

POTENTIALITÉS FOURRAGÈRES DU SOJA
RÉCOLTÉ EN VERT - ÉVOLUTION DES
COMPOSITIONS MORPHOLOGIQUE
ET CHIMIQUE APRÈS FLORAISON

LES TOURTEAUX DE SOJA DESTINÉS À COMPENSER LA FAIBLE VALEUR AZOTÉE DU MAÏS-FOURRAGE SONT POUR L'ESSENTIEL IMPORTÉS. DIVERSES INTERROGATIONS surgissent à l'égard de l'autonomie et de la dépendance de notre élevage laitier vis-à-vis des pays producteurs de soja et justifient un intérêt nouveau pour la culture des plantes riches en protéines. En France, parmi les associations graminées-légumineuses qui offrent la possibilité d'établir des rations mieux équilibrées, plus économiques, et qui sont faciles à conserver par ensilage, l'association maïs-soja est d'introduction récente (MARTY et al., 1978 ; RAKOTONDRAZAFY, 1980 ; MARTY et EYCHENNE, 1980). Elle présente pourtant un intérêt particulier dans certaines régions, et notamment dans le Sud-Ouest de la France (MONCOULON et AFFANE, 1983).

C. Pakdeerakorn,
Bouillier-Oudot,
Moncoulon et
Bozzolo

Un des avantages de cette association fourragère réside dans la bonne complémentarité qui existe entre le soja (*Glycine max.* (L.) MERRILL) et

le maïs (BLANCHET et CHONE, 1979), toujours recherché en raison de sa forte productivité. Cependant, le rendement de l'association maïs-soja est, dans la quasi-totalité des essais réalisés à ce jour, inférieur à celui du maïs-fourrage. Dans de telles conditions, le soja apparaît comme le facteur limitant de la productivité du mélange. Il peut paraître légitime d'attribuer de tels résultats à la mauvaise adaptation des variétés de soja utilisées pour une récolte en plante entière. En effet, dans tous les essais, les sojas cultivés en association appartiennent à des groupes précoces, convenant mieux à la production des graines qu'à celle des fourrages. Leur développement végétatif est limité et ne peut, à la récolte, compenser l'effet de concurrence en culture qui pénalise sensiblement le maïs. Par ailleurs, la volonté de faire coïncider au mieux les stades optimums de récolte des deux composantes de l'association limite le choix de la variété de maïs à des groupes trop précoces pour prétendre à des productions importantes (MONCOULON et AFFANE, 1983).

Il apparaît ainsi que, dans ce type d'association, l'emploi de variétés plus tardives pourrait rendre l'association plus performante ; cependant, peu de travaux ont été consacrés aux qualités fourragères du soja « plante entière » (ANDRIEU et al., 1982) : le comportement des variétés tardives est mal connu et le stade optimal de récolte reste très imprécis.

L'objectif de cette expérimentation est de comparer les comportements en culture pure de quatre variétés de soja, appartenant à des groupes de précocité compris entre les groupes 3 et 7 dans l'échelle de précocité américaine. La durée du cycle végétatif de ces variétés, forcément liée aux conditions de photopériode et de température de la zone de culture, reste imprécise. A titre indicatif, en France, le cycle végétatif d'une variété du groupe 0 dure 100 jours. Celui d'une variété du groupe 3 est de l'ordre de 150 jours. Les variétés tardives utilisées (groupes 6 et 7) ont un cycle largement supérieur à 150 jours et ne peuvent donc parvenir à maturité sous nos conditions climatiques.

Les suivis de la croissance, de la composition morphologique et de la composition chimique de ces quatre variétés nous ont permis de préciser leurs potentialités fourragères et leurs stades optimums de récolte, facteurs décisifs dans le choix d'une combinaison variétale maïs-soja équilibrée.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Fourrages et techniques culturales

L'étude compare quatre variétés de soja. Trois appartiennent à des groupes tardifs : Mc Nair 600 (groupe 6), S 69.96 (groupes 6-7), Mc Nair 710 (groupe 7). La durée de leur cycle végétatif est supérieure à 150 jours. La quatrième, Williams (groupe 3), dont le cycle végétatif est de 150 jours, a déjà fait l'objet d'études en culture associée au maïs (MONCOULON et AFFANE, 1983).

Ces fourrages sont semés à la densité de 250.000 grains/ha, dans un sol d'alluvions fines (boulbènes), à la Station Expérimentale de l'École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse, le 18 mai 1983, avec un écartement entre les lignes de 75 cm, la taille de chacune des parcelles étant de 0,10 ha. La fertilisation apportée avant semis comprenait 180 kg/ha de N, 90 kg/ha de P₂O₅, et 190 kg/ha de K₂O. Le désherbage a été réalisé en post-semis, par pulvérisation d'un mélange d'alachlore et de linuron aux doses respectives de 1,5 et 0,5 kg/ha. Une irrigation par aspersion a été fournie durant les mois de juillet et août (3 × 40 mm), s'ajoutant aux 260 mm d'origine pluviale intervenus en cours de végétation.

2. Mesures expérimentales

Après 100 jours de végétation correspondant à une somme de températures locales de 1.488 °C (base 6 °C), l'évolution de la composition morphologique des quatre variétés a été contrôlée chaque semaine jusqu'au 142^e jour pour la variété Williams et jusqu'au 156^e jour pour les trois autres variétés. Parallèlement, les dates d'apparition des stades selon la classification phénologique de FEHR et al. (1977) et TEKRONY et al. (1981) étaient notées :

- R₃ (début de formation des gousses),
- R₄ (gousses à mi-développement),
- R₅ (début de remplissage des gousses),

- R₆ (fin de gonflement des grains),
- R₇ (maturité physiologique correspondant à l'apparition d'une gousse de couleur brune sur la tige principale).

Pour chaque variété, l'échantillon fut réalisé par la collecte de 10 plants prélevés au hasard à divers points de la parcelle. Les différents organes de chaque plante furent pesés et mis en étuve (105 °C pendant 24 heures).

Pour l'ensemble des variétés, les analyses chimiques ont été effectuées à cinq âges végétatifs : 100, 121, 135, 142 et 156 j après le semis. Systématiquement, trois déterminations chimiques furent réalisées pour chaque échantillon de matière sèche (M.S.) issu du cumul de chacune de ces fractions (tiges, feuilles, gousses), afin de déterminer les taux de cendres (M.M.), de matières grasses (M.G.), de matières azotées totales (M.A.T.), d'extractif non azotés (E.N.A.), de cellulose brute Weende (C.B.), exprimés en % de la M.S.

