

FIXATION RELATIVE D'AZOTE DU SOJA ASSOCIE AU MAÏS FOURRAGE COMPARE A LA CULTURE PURE, SUIVANT L'IMPLANTATION DES PEUPELEMENTS

CHAPOT J-Y ^a, AMARGER N ^b, BLATZ A ^a

^a UMR ENSAIA Nancy Université - INRA Colmar – Agronomie et Environnement – BP 20507 – 68021 Colmar chapot@colmar.inra.fr

^b INRA Microbiologie du Sol Dijon noelle.amarger@wanadoo.fr

L'association maïs fourrage légumineuses à graines devrait permettre d'enrichir l'ensilage en protéines et une certaine économie d'engrais azotés, à condition que la fixation symbiotique d'azote et les biomasses des cultures associées soient significatives. Cette association pour l'ensilage ne s'est pas développée dans la pratique. Elle a fait l'objet d'un certain nombre d'études au Canada, aux Etats-Unis principalement, sous climats tropicaux et en Europe. En France on a pu montrer qu'il est possible d'associer au maïs fourrage du point de vue de la concordance des cycles, le soja, le haricot à rame, le lupin (Chapot, 1990). L'association avec le soja est la plus réaliste, tandis qu'avec le haricot elle est satisfaisante du point de vue de la concurrence pour la lumière, mais elle ne permet pas de localiser l'apport d'azote suffisamment loin du haricot et le coût des semences est plus élevé; l'association avec le lupin est possible en sol acide mais avec des maïs très précoces, moins productifs.

Les études de l'association maïs soja montrent que l'ensilage réalisé avec différentes proportions de soja est de bonne qualité (Yilmaz, 2009), la production de protéines/ha est augmentée; le LER (Land Equivalent Ratio) est souvent supérieur à 1, ce qui traduit une utilisation de la surface par l'association plus intensive que celle des deux cultures pures cultivées séparément; ce niveau du LER s'expliquerait en partie par une meilleure valorisation du rayonnement en début de cycle (Clement et al., 1992). Des travaux comparent les structures d'implantation (Prithiviraj et al., 2000), les densités (Marchiol et al., 1992 ; Putnam D H, 1986) des cultures associées. Les études les plus nombreuses comparent les productions dans différents contextes pédo-climatiques. En ce qui concerne la fixation d'azote, des travaux détectent par dilution isotopique ¹⁵N des transferts d'azote du soja au maïs (Martin R C, 1991). Mais il n'y a quasiment pas d'études qui comparent la fixation symbiotique pour différentes structures d'implantation des deux cultures.

En système relativement intensif, afin de ne pas réduire la production d'énergie, le maïs associé doit être conduit à la même densité qu'en culture pure. Le soja va subir une concurrence pour la lumière forte si les 2 cultures sont semées sur le même rang, plus faible dans le cas de structures alternées, lorsque un ou deux rangs de maïs sont remplacés par un ou deux rangs de soja. De nombreuses études traitent de l'interaction azote minéral et fixation symbiotique chez le soja en culture pure. Salvagiotti et al, 2008, à partir de 637 jeux de données dans des conditions très différentes, constate une très grande variabilité des résultats. Il établit à partir de ces données une relation exponentielle négative entre l'apport d'azote et la fixation. En absence d'apport d'azote la fixation varie entre 0 et 337 kg/ha et elle correspond en moyenne à 58% des prélèvements d'azote des parties aériennes; pour 100 kg/ha d'apport d'azote, la fixation est en moyenne de 130 kg/ha. Si globalement l'apport d'azote réduit la fixation, il permet cependant dans le cas de soja à forte production et pendant la phase reproductrice, une augmentation des prélèvements d'azote, mais avec des gains très variables (Thies et al., 1995), sans qu'on trouve une relation évidente. L'activité des deux processus, fixation et assimilation est à optimiser, mais actuellement on ne dispose pas de relations fonctionnelles, les résultats étant souvent contradictoires, pour expliquer l'effet sur la fixation symbiotique des variations de l'azote minéral. Selon Salvagiotti et al., 2008, c'est encore, en culture pure, une question de recherche. Il signale également qu'on ne dispose pas de relations pour expliciter l'effet au cours du temps, du sol, du climat, du génotype, des pratiques. On peut supposer que la fixation du soja associé pose des problèmes est encore plus complexes.

La fixation symbiotique dépend de nombreux facteurs principalement :

- la présence de souches efficaces ;
- la photosynthèse qui apporte aux nodosités l'énergie nécessaire à leur fonctionnement ;
- la présence d'azote minéral qui joue un rôle dépressif ;
- les conditions microclimatiques.

Pour favoriser la fixation symbiotique de l'association, le principal paramètre sur lequel il est possible d'agir est la structure d'implantation des 2 cultures, qui permet de réduire la compétition pour la lumière et de limiter la teneur en azote minéral à proximité de la légumineuse. Trois modalités d'implantation des cultures associées et deux modalités d'apport d'azote ont été comparées; elles sont plus ou moins favorables à l'éclaircissement de la légumineuse et à une localisation des apports d'azote. Les structures d'implantation retenues sont adaptées au matériel de récolte courant, ensileuse à bec cueilleur. On présente les résultats de la fixation d'azote du soja en culture pure et associée au cours du cycle, par le test de réduction de l'acétylène (Amarger et al., 1979). L'incidence de certains paramètres de la fixation est analysée : relations entre poids de plantes, poids de nodosités, fixation d'azote estimée.

Méthodes

Les traitements comparés :

- Maïs en culture pure, rangs à 75 cm. Les peuplements de maïs en culture pure et associée sont de 85000 pieds/ha.

- Soja en culture pure, rangs à 37,5 cm, 480000 pieds/ha.

- Soja en association 240000 pieds/ha :

- Rangs 15 cm N plein : un rang de soja à 15 cm d'un rang de maïs ; rangs de maïs à 75 cm ; apport d'azote en plein.

