

ACADEMIE DE MONTPELLIER
UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

—*—
THESE

*Présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc
Pour obtenir le Diplôme de DOCTORAT
en
Mécanique, Génie mécanique, Génie civil
(Sciences de l'Eau et Aménagement)*

**ESTIMATION DE L'EFFICIENCE DE CONVERSION EN MATIERE
SECHE DU RAYONNEMENT SOLAIRE INTERCEPTE PAR UNE
CULTURE DE BLE A PARTIR DE LA REFLECTANCE SPECTRALE.**

Relations avec l'évapotranspiration et la température de surface.

19 AVR. 1991

par

Silvio STEINMETZ

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
I. N. R. A.
Station de Bioclimatologie
B.P. 91 - Domaine Saint-Paul
84143 MONTFAVET CEDEX
FRANCE

Soutenue le 8 juin 1990 devant le jury composé de :

AHTH 19

MM. C. Bocquillon	Président
M. Steven	Rapporteurs
B. Itier	
B. Seguin	
B. Saugier	Examineurs
C. Charreau	

A ma femme, Rosângela

A mes enfants, Luciane, Patricia et Ricardo

En témoignage de mon amour.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier très sincèrement à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail et, plus particulièrement à :

- B. Seguin, Directeur de Recherche à la Station de Bioclimatologie de l'INRA d'Avignon pour m'accueillir au sein de son groupe de travail, d'accepter de diriger cette thèse et pour les corrections apportées à ce document;
- J.P. Lagouarde, M. Guerif, R. Delecolle et F. Baret qui m'ont accompagné pas à pas dans toutes les étapes de cette étude. Je remercie spécialement J.P. Lagouarde qui a une participation décisive dans l'acquisition et le traitement des données micrométéorologiques ainsi que M. Guerif qui m'a bien soutenu tout au long de cette thèse. F. Baret m'a aussi donné des conseils judicieux pour améliorer la rédaction de ce document;
- C. Bocquillon, Professeur à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), qui a bien voulu juger ce travail et présider la soutenance de cette thèse;
- M. Steven, Professeur à l'Université de Nottingham (U.K.) et B. Itier, Directeur de Recherche à la Station de Bioclimatologie de l'INRA/Grignon, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse;
- B. Saugier, Professeur à l'Université de Paris-Sud (Centre d'Orsay) et Dr. C. Charreau, Directeur de l'Institut de Recherches Agronomiques et des Cultures Vivrières (IRAT/CIRAD) pour avoir accepté de faire partie du jury;
- A. Baille, Directeur de la Station de Bioclimatologie de l'INRA d'Avignon pour le support matériel nécessaire pour vaincre toutes les étapes de réalisation de cette étude;
- A ma famille brésilienne qui m'a toujours encouragé malgré la distance qui nous séparait;
- A Rosângela, pour son amitié et support moral dans les moments les plus difficiles.

TABLE DES MATIERES

	Pages
- Table des matières	1
- Table des symboles	13
- Résumé - Abstract	21
- Introduction	25
 CHAPITRE I. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.1. ESTIMATION DE LA BIOMASSE A PARTIR D'UN MODELE DE RENDEMENT ENERGETIQUE	35
1.1.1. Efficienc e climatique (ϵc)	35
1.1.2. Efficienc e d'interception du rayonnement solaire (ϵi)	37
1.1.2.1. Méthodes de mesure du rayonnement intercepté par un couvert végétal	
1.1.2.1.1. <i>Bilan radiatif</i>	39
1.1.2.1.2. <i>Photos hémisphériques</i>	39
	43
1.1.2.2. Estimation du P.A.R. à partir de la réflectance spectrale	45
1.1.2.2.1. <i>Définition de la réflectance bidirectionnelle</i>	45
1.1.2.2.2. <i>Rappel des facteurs affectant la réflectance d'un couvert végétal</i>	47
1.1.2.2.2.1. <i>Les propriétés optiques des feuilles</i>	47
1.1.2.2.2.2. <i>Les propriétés optiques des sols</i>	51
1.1.2.2.2.3. <i>Effet des facteurs propres et externes au couvert sur la réflectance</i>	53
1.1.2.2.3. <i>Les indices de végétation</i>	55
1.1.2.2.4. <i>Relations entre le P.A.R. intercepté et la réflectance spectrale</i>	57
Conclusion	63
1.1.3. Efficienc e de la conversion du P.A.R. intercepté biomasse (ϵb)	65
1.1.3.1. Effet de la température	69
1.1.3.2. Importance de la phase phénologique	71
1.1.3.3. Influence du stress hydrique	75
1.1.3.4. Influence de la fertilisation minérale	77
Conclusion	79

1.2.	INDICES DE STRESS HYDRIQUE ET SES RELATIONS AVEC LA PRODUCTION DE MATIERE SECHE	81
1.2.1.	Relations entre la production de biomasse, l'évapotranspiration et l'évapotranspiration potentielle	81
1.2.2.	Indices de stress hydrique	85
1.2.2.1.	L'évapotranspiration relative (E_{Tr}/E_{Tp})	85
1.2.2.1.1.	<i>Méthodes de mesure de l'évapotranspiration réelle (E_{Tr})</i>	85
1.2.2.1.2.	<i>L'évapotranspiration potentielle (E_{Tp})</i>	91
1.2.2.2.	Indices de stress hydrique basés sur la température de surface	93
1.2.2.2.1.	<i>Le bilan d'énergie de surface et son influence sur les relations entre la température de surface et l'évapotranspiration</i>	93
1.2.2.2.1.1.	<i>Bilan d'énergie d'une surface mince</i>	93
1.2.2.2.1.2.	<i>Relations entre la température de surface et l'évaporation (ou l'évapotranspiration)</i>	95
1.2.2.2.1.3.	<i>Les problèmes posés par l'extension aux couverts élevés</i>	97
1.2.2.2.2.	<i>Application de la température de surface pour caractériser l'état hydrique de la culture</i>	99
1.2.2.2.2.1.	<i>Indices de stress hydrique à l'échelle de la parcelle</i>	99
1.2.2.2.2.2.	<i>Estimation de l'évapotranspiration à partir de la température de surface</i>	105
	Conclusion	107
 CHAPITRE II. L'EXPERIMENTATION		
2.1.	Le milieu	111
2.1.1.	Situation	111
2.1.2.	Le sol	111
2.1.3.	Le climat	111
2.2.	Dispositif expérimental et protocole de mesures	115
2.2.1.	Dispositif expérimental	115
2.2.1.1.	Les traitements	117

2.2.2.	Protocole de mesures	117
2.2.2.1.	Mesures et calcul des paramètres biologiques.	117
2.2.2.1.1.	<i>Matière sèche aérienne</i>	117
2.2.2.1.2.	<i>L'indice des organes verts</i>	121
2.2.2.1.3.	<i>Le rendement et les composants du rendement</i>	
2.2.2.2.	Mesure de la réflectance spectrale et calcul des indices de végétation	123
2.2.2.2.1.	<i>L'appareil de mesure: le radiomètre</i>	123
2.2.2.2.2.	<i>Les mesures. Variabilité des mesures</i>	123
2.2.2.2.3.	<i>Détermination de la droite du sol</i>	125
2.2.2.2.4.	<i>Calcul des indices de végétation</i>	127
2.2.2.3.	Mesure de l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (P.A.R.)	127
2.2.2.3.1.	<i>La prise des photos hémisphériques</i>	127
2.2.2.3.2.	<i>La numérisation</i>	131
2.2.2.3.3.	<i>Obtention des valeurs journalières de ϵ_i</i>	131
2.2.2.4.	Mesures micrométéorologiques	133
2.2.2.4.1.	<i>Dispositif des mesures pour des flux et de température de surface</i>	133
2.2.2.4.1.1.	<i>Année 1986/87</i>	133
2.2.2.4.1.2.	<i>Année 1987/88</i>	135
2.2.2.5.	Mesures de la tension de l'eau dans le sol	137
2.3.	Les cultures	137
2.3.1.	Matériel végétal et techniques culturales	137
2.3.2.	Stades phénologiques	139
2.3.3.	Le rendement et les composants du rendement	139
 CHAPITRE III. QUANTIFICATION DU STRESS HYDRIQUE DE LA CULTURE		
3.1.	Introduction	147
3.2.	Rappels méthodologiques	147
3.2.1.	Calcul de l'évapotranspiration réelle (ET _r)	147
3.2.1.1.	Estimation du flux de chaleur sensible H par la méthode aérodynamique	149

3.2.1.2.	Estimation du flux de chaleur sensible H par la méthode aérodynamique simplifiée	151
3.2.2.	Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETp)	155
3.3.	Résultats et discussion	155
3.3.1.	Evolution de la tension de l'eau dans le sol	155
3.3.2.	Evolution de l'évapotranspiration réelle (ETr)	157
3.3.3.	Evolution du rapport ETr/ETp	159
3.3.4.	Evolution de la température de surface du blé	163
3.3.5.	Estimation de l'évapotranspiration à partir de la température de surface	167
3.4.	Conclusion	169
CHAPITRE IV. ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE ET DU P.A.R. INTERCEPTE A PARTIR DE LA REFLECTANCE SPECTRALE		
4.1.	Introduction	173
4.2.	Résultats et discussion	175
4.2.1.	Estimation de l'indice foliaire à partir de la réflectance spectrale	175
4.2.1.1.	Evolution des indices foliaires	175
4.2.1.2.	Evolution de la réflectance dans les domaines du visible et du proche infrarouge	179
4.2.1.3.	Estimation de l'indice foliaire à partir du rapport PIR/R	185
4.2.2.	Estimation du P.A.R. intercepté à partir de la réflectance spectrale	191
4.2.2.1.	Rappels méthodologiques	191
4.2.2.1.1.	<i>La relation analytique entre le P.A.R. intercepté et les indices de végétation</i>	191
4.2.2.1.2.	<i>La relation empirique entre le P.A.R. intercepté et l'indice de végétation PIR/R.</i>	191
4.3.	Conclusion	195

CHAPITRE V. EFFET DU STRESS HYDRIQUE, DE LA FERTILISATION AZOTEE ET DE LA PHASE PHENOLOGIQUE SUR LES EFFICIENCES D'INTERCEPTION (ϵ_i) ET DE CONVERSION EN BIOMASSE (ϵ_b) DU P.A.R. INTERCEPTE.

