

Erreurs induites par l'utilisation d'un capteur de grande taille

Exemple d'un ceptomètre pour calculer un coefficient d'extinction à partir de la mesure des rayonnements transmis sous une culture

Régis Tournebize¹, Denis Cornet², Raymond Bonhomme¹

Résumé : *L'estimation des rayonnements solaires interceptés par une culture est une donnée devenue courante en agronomie pour évaluer sa production. Cette estimation est le plus souvent faite à partir de la seule mesure de l'indice foliaire LAI et l'utilisation d'un coefficient d'extinction des rayonnements K.*

Ce coefficient K est souvent évalué à partir de mesures ponctuelles de l'indice foliaire et de la fraction des rayonnements solaires transmis sous une culture TR, en utilisant la formule :

$$K = - (LN(TR)) / LAI.$$

Il est montré que cette évaluation, à partir d'une formule non linéaire, doit être faite avec précaution. Les écarts introduits dans l'estimation du coefficient d'extinction sont plus grands si les variations de LAI sont marquées sur la surface de mesure des TR. Un capteur de rayonnement transmis de grande taille donne un TR moyen qui englobe le plus souvent des zones hétérogènes, ce qui va donc conduire à des valeurs de K trop faibles.

Dans une culture peu homogène il faut donc estimer K à partir de mesures ponctuelles des rayonnements transmis en ne calculant pas le logarithme d'une moyenne des TR mais au contraire une moyenne des logarithmes de TR.

Mots-clés : ceptomètre, coefficient d'extinction, indice foliaire, rayonnements transmis sous une culture, PAR

Introduction

La production de matière sèche d'une culture est fonction du rayonnement solaire qu'elle absorbe, essentiellement par les feuilles. La mesure des rayonnements absorbés par une culture tout au long de son cycle est donc une donnée essentielle en agronomie. Cette mesure porte le plus souvent sur la seule interception des rayonnements solaires utiles à la photosynthèse (PAR : Photosynthetically Active Radiation ; Varlet-Grancher *et al.*, 1981 ; Varlet-Grancher *et al.*, 1989) et ne nécessite donc que la mesure du rayonnement incident (PAR) et du rayonnement transmis sous la culture PARt.

Compte tenu de l'hétérogénéité de la répartition des rayonnements PARt sous une culture, la mesure du PARt moyen a conduit à développer des dispositifs plus ou moins complexes (déplacement de capteurs par exemple) mais surtout des capteurs de grande taille (type « pyranomètres linéaires » ou plus récemment « ceptomètres ») : voir, par exemple, la synthèse assez récente de Bréda (2003).

Mais l'instrumentation d'une culture pour faire des mesures de rayonnement transmis sur l'ensemble d'un cycle est lourde. Aussi l'objectif de nombreux travaux est d'évaluer le

¹, INRA, UR1321 ASTRO, Agrosystèmes tropicaux F-97170 Petit Bourg (Guadeloupe)

☎ 05 90 25 59 76, ✉ regis.tournebize@antilles.inra.fr

², UPR Multiplication Végétative - CIRAD - F-34398 Montpellier ✉ D.Cornet@cgiar.org

coefficient d'extinction « K » à partir de mesures de courte durée de PARt/PAR, coefficient qui permet ensuite d'estimer la transmission par simple mesure de l'indice foliaire LAI en utilisant la formule maintenant classique (voir la synthèse de Varlet-Grancher *et al.*, 1989) :

$$\text{PARt/PAR} = \exp (- K * \text{LAI}).$$

L'inversion de la relation ci-dessus permet d'évaluer K, à partir de la mesure de PARt/PAR et de LAI, mais la relation utilisée suppose que le LAI soit constant sur la surface considérée. En utilisant un capteur de grande taille, pour évaluer la transmission moyenne des rayonnements sous la culture, celui-ci recouvre des zones d'indices foliaires différents, et l'inversion de la loi exponentielle, donc non linéaire, peut conduire à des valeurs erronées de K.

