



Master Biologie, Géosciences, Agronomie, Environnement
Spécialité : Biologie Fonctionnelle des Plantes

Parcours : M1

Année Universitaire 2005-2006

**Mesure de l'indice foliaire de la canne à sucre par
deux méthodes indirectes**

Organisme d'accueil : CIRAD

Romain GRANGEON



Stage encadré par : Denis Pouzet (CIRAD-CA UR systèmes canniers)

**Lieu du stage : Ferme de Vidon, 97140 Capesterre de Marie
Galante Guadeloupe**

**Avec la participation de : Raymond Bonhomme et Régis Tournebize (INRA
UR APC Domaine Duclos 97170 Petit Bourg Guadeloupe)**

Résumé

Le stage a porté sur la mise au point de deux mesures indirectes de l'indice foliaire de couverts de canne à sucre. Cet indice est utilisé par les agronomes pour évaluer la croissance du couvert dans les jeunes stades de développement. Les méthodes de mesure directes, difficiles à mettre en œuvre ont été utilisées pour caler des mesures indirectes de porosité (photographie hémisphériques) et d'absorption de la lumière photosynthétique active (ceptomètre). Les mesures ont portées sur 2 variétés (R579 ET B80689).

Les deux méthodes indirectes donnent une bonne estimation de l'indice foliaire lorsqu'il est inférieur à 3.5. Les mesures ne sont plus pertinentes au-delà de cette valeur. Les méthodes sont suffisamment sensibles pour détecter l'enroulement foliaire suite à un stress hydrique. Des mesures d'indice foliaire de jeunes couverts on pu être réalisées par des photos hémisphériques en photographiant en direction du sol et en séparant les composants sols et feuilles de l'image.

Les mesures indirectes rapides et fiables permettent d'envisager le suivi de l'évolution de la couverture de la canne à sucre dans les stades précédent la fermeture du couvert. Il est ainsi possible d'évaluer l'effet de techniques destinées à accélérer la vitesse de fermeture pour mieux gérer l'enherbement et l'alimentation hydrique (cultivars, resserrement des plantations, utilisations des résidus de récolte).

I Introduction

I.a. Contexte général

La canne à sucre est une plante herbacée tropicale et subtropicale de la famille des *Poaceas* ou graminées, appartenant au genre *Saccharum*. L'espèce la plus connue est *Saccharum officinarum* qui est cultivée pour ses tiges qui contiennent un jus sucré dont on tire le saccharose, sucre cristallisable et fermentescible qui permet la fabrication du sucre et du rhum.

La tige de la canne atteint généralement 2 à 5 mètres de hauteur et mesure de 2 à 5 cm de diamètre. Au sommet de la tige, se trouve l'inflorescence terminale, de 0,5 à 1 m de long. Généralement, la canne est récoltée à douze mois. Les variétés modernes fleurissent très peu (la morphologie de la canne et son cycle de culture sont présentés en Annexe 1).

Comme beaucoup de plantes tropicales la canne est une plante de type C4 (lors de la photosynthèse le premier sucre formé possède 4 carbones), ce qui lui confère un meilleur rendement photosynthétique adaptation quand la température est élevée.

La canne à sucre est aujourd'hui un élément majeur de l'agro-industrie mondiale. En 2004, près de 1300 millions de tonnes de cannes ont été produites sur environ 20 millions d'hectares. Cultivée dans 73 pays la canne est en tête des productions agricoles mondiales avec le blé et le riz.

Son rôle économique pour la Caraïbe, bien qu'il ne soit plus celui qu'il a été autrefois dans nombre d'îles, reste prépondérant.

En Guadeloupe, la canne à sucre est la première production en surface avec une seule cannière de 13 350 ha (en 2005) sur les 46 000 ha qu'occupe la SAU (surface agricole utile). Elle conserve toujours une place importante dans les exploitations grâce à sa garantie d'écoulement et à son adaptabilité aux conditions climatiques (sécheresse et cyclone). La culture contribue localement au revenu stable de plusieurs milliers de familles.

Ce stage s'insère dans un programme de recherche du CIRAD qui vise à obtenir une meilleure gestion de l'eau pluviale par le couvert de canne à sucre.

L'eau est une denrée rare, spécialement à Marie Galante (île de la Guadeloupe et lieu du stage), où les nappes souterraines suffisent à peine à subvenir à la consommation courante des habitants de l'île. L'irrigation des cultures n'est pas envisageable.

Il s'agit donc d'utiliser au mieux les eaux pluviales dans le contexte spécifique des sols vertiques de la Guadeloupe. Les sols vertiques sont localisés dans les régions tropicales à faible pluviométrie, marquées par l'alternance de saison sèche et de saison humide. Ils sont caractérisés par des argiles gonflantes (smectites). En saison sèche, des craquelures apparaissent dans le sol, alors que, durant la saison humide, le sol se gonfle. Les plantes adaptées ont un système racinaire très touffu, qui compense la très faible conductivité hydrique de ces sols.

Différentes techniques réputées économiques en eau doivent être testées, comme le resserrement des interlignes, la préparation du sol, l'utilisation d'un mulch de biomasse résiduelle (résidu de récolte utilisé dans les interlignes, pour limiter la perte d'eau et la pousse d'adventices).