5.1.	Introduction	199
5.2.	Méthode de calcul des valeurs hebdomadaires de ϵ_b	199
5.3.	Résultats et discussion	201
5.3.1.	Influence de la fertilisation azotée et du stress hydrique sur l'efficacité d'interception du P.A.R. (i)	201
5.3.1.1.	Effet de la fertilisation azotée sur l'efficacité ϵ_i	203
5.3.1.2.	Effet du stress hydrique sur l'efficacité ϵ_i	205
5.3.2.	Effet de la fertilisation azotée, du stress hydrique et de la phase phénologique sur l'efficacité ϵ_b	205
5.3.2.1.	Evolution de la production de biomasse et du P.A.R. absorbé pendant le cycle du blé	207
5.3.2.2.	Evolution des valeurs hebdomadaires de ϵ_b pendant le cycle du blé	209
5.3.2.3.	Effet de la fertilisation azotée sur l'efficacité ϵ_b	213
5.3.2.4.	Effet du stress hydrique sur l'efficacité ϵ_b	217
5.3.2.5.	Effet de la phase phénologique de la plante sur ϵ_b	219
5.4.	Conclusion	225
CHAPITRE VI. RELATIONS ENTRE LES INDICES DE STRESS HYDRIQUE ET LA PRODUCTION DE MATIERE SECHE ET/OU L'EFFICIENCE ϵ_b		
6.1.	Introduction	229
6.2.	Resultats et discussion	229
6.2.1.	Relations entre la matière sèche et les paramètres indicateurs de l'état hydrique de la culture	229

6.2.1.1.	Relations entre la matière sèche et l'évapotranspiration	229
6.2.1.2.	Relations entre la production de matière sèche et la température de surface	231
6.2.2.	Relations entre l'efficacité ϵ_b et les paramètres indicateurs de l'état hydrique de la culture	235
6.2.2.1.	Relations entre l'efficacité ϵ_b et l'évapotranspiration	235
6.2.2.2.	Relations entre l'efficacité ϵ_b et la température de surface	237
6.3.	Conclusion	239
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		245
BIBLIOGRAPHIE		253

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISES

- a : Albedo
- Adv : Composante advective de l'équation de Penman
- Cp : Capacité calorifique de l'air à pression constante ($J.Kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
- CWSI: Crop Water Stress Index
- d : Hauteur de déplacement (cm)
- DN : Différence normalisée $(PIR-R)/(PIR + R)$
- e : Pression de vapeur d'eau (Pa)
- e_a : Pression de vapeur d'eau dans l'air (Pa)
- e_s : Pression de vapeur d'eau à la surface (Pa)
- E : Flux massique d'évapotranspiration réelle
- ET : Evapotranspiration ($mm.jour^{-1}$)
- ETo : Evapotranspiration de la culture de référence ($mm.jour^{-1}$)
- ETm : Evapotranspiration maximale de la culture ($mm.jour^{-1}$)
- ETp : Evapotranspiration potentielle ($mm.jour^{-1}$)
- ETr : Evapotranspiration réelle de la culture ($mm.jour^{-1}$)
- Ew : Déficit de saturation de l'air (Pa)
- g : Accélération due à la gravité ($9,81 m.s^{-2}$)
- h : Hauteur moyenne de la culture (cm)
- H : Flux de chaleur sensible dans l'air ($mm.jour^{-1}$)
- IF : Indice foliaire ($m^2.m^{-2}$)
- IFV : Indice foliaire vert ($m^2.m^{-2}$)
- k : Coefficient d'extinction de la lumière dans le couvert (cm^{-1})

- k** : Constante de VON KARMAN ($k=0,4$)
- K_E** : Coefficient de transfert turbulent de masse ($m.s^{-1}$)
- K_H** : Coefficient de transfert turbulent de chaleur ($m.s^{-1}$)
- K_M** : Coefficient de transfert turbulent de quantité de mouvement ($m.s^{-1}$)
- L** : Longueur de MONIN-OBUKHOV
- L** : Chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J.Kg^{-1}$)
- MS** : Matière sèche aérienne ($g.m^{-2}$)
- P.A.R** : Rayonnement photosynthétiquement actif ($MJ.M^{-2}$)
- P.A.Ri**: Portion du P.A.R. intercepté instantané par la culture (%) $\approx \epsilon_i$
- P.A.Ra**: Portion du P.A.R. absorbé par la culture dans la la journée
($P.A.Ra = \epsilon_c \epsilon_i R_g$) ($MJ.m^{-2}$)
- PIR** : Réflectance dans le proche infrarouge (%)
- R** : Réflectance dans le rouge (%)
- RA** : Rapport PIR/R
- DN** : Différence normalisée $(PIR-R)/(PIR+R)$
- PVI** : Perpendicular Vegetation Index: défini dans le plan rouge et proche infrarouge comme la distance du point végétation à la droite du sol.
- Ra** : Rayonnement atmosphérique ($w.m^{-2}$)
- Rad** : Composante radiative de l'équation de Penman ($mm.jour^{-1}$)
- Rc** : Réflectance corrigée (%)
- Rm** : Réflectance mesurée par le radiomètre (%)
- Rp/Rb**: Coefficient d'étalonnage entre la réflectance du panneau de référence (R_p) et celle mesurée par le radiomètre (R_b)
- R_⊙** : Réflectance du panneau éclairé avec une incidence \odot

- R_O : Réflectance du panneau de référence éclairé à la verticale (%)
 R_g : Rayonnement solaire global (w.m^{-2})
 R_i : Nombre de Richardson
 R_n : Rayonnement net (w.m^{-2})
 R_n^* : Rayonnement net climatique (w.m^{-2})
 S : Flux de chaleur dans le sol (w.m^{-2})
 SDD : Stress Degree Day ($^{\circ}\text{C}$)
 T : Température ($^{\circ}\text{C}$)
 T^* : Température de frottement ($^{\circ}\text{C}$)
 T_a : Température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)
 T_h : Température humide de l'air ($^{\circ}\text{C}$)
 T_s : Température de surface du couvert ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{sa} : Température de surface "aérodynamique" ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{sr} : Température de surface "radiative" ($^{\circ}\text{C}$)
 U : Vitesse du vent (m.s^{-1})
 U^* : Vitesse de frottement (m.s^{-1})
 Z : Hauteur de référence considérée pour la mesure des paramètres micrométéorologiques
 Z_o : Rugosité aérodynamique
 Z_{ot} : Rugosité thermique
 Δ : Différence finie entre deux grandeurs
 Δ : Pente à la courbe de tension de vapeur à la température T_h ($\text{Pa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 ϵ : Emissivité de la surface
 ϵ_c : Proportion du P.A.R. dans le spectre solaire ($\text{MJ.m}^{-2}/\text{MJ.m}^{-2}$)

- ϵ_i : Efficience d'interception instantanée du P.A.R. (%)
- $\overline{\epsilon_i}$: Efficience d'interception journalière du P.A.R. ($\text{MJ.m}^{-2}/\text{MJ.m}^{-2}$)
- ϵ_b : Efficience de conversion en matière sèche du rayonnement absorbé par la culture (g.MJ^{-1})
- γ : Constante psychrométrique ($0,66 \text{ mb } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- ρ : Masse volumique de l'air (kg.m^{-3})
- σ : Constante de STEPHAN-BOLTZMAN ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)
- $\psi_{m,t}$: Fonctions de stabilité

RESUME

L'étude qui a été réalisée au cours de deux cycles de la culture du blé (années 1986/87 et 1987/88) a porté sur l'effet du stress hydrique et de la fertilisation azotée sur l'efficacité d'interception (ϵ_i) du rayonnement solaire dans le domaine du visible (P.A.R.) ainsi que sur l'efficacité de conversion (ϵ_b) en matière sèche du rayonnement intercepté. Le rayonnement intercepté a été déterminé à l'aide de photos hémisphériques et de la réflectance spectrale mesurée avec un radiomètre de simulation du satellite SPOT.

D'autre part, l'étude a évalué les relations entre la matière sèche produite et l'efficacité ϵ_b avec des paramètres caractérisant l'état hydrique de la culture tels que l'évapotranspiration réelle (ETr), le rapport entre l'ETr et l'évapotranspiration potentielle (ETr/ETp) ainsi que le "Stress Degree Day" (SDD). Ces données ont été acquises à partir d'un dispositif de mesures micrométéorologiques implantés sur les parcelles sèche et irriguée.

La relation linéaire obtenue entre les valeurs hebdomadaires de l'efficacité ϵ_b et les indices caractérisant l'état hydrique de la culture tels que l'ETr, le rapport ETr/ETp et le SDD suggère la possibilité d'utilisation conjointe des modèles d'interception du rayonnement solaire et des modèles d'évapotranspiration pour estimer la production de matière sèche du blé en conditions de stress hydrique.

Les bonnes performances des données de réflectance spectrale pour caractériser l'évolution de l'indice foliaire et du rayonnement intercepté et de la température de surface pour évaluer l'état hydrique de la culture indiquent la perspective d'utilisation de la télédétection satellitaire dans ces modèles.

MOTS-CLES : matière sèche, rayonnement photosynthétiquement actif (P.A.R.), interception du P.A.R. (ϵ_i), efficacité de conversion en matière sèche (ϵ_b), photos hémisphériques, réflectance spectrale, évapotranspiration, température de surface, stress hydrique, fertilisation azotée, climat méditerranéen.

SPECTRALLY ESTIMATED INTERCEPTION AND USE EFFICIENCY OF SOLAR RADIATION OF A WINTER DURUM WHEAT SUBJECTED TO NITROGEN AND WATER DEFICIENCIES. RELATIONSHIPS WITH EVAPOTRANSPIRATION AND CROP SURFACE TEMPERATURE.

ABSTRACT

A two years study was conducted to evaluate de possibility of using the combination of models based on light interception and on evapotranspiration to estimate dry matter production of a winter durum wheat.

A first step consisted in evaluating the effect of two nitrogen and two irrigation levels on the crop efficiency (ϵ_i) to intercept the solar radiation (P.A.R.) and on the efficiency (ϵ_b) with which this intercepted energy is converted to dry matter. The evolution of ϵ_i during crop cycle was spectrally estimated by using a previously established relationship between ϵ_i (measured with hemispherical photographs) and the spectral reflectance. ϵ_i and ϵ_b were more affected, respectively, by the nitrogen and the water deficiencies.

A relationship was also established between dry matter production and/or the efficiency ϵ_b with the water stress indices based on the evapotranspiration (E_{Tr}), relative evapotranspiration (E_{Tr}/E_{Tp}) and on the sum of the difference between the crop and the air temperatures (SDD). The linear relationship between these parameters suggest the possibility of combining these two approaches to estimate dry matter production of a wheat crop subjected to water stress. However, the low coefficients of determinations obtained ($R^2=0.42$ for the E_{Tr}/E_{Tp} and $R^2=0.54$ for SDD) suggest more research is needed before operational utilisation.

KEY WORDS: Dry matter; photosynthetically active radiation (P.A.R.); efficiency of light interception (ϵ_i); light use efficiency (ϵ_b); hemispherical photographs; spectral reflectance; evapotranspiration; crop surface temperature; water stress; nitrogen fertilization; mediterranean climat.

INTRODUCTION

L'estimation du rendement des cultures céréalières est l'un des objectifs de la majorité des programmes de recherche agronomique. Dans ce cadre, la disponibilité de l'énergie solaire et de l'eau sont deux facteurs essentiels pour le processus photosynthétique des plantes et donc de leur production.

Parmi les différents modèles existants pour l'estimation de la production d'une culture, celui proposé par Monteith (1972, 1977), malgré ses limitations, est l'un de plus attractifs, notamment par sa simplicité. Il indique que la production de matière sèche totale (MS) peut être décrite par le formalisme suivant:

$$MS = \int_t \epsilon_c \epsilon_i \epsilon_b R_g dt$$

où ϵ_c est la proportion du rayonnement photosynthétiquement actif (P.A.R.) du spectre solaire, ϵ_i l'efficacité d'interception du P.A.R., ϵ_b l'efficacité de conversion en matière sèche du rayonnement intercepté par la culture et R_g est le rayonnement solaire global.

Pour des conditions d'alimentation hydrique et minérale non limitantes, ce modèle permet l'estimation de la production de matière sèche d'une culture par la simple estimation de la quantité d'énergie intercepté pendant le cycle de cette culture. Ceci parce que, pour ces conditions, et notamment quand elle est intégrée sur des longues périodes, l'efficacité ϵ_b peut être considérée maximale et constante. Il est donc possible d'estimer la production maximale ou potentielle d'une région en fonction de la disponibilité d'énergie et de l'efficacité de interception de cette énergie par la culture comme a déjà été montré par Gosse et al. (1986).