3. Exploitation des résultats

On a appliqué aux résultats de croissance pondérale une analyse de variance avec interaction lorsque les paramètres observés sont expliqués par l'influence de critères qualitatifs : effets dus aux variétés, aux périodes de mesure. Les évolutions selon la maturité sont approchées par les méthodes de régression. Les tests de signification ont été réalisés à l'aide du F de snedecor.

RÉSULTATS

1. Évolution de la composition morphologique des quatre variétés de soja

a) Accroissement de M.S. dans la plante entière

L'ensemble des trois facteurs de variation, variété, date de prélèvement et interaction, intervient significativement dans l'explication de la variation totale du poids sec (Ps). La transformation $X' = \text{Log } X$ permet de proposer un ajustement légèrement amélioré.

*Potentialités fourragère
et développement*

La date de prélèvement est la source de variation la plus importante. L'ajustement polynomial des variations de Log Ps, en fonction de la date de prélèvement et selon les variétés, n'apporte guère plus de précision que la régression linéaire.

Sur la base d'une approximation linéaire, l'évolution du poids sec est peu distincte selon les variétés, les coefficients de régression n'étant pas significativement différents. Le coefficient de régression moyen peut donc être retenu pour l'ensemble des variétés testées : $b = 0,018 \pm 0,003$ ($P < 0,05$) et correspond à une vitesse de croissance journalière des plantes comprise entre 1,01 g et 1,02 g/j.

b) Formation du rendement : participation relative des divers organes aériens à l'accumulation de M.S. dans la plante entière

La participation relative des différentes parties (F, T, G), à l'accumulation de M.S. dans la plante entière, est appréciée par leur poids sec rapporté à celui de la plante entière (Ps). L'influence conjointe des trois facteurs de variation est très significative pour tous les organes de la plante, notamment pour les feuilles et les gousses qui évoluent plus vite que les tiges.

La conjugaison de ces divers effets est abordée par l'étude des régressions polynomiales matérialisées sur la figure 1.

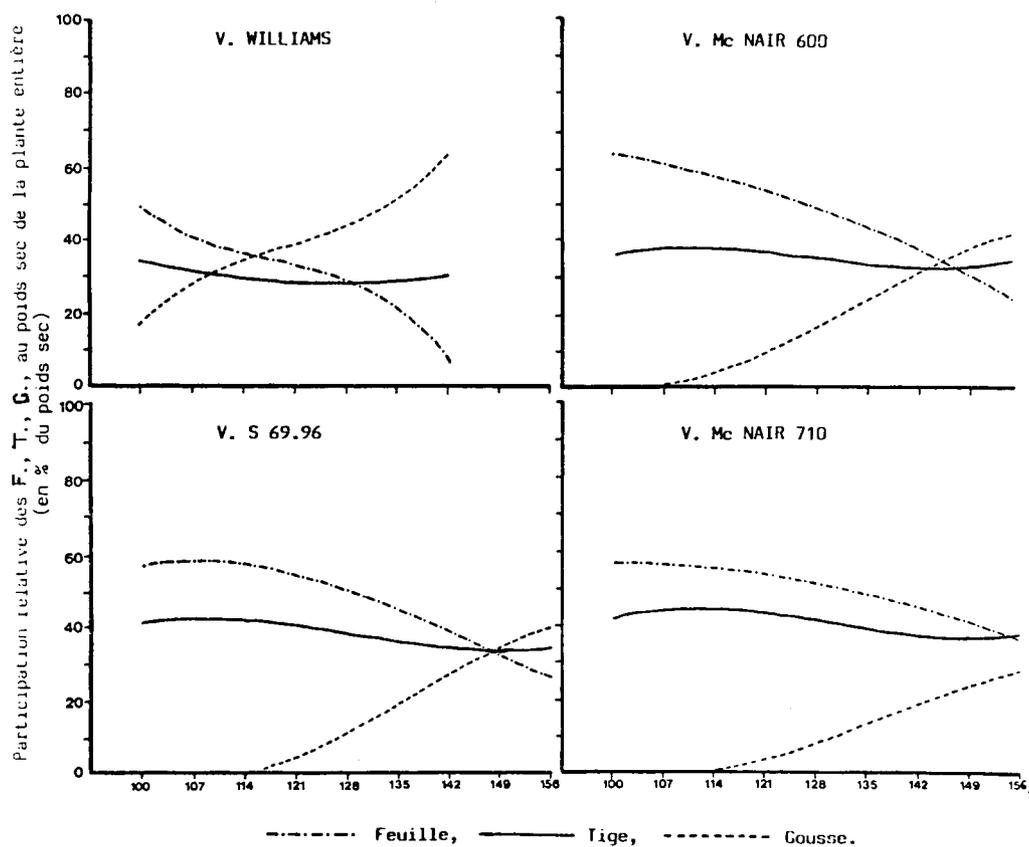
— Tiges

Nous retrouvons (figure 1) la faible évolution de la participation des tiges au Ps au cours du temps. Dans la période analysée, la part représentée par cet organe dans la plante entière est presque constante. Cependant, les proportions diffèrent de façon significative avec les variétés étudiées. En particulier, les plus tardives (Mc Nair 710 et S 69.96) totalisent 40 % de leur Ps sous forme de tige ; la variété Williams, la plus précoce, n'excède pas 30 % ; Mc Nair 600 se situe en position intermédiaire. Ceci est à relier au développement végétatif de la plante exprimé par sa hauteur.

orphologique du soja

La faible corrélation, établie entre ce critère et Ps ($r = 0,04$; $r = 0,17$; $r = 0,27$; $r = 0,37$, respectivement pour les quatre variétés et par

FIGURE 1
RÉGRESSION POLYNOMIALE DE LA CONTRIBUTION
DES ORGANES AÉRIENS AU POIDS SEC
DE LA PLANTE ENTIÈRE,
SELON L'ÂGE DEPUIS LE SEMIS (en jours)



ordre de précocité décroissante) implique que la taille des variétés étudiées est proche du développement maximum et ce, d'autant plus que la variété est précoce.

Pour les variétés Mc Nair 600 et 710, nous notons de plus que la hauteur est liée positivement avec les proportions de gousses ($r = 0,50^{xxx}$; $r = 0,32^{xxx}$), et négativement avec les proportions de feuilles ($r = -0,60^{xxx}$; $r = -0,53^{xxx}$), alors que pour les deux autres variétés, ces caractères sont indépendants ($r < 0,13$).