Position théorique du problème

Considérons des mesures ponctuelles de transmission TR (TR=PARt/PAR) effectuées à l'aide d'un capteur ponctuel en **n** positions sur la même parcelle. En supposant que la géométrie de la culture (inclinaison et propriétés optiques des feuilles) est analogue en tout point, et que seul le LAI varie, pour chaque position :

$$\text{TRn} = \exp (-K \times \text{LAI}_n)$$

où LAIn est le LAI correspondant à la portion du couvert **n** sous laquelle on effectue la mesure de TR. Dans la pratique, le LAIn n'est pas accessible à la mesure ; seul l'indice foliaire moyen LAIm peut être mesuré sur une surface représentative de la culture. La transmission moyenne de la culture est calculée en moyennant les mesures ponctuelles de TR des positions 1 à **n** :

$$\text{TRm} = 1/n \times \sum_{1}^n \exp (-K \times \text{LAI}_n)$$

Si le LAI de la culture est homogène alors LAIm est égal à LAIn en tout point et :

$$\text{TRm} = 1/n \times \sum_{1}^n \exp (-K \times \text{LAI}_n) = 1/n \times n \times \exp(-K \times \text{LAI}_n) = \exp (-K \times \text{LAI}_m)$$

Dans ce cas théorique d'une culture parfaitement homogène, un capteur de grande taille mesurant TRm permet donc le calcul du coefficient d'extinction K connaissant LAIm :

$$K = - \text{LN} (\text{TRm}) / \text{LAI}_m, \text{ où LN est le logarithme népérien.}$$

Mais une culture n'est jamais parfaitement homogène et donc :

$$\text{TRm} = 1/n \times [\exp (-K \times \text{LAI}_1) + \exp (-K \times \text{LAI}_2) + \dots + \exp (-K \times \text{LAI}_n)]$$

est différente de $\exp(-K \times (LAI_1 + LAI_2 + \dots + LAI_n)/n)$ car l'exponentielle d'une moyenne n'est pas la moyenne des exponentielles.

Dans une culture hétérogène la mesure de la transmission moyenne des rayonnements TR_m avec un capteur de grande taille ne permet pas d'évaluer correctement le coefficient d'extinction des rayonnements K .

Cependant la détermination du coefficient d'extinction K peut être faite de façon rigoureuse, y compris dans un couvert hétérogène, à partir d'un ensemble de mesures ponctuelles faites sur une surface représentative de la culture, dont l'indice foliaire moyen est LAI_m . En effet, pour chaque mesure ponctuelle :

$$\text{LOG}(TR_n) = -K \times LAI_n$$

et donc :

$$1/n \times \sum_{1}^n \text{LOG}(TR_n) = -K \times 1/n \times \sum_{1}^n LAI_n = -K \times LAI_m$$

$$K = [1/n \times (\sum_{1}^n -\text{LOG}(TR_n))] / LAI_m$$

Dans une culture hétérogène il est donc possible d'évaluer rigoureusement le coefficient d'extinction K à partir de la *moyenne des logarithmes des transmissions mesurées ponctuellement*, connaissant le LAI moyen de la surface considérée.

Cette difficulté à inverser une mesure de transmission moyenne, pour obtenir le coefficient d'extinction ou l'indice foliaire, dans une culture hétérogène, a déjà été discutée par Lang et Xiang (1986). Mais l'étude utilisait un capteur spécifique peu courant, ce qui en a beaucoup réduit la portée, et peu d'expérimentateurs ont suivi les recommandations de ces auteurs.

Evaluation théorique des erreurs sur un couvert végétal fictif

Supposons un couvert végétal « en rangs » homogènes selon la direction du rang et une transmission des rayonnements égale à $\exp(-K \times LAI)$ dans ce couvert.

Si le couvert végétal est continu cela revient à supposer que les rangs sont contigus ; pour un LAI de 4 et un coefficient d'extinction de 0,6, un capteur ponctuel dans un rang mesurera une transmission $TR_1 = \exp(-0,6 \times 4) = 0,09$, idem sous le deuxième rang : $TR_2 = 0,09$. Un

capteur de grande taille mesurant simultanément les rayonnements transmis sous les deux rangs conduira à une transmission TR_{tot} de 0,09.

