

## Mesure du taux de couverture du sol pour estimer les principales caractéristiques d'une culture de colza avant montaison

### Measuring the rate of soil coverage to estimate the chief characteristics of a colza crop before plant emergence

Oléagineux, Corps Gras, Lipides. Volume 7, Numéro 1, 118-23, Janvier - Février 2000, Fondamental

**Auteur(s)** : Pascal DENOROY, Eric JUSTES, Ghislain GOSSE, INRA Bioclimatologie, 78850 Thiverval-Grignon, France.

**Author(s)** : Pascal DENOROY, Eric JUSTES, Ghislain GOSSE

**Résumé** : L'étude de paramètres biologiques en expérimentation au champ est fastidieuse et les mesures directes sur échantillons de plantes induisent des problèmes pratiques, en particulier pour le suivi hivernal des cultures (durée du prélèvement, conservation, rapidité de traitement...), qui limitent leur utilisation à un petit nombre d'essais. Aussi, en général, peu de mesures sont réalisées en cours de végétation et, si on dispose de résultats finals, on n'a guère d'informations quantitatives intermédiaires, en particulier sur la dynamique d'installation de la culture. Ces informations permettraient pourtant de mieux analyser les sources de variation des résultats par une analyse de différents processus de la croissance : mise en place de la surface foliaire, accumulation de la matière sèche, absorption des minéraux... Il serait donc utile de disposer de méthodes permettant d'estimer des variables d'état biologiques en cours de culture tout en minimisant le temps et les moyens nécessaires au recueil des données. Ce qui suit fait état des résultats obtenus dans une étude concernant l'intérêt d'utiliser de simples photographies verticales pour estimer diverses grandeurs caractérisant une culture de colza au stade rosette. Ces travaux font suite à des résultats publiés précédemment, d'une part, sur blé [1] et d'autre part, sur maïs et betterave [2].

**Summary** : Leaf area index (LAI) , crop dry matter (DM) and nitrogen amount in the canopy (N) are amongst the main parameters characterizing rapeseed crop before the onset of stem elongation. The correlations of these parameters with the ground cover ratio estimated from vertical-view photographs taken at a height of 1.5 m, allow a fairly good indirect estimate of LAI, and satisfactory estimates of DM and N, when practical constraints make difficult their direct measurement.

**Keywords** : ground cover ratio, leaf area index, dry matter, canopy nitrogen content.

ARTICLE

*Quelles caractéristiques étudier ?*

#### ***L'indice foliaire***

Parmi les diverses grandeurs représentatives de l'état d'une culture, l'indice foliaire (IF ou LAI, abréviation du terme anglophone : *Leaf Area Index*), défini comme la surface de feuilles vertes par unité de surface de sol, est rarement mesuré. C'est pourtant un indicateur pertinent du potentiel de

croissance [3] ou de l'état nutritionnel ou sanitaire de la culture. L'IF est souvent une variable centrale dans les modèles de simulation des cultures (CERES [4], SUCROS [5]), où il sert généralement à calculer l'interception du rayonnement efficace pour la photosynthèse et donc la production de matière sèche. Mais l'IF est difficile à mesurer directement. Il nécessite le prélèvement d'un échantillon suffisamment grand pour être représentatif car l'IF peut être fortement variable à l'échelle décimétrique, voire métrique. Il faut également mesurer des feuilles dans un laps de temps assez court car leur dégradation (dessèchement, pourriture), les rendant impropres à la planimétrie, est rapide. De plus, l'estimation des surfaces foliaires nécessite soit l'usage d'un planimètre (appareil coûteux), soit des mesures manuelles - longues et laborieuses - de dimensions linéaires. Aussi, diverses méthodes ont été proposées pour l'estimation indirecte de l'indice foliaire [6, 7]. Elles font généralement appel à une mesure de la couverture du sol (TC) ou de l'interception du rayonnement ( $*_i$ , qui est le rapport du rayonnement intercepté par le couvert - Ri - au rayonnement incident - Ro), combinée à des considérations géométriques ou à des régressions statistiques. Généralement, elles nécessitent un équipement spécifique (TC ou  $*_i$  ne se mesurent pas directement). La plupart ne sont applicables que pour des couverts suffisamment développés en hauteur. Dans le cas du colza, aucune méthode indirecte applicable aux stades précoces de la culture n'a encore été proposée, la nature rase et discontinue du couvert compliquant particulièrement le problème.

### ***La biomasse***

L'estimation de la biomasse en place (matière sèche : MS) présente un intérêt évident puisque c'est la première variable synthétisant le fonctionnement de la culture. La biomasse totale (aérienne plus racinaire) représente l'ensemble de la production végétale, mais la biomasse aérienne est souvent suffisante pour caractériser la croissance d'une culture. Les mesures de biomasse sont plus aisées que la mesure de l'IF, mais la collecte, le transport et le traitement des échantillons représentent une quantité de travail souvent limitante en expérimentation.