Pour des conditions non optimales, l'estimation de biomasse à partir de ce modèle apparaît plus problématique, des travaux récents indiquant que l'efficacité ϵ_b , contrairement aux premiers résultats que la considéraient constante, même pour des conditions non idéales, est en effet affectée non seulement par les stress hydrique et minéral mais également par la phase phénologique de la culture.

Il faut rappeler que le stress hydrique est la contrainte la plus importante des cultures pluviales dans les différentes parties du monde. Le risque de stress hydrique résulte, en général, de l'insuffisance ou de la mauvaise répartition des pluies et conditionne l'utilisation de technologies modernes (cultivars, fertilisation minérale, pesticides etc) par les agriculteurs. La figure 1 illustre bien le cas de l'évolution de la productivité du blé cultivé dans des régions avec de différents niveaux de risque de stress hydrique. Ainsi, en Angleterre, où le régime pluviométrique est favorable au développement de la culture, la production de blé a beaucoup augmenté (moyenne de $67 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) dans les dernières 35 à 40 années, alors que, pour des conditions où les pluies sont insuffisantes ou mal réparties, les productivités sont plus faibles et très

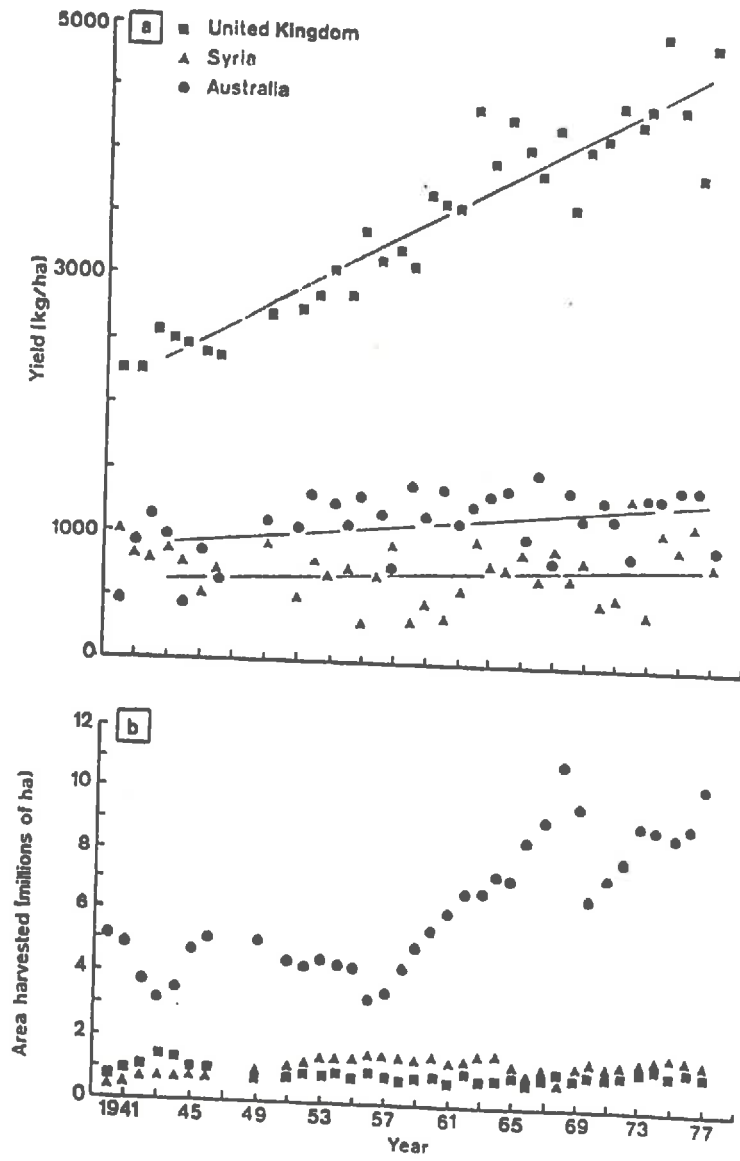


Figure 1. Productivité annuelle du blé (a) et surface cultivée par an (b) en Australie (●), Syrie (▲) et en Angleterre (■) entre 1940 et 1977 (d'après Turner et Begg, 1981).

variables (cas de l'Australie et de la Syrie). En Australie, l'accroissement de rendement, pendant la même période, a été de seulement $13 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$.

Une situation similaire est observée dans la région centrale du Brésil (Cerrado) où, malgré l'abondance des pluies, les chutes de productivité des cultures pluviales sont parfois très fortes en raison de l'apparition des périodes de sécheresse (appelées Veranicos) pendant la saison pluvieuse. Les baisses de productivité sont variables selon les cultures, le riz pluvial étant l'une des plus affectées. En raison de la grande surface cultivée (environ 4 million d'hectares) avec ce système, qui représente environ 60-70% de la production nationale de riz, l'apparition du "veranico" entraîne des pertes pouvant atteindre jusqu'à 1 million de tonnes pour cette céréale qui est, avec le haricot, la base de l'alimentation pour des millions de brésiliens (Embrapa, 1981).

En considérant l'effet du stress hydrique sur les cultures, on doit se poser la question:

comment estimer la production de matière sèche d'une culture pour des régions affectées par le stress hydrique à partir d'un modèle basé sur l'interception du rayonnement solaire comme celui proposé par Monteith?

Une option possible semble être la suivante: estimer la production de matière sèche optimale espérée en mesurant le rayonnement solaire intercepté par la culture (ϵ_i) et en supposant des valeurs maximales de ϵ_b (qui doivent être connues) et, en même temps, suivre l'état hydrique de cette culture de façon à pouvoir corriger, si nécessaire, les valeurs de matière sèche produite par l'application d'un indice de stress hydrique. C'est dans ce sens que cette étude a été conçue.

Les objectifs en sont les suivants:

1) Objectif global:

-Evaluer la possibilité d'estimation de production de matière sèche d'une culture de blé à partir de l'utilisation conjointe d'un modèle basée sur l'interception du rayonnement solaire et des indices de stress hydrique basés sur l'évapotranspiration et la température de surface.

2) Objectifs spécifiques:

2.1. Quantifier le stress hydrique de la culture à partir de mesures de d'évapotranspiration et de la température de surface;

2.2. Evaluer l'efficacité des indices de végétation basés sur la réflectance spectrale pour caractériser l'évolution de l'indice foliaire et de l'interception du P.A.R. en conditions variables de fertilisation azotée et d'irrigation;

2.3. Caractériser l'effet de la fertilisation azotée, du stress hydrique et de la phase phénologique de la culture sur les efficiences ϵ_i et ϵ_b ;

2.4. Etablir les relations entre la production de matière sèche et/ou ϵ_b avec les indices de stress hydrique basés sur les mesures d'évapotranspiration et de température de surface.

Cette étude comporte 6 chapitres: les deux premiers sont consacrés, respectivement, à l'analyse bibliographique et à la description de l'expérimentation alors que les quatre suivants présentent les résultats obtenus.

CHAPITRE 1

CHAPITRE I. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Estimation de la biomasse à partir d'un modèle de rendement énergétique

L'utilisation du concept de rendement énergétique dans l'analyse de la croissance en matière sèche d'une culture s'est beaucoup développée ces dernières années. Ce concept a été utilisé par plusieurs auteurs (Osman, 1971; Biscoe & Gallagher, 1977; Charles-Edwards, 1982) et a mis en évidence que la production finale d'une culture est basé sur trois points:

- la quantité d'énergie interceptée par le couvert
- l'efficacité avec laquelle l'énergie interceptée est transformée en matière sèche
- la répartition de cette matière sèche dans les différents organes de la plante.

Les deux premiers aspects sont pris en compte par le formalisme proposé par Monteith (1972), dans lequel la production de matière sèche d'une culture peut être exprimée par l'équation suivante:

$$MS = \int_t \epsilon c \epsilon i \epsilon b R_g dt \quad (I.1)$$

- où
- R_g = rayonnement solaire global incident;
 - MS = matière sèche produite;
 - εc = proportion d'énergie photosynthétiquement active (PAR : 400 - 700 nm) contenue dans le rayonnement solaire global (300 - 3000 nm);
 - εi = efficacité de l'absorption du PAR incident par le couvert;
 - εb = efficacité de conversion en matière sèche du PAR intercepté par le couvert;
 - t = période de temps.

Par la suite, nous allons analyser le rôle de chacun de ces éléments sur la production finale de biomasse et montrer l'influence des facteurs propres de la culture, des techniques culturales et de l'environnement sur chacun de ces paramètres.

1.1.1. Efficacité climatique (εc)

De toutes les radiations du spectre solaire (Fig.I.1) seule la fraction du visible ou du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) est absorbée par les pigments chlorophylliens de la plante.

La définition de la bande spectrale du PAR est légèrement différente selon les pays. Ainsi, en Union Soviétique et dans les pays de l'Europe de l'Est, le PAR est défini comme étant la radiation comprise entre 380nm et 710nm tandis qu'aux Etats Unis et en Europe de l'Ouest le PAR comprend la bande spectrale de 400nm à 700nm

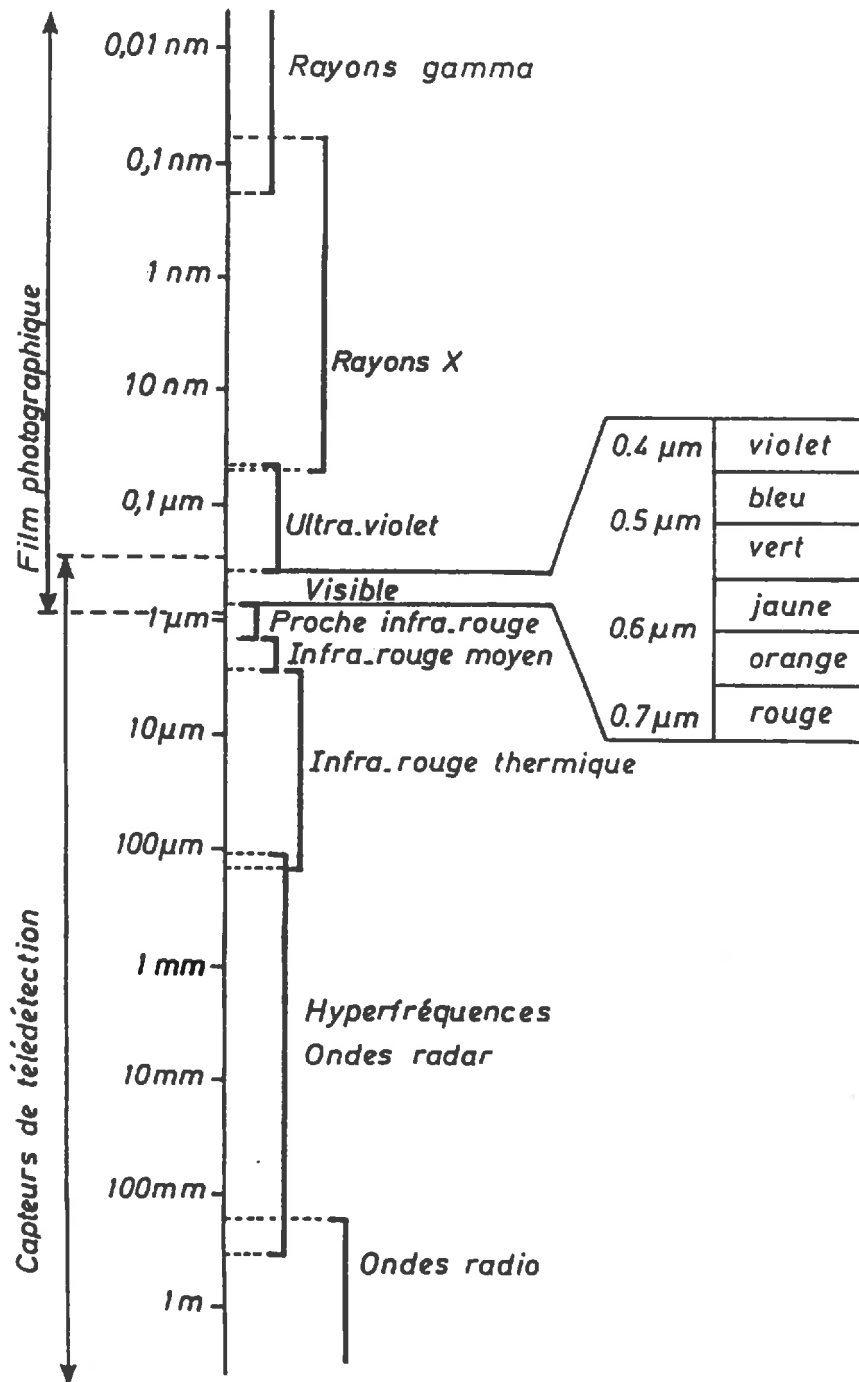


Figure I.1. Le spectre du rayonnement électromagnétique (d'après Guyot, 1989).

laquelle, selon McCree (1972), est la plus appropriée pour caractériser le rayonnement utile à la photosynthèse des plantes.

