows the STICS model to effectively simulate innovative cultivation practices based on crop diversification (grain and cereal legumes) and nitrogen fertilization management.

**Keywords:** Cropping systems, intercropping, resilience, nitrogen, water, durum wheat, chickpea, maize, common bean, modeling, MOMOS, STICS.