Mais les effets de ces techniques ne peuvent se quantifier que par des mesures de la croissance des cultures puisque les appareils de mesure classique de l'humidité du sol sont difficilement fonctionnelles sur vertisols (fentes de retrait). L'évolution de l'indice foliaire (ou LAI leaf area index) est un bon indicateur de la croissance du couvert, il est donc impératif de pouvoir le mesurer.

L'indice foliaire est défini comme la surface déroulée des feuilles par unité de surface au sol (Bréda, 2003) ; ce nombre est donc exprimé en m^2 de feuilles par m^2 de sol, c'est une variable sans dimension. L'indice foliaire varie généralement entre 3 et 5 pour des cultures annuelles mais il peut atteindre 8 dans le cas de peuplements très fermés (grandes canopées).

Lorsque le couvert est fermé, il intercepte l'énergie lumineuse au maximum et le rendement photosynthétique de la culture devient alors optimal. D'autre part, les adventices n'ont plus assez de lumière pour se développer ce qui permet à la plante d'exploiter au mieux les ressources minérales et hydriques.

Il est donc très intéressant d'atteindre la fermeture du couvert le plus rapidement possible, surtout pour des plantes cultivées, limitant ainsi l'apport d'herbicide et les risques d'érosion et de perte d'engrais par ruissellement. Ceci contribue à une meilleure durabilité des systèmes d'exploitation.

I.b. Problématique

Pour pouvoir développer des techniques accélérant la fermeture du couvert il faut d'abord pouvoir évaluer cette fermeture, et donc mettre en place des mesures de suivi de l'indice foliaire (LAI).

Comment mettre en place des mesures d'indice foliaire rapides, fiables et reproductibles, afin d'évaluer le développement du couvert de canne à sucre ?

I.c. Objectifs

Mettre au point des mesures d'indices foliaires indirectes, permettant de caractériser un couvert de canne à sucre, en contournant les mesures d'indices foliaires manuelles peu pratiques et coûteuses en main d'œuvre et en temps.

Différentes méthodes de mesure indirecte ont été développées par les forestiers dans des canopées où les mesures directes sont impossibles. Celles qui ont été retenues dans cette étude sont basées sur l'absorption de la lumière par le couvert et sur la porosité. Notre propos sera d'utiliser ces méthodes sur des couverts de canne à sucre.

II Matériels et méthodes

II.a. Mesure directe de la surface des feuilles de canne à sucre

Pour quatre variétés de canne utilisées en Guadeloupe, R579 ("canne rouge"), R570 ("canne jaune"), B80 689 ("canne blanche"), B69 566 ("canne bleue"), un prélèvement de 20 plantes est effectué.

Sur chaque plante prélevée, des mesures morphologiques destructrices sont faites :

- La taille de la tige est mesurée, du sol jusqu'à la première feuille où la ligule est visible.

- La longueur ainsi que la largeur maximale sont mesurées sur les 5 premières feuilles de chaque plante prélevée.

Cela représente un échantillon de 100 feuilles pour chaque variété.

Deux méthodes de mesure de la surface des feuilles ont été utilisées :

➤ Chaque feuille est numérisée à l'aide d'un scanner, la surface de la feuille peut alors être déterminée grâce à un logiciel MESURIM PRO.

➤ La surface des feuilles a été également mesurée avec un planimètre (LICOR LI-3100C). Le planimètre permet de calculer la surface foliaire par simple introduction de la feuille dans l'appareil (annexe 2). L'utilisation du planimètre représente un gain de temps non négligeable comparée au scanner, en effet la numérisation des feuilles et le calcul des surfaces avec le logiciel sont des tâches laborieuses et longues à mettre en oeuvre.

Le temps entre le prélèvement de la feuille et sa numérisation doit être le plus court possible, pour ne pas permettre à la feuille de se refermer sur elle-même, ce qui induit des erreurs sur le calcul de la surface foliaire.

II.b. Estimation de la surface des feuilles de canne à sucre

Une fois que la surface, la longueur et la largeur de la feuille sont connues, les feuilles sont placées dans une étuve, 72h à 80°C. Lorsque les feuilles sont sèches elles sont pesées individuellement.

La longueur, la largeur, la surface ainsi que la masse sèche de chaque feuille est désormais connue.

Des relations qui permettront d'estimer la surface foliaire sont alors établies :

- La relation surface foliaire / longueur*largeur de la feuille.

- La relation surface foliaire / poids sec de la feuille.

Il importe d'évaluer la stabilité des relations obtenues selon les différents cultivars de canne à sucre étudiés, mais aussi selon la taille de la canne à sucre, ou selon la position de la feuille sur cette tige.

C'est à partir de ces deux relations que seront calculés les indices foliaires de référence qui serviront à étalonner les mesures indirectes. Il suffira de mesurer la longueur et la largeur, ou de peser la matière sèche d'un échantillon de feuille, pour obtenir la surface foliaire correspondante. Il faudra rapporter cette surface foliaire à la surface au sol sur laquelle l'échantillon de feuilles a été prélevé pour calculer l'indice foliaire de la culture.