La proportion d'énergie photosynthétiquement active du rayonnement global (ϵ_c) se situe entre 0.42 (dans le direct) et 0.65 (dans le diffus) avec une moyenne de 0.50 (Ross, 1975). Szeicz (1970) a trouvé, à Cambridge, Angleterre, une moyenne annuelle de 0.49 avec des valeurs minimales de 0.48 pendant le printemps et maximales de 0.51 en hiver. Selon Monteith (1972), une valeur moyenne de ϵ_c égale à 0.50 serait, en principe, valable pour les régions tropicales et tempérées. Cette hypothèse est confirmée par les résultats de Varlet-Grancher et al. (1982) qui ne trouvent pas de variation significative de ϵ_c pour différentes hauteurs de soleil, de couvertures nuageuses ou de latitudes (Guadeloupe et région parisienne). Ils ont trouvé une valeur moyenne de ϵ_c égale à 0.48.

1.1.2. Efficience de l'interception du rayonnement solaire (ϵ_i)

Plusieurs études ont montré que, dans des conditions d'alimentation hydrique et minérale non-limitantes, il existe une relation linéaire entre la production totale de matière sèche et le total du rayonnement intercepté par la culture, qui est très dépendant de l'évolution de l'indice foliaire (Monteith, 1972, 1977; Gallagher & Biscoe, 1978; Varlet-Grancher et al., 1982).

L'exemple de la figure I.2 montre que la production de matière sèche MS est en relation linéaire avec la radiation globale interceptée R pendant le cycle de sorte que l'efficience de conversion de cette énergie en biomasse, l_e (ou ϵ_b) a une valeur constante. Les valeurs minimales et maximales, pour un climat donné, sont représentées par A et B, respectivement. Si, par exemple, la relation entre MS et R est représentée par le point C, la culture a utilisé l'énergie avec l'efficience maximale, mais la production est inférieure au maximum parce que l'interception du rayonnement incident n'est pas optimale. Par contre, si la performance de la culture est représentée par le point D, la réduction de production est attribuée à la diminution de l'interception du rayonnement (B-C) et à une plus faible efficience photosynthétique, l_g (Legg et al., 1979).

L'effet des différents facteurs qui peuvent affecter l'efficience photosynthétique sera présenté ultérieurement. Dans la suite, nous allons exposer les méthodes les plus utilisées pour caractériser l'interception de la lumière par le couvert végétal.

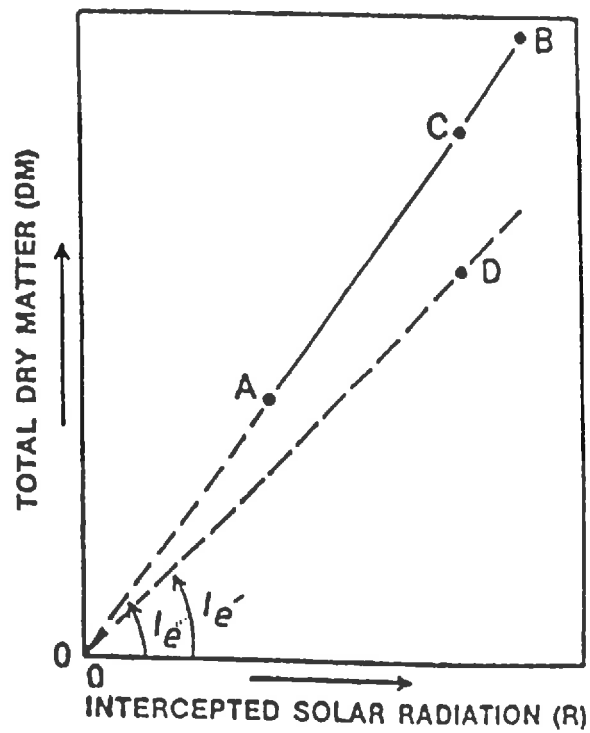


Figure I.2. Schéma de la relation entre la production totale de matière sèche d'une culture (DM) et l'interception du rayonnement solaire (R). Les points A, B, C et D représentent les situations discutées dans le texte; l_e' et l_e'' sont les efficacités photosynthétiques (d'après Monteith, 1977 modifié par Jordan, 1983).

1.1.2.1. Méthodes de mesure du rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal

L'interception du rayonnement solaire par un couvert végétal I a été décrite par plusieurs auteurs (Monsi & Saeki, 1953; Gallagher & Biscoe, 1978; Charles-Edwards, 1982) en utilisant la relation suivante:

$$I = I_0 \exp(-k IF) \quad (I.2)$$

où I_0 = le rayonnement incident
 k = coefficient d'extinction de la lumière dans le couvert
 IF = indice foliaire

En utilisant, notamment les résultats obtenus par Monteith (1965) avec l'indice foliaire cumulé du haut vers le bas du couvert, Charles-Edwards (1982) montre que l'incidence et, par conséquent, l'interception des flux de photons visibles Q peut être calculé par:

$$Q = 1 - (I/I_0) = 1 - \exp(-k IF) \quad (I.3)$$

Une autre façon de représenter le rayonnement solaire intercepté par le couvert est d'introduire le point de saturation ou l'asymptote maximale de l'interception A de façon à avoir:

$$\epsilon_i = A (1 - \exp(-k IF)) \quad (I.4)$$

Ces équations de base ont été établies en utilisant notamment:
 -les mesure des différentes composantes du bilan radiatif;
 -la méthode des photos hémisphériques;

Dans la suite, nous analyserons brièvement les principes de base de ces deux méthodes d'obtention de ϵ_i .

1.1.2.1.1. Bilan radiatif

Le rayonnement utile à la photosynthèse intercepté par un couvert végétal (PAR_i) est exprimé par la relation suivante:

$$PAR_i = \epsilon_i = (PAR_o - PAR_t) + (PAR_{rs} - PAR_{rc}) \quad (I.5)$$

Les indices expriment les différents composants du bilan:

- (o) incidente
- (rs) réfléchi par le sol
- (rc) réfléchi par l'ensemble sol-culture
- (t) transmise au sol

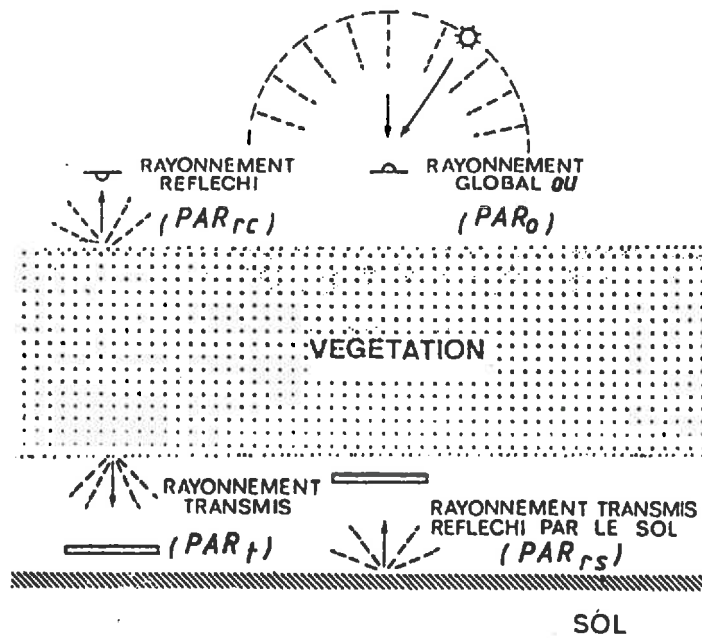


Figure I.3. Schéma de la méthode du bilan radiatif pour mesurer les efficacités de l'interception des rayonnements solaires (adaptée de Varlet-Grancher et Bonhomme, 1979).

La figure I.3 montre un schéma des différents composants du bilan radiatif d'un couvert. Il peut être mesuré par l'utilisation de différents capteurs tels que:

- des cellules type Lambda (Li-Cor "Quantum sensor") qui mesurent les flux des photons visibles (Hipps et al., 1983);

- des piles solarimétriques (Fasheun & Dennett, 1982);

- l'utilisation combinée de plusieurs types de capteurs tels que:

- *le pyranomètre de Moll (Kipp & Zonen) qui permet de mesurer le rayonnement global;

- *le spectroradiomètre (I.S.C.O.) pour avoir le PAR incident (PARo) ou réfléchi par l'ensemble sol-culture (PARrc) (mesures ponctuelles);

- *des cellules type Lambda pour mesurer les mêmes PARo et PARrc mais en continu;

- *des pyranomètres linéaires pour obtenir le rayonnement global transmis au sol (Varlet-Grancher et al., 1982).

Par suite de la forte absorption du rayonnement dans le domaine du PAR par des feuilles vertes, plusieurs auteurs considèrent le rayonnement intercepté (PARI) comme effectivement absorbé par la culture (PARa) (Asrar et al., 1984; Gosse et al., 1986; Baret et al., 1989). Dans la majeure partie de ces études, on utilise la loi classique de pénétration de la lumière dans le couvert, décrite auparavant.

Les unités de mesure du rayonnement global Rg ou du PAR sont exprimées en $W.m^{-2}.J^{-1}$ ou Mole de photons. $m^{-2}.s^{-1}$, pour les données instantanées ou $MJ.m^{-2}.j^{-1}$ ou Mole de photons. $m^{-2}.j^{-1}$ pour les données cumulées.

La mesure de PARa, à partir des composants du bilan radiatif a été utilisée par plusieurs auteurs pour différentes cultures telles que: Canne à sucre (Varlet-Grancher et al. 1982); Maïs (Varlet-Grancher et al., 1982; Gallo et al., 1985); Orge (Gallagher & Biscoe, 1978); Luzerne (Gosse et al., 1982; Allirand et al., 1988) et Blé (Gallagher & Biscoe, 1978; Hipps et al., 1983; Hatfield et al., 1984).