### ***L'azote absorbé***

L'estimation de la quantité d'azote présente dans un couvert (N) en fin d'hiver permet d'ajuster la fertilisation azotée du colza. Le feuillage étant le principal compartiment azoté de la plante avant montaison, il existe une corrélation entre l'IF et la quantité d'azote contenue dans les parties aériennes de la culture. Cette corrélation statistique s'explique d'ailleurs par des relations fonctionnelles au niveau de la plante [8]. Le Cetiom a ainsi mis au point et vulgarisé une méthode d'évaluation de la quantité d'azote absorbée à la sortie de l'hiver, fondée sur l'observation visuelle du couvert. Cette méthode reste cependant moins précise, pour des colzas bien développés, qu'une estimation fondée sur des prélèvements de biomasse aérienne [9].

Le « taux de couverture du sol par une culture » est un concept qui peut avoir plusieurs sens, surtout dans le cas de couverts discontinus. Dans cet article, nous utilisons le « taux de couverture brut » (TCb), qui désigne la part de surface de sol masquée par les feuilles et tiges en visée verticale, car cette grandeur s'avère assez simple à obtenir par traitement informatisé des photographies après numérisation.

Nous présentons dans cet article des utilisations possibles du TCb estimé par photographies verticales numérisées, dans le cas de colza au stade rosette, en vue d'établir des relations empiriques pratiques entre TCb, d'une part, et IF ou MS ou N, d'autre part.

## **Matériel et méthodes**

### *Origine des données expérimentales*

Nous avons étudié des couverts de colza de variétés Goéland et Jet Neuf, dans deux expériences au champ. Dans la première, le cv Goéland a été semé en conditions normales (le 9 septembre 1994) en Champagne crayeuse (Le Rafidin, 10 km à l'ouest de Châlons en Champagne), sur un sol de rendzine sur craie à poches de cryoturbation. Ce sol présente des graviers de craie en surface mais très peu de cailloux. À diverses dates, de l'automne au printemps, des placettes rectangulaires de 0,44 m<sup>2</sup> composées de deux lignes de semis adjacentes (inter-rang 29 cm) sur une longueur de 0,75 m étaient photographiées. Puis les plantes constituant la placette étaient prélevées et leur IF était mesuré (planimètre optique Delta-T Device). Leur matière sèche était mesurée, en distinguant parties aériennes et racines, ce qui permet d'exprimer les résultats en matière sèche aérienne verte (MSa) et matière sèche totale (MSt).

Dans la seconde expérience, les cv Goéland et Jet-Neuf ont été semés (inter-rang : 29 cm) dans le Bassin parisien (Grignon, 20 km à l'ouest de Paris) au printemps, avec trois dates de semis (23 mars, 6 avril et 4 mai 1995) et, à la dernière date, quatre écartements différents pour Goéland (14, 29, 40 et 56 cm), le sol étant un limon brun avec peu de cailloux calcaires. Les placettes photographiées, de surface équivalente à celles du Rafidin, étaient également prélevées, et la surface (planimètre optique Li-Cor) et la matière sèche des feuilles mesurées.

Les placettes ont été photographiées avec un appareil muni d'un objectif de 50 mm de focale en utilisant des pellicules diapositives standard (diverses marques, sensibilité 200 ASA). Les prises de vue ont été réalisées d'une hauteur approximative de 1,5 m, sans préparation autre que le piquetage des angles de la placette afin d'en repérer les limites. Ne nécessitant aucune préparation ni appareillage particulier, cette procédure est donc réalisable au champ par une personne seule et pratiquement par tous temps. Les photographies ont été prises depuis la levée jusqu'à la fermeture du couvert, ce qui correspond à des IF de 0 à 3 environ.

### *Traitement des images*

Les images, projetées sur écran dépoli, ont été numérisées avec une caméra CCD Sony, et les images numérisées, traitées sur une station de traitement d'image Pericolor 3000 utilisant le logiciel H70, ont été développées à l'unité de Bioclimatologie de l'INRA à Grignon. Ce logiciel permet de ne traiter qu'une partie choisie de l'image complète. Chaque image est numérisée sur 512 x 512 pixels<sup>(1)</sup> au maximum, chacun codé en 3 couleurs primaires sur 256 niveaux d'intensité. Le traitement consiste en un seuillage et tri des pixels suivant le rapport des intensités dans le rouge et le vert, puis comptage des pixels de chaque groupe [2]. Les réponses dans ces deux couleurs sont en effet différentes pour le sol (dominante rouge) et pour les parties végétales (dominante verte). La réponse des feuilles mortes (ou des parties de feuilles mortes) s'apparente à celle du sol. La part des pixels à dominante verte sur le total donne une estimation du TCb. Le logiciel est interactif ce qui permet à l'opérateur d'adapter la procédure en comparant l'image reconstituée après traitement avec l'image

originale. Toutefois, des pixels à niveau d'éclairage très faible (zones d'ombre : signal trop bas) ou très fort (dans le cas de prise de vue par temps ensoleillé : saturation) sont difficiles à classer, ce qui introduit une source d'erreur dans les résultats. Aussi, afin d'estimer la fiabilité du traitement automatique, on a traité manuellement à titre de référence certaines des images traitées au Péricolor. Dans ce cas, les images étaient projetées sur un écran en verre dépoli et on reportait sur calque transparent les silhouettes et surfaces exactes des plantes. Cette procédure permet une interprétation précise de l'image par l'opérateur, y compris pour les zones à éclairage très faible ou très fort. On planimétrait ensuite ces images des plantes sur calques pour obtenir les TCb. Mais ce traitement manuel complet nécessite 15 à 45 minutes par image, contre 3 à 5 minutes par image pour le traitement automatisé sur Péricolor.