- Rangs 15 cm N localisé : un rang de soja à 15 cm d'un rang de maïs ; rangs de maïs à 75 cm ; apport d'azote localisé à 10 cm du rang de maïs, du côté opposé au rang de soja. La densité de soja sur la ligne est la même en culture pure et pour l'association en Rangs 15 cm.

- A 1/1 : rangs alternés par un ; un rang de maïs sur 2 est remplacé par un rang de soja ; les rangs de maïs sont espacés de 150 cm et les rangs de maïs et de soja de 75 cm.

- A 2/2 : rangs alternés par deux; 2 rangs de maïs sur 4 sont remplacés par deux rangs de soja ; les rangs de maïs sont espacés de 75 cm et 225 cm ; les rangs de maïs et de soja de 75 cm et les 2 rangs de soja de 75 cm.

- Deux modalités sont comparées dans le cas des structures alternées pour vérifier s'il est possible de réduire la compétition sur le rang. De simples rangs de maïs et de soja (noté A1/1 SR et A2/2 SR) respectivement à double densité sur la ligne, afin d'obtenir 85000 et 240000 pieds/ha de maïs et de soja. Les simples rangs sont comparés à des doubles rangs de maïs et de soja : le simple rang à double densité (SR) est doublé en 2 rangs à simple densité distants de 20 cm (récoltable par une ensileuse à bec cueilleur) (noté A1/1 DR et A2/2 DR). Pour les structures alternées simple rangs, l'apport d'azote au maïs est localisé à 10 cm de part et d'autre du rang de maïs, soit à 65 cm du rang de soja. Pour les associations alternées en double rangs de maïs et de soja distants de 20 cm, l'apport d'azote est localisé à 10 cm à l'extérieur des 2 rangs de maïs appariés, soit à 55 cm des rangs de soja. L'apport d'azote au maïs en culture pure et associée est de 180 kg/ha, sous forme d'ammonitrate, fractionné un tiers au semis, deux tiers au stade six feuilles du maïs. Le soja est inoculé, il ne reçoit pas d'apport d'azote en culture pure, tandis qu'en association il est plus ou moins proche des apports d'azote au maïs. Les variétés de maïs et de soja retenues, suite à des essais préliminaires, sont DEA et WEBER.

Le sol de l'essai, sur le domaine expérimental de l'INRA de Colmar, est un limon loessique calcaire profond, 1,6 m, appartenant à la classe de texture limon argileux, avec 2,1% de MO dans l'horizon supérieur. L'essai n'est pas irrigué. Désherbage avec alachlore plus linuron (1,7 et 0,5 kg/ha de matière active). Essai bloc Fisher avec 4 répétitions ; parcelles de 5,5 m de long, de 4 rangs de maïs et de soja. Le traitement statistique a été effectué par une analyse de variance et les traitements comparés par le test de Newmann et Keuls, avec le logiciel STATITCF.

Une méthode indirecte a été utilisée pour estimer la capacité fixatrice de l'azote atmosphérique par le soja. Elle est basée sur la propriété de la nitrogénase, enzyme responsable de la réduction de l'azote moléculaire, de réduire également l'acétylène en éthylène. Il a été montré que l'activité fixatrice d'azote estimée par mesure de réduction d'acétylène au cours du développement de sojas cultivés au champ, était directement corrélée à la proportion d'azote fixé par ces plantes (méthode 15N) (Amarger et al., 1979). La méthode a été utilisée par Bezdicsek et al., 1978, Semu et Hume, 1979, Muldoon et al, 1980. Afin de comparer la capacité relative à fixer l'azote des sojas seuls ou associés, nous avons suivi l'évolution de l'activité réductrice d'acétylène de racines excisées à 10 dates au cours du cycle à intervalles réguliers tous les dix jours. Les mesures ponctuelles dans le temps, ont une valeur relative. Choix de 3 plantes consécutives, représentatives des plantes moyennes du peuplement ; mesure de la réduction d'acétylène des racines et des nodosités des 3 plantes, par incubation dans un mélange de 10% d'acétylène dans l'air. L'éthylène formé a été prélevé au bout de 8 et 16 minutes. Les incubations ont été faites aux mêmes heures dans les délais les plus brefs. Les dosages ont été

effectués au Laboratoire de Microbiologie des sols de l'INRA Dijon. On a prélevé la totalité des nodosités sur 20 cm, sans qu'il soit possible de distinguer entre les nodosités actives et celles devenues inactives par vieillissement.

Résultats

- Comparaison de la MS aérienne de 3 plantes, de la MS des nodosités de 3 plantes et de l'estimation de la fixation de 3 plantes, pour les dix dates de mesures au cours du cycle (moyenne des 4 répétitions pour chaque date). L'observation des figures 1, 2 et 3 met en évidence un classement cohérent des traitements pour ces 3 paramètres. Ces paramètres sont plus élevés pour le soja en culture pure, plus faibles pour les structures en rangs à 15 cm et intermédiaires pour les associations en rangs alternés. Les fluctuations des courbes au cours du cycle sont en partie liées à la petite taille des échantillons. La comparaison statistique de la valeur moyenne des 10 mesures pour chaque traitement (Tab. 1) confirme que ce classement est significatif et elle montre pour l'association Rangs 15 cm un effet significatif du mode d'apport d'azote; l'apport d'azote en plein pénalise la MS nodosités et la fixation par 3 plantes.

Remarque - Parmi les associations en rangs alternés, les résultats de la structure A2/2 SR ne semblent pas cohérents en ce qui concerne la MS nodosités; si la MS/3pl plantes se situe logiquement dans le groupe intermédiaire des structures alternées, la MS nodosités/3plantes par contre est plus faible pendant tout le cycle que celle des autres traitements alternés; elle est supérieure mais non significativement à celle des peuplements associés Rangs 15 cm. Comme on observe des proportions de nodosités proches entre A1/1 SR et DR, on pourrait s'attendre à un comportement analogue entre A2/2 SR et DR. Nous n'avons pas d'hypothèses explicatives: s'agit-il d'un problème lié à l'inoculation? On présente cependant les résultats concernant cette structure, sauf dans le schéma d'interprétation Fig 8.

