

## **Une méthode pour estimer l'interception du rayonnement par un couvert bas : application au colza avant montaison**

### **A method for assessing intercepted radiation by a crop with a low leaf area: an application to oilseed rape**

Oléagineux, Corps Gras, Lipides. Volume 9, Numéro 1, 54-63, Janvier - Février 2002, Fondamental

**Auteur(s)** : Pascal DENOROY, Pascal THIEBEAU, Ghislain GOSSE, INRA Agronomie, 71, av. Édouard-Bourleaux, BP 81, 33883 Villenave-d'Ornon Cedex..

**Résumé** : Dans les modèles de simulation du fonctionnement des cultures, l'interception du rayonnement est une variable cruciale pour la prévision de la productivité en biomasse. D'autre part, la connaissance de l'interception du rayonnement par une culture permet de mieux analyser la réponse à un traitement en autorisant la distinction entre les effets morphogénétique et physiologique du traitement. Par exemple, dans l'étude de la fertilisation azotée du colza [1] on a pu faire la part de l'effet morphogénétique (accroissement de l'indice foliaire, donc de l'interception) et de l'amélioration de la conversion photosynthétique du rayonnement absorbé. Dans un cas comme dans l'autre, une estimation correcte de l'interception du rayonnement est essentielle. Très souvent, un formalisme dérivé de la loi de Beer-Lambert est utilisé pour quantifier la part interceptée du rayonnement :  $PAR_i = \epsilon_i PAR$  (1) et  $\epsilon_i = 1 - e^{-k \cdot IF}$  (2), PAR représentant le rayonnement photosynthétiquement actif incident (exprimé en Joules ou en moles de photons),  $PAR_i$  la part de ce dernier interceptée par le couvert,  $\epsilon_i$  le coefficient (sans dimension) d'interception, IF l'indice foliaire et k le coefficient d'extinction du rayonnement. Un formalisme un peu plus complexe doit être utilisé si on veut considérer le rayonnement absorbé [1, 2]. Pour des cultures couvrantes, la sensibilité de ces modèles à la valeur de k est faible pour les IF élevés, c'est pourquoi ces modèles sont souvent utilisés avec succès. Mais aux faibles IF, les modèles sont sensibles à k, d'où l'importance de l'estimation de ce paramètre pour les cultures présentant une longue période de faible couverture du sol, tel le colza peu fertilisé en phase hivernale. De plus, pour les cultures discontinues, c'est-à-dire présentant des zones où le sol n'est pas du tout couvert par la végétation, comme les inter-rangs, on doit introduire dans l'équation 2 un paramètre représentant le taux de couverture du sol. Si l'estimation par mesure directe de  $\epsilon_i$  et donc l'estimation de k sont assez simples, au moins dans le principe pour un couvert développé en hauteur (colza après montaison) [3], une telle mesure devient beaucoup plus complexe dans le cas d'un couvert discontinu et bas. Dans ce milieu hétérogène (et souvent dans des conditions hivernales sévères), une distribution représentative des capteurs de rayonnement est difficile, les risques de perturbation de la mesure (salissure des capteurs, dérèglages) sont élevés. Plusieurs études ont déjà traité de  $\epsilon_i$  et k dans le cas du colza [3-7]. Elles sont fondées sur des mesures d'interception du rayonnement et concernent des couverts fermés, après montaison. Une autre approche consiste à effectuer un calcul précis de  $PAR_i$  avec des modèles détaillés utilisant une description complète des paramètres (géométriques et radiatifs) du feuillage, et du rayonnement incident [8]. Mais les données nécessaires sont alors nombreuses, complexes à obtenir et donc généralement non disponibles en expérimentation. Pour répondre aux besoins de calcul de l'interception du rayonnement dans les

phases d'installation du colza, cet article présente une méthode permettant de calculer  $\epsilon$  en tenant compte des principales caractéristiques de la morphologie du couvert et du régime radiatif auquel ce dernier est soumis. Les données nécessaires sont limitées : l'indice foliaire, les taux de couverture du sol (deux définitions), la latitude du lieu considéré, la date et le rayonnement incident quotidien. Ce calcul permet une estimation du coefficient moyen d'extinction  $k$  (équation 2). On verra que  $k$  peut être corrélé à l'IF, la période de l'année et la latitude du lieu, ce qui permet de proposer une estimation simple de  $k$  et donc un calcul simplifié de  $\epsilon$ , adapté au cas des faibles IF (colza entre levée et montaison).

**Summary** : Calculation of photosynthetically active radiation interception by a crop with a low leaf area index - particularly when the canopy is not closed - needs a more detailed approach than a simple Beer's law with constant light extinction coefficient ( $k$ ). This paper introduces a simple procedure for the calculation of intercepted radiation, taking into account the ground cover ratio, and using a small set of parameters. The  $k$  coefficient is deduced from this calculation and we show that  $k$  depends on the leaf area index, the location and the season. The significance of introducing ground cover ratio in the calculation of intercepted radiation is estimated, and sensitivity of the method to various parameters is assessed.

**Keywords** : radiation interception, method, ground cover ratio, heterogeneous canopy.

ARTICLE

## Matériel et méthodes

### *Définitions*

Le « taux de couverture du sol par une culture » est un concept qui peut avoir plusieurs sens. Dans un premier sens, il désigne la part de surface de sol masquée par les feuilles et tiges, en visée verticale, rapportée à une surface choisie. On appellera « taux de couverture brut » (TC<sub>b</sub>) cette grandeur. Ce paramètre s'avère assez simple à obtenir par traitement informatisé de photographies après numérisation [9]. Il est aussi par définition strictement égal au coefficient d'interception du rayonnement d'incidence verticale, soit encore le taux d'absorption par un couvert de feuilles totalement absorbantes (« noires »). On note  $\epsilon_{ivn}$  ce coefficient et  $k_{vn}$  le coefficient d'extinction qui lui correspond.

Dans un second sens, le « taux de couverture » désigne la part de surface couverte par les rangs d'une culture discontinue même si, dans les rangs, la végétation ne masque pas tout le sol. On appellera « taux de couverture net » (TC<sub>n</sub>) cette grandeur, qui indique le pourcentage de la surface de sol colonisée par la culture. Pour le colza, TC<sub>n</sub> n'a d'intérêt que pour la période avant la fermeture du couvert entre les rangs puisqu'il est ensuite, par définition, égal à 1. C'est aussi le rapport de la largeur moyenne du rang à la distance entre lignes de semis. Dans le cas d'un couvert comme le colza, où le bord du rang est très irrégulier, l'estimation directe du TC<sub>n</sub> s'avère délicate. Le TC<sub>b</sub> est

toujours inférieur ou égal au  $TC_n$ , la différence entre les deux correspondant au taux de trouées dans le couvert du rang. En d'autres termes, si on note  $TC_r$  le taux de couverture brut sur le rang, au niveau de la parcelle ou d'une placette expérimentale, on a :  $TC_b = TC_n * TC_r$ .

### ***Mise au point théorique***

Dans le cas d'un couvert végétal, l'application directe de la loi de Beer-Lambert (équation 2) à l'échelle journalière est en fait abusive. En effet, cette loi n'est en toute rigueur applicable que pour un milieu isotrope, avec un rayonnement incident unidirectionnel, ce qui n'est pas le cas d'une culture au champ. En effet :

- la distribution des angles d'inclinaison foliaires dans un couvert végétal n'est - en général - pas uniforme ; le « milieu » couvert n'est alors pas isotrope ;
- en conditions naturelles, le rayonnement total incident (PAR) à un instant donné sur un couvert provient de toutes les directions de la voûte céleste, en quantité variable suivant chacune de ces directions. Le couvert n'étant pas isotrope, la valeur de  $k$  (et donc de  $\epsilon$ ) est différente pour chaque angle d'incidence du rayonnement [10] ;
- la distribution angulaire des intensités des rayonnements incidents varie aussi dans le temps, en particulier suivant la hauteur du soleil dans le ciel.

Dans l'estimation de  $k$  par mesure au champ, on mesure PAR et  $PAR_i$  (en fait, on mesure le PAR transmis et  $PAR_i$  est la différence entre PAR incident et PAR transmis), on déduit  $\epsilon$  de ces mesures (équation 1), puis ayant mesuré IF, on inverse l'équation 2 pour estimer le  $k$  moyen du couvert [2]. En mesurant  $PAR_i$ , on réalise donc en fait une intégration (sommation) sur l'espace et le temps des  $\epsilon * PAR$ , l'indice  $\beta$  indiquant les classes angulaires d'incidence du rayonnement. Cela explique que des mesures de courte durée - surtout par temps ensoleillé - conduisent à des  $k$  dépendant de l'heure à laquelle est réalisée la mesure, c'est-à-dire de la hauteur angulaire du soleil à ce moment [11]. Pour obtenir une estimation robuste de  $k$ , il faut intégrer les variations de rayonnement incident en mesurant PAR et  $PAR_i$  sur une période aussi longue que possible. Mais comme il faut également estimer IF pour calculer  $k$ , et que IF varie dans le temps du fait de la croissance ou de la sénescence foliaire, un compromis doit être trouvé entre ces deux exigences contradictoires. Cela se traduit souvent par une mesure sur plusieurs semaines des PAR et  $PAR_i$ , et des mesures approximativement hebdomadaires de l'IF [3]. Pour inverser l'équation 2, on choisira de mettre en regard l'IF à une date de mesure avec l' $\epsilon$  moyen établi sur quelques jours encadrant cette date (ce nombre étant fonction de la vitesse d'évolution de l'IF).

En toute rigueur, la somme de fonctions exponentielles n'étant pas une fonction exponentielle, l'inversion de l'équation 2 pour obtenir un  $k$  moyen est discutable [12]. Cependant, la commodité du modèle de Beer-Lambert et la qualité de l'ajustement statistique qui en résulte (surtout pour des IF supérieurs à 1 ou 2) font que cette pratique est très courante.

La méthode que nous proposons pour estimer  $\epsilon$ , puis  $k$ , revient à simuler par le calcul les résultats que l'on obtiendrait par des mesures de longue durée, au champ, de l'interception du rayonnement.