#### *Étude des corrélations entre TCb et IF, MS ou N*

Les corrélations entre TCb et IF, MS ou N ont été étudiées avec trois modèles statistiques. Le premier découle du fait que le TCb correspond à un coefficient d'interception du rayonnement en visée verticale. On peut donc formaliser la relation entre TCb et IF suivant une loi de Beer-Lambert :  $TCb = 1 - \exp^{-kv \cdot IF}$  [équation 1] (TCb doit tendre vers 1 quand IF tend vers l'infini). Cette équation s'inverse en :  $IF = -1/kv \cdot \ln(1 - TCb)$  [équ. 2] [2], kv désignant ici le coefficient d'extinction du rayonnement (k) en visée verticale et le premier modèle statistique de régression est donc :  $IF = a \ln(1 - TCb)$  [équ. 3]. Pour la relation entre TCb et MS, on a testé également un second modèle, le modèle multiplicatif « allométrique » classique :  $MS = a \cdot TCb^b$  [équ. 4]. Enfin, compte tenu de la faible curvilinearité de la relation entre variables pour les faibles valeurs d'IF ou de MS, on a également testé le modèle linéaire simple (troisième modèle) :  $IF$  (ou  $MS$ ) =  $a \cdot TCb + b$  [équ.5], qui a été également utilisé pour la relation entre N et TCb. Les ajustements des modèles aux données ont été obtenus soit par régression linéaire, soit par régression non linéaire en utilisant la méthode de Gauss-Newton, qui minimise par itérations successives le carré moyen résiduel (CMR).

### **Résultats et discussion**

#### *Fiabilité du traitement automatisé*

On considère le traitement manuel des images comme une référence car, dans ce cas, chaque partie de l'image est interprétée par l'opérateur. La comparaison des TCb obtenus pour les mêmes images, par cette méthode (TCb manuel) et par traitement informatisé (TCb informatique), indique l'imprécision introduite par la numérisation des photos et le traitement informatique des images numérisées. La *figure 1* montre la corrélation assez étroite obtenue entre les deux estimations du TCb. La régression linéaire du TCb « informatique » suivant le TCb « manuel » ( $n = 54$ ,  $R^2 = 0,97$  ; écart type résiduel :  $ETR = 0,054$ ) présente un terme constant non différent de 0, et fait apparaître une tendance à un léger biais systématique : le TCb « informatique » est en moyenne égal à 0,96 TCb « manuel », donc légèrement sous-estimé.

La dispersion des différences entre les TCb « manuel » et « informatique » pour les mêmes placettes indique la marge de progrès restant pour la partie matérielle et logicielle de la méthode, afin de diminuer le « bruit » introduit par la numérisation et le traitement de l'image. Ainsi, en considérant la même image traitée informatiquement plusieurs fois, on constate que le coefficient de variation du résultat, attribuable au traitement des données, peut être élevé dans le cas d'images de médiocre qualité pour les faibles IF (coefficient parfois supérieur à 1 pour  $IF < 0,5$ ). D'autre part, comme pour

tout échantillonnage, on a intérêt à faire plusieurs images par situation expérimentale traitée pour estimer correctement le TCb de l'ensemble du peuplement, surtout lorsque la variabilité spatiale de répartition des plantes est importante.

La qualité de la prise de vue influe très directement sur la qualité des informations qu'on pourra tirer des images. Il apparaît à l'usage que les conditions idéales sont : un niveau de luminosité élevé, mais sans soleil direct (éviter l'apparition d'ombres ; pas de flash), un sol non caillouteux avec peu de relief en surface, pas d'adventices. Il faut évidemment qu'il n'apparaisse aucun objet parasite sur la partie considérée de l'image. Par contre, le piquetage doit utiliser des couleurs différentes de celles des plantes après numérisation (pas de vert ou de bleu si on numérise en rouge-vert).

En conclusion, la qualité de l'adéquation entre les deux estimations de TCb autorise l'utilisation du TCb « informatique » en routine.