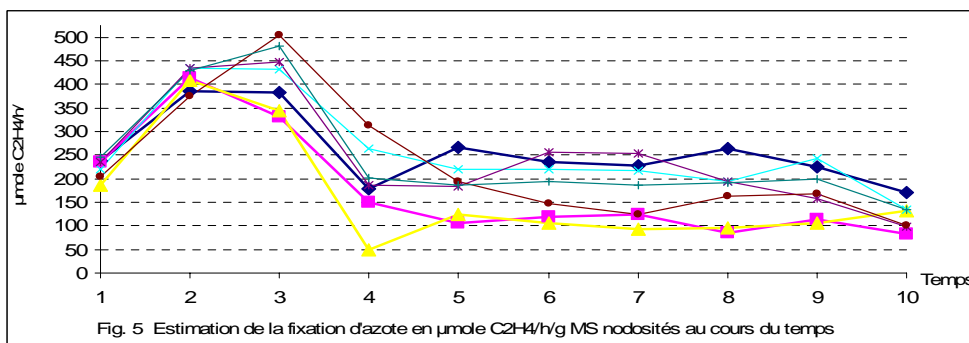
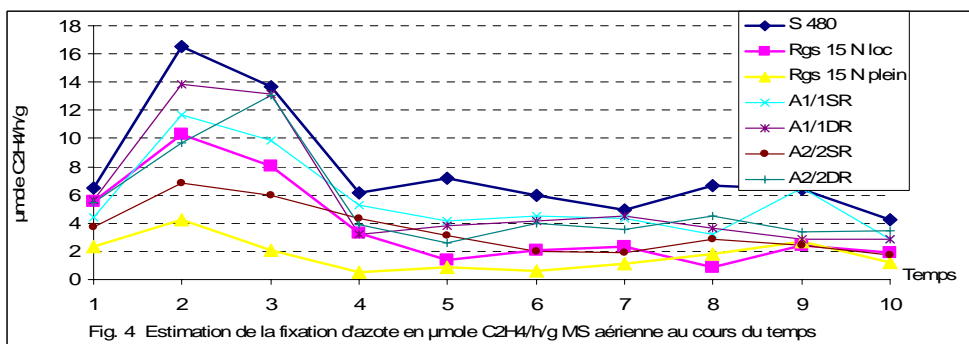
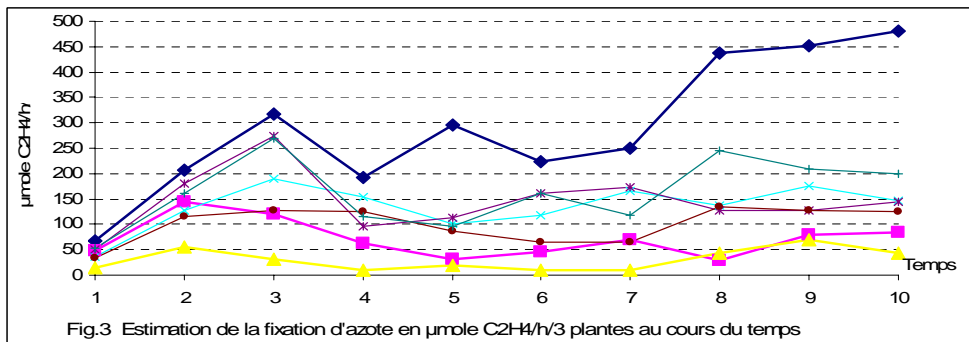
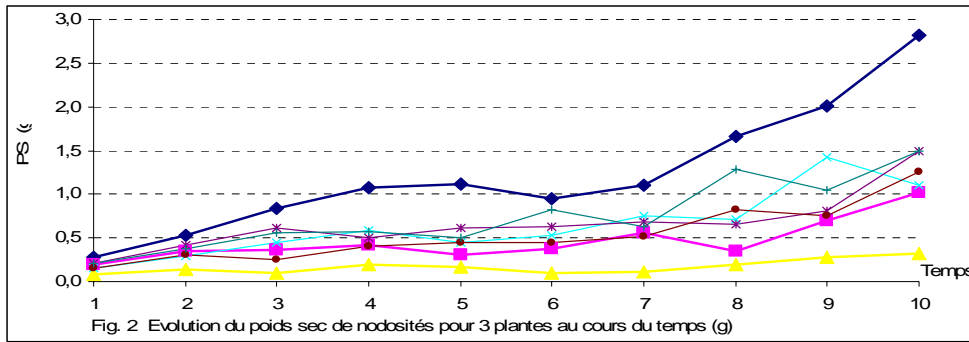
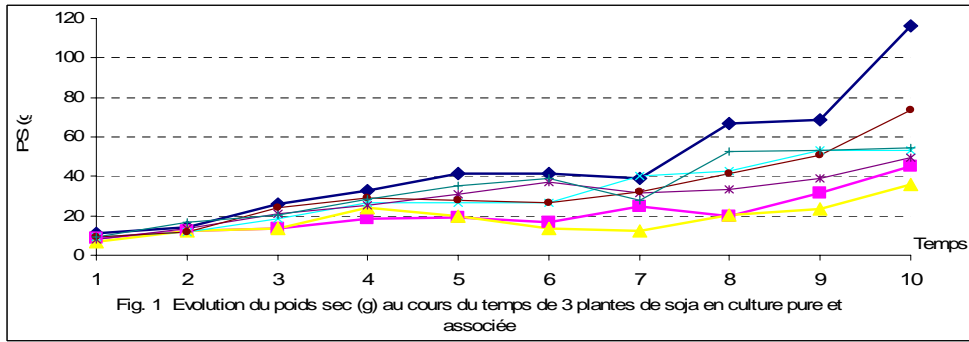
- Comparaison de l'efficacité de la fixation, exprimée par unité de MS de nodosités et par unité de MS aérienne, pour les dix dates de mesures au cours du cycle (moyenne des 4 répétitions pour chaque date). L'observation de la figure 4 et l'analyse statistique (Tab. 1) de la fixation par unité de MS aérienne confirme le classement des traitements obtenu pour les paramètres précédents. La fixation par unité de MS de nodosités permet de distinguer 2 groupes statistiquement différents (Fig. 5 et Tab. 1), d'une part les associations Rangs 15 cm et d'autre part les structures alternées et le soja en culture pure. Les différences ne sont pas significatives entre les 2 associations Rangs 15 cm, ni entre les structures alternées et la culture pure de soja.