II.c. Mesure indirecte d'indice foliaire

Les mesures indirectes d'indices foliaires sont non destructives contrairement aux mesures directes par pesée, et surtout plus rapides à mettre en place. Dans le cadre de cette étude nous avons retenu deux méthodes indirectes pour mesurer l'indice foliaire.

- Détermination de l'indice foliaire par photographie hémisphérique :

Cette méthode a été utilisée avec succès pour mesurer l'indice foliaire des couverts forestiers, là où une mesure directe est impossible. Depuis l'arrivée des appareils numériques à très grande résolution cette méthode proposée dans les années 70 (Bonhomme et Chartier, 1972) recommence à être utilisée couramment pour caractériser la structure d'un couvert. L'utilisation d'un appareil photo numérique se justifie par rapport à l'utilisation d'un appareil classique sur film par un coût moindre, et par un dépouillement plus facile des photos, avec une efficacité comparable (Frazer et al, 2001).

L'appareil utilisé ici est un Nikon Coolpix 8800 (8 millions de pixels) muni d'un objectif Fisheye converter FC-E9, le couvert végétal est photographié depuis le sol (figure 1). L'image est ensuite traitée afin de faire ressortir au maximum le contraste entre les feuilles et le ciel. Finalement la photo est transformée en noir et blanc, où les feuilles apparaissent en noir et le ciel en blanc (figure 2). La portion qui apparaît alors en blanc sur la photo correspond à la partie poreuse du couvert végétal (gap fraction).

Le traitement des photos se fait avec le logiciel GLA (Gap Light Analyser version 2.0 logiciel libre d'accès www.ecostudies.org/gla/). Ce logiciel peut fournir des informations sur la structure et la transmission de la lumière dans le couvert végétal, mais il n'est utilisé ici que pour construire un fichier Excel™ donnant, par zones de ciel (hauteur zénithale et azimut de 10° ; la hauteur zénithale est l'angle de la normale à la zone par rapport à la verticale), la fraction de ciel vue à travers le feuillage. Des réglages visuels de couleur et de contraste permettent d'optimiser la discrimination feuille-ciel.

Le choix des lois reliant indice foliaire (IF) et fraction de trouées (F) a donné lieu à une abondante bibliographie, et nous avons utilisé la plus couramment citée dans la bibliographie :

$$\bullet \quad IF = 2 * [-\text{LOG}(F7)*0.034*\text{COS}(7) - \text{LOG}(F23)*0.103*\text{COS}(23) - \text{LOG}(F38)*0.158*\text{COS}(38) - \text{LOG}(F53)*0.705*\text{COS}(53)]$$

où F7, F23, F38, F53 sont les fractions de trouées pour des angles zénithaux respectifs de 7, 23, 38, 53° (Stenberg et al, 1994) ; ces fractions sont obtenues par interpolation des valeurs obtenues sur les angles proches.

Dans le cas particulier du suivi de jeunes couverts cannières la hauteur de l'appareil et de l'objectif pose problème. Aussi un système a-t-il été élaboré afin de prendre les photos vues du ciel : l'appareil est suspendu à une potence et il photographie le sol vu du ciel (figure 3). La difficulté est d'arriver ensuite à faire ressortir le contraste qui existe entre les feuilles et le sol, Pour cela différentes techniques ont été testées, comme la pose sur le sol d'une bâche blanche, ou encore l'utilisation de filtres colorés sur l'appareil photo, mais le meilleur contraste entre les feuilles et le sol a été obtenu en désherbant manuellement entre les rangs de canne et en uniformisant la texture du sol à l'aide d'un râteau. Le même logiciel utilisé précédemment (GLA) permettra de calculer l'indice foliaire.

La durée d'exposition est un paramètre crucial afin de déterminer l'indice foliaire avec une photographie hémisphérique (Zhang et Chen, 2005) l'appareil a donc été utilisé en mode « automatique » afin qu'il optimise lui-même tous ces paramètres.

Il existe quelques précautions d'emploi pour cette méthode, une des plus importantes est de prendre les photos quand la luminosité du ciel est uniforme, généralement à l'aube, au crépuscule, ou par temps nuageux. La lumière directe pose des problèmes pour l'analyse des photos avec le logiciel GLA.

- Détermination de l'indice foliaire par mesure d'absorption de l'énergie photosynthétique active (PAR) à l'aide d'un ceptomètre :

Le PAR est la portion du spectre lumineux, comprise entre 400 et 700 nm, qui est utilisée par les plantes pour la photosynthèse.

Le PAR est mesuré à l'aide d'un ceptomètre. Le modèle utilisé dans nos expériences est le modèle "Accupar LP 80" de Decagon devices (figure 4) ; cet appareil dispose de 80 capteurs sur une longueur de 0.80 m et d'un capteur externe. L'utilisation de cet appareil repose sur plusieurs hypothèses dont deux principales :

.Les feuilles sont distribuées au hasard dans le couvert.

.La taille individuelle d'une feuille est petite comparée à la taille du couvert.