L'interception instantanée par un couvert du rayonnement provenant d'une direction donnée a été modélisée avec plus ou moins de succès en considérant que la distribution angulaire des éléments de surface du couvert est assimilable à la distribution des éléments de surface de divers volumes simples [13, 14]. Pour une direction donnée du rayonnement incident, le rapport de la surface projetée du volume à la surface propre du volume est égalé au coefficient d'interception. On peut ainsi par exemple décomposer la distribution des fréquences angulaire des éléments de feuillage en classe d'inclinaison pour modéliser le feuillage comme un ensemble de cônes [15]. En particulier, l'ellipsoïde permet une représentation simple et pertinente de la distribution des angles foliaires : par un choix judicieux du rapport (nommé  $x$ ) des dimensions de l'axe horizontal à l'axe vertical, on peut définir pour toute distribution angulaire foliaire choisie pour des feuilles « noires », c'est-à-dire totalement absorbantes, un ellipsoïde présentant pratiquement le même coefficient d'interception [16]. Dans le cas d'un couvert planophile, la fréquence des angles d'inclinaison des surfaces élémentaires foliaires sera assimilable à la fréquence angulaire des éléments de surface d'un ellipsoïde aplati, le cas inverse étant celui d'un couvert à port érectophile. L'avantage d'une telle représentation est que la géométrie d'un couvert peut être synthétisée par le seul paramètre  $x$ . L'estimation du coefficient  $x$  au champ par mesure de la distribution angulaire des feuilles est possible, mais extrêmement fastidieuse. Heureusement, il a été établi que pour la distribution ellipsoïdale, le coefficient d'extinction par un couvert formé d'éléments noirs, d'un rayonnement d'incidence  $\beta$  (mesuré relativement à l'horizontale), est :

$$k_n = (x^2 + \cot^2 \beta)^{1/2} / (x + 1,774 (x + 1,182)^{-0,773}) \quad (3) \quad [10, 17].$$

Ainsi, connaissant  $\epsilon_{in}$ , l'extinction du rayonnement par un couvert totalement absorbant pour une incidence  $\beta$ , et IF, on peut calculer  $k_n$  par inversion de l'équation 2, puis par inversion de l'équation 3, le  $x$  caractérisant le couvert.

### ***Estimation de l'interception du rayonnement et de ses paramètres pour un couvert fermé***

Partant des données d'IF et TCb d'un couvert, pour un site de latitude connue et pour lequel on dispose des valeurs quotidiennes de rayonnement global sur une période donnée, on peut calculer le rayonnement intercepté et en déduire les  $\epsilon_{in}$  et  $k$  moyens du couvert par la procédure suivante, synthétisée par la *figure 1* :

(I)  $\epsilon_{in} = TCb$  (4) par définition (voir plus haut)

(II)  $k_{vn} = -1/IF \ln(1 - \epsilon_{in})$  (5) par inversion de l'équation 2

(III) pour  $\beta = 90^\circ$  (cas de la visée verticale) l'équation 3 devient :

$$k_{vn} = x / (x + 1,774 (x + 1,182)^{-0,773}) \quad (6)$$

on l'inverse numériquement pour établir le  $x$  caractéristique du couvert.

(IV) détermination de la répartition quotidienne du rayonnement incident total entre rayonnement direct et diffus suivant la procédure de Spitters *et al.* [18]. Cette procédure utilise le rapport entre la valeur mesurée de rayonnement et sa valeur potentielle, établie suivant la latitude, la date et la constante solaire extra-atmosphérique.

(V) détermination de la distribution angulaire des rayonnements incidents quotidiens : choix d'une discrétisation de la voûte céleste pour les calculs quotidiens du rayonnement intercepté, d'origine directe ou diffuse, par classe d'incidence. On suppose un régime radiatif symétrique de part et d'autre du midi solaire (même répartition par classe angulaire d'incidence du rayonnement le matin ou l'après midi), ce qui permet de limiter les calculs à la demi-journée, ou demi-voûte céleste. Pour le rayonnement diffus, on discretise la demi-voûte en 90 classes de hauteur angulaire (1° chacune) et on attribue le rayonnement de la classe à sa hauteur angulaire médiane (beta'). On considère la distribution des intensités selon beta' suivant le modèle du ciel couvert standard (Standard Overcast Sky ou SOCS) [14]. Pour le rayonnement direct, la demi-voûte est discrétisée en 100 classes de hauteur angulaires. Pour chaque jour, l'amplitude de ces classes dépend de la hauteur maximale du soleil ; compte tenu des latitudes et dates considérées dans nos calculs, on aboutit à une amplitude d'environ un demi-degré. Avec une distribution sinusoïdale (centrée sur midi) de l'intensité du rayonnement direct suivant l'heure solaire [10], on calcule la quantité de rayonnement correspondant à chaque classe d'incidence et on l'attribue à l'incidence médiane de la classe (beta'').

(VI) calcul de  $k_{n\beta}$  avec l'équation 3 pour chaque classe angulaire de rayonnement direct ou diffus. La répartition angulaire du rayonnement diffus étant fixée (SOCS), les  $k_{n\beta'}$  ne sont calculés qu'une fois pour un couvert donné. En revanche, la hauteur angulaire maximale du soleil variant chaque jour, les  $k_{n\beta''}$  doivent être calculés pour chaque jour. De plus, pour tenir compte de la diffusion du rayonnement dans le couvert, due à la transmittance et à la réflectance des feuilles, on corrige les  $k_{n\beta}$  pour obtenir les  $k_{\beta}$  :

$$k_{\beta} = k_{n\beta} (1 - \sigma)^{0,5} \quad (7) \quad [19],$$

sigma étant la somme de la transmittance et de la réflectance pour le PAR (on prend  $\sigma = 0,2$ , d'où  $k_{\beta} = 0,8944 * k_{n\beta}$ ).

(VII) quotidiennement (jour j), séparément pour le rayonnement direct et pour le rayonnement diffus, et par classe angulaire d'incidence (beta = beta' ou beta''), calcul du rayonnement intercepté par combinaison des équations 1 et 2 :

$$PAR_{i\beta} = (1 - e^{-k_{\beta} * I_F}) * PAR_{\beta} \quad (8)$$

puis sommation des rayonnements interceptés sur la journée j :

$$PAR_j = \Sigma_{\beta'} PAR_{i\beta'} + \Sigma_{\beta''} PAR_{i\beta''} \quad (9)$$

(VIII) sommation sur toutes les journées j de la période p choisie, des rayonnements PAR incidents et des rayonnements interceptés, calcul du epsilon moyen comme rapport de ces deux sommes :

$$\epsilon_{p} = \Sigma_j PAR_{i\beta} / \Sigma_j PAR_j \quad (10)$$

et calcul du k moyen pour la période p, par inversion de l'équation 2 :

$$k_p = -1/IF \ln(1 - \epsilon_{ip}) \quad (11)$$

Pour obtenir une estimation représentative du k moyen du colza d'hiver, on a effectué pour chaque situation expérimentale disponible (structure de couvert fermé définie par IF et TCb) le calcul du rayonnement intercepté, puis du k moyen qui en résulte, avec des données de rayonnement quotidien pour une période relativement longue (166 jours), du premier octobre à mi-mars. Ces conditions d'éclairement correspondent à un soleil bas et à un rayonnement majoritairement diffus. À titre de comparaison, les mêmes calculs ont été effectués en utilisant les données de rayonnement de la période du premier mars à fin mai (92 jours), donc avec un soleil plus haut et un rayonnement presque équitablement réparti entre direct et diffus. En référence aux conditions d'éclairement hivernal, ce second calcul permet d'estimer le k qui serait trouvé avec un colza de même port, mais semé au printemps [3]. Afin d'évaluer l'effet sur l'estimation de k lié aux variations des conditions d'éclairement, les calculs ont été faits pour plusieurs sites et plusieurs années (*tableau 1*).

### ***Estimation de l'interception du rayonnement et de ses paramètres pour un couvert non fermé***

Dans le cas d'un couvert en rangs non fermé, la procédure de calcul est globalement la même, mais il faut de plus tenir compte du TCn, représentant la part du sol sur laquelle il y a effectivement couvert donc interception. L'interception ( $\epsilon_{ip}$ ) est considérée nulle pour la partie du sol non colonisée par la végétation. Sur le rang, il faut considérer la valeur effective de l'IF, égale à l'IF mesuré sur la placette (sol nu compris), divisé par TCn. À l'échelle de la placette, l'équation 2 devient :

$$\epsilon_{ip} = TCn * (1 - \exp^{-k*IF/TCn}) \quad (12) \quad [10].$$

De plus, le TCb mesuré ne correspond plus à  $\epsilon_{ip}$  (caractéristique du feuillage sur le rang), mais  $TCn * \epsilon_{ip}$ . On considère donc

$$\epsilon_{ip} = TCb/TCn \quad (13)$$

dans les estimations de  $k_{vn}$ ,  $x$ , et les calculs qui en découlent.

La difficulté se trouve dans l'estimation du TCn. Le TCn ne peut être mesuré directement, car les bords des rangs sont très irréguliers. En considérant pour bord du rang la ligne joignant les extrémités des feuilles les plus grandes, on surestimerait fortement la largeur moyenne des rangs mais surtout on considérerait des rangs présentant une forte hétérogénéité interne, puisque les bords de ces « rangs » présenteraient un taux de trous beaucoup plus élevé que le centre du rang. Or le raisonnement exposé jusqu'à présent sous entend que le rang présente une homogénéité interne suffisante.