Une inversion de la mesure des rayonnements transmis, pour évaluer le coefficient d'extinction, donnera le même résultat si elle porte sur TR_{tot} ou sur la moyenne logarithmique de TR_1 et TR_2 :

$$K_{tot} = - \text{LN}((0,09 + 0,09)/2) / 4 = - \text{LN}(0,09) / 4 = 2,40 / 4 = 0,6$$

$$K = (1/2) \times (- \text{LN}(TR_1) - \text{LN}(TR_2)) / 4 = - \text{LN}(0,09) / 4 = 2,40 / 4 = 0,6$$

Mais si le couvert végétal, de même LAI = 4, est constitué de deux bandes d'égale largeur dont l'une a un LAI de 2 et l'autre un LAI de 6, les transmissions ponctuelles dans chacune des bandes seront respectivement :

$$TR_1 = \exp(-0,6 \times 2) = 0,30 \text{ et } TR_2 = \exp(-0,6 \times 6) = 0,027$$

La transmission mesurée par le capteur de grande taille, intégrant les rayonnements transmis sous les deux rangs, sera alors :

$$TR_{tot} = (0,30 + 0,027) / 2 = 0,164.$$

Une inversion des mesures de rayonnement transmis conduit alors à :

$$K_{tot} = - \text{LN}((0,30 + 0,027)/2) / 4 = - \text{LN}(0,164) / 4 = 1,81 / 4 = 0,45$$

$$\begin{aligned} K &= (1/2) \times (- \text{LN}(TR_1) - \text{LN}(TR_2)) / 4 = (1/2) \times (-\text{LN}(0,30) - \text{LN}(0,027)) / 4 \\ &= (1/2) \times (1,2 + 3,6) / 4 = (1/2) \times (4,8) / 4 = 0,6 \end{aligned}$$

L'utilisation d'un capteur de grande taille intégrant les mesures sur les deux rangs de cette culture fictive hétérogène ne donne donc pas accès à une valeur correcte du coefficient d'extinction. En revanche, le calcul basé sur la moyenne des logarithmes des transmissions mesurées avec un capteur dans chaque zone homogène de la culture conduit à une estimation correcte.

La **figure 1** ci-après reprend le même type de comparaison mais sur des intervalles de variation des LAI moyens et de l'écart de LAI entre les deux bandes de végétation. Les écarts d'estimation du coefficient d'extinction sont d'autant plus importants que la différence de LAI entre les bandes est forte et que le LAI est élevé. Les écarts seront également plus importants si l'atténuation des rayonnements est plus marquée avec des feuilles à port plus horizontal et donc un coefficient d'extinction K plus élevé (résultats non montrés).

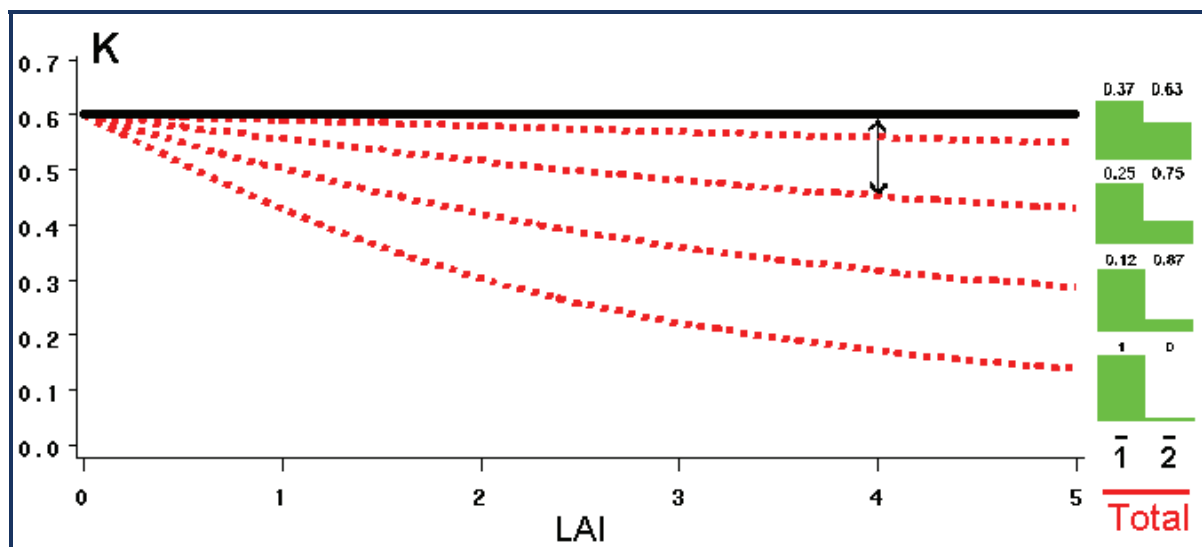


Figure 1 : estimation du coefficient d'extinction K , dans des cultures fictives où il est constant et égal à 0,6, à partir de mesures de transmission des rayonnements PAR faites sous ces cultures. Les cultures, de LAI moyen variant de 0 à 5, sont constituées de deux bandes, homogènes sur le rang, mais différentes entre elles par leur LAI partiel (la fraction de LAI est indiquée au-dessus de chaque bande verte). L'estimation de K est faite :