- Le tableau 2 indique en valeurs relatives pour le soja en culture associée et en culture pure (%), les paramètres de la fixation d'azote pour 3 plantes, ainsi que l'estimation de la fixation relative par hectare. Pour 3 plantes et dans les conditions de l'expérience, la fixation est estimée à 10, 25, 45-55 % respectivement pour les traitements Rangs 15 cm N en plein, Rangs 15 cm N localisé et Rangs alternés. Calculé par hectare, avec un peuplement réduit de moitié en association, l'estimation de la fixation des trois traitements précédents est de l'ordre de 5, 12, 25 % de celle du soja en culture pure.

- Les résultats montrent pour chacune des dix dates de mesures qu'on a des corrélations hautement significatives entre la MS de 3 plantes et la MS correspondante de nodosités et entre la MS sèche de nodosités et l'estimation de la fixation en $\mu\text{mole C}_2\text{H}_4/\text{h}/3$ plantes (Fig. 6 et 7). A titre indicatif les coefficients de détermination calculés à partir des 7 traitements et pour chaque traitement à partir de la moyenne des 10 dates de mesures, sont de $R^2 = 0,89$ entre MS Plantes et MS nodosités et de $R^2 = 0,98$ entre MS nodosités et estimation de la fixation.

- Le pourcentage de nodosités moyen pour les dix dates par rapport à la MS aérienne (Tab. 2) est pour le soja seul de 2,7 %, pour les 3 structures alternées (sans A2/2 SR) et l'association en Rangs à 15 cm N localisé de 2,20 % et pour le traitement en Rangs à 15 cm N en plein de 0,9%.

- La fixation par g de nodosités (Fig. 5) plus forte en début de cycle, se stabilise ensuite à un niveau inférieur. L'évolution au cours de cette seconde phase pourrait être liée au fait qu'il y a moins de substrats carbonés disponibles pour la fixation lors de la formation des gousses et à un renouvellement régulier entre nodosités actives et inactives.



Tab. 1 Comparaison de moyennes entre soja en culture pure et associée

	MS 3 plantes (g)		MS nodosités 3 plantes (g)		µmole C2H4/h/3 plantes	
Rgs 15 N plein	18,2	NS	Rgs 15 N plein	0,17	Rgs 15 N plein	30,6
Rgs 15 N loc	21,1		Rgs 15 N loc	0,46	Rgs 15 N loc	71,4
A1/1 DR	28,9	**	A2/2 SR	0,54	A2/2 SR	100,5
A1/1 SR	30,9		A1/1 SR	0,65	A1/1 SR	135
A2/2 SR	32,7	NS	A1/1 DR	0,66	A1/1 DR	144,5
A2/2 DR	33,8		A2/2 DR	0,75	A2/2 DR	162,5
Soja c pure	45,7	**	Soja c pure	1,24	Soja c pure	292,4
	µmole C2H4/h/g nodosités		µmole C2H4/h/g MS aérienne			
Rgs 15 N plein	164	NS	Rgs 15 N plein	1,73		
Rgs 15 N loc	176		Rgs 15 N loc	3,8		
A2/2 SR	229	*	A2/2 SR	3,49	*	
A1/1 DR	245	NS	A2/2 DR	5,37	**	
A2/2 DR	245		A1/1 SR	5,67	NS	
A1/1 SR	258	NS	A1/1 DR	5,77	**	
Soja c pure	258		Soja c pure	7,82	**	

*, **, différences significatives au seuil 5 et 1%

Tab. 2 Valeur relative (%) des paramètres de la fixation du soja en association et proportion de nodosités

	MS 3pl	MS nodosités 3 pl	MS nodosités/MS aérienne %	µmole C2H4/h/3pl	µmole C2H4/h/g MS aérienne	µmole C2H4/h/g nodosités	pieds /hectare	µmole C2H4/h/hectare
Soja c pure	100	100	2,70	100	100	100	480000	100
Rgs 15 N plein	39,9	13,5	0,92	10,5	22,1	63,8	240000	5,3
Rgs 15 N loc	46,0	37,5	2,20	24,4	48,6	68,4	240000	12,2
A1/1 SR	67,6	52,3	2,09	46,2	72,4	100,0	240000	23,1
A1/1 DR	63,1	53,6	2,30	49,4	73,7	95,0	240000	24,7
A2/2 DR	73,9	60,7	2,22	55,6	68,6	95,1	240000	27,8
A2/2 SR	71,4	43,5	1,64	34,4	44,6	88,9	240000	17,2

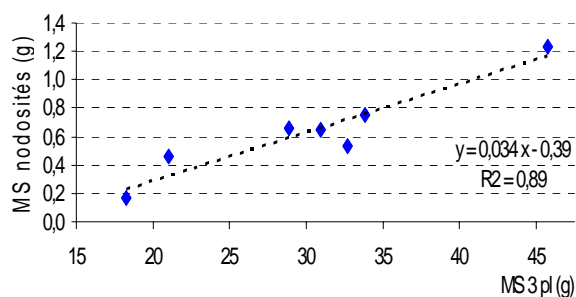


Fig. 6 MS nodosités 3 plantes (g) = f (MS aérienne 3 plantes)