#### *Expression de l'IF en fonction du TCb*

Compte tenu de la précision obtenue en planimétrie optique, on peut considérer que les IF sont connus sans erreur importante. Le *tableau 1* présente les résultats les plus marquants des études de régression statistique et la *figure 2* les points expérimentaux et certaines régressions. En général, le modèle en  $a \times \ln(1-TCb)$  s'avère le meilleur. Si l'on considère une régression linéaire en  $\ln(1-TC)$ , soit  $IF = a \times \ln(1-TCb) + b$ , le terme constant n'est jamais significativement différent de 0, ce qui confirme la validité du modèle retenu [équ.3]. Mais pour les faibles IF, le modèle linéaire en  $a \times TCb$  est de qualité équivalente (là encore, le terme constant de la régression linéaire n'est pas significativement différent de 0). Les valeurs, élevées pour les coefficients de détermination ( $R^2$ ) et faibles pour les écarts type résiduels (ETR), obtenues avec les TCb « manuels », montrent la pertinence du modèle retenu et la précision potentielle de l'estimation de l'IF. Le moins bon ajustement obtenu avec les mesures « informatiques » est donc essentiellement attribuable à l'imprécision dans l'estimation automatisée du TCb.

#### *Facteurs de variation*

Parmi les différents facteurs potentiels de variation de la relation entre TCb et IF, les effets du type de sol, de la zone climatique, du cultivar, de la densité de semis, du traitement azoté ont été examinés (*figure 3*). Trop peu de données expérimentales sont disponibles pour chaque facteur pour des conclusions statistiquement étayées, mais il n'est pas apparu de facteur explicatif patent de la variabilité rencontrée, comme on l'a également constaté sur maïs et betterave [2]. Par contre, les réticences exprimées par des auteurs [2] quant à l'utilisation de la relation TCb-IF sur des sols crayeux clairs - comme ceux de notre expérimentation de Châlons - s'avèrent non fondées ; elles découlaient du test d'un fond artificiel en papier [2] dont la réflectance (95 %) est en réalité très supérieure à l'albédo (15-30 %) d'un sol crayeux [10]. L'absence d'« effet-sol » reste cependant à confirmer quant au taux de cailloux, la réflexion sur les cailloux se confondant parfois avec celle des pétioles, ou pouvant saturer des pixels qui deviennent alors inclassables. Il n'est pas apparu de différence marquée entre les deux variétés de colza considérées (Goéland et Jet-Neuf). Un test systématique devrait être fait avec des variétés de ports extrêmes pour confirmer ce résultat. Il semble d'ailleurs que les conditions climatiques dans la période précédant les observations aient également un effet sur le port des feuilles : dans les semis de printemps, le port foliaire tendait à être plus érigé. La densité de semis (qui variait approximativement entre 40 et 100 plantes/m<sup>2</sup>) ne joue pas un rôle

évident contrairement à ce que l'on pouvait présager. Une faible densité de plantes par m<sup>2</sup> conduit peut-être à un port plus étalé des plantes, qui vont donc bien coloniser les inter-rangs plus larges, compensant ainsi le handicap des grands inter-rangs. Pour l'expérience de Châlons, où il n'y a pas eu apport d'azote (points N0) avant le printemps (après fertilisation : points N1), il n'apparaît pas d'effet N évident. Toutefois, les niveaux de nutrition azotée n'étaient jamais élevés. Le niveau de rougissement du feuillage (indicateur de stress azoté, lequel était fort à certaines dates) semble jouer très peu, ce qui autorise à utiliser cette méthode dans des conditions de faible fertilisation ou pour des niveaux limitants de nutrition azotée.

En première approximation, on peut donc considérer que la régression établie ci-dessus entre TCb et IF reste valide pour une assez large gamme de situations. Une étude plus large mériterait d'être réalisée pour le vérifier. En effet, la précision limitée des estimations informatives de TCb induit une variabilité résiduelle non négligeable qui pourrait expliquer que peu d'effet visible ait été obtenu pour chaque facteur de variation. Il faut également noter que notre expérimentation a concerné des cultures très bien désherbées. Or l'état d'infestation par les adventices est potentiellement critique pour l'estimation informatisée du TC, puisque la couleur, seul critère de seuillage des images, ne permet pas de distinguer les feuilles du colza de celles d'adventices.

#### *Corrélation entre TC et biomasse*

La *figure 4* montre la corrélation entre TCb et biomasse totale en place, et les principaux résultats sont repris dans le *tableau 2*. Les régressions de type « allométrique », présentent des ajustements (Carrés Moyens Résiduels) très proches de ceux obtenus avec le modèle « logarithmique »  $MS = a \times \ln(1-TC)$ . Ce dernier modèle est donc retenu préférentiellement puisque plus simple, et le modèle allométrique ne sera pas davantage présenté. Le modèle linéaire  $MS = a \times TCb$  s'avère aussi pertinent que le modèle logarithmique seulement pour les faibles TCb. Comme pour les corrélations entre TCb et IF, les termes constants des corrélations linéaires ne sont pas significativement différents de 0, donc pris égaux à 0. La prédiction de la MS - aérienne ou totale - en place à partir du TCb apparaît moins bonne que celle de l'IF, surtout si l'on considère la matière sèche totale. La régression sur le TCb manuel apparaît toujours meilleure, ce qui confirme l'intérêt du modèle statistique retenu et indique, là encore, la marge de progrès à réaliser sur le traitement informatique des images. La grande variabilité du paramètre de régression en fonction de la population de TC sur laquelle on l'ajuste (*tableau 2*) reflète sans doute le biais dû au traitement informatique mais aussi à la dispersion des données.