- à partir de la moyenne des logarithmes des transmissions ponctuelles mesurées en 1 et 2 (ligne continue noire),
- à partir de la transmission moyenne sous la culture mesurée à l'aide d'un capteur de grande taille « Total » (lignes rouges en pointillés).

La flèche noire verticale indique l'écart d'estimation de K décrit numériquement dans le texte (LAI moyen de 4 réparti en 6 et 2, fractions de 0,75 et de 0,25, selon les deux rangs).

Selon la méthode de calcul, les erreurs sur l'estimation de K sont accrues lorsque les rangs sont marqués. Cela amène à s'interroger sur certains résultats expérimentaux, comme ceux de Clegg *et al.*, (1974) et de Flénet *et al.*, (1996), montrant, pour un LAI donné, une diminution de K avec l'augmentation de l'espacement des rangs dans une culture. Les « matériels et méthodes » de ces publications ne sont pas assez précis pour attribuer ces variations, ou au moins une partie de celles-ci, à la méthode de calcul utilisée.

Évaluation expérimentale de la méthode de calcul du coefficient d'extinction K

Des mesures des rayonnements PAR incident et transmis sous une culture d'igname (*Dioscorea alata*) en rangs ont été faites tout au long du cycle de culture, en 2004 sur le Domaine Inra de Godet, en Guadeloupe ; une description détaillée des conditions de l'essai peut être trouvée dans Cornet (2005).

Ces mesures ont été réalisées avec un capteur linéaire de rayonnement de type ceptomètre (Sunfleck PAR Ceptometer, Decagon Devices Inc., Pullman Washington 99163 USA). Ce capteur est placé dans la direction du rang des ignames et déplacé parallèlement 15 fois tous les 0,10 m sur la distance inter billon. Une position du ceptomètre donne une mesure de

transmis considérée ici comme une mesure ponctuelle ; la moyenne des transmissions pour les 15 positions est la mesure qui serait donnée par un capteur de grande taille. Après la série de mesures les feuilles de la surface considérée sont prélevées et leur surface est mesurée rapidement à l'aide d'un planimètre Li-cor LI 3.100 (Li-cor, Lincoln, Nebraska 68504 USA), avec une précision d'environ 1 % ; cette surface foliaire permet le calcul du LAI moyen (surface foliaire ramenée à la surface prélevée).