Le facteur de transmission du PAR ($T = \text{PAR transmis} / \text{PAR incident}$) est directement fonction de l'indice foliaire de la culture. Il est donc possible d'inverser cette relation pour obtenir le LAI à partir de T ; c'est la procédure que nous avons utilisée, telle qu'elle est décrite dans le manuel d'utilisation de l'Accupar, (Version 1.2 du manuel d'utilisation de l'analyseur de couvert végétal Accupar LP 80) :

$$IF = (((1 - 1/(2*K)) * B - 1) * \text{LOG}(T)) / (A * (1 - 0.47 * B))$$

K est une fonction de l'angle zénithal du soleil et B la fraction de PAR direct (qui peuvent donc se calculer connaissant l'heure, la date, la latitude, et une mesure de PAR hors culture) ; A est une fonction du facteur d'absorption des feuilles dans le PAR (voisin de 0.9 pour les feuilles; il sera pris égal à un pour les tiges).

Cela nécessite une mesure des radiations au-dessous du couvert et une mesure des radiations incidentes. Les radiations incidentes doivent être mesurées au dessus de la canopée grâce à un capteur externe fixé sur un piquet à une hauteur de 2m.

Théoriquement cet appareil peut calculer l'indice foliaire dans toutes les conditions lumineuses, mais des expériences ont démontré qu'en condition de lumière diffuse l'expérimentateur obtient des résultats plus précis que lorsque la lumière du soleil est directe ; une trop forte luminosité conduit à une sous estimation de la valeur de l'indice foliaire (Leblanc & Chen, 2001).

Ces deux méthodes de détermination indirecte de l'indice foliaire devront être calibrées par rapport à une mesure directe de l'indice foliaire, afin de s'assurer de leur fiabilité.

II.d. Echantillonnage des mesures

Nous avons effectué les mesures sur deux parcelles de canne blanche B80689 âgée de 6 mois et 3 mois (jeune couvert), ainsi que sur une parcelle de canne rouge R579 âgée de 8 mois (tableau figure 5).

Ne possédant pas plusieurs couverts à différents stades de LAI, nous avons utilisé un même couvert que nous avons défolié progressivement.

Les mesures effectuées avec l'Accupar et l'appareil photo se déroulent selon un protocole défini. Une placette de 2m sur 3m est délimitée dans le champ (schéma figure 5).

Quatre séries de mesures sont effectuées au sein de la placette ce qui permet d'obtenir quatre points d'indice foliaire différent.

Les résultats obtenus avec les deux méthodes indirectes seront comparés avec le LAI estimé par la relation surface-poids sec, en effet chaque échantillon de feuilles prélevé dans la zone de mesure sera séché puis pesé, afin d'obtenir une valeur de LAI qui servira de référence.

Série indice foliaire "total" :

Aucune feuille n'est coupée, les rangs sont conservés intacts pour effectuer les mesures. Le LAI obtenu est la valeur la plus élevée de la placette.

Série indice foliaire "sans fouet" :

Les fouets sont coupés sur toutes les plantes de la placette, ce qui permet de diminuer volontairement l'indice foliaire pour les mesures suivantes.

Série indice foliaire "1 feuille sur 2" :

1 feuille restante sur 2 est supprimée, abaissant ainsi encore un peu l'indice foliaire.

Série indice foliaire "tiges nues" :

Toutes les feuilles sont coupées, il ne reste plus que les tiges, l'indice foliaire est donc de 0, mais les tiges peuvent influencer l'absorption et la porosité du couvert, cette série permet d'évaluer l'effet des tiges sur les mesures indirectes.

En milieu forestier, une correction de ces mesures est effectuée pour prendre en compte l'incidence des troncs, des branches et des fruits sur la mesure de LAI. Dans le cadre de notre étude, il faudra voir si les tiges ont un effet significatif sur la valeur du LAI estimé.

III Résultats

III.a. Estimation de la surface des feuilles

Relations surface de la feuille – poids sec

Les relations obtenues entre surface d'une feuille (SURF en cm²) et poids sec de cette feuille (PSURF en g) sont très significatives et ne dépendent pas du rang de feuille considéré (NFEUILLE). Mais l'interaction PSURF*VARIETE est elle aussi très significative ce qui indique que les relations entre SURF et VARIETE sont différentes selon les cultivars (figure 6). L'effet de la hauteur de plante n'est pas significatif (résultats non présentés).

Le graphique de la figure 6 montre que les relations ne sont pas confondues entre les différents cultivars.

Il est donc possible d'utiliser, pour chaque cultivar, une relation linéaire spécifique, qui passe par l'origine :

$$\text{SURF} = a * \text{PSURF}$$

Variété	Coefficient a
B69566	95,24
B80689	88,49
R570	90,90
R579	89,28

Si une très grande précision n'est pas recherchée une relation indépendante des cultivars peut cependant être utilisée avec $a = 90.9$ ($R^2 = 0.8721$).

Relations surface de la feuille – dimensions (longueur : LO, largeur : LA)

Comme cela a été observé sur de nombreuses plantes, dont des graminées, les relations entre la surface d'une feuille (SURF) et le produit LO*LA sont généralement très bonnes, et surtout

indépendantes du numéro de feuille (NFEUILLE) et du cultivar (interaction LO_LA*VARIETE non significative ; figure7).