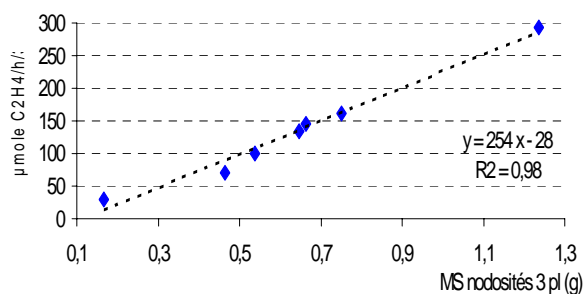


Fig. 7 Estimation de la fixation 3 plantes (µmole C2H4/h/3pl) = f (MS nodosités 3 plantes)

- Les productions de MS/ha du maïs et du soja en culture pure et associée sont présentées dans le tableau 3. Pour les structures Rangs 15 cm, la production de MS du maïs est comparable à celle de la culture pure et la production de MS du soja est faible, significativement inférieure à celle des

associations alternées. La production de MS des maïs A1/1 est respectivement significativement inférieure à celle des rangs à 15 cm et significativement supérieure à celle des A2/2.

Tab. 3 Production de MS (T/ha) en culture pure et associée

Maïs			Soja		
Rgs 15 N plein	18,6		Soja c pure	9,9	
Maïs c pure	18,5	NS	Rgs 15 N plein	1,1	NS
Rgs 15 N loc	18,0	*	Rgs 15 N loc	1,3	**
A1/1 DR	17,0	NS	A1/1 SR	2,1	
A1/1 SR	16,8	*	A1/1 DR	2,2	NS
A2/2 SR	15,3	NS	A2/2 SR	2,3	
A2/2 DR	14,4	NS	A2/2 DR	2,5	

*, **, différences significatives au seuil 5 et 1%

- Les pourcentages de verse à la récolte du maïs en culture pure et associée sont indiqués dans le Tab. 4.

Tab. 4 Pourcentage de verse du maïs

	verse %		verse %
Maïs c pure	0	A1/1 SR	10
Rgs 15 N plei	3	A1/1 DR	0
Rgs 15 N loc	1	A2/2 SR	16
		A2/2 DR	0

- Les exportations d'azote sont de 210 kg/ha pour le maïs en culture pure et en moyenne de 240 kg/ha pour les associations.

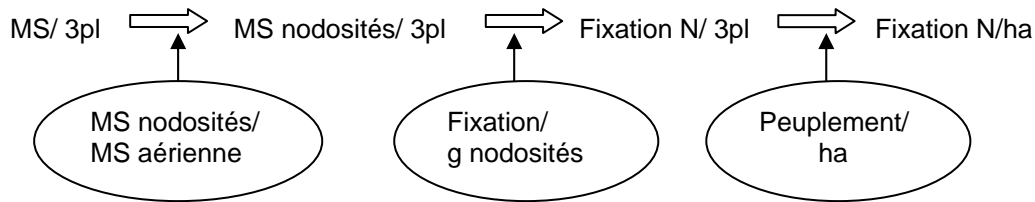
- On a également comparé dans cet essai pour estimer l'effet de la concurrence, les productions de MS/ha des traitements maïs en culture pure respectivement conduits, en rangs à 75 et 150 cm, en simples et double rangs et à 85000 et 105000 pieds/ha, aux productions de maïs associé en A1/1 SR et DR (Tab. 5).

Tab. 5 Production de MS des maïs (Tonnes/ha) en cultures pures et associées, en fonction de la densité, de l'interrang, de simples et doubles rangs de maïs

Maïs 85000 pieds/ha	Rangs 75 cm	18,5	
Maïs 85000	Rangs 150 cm	17,3	NS
Maïs 105000	Rangs 75 cm	20,1	
Maïs 105000	Rangs 150 cm	18,0	NS
(densités confondues)			
Maïs 85000 et 105000	Rangs 150 cm SR	17,6	
Maïs 85000 et 105000	Rangs 150 cm DR	17,7	NS
Maïs + Soja			
Maïs A1/1 SR	Rangs 150 cm SR	16,8	
Maïs A1/1 DR	Rangs 150 cm DR	17,0	NS

Discussion

Les corrélations fortes entre MS plantes et MS nodosités et entre MS nodosités et estimation de la fixation ($\mu\text{mole C}_2\text{H}_4/\text{h}/3 \text{ pl}$), permettent d'écrire le schéma fonctionnel et la relation fonctionnelle suivante :