Ainsi, à partir de simples photographies, on peut effectuer un suivi acceptable de la dynamique de la MS au champ, tant que l'IF reste inférieur à 2-3 (ou TCb < 0,8) : on voit (*figures 2 et 4*) que les points à fort TCb s'ajustent moins bien. Toutefois, pour un TCb inférieur à 10 %, l'incertitude relative devient trop importante.

#### *Corrélation entre TC et azote absorbé*

Dans la gamme des valeurs obtenues (0-50 kg N/ha, expérience de Châlons seulement), la corrélation entre TCb et quantité d'azote présente dans les parties aériennes (Nae) de la culture est assez étroite et une relation linéaire en rend compte de façon satisfaisante (*figure 5*). Le terme constant n'étant pas significativement différent de 0, la régression linéaire entre les deux grandeurs est  $Nae = 53,0 \times TCb$  (N en kg/ha ;  $R^2 = 0,95$  ; ETR = 3,6 kg/ha). Si l'on considère l'azote contenu dans toute la plante

(parties aériennes et souterraines), on obtient :  $N = - 2,2 + 67,9 \times \text{TCb}$  ( $R^2 = 0,92$  ; ETR = 5,9 kg/ha). Ces résultats montrent que la mesure de TCb permet d'estimer l'azote absorbé en fin hiver, avec plus de précision que la méthode d'estimation visuelle proposée par le Cetiom [9], elle aussi fondée de fait sur le TCb. Cette information est intéressante pour l'ajustement de la fertilisation de printemps. L'estimation de l'azote absorbé à partir de TCb n'est toutefois utilisable que pour des colzas peu ou moyennement développés : pour une gamme de quantité d'azote ou de TCb supérieure à celle rencontrée, la relation ne sera évidemment plus linéaire, puisque TCb va tendre vers 1 alors que Nae pourra continuer à augmenter fortement. Il faudrait alors utiliser une relation entre Nae et IF pour estimer correctement l'azote contenu dans les parties aériennes. De plus, les placettes étudiées étaient assez carencées en azote (pas d'apport automnal) ; la généralisation des régressions ci-dessus reste donc à vérifier dans le cas de colzas riches en azote (fertilisation automnale ou fortes quantités d'azote dans le sol lors du semis), qui peuvent présenter des richesses surfaciques ( $\text{g N/m}^2$  feuilles) de 20 à 30 % supérieures à celles des plantes étudiées.

(1) Pixel : surface élémentaire composant l'image numérisée. À chaque pixel est associé un codage qui indique la couleur, l'intensité, la luminosité ou la valeur d'autres paramètres en ce point.

## CONCLUSION

L'utilisation d'images numérisées de couverts de colza au stade rosette, en visée verticale, permet, à partir de la mesure du taux de couverture brut (TCb), l'estimation de l'indice foliaire et, avec une moindre précision, de la matière sèche en place ou du contenu en azote du couvert. Il devient donc possible d'effectuer un suivi beaucoup plus fin, en termes de pas de temps, de la mise en place de cultures, avec une procédure de prise de vue extrêmement simple. Cela autorise une analyse plus pertinente des expérimentations, voire un pilotage plus précis de la fertilisation.

Bien que le sujet n'ait pas été traité ici, on peut rappeler qu'un autre intérêt de travailler sur des images numérisées, par rapport à une mesure directe du TCb (par exemple avec un radiomètre), tient aussi au fait que l'image peut fournir d'autres informations que celles envisagées ici, par exemple relativement à l'état sanitaire du feuillage (comptage ou caractérisation de taches sur des feuilles...).

Jusqu'à une date récente, la numérisation et le traitement informatique des images nécessitaient des investissements spécifiques. Mais la numérisation de diapositives est maintenant possible avec une très bonne qualité sur nombre de scanners à un coût de plus en plus abordable. La solution à court terme passe par l'utilisation d'appareils photographiques numériques, maintenant fiables et relativement bon marché. Les images peuvent alors être stockées en grand nombre sur des supports informatiques. Le seul point faible actuel de la méthode présentée ici est la disponibilité en logiciels de traitement des images. Il faut en effet pouvoir effectuer des traitements numériques simples, mais pixel par pixel, sur une placette délimitée sur l'image numérisée, ce qui n'est pas, à notre connaissance, disponible sur les logiciels courants de traitement d'image. Toutefois, le genre de problème que nous nous posons en voulant estimer un taux de couverture est similaire à divers cas de suivis de processus industriels puisqu'il s'agit de l'estimation du pourcentage relatif de deux couleurs sur une sous-image. Les logiciels traitant ce type de question doivent donc apparaître de plus en plus nombreux sur le marché professionnel. C'est d'ores et déjà le cas de ceux traitant les

données de télédétection sur micro-ordinateur. Un inventaire et un suivi des ressources existantes en logiciel restent à faire.