Pour évaluer TCn par la largeur représentative des rangs, on a donc cherché à estimer une longueur de feuilles en projection verticale (ce qui est mesuré par un  $\epsilon_{iv}$  sur le rang) représentative de toute la population de feuilles. La population des plantes a été décrite en les classant suivant leur diamètre au collet et en répartissant cette population en six classes (par date et traitement). À chaque date de mesure, la longueur maximale représentative des feuilles (L) est estimée par la moyenne des plus longues feuilles ( $l_{max_i}$ ) de chacune des six classes de plantes pondérée par la part de chaque classe dans l'IF total ( $pcIF_i$ ).

$$L = 1/6 * \text{SIGMA}_1^6 (l_{\max_i} * \text{pciF}_i) \quad (14)$$

TCn est estimé par le rapport de la projection verticale ( $L_{pv}$ ) d'une feuille de longueur L, sur la moitié de la distance ( $D_{ir}$ ) entre lignes de semis :

$$\text{TCn} = L_{pv} / (0,5 * D_{ir}) \quad (15).$$

$L_{pv}$  est déduite de L en faisant l'hypothèse que le profil en longueur des feuilles correspond à la demi-ellipse de paramètre x, valeur moyenne des x trouvés pour les couverts (paragraphe précédent).  
Alors

$$L_{pv} = 2 L (0,5 (1 + 1/x^2))^{-0,5} / \pi \quad (16)$$

car  $L_{pv}$  est le grand axe de l'ellipse et L son demi-périmètre (le périmètre de l'ellipse est :  $\pi L_{pv} (0,5 (1 + 1/x^2))^{0,5}$ ). En vue de la simplification de la méthode, on a également cherché une éventuelle relation entre L et des caractéristiques de la plante moyenne ou médiane des échantillons.

Les calculs d'interception du rayonnement et de k moyen ont été effectués pour les situations expérimentales de couvert non fermé (définis par IF, TCb et TCn) avec les mêmes données météorologiques que pour les couverts fermés (*tableau 1*). On a ensuite étudié l'éventualité d'une corrélation entre k moyen et IF.

### ***Origine des données expérimentales sur les couverts***

On a considéré des couverts de colza d'hiver de variété Goéland dans une expérience au champ. Le colza a été semé en conditions normales en Champagne crayeuse (Le Rafidin, 10 km à l'ouest de Châlons-en-Champagne). À diverses dates, de l'automne au printemps, des placettes étaient photographiées puis prélevées et leur IF était mesuré (planimètre optique Delta-T Device). Les photographies en visée verticale ont été prises depuis la levée jusqu'à la fermeture du couvert, ce qui correspond à des IF de 0 à 3 environ. Ces images ont ensuite été numérisées et traitées informatiquement pour en déduire le TCb. La procédure de prise de vue et de traitement des images - présentée par ailleurs - donne une estimation précise du TCb [9].

### ***Analyse de sensibilité***

L'estimation de k utilise plusieurs autres grandeurs estimées. On a donc évalué l'importance de l'erreur potentiellement imputable à chacune de ces sources, afin de mettre en évidence les paramètres critiques pour l'amélioration (et la simplification) de la méthode. Les calculs ont utilisé les jeux de données météorologiques pour le site de Dijon, latitude moyenne des cultures du colza en France (8 années de données météorologiques).

\* Une première source d'erreur potentielle est la discrétisation de la voûte céleste en classes angulaires de rayonnement. On a effectué les mêmes calculs de epsilon et k en considérant 9 classes angulaires pour le rayonnement diffus, et 10 pour le rayonnement direct, ce qui revient pratiquement à discrétiser la voûte céleste par dizaines de degrés. La précision de la description du rayonnement incident est donc dégradée d'un facteur 10.

\* On a testé le rôle de la périodicité des données météorologiques utilisées en comparant les valeurs de epsilon et k obtenues à partir des données quotidiennes de rayonnement, avec celles obtenues à partir des données décennales.

\* On sait que l'estimation du TCn est délicate. On a estimé la sensibilité de l'estimation de epsilon et k à une variation de TCn en refaisant les calculs pour TCn égal à 50, 75, 90, 110, 125, 150 et 200 % de la valeur expérimentale. Cette fourchette, de la moitié au double de la valeur réelle, semble assez large pour couvrir les niveaux d'erreur réalistes dans l'estimation de TCn.

\* Le paramètre x est estimé à partir d'autres données. Comme pour TCn, on a estimé la sensibilité de l'estimation de epsilon et k à une variation de x en refaisant les calculs de epsilon pour x égal à 50, 75, 90, 110, 125, 150 et 200 % de la valeur expérimentale.

## Résultats

### ***Estimation du TCn : l'intérêt de caractériser des plantes médianes***

Pour l'estimation de TCn on a pris comme valeur moyenne  $x = 2,69$  (établi sur les couverts fermés, cf. paragraphe Estimation de l'interception du rayonnement et de ses paramètres pour un couvert fermé).

La *figure 2* fait apparaître une corrélation entre TCn et IF. Cette relation

a été ajustée à l'équation

$$TCn = 1 - \exp^{(-3,13*IF)} \quad (17).$$

Il est hasardeux de généraliser cette régression établie sur les données d'une expérience car ses paramètres dépendent peut-être de l'écartement des lignes de semis, qui était ici de 35 cm, valeur courante dans la pratique agricole.

L'estimation du TCn est fondée sur la longueur moyenne (pondérée par classe de plantes) de feuilles les plus longues. On a aussi trouvé que cette longueur moyenne est égale à 1,08 fois la longueur de la plus longue feuille de la plante médiane ("0,01, seuil 5 %). Ce résultat, s'il est généralisable, permettra de simplifier considérablement la procédure d'estimation du TCn. Il ne sera plus nécessaire de caractériser les feuilles de toute la population des plantes, mais simplement d'identifier des plantes « médianes » (ce qui est aisé par la mesure du diamètre au collet), et de mesurer seulement la longueur de la plus grande feuille de ces plantes. La lourdeur de la méthode actuelle d'estimation du TCn est en effet un obstacle à son usage.

### ***Estimation de k : dépendance vis-à-vis de la saison et du lieu***

Les *figures 3* et *4* présentent la gamme de variation de epsilon et k moyen, calculé pour chaque placette en tenant compte du TCn et IF, c'est-à-dire représentant les propriétés du couvert sur le rang (12). Par souci de lisibilité, seules les situations extrêmes ont été représentées : latitudes extrêmes (Taastrup et Montpellier), rayonnement hivernal ou printanier. On constate (*figure 3*) que epsilon est légèrement plus élevé avec un rayonnement hivernal que printanier : la géométrie du couvert est plus apte à capter des rayonnements assez bas, ce qui est le cas du direct hivernal et du diffus. Cela se traduit (*figure 4*) par une nette décroissance curvilinéaire de k quand l'IF croît. On a



trouvé des  $x$  (rapport du grand au petit axe de la distribution éllipsoïdale des angles foliaires) variants entre 3 et 1,7, avec une tendance (peu nette) à sa diminution (évolution ellipse vers sphère) quand le couvert se ferme. Sur tous les sites, un test d'égalité par données appariées (mêmes placettes, mêmes site et année) montre une différence très hautement significative entre  $k$  estimé avec le rayonnement hivernal ( $k_h$ ) et  $k$  estimé avec le rayonnement printanier ( $k_p$ ). Chartier *et al.* [3] arrivent à une conclusion similaire par la mesure directe de  $\epsilon$ . Ayant calculé le  $k_h$  (resp.  $k_p$ ) moyen pour chaque couvert (placette) étudié, on a calculé les  $k_h$  (resp.  $k_p$ ) centrés et réduits pour étudier les effets site et année, par analyse normalisée de variance. Tous les effets (et leur interaction) sont significatifs, mais l'effet site est très dominant.

Dans l'étude de la corrélation entre  $k$  et IF, on a retenu, après comparaison de plusieurs modèles curvilinéaires,

$$k = k_0 - A * IF^B \quad (18).$$

Les paramètres de cette équation ont été ajustés pour chaque site et pour l'ensemble des données disponibles, considérant le rayonnement hivernal ou printanier (*tableaux 2a* et *b*). Comme l'effet site semble déterminant pour  $k$ , on a étudié la régression linéaire entre les paramètres de

l'équation 18 et la latitude :

$$\text{paramètre} = \alpha + \beta * \text{latitude} \quad (19).$$

La corrélation est significative (sauf pour  $k_0$  en situation hivernale), mais les coefficients de détermination sont médiocres si on considère chaque paramètre séparément (*tableau 3*).

En calculant  $k$  à partir de  $\epsilon$ , mais sans tenir compte du TCn, c'est-à-dire en considérant le modèle  $\epsilon = 1 - \exp(-k * IF)$  (2), on obtient des évolutions de  $\epsilon$  et  $k$  en fonction de l'IF très similaires à celles obtenues en tenant compte de TCn. Les  $k$  ajustés sont toutefois plus dispersés qu'avec le modèle de l'équation 12 qui paraît donc préférable, sur le plan statistique comme sur le plan théorique. Comme pour le calcul précédent, les  $k_h$  et  $k_p$  sont très significativement différents, et l'effet lieu (étudié par analyse de variance sur les  $k_h$  et  $k_p$  centrés et réduits) est prédominant, bien que l'effet année et l'interaction lieu\*année soient également significatifs. On a également ajusté l'équation 18 site par site aux  $k$  « hors TCn » (*tableaux 4a* et *b*) : on constate que les carrés moyens résiduels (CMR) sont cinq à dix fois plus élevés que pour le calcul avec TCn. La recherche de corrélation linéaire entre les paramètres de l'équation 18 et la latitude donne les résultats résumés dans le *tableau 5*.

On a aussi calculé le  $k_v$  moyen (coefficient d'extinction pour le rayonnement vertical). Sa valeur est 0,747. La *figure 5* présente  $\epsilon$  en fonction de IF, pour un rayonnement hivernal, pour les sites de Taastrup et Montpellier, calculés avec ou sans prise en compte du TCn (à partir des équations 12, 17, 18 et 19 et avec les paramètres des *tableaux 2a, 3, 4a* et *5*) et  $\epsilon$  calculé avec  $k_v$  (et l'équation 2).

