

Estimation de l'indice foliaire d'une culture de canne à sucre à l'aide de photographies hémisphériques faites *in situ*

Régis Tournebize¹, Raymond Bonhomme¹, Denis Pouzet²

Résumé : Nous présentons un exemple d'estimation de l'indice foliaire d'une culture de canne à sucre, depuis la prise de vue dans une parcelle jusqu'au traitement des photographies numériques et au calcul de l'indice foliaire ; les résultats sont comparés à des mesures destructives. Les résultats sont satisfaisants et cette technique peut donc être recommandée pour des cultures de grande taille.

Mots clés : photographies hémisphériques, indice foliaire, canne à sucre

Introduction

La production de matière sèche d'une culture est fonction du rayonnement solaire qu'elle intercepte, essentiellement par les feuilles. Les mesures de la surface foliaire d'une culture (caractérisée par l'indice foliaire IF : surface de feuilles par unité de surface de sol) sont donc des données très importantes en agronomie.

De nombreuses méthodes de mesure directe ou d'estimation indirecte de l'IF sont disponibles, et des articles de synthèse récents (Bréda, 2003 ; Jonckheere *et al*, 2004) présentent les principes, avantages, inconvénients et précision de ces méthodes.

Parmi les méthodes adaptées à des cultures de grande taille, celle des photographies hémisphériques ne nécessite qu'un investissement en matériel limité (appareil photographique muni d'un objectif fish-eye) et donne de bons résultats ; comme elle est non destructive elle permet le suivi de la croissance. Mais son utilisation était limitée par le difficile dépouillement des clichés selon des zones géométriques de taille variable (Bonhomme et Chartier, 1972). La situation actuelle lève cette difficulté par le recours à des appareils photographiques numériques de grande résolution et la mise à disposition de logiciels de traitement.

1. Acquisition des photographies hémisphériques

L'appareil utilisé est un Nikon Coolpix 8800 (8 millions de pixels) muni d'un objectif Fisheye converter FC-E9 ; il est placé au niveau du sol, sur un support comportant un niveau à bulle pour en contrôler l'horizontalité, et dirigé vers le haut.

La canne à sucre est une culture de grande taille, pouvant dépasser 3 m après 12 mois de croissance, classiquement cultivée en rangs distants de 1,5 m. Afin d'assurer un bon échantillonnage, les clichés sont pris sur 3 lignes de mesure de 3 m chacune perpendiculaires aux rangs, avec une photographie tous les 0,20 m, soit 16 clichés par ligne de mesure ; les

¹ INRA UR135 Unité agropédoclimatique de la zone caraïbe Domaine Duclos, 97170 Petit-Bourg ☎ 05 90 25 59 76
Regis.Tournebize@antilles.inra.fr

² CIRAD UPR Systèmes canniens, 97140 Capesterre de Marie Galante

trois lignes de mesure, parallèles, sont espacées de 1 m. La prise de ces 48 clichés prend environ 30 minutes et doit être effectuée en l'absence de rayonnement solaire direct (aube, crépuscule ou ciel très couvert). La discussion de la relation entre nombre de photographies et précision de l'estimation de l'indice foliaire sera faite dans la partie « Résultats ».

2. Traitement des photographies hémisphériques

L'estimation de l'indice foliaire repose sur l'analyse des fractions de ciel vues à travers la voûte végétale, selon différentes hauteurs de visée (Bonhomme, 1974). Le dépouillement consiste donc à maximiser le contraste feuilles-ciel des photographies et à calculer les « trouées » pour différentes classes d'azimut et de hauteur de visée. Sur les photographies hémisphériques, l'horizon est le cercle le plus extérieur et le zénith est le centre de la photographie.

Nous avons choisi le logiciel spécialisé « Gap Light Analyser » (GLA, version 2.0), disponible gratuitement en ligne <http://www.ecostudies.org/gla/>, et qui comporte une notice détaillée (GLA, 1999). Nous n'utilisons pas les procédures de calcul direct de l'indice foliaire et d'estimation des rayonnements solaires de ce logiciel mais seulement celles qui conduisent au calcul d'un tableau des fractions de ciel vues pour des classes d'azimut (AZ) et de hauteur (ALT) de 10 degrés.

Descriptif de la procédure après le lancement du logiciel GLA :

- Chargement de la photo (File – Open image) ;
- Prise en compte de l'image (Configure – Register Image) en traçant, à l'aide de la souris, ou des coordonnées, le cercle correspondant à l'horizon. Ce cercle peut être délimité avec précision avec une photo de ciel sans culture ; il peut être mémorisé pour les photos suivantes en cochant « Fix Registration for Next Image » ;
- Possibilité de visualiser les zones d'azimut et de hauteur qui seront prises en compte dans les calculs (View – Overlay Sky-Region Grid) ;
- recherche très soignée du contraste optimal (Image – Threshold), en comparant l'image initiale « Registered Image » et l'image de travail « Working Image » (**figures 1a et 1b**). Faire « OK » ;
- Lancement des calculs (Calculation – Canopy Structure) en cochant « Log Details to File » pour créer un fichier (donner un chemin et un nom de stockage). Lancer « Calculate » ;
- Les fichiers « texte » ainsi créés peuvent être repris et regroupés avec un tableur, en ajoutant un numéro de photo et, éventuellement, un nom de « couvert ».