La figure 7 visualise bien la superposition des différentes données selon les cultivars. Une relation unique simple peut donc être utilisée ($R^2= 0.9918$):

$$\text{SURF} = 0.673 * \text{LO} * \text{LA}$$

Cette valeur de 0.673 est assez proche du coefficient 0.70 trouvé dans la littérature (Varlet-Grancher et al., 1980), confortant ainsi la validité de notre relation.

III.b. Estimation indirecte de l'indice foliaire d'un couvert de B80689

Les résultats sont présentés dans la figure 8 ; l'indice foliaire mesuré par prélèvement des feuilles (mesure directe) est mis en relation avec l'indice estimé par photographies hémisphériques (Fig. 8a.) ou avec l'Accupar (Fig. 8b).

La figure 8a, montre que, pour cette variété (B80689 canne blanche), l'estimation de l'indice foliaire à partir des photos est très bonne, puisque tous les points sont proches de la droite de référence passant par l'origine et le point (1 ; 1); cette estimation correspond donc avec l'indice foliaire mesuré directement à partir de l'échantillon de feuilles prélevé. Pour chaque point d'indice foliaire, les résultats de chaque ligne de mesure sont représentés, illustrant l'hétérogénéité des estimations dans une même placette.

L'Accupar donne également une bonne estimation de l'IF, puisque les points sont proches de la droite de référence.

Ces mesures se sont déroulées le 23 mars 2006. Cependant un point supplémentaire de LAI a été rajouté (cf. point entouré en rouge), ce point correspond à une mesure de repousse du couvert le 19 avril, un mois après les premières mesures. Il n'y a eu que 16 mesures pour obtenir ce point de LAI c'est pourquoi l'hétérogénéité de l'IF estimé entre les lignes n'est pas représenté.

Une autre série de mesures a été menée le 10 mai 2006 sur un jeune couvert cannier, ce jeune couvert provient de la repousse d'une parcelle qui a été coupée en janvier 2006. Les résultats sont présentés dans la figure 8c. Il s'agit encore de la variété B80689, mais le LAI a été estimé

par des photos vues du dessous et des photos vues de dessus (figure 3). Les photos vues de dessus permettent de visualiser le couvert dans son entier, il est en effet plus difficile d'estimer le LAI de ces jeunes couverts par des photographies en vue de dessous puisque les cannes sont de petite taille et donc lorsque l'appareil est sur son pied il ne prend pas en compte dans son champ de vision le couvert dans son entier.

L'Accupar à lui aussi été essayé sur jeunes couverts sans donner de résultats exploitables (données non représentées).

Les photos vues du dessus (représentées par les barres blanches) donnent une meilleure estimation que les photos vues de dessous (représentées par les barres noires). En effet, les photos vues de dessous sous estiment le LAI tandis que les photos vues de dessus donnent un résultat plus précis.

Pour cette variété les estimations de l'indice foliaire données par les photos et l'Accupar sont de bonnes estimations du LAI mesuré directement. Le couvert est de taille moyenne et dans ce cas là les 2 méthodes d'estimations sont correctes.

Pour le jeune couvert, les photographies vues de dessus donnent une bien meilleure estimation de l'IF.

III.c. Estimation indirecte de l'indice foliaire d'un couvert dense de R579

L'indice foliaire d'un autre cultivar, la variété R579 (canne rouge) a été également étudié avec les deux méthodes : les résultats sont illustrés par la figure 9. Ce couvert est plus âgé de 2 mois que les couverts de B80689 dont les résultats ont été présentés précédemment.

Les valeurs de LAI estimées par les photos hémisphériques (carré rouge Fig.9a) sont tous sous la droite de référence, ce qui signifie que le LAI estimé est plus faible que le LAI mesuré, et que par conséquent les photos hémisphériques sous estiment le LAI.

L'Accupar (carré bleu Fig.9a) a également tendance à sous estimer le LAI.

Le graphique (Fig.9b) montre que la sous-estimation de l'Accupar et la sous-estimation du LAI par les photos sont du même ordre, puisque les points sont très proches de la droite. Si les deux méthodes donnent la même tendance à sous-estimer le LAI, c'est qu'il existe un biais qui fausse systématiquement les mesures directes.

Comme les mesures sur ce couvert se sont déroulées dans la saison sèche, durant le carême, les données météo de la parcelle (Fig.9c) peuvent aider à comprendre cette sous-estimation. En

effet, durant les 5 jours précédant les mesures la pluviométrie a été nulle sur la parcelle. Or lorsque la canne à sucre subit un stress hydrique une de ses premières réactions est de diminuer la surface d'interception de la lumière en enroulant ses feuilles pour limiter la perte d'eau par évaporation (Inman-Bamber et Jager, 1986 ; Tournebize, 1990). En enroulant ses feuilles les deux méthodes d'estimation indirectes du LAI se trouvent affectées, les feuilles occupant moins d'espace, l'interception est diminuée. La surface réelle de la feuille mesurée au planimètre en aplatissant le limbe n'est, elle, pas affectée par ce phénomène. Cela peut être une explication possible à la sous-estimation du LAI par les méthodes indirectes.