Pour une meilleure comparaison des  $\epsilon$  obtenus avec ou sans prise en compte du TCn, on a calculé le rapport  $\epsilon_1/\epsilon_2$ , où  $\epsilon_1$  représente le  $\epsilon$  calculé avec TCn et  $\epsilon_2$  sans TCn. La *figure 6* présente la variation de  $\epsilon_1/\epsilon_2$  suivant l'IF. La corrélation

linéaire du rapport  $\epsilon_1/\epsilon_2$  avec l'IF a été étudiée pour les IF inférieurs à 1,5. On obtient la régression :  $\epsilon_1/\epsilon_2 = 0,8325 + 0,1148 \text{ IF}$  ( $R^2 = 0,455$ ) (20), ce qui donne  $\epsilon_1 = \epsilon_2$  pour  $\text{IF} = 1,46$ . Pour les IF supérieurs, on doit théoriquement avoir  $\epsilon_1 = \epsilon_2$  (sauf pour le cas des TCn encore inférieurs à 1).

### **Analyse de sensibilité**

\* La comparaison des estimations des  $\epsilon_1$  et  $k$  obtenues avec une discrétisation de la voûte céleste degré par degré ou par tranche de 5-10° (9 tranches par demie-voûte pour le direct, 10 pour le diffus) montre que les deux sont très étroitement corrélées ( $R^2 = 0,99$  pour les  $\epsilon_1$ ,  $R^2 = 0,98$  pour les  $k$ ,  $n = 3\,445$ ). Les différences relatives sur l'estimation de  $k$  ne sont supérieures à 1 % que dans le cas des IF inférieurs à 0,12. On peut donc réduire les calculs nécessaires à l'estimation de  $\epsilon_1$  (à partir de TCb, TCn et IF) en utilisant une discrétisation en 10 classes de la voûte céleste, sans perte de précision.

\* Les valeurs de  $k$  obtenues à partir des données de rayonnement décadaires sont très proches de celles obtenues à partir de données quotidiennes ( $R^2$  de 0,99 pour le rayonnement d'hiver, 0,98 pour celui de printemps). On peut donc utiliser les données météorologiques décadaires à la place des données quotidiennes avec peu de perte de précision.

\* La *figure 7* présente les rapports des  $\epsilon_1$  calculés avec une variation de TCn, au  $\epsilon_1$  de référence. Chaque série de points correspond à un taux par lequel le TCn a été multiplié. Pour des IF supérieurs à 0,5, les points correspondant à des taux de modification de TCn supérieurs ou égaux à 125 % sont confondus.

\* La *figure 8* présente les rapports des  $\epsilon_1$  calculés avec une variation du coefficient  $x$ , au  $\epsilon_1$  de référence. Chaque série de points correspond à un taux par lequel  $x$  a été multiplié.

### **Discussion**

Le TCn est le paramètre dont l'estimation pose le plus problème dans notre procédure de calcul du rayonnement intercepté. Sa définition même peut être sujette à discussion. Nous avons choisi une définition qui, à défaut d'être très simple, est cohérente avec les besoins de la méthode (homogénéité interne sur le rang). Notre définition autorise une estimation par régression à partir de l'IF, ou à partir des caractéristiques de la plante médiane du peuplement. Ces deux méthodes indirectes devraient cependant être encore validées dans d'autres situations expérimentales. D'autres définitions de la largeur du rang peuvent être imaginées, par exemple basées sur l'étude de l'homogénéité interne du rang en terme de trouées dans le couvert. Elles nécessitent une approche par traitement d'image (étude des densités de trous), qui reste à faire.

Il faut garder à l'esprit que les paramètres à utiliser pour une méthode de calcul de  $\epsilon_1$  (ou  $k$ ) incluant le TCn dépendront de la définition même du TCn. De plus l'estimation de  $\epsilon_1$  s'avère très sensible au TCn (*figure 7*) surtout en cas de sous-estimation (bien qu'une sous-estimation devienne pratiquement très improbable quand IF dépasse 1, puisqu'on approche la fermeture du couvert). Le TCn est donc le paramètre le plus critique pour l'usage de l'équation 12.

Contrairement au cas du TCn, il apparaît que le calcul de l'interception est assez peu sensible aux erreurs sur l'estimation du coefficient  $x$  (*figure 8*). L'erreur n'est perceptible que pour des IF

inférieurs à 0,2 et se limite à 5 %. Cela justifie *a posteriori* le calcul approximatif de  $x$ , nécessaire dans notre méthode pour estimer TCn, puisque  $x$  n'avait pas été mesuré.

Alors que l'on considère souvent  $k$  comme un paramètre indépendant de l'IF, notre calcul a mis en évidence la forte corrélation de  $k$  à l'IF, surtout sensible aux faibles IF. Ceci était tout à fait prévisible, puisque le  $k$  moyen n'est qu'un paramètre d'ajustement à une fonction exponentielle (équation 2 ou 12), modèle statistique dont on sait qu'il n'est pas rigoureusement adapté à la représentation de  $\epsilon_{\text{ioni}}$  en fonction de l'IF dans le cas d'un rayonnement composé de multiples incidences. Comme fort peu de recherche (et de mesures) ont été faites pour des IF faibles, ce point est souvent passé sous silence. Le paramètre  $k$  apparaît également dépendre de la saison et de la latitude, ce qui est tout à fait logique puis que ces paramètres déterminent la distribution angulaire du rayonnement direct, ainsi que la répartition du rayonnement global entre direct et diffus. On a constaté (*figure 3*) des différences de l'ordre de 0,05 à 0,1 pour  $\epsilon_{\text{ioni}}$  entre les situations extrêmes étudiées (Taastrup printemps/ Montpellier hiver). Ceci représente une erreur relative de l'ordre de 10 à 20 % (pour des IF inférieurs à 2), ce qui est non négligeable et justifie la prise en compte de la latitude et de la saison dans le calcul de l'interception du rayonnement par la culture. Cette dépendance de  $k$  vis-à-vis de la latitude et de la date doit conduire à la prudence quand on veut utiliser des valeurs de  $k$  établies dans un site donné, pour le traitement de données obtenues dans un autre site.

On constate d'ailleurs que nos valeurs calculées pour  $k$  tendent, quand IF atteint 2, vers les valeurs trouvées dans la littérature : de l'ordre de 0,84 [4], 0,4 à 0,6 [5], 0,65 [6], 0,90 [7]. Ces derniers résultats sont déduits de mesures sous des couverts fermés, avec des IF assez élevés, souvent après montaison et assez tard au printemps ou en été. Dans certains cas, le  $\epsilon_{\text{ioni}}$  concerne siliques et feuilles ensemble. On est bien alors dans les cas de « rayonnement printanier » et d'« IF élevé » de la *figure 4*, d'autant plus qu'à partir de la montaison, la morphologie foliaire évolue vers des feuilles sessiles, plus lancéolées et érigées (donc des  $k$  plus faibles) que celles en place en hiver. Les valeurs de  $k$  estimées expérimentalement par mesures de rayonnement en printemps-été ne sont donc pas pertinentes pour l'estimation du rayonnement intercepté précocément par la culture. Les  $\epsilon_{\text{ioni}}$  plus élevés obtenus avec des conditions d'éclairement hivernales (*figures 3* et *5*) montrent que la morphologie foliaire hivernale (celle de notre essai au champ) s'avère mieux adaptée que la morphologie estivale pour une interception efficace des rayonnements hivernal.

La comparaison des estimations des  $\epsilon_{\text{ioni}}$  calculés avec ou sans prise en compte du TCn (*figures 5* et *6*) montre une différence importante pour les faibles IF, avec une différence relative d'autant plus forte que l'IF est bas (jusqu'à 25 % de surestimation dans le cas « sans TCn » par rapport à la référence « avec TCn »). Le calcul « sans TCn » surestime  $\epsilon_{\text{ioni}}$  car dans ce cas il n'y a pas de surface perdue pour la réception, et l'efficacité marginale de l'interception sur le rang diminue quand l'IF augmente. Ainsi - en simulation - le gain d'interception dû à l'absence d'inter-rang fait plus que compenser la moindre interception sur le rang. Mais la différence des deux estimations devient négligeable pour un IF supérieur à 1,5, ce qu'on a quantifié par une régression liant les deux estimations de  $\epsilon_{\text{ioni}}$  suivant l'IF. Dans les cas où l'estimation de TCn est douteuse ou impossible, une solution peut être de faire l'impasse sur ce paramètre, estimer  $\epsilon_{\text{ioni}}$  « hors TCn » puis, si l'IF est inférieur à 1,5, corriger cet  $\epsilon_{\text{ioni}}$  en fonction de l'IF (équation 20) pour annihiler la surestimation due à la non prise en compte de la structure en rangs du couvert.

Reste toutefois à définir les limites de validité de l'équation 20 selon la configuration de la culture (distance entre rangs en particulier).

En revanche, il apparaît clairement (*figure 5*) que l'assimilation du taux de couverture en visée verticale (TCb) au taux d'interception (ce qui revient à l'assimilation du  $k_{vn}$  au  $k$  moyen) conduit à une forte sous-estimation de l'interception. L'erreur absolue atteint couramment 10 % (aux faibles IF) soit une erreur relative de 20 à 30 %. L'estimation de  $\epsilon$  par cette approche est donc à proscrire.

On a aussi mis en évidence que l'estimation de  $\epsilon$  (et  $k$ ), en se fondant sur des données de rayonnement décadaires, ou bien en considérant une description plus fruste (10 classes angulaires au lieu de 100) de la distribution du rayonnement, conduit à une faible perte de précision par rapport à l'estimation de référence (100 classes angulaires, données météorologiques quotidiennes). Dans le cas où l'on souhaite effectuer le calcul détaillé de  $\epsilon$ , on peut donc simplifier la procédure de calcul. Si l'on veut utiliser un modèle « de Beer » (équation 2 ou 12), on peut utiliser pratiquement les mêmes paramètres pour une périodicité décadaire ou quotidienne des données de rayonnement.

On peut même à la limite, utiliser la régression établie dans un autre article entre TCb et IF [9], pour estimer à une date donnée et dans un site connu,  $\epsilon$  à partir du seul TCb en utilisant l'équation 12. En effet, de TCb on déduit IF, dont on déduit TCn (équation 17), alors qu'on déduit  $k$  des équations 18 et 19 et des *tableaux 2 et 3*. Mais une telle approche, qui conduit à accumuler les régressions à partir de très peu de mesures, nécessiterait une validation expérimentale.