Figure 1a : Photographie hémisphérique d'un couvert de canne à sucre ; une grille permet de repérer les hauteurs zénithales et les azimuts.



Figure 1b : Photographie hémisphérique traitée afin d'accroître le contraste entre les feuilles et le ciel

3. Calcul de l'indice foliaire

Le choix des lois reliant indice foliaire (IF) et fraction de trouées (F) a donné lieu à une abondante bibliographie, et nous en avons utilisé seulement trois qui font une certaine unanimité :

- $IF = -1.09 * LN(F_{32.5})$
où $F_{32.5}$ est la fraction de trouées pour la hauteur de 32.5° (première formule de ce type établie par Bonhomme et Chartier en 1972 ; la couronne de 10° de hauteur centrée sur 35° est en fait utilisée), LN le logarithme népérien ; l'estimation de l'indice foliaire sera notée IF_BONH.
- $IF = 2 * [-LN(F_{83}) * 0.034 * COS(7^\circ) - LN(F_{67}) * 0.103 * COS(23^\circ) - LN(F_{52}) * 0.158 * COS(38^\circ) - LN(F_{37}) * 0.705 * COS(53^\circ)]$
où F_{83} , F_{67} , F_{52} , F_{37} sont les fractions de trouées pour des hauteurs angulaires respectives de 83 , 67 , 52 et 37° (Stenburg et al., 1994) ; des interpolations entre les hauteurs de visée proches sont ici nécessaires : cette estimation sera notée IF_STEN.
- $IF = 2 * (A + B)$
où A et B sont les coefficients de la relation linéaire entre la fraction de trouées F et le complément de la hauteur angulaire ($TETA = \pi/2 - ALT$, en radian) : $LN(F) = A + B * (TETA / (-COS(TETA)))$, pour TETA compris entre 1 et 0.4 (LANG, 1987) ; cette estimation sera notée IF_LANG.

Les fractions de trouées F sont calculées sur l'ensemble des photos selon une méthode qui sera discutée dans la partie « Résultats ».

4. Mesure directe de l'indice foliaire de la culture

Cette mesure de référence a été effectuée par prélèvements destructifs des feuilles sur une surface de 6 m². La surface de ces feuilles a été très rapidement mesurée à l'aide d'un planimètre LICOR LI-3100C d'une précision de l'ordre de 1 cm². Pour les forts indices foliaires, seul un sous échantillon a été planimétré et des relations établies entre surface et poids sec des feuilles de façon à estimer la surface foliaire totale.

5. Résultats obtenus sur la variété B80689

Lorsque la prise de vue et les dépouillements sont faits soigneusement, les estimations obtenues sur ce type de culture sont très proches des mesures (**figure 2**) ; à noter que ces dernières sont aussi entachées d'une erreur difficile à apprécier. Les différentes formules choisies donnent des résultats très voisins, les plus récentes n'améliorant pas la qualité de la prédiction de la formule ancienne, plus simple.

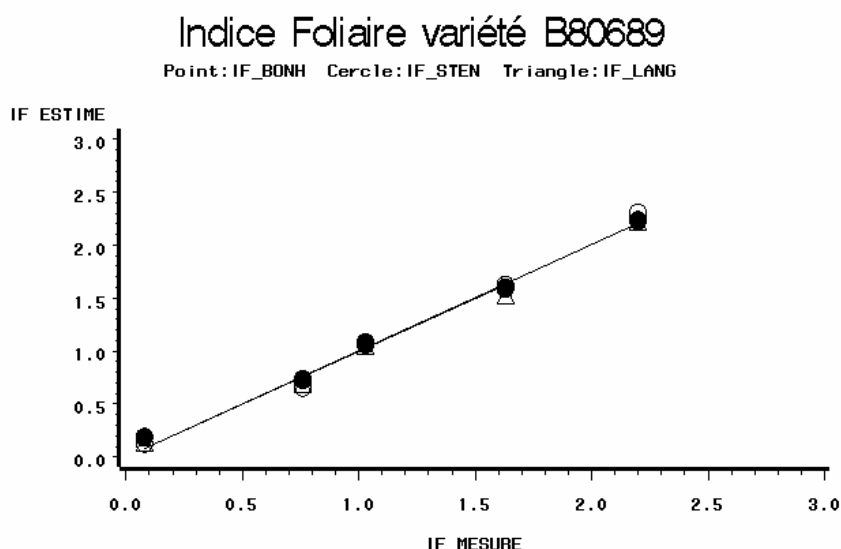


Figure 2 : Comparaison de valeurs d'indice foliaire IF mesurées directement ou calculées à partir de 48 photographies hémisphériques par point, selon trois formules différentes.