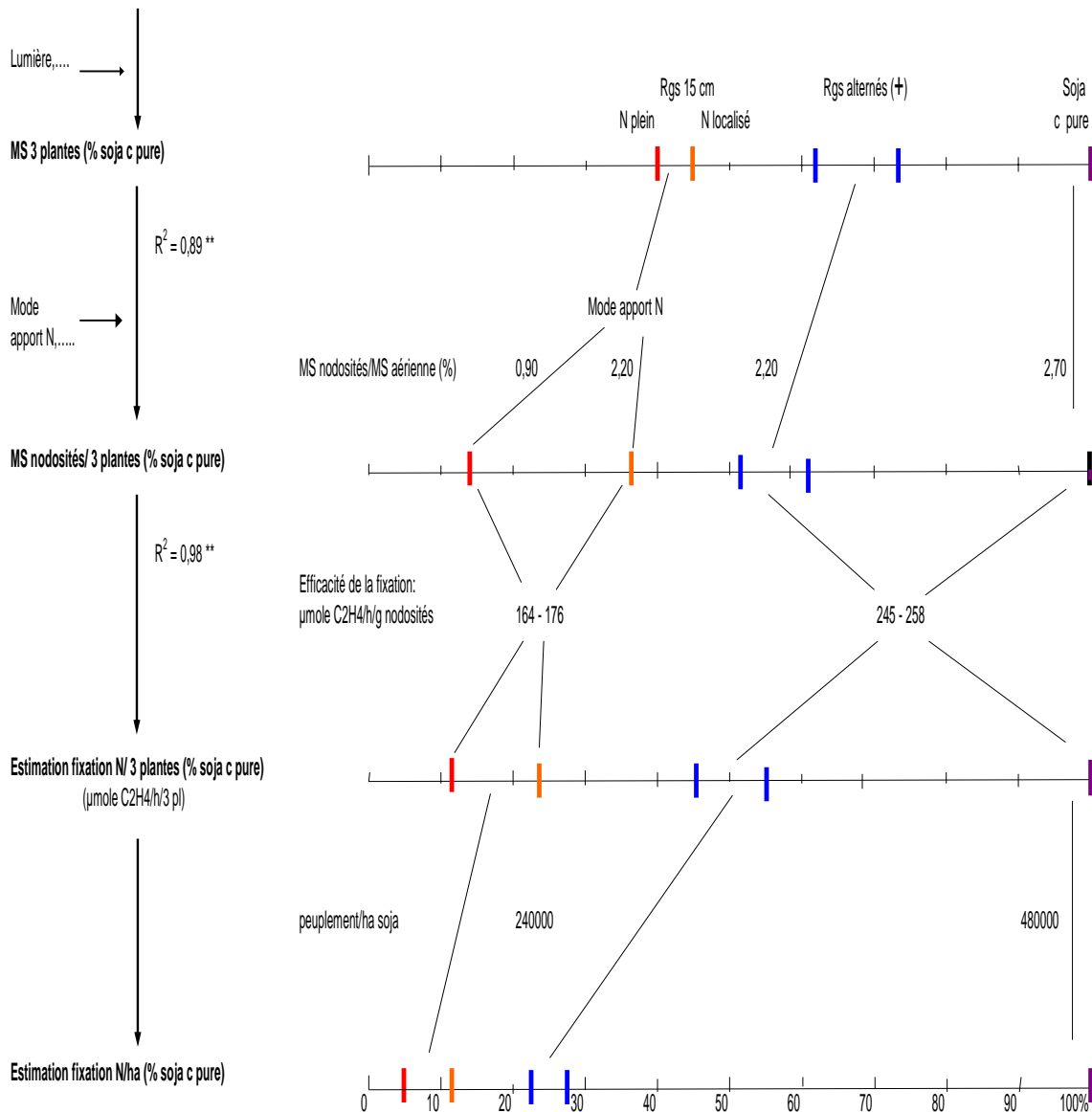
Estimation de la fixation relative $N/\text{ha} = f [(MS \text{ plante}) * (MS \text{ nodosités}/g \text{ MS aérienne}) * (Fixation/g \text{ nodosités})] * \text{Peuplement}/\text{ha}$

On a schématisé sur la figure 8 ces relations et les valeurs des variables et paramètres mesurées pour le soja en culture pure et associée. Les valeurs présentées correspondent à la moyenne des dix mesures effectuées au cours du cycle. Les valeurs des paramètres sont fonction des densités des peuplements de maïs et de soja retenues dans l'expérience ; aussi pour une même densité de maïs, un peuplement de soja associé plus faible rapprocherait le poids des plantes du soja associé de celui de la culture pure et augmenterait la MS nodosités et la fixation par plantes. Ce schéma a une valeur plus générale ; il permet une analyse des relations entre les variables et les paramètres. Quelles orientations tirer des choix effectués concernant les structures d'implantation des cultures associées, les densités, de maïs et de soja ?

L'association en Rangs à 15 cm ne pénalise pas la production de maïs associé par rapport au maïs en culture pure, mais la production de MS du soja est faible, inférieure d'un tiers à celle du soja en cultures alternées. Le mode d'apport de l'azote n'a pas d'effet significatif sur les productions du maïs ou du soja associés. Par contre il a une incidence forte sur la proportion de nodosités/MS aérienne qui est fortement réduite lorsque l'azote est apporté en plein, tandis que ce pourcentage se situe au même niveau que celui des structures alternées lorsque l'azote est localisé (2,2%). La localisation de l'apport d'azote à 10 cm du rang de maïs, du côté opposé au rang de soja, semble efficace afin de ne pas pénaliser la proportion de nodosités. L'incidence sur la proportion de nodosités, de la mise en association en Rangs 15 cm N localisé ou en rangs alternés, est de l'ordre de moins 20% de celle du soja en culture pure ($2,2/2,7 = 0,82$). Cette réduction s'explique pour partie par une diminution du poids de plante de soja en association, qui est en relation forte avec le poids de nodosités. Si la proportion de nodosités est comparable entre association en Rangs à 15 cm N localisé et structures alternées, l'efficacité de la fixation/g de nodosités est par contre significativement plus faible, d'environ un tiers, pour les 2 structures en Rangs à 15 cm. On ne peut pas savoir, s'il s'agit de nodosités intrinsèquement moins efficaces ou s'il y a davantage de nodosités inactives ; cependant du fait qu'il existe une corrélation forte entre MS nodosités et fixation d'azote, on peut supposer que sur tous les traitements la proportion de nodosités actives et inactives est comparable. La bibliographie montre que c'est la présence de nitrates dans la proximité immédiate des nodosités qui limite la fixation (Arrese-Igor et al., 1997 ; Streeter, 1985) ce qui correspond au cas de la structure Rangs 15 cm N en plein. On peut avancer l'hypothèse d'une efficacité de la fixation réduite en Rangs 15 cm sur les 2 traitements, principalement du fait d'une réduction supérieure de la photosynthèse, entraînant une concurrence accrue entre la fabrication de biomasse et l'énergie disponible pour la fixation. La fixation d'azote est réduite en Rangs 15 cm, principalement par le mode d'apport de l'azote (effet sur la proportion de nodosités dans le cas de Rangs 15 cm N en plein) et par limitation de la photosynthèse (effet sur l'efficacité de la fixation/g nodosités pour les 2 structures). La fixation/3pl du soja associé en Rangs 15 cm N en plein et N localisé est de 11 et 25% de celle de la culture pure et si on exprime la fixation par hectare, qui correspond à l'indice utile in fine, elle est de 5 et 12% de celle de la culture pure, ce qui est très faible.