Dans cet article, les calculs ont été réalisés à IF constant, comme lorsqu'on considère le rayonnement intercepté à l'échelle de la journée. Dès que l'on passe à des échelles de temps plus longues, il faut tenir compte de la variation de l'IF due à la croissance (ou à la sénescence) du couvert. L'interception dépend en effet très fortement de l'IF, surtout pour les IF faibles (*figure 3*). Dans le cas du calcul de  $\epsilon$  pour un couvert en croissance au champ, on devra donc introduire une procédure d'interpolation des IF entre les dates de mesures, ou un modèle performant de simulation de la dynamique de l'IF [20].

On doit aussi garder à l'esprit que tous les calculs précédents tendent encore à sous-estimer  $\epsilon$  réel pour un couvert non fermé, car ils considèrent que seule une part du rayonnement égale à TCn atteint les rangs. Mais en pratique, une part du rayonnement d'incidence oblique et devant atteindre l'inter-rang (sol nu) si le rang était de hauteur nulle, est interceptée latéralement par les rangs. Et ce d'autant plus que les rangs sont hauts, leur orientation éloignée de l'axe est-ouest, et que la latitude est élevée [21]. Les estimations de  $k$  proposées dans cet article sont donc des valeurs minimales.

## CONCLUSION

L'utilisation d'images numérisées de couverts de colza au stade rosette, en visée verticale, permet l'estimation du taux de couverture brut (TCb) du couvert [9]. Cette grandeur, associée à l'estimation de TCn et à la mesure de l'IF, permet de paramétrer ( $x$ ) une distribution ellipsoïdale des angles foliaires. En utilisant des hypothèses simples sur la distribution du rayonnement incident, tous ces paramètres permettent de calculer l'interception du rayonnement et d'en déduire un coefficient moyen ( $k$ ) d'extinction de la lumière pour un couvert non fermé. Ce coefficient, dont on a montré qu'on peut aussi l'estimer à partir de l'IF et de la latitude, permet en retour un calcul simplifié de  $\epsilon$  en utilisant un formalisme proche de la loi de Beer (équation 12). On disposera donc en

définitive de deux méthodes de calcul du rayonnement intercepté : une par simulation relativement mécaniste, et une simplifiée obtenue par intégration des résultats de la première suivant le formalisme de Beer, avec prise en compte ou non du taux de couverture nette du sol. L'interception du rayonnement dépendant au premier chef de l'IF, le calcul de l'interception du rayonnement sur plusieurs jours nécessitera évidemment de coupler une des méthodes présentées ici avec un modèle de dynamique de l'IF.

Les méthodes décrites dans cet article permettent une estimation du rayonnement intercepté, alors que la mesure directe en est particulièrement difficile dans le cas d'un couvert bas présentant une structure en rangs marquée. Elles permettront donc de généraliser l'estimation de l'interception du rayonnement tout en offrant une meilleure précision des résultats dans des cas où l'approche courante, utilisant un  $k$  moyen établi sur couvert fermé s'avère largement erronée.

Les conclusions présentées ici se fondent sur une approche théorique étayée, qui reste toutefois à valider par des mesures d'interception, difficiles à réaliser sur couvert discontinu et rasant. Une mesure par photographies hémisphériques serait probablement la plus simple et rapide, quoiqu'elle dépende elle aussi d'hypothèses sur la distribution angulaire des rayonnements incidents.

Pour des estimations pratiques du rayonnement intercepté par une culture, le modèle « de Beer » reste le plus simple. La prise en compte de  $TC_b$ ,  $TC_n$  et  $x$  ne complique pas excessivement la collecte des données au champ, et permet un calcul plus précis. L'estimation de  $TC_n$  - paramètre le plus critique - peut être indirecte, voire complètement laissée de côté, moyennant une correction du  $\epsilon$  obtenu sans ce paramètre. La validation de la méthode proposée permettra donc de disposer d'un outil assez simple et précis de calcul du rayonnement intercepté par le colza avant le stade montaison. Ses présupposées théoriques n'étant en rien spécifiques du colza, elle doit aussi pouvoir être appliquée - moyennant une reparamétrisation complète - à toute autre culture.

## Remerciements

Pour leur collaboration, à E. Justes (organisation de l'expérience de Châlons), M. Lauransot et B. Gabrielle (traitement des échantillons), P. Belluomo (traitement informatisé des images).

## REFERENCES

1. JUSTES E, DENOROY P, GABRIELLE B, GOSSE G (2000). Effect of crop nitrogen status and temperature on the radiation use efficiency of winter oilseed rape. *Eur J Agron*, 13: 165-77.
2. 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.
3. CHARTIER M, FABRE B, GOSSE G, RODE JC (1983). Bilan radiatif d'un couvert de colza. In : *Proceedings 6th International Rapeseed Conference*. Paris : GCIRC, Tome 1 : 154-65.
4. GOSSE G, VARLET-GRANCHER C, BONHOMME R, CHARTIER M, ALLIRAND JM, LEMAIRE G (1986). Production maximale de matière sèche et rayonnement intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 6 : 47-56.

5. MENDHAM NJ, SALISBURY PA. (1995). Physiology : crop development, growth and yield. In : KIMBE, MCGREGOR, eds. *Brassica oilseed. Production and utilization*. Cambridge : CAB : 11-64.
6. MORRISON MJ, STEWART DW (1995). Radiation use efficiency in summer rape. *Agronomy J*, 87 : 1139-42.
7. HABEKOTTE B (1996). *Winter oilseed rape. Analysis of yield formation and crop design for higher yield potential*. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, 156 p.
8. SINOQUET H, VARLET-GRANCHER C, BONHOMME R (1993). Modelling radiative transfer within homogeneous canopies : basic concepts. In : VARLET-GRANCHER C, BONHOMME R, SINOQUET H, eds. *Crop structure and light microclimate, Characterization and applications*. Paris : INRA Publ. : 207-28.
9. DENOROY P, JUSTES E, GOSSE G (2000). Mesurer le taux de couverture du sol pour estimer les principales caractéristiques d'une culture de colza avant montaison. *OCL*, 7: 118-23.
10. JONES HG (1992). *Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge : Cambridge University Press, 428 p.
11. FLENET F, KINIRY JR, BOARD JE, WESTGATE ME, REICOSKY DC (1996). Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean and sunflower. *Agron J*, 88 : 185-90.
12. GOUDRIAAN J, VAN LAAR HH (1994). *Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Current Issues in Production Ecology*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 238 p.
13. CAMPBELL GS (1977). *An introduction to environmental biophysics*. New York : Springer Verlag.
14. MONTEITH JL, UNSWORTH MH (1990). *Principles of environmental physics*. London : Edward Arnold Publ., 291 p.
15. LEMEUR R (1973). A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, Jerusalem artichoke, corn, and soybean canopies using actual stand structure data. *Agricultural Meteorology*, 12 : 229-47.
16. CAMPBELL GS (1986). Extinction coefficient for radiation in plant canopies using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36 : 317-21.
17. CAMPBELL GS (1990). Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49 : 173-6.
18. SPITTERS CJT, TOUSSAINT HAJM, GOUDRIAAN J (1986). Separating the diffuse and direct components of global radiation and its implication for modeling photosynthesis. Art I. Components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38 : 217-29.
19. GOUDRIAAN J (1977). *Crop micrometeorology ; a simulation study. Simulation Monograph*. Wageningen : PUDOC, 249 p.

20. GABRIELLE B, DENOROY P, GOSSE G, JUSTES E, ANDERSEN MN (1998). A model of leaf area development and senescence for winter oilseed rape. *Field Crops Research*, 57 : 209-22.

21. VARLET-GRANCHER C, BONHOMME R, SINOQUET H (1993). *Crop structure and microclimate. Characterization and applications*. Paris : INRA Publ., 518 p.