Dans certains cas, il existe des sous-estimations systématiques des indices foliaires estimés. Les effets de « clumping » (superpositions privilégiées des feuilles), qui ont donné lieu à une abondante bibliographie, peuvent parfois expliquer une part des écarts, impossible à chiffrer. Mais une grande part peut aussi être due au fait que la mesure directe de la surface des feuilles est faite en déroulant et aplatissant les feuilles, alors qu'elles ont tendance à s'enrouler *in situ*. Ce comportement peut différer selon les conditions de milieu et entre variétés ; c'est d'ailleurs une forme d'adaptation à la contrainte hydrique (Tournebize, 1990), qui a été trouvée aussi sur canne à sucre (Inman-Bamber et Jager, 1986). Dans ce cas, les photographies hémisphériques permettent d'accéder à l'énergie réellement absorbée par la culture (voir par

exemple les procédures existantes dans GLA, 1999), alors que la mesure directe de la surface foliaire est de peu d'intérêt.

5.1. Test du nombre de photographies (figure 3)

L'écart entre valeur mesurée et valeurs estimées par les différentes formules s'accroît lorsque le nombre de photographies devient inférieur à 12. Cet ordre de grandeur n'a pas de valeur générale car il dépend de la taille de la culture et de son hétérogénéité

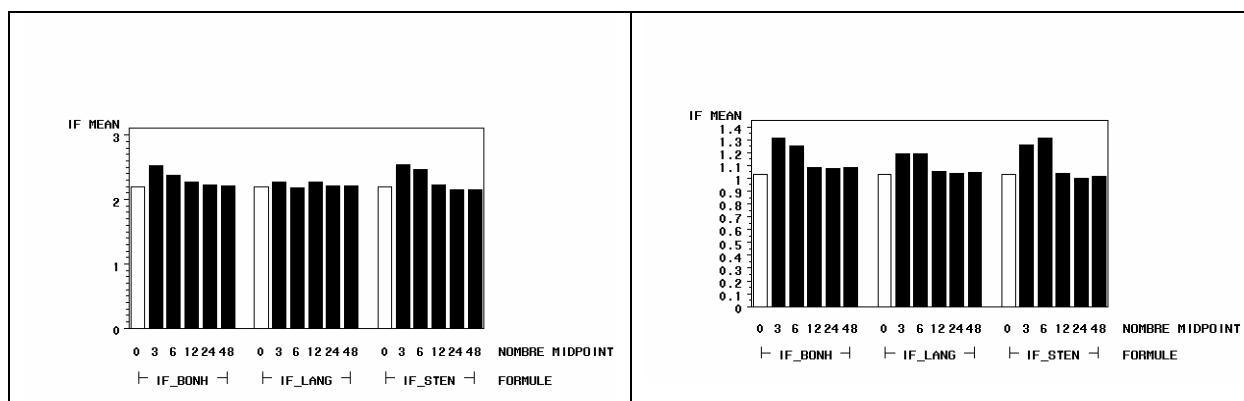


Figure 3 : Comparaison entre la mesure directe d'indice foliaire IF (nombre=0) et les estimations effectuées selon différentes formules avec un nombre variable de photographies par parcelle (de 3 à 48) Graphique de gauche : indice foliaire fort ; Graphique de droite : indice foliaire faible.

5.2. Méthode de calcul de la moyenne des trouées

Bien que cela soit rarement précisé en bibliographie dans la description des méthodes utilisées, les calculs d'indice foliaire à partir d'un certain nombre de photos peuvent être faits de différentes façons : (i) calcul de la moyenne des trouées sur l'ensemble des clichés puis calcul de l'indice foliaire à partir de cette valeur moyenne, (ii) calcul de l'indice foliaire sur chaque photographie puis calcul de la moyenne de ces indices foliaires, etc.

Comme la relation entre trouées et indice foliaire n'est pas linéaire, mais logarithmique, ces méthodes de calcul ne conduisent pas aux mêmes résultats si les valeurs des trouées sont variables entre photos ou azimuts : le logarithme de la moyenne n'est alors pas égal à la moyenne des logarithmes. Ce point a été discuté, de façon théorique, par Lang et Xiang (1986) mais leurs recommandations ont été peu appliquées au cas des photographies hémisphériques.