IV Discussion

La relation surface de la feuille – produit longueur * largeur est d'une utilisation plus longue que la relation surface- poids sec, mais l'avantage majeur de cette relation est que son utilisation est non destructrice, puisque les mesures de longueurs et de largeurs peuvent être effectuées directement sur les plantes en plein champ. Certes l'utilisation de cette relation est plus laborieuse que l'autre, car il faut prendre le temps de mesurer sur chaque feuille sa longueur et sa largeur, mais elle est plus fiable et surtout elle ne varie pas au cours de temps. C'est une relation assez générale utilisable pour les principales variétés de canne à sucre.

Dans nos expériences nous avons malgré tout préféré utiliser la relation surface-poids sec pour calculer la surface de nos échantillons de feuilles, car le nombre de feuilles prélevées était trop important pour pouvoir mesurer la longueur et la largeur de chaque feuille. Un passage à l'étuve suivi d'une pesée est un moyen bien plus rapide d'obtenir la surface foliaire lorsque l'échantillon est assez important.

Les relations surface de la feuille – poids sec sont facilement utilisables, puisqu'une simple pesée d'un échantillon de feuilles donne directement la surface foliaire. Pour chaque variété une relation a été établie, ces relations sont donc un moyen rapide d'estimer la surface foliaire de façon destructive.

Mais l'utilisation de ces relations peut poser des problèmes, car la relation surface de feuille – poids sec varie au cours du temps. Une relation établie avec des feuilles jeunes sera différente d'une relation établie avec des feuilles à un stade de développement plus avancé, cela induit une erreur dans l'estimation directe de l'IF de 6 à 11%. C'est pour cette raison qu'avant d'utiliser une relation de ce type il faut s'assurer qu'elle soit bien valide pour l'échantillon

considéré, la meilleure solution est d'établir une relation sur la même parcelle que celle où va être installée la placette de mesure. Ainsi l'utilisateur s'assure que la relation qu'il utilisera pour estimer de façon directe son indice foliaire sera adaptée à l'échantillon de feuilles prélevées.

De plus, l'estimation de l'indice foliaire des fouets par la relation surface-poids sec pose un autre problème. Lorsque les fouets sont coupés, puis pesés afin d'obtenir la surface foliaire correspondante, la relation donne systématique une surestimation de la surface foliaire. Cela provient de la structure même du fouet (annexe 3), qui est en fait un enroulement de feuilles, en déroulant les feuilles contenues dans le fouet la surface obtenue est bien plus importante que la surface qu'occupe réellement le fouet. Afin de limiter cette surestimation nous proposons d'appliquer la formule surface-poids sec et de diviser par 2 la valeur de la surface obtenue. Nous avons observé qu'en procédant ainsi la demi-surface du fouet est en cohérence avec les estimations par les photos et par l'Accupar.

L'utilisation de photographies hémisphériques pour estimer le LAI de couvert cannier donne de bons résultats, mais il faut prendre un grand nombre de clichés pour pouvoir estimer le LAI d'un couvert. Au sein d'une même placette de mesure l'hétérogénéité est nette ; selon la ligne de mesure (16 mesures par ligne) la valeur du LAI peut varier jusqu'à 30%, et au sein de la même ligne de mesure les variations peuvent être encore plus marquées selon que la mesure est effectuée dans l'interrang ou dans le rang de canne. Il est impératif d'avoir un nombre important de photos pour pouvoir déterminer avec le plus de précision possible l'indice foliaire d'une parcelle. Le protocole mis en place par le chercheur doit donc être conséquent, pour pouvoir obtenir assez de mesures et ainsi moyenner correctement les données pour estimer au mieux l'indice foliaire. Cela rend cette méthode de mesure un peu plus longue mais cette démarche est nécessaire à l'obtention d'une valeur de LAI fiable.

Comme les conditions climatiques peuvent influencer la qualité des photos, il sera préférable de prendre les photos un jour où le ciel est uniformément nuageux ; si ce n'est pas le cas les photos doivent être prises aux heures les moins ensoleillées de la journée (à l'aube ou au crépuscule) ; il vaut mieux éviter de prendre des photos lorsque le couvert subit un stress hydrique.

Concernant les jeunes couverts canniers, réussir à déterminer l'IF est très intéressant au niveau agronomique. Car c'est à ce stade de développement que la vitesse de fermeture du couvert va conditionner la croissance de la culture ; plus le couvert se fermera rapidement et

plus la culture sera capable d'utiliser toute l'énergie lumineuse disponible. De plus, les adventices ne se développeront pas puisque la lumière qui arrive jusqu'au sol sera trop faible, et donc l'utilisation d'herbicide pourra être fortement diminuée, limitant ainsi le coût d'exploitation et les problèmes environnementaux.

Une autre méthode a donc été testée, elle consiste à prendre les photos vues de dessus, en fixant l'appareil photo à une potence. La plus grande difficulté rencontrée dans l'utilisation de cette technique est de faire apparaître un contraste suffisamment important entre le sol et les feuilles. La luminosité est un facteur extérieur à prendre en compte : en plein soleil les feuilles peuvent avoir des reflets blancs qui fausseront le calcul du LAI : nous préconisons une mesure le soir ou le matin quand les conditions d'ensoleillement sont les plus favorables.