— Feuilles et gousses

Les résultats font apparaître des effets très importants, imputables aux variétés et à la période de prélèvement. Les courbes de régression (figure 1) montrent très clairement la tendance générale vers une décroissance de la proportion de feuilles. A l'inverse, la part représentée par les gousses augmente. L'intersection des deux courbes se réalise pratiquement au niveau de leur point d'inflexion, lesquels sont presque confondus pour les différents organes et les diverses variétés.

Ces courbes, qui apparaissent symétriquement disposées, suggèrent que les quantités de M.S. représentées par les deux organes se compensent mutuellement. L'analyse des régressions entre proportions de feuilles et de gousses confirme cette liaison négative. Pour l'ensemble des variétés, les pentes de régressions linéaires n'étant pas significativement différentes entre elles, le coefficient de régression moyen prend la valeur : $b = -0,831 \pm 0,03$ ($r = -0,95$; standard (Sd) = 3,8).

Le point d'intersection caractéristique intervient, quelles que soient les variétés, lorsque la part de chacun des organes représente environ 33 % du Ps. La variété Williams atteint ce stade à 115 jours, Mc Nair 600 à 144 jours, S 69.96 à 148 jours après le semis, alors qu'il n'est pas encore apparu au 156^e jour pour Mc Nair 710, variété la plus tardive.

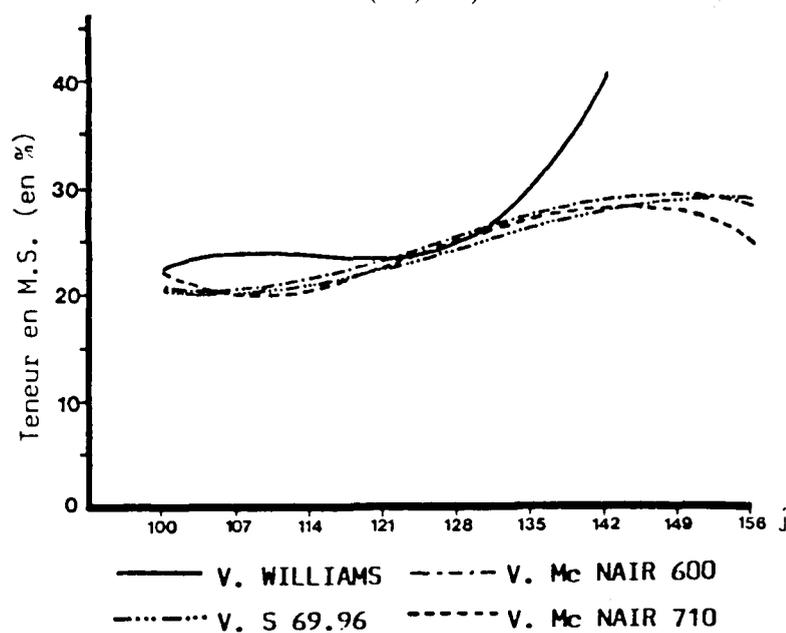
Nous retrouvons dans la confrontation des coefficients de corrélation, d'une part la liaison positive entre Ps et la part représentée par les gousses et, d'autre part, la liaison négative entre Ps et les proportions de tiges et de feuilles.

En conséquence, la participation des gousses dans le rendement en M.S./ha est prépondérante et reste en faveur de récoltes à des stades tardifs pour ce critère.

2. Évolution de la teneur en M.S. avec l'âge de la plante

La figure 2 résume les éléments de variation de la teneur en M.S. des différentes parties de la plante. Il ressort que :

FIGURE 2
RÉGRESSION POLYNOMIALE DE LA MATIÈRE SÈCHE
DE LA PLANTE ENTIÈRE SELON L'ÂGE DEPUIS LE SEMIS
 (en jours)



*Potentialités fourragère
 et développement
 morphologique du soja*

— L'évolution de la M.S. de la plante entière dépend à la fois des trois sources de variation avec un effet majeur lié à la date de prélèvement.

— Dans l'ensemble, les gousses sont les plus sensibles aux effets retenus, les feuilles les moins variables, les tiges étant situées à un stade intermédiaire. Ceci reflète des états de maturité respectifs différents.

L'étude des ajustements en régression polynomiale de la teneur en M.S. en fonction de l'âge des plantes et selon les variétés (tableau I) fait apparaître les points suivants :

• Pour la teneur en M.S. des feuilles, la liaison avec l'âge est dans l'ensemble assez faible ($r^2 < 0,67$) et notamment pour la variété la plus précoce (Williams : $r^2 = 0,23$). En effet, à partir d'un taux maximum, ce

TABLEAU I
ÉQUATIONS DE RÉGRESSION POLYNOMIALE
DÉS TENEURS EN M.S. EN FONCTION DU TEMPS
DE PRÉLÈVEMENT DEPUIS LE SEMIS (X)

| ORGANES | VARIETES | A° | X | X ² x 10 ⁻² | X ³ x 10 ⁻⁴ | X ⁴ x 10 ⁻⁶ | R ² | Sd |
|-------------------|--------------|----------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------|------|
| FEUILLES | Williams | 121.81 | - 1.7086 | 0.7327 | | | 0.23 | 2.89 |
| | Mc Nair 600 | 764.96 | -18.6646 | 15.3580 | - 4.1286 | | 0.65 | 2.35 |
| | S. 6996 | 599.11 | -14.5256 | 11.9420 | - 3.1972 | | 0.63 | 2.47 |
| | Mc Nair 710 | 1085.84 | -26.1511 | 21.1074 | - 5.5858 | | 0.67 | 2.34 |
| TIGES | Williams | 131.60 | - 1.9575 | 0.8671 | | | 0.54 | 2.30 |
| | Mc.Nair 600 | 603.89 | -14.8216 | 12.2802 | - 3.2999 | | 0.82 | 1.95 |
| | S.6996 | 408.76 | - 9.6640 | 7.8121 | - 2.0385 | | 0.76 | 2.10 |
| | Mc. Nair 710 | 779.36 | -18.7095 | 15.1288 | - 3.9962 | | 0.70 | 2.15 |
| GOUSSES | Williams | 20414.37 | -706.3990 | 912.8434 | -521.7381 | 111.3508 | 0.85 | 4.84 |
| | Mc. Nair 600 | -2275.10 | 73.7127 | -88.0433 | 46.2488 | - 8.9875 | 0.87 | 2.01 |
| | S. 6996 | -6476.24 | 205.2671 | -241.2674 | 124.9342 | - 24.0263 | 0.82 | 2.50 |
| | Mc. Nair 710 | -1122.40 | 38.1577 | -47.2865 | 25.6839 | - 5.1434 | 0.68 | 2.23 |
| PLANTE ENTIERE | Williams | -1172.25 | 31.7263 | -28.0065 | 8.2243 | | 0.80 | 3.10 |
| | Mc. Nair 600 | 446.34 | -10.6386 | 8.6667 | -2.2849 | | 0.81 | 1.76 |
| | S.6996 | 343.30 | - 7.9976 | 6.4365 | -1.6682 | | 0.75 | 2.02 |
| | Mc. Nair 710 | 756.79 | -18.0655 | 14.5494 | -3.8318 | | 0.68 | 1.99 |