### Remerciements

Pour leur collaboration technique, à P. Thiebeau (prises de vue, expérience de Châlons), M. Lauransot (traitement manuel des images), E. Caron (expérience de Grignon), P. Belluomo (traitement informatisé des images).

Reçu le 14 décembre 1998 / Accepté le 10 octobre 1999

### REFERENCES

1. BOISSARD P, POINTEL JG, TRANCHEFORT J (1992). Estimation of the ground cover ratio of a wheat canopy using radiometry. *Int J Remote Sensing*, 13 : 1681-92.
2. ANDRIEU B, ALLIRAND JM, JAGGARD K (1997). Ground cover and leaf area index of maize and sugar beet crops. *Agronomie*, 17 : 315-21.
3. VARLET-GRANCHER C, GOSSE G, CHARTIER M, SINOQUET H, BONHOMME R, ALLIRAND JM (1989). Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 9 : 419-39.
4. JONES CA, KINIRY JR (1986). *CERES maize. A simulation model of maize growth and development*. Temple, TX, College Station : Texas A&M University Press.
5. SPITTERS CJT, VAN KEULEN H, VAN KRAALINGEN DWG (1989). A simple and universal crop growth simulator : SUCROS 87. In : RABBINGE R, WARD V, VAN LAAR HH, eds. *Simulation and system management in crop protection. Simulation Monograph 32*. Wageningen : PUDOC : 150-8.
6. COOMBS J, HALL DO, LONG SP, SCURLOCK JMO (1985). *Methods in bioproductivity and photosynthesis (2nd ed.)*. Oxford : Pergamon Press.
7. VARLET-GRANCHER C, BONHOMME R, SINOQUET H (1993). *Crop structure and microclimate. Characterization and applications*. Paris : INRA Éditions.
8. LEMAIRE G, GASTAL F, CRUZ P, GREENWOOD DJ, DRAYCOTT A (1990). Relationship between plant-N, plant mass and relative growth rate for C3 and C4 crops. Proceedings 1st ESA Congress, Paris, 5-7/12/1990.
9. JUNG L (1996). Fournitures du sol : ne pas négliger l'absorption d'azote à l'automne. *Oléoscope*, 31 : 18-20.
10. CELLIER P, RICHARD G, ROBIN P (1996). Partition of sensible heat fluxes into bare soil and the atmosphere. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82 : 245-65.



## Illustrations

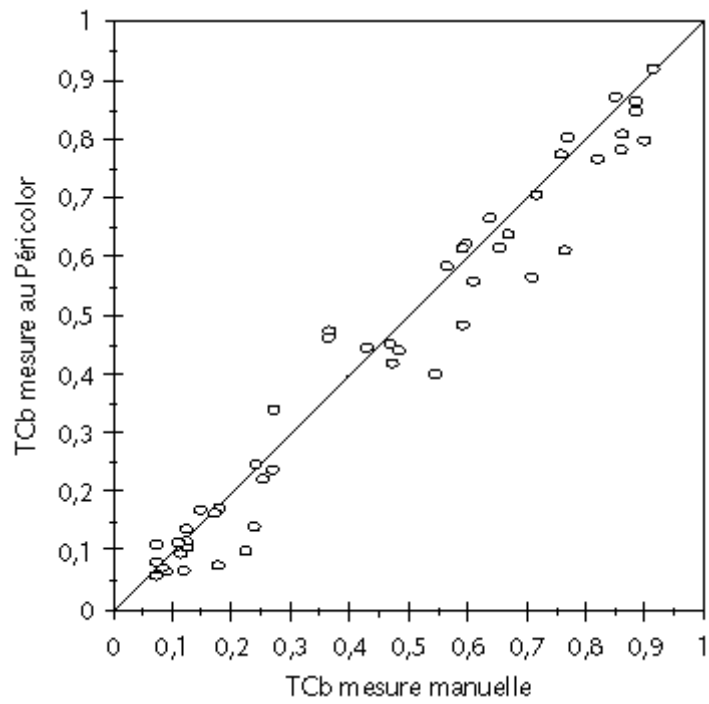


Figure 1. Comparaison des valeurs de taux de couverture obtenues, pour les mêmes photographies, par méthode manuelle et par méthode informatisée (station Péricolor). (À titre de référence : droite  $x = y$ .)