Illustrations

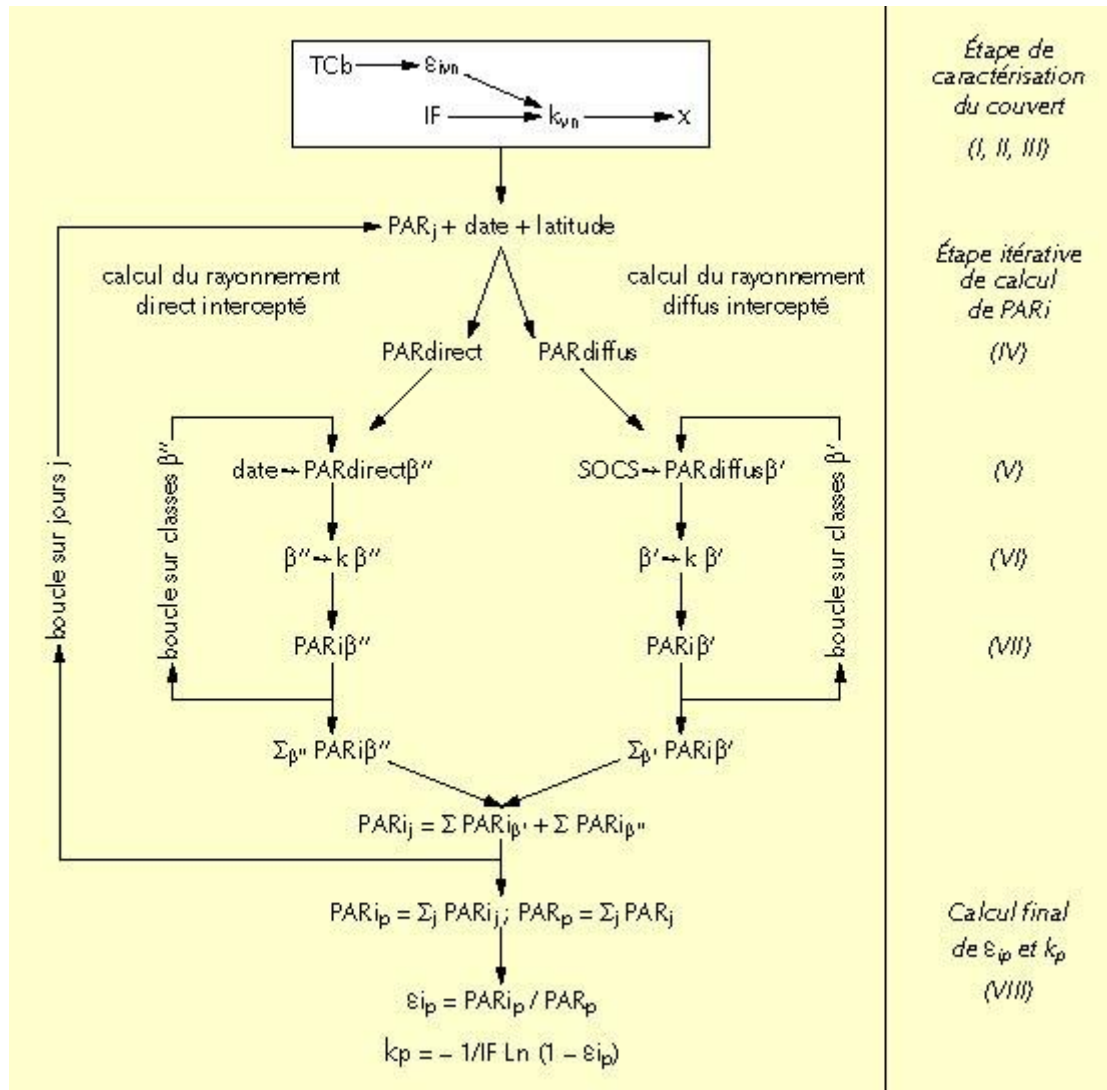


Figure 1. Organigramme de la procédure d'estimation de  $\epsilon$  et  $k$  moyens. Les chiffres romains font référence aux étapes décrites dans le texte.

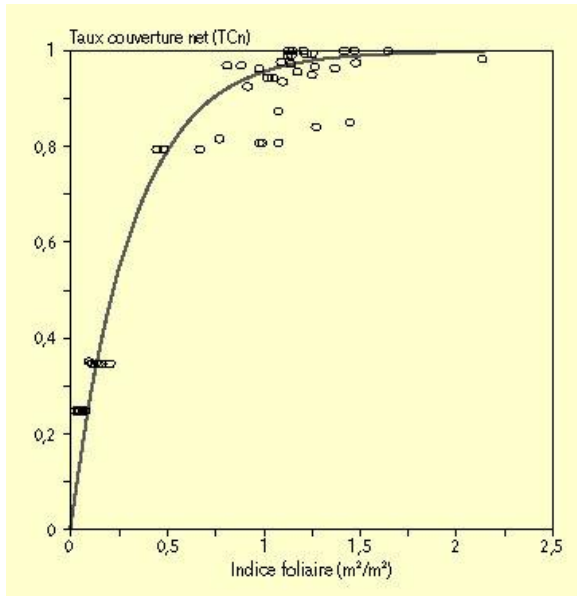


Figure 2. Taux de couverture net (TCn) de la culture suivant l'IF, pour une distance entre ligne de semis de 35 cm. Régression :  $TCn = 1 - e^{-3,13*IF}$ .

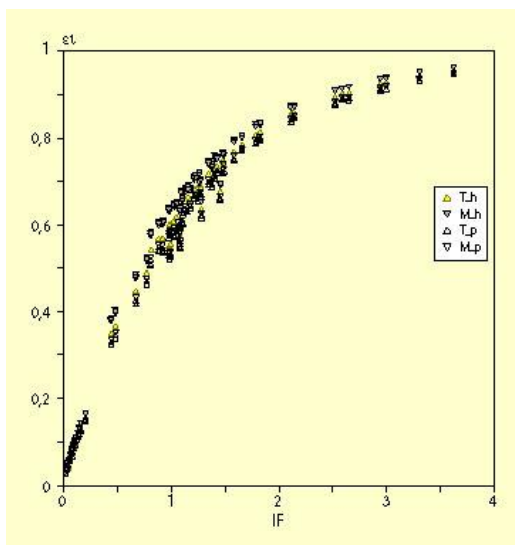


Figure 3. Valeurs calculées de  $\epsilon$ , tenant compte de la distribution des angles foliaires, du taux net de couverture du sol et de la distribution du rayonnement incident : pour Taastруп (resp. Montpellier) avec rayonnement hivernal :  $T_h$  (resp.  $M_h$ ), et avec rayonnement printanier :  $T_p$  (resp.  $M_p$ ), suivant l'IF mesuré (8 années de mesure pour chaque site).



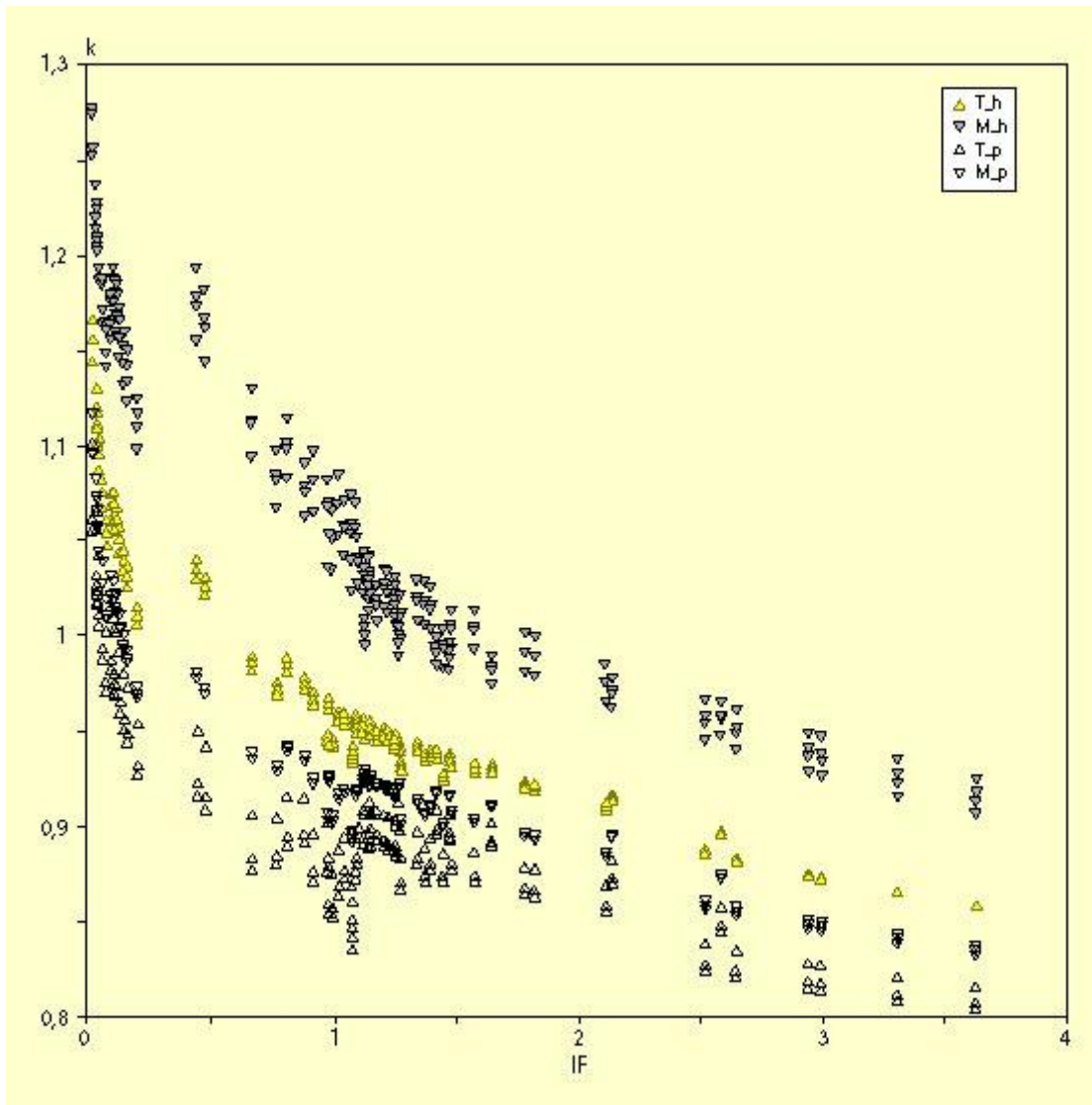


Figure 4. Estimation du  $k$  (coefficient d'extinction) moyen, tenant compte de la distribution des angles foliaires, du taux net de couverture du sol, et de la distribution du rayonnement incident : pour Taastrup (resp. Montpellier) avec rayonnement hivernal :  $T_h$  (resp.  $M_h$ ), et avec rayonnement printanier :  $T_p$  (resp.  $M_p$ ), suivant l'IF mesuré (8 années de mesure pour chaque site).