Sans entrer dans des considérations théoriques fastidieuses, l'importance de la méthode de calcul peut être mise en évidence avec un exemple :

- avec deux photographies dans un couvert végétal homogène, d'indice foliaire égal à 4, chaque photographie va conduire, pour une hauteur de visée de 32.5°, à une moyenne des trouées de 0.0255. Dans ce cas : $-1.09 * ((\ln(0.0255) + \ln(0.0255)) / 2)$ est égal à $-1.09 * (\ln((0.0255 + 0.0255) / 2)) = 4$.
- si le couvert végétal, de même indice foliaire 4, est constitué de deux bandes égales, supposées homogènes, d'indice foliaire respectif de 5 et 3, les trouées mesurées sur une photo dans chacune de ces bandes seront respectivement de 0.0102 (couvert plus dense, donc trouées plus petites) et 0.0638 (couvert moins dense). La moyenne des trouées est de 0.0370 et un calcul fait avec cette valeur moyenne donnerait un indice foliaire de $-1.09 * \ln(0.0370) =$

3.59. Si par contre le calcul d'indice foliaire est fait selon : $-1.09*((\text{LN}(0.0102) + \text{LN}(0.0638)) / 2)$ la valeur trouvée est bien égale à 4.

Comme un couvert végétal n'est jamais homogène il faut donc calculer l'indice foliaire avec la moyenne des logarithmes des trouées. Ce raisonnement pourrait conduire à faire ces calculs sur de petites zones d'azimut pour chaque photo ; le risque de travailler sur une zone trop petite est de trouver des trouées égales à zéro (couvert végétal continu) et donc d'avoir un logarithme non défini. Lang et Xiang (1986) discutent donc la taille minimale de la zone à échantillonner en fonction de la dimension des feuilles et de leur distance à l'objectif.

De façon pratique, pour un couvert de grande taille comme celui de la canne à sucre, le calcul des trouées peut être fait sur des secteurs d'azimut de 90° sur chaque photo, puis l'indice foliaire calculé sur la moyenne des logarithmes de ces trouées.

Sur les cultures extrêmes de la **figure 3**, les écarts obtenus selon la méthode de calcul peuvent atteindre 0.23 d'indice foliaire pour la culture de grande taille (soit un écart de 10 %) et 0.15 pour la culture peu développée (écart relatif de 15 % car le couvert est ici plus hétérogène).

6. Conclusion

Compte tenu des appareils photographiques numériques disponibles sur le marché pouvant être équipés d'un objectif fish-eye, et du développement de logiciels spécialisés de traitement de l'image, la technique des photographies hémisphériques est facile à utiliser.

Le nombre de clichés pour caractériser une parcelle ne doit pas être inférieur à 12 clichés, surtout si l'hétérogénéité est forte ou l'indice foliaire faible. Les différentes formules de calcul reliant IF mesuré et IF estimé par traitement d'image donnent des résultats très voisins ; le calcul des moyennes des trouées doit être fait selon une procédure bien précise.

Si la prise de vue et le dépouillement des clichés sont effectués avec soin, l'estimation de l'indice foliaire est obtenue avec une bonne précision. Cette méthode non destructive peut donc être utilisée de façon fiable sur des cultures d'assez grande taille pour étudier la dynamique de mise en place de leur indice foliaire.

Remerciements : Cette expérimentation doit beaucoup à Romain Grangeon, stagiaire au Cirad à Marie-Galante, en 2006, pour l'obtention d'un Master Biologie, Agronomie, Environnement, de l'Université Montpellier 2.

Bibliographie

- Bonhomme R (1974) Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites in situ. Thèse de Docteur - Ingénieur, UER Marseille-Luminy, 56p.
- Bonhomme R, Chartier P (1972) The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. *Israelian Journal of Agricultural Research*, 22, 53-61.
- Bréda N.J.J (2003) Ground-based measurements of leaf area index : a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54, 392, 2403-2417.
- GLA, Gap Light Analyser (1999) Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs. Users Manual and program

- Documentation, Version 2.0. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, Canada, 36 p. consulter le site <http://www.ecostudies.org/gla/>
- Inman-Bamber, N. G., Jager, J. M. De, 1986. The reaction of two varieties of sugarcane to water stress. *Field Crops Research* 14 (1): 15-28 1986
- Jonckheere I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., Baret, F., 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 19-35.
- Lang, A.R.G., 1987. Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology*, 41, 179-186.
- Lang, A.R.G., Xiang, Y., 1986. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 37, 229-243.
- Stenberg, P., Linder, S., Smolander, H., Flower-Ellis, J., 1994. Performance of the LAI-2000 plant canopy analyser in estimating leaf area index in some Scots pine stands. *Tree Physiology*, 14, 981-995.
- Tournebise, R., 1990. Contribution à l'étude de l'effet de la sécheresse sur la croissance de la fétuque élevée à deux niveaux d'azote. Rapport de DEA de l'Université Paris XI, Orsay, 37pp.