Pour les structures alternées, par rapport au soja seul, la proportion de nodosités est réduite, mais l'efficacité de la fixation est comparable ce qui constitue un critère déterminant en faveur du choix de cette structure. En association alternée, par comparaison au soja seul, les paramètres de la fixation semblent modérément limités par l'effet d'une certaine réduction du rayonnement et de l'apport

Structure d'implantation, densité sur le rang,



(+) Rangs alternés sans A2/2 SR

(*) Les valeurs présentées correspondent à la moyenne des dix mesures effectuées au cours du cycle et à un peuplement de soja de 480000 et 240000 pieds/ha en culture pure et associée

$$\text{Estimation de la fixation relative N/ha} = f[(\text{MS plante}) * (\text{MS nodosités/MS aérienne}) * (\text{efficacité fixation/MS nodosités})] * (\text{peuplement/ha})$$

Fig. 8 Paramètres de la fixation d'azote du soja en culture pure et associée (*)

d'azote à 65 cm du rang de soja. On peut observer une augmentation de la concurrence en fin de cycle, d'après l'accroissement des différences de biomasses des plantes et des nodosités du soja (Fig. 1et 2) entre culture pure et associations alternées, ce que rapporte aussi Yu ChangBing, 2009. Le soja fixe et il assimile également une partie de l'azote apporté à 65 cm du rang. C'est ce qu'on montre dans un autre essai avec la structure A1/1 SR, recevant 4 doses d'azote localisé 0, 60, 120, 180 kg/ha. Les teneurs en azote du soja non inoculé augmentent, ce qui traduit une certaine assimilation, elles sont de 1,46, 1,49, 1,75, 1,96 % et celles du soja inoculé sont de 2,88, 2,78, 2,78, 2,86%. L'estimation de la fixation/3plantes est de l'ordre de 50% de celle du soja en culture pure, ce qui s'explique principalement par un PS de plante inférieure, qui dépend des densités de soja associé

retenues. La fixation par hectare est de l'ordre de 25% du soja en culture pure. Les structures alternées, plus favorables à la fixation, le sont aussi à la production de MS du soja, mais elles entraînent une baisse significative de production de MS du maïs. Cette diminution plus faible en A1/1 est presque compensée par le soja, tandis que la production de maïs A2/2 est significativement inférieure à A1/1, alors que la production de soja A2/2 est très faiblement augmentée. Ce résultat que nous avons déjà observé dans un essai précédent, semblerait montrer une meilleure adaptation du maïs à l'association dans le cas de la structure A1/1. Deux rangs de maïs sont espacés de 150 cm en A1/1 et de 225 et 75 cm en A2/2 ; la concurrence est elle plus forte ? la comparaison est à approfondir. Dans un essai aux USA, Ennin et al, 2002, montrent que le rayonnement photosynthétiquement actif sur le maïs A2/2 est un peu inférieur à celui du maïs A1/1. L'incidence sur la production de MS/ha du maïs et du soja, respectivement de simples rangs à double densité ou de doubles rangs à densité normale, n'est pas significative. Cependant dans le cas du maïs, la forte verse en simples rangs, conduit à retenir la structure A1/1 double rangs.

On peut apporter quelques éléments sur l'aptitude du maïs à être conduit en A1/1, soit en rangs espacés de 150 cm. Les résultats à 85000 pieds/ha montrent une baisse de production (Tab. 5) du maïs seul entre rangs à 75 cm et rangs à 150 cm de - 6,5%, entre maïs seul rangs à 75 cm et maïs associé A1/1 SR de - 9,2% et entre maïs seul rangs à 75 cm et maïs associé A1/1 DR de - 8,1%. Ces réductions modérées, entre 1,2 et 1,7 tonnes/ha, sont du même ordre de grandeur. La baisse de production du maïs en association A1/1, par rapport à la culture pure en rangs à 75 cm, s'explique principalement par l'augmentation de la concurrence au sein du peuplement de maïs. La concurrence exercée par le soja est plus limitée. Ce résultat laisse supposer qu'il doit être possible d'augmenter le peuplement de soja dans l'interrang de maïs de 150 cm. Plus généralement le maïs à grand écartement, mais en double rangs pour limiter la verse, semble supporter relativement bien l'augmentation de la concurrence ; il montre dans ces conditions une certaine adaptation à valoriser les ressources ; cet espace interrang est à livrer à la créativité. Notons qu'il n'y a pas dans la conduite de maïs en rangs à 150 cm de différence de production entre SR et DR.

Conclusions

Il ressort de cette étude, dans les conditions d'un maïs associé conduit à forte densité, que l'association en Rangs à 15 cm fournit une production de MS de soja faible et que la fixation d'azote est fortement réduite par comparaison à la culture pure. Le meilleur compromis correspond à la structure Alternée 1/1 DR avec des doubles rangs de maïs. La perte en maïs est compensée par le gain en soja, le maïs ne verse pas, la diminution de la fixation d'azote par rapport au soja en culture pure est limitée par des conditions moins défavorables qu'en Rangs 15 cm, de l'effet de l'éclaircissement et de l'apport d'azote.

L'étude des paramètres de la fixation permet d'interpréter les résultats et d'orienter les recherches. Pour la structure A1/1, l'efficacité de la fixation par gramme de nodosités est comparable à celle du soja en culture pure, ce qui est un critère déterminant pour poursuivre avec cette structure d'implantation, tandis que la proportion de nodosités par rapport à la MS aérienne est réduite de 20% par comparaison à celle de la culture pure de soja et c'est le paramètre qu'il faut chercher à améliorer.