critère n'évolue plus guère après le stade de floraison. De plus, la M.S. des feuilles apparaît plus sensible aux variations des conditions hygrométriques que les tiges. C'est donc un critère médiocre pour prévoir le degré de maturité de la plante.

- Dans la période suivie, la teneur en M.S. des gousses est à l'inverse étroitement liée à la date de prélèvement, en particulier pour les variétés Williams, Mc Nair 600 et S. 69.96. La qualité de la prédiction est alors aussi bonne, sinon meilleure que celle établie à partir de la M.S. de la plante entière.

Les corrélations établies entre proportions pondérales des différentes parties constitutives de la plante et la teneur en M.S. de la plante entière (P.E.) appuient les précédentes observations (tableau II) :

- liaison positive entre proportion pondérale des gousses et teneur en M.S. de la plante entière,

- liaison négative, symétrique par rapport à la précédente, entre proportion des feuilles et M.S. de la plante entière,

- liaison négative, plus faible, de la proportion de tige avec la M.S. de la plante entière.

La variabilité des coefficients de corrélation entre M.S. de la plante entière et M.S. des différents organes selon les variétés (tableau II) reflète les différences de maturité. Le soja Williams, à un stade plus avancé, traduit l'influence majoritaire des gousses et laisse apparaître une forte corrélation avec ce critère ($r = 0,96$). Mc Nair 600 et S 69.96, à un stade intermédiaire, présentent une liaison plus étroite avec la M.S. des tiges ($r = 0,97$). La variété Mc Nair 710, à un stade nettement plus végétatif, possède une meilleure liaison avec la M.S. des feuilles et des tiges ($r = 0,95$; $r = 0,96$ respectivement).

En tenant compte des remarques précédentes, la teneur en M.S. des gousses semble être le critère le plus simple pour prédire le niveau des diverses proportions pondérales de la plante après la floraison, en liaison avec la maturité. Dès lors que l'on recherche une proportion importante de gousses dans le fourrage, ce critère apparaît intéressant pour estimer égale-

TABLEAU II
PRINCIPALES VALEURS DES COEFFICIENTS
DE CORRÉLATION

| FACTEURS LIES | | VARIETES DE SOJA | | | |
|---------------|---------------|------------------|--------------|--------|--------------|
| | | Williams | Mc. Nair 600 | S.6996 | Mc. Nair 710 |
| Age végétatif | MS. F | 0.28 | 0.56 | 0.67 | 0.48 |
| | MS. T | 0.59 | 0.82 | 0.85 | 0.69 |
| | MS. G | 0.80 | 0.89 | 0.83 | 0.77 |
| | MS. P.E | 0.73 | 0.86 | 0.84 | 0.66 |
| MS. P.E | MS. F | 0.64 | 0.86 | 0.90 | 0.95 |
| | MS. T | 0.86 | 0.96 | 0.97 | 0.96 |
| | MS. G | 0.96 | 0.85 | 0.81 | 0.64 |
| | % F | - 0.82 | - 0.78 | - 0.75 | - 0.42 |
| | % T | - 0.31 | - 0.47 | - 0.71 | - 0.60 |
| | % G | 0.82 | 0.82 | 0.85 | 0.69 |
| | Poids sec P.E | 0.56 | 0.40 | 0.62 | 0.54 |
| MS. gousse | MS. T | 0.70 | 0.74 | 0.74 | 0.60 |
| | MS. F | 0.47 | 0.52 | 0.59 | 0.50 |
| | % G | 0.86 | 0.88 | 0.85 | 0.79 |
| | % T | - 0.26 | - 0.35 | - 0.54 | - 0.23 |
| | % F | - 0.89 | - 0.87 | - 0.82 | - 0.72 |
| | Poids sec P.E | 0.50 | 0.41 | 0.54 | 0.50 |
| | Log poids sec | 0.53 | 0.48 | 0.58 | 0.51 |

x : r > 0.21 ; xx r > 0.27 ; xxx r > 0.34

ment la teneur en M.S. de la plante entière. Les caractéristiques des équations de régression linéaire de la M.S. de la plante entière en fonction de la M.S. des gousses sont :

$$\text{M.S. plante entière} = b \times x \text{ teneur en M.S. des gousses} + A$$

| Variétés | b | A | r ² | Standard |
|-------------|-------|-------|----------------|----------|
| Williams | 0,532 | 10,17 | 0,91 | 2,04 |
| Mc Nair 600 | 0,619 | 10,27 | 0,72 | 2,07 |
| S 69.96 | 0,557 | 11,76 | 0,65 | 2,35 |
| Mc Nair 710 | 0,582 | 11,49 | 0,42 | 2,66 |

La qualité de la prédiction est atténuée pour les variétés les plus tardives en raison d'une maturité moins avancée, dans les limites de la période de mesure.