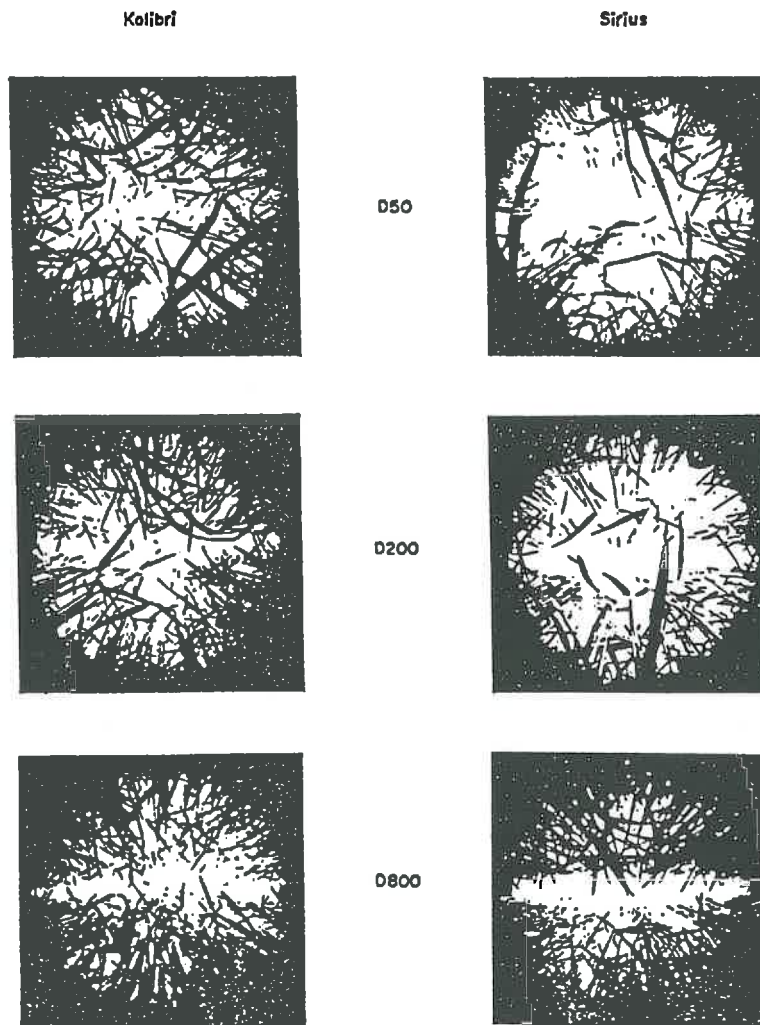


Figure I.4. Photos hémisphériques prises au-dessous d'un couvert de blé (variétés Kolibri et Sirius) avec trois densités de plantes par m^{-2} et orientées de façon que les rangs soient disposés horizontalement (d'après Hooper, 1975).

1.1.2.1.2. Photos hémisphériques

Cette méthode, qui a été développée par Evans & Coombe (1959), a été utilisée par plusieurs auteurs (Anderson, 1964, 1971; Bonhomme & Chartier, 1972; Bonhomme et al., 1974, Olioso, 1987; Baret et al., 1989). La majeure partie des études utilisant cette technique a été faite sur des forêts.

Bonhomme & Chartier (1972) ont utilisé les photos hémisphériques pour estimer le coefficient d'extinction de la lumière dans le couvert de Maïs et de Patate douce. Cette technique est basée sur la probabilité d'un rayon de soleil, à n'importe quel angle azimuthal, de traverser la voûte végétale sans être intercepté. Dans ce cas, les photos sont prises au dessous du couvert avec l'appareil orienté vers le ciel. La même technique a été utilisée par Hooper (1976) pour mesurer l'interception du rayonnement solaire du blé et de l'orge comme l'illustre la figure I.4. Il a montré que la hauteur et le placement de la camera au dessous du couvert de cultures céréalières n'est pas trop difficile et qu'il y a bonne concordance ($\pm 5\%$) avec le PAR_i mesuré avec de tubes solarimétriques quand le couvert était bien développé.

Bonhomme (1976) a aussi utilisé cette technique pour estimer l'indice foliaire et l'interception des rayonnements solaires incidents pour les cultures de Maïs, Patate douce, Canne à sucre et Vigne. La méthode s'est montrée efficace dans l'estimation du PAR absorbé par ces cultures. En raison de sa rapidité, l'auteur suggère l'emploi de cette méthodologie comme une alternative aux mesures faites avec les pyranomètres, notamment lorsqu'une grande précision n'est pas nécessaire.

Bonhomme et al.(1974) ont trouvé une bonne concordance entre l'indice foliaire mesuré et estimé à partir des photos hémisphériques prises non plus au dessous, mais au dessus des cultures en phase d'implantation. Le même principe a été utilisé par Olioso (1987) et Baret et al. (1989) pour estimer la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (PAR_a) par le couvert. Il s'agit de calculer la fraction du rayonnement intercepté par la végétation pour chaque direction d'incidence caractérisée par un angle azimuthal et un angle zénithal.

La distinction entre les éléments verts photosynthétiquement actifs et le sol ou la végétation sénescente est faite en combinant les images rouge et proche infrarouge extraites de la photographie sous la forme d'un "indice de végétation". La fraction absorbée, estimée à partir de la photographie dans la direction incidente du soleil, est reliée à la quantité d'énergie incidente dans le domaine du PAR. Ainsi, il est possible de calculer la fraction du PAR absorbée dans la journée et dans le cycle de la culture. Plus de détails sur cette méthodologie seront présentés dans le chapitre II puisqu'elle sera utilisée pour l'estimation de ϵ_i dans cette étude.

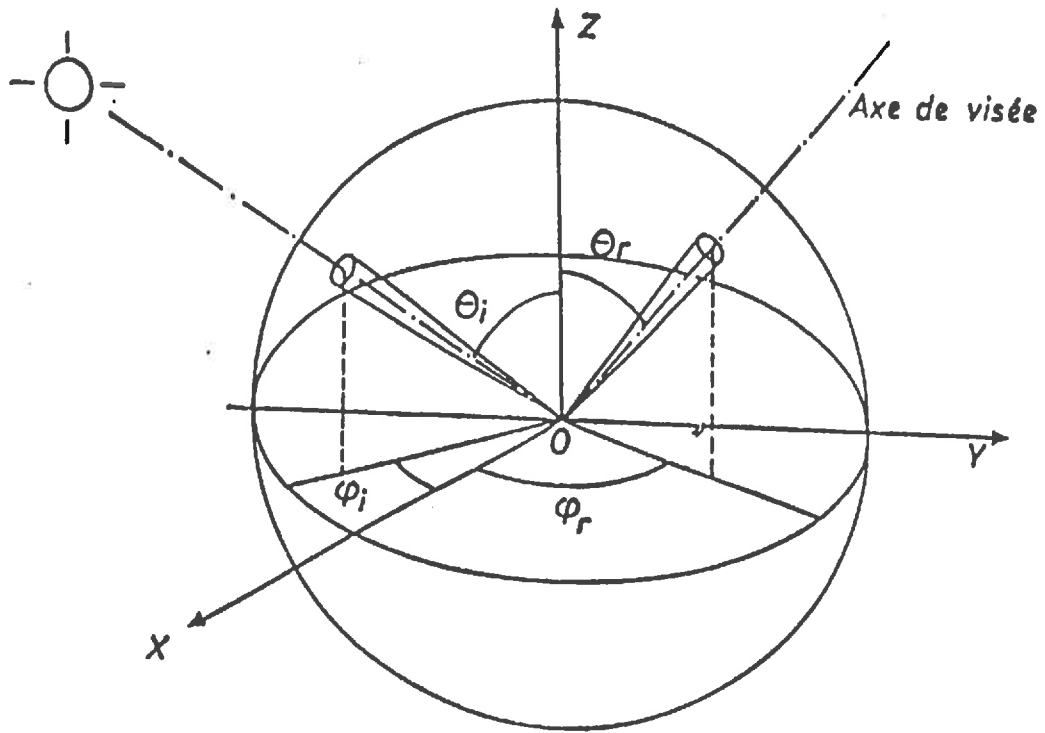


Figure I.5. Schéma illustratif du concept de la réflectance bidirectionnelle (d'après Guyot, 1989).

L'analyse des ces deux méthodes montre que le calcul de ϵ_i à partir des photos hémisphériques permet, en principe, d'éviter trois faiblesses de la méthode du bilan radiatif:

- la difficulté de mesurer la fraction du PAR transmise à la partie inférieure de la strate verte, dans la phase d'installation de la culture;
- la non séparation des organes verts photosynthétiquement actifs des feuilles et d'autres éléments sénescents en fin de cycle;
- la difficulté d'avoir une bonne intégration spatiale, notamment dans la phase initiale de la culture, à moins d'installer un nombre important de capteurs ou d'avoir des capteurs pouvant se déplacer sous le couvert.

Par contre, Olioso (1987) a trouvé quelques difficultés dans le calcul de ϵ_i à partir des photos hémisphériques. Ces difficultés étaient liées à la qualité de discrimination sol-végétation qui était très dépendante des conditions d'éclairement le jour de la prise des photos. Les meilleurs résultats ont été observés en prenant les photos avec un temps couvert.

1.1.2.2. Estimation du PAR intercepté à partir de la réflectance spectrale.

Avant d'aborder sa relation avec ϵ_i , il est nécessaire de rappeler quelques définitions de base liées à la réflectance. On verra ensuite, les facteurs qui affectent la réflectance d'un couvert aussi bien que la notion d'indice de végétation.

1.1.2.2.1. Définition de la réflectance bidirectionnelle

Selon Guyot (1989), le terme facteur de réflectance est préférable à celui de la réflectance bidirectionnelle parce que sa définition est plus générale et s'applique à tous les cas. "Le facteur de réflectance R est le rapport du flux énergétique réfléchi par un élément de surface dans un cône, dont le sommet est sur l'élément de surface, au flux énergétique qui serait réfléchi dans le même angle solide par un réflecteur diffusant parfait (surface blanche lambertienne) et recevant le même éclairement" (Fig.I.5). Cette définition ne dépend pas de la géométrie de l'éclairement.

$$R = \int_{\Omega_T} L_T(\Theta_T, \varphi_T) \cos \Theta_T d\Omega_T / L_W \int_{\Omega_T} \cos \Theta_T d\Omega_T = L_T(\bar{\Theta}_T) / L_W \quad (I.6)$$

où Ω = angle solide dans lequel le flux énergétique est mesuré
 L = luminance énergétique reçu par le capteur
 Θ, φ = repérage d'une direction donnée en coordonnées polaires; Θ angle zénithal et φ azimut