L'Accupar est d'une utilisation plus rapide et plus facile que l'appareil photo, car il n'y a pas besoin de traiter les données comme on traite les photos pour faire ressortir le contraste, ce qui prend beaucoup de temps. L'appareil donne un fichier directement utilisable pour moyenner les valeurs et calculer un LAI à partir de la formule donnée dans le manuel d'utilisation de cet appareil.

Cependant là aussi il faut faire un nombre assez important de mesures pour tenir compte de l'hétérogénéité due à l'organisation en rangs des parcelles de cannes.

L'utilisation de cet appareil nécessite des conditions lumineuses assez particulières. Si la sonde externe qui mesure le rayonnement incident donne une valeur inférieure à $100\mu\text{mol}$ de photons. $\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ alors l'erreur sur la mesure sera assez importante ; en effet l'erreur sur la mesure des radiations transmises est d'autant plus forte que la mesure des radiations incidentes est faible. Il vaut mieux prendre les mesures lorsque la sonde externe donne des valeurs supérieures à $200\mu\text{mol}$ de photons. $\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Il faut également faire attention aux ombres que les couverts voisins peuvent créer sur la placette de mesure, la sonde externe qui se trouve au dessus du couvert (2m environ) peut indiquer une valeur de rayonnement lumineux satisfaisante mais la réglette de mesure de l'Accupar qui se trouve proche du sol peut se trouver à l'ombre d'un couvert voisin. Par conséquent le rapport rayonnement incident/transmis est faussé, et l'ombre du couvert voisin induit en erreur l'Accupar qui surestime les mesures : l'ombre est alors analysée par l'Accupar comme la résultante d'un couvert très dense, donc au LAI élevé.

Dans cette étude, nous avons constaté que la contribution des tiges sur la valeur du LAI est négligeable, il existe des fonctions qui permettent de corriger l'influence des parties non-

photosynthétiques (troncs, fruits, branches) sur le LAI, mais il n'est pas nécessaire d'effectuer une telle correction dans le cas spécifique de la canne à sucre.

V Conclusion

Cette étude a permis de mettre au point les modalités d'utilisation de deux méthodes permettant de mesurer de façon indirecte le LAI et donc de se substituer à des mesures directes de LAI qui sont destructrices et très longues à mettre en place. La détermination du LAI d'un couvert permet à l'agronome de connaître la vitesse de fermeture d'un couvert, et la croissance d'une culture peut être ainsi facilement quantifiée.

Maintenant que ces outils sont en place, les effets de différents traitements testés sur la canne à sucre peuvent être facilement observés et quantifiés.

Ces deux méthodes peuvent être également utilisées en amélioration variétale. La comparaison entre la croissance de différentes variétés peut être évaluée et le sélectionneur dispose ainsi d'un outil lui permettant de discriminer plus facilement une variété qui est plus adaptée à un type de sol donné, ou à un facteur abiotique particulier.

Avant de pouvoir étendre l'utilisation à d'autres variétés il est nécessaire d'établir la relation surface-poids sec qui est spécifique à chaque variété et à chaque période.

Les photos vues du dessus permettent d'obtenir le LAI lorsque les couverts sont trop jeunes pour être photographiés par en dessous. Cette alternative donne à l'agronome la possibilité de pouvoir, dès les stades de développement précoces, suivre le LAI d'une jeune parcelle. Ce résultat est intéressant, car en effet les étapes les plus critiques du développement de la canne à sucre ont lieu lorsque le couvert est encore jeune.

Le CIRAD dispose déjà de parcelles où des essais sont en place, et ces méthodes de mesures indirectes d'indice foliaire seront utilisées pour trouver les itinéraires techniques les plus efficaces pour obtenir une meilleure récolte possible de canne à sucre.

VI bibliographie

Bonhomme R, Chartier P (1972) The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. *Israeli Journal of Agricultural Research*. 22: 53-61.

Bonhomme R, Drouet JL, Améglio T (1996) Introduction à la modélisation du fonctionnement physiologique d'un couvert. In: "De la plante au couvert végétal". INRA Département de Bioclimatologie, tome 1, 647-669.

Breda NJJ (2003) Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* Vol. 54, No. 392, pp. 2403-2417.

Frazer GW, Fournier RA, Trofymow JA, Hall RJ (2001) A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agricultural and Forest meteorology* 109:249-263.

Inman-Bamber NG, Jager JM. (1986) The reaction of two varieties of sugarcane to water stress. *Field Crops Research* 14 (1): 15-28 1986.

Jonckheere R, Fleck S, K Nackaerts, Muys B, Coppin P, Weiss M, Baret F (2003) Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest meteorology*. 121: 19-35.

Lang ARG (1987) Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology*. 41:179-186.

Lang ARG, Xiang Yueqin (1986) Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*. 37: 229-243.

Leblanc SG, Chen JM, Fernandes R, Deering DW, Conley A (2005) Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forest. *Agricultural and Forest meteorology*. 129:187-20.

Leblanc SG, Chen JM (2001) A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agricultural and Forest meteorology*. 110:125-139.

Nobis M, Hunziker U (2005) Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agricultural and Forest Meteorology*. 128 (2): 243-250.

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.