3. Évolution de la composition chimique des quatre variétés de soja en fonction de l'âge de végétation

L'évolution des concentrations et des participations relatives des trois types d'organes par rapport à la plante entière pour les différents constituants de la M.S. (cendres, M.O., E.N.A., M.A.T., C.B., M.G.) permet de caractériser les modifications internes de la plante en cours de maturation. Ces deux approches sont matérialisées sur la figure 3 qui illustre les caractéristiques propres à la variété Mc Nair 600. Les autres variétés montrent des évolutions similaires avec un décalage selon l'âge, en raison des différences de précocité.

a) Évolution des concentrations

— Matière organique

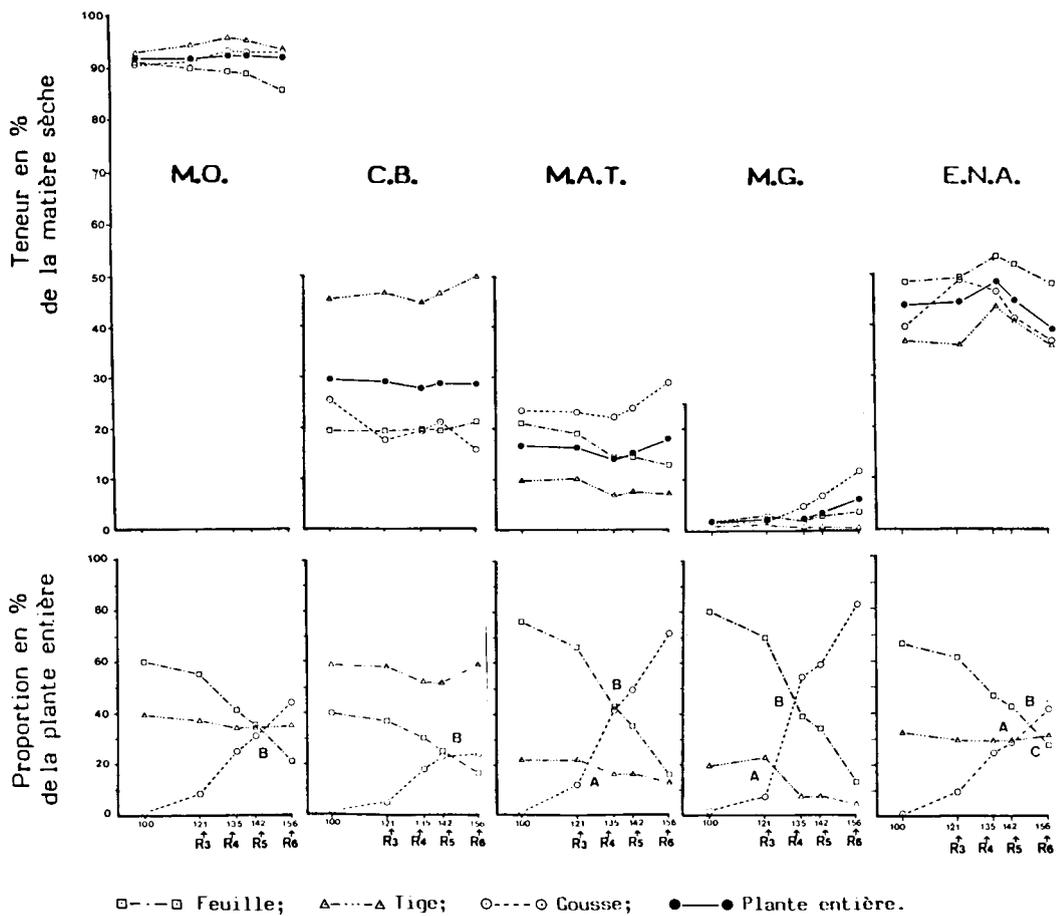
La teneur en M.O. des différentes parties constitutives de la plante ne paraît pas différer selon les variétés, bien que l'on observe un décalage d'évolution dans le temps. En revanche, avec la durée de végétation on assiste à une diminution constante de ce critère, qui, dans les feuilles évolue de 90 % à 85 % de M.S. Corrélativement, nous retrouvons l'augmentation symétrique de la concentration en M.O. dans les gousses jusqu'à 93 % de M.S.

L'organe de structure et de transit des substances nutritives qu'est la tige présente une teneur en M.O. légèrement variable en fonction du temps : une phase ascendante parallèle à celle des gousses culmine à 95 %, puis un déclin intervient à des âges décalés selon les précocités variétales.

Les concentrations de la plante entière n'évoluent que très peu, excepté pour la variété Williams, caractérisée, en période terminale, par un gain important de M.S. dans les gousses qui provoque une variation positive de 1 point de M.O.

*Potentialités fourrage
et développement
morphologique du s*

FIGURE 3
ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN M.O., C.B., M.A.T.,
M.G., E.N.A. ET DE LA PARTICIPATION RELATIVE
DES ORGANES AÉRIENS SELON L'ÂGE
 (en jours ; variété Mc Nair 600)



— *Cellulose brute*

Les teneurs en C.B. des tiges (47 % M.S.) sont beaucoup plus fortes que celles des feuilles et des gousses (20 % M.S.). Ceci est en accord avec leur rôle d'organe de maintien de la plante, plus riche en éléments de structure. La concentration en C.B. dans la plante entière est relativement stable tout au long de la période étudiée. Par contre, les teneurs dans les gousses et les feuilles varient, elles sont comparables (20 % M.S.) avant le stade R₅, début de remplissage des gousses ; elles divergent symétriquement par la suite, augmentant dans les feuilles (22 % M.S.), chutant dans les gousses (14 % M.S.).

— *Matières azotées totales*

La tendance évolutive de la teneur en M.A.T. est similaire pour les quatre variétés de soja utilisées.

Cette concentration est légèrement décroissante dans les tiges pour les trois variétés les plus tardives. Pour la variété Williams, les stades végétatifs étant plus avancés, on enregistre une baisse supérieure, notamment au stade R₆ (M.A.T. = 6 %). Dès le début de la formation des gousses (R₃), l'évolution dans les feuilles est aussi diamétralement opposée. La teneur en M.A.T. des feuilles chute en premier. A un stade tardif, les tiges manifestent une tendance semblable mais moins prononcée. Pour la variété Williams, les évolutions sont presque parallèles.

Les modifications de la teneur en M.A.T. de la plante entière sont conditionnées par la part prépondérante des gousses, comme le montre la figure 3 (début de remplissage des gousses). Lorsque le stade R₄-R₅ est atteint, la teneur en M.A.T. de la plante entière a tendance à augmenter.

— *Matières grasses*

Les faibles teneurs en matières grasses (M.G.) décelées dans les tiges et les feuilles (moins de 2 et 5 %) contrastent avec la courbe croissante des concentrations dans les gousses dont le maximum approche 15 % (Williams) en fin d'étude. Les modifications de la teneur en M.G. de la plante entière sont conditionnées par la part prépondérante des gousses, comme celle de la teneur en M.A.T.