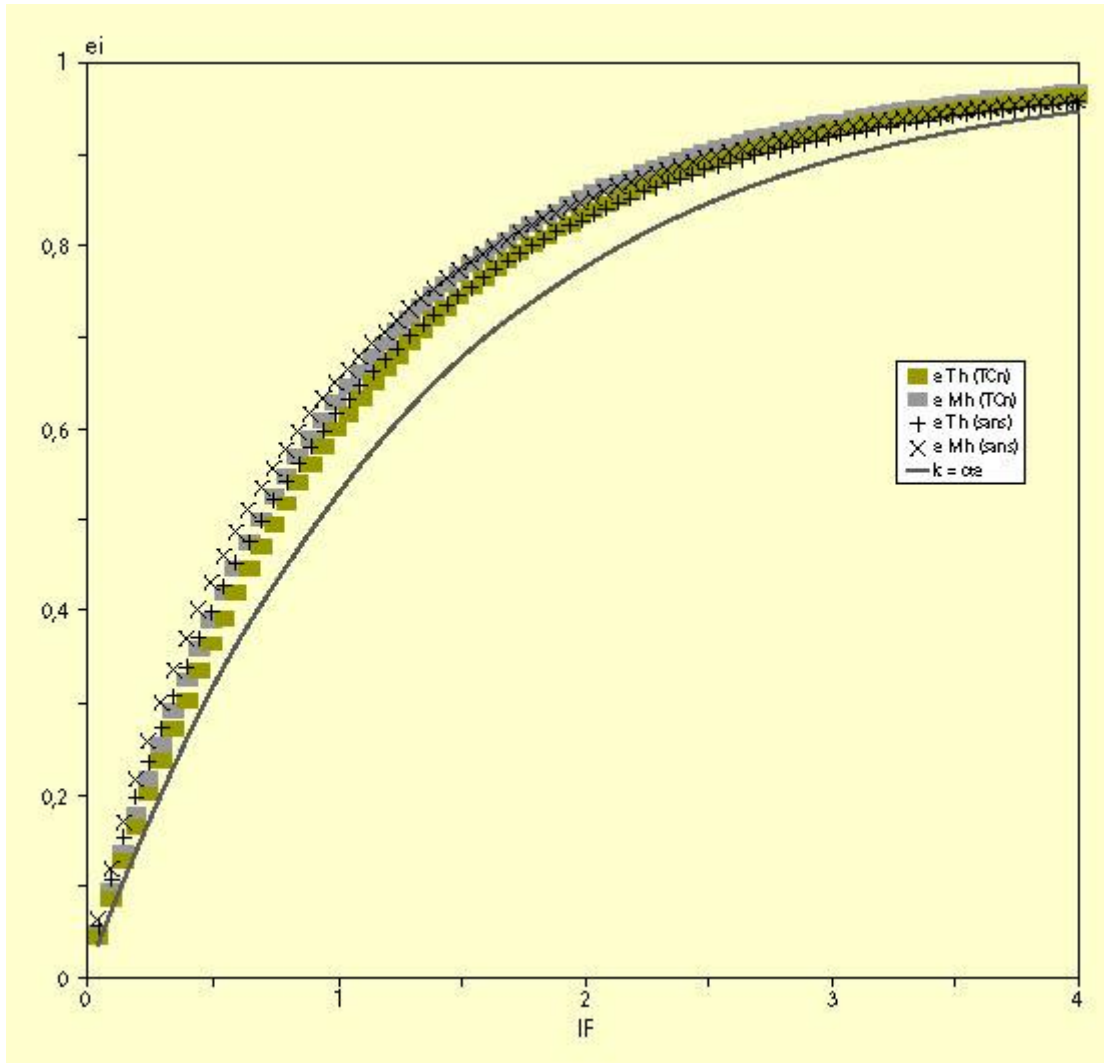


Figure 5. Comparaison des coefficients d'interception ( $\epsilon_i$ ) du rayonnement global (RG) obtenus suivant l'IF, soit en tenant compte des distributions angulaires du feuillage et du TCn, soit en prenant  $\epsilon_i = TCb \cdot eTh(TCn)$  : coefficient pour Taastrup, avec rayonnement hivernal et prise en compte du TCn (resp.  $eMh(TCn)$  pour Montpellier) ;  $eTh(sans)$  : coefficient pour Taastrup, avec rayonnement hivernal et sans prise en compte du TCn (resp.  $eMp(sans)$  pour Montpellier).  $k = cte$  ;  $k = 0,747$ , déduit de l'ajustement de  $k$  moyen au  $TCb = \epsilon_i$ .

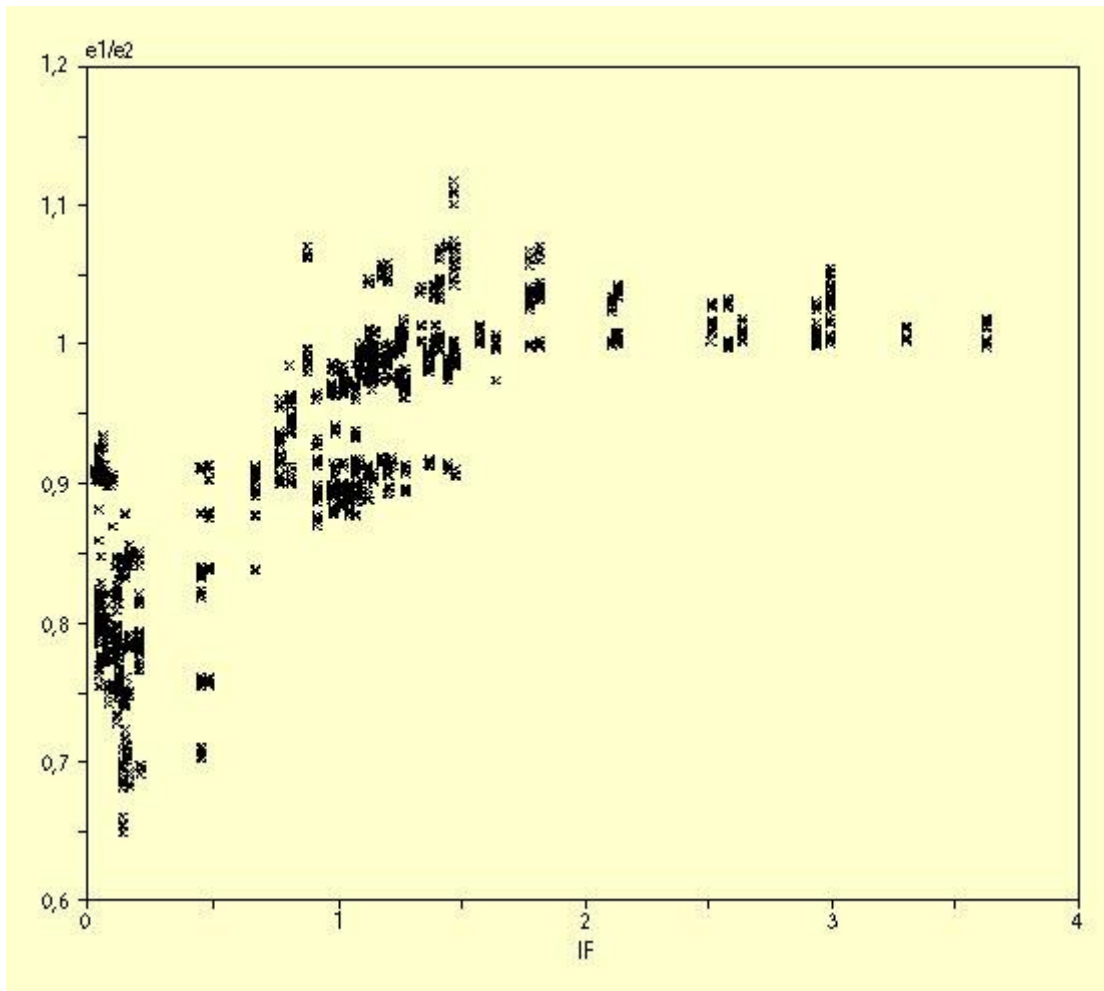


Figure 6. Rapport des coefficients d'interception obtenus avec ( $\epsilon_1 = e_1$ ) ou sans ( $\epsilon_2 = e_2$ ) prise en compte du Tcn dans le calcul, en fonction de l'IF.

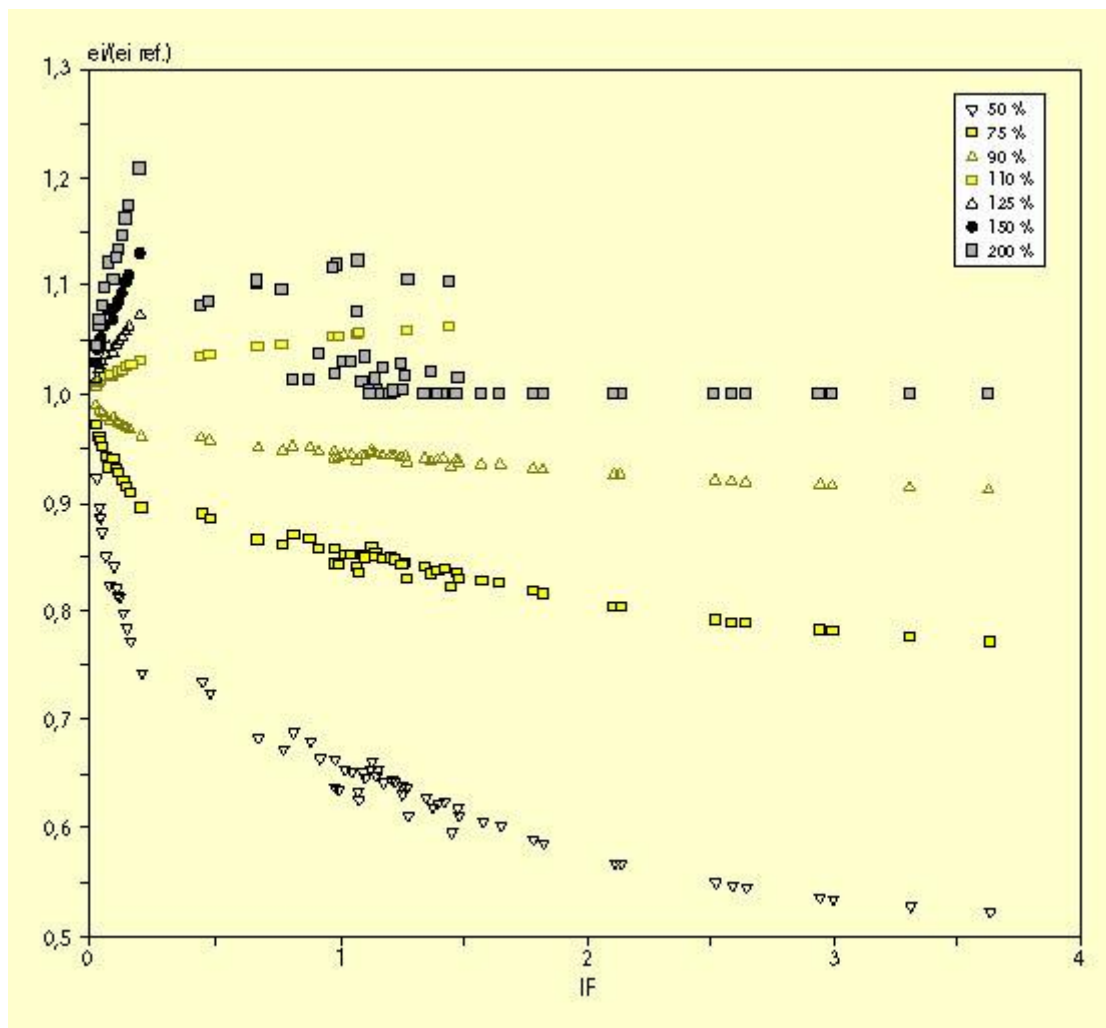


Figure 7. Rapport des coefficients d'interception ( $*i = ei$ ) obtenus avec divers taux de modification du TCn (50 à 200 %), par rapport au coefficient obtenu avec le TCn d'origine, en fonction de l'IF. TCn modifié = TCn référence \* taux.