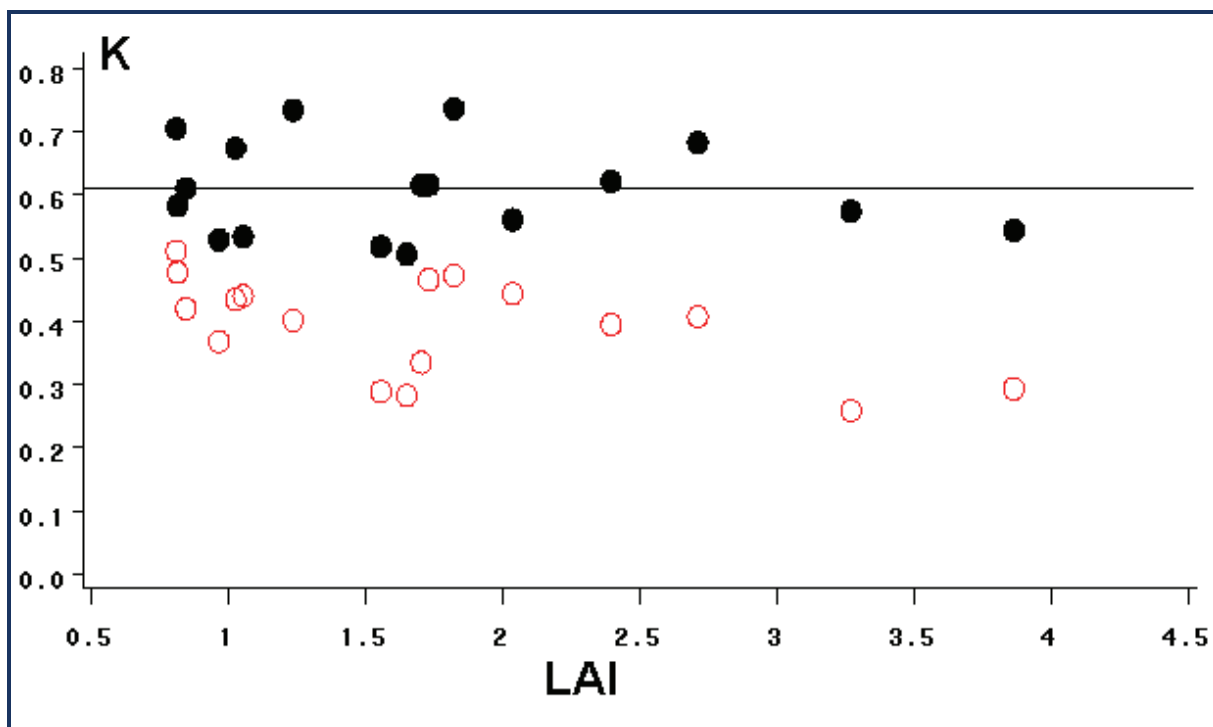


Figure 2 : estimation du coefficient d'extinction K à partir de mesures de transmission des rayonnements PAR faites sous des cultures d'igname (*Dioscorea alata*) avec un capteur de type « ceptomètre Decagon ». L'estimation de K est faite :

- à partir de la moyenne des logarithmes des transmissions ponctuelles mesurées en 15 positions sur l'inter rang (points noirs),
- à partir de la transmission moyenne sur l'ensemble des positions (cercles rouges).

En utilisant la moyenne des transmissions, comme le ferait un capteur de grande taille, un coefficient de transmission K' de 0,458 est obtenu, et la variabilité des mesures est élevée (s.e. de 0,015). Un tel coefficient est difficile à justifier car il correspondrait à des feuilles de port assez vertical, ce qui n'est pas le cas des ignames.

En revanche, le calcul basé sur les moyennes des logarithmes de transmission en plusieurs points conduit à un coefficient K de 0,629, valeur plus logique, bien que des mesures directes ne soient pas disponibles, avec une estimation moins variable et plus stable dans le temps.

Conclusion

Des capteurs de rayonnements de grande taille, comme les ceptomètres, permettent d'obtenir une valeur moyenne des rayonnements transmis sous une culture. Mais cette transmission moyenne conduit à des erreurs si elle est utilisée pour estimer le coefficient d'extinction des

rayonnements dans une culture K, connaissant le LAI. Ces erreurs sont d'autant plus grandes que l'hétérogénéité de la culture est marquée.

Dans une culture peu homogène il est donc nécessaire d'estimer K à partir de mesures ponctuelles des rayonnements transmis et en ne calculant pas le logarithme d'une moyenne des TR, mais au contraire une moyenne des logarithmes de TR dans la formule :

$$K = - (\text{LN}(\text{TR})) / \text{LAI}.$$

Bibliographie

- 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.
- Clegg M.D., Biggs W.W., Eastin J.D., Maranville J.W., Sullivan C.Y. (1974) Light transmission in field communities of sorghum. *Agronomy Journal*, 66, 4, 471-476.
- Cornet D. (2005) Étude du fonctionnement physiologique d'un couvert végétal d'igname (*Dioscorea alata* L.). Mémoire DEA, Sciences agronomiques et ingénierie biologique, Faculté des Sciences agronomiques, Gembloux, Belgique, 66pp. + bibliographie 19pp.
- Flénet F., Kiniry J.R., Board J.E., Wesgate M.E., Reicosky D.C. (1996) Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. *Agronomy Journal*, 88, 2, 185-190.
- 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.
- Varlet-Grancher C., Chartier M., Gosse G., Bonhomme R. (1981) Rayonnement utile pour la photosynthèse des végétaux en conditions naturelles : caractérisation et variations. *Acta Oecologica Oecol. Plant.*, 2 (16), 189-202.
- Varlet-Grancher C., Gosse G., Chartier M., Sinoquet H., Bonhomme R., Allirand J.-M. (1989) Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 9 (5), 419-439.