— *Extractif non azoté*

Les valeurs de l'E.N.A., obtenues par différence des autres constituants à la M.O., possèdent le désavantage de cumuler les erreurs de détermination chimique (CRAMPTON et HARRIS, 1969). Aussi, les fluctuations sont-elles difficiles à interpréter. Toutefois, il est notable de constater une diminution des teneurs de l'E.N.A., synchrone de l'augmentation des M.G. dans les gousses.

b) Évolution des participations relatives

Pour l'ensemble des constituants chimiques précédemment analysés, lorsque la proportion de chacun des éléments constitutifs de la matière sèche des divers organes est exprimée par rapport à la quantité totale de cet élément dans la plante entière, trois points caractéristiques de recouplement sont mis en évidence : A, B et C.

Ces trois points apparaissent lorsque, pour un constituant, les participations relatives de deux organes sont de même niveau. Dans l'ordre chronologique d'apparition, ceux-ci sont représentés par :

- A : entre tiges et gousses,
- B : entre feuilles et gousses,
- C : entre tiges et feuilles.

Pour cette raison, ils sont appelés « points d'isoproportion ». A titre d'exemple, les points d'isoproportion B, pour la variété Mc Nair 600 prennent les valeurs de :

- 40 % pour la M.A.T.,
- 45 % pour les M.G.,
- 35 % pour l'E.N.A.,
- 22 % pour la C.B.

L'étude des divers points de recouplement pour l'ensemble des sojas testés montre que ces valeurs sont de même niveau. Seules varient leurs dates d'apparition, comme le montrent les résultats regroupés dans le

TABLEAU III
DATES D'APPARITION DES POINTS D'ISOPROPORTION
SELON LES CONSTITUANTS CHIMIQUES
ET LES VARIÉTÉS DE SOJA (en jours)

| Constituants chimiques | Isoproportions en P 100 de la plante entière | | | Williams | | | Mc. Nair 600 | | | S. 6996 | | | Mc. Nair 710 | | |
|------------------------|--|---------|----|----------|-----|-----|--------------|-----|------|---------|-----|------|--------------|------|------|
| | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| M.S. | - | 33 | - | 108 | 115 | 128 | 142 | 144 | 145 | - | 148 | - | - | - | - |
| M.O. | - | 32 | - | - | 118 | - | - | 144 | - | - | 148 | - | - | - | - |
| M.G. | 17 | 45 | 2 | 93 | 101 | 142 | 125 | 132 | 170* | 126 | 137 | 176* | 131 | 144 | - |
| M.A.T. | 20 | 40 | 10 | 98 | 113 | 136 | 125 | 136 | 159 | 130 | 143 | 166* | 138 | 153 | 176* |
| E.N.A. | 29 | 35 | 30 | 111 | 124 | 133 | 142 | 149 | 153 | 148 | 155 | 158 | 163* | - | - |
| C.B. | - | (21-24) | - | - | 127 | - | - | 145 | - | - | 152 | - | - | 166* | - |

A = Tige-gousse B = Feuille-gousse C = Feuille-tige * obtenu par extrapolation

tableau III. Ainsi, on peut y voir que le point B d'isoproportion de la M.A.T. est obtenu pour les variétés Williams, Mc Nair 600, S 69.96 et Mc Nair 710, respectivement à 113, 136, 143 et 153 jours de végétation.

DISCUSSION

1. Morphogénèse et rythmes de développement du soja

La reconstitution pondérale, par estimation graphique de ces divers éléments de la M.S. à partir des points fixes A, B, C dégagés précédem-

Potentialités fourragères et développement

ment sur chacune des variétés étudiées, permet de proposer une vision généralisée de leurs mouvements internes, pendant la période propice à l'utilisation fourragère située entre la floraison et la maturité physiologique. Celle-ci est suivie à partir d'une échelle phénologique exprimée en pourcentage de l'âge végétatif, par rapport à l'âge au stade R₇. Les intervalles entre stades restent une caractéristique variétale ainsi que la date d'apparition de la floraison.

Plusieurs temps de croissance se dégagent, que l'on peut analyser comme des séquences séparées du développement des cosses et des graines (cosse + graine = gousse). L'examen des courbes respectives de vitesse de croissance journalière relative des gousses et de déclin des feuilles et tiges (figure 4a), obtenues par dérivation des courbes d'accumulation de M.S., permet de repérer plus finement les chronologies évolutives :

— Le premier pic décelé pour la courbe M.A.T. est révélé en même temps que ceux de la C.B., de l'E.N.A. et de la M.G., avec un léger décalage pour cette dernière. Il s'agit du stade R₄ où la vitesse de croissance des cosses est maximum. La fin du développement est marquée par un arrêt momentané du dépôt de C.B. dans les gousses et un ralentissement de l'accumulation des autres constituants accompagnant le stade R₅.

— Au moment du développement maximum des cosses, un apport par transfert de M.A.T. et d'E.N.A. d'origine foliaire est nettement indiqué par les vitesses de décroissance respectives dans les feuilles et les tiges. L'exode d'E.N.A. depuis les feuilles intervient en fin de phase R₄ et constitue une étape d'accumulation énergétique dans les cosses préparant le développement exponentiel des graines. Un deuxième pic partiel d'exode de la M.A.T. moins élevé que le précédent accompagne l'élévation de la M.A.T. retenue dans les grains au moment du gonflement maximum.

— Après le stade R₆, un accroissement constant des M.G. signale un changement de rythme de développement et préfigure la phase d'accumulation cellulaire. Dans les feuilles, à ce même moment, un transfert important d'E.N.A. accompagne une forte chute foliaire ainsi que le dépôt de substances azotées.

Les flux enregistrés dans les tiges accompagnent, pour l'E.N.A., les vagues de croissance des cosses et des graines. Celui de la M.A.T. montre une accumulation passagère pendant la floraison, puis un faible transfert initial en début de développement des cosses, poursuivi par un exode plus important précédant le gonflement des grains. En début de maturité physiologique, une légère reprise d'accumulation pourrait signaler le passage des réserves racinaires et nodaires sénescents vers les gousses (JEPPSON et al., 1978 ; EGLI et al., 1978). Les modifications de l'azote stocké, en une forme nettement protéique à ce stade (RUBEL et al., 1972), pourraient être associées à ce transfert.