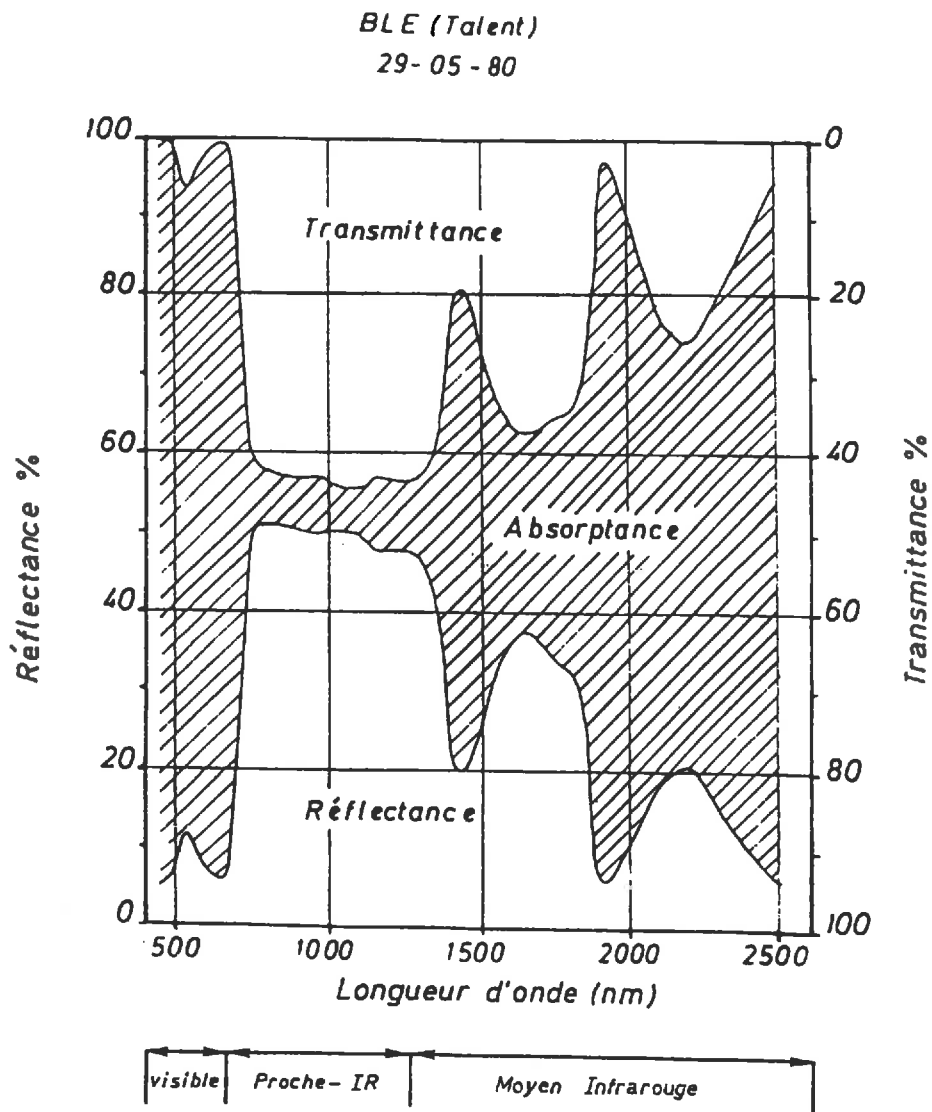


Figure 1.6. Evolution des propriétés optiques d'une feuille de blé en fonction de la longueur d'onde (d'après Guyot, 1989).

Φ = flux énergétique

i, r = indices caractérisant l'énergie incidente ou réfléchi, respectivement

L_w = luminance d'un réflecteur diffusant blanc lambertien

Dans le cas où on n'utilise pas une surface de référence, mais si on mesure l'éclairement incident E , le facteur de réflectance est obtenu en remplaçant L_w par $E/\pi\Omega_0$ car par définition

$$E = \pi \Omega_0 L_w \quad (\text{avec } \Omega_0 = 1 \text{ sr}) \quad (I.7)$$

ce qui donne:

$$R = \pi L_T (\Omega_T) / E \quad (I.8)$$

Dans le cas du rayonnement solaire direct qui arrive à la surface terrestre on peut parler de réflectance bidirectionnelle car l'éclairement a une direction donnée $E(\theta_i, \varphi_i)$. Cependant, l'éclairement reçu par un radiomètre ou par un satellite qui vise le sol est composé non seulement par le rayonnement direct mais également par le rayonnement diffus. C'est pour cette raison que le terme facteur de réflectance est préférable (Guyot, 1989). Si l'on ignore le rayonnement solaire diffus la réflectance bidirectionnelle peut être exprimée par l'équation suivante:

$$R = \pi L_T (\Omega_T) / E(\theta_i, \varphi_i) \quad (I.9)$$

1.1.2.2. Rappel des facteurs affectant la réflectance d'un couvert végétal.

Le flux de rayonnement solaire réfléchi par un couvert végétal est la résultante d'une combinaison de flux élémentaires qui sont réfléchis par les différentes strates de feuilles et du sol. Ainsi, la réflectance d'un couvert végétal dépend de la réflectance des feuilles, de leur disposition et, dans une moindre proportion, de la réflectance du sol (Richardson and Wiegand, 1977). Pour mieux comprendre le rôle de chacun de ses éléments dans la réflectance d'un couvert végétal, ces derniers seront analysés séparément et d'une façon très synthétique.

1.1.2.2.1. Les propriétés optiques des feuilles

L'évolution de la réflectance des feuilles de blé, en fonction de la longueur d'onde, est montrée par la figure I.6. Elle indique trois domaines spectraux dans lesquels les propriétés optiques des feuilles sont caractéristiques (Guyot, 1989).

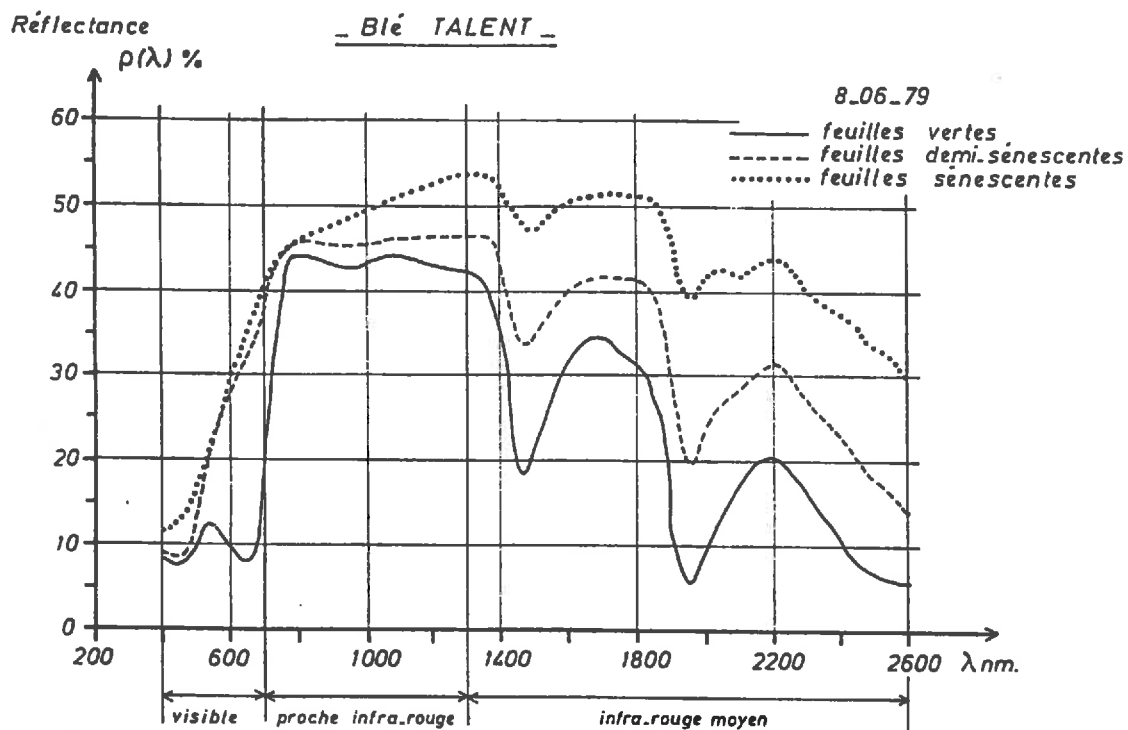


Figure I.7. Evolution des spectres de la réflectance des feuilles de blé au cours de la sénescence (d'après Guyot, 1989).

a) Visible (400-700nm)

Dans ce domaine, les feuilles ont une faible réflectance (15% maximum) et une très faible transmittance. La majeure partie du rayonnement solaire est absorbé par les pigments foliaires (Gates et al., 1965; Gates, 1970):

* de 400 à 500 nm absorption par les carotènes, les xanthophylles et les chlorophylles;

* de 600 à 700 nm absorption par les chlorophylles.

Ainsi, à cause du spectre d'absorption de leurs pigments, les feuilles présentent un niveau minimum de réflectance dans les bandes bleue et rouge et un maximum dans la bande jaune-verte (550 nm environ).

b) Proche infrarouge (700-1300 nm)

Dans ce domaine, il n'y a pratiquement pas d'absorption du rayonnement solaire incident par les pigments ni par l'eau. La structure interne du mésophylle et particulièrement la participation des vides d'air (Sinclair et al., 1973) et l'épaisseur de la feuille (Gausman, 1974) détermineront les propriétés optiques de la feuille dans ce domaine.

c) Infrarouge moyen (1300-2500 nm)

Dans ce domaine, les propriétés optiques des feuilles sont essentiellement affectées par leur teneur en eau (Tucker et Garrat, 1977; Guyot, 1984). Nous ne traiterons pas ce domaine par la suite, car l'infrarouge moyen n'est pas détecté par les capteurs du radiomètre de simulation du satellite SPOT.

d) Facteurs qui affectent les propriétés optiques des feuilles.

Les propriétés optiques des feuilles sont affectées par plusieurs facteurs. Parmi eux, les plus importants sont:

- la structure anatomique,
- l'âge (sénescence),
- la teneur en eau,
- les déficiences minérales,
- les attaques parasitaires.

Les changements des propriétés optiques associés à l'âge des feuilles sont très marqués comme le montre la figure I.7. La disparition des pigments chlorophylliens entraîne un fort accroissement de la réflectance dans le jaune-vert et dans le rouge.