Pour augmenter la production de MS/ha du soja associé, on peut diminuer la densité de peuplement du maïs associé et/ou augmenter celle du soja. La première voie est adaptée pour des systèmes de production moins intensifs. A titre d'exemple, on a obtenu dans un essai précédent, avec 66000 pieds/ha de maïs en culture pure et associée et 290000 pieds/ha de soja associé, 17,7 T/ha de maïs en culture pure et pour les associations A1/1 DR et Rangs 15 cm, respectivement en maïs et soja, 13,2 et 3,8 T/ha et 13,9 et 3,5 T/ha. En système plus intensif, avec un peuplement de maïs élevé, il faut d'une part chercher à augmenter la densité/ha de soja associé par rapport à celle de l'expérience et d'autre part viser à une réduction minimale du poids individuel des plantes de soja associé par rapport à celui de la culture pure, afin d'obtenir une proportion plus élevée de nodosités par rapport à la MS aérienne des plantes. Il faut pour la structure A1/1 DR chercher un arrangement du peuplement de soja associé qui réalise un compromis entre augmentation du nombre de plantes/ha par rapport à celui de l'expérience et accroissement du poids individuel des plantes. Il faudrait tester des structures A1/1 DR double rangs de maïs, en augmentant le nombre de rangs de soja dans l'interrang de maïs (autre type d'ensileuse), avec des densités de soja sur la ligne plus faibles. On pourrait dans une première étape, dans un interrang de maïs (double rangs de maïs espacés de 20 cm, soit un interrang de maïs de 130 cm) introduire 3 rangs de soja distants de 32,5 cm et comparer différentes densités de soja sur la ligne.

L'association maïs légumineuse peut assurer par rapport aux 2 cultures pures conduites séparément, un gain en MS/ha et en protéines/ha (Land Equivalent Ratio) ; cette "colocation" peut permettre de

mieux valoriser les ressources. En ce qui concerne la fixation d'azote/ha en association, les résultats obtenus permettent de préciser la nouvelle question qui est de répondre jusqu'à quel niveau on peut l'améliorer et la rapprocher de celle de la légumineuse en culture pure. C'est une question plus générale concernant les associations.

Du point de vue de la démarche mise en œuvre, on peut considérer qu'elle est validée par les résultats de cette expérience, qui ont permis de hiérarchiser la fixation du soja associé selon les structures d'implantation comparées. Les paramètres mesurés sont fortement corrélés à la fixation, ils sont donc pertinents et peuvent être retenus dans les études suivantes. L'analyse de l'incidence de ces paramètres permet d'orienter la recherche; elle montre que le poids d'une plante de soja associé doit tendre vers celui de la culture pure afin de pénaliser au minimum la proportion de nodosités qui est fortement corrélée à la fixation. Les méthodes à l'acétylène et le fractionnement isotopique¹⁵N pour quantifier, peuvent utilement être utilisées en complémentarité.

Bibliographie

- Amarger N, Mariotti A, Mariotti F, Durr J C, Bourguignon C, Lagacherie B, 1979. Estimate of symbiotically fixed nitrogen in field grown soybeans using variations in ¹⁵N abundance. *Plant and Soil* 52, 269-280.
- Arrese-Igor C, Minchin F R, Gordon A J, Nath A K, 1997. Possible causes of the physiological decline in soybean nitrogen fixation in the presence of nitrate. *J. Experimental Botany* 48, 905-913.
- Bezdicsek D F, Evans D W, Abede B, Witters R E , 1978. Evaluation of peat and granular inoculum for soybean yield and N fixation under irrigation. *Agronomy Journal* 70, 865-868.
- Chapot J Y, 1990. Dans le nord-est de la France, associations maïs fourrage-légumineuses à graines: compatibilité de la longueur des cycles. *Fourrages* 123, 255-271.
- Clement A, Chalifour F P, Bharati M P, et al. 1992. Nitrogen and light partitioning in a maize soybean intercropping system under a humid subtropical climate. *Canadian J. of Plant Science* 72, 69-82.
- Ennin S A, Clegg M D, Francis C A , 2002. Resource utilisation in soybean/maize intercrops. *African Crop Science Journal* 10, 251-261.
- Marchiol L, Miceli F, Pinosa M et al., 1992. Intercropping of soybean and maize for silage in northern Italy: effect of nitrogen level and plant density on growth, yield and protein content. *European Journal of Agronomy* 1, 207-211.
- Martin R C, Voldeng H D, Smith D L, 1991. Nitrogen transfer from nodulating soybean to maize or to nonnodulating soybean in intercrops. *Plant and Soil* 132, 53-63
- Muldoon J F, Hume D J, Beversdorf W D, 1980. Effects of seed- and soil applied- *Rhizobium japonicum* inoculants on soybeans in Ontario. *Canadian J. Plant Science* 60, 399-409.
- Prithiviraj B, Carrthers K, Fe Q, et al. 2000. Intercropping of corn with soybean and lupin for silage: effect of seeding date on yield and quality. *J. of Agronomy and Crop Science* 185, 129-136.
- Putnam D H, Hubert S J, Vargas A, 1986. Intercropped corn soybean density studies. II Yield composition and protein. *Experimental Agriculture* 22, 373-381.
- Salviagiotti F, Cassman K G, Specht J E, Walters D T, Weiss A, Dobermann A , 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research* 108, 1-13.
- Semu E, Hume D J, 1979. Effects of inoculation and fertilizer N levels on N₂ fixation and yields of soybeans in Ontario. *Canadian J. Plant Science* 59, 1129-1137.
- Streeter J G, 1985. Nitrate inhibition of legume nodule growth and activity. II. Short term studies with high nitrate supply. *Plant Physiology* 77, 325-328.
- Thies J E, Singleton P W, Bohlool B B , 1995. Phenology, growth, and yield of field-grown soybean and bush bean as a function of varying modes of N nutrition. *Soil Biology and Biochemistry* 27, 575-583.
- Yilmaz A, Altinok S, Kocabas Z, 2009. An investigation on quality parameters of the silages made by corn and soybean grown in different seeding rates. *J of Animal and Veterinary Advances* 8, 1856-1859.
- Yu ChangBing, Sun JianHao, Li Long, 2009. Effect of interspecific interaction on crop growth and nutrition accumulation. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 15, 1-8.