Tewelde H, Sistani KR, Rowe DE, Adeli A, Tsegaye T (2005) Estimating Cotton Leaf Area Index Non-destructively with a Light Sensor. *Agronomy Journal*. 97:1158-1163.

Tournebize R. (1990) Contribution à l'étude de l'effet de la sécheresse sur la croissance de la fétuque élevée à deux niveaux d'azote. Rapports de DEA de l'Université Paris XI, Orsay, 37 pp.

Varlet-Grancher C, Bonhomme R, Jacob C, Artis P, Chartier M (1980) Caractérisation et évolution de la structure d'un couvert végétal de canne à sucre. *Ann. Agron*. 31 (4) 429-454.

Weiss M, Baret F, Smith GJ, Jonckheere I, Coppin P (2003) Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest meteorology*. 121: 37-53.

Wilhelm WW, Ruwe K, Schlemmer MR (2000) Comparaison of three leaf area index meters in a corn canopy. *Crop science*. 40:1179-1183

Wohlfahrt G, Sapinsky S, Tappeiner U, Cermusca A (2001) Estimation of plant area index of grasslands from measurements of canopy radiation profiles. *Agricultural and Forest meteorology*. 109:1-12.

Zhang Y, Chen JM, Miller J (2005) Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest meteorology*. 133:166-181.

annexe 1

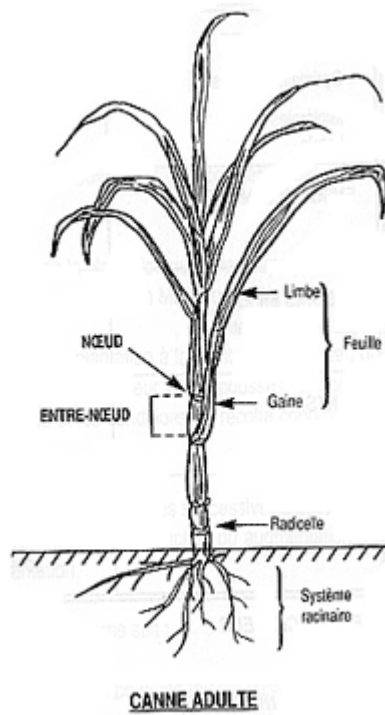
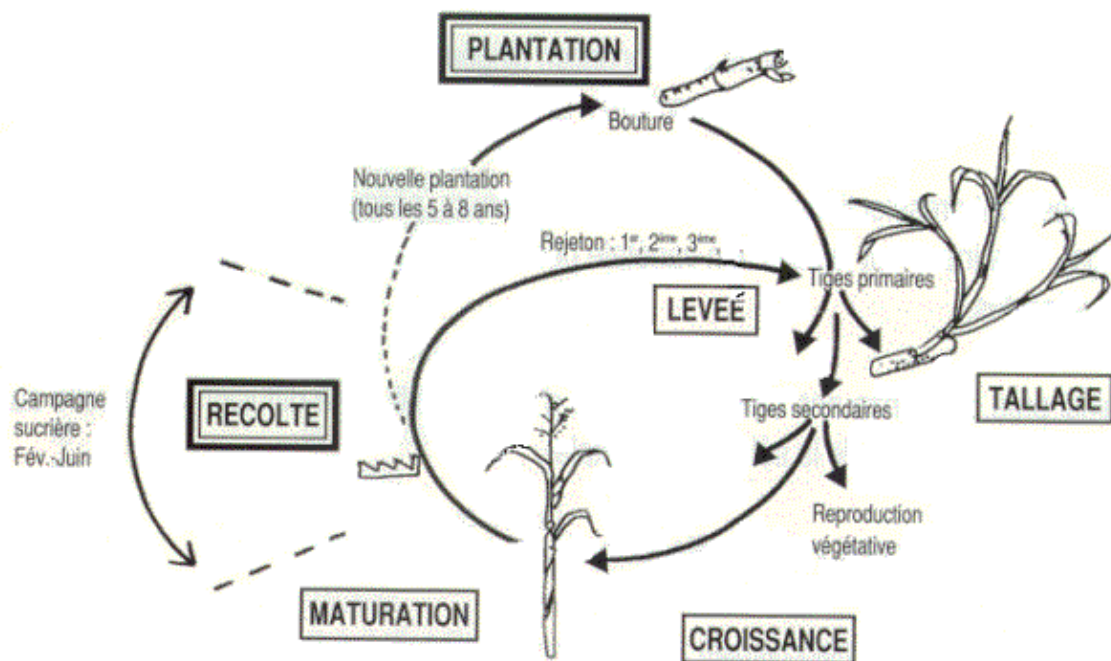


Schéma d'une canne à sucre adulte



Cycle de la canne à sucre

Annexe 2



Photographie du planimètre de l'INRA à Duclos, utilisé pour établir les mesures de surface des feuilles de canne à sucre. (LICOR LI-3100C)

Annexe 3



Photographie d'un fouet de canne à sucre, c'est un ensemble de feuilles enroulées à l'extrémité de la tige. Sur cette photo le fouet a donné naissance à plusieurs jeunes feuilles, mais certaines feuilles sont en permanence enroulées, participant à la croissance de la plante.