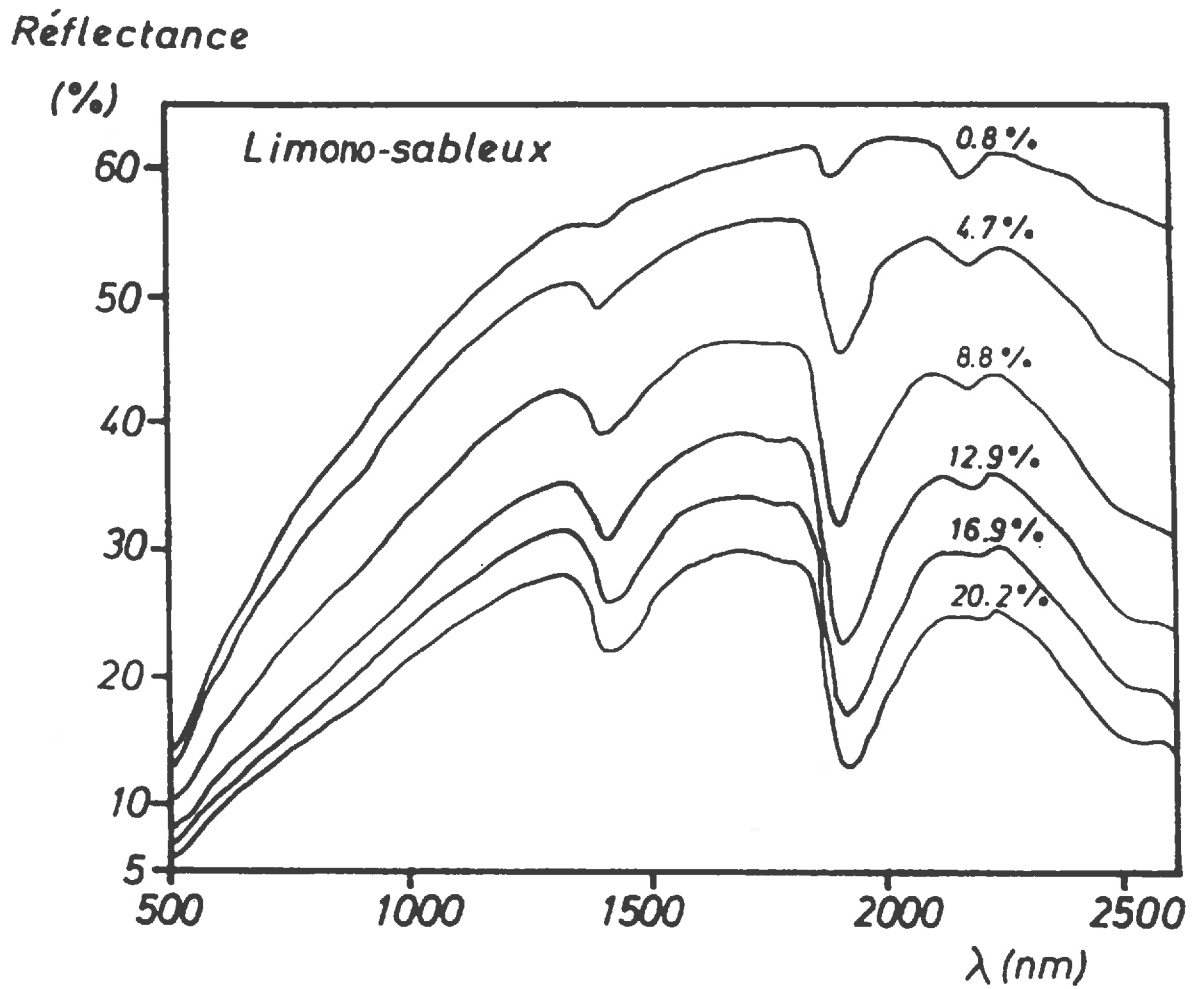


Figure I.8. Evolution du spectre de réflectance d'un sol limono - sableux en fonction de son humidité (d'après Bowers et Hanks, 1965).

Dans le proche infrarouge, la réflectance évolue seulement lorsque la structure interne de la feuille est affectée par son dessèchement (Guyot, 1984).

Les modifications de la réflectance des feuilles en fonction des déficiences minérales sont dues aux variations de la teneur en chlorophylle des feuilles et, selon la sévérité du stress, au changement de leur structure anatomique (Gausmann et al., 1972; Guyot, 1989). Ainsi, la déficience de l'azote par exemple peut être caractérisée par la réflectance spectrale dans les bandes d'absorption de la chlorophylle. Elle peut affecter, non seulement les propriétés optiques des feuilles dans le domaine du visible, mais également dans le proche et le moyen infrarouge en fonction des réductions de leurs épaisseurs et de leur teneur en matière sèche par unité de surface (Guyot, 1989).

L'effet du stress hydrique sur la réflectance des feuilles est beaucoup plus marqué dans l'infrarouge moyen que dans le visible et le proche infrarouge. Cependant, il faut que le stress hydrique soit très marqué pour qu'il puisse être détecté par les mesures de réflectance dans l'infrarouge moyen (Guyot, 1989).

Une analyse plus complète de l'effet des différents facteurs sur les propriétés optiques des feuilles est présentée par Gates et al. (1965), Gausman et al. (1969, 1972, 1977), Guyot (1984, 1989) et Grant (1987).

1.1.2.2.2. Propriétés optiques des sols

Généralement, les propriétés optiques des sols sont affectées par l'humidité, la composition minérale, la teneur en matière organique et l'état de surface du sol.

Bowers & Hanks (1965) ont montré l'influence de l'humidité du sol sur la réflectance (Fig.I.8). Cette figure montre que:

- la réflectance d'un sol croît progressivement du visible au moyen infrarouge ,
- il y a, comme pour la végétation, des bandes d'absorption de l'eau dans le moyen infrarouge qui, sont d'autant plus intenses que le sol est plus humide,
- la réflectance est affectée par la teneur en eau du sol dans tout le domaine spectral considéré, mais elle est d'autant plus faible que le sol est plus humide.

En général, les sols sont plus réfléchissants que la végétation dans le visible et moins dans le proche infrarouge. Ces caractéristiques peuvent jouer un rôle important dans la phase d'implantation de la culture quand elle est peu couvrante (cas des cultures en rangs, faibles indices foliaires) et quand la visée ou le soleil sont proches de la verticale (Vanderbilt et al., 1981; Baret & Guyot, 1986; Baret et al., 1989).

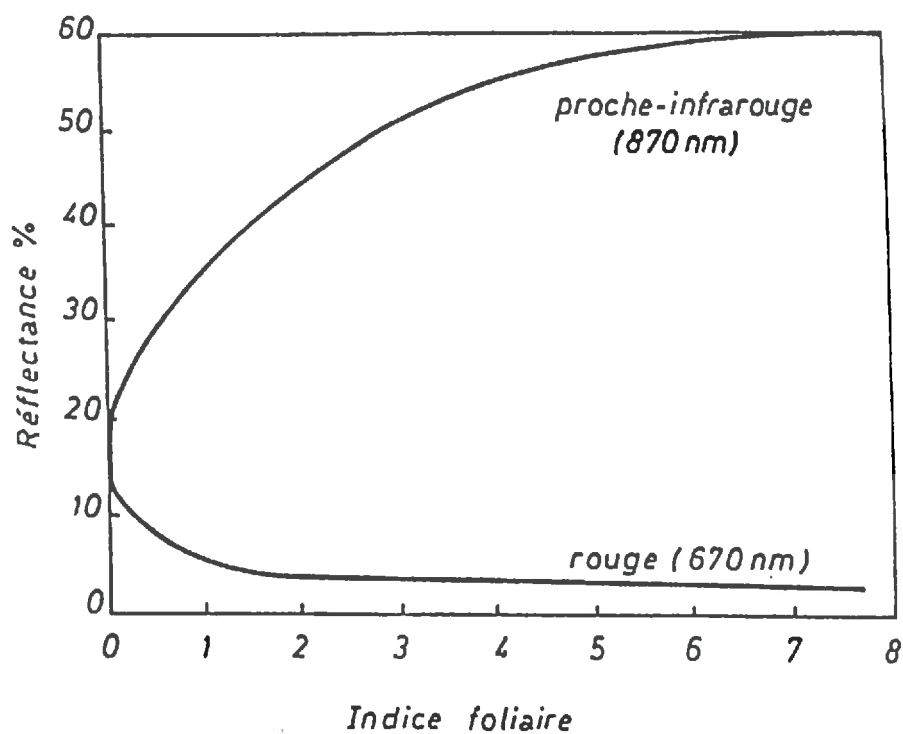


Figure 1.9. Evolution de la réflectance d'un couvert végétal dans le rouge et le proche infrarouge en fonction de l'indice foliaire (d'après Guyot, 1989).

Le contraste des propriétés optiques entre le sol et la végétation a été utilisé pour évaluer la sensibilité des différents indices de végétation en faisant varier les propriétés optiques des sols, fonction des types et des états des ces sols (Ezra et al., 1984; Huete et al., 1985; Elvidge & Lyon, 1985)

1.1.2.2.3. Effet des facteurs propres et externes au couvert sur la réflectance

Le flux de rayonnement solaire réfléchi par un couvert végétal est la résultante d'une combinaison de flux réfléchis non seulement par les feuilles mais également par le sol. Dans la phase initiale de la culture, les indices foliaires sont faibles et le sol a une forte influence sur la réflectance tandis que la participation des feuilles sera plus importante que celle du sol quand la culture se développera.

La figure I.9 montre que le développement de l'indice foliaire provoque une diminution de la réflectance dans le domaine du rouge et une augmentation du proche infrarouge. Cependant, cette réponse spectrale a un limite (saturation) qui se situe, pour la majeure partie des cultures, aux environs d'un indice foliaire de 3 dans le rouge et entre 5 et 6 dans le proche infrarouge.

Les autres facteurs propres au couvert qui affectent la réflectance sont les suivants:

- la structure géométrique du couvert avec des facteurs tels que l'indice foliaire, l'inclinaison des feuilles et la distribution des inclinaisons des feuilles (Verhoef & Bunnik, 1981)

- l'orientation des rangs des cultures (Jackson et al., 1979; Vanderbilt et al., 1981),

Les facteurs externes qui peuvent affecter la réponse spectrale d'un couvert végétal sont les suivants:

- la hauteur du soleil (Baret & Huet, 1979; Schnetzer, 1981; Verhoef & Bunnik, 1981);

- l'angle zénithal de visée (Guyot, 1983; Kimes et al., 1984);

- la dimension de la surface visée par le radiomètre (Guyot, 1980);

- la nébulosité (Guyot, 1980)

- la vitesse du vent (Lord et al., 1985).

La combinaison des réflectances spectrales, sous la forme d'indices de végétation, a été proposée par plusieurs auteurs comme un outil pour minimiser

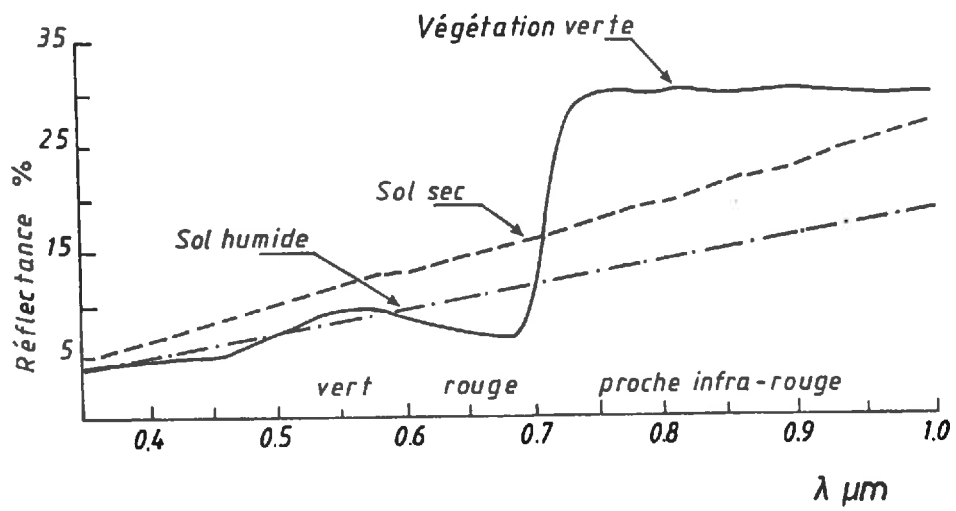


Figure I.10. Réflectance du sol et de la végétation dans le visible et le proche infrarouge (d'après Tucker et Miller, 1977)

l'influence des facteurs perturbateurs décrits auparavant. Les aspects les plus importants des indices de végétation seront présentés dans le sous-chapitre suivant.

1.1.2.3 Les indices de végétation

Il existe plusieurs indices de végétation qui ont été développés afin de permettre une meilleure caractérisation spectrale de la végétation verte et pour diminuer l'influence des facteurs perturbateurs tels que les propriétés optiques du sol, l'angle solaire et la végétation sénescente. Une revue de l'origine, de l'évolution et de la justification de 48 types d'indices de végétation a été faite par Perry & Lautenschlager (1984).