2. Les variétés tardives sont plus productives que les variétés précoces

L'étude de l'accroissement pondéral (P_s) de la plante entière de soja dans l'intervalle de 100 à 156 jours après le semis fait apparaître que la variabilité « intra-variété » est plus importante que celle constatée entre variétés. La régression du logarithme du poids sec (P_s) en fonction du temps depuis le semis (j) : $\text{Log } P_s = 0,019 j + A$ ($r_2 = 0,32$; standard = 0,471), peut être appliquée aux quatre variétés pour la phase comprise entre la floraison (R_3) et la maturité physiologique (R_7). Il ressort que l'accroissement journalier moyen, de l'ordre de 1 g/j par plante, est d'un niveau intermédiaire entre ceux rapportés par HANWAY et WEBER (1971 a) : 0,46 g/j pour des variétés précoces et ceux de ALBERDA et WITLAGE de BOER (1983) (1,37 g/j) obtenus à partir de cultures en pot. Après cette période active, la plus faible croissance de la plante est due aux modifications des grains dans les gousses et reste indépendante des variétés (HANWAY, 1976). La densité moyenne de notre essai étant de 200.000 pieds réels / ha, la production peut être estimée durant cette période à environ 200 kg M.S./ha/j.

En conséquence, le rendement final en vue d'une exploitation fourragère dépend pour l'essentiel du délai d'apparition de la maturité physiologique et des pratiques culturales plutôt que de potentialités génétiques de croissance différentes. Ceci rejoint les conclusions de HANWAY et WEBER (1971 a) et les résultats de GAY et al. (1980) obtenus à partir de

quatre variétés situées dans les groupes 3 et 5. En raison de leur cycle végétatif plus long, les variétés tardives sont donc plus productives pour ce critère.

3. En conclusion, la récolte fourragère doit se situer après le stade R₄

Sur l'ensemble de la période étudiée (figure 4), il apparaît que le déclin progressif des teneurs en cellulose brute et en extractif non azoté est compensé par l'augmentation de celles des matières azotées totales et de la matière grasse, liée au développement des graines. La perte des feuilles n'apparaît pas comme un élément négatif du rendement en matières utiles de la plante jusqu'au stade observé (R₇). Toutefois, les caractéristiques de la cellulose brute dans cette évolution sont à considérer. Si, dans les tiges, les quantités globales restent constantes et même légèrement déclinantes entre R₆ et R₇, le taux de lignification peut modifier la valeur fourragère. En outre, la raréfaction des feuilles provoque une réduction supplémentaire de la fraction fermentescible de la cellulose brute totale. Cependant, ce dernier élément n'est pas déterminant puisque cette participation est compensée par une quantité équivalente dans les graines. La qualité de la cellulose brute reste en définitive sous l'influence des tiges et des cosses.

Au vu de ces résultats, il ressort que la plage d'utilisation fourragère du soja est potentiellement très étendue. Sur la base des valeurs azotée et énergétique de la plante, en prenant en considération la participation influente des matières grasses, il apparaît que la récolte devrait se situer à un stade postérieur à R₄ quand les gousses sont formées et lorsque les grains commencent à apparaître. C'est à ce moment aussi que les transferts de matières sont les plus intenses ; en conséquence, les formes solubles associées pourraient favoriser une meilleure digestibilité. Pour une exploitation optimum, mais sous réserve d'une bonne utilisation de la cellulose brute par les animaux, les stades tardifs sont préférables car, jusqu'au stade R₇, les rendements de matière sèche croissent. Seules, des épreuves de digestibilité et d'ingestibilité « in vivo » permettront de préciser plus finement le choix de la date de récolte optimale en raison des nombreuses interférences possibles des constituants chimiques de la plante sur les temps de fermentation, sur l'utilisation digestive et la palatabilité de ces fourrages.

TABLEAU IV
ÉVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DU SOJA
SELON LES STADES DE MATURITÉ RETENUS
EN FONCTION DU DÉLAI D'APPARITION
DES POINTS D'ISOPROPORTION

a - Evolution de la composition chimique des organes aériens - (résultats exprimés en p.100 de M.S.) -

| Délai d'apparition des Points d'isoproportion et des stades de maturité, en p.100 de l'âge au stade R ₇ | Participation des divers organes au poids sec de la plante entière en p.100 | | | Composition chimique des organes aériens | | | | | | | | | | | |
|--|---|----|----|--|------|------|------|------|-----|------|------|------|--------|------|------|
| | | | | M.A.I. | | | M.G. | | | C.B. | | | E.N.A. | | |
| | | | | F | G | T | F | G | T | F | G | T | F | G | T |
| - A - (MG) 71 % ← R ₃ (72 %) | 52 | 11 | 37 | 18.9 | 23.2 | 9.2 | 2.3 | 2.5 | 0.8 | 18.8 | 19.5 | 44.6 | 49.4 | 47.2 | 39.7 |
| - A - (MAT) 74 % ← R ₄ (78 %) | 50 | 13 | 37 | 20.0 | 22.0 | 10.0 | 2.3 | 3.4 | 0.8 | 18.5 | 20.0 | 45.4 | 48.4 | 46.9 | 38.1 |
| - B - (MG) 78 % ← R ₄ (85 %) | 45 | 20 | 35 | 18.6 | 24.4 | 10.2 | 2.1 | 4.7 | 0.8 | 18.8 | 20.1 | 46.0 | 49.3 | 43.5 | 37.7 |
| - B - (MAT) 81 % ← R ₅ (92 %) | 38 | 28 | 34 | 18.0 | 25.0 | 9.0 | 2.2 | 6.9 | 0.7 | 18.8 | 18.4 | 47.0 | 49.2 | 42.9 | 36.2 |
| - B - (CB) 88 % ← R ₆ (92 %) | 33 | 34 | 33 | 16.0 | 27.0 | 8.0 | 2.4 | 9.9 | 0.6 | 20.1 | 16.3 | 48.2 | 45.8 | 39.7 | 37.6 |
| - C - (MAT) 94 % ← R ₆ (92 %) | 22 | 45 | 33 | 13.0 | 30.0 | 7.0 | 2.5 | 12.7 | 0.6 | 22.0 | 14.7 | 50.2 | 47.7 | 36.0 | 35.8 |
| - C - (MG) 100 % ← R ₇ (100 %) | 8 | 63 | 29 | 14.0 | 32.0 | 9.0 | 1.8 | 13.0 | 0.6 | 21.9 | 15.1 | 50.5 | 47.5 | 33.2 | 33.8 |