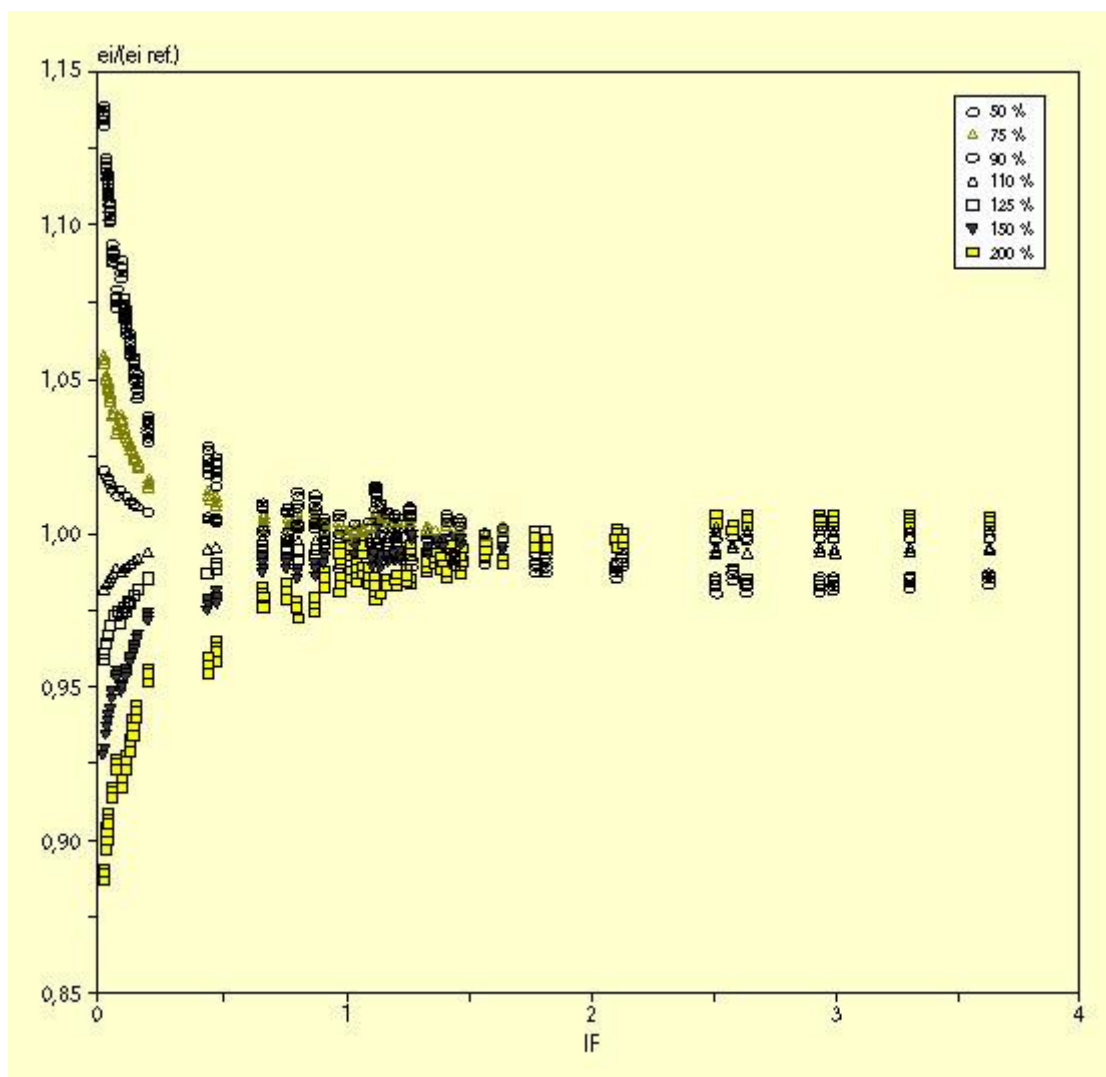


Figure 8. Rapport des coefficients d'interception ( $*i = ei$ ) obtenus avec divers taux de modification du coefficient  $x$  (50 à 200 %), par rapport au coefficient obtenu avec le  $x$  d'origine, en fonction de l'IF.  $X$  modifié =  $x \cdot \text{taux}$ .

Tableau 1. Sites et périodes de données de rayonnement utilisés dans les calculs des coefficients d'extinction du rayonnement ( $k$ ).

Lieu	Latitude (degrés N)	Nombre d'années « hiver »	Nombre d'années « printemps »
Taastrup (DK)	55,4	3	5
Wageningen (NL)	51,97	21	22
Châlons (F)	48,9	7	8
Grignon (F)	48,84	11	12
Dijon (F)	47,4	8	8
Montpellier (F)	43,5	4	4

Tableau 2a. Paramètres de la régression  $k = k_0 - A * IF^B$  (équation 18), pour l'ensemble des sites, et site par site ;  $k$  étant calculé avec les rayonnements du 1<sup>er</sup> octobre au 15 mars, en tenant compte du TCn.

Site	$k_0$	A	B	n	1 000*CMR
Ensemble	1,269	0,289	0,243	3 510	0,6783
Taastrup	1,297	0,344	0,179	195	0,1521
Wageningen	1,263	0,295	0,228	1 365	0,1916
Châlons	1,251	0,266	0,267	455	0,1996
Grignon	1,301	0,328	0,213	715	0,1898
Dijon	1,280	0,288	0,254	520	0,2005
Montpellier	1,284	0,236	0,369	260	0,4826

n = nombre de points expérimentaux (placettes\*années) ; CMR = carré moyen résiduel.

Tableau 2b. Comme le tableau 2a, pour données rayonnement du 15 mars au 31 mai.

Site	$k_0$	A	B	n	1 000*CMR
Ensemble	1,583	0,678	0,071	3 835	0,3316
Taastrup	2,127	1,242	0,035	325	0,3681
Wageningen	1,587	0,683	0,071	1 430	0,2974
Châlons	1,344	0,437	0,111	520	0,2137
Grignon	1,839	0,934	0,052	780	0,2313
Dijon	1,597	0,687	0,072	520	0,3476
Montpellier	1,287	0,365	0,142	260	0,1440

Tableau 3. Paramètres de la régression linéaire (équation 19) entre paramètres de l'ajustement de  $k$  (calculé avec prise en compte du TCn) à l'IF (équation 18), et latitude du site : paramètre =  $\alpha + \beta$  latitude.

Paramètre	$\alpha$	$\beta$	n	R <sup>2</sup>
$K_0$ (hiver)	1,259	0,0005	54	0,00
A (hiver)	-0,065	0,0074	54	0,22
B (hiver)	0,879	-0,0129	54	0,56
$K_0$ (printemps)	-2,883	0,0923	59	0,23
A (printemps)	-3,912	0,0947	59	0,24
B (printemps)	0,406	-0,0066	59	0,32

n = nombre de données. Les latitudes sont en valeurs décimales.

Tableau 4a. Paramètres de la régression  $k = k_0 - A * IP$ , pour l'ensemble des sites, et site par site ;  $k$  étant calculé avec les rayonnements du 1<sup>er</sup> octobre au 15 mars, mais sans tenir compte du TCn.

Site	$k_0$	A	B	n	1 000*CMR
Ensemble	1,530	0,536	0,220	3 510	3,4179
Taastrup	1,489	0,517	0,206	195	2,02036
Wageningen	1,577	0,599	0,189	1 365	2,3005
Châlons	1,521	0,526	0,224	455	2,80744
Grignon	1,558	0,566	0,209	715	2,74766
Dijon	1,506	0,500	0,244	520	3,28950
Montpellier	1,488	0,419	0,332	260	6,41855

CMR = carré moyen résiduel.

Tableau 4b. Comme le tableau 4a, pour données rayonnement du 15 mars au 31 mai.

Site	$k_0$	A	B	n	1 000*CMR
Ensemble	1,590	0,678	0,131	3 835	1,4128
Taastrup	1,595	0,701	0,116	325	1,44197
Wageningen	1,691	0,783	0,113	1 430	1,4085
Châlons	1,518	0,606	0,144	520	1,18147
Grignon	1,614	0,699	0,129	780	1,30101
Dijon	1,533	0,615	0,146	520	1,36504
Montpellier	1,421	0,486	0,190	260	1,23340

Tableau 5. Paramètres de la régression linéaire (équation 19) entre paramètres de l'ajustement de  $k$  (calculé sans prise en compte du TCn) à l'IF (équation 18) et latitude du site : paramètre =  $\alpha + \beta^2$  latitude.

Paramètre	$\alpha$	$\beta$	n	R <sup>2</sup>
$K_0$ (hiver)	1,221	0,0066	54	0,10
A (hiver)	-0,1663	0,0144	54	0,30
B (hiver)	0,8009	-0,0117	54	0,62
$K_0$ (printemps)	0,4948	0,022381	59	0,17
A (printemps)	-0,56571	0,025354	59	0,24
B (printemps)	0,451305	-0,0064	59	0,49

n = nombre de données. Les latitudes sont en valeurs décimales.