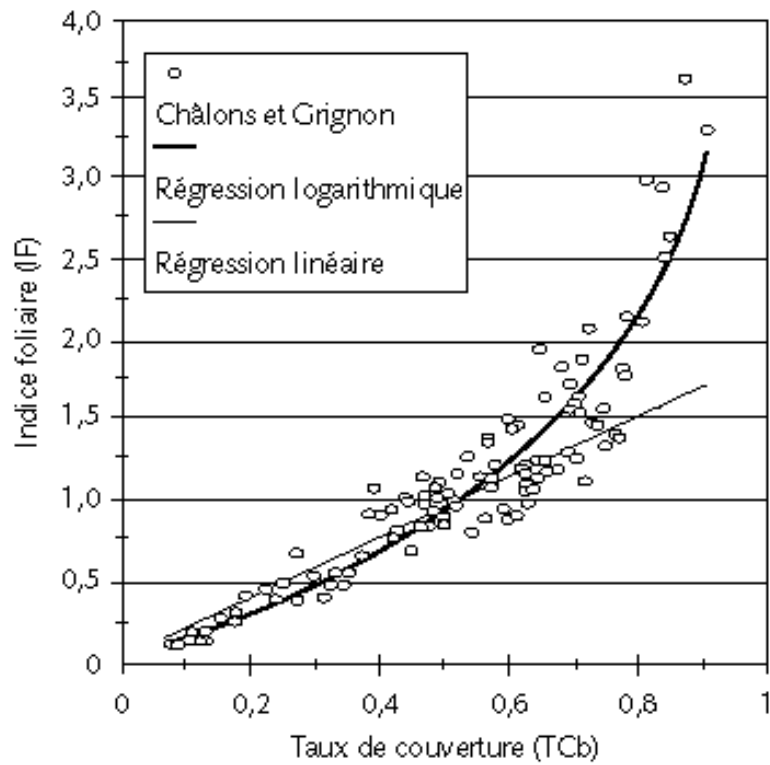


Figure 2. Indice foliaire (IF) représenté en fonction du taux de couverture brut (TCb). Points expérimentaux avec TCb estimé par méthode informatisée. Régression logarithmique :  $IF = -1,341 \times \ln(1-TC)$  ; régression linéaire :  $IF = 1,907 \times TC$  (cf. tableau 1).

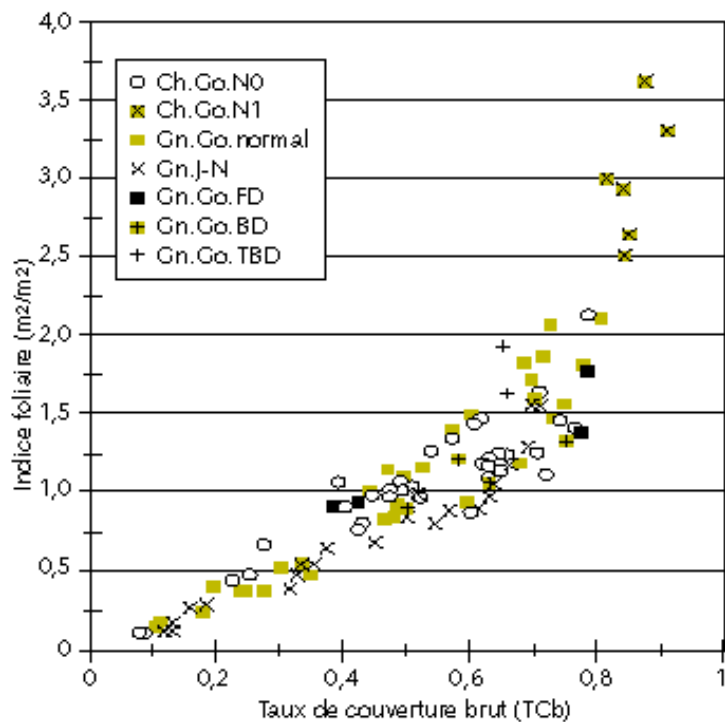


Figure 3. *Indice foliaire représenté en fonction du taux de couverture brut (TCb) des mêmes placettes, estimé informatiquement. Ch : site Châlons ; Gn : site Grignon ; Go : variété Goéland ; J-N : variété Jet-Neuf ; FD : forte densité (inter-rang = 14 cm) ; BD : basse densité (inter-rang = 40 cm) ; TBD : très basse densité (inter-rang = 56 cm). Autres cas : inter-rang = 29 cm ; NO : aucune fertilisation ; N1 : fertilisation N de printemps.*

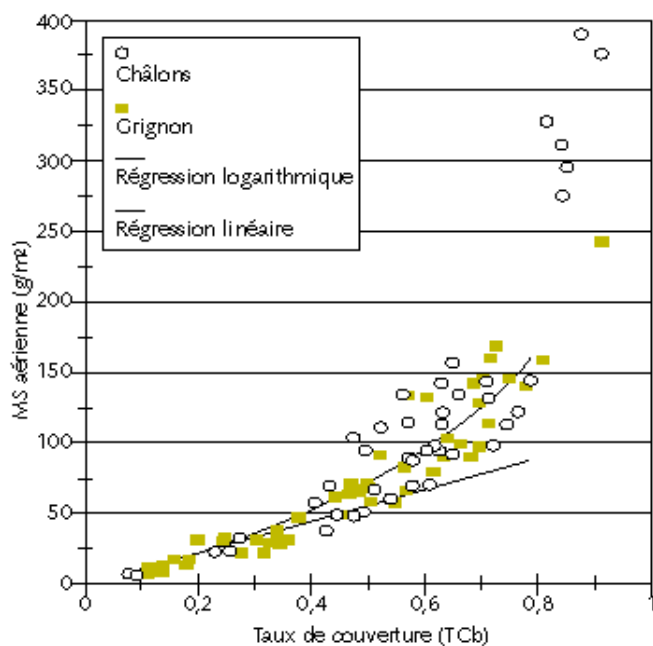


Figure 4. Biomasse aérienne (matière sèche : MS) en place, représentée en fonction du taux de couverture (TCb). Points expérimentaux avec TCb estimé par méthode informatisée. Régression logarithmique :  $MS = -104,9 \ln(1-TC)$  paramètres pour  $TC < 0,8$  ; régression linéaire :  $MS = 112 TC$  paramètres pour  $TC < 0,45$  (cf. tableau 2).