b - Evolution des apports respectifs des feuilles (F), des gousses (G) et des tiges (T), dans la composition chimique de la plante entière (P.F.).
(résultats exprimés en g pour 100 g de M.S. de plante entière)

| stade phénologique | Teneur en MS des gousses | Age post semis en p.100 de R ₇ | M.A.I. | | | | M.G. | | | | C.B. | | | | E.N.A. | | | |
|--------------------|--------------------------|---|--------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|------|-----|------|------|--------|------|------|------|
| | | | F | G | T | PE | F | G | T | PE | F | G | T | PE | F | G | T | PE |
| R ₃ | (20) | →71 | 9.8 | 2.6 | 3.4 | 15.8 | 1.2 | 0.3 | 0.3 | 1.8 | 9.8 | 2.1 | 16.5 | 28.4 | 25.7 | 5.2 | 14.7 | 45.6 |
| | | →74 | 10.0 | 2.9 | 3.7 | 16.6 | 1.2 | 0.4 | 0.3 | 1.9 | 9.3 | 2.6 | 16.8 | 28.7 | 24.2 | 6.1 | 14.1 | 44.4 |
| R ₄ | (24) | →78 | 8.4 | 4.9 | 3.6 | 16.8 | 0.9 | 0.9 | 0.3 | 2.2 | 8.5 | 4.0 | 16.1 | 28.6 | 22.2 | 8.7 | 13.2 | 44.1 |
| R ₅ | (29) | →81 | 6.8 | 7.0 | 3.6 | 17.4 | 0.8 | 1.9 | 0.2 | 2.9 | 7.1 | 5.2 | 16.0 | 28.3 | 18.7 | 12.0 | 12.3 | 43.0 |
| R ₆ | (32) | →88 | 5.3 | 9.2 | 2.6 | 17.1 | 0.8 | 3.4 | 0.2 | 4.4 | 6.6 | 5.5 | 15.9 | 28.0 | 15.1 | 13.5 | 12.4 | 41.0 |
| R ₆ | | →94 | 2.9 | 13.5 | 2.3 | 18.7 | 0.6 | 5.7 | 0.2 | 6.5 | 4.8 | 6.6 | 16.6 | 28.0 | 10.5 | 16.2 | 11.8 | 38.5 |
| R ₇ | (57) | →100 | 1.1 | 20.2 | 2.6 | 23.9 | 0.2 | 8.2 | 0.2 | 8.5 | 1.7 | 9.5 | 14.6 | 25.8 | 3.8 | 20.9 | 9.8 | 34.5 |

Une contribution équilibrée des trois organes (33 % de Ps) au poids sec de la plante entière apparaît entre les stades R₅ et R₆ et peut constituer un bon repère pour décider du moment de la récolte fourragère. Par ailleurs, entre les stades R₄ et R₆, le taux de M.S. dans les gousses est un indice étroitement associé au stade de maturité (tableau IV).

C. PAKDEE-PATRAKORN, M. BOUILLIER-LOUDOT,
R. MONCOULON et G. BOZZOLO,

*Laboratoire de Zootechnie,
École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse (Haute-Garonne).*

LISTE DE MOTS-CLÉS

Composition chimique de la plante, composition morphologique, croissance, cultivar, fourrage, France, *Glycine max.*, indice de récolte, léguminosae, modélisation, plante entière, points d'isoproportion, production fourragère, soja, Sud-Ouest.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBERDA T. et WITLAGE de BOER J.M. (1983) : « Distribution of dry matter and nitrogen between the different plant parts in intact and depodded soya bean plants after flowering », *Neth. J. Agric. Sci.*, 31, 171-179.
- ANDRIEU J., DEMARQUILLY C. et LE DU J. (1982) : « Valeur alimentaire de la plante entière de féverole, de lupin, de pois et de soja sur pied et après ensilage », *Bull. Techn. C.R.Z.V. Theix, I.N.R.A.*, 47, 19-26.
- BLANCHET R. et CHONE E. (1979) : « Le Soja », *B.T.I.*, Tome I, 211-222.
- BOON-LONG P., EGLI D.B. et LEGGETT J.E. (1983) : « Leaf N and photosynthesis during reproductive growth in soybeans », *Crop Science*, 23, 617-620.
- EGLI D.B., LEGGETT J.E. et DUNCAN W.G. (1978) : « Influence of N stress on leaf senescence and N redistribution in soybeans », *Agron. J.*, 70, 43-47.

*Potentialités fourragère
et développement*

- HANWAY J.J. et WEBER C.R. (1971 a) : « Dry matter accumulation in eight soybean (*Glycine max.* (L.) Merrill) varieties », *Agron. J.*, 63, 227-230.
- HANWAY J.J. (1976) : « Interrelated developmental and biochemical processes in the growth of soybean plants ; *World Soybean Research*, 5-15.
- JEPPSON R.G., JOHNSON R.R. et HADLEY H.H. (1978) : « Variation in mobilization of plant nitrogen to the grain in nodulating and non-nodulating soybean genotypes » ; *Crop Sci.*, 18, 1058-1062.
- MARTY J.R., HILAIRE A. et DABASSE M. (1978) : « Association maïs-soja et soja-sorgho grain en cultures fourragères », *C.R. Acad. Agric.*, 4, 331-345.
- MARTY J.R. et EYCHENNE F. (1980) : « L'association maïs-soja en culture fourragère », *Fourrages*, 81, 113-125.
- MONCOULON R. et AFFANE M. (1983) : « Valeur alimentaire d'une association maïs-soja en culture fourragère. Comparaison avec le maïs-fourrage », *Fourrages*, 93, 35-50.
- RAKOTONDRAZAFY H.O. (1980) : *Valeur alimentaire d'une association fourragère maïs-soja*, thèse de doctorat de 3^e cycle, I.N.P. TOULOUSE.
- RUBEL A., RINNE R.W. et CANVIN D.T. (1972) : « Protein, oil and fatty acid in developing soybean seeds », *Crop Science*, 12, 739-741.
- TEKRONY D.M., EGLI D.B. et HENSON G. (1981) : « A visual indicator of physiological maturity in soybean plants », *Agron. J.*, 73, 553-556.
- WITTENBACH V.A., ACKERSON R.C., GIAQUINTA R.T. et HEBERT R.R. (1980) : « Changes in photosynthesis, ribulose biophosphate carboxylase, proteolytic activity, and ultrastructure of soybean leaves during senescence », *Crop Science*, 20, 225-231.