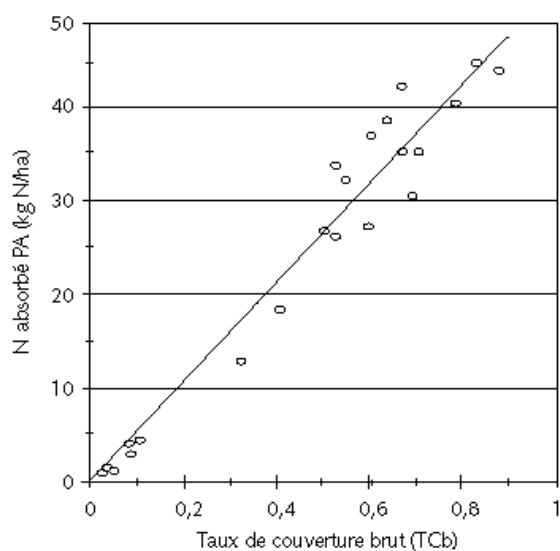


Figure 5. Quantité absorbée d'azote (parties aériennes) en fonction du taux de couverture brut (TCb). (Régression :  $N_{ae} = 53 TCb$ . Expérience Châlons seulement : pas de fertilisation azotée, sauf pour les points avec TCb supérieur à 0,8 correspondant aux placettes après fertilisation de printemps, 78 kg/ha, une semaine avant le prélèvement.)

	Limite supérieure d'IF	Limite supérieure de TCb	Modèle statistique	n	R <sup>2</sup>	ETR	a
Régression sur TC « manuel »	sans	sans	IF = a Ln(1-TC)	34	0,920	0,252	- 1,330
	3	0,85	IF = a Ln(1-TC)	33	0,968	0,136	- 1,181
	1,5	0,75	IF = a TC	29	0,976	0,069	1,877
Régression sur TC « informatique »	sans	sans	IF = a Ln(1-TC)	110	0,872	0,241	- 1,342
	3	0,85	IF = a Ln(1-TC)	107	0,858	0,214	- 1,303
	1,5	0,75	IF = a TC	88	0,879	0,138	1,907

Tableau 1. *Calculs de régressions donnant l'indice foliaire (IF) en fonction du taux de couverture brut du sol (TCb) pour des cultures de colza au stade rosette. Les TCb ont été estimés manuellement ou informatiquement (voir texte). (Ln = logarithme népérien ; n = nombre d'échantillons ; R<sup>2</sup> = coefficient de détermination ; ETR = écart type résiduel ; a = coefficient de la régression. Les limites indiquées sont celles du domaine de validité des régressions. Unité : m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.)*

	Limite supérieure de TC	Modèle statistique	n	Pour MS aérienne			Pour MS totale		
				R <sup>2</sup>	ETR	a	R <sup>2</sup>	ETR	a
Régression sur TC « manuel »	0,8	MS = a Ln(1-TC)	27	0,977	4,15	- 70,26	0,976	5,02	- 81,37
	0,8	MS = a TC	27	0,951	6,06	109,72	0,941	7,78	126,72
Régression sur TC « informatique »	sans	MS = a Ln(1-TC)	96	0,813	30,02	- 120,86	0,778	46,83	- 148,09
	0,8	MS = a Ln(1-TC)	88	0,832	18,74	- 104,94	0,756	29,60	- 128,38
	0,45	MS = a Ln(1-TC)	33	0,836	7,04	- 90,72	0,769	10,26	- 103,94
	sans	MS = a TC	96	0,601	49,74	201,62	0,576	64,74	246,91
	0,8	MS = a TC	88	0,783	21,34	164,66	0,709	32,31	201,34
	0,45	MS = a TC	33	0,810	7,58	112,03	0,737	10,95	128,15

Tableau 2. *Calcul de régressions donnant la matière sèche (MS) aérienne ou totale (aérienne plus souterraine) en fonction du taux de couverture brut du sol (TCb) pour des cultures de colza au stade rosette. Les TCb ont été estimés manuellement ou informatiquement (voir texte). (Ln = logarithme népérien ; n = nombre d'échantillons ; R<sup>2</sup> = coefficient de détermination ; ETR = écart type résiduel ; a = coefficient de la régression. Les limites indiquées sont celles du domaine de validité des régressions. Unité : g/m<sup>2</sup>.)*