Les bandes spectrales les plus utilisées dans le calcul des indices de végétation sont le rouge (R) et le proche infrarouge (PIR) puisque c'est dans ces deux bandes que le contraste entre le sol et la végétation est le plus accentué (Fig.I.10). En général, ces indices sont groupés en deux catégories:

- les indices basés sur le rapport des canaux,
- ceux basés sur la distinction sol-végétation.

Les indices le plus connus, basés sur le rapport des canaux, sont les suivants:

-Le rapport: $RA = PIR/R$ (Pearson et Miller, 1972) (I.10)

-La différence normalisée: $ND = (PIR-R)/(PIR+R)$ (Rouse et al., 1974) (I.11)

-L'indice de végétation transformé: $TVI = (ND + 0.5)^{1/2}$ (Deering et al., 1975). (I.12)

Les auteurs de cet indice ont ajouté 0.5 à la valeur de ND pour éviter les valeurs négatives et ont pris la racine carrée du résultat pour stabiliser la variance.

Le rapport et la différence normalisée sont fonctionnellement équivalents, c'est à dire qu'on peut passer d'un indice à l'autre (Perry et Lautenschlager, 1984):

$$ND = (RA-1)/(RA+1) \text{ et } RA = (1+ND)/(1-ND) \quad (I.13)$$

Les indices de végétation basés sur la distinction sol-végétation ont été développés avec l'intention de mieux séparer, au niveau de la réponse radiométrique, la participation du sol et de la végétation. Le PVI (Perpendicular Vegetation Index), qui a été proposé par Richardson et Wiegand (1977), est l'un des indices le plus utilisés. Sa formulation est la suivante:

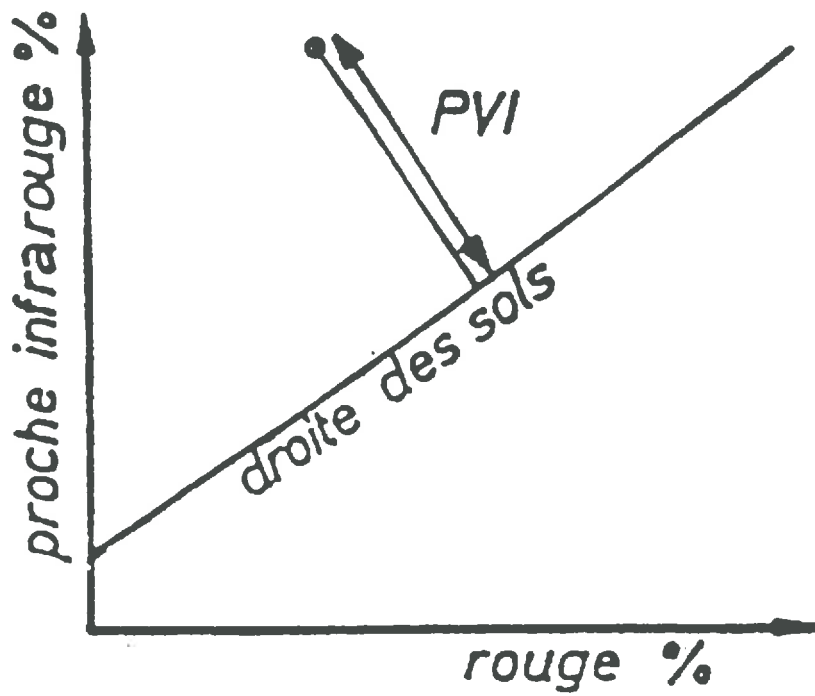


Figure I.11. Schéma de construction du Perpendicular Vegetation Index - PVI (d'après Wiegand & Richardson, 1977 adapté par Baret, 1986).

$$PVI = [(R_{\text{sol}} - R_{\text{vég}})^2 + (PIR_{\text{sol}} - PIR_{\text{vég}})^2]^{1/2} \quad (\text{I.14})$$

Il représente, dans le plan rouge et proche infrarouge, la distance perpendiculaire du point "végétation" à la droite du sol (Fig.I.11). Ses valeurs augmentent avec le développement de la végétation à partir d'un PVI=0 pour le sol nu.

Kauth & Thomas (1976) ont proposé un indice basé sur les mêmes principes que le PVI pour les quatre canaux Landsat (MSS). La connaissance de cet indice, dénommé *Tasseled Cap*, passe nécessairement par l'obtention des axes orthogonaux définissant les objets caractéristiques qu'ils doivent mesurer tels que:

- le sol (SBI : Soil Brightness Index)
- la végétation verte (GVI : Green Vegetation Index)
- la végétation sénescente (YVI : Yellow Vegetation Index).

Jackson (1983) a utilisé ce même principe pour évaluer l'efficacité des indices de végétation basés sur la combinaison de plusieurs canaux de différents satellites.

En effet, l'augmentation du nombre de canaux utilisés dans le calcul d'un indice de végétation n'apporte souvent pas une amélioration significative par rapport à l'utilisation des seuls canaux rouge et proche infrarouge (Jackson, 1983; Perry & Lautenschlager, 1984; Elvidge & Lyon, 1985)

Selon Elvidge & Lyon (1985), le critère de choix d'un indice de végétation devrait être basé notamment sur la valeur du rapport signal/bruit (S/B = (Sensibilité à l'état de la végétation)/(Sensibilité aux facteurs externes à la végétation)).

1.1.2.2.4. Relations entre PARI et la réflectance spectrale

Saeki (1963) a montré que le flux de photos visibles incident sur les feuilles et disponibles pour la photosynthèse I_p peut être décrit par l'équation suivante:

$$I_p = [(1+r)k I_0 \exp(-k IF)] / (1-m) \quad (\text{I.15})$$

- où
- I_0 = rayonnement solaire incident
 - k = coefficient d'extinction de la lumière dans le couvert
 - IF = indice foliaire
 - r, m = coefficients de réflectance et transmittance des feuilles, respectivement.

Le calcul de ϵ_i par l'utilisation de l'indice foliaire, de la géométrie du couvert, de la réflectance et de la transmittance des feuilles, associés à d'autres paramètres propres et externes du couvert a été proposée par plusieurs auteurs sous la forme de modèles dites de réflectance et d'absorptance du rayonnement solaire. Parmi les nombreux modèles existants, les plus utilisés sont le modèle de Suits (1972) et le modèle SAIL (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves) (Verhoef & Bunnik, 1981). Ces modèles sont relativement complexes et utilisent des paramètres qui sont difficiles à mesurer comme l'angle d'inclinaison des feuilles, par exemple.

Un modèle simplifié de réflectance (ou de transmittance) a été proposé par Baret (1988), qui a considéré que la réflectance est liée à l'indice foliaire de la culture et varie entre deux limites:

-la réflectance du sol nu (quand l'indice foliaire est nul) et

-la réflectance infinie qui correspond à la valeur asymptotique atteinte lorsque l'indice foliaire tend vers l'infini.

Ce formalisme peut être écrit:

$$R_c = R_{\infty} + (R_s - R_{\infty}) e^{-kR IF} \quad (I.16)$$

où R_c = réflectance de la culture
 R_{∞} = réflectance infinie de la culture
 R_s = réflectance du sol nu
 k_R = coefficient d'atténuation de la réflectance
 IF = indice foliaire.

Le modèle simplifié de Baret (1988) considère que l'absorptance du couvert dans le domaine du PAR peut être représentée par:

$$A_v = 1 - R_c - (1 - R_s) T_c \quad (I.17)$$

avec A_v = absorptance par les parties végétales photosynthétiquement actives
 R_c = réflectance hémisphérique du couvert
 R_s = réflectance du sol sous la végétation
 T_c = transmittance du couvert au niveau du sol

Comme il a été mentionné auparavant, la transmittance du flux incident à travers un couvert végétal peut être exprimée selon la loi de Beer:

$$T_c = e^{-k_t IF} \quad (I.18)$$

avec:

k_t = coefficient d'atténuation pour la transmittance

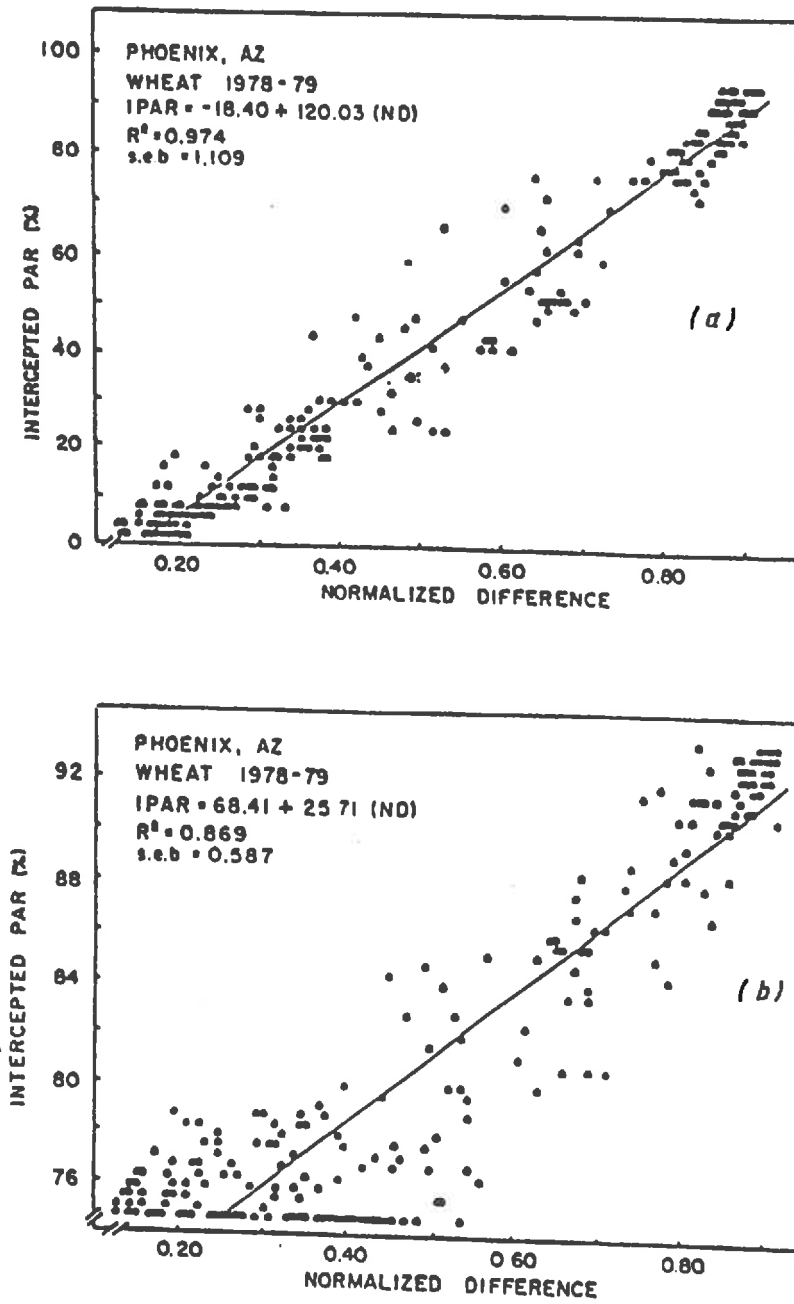


Figure 1.12. Relations entre le PAR intercepté (ϵ_i) et la différence normalisée pendant les phases de croissance (a) et de sénescence (b) du blé (d'après Hatfield et al., 1984).

Une analyse critique faite par Becker et al. (1988) montre que " ce modèle donne des résultats comparables à ceux qui sont fournis par des modèles plus complexes mais avec certaines limitations. Il demande un nombre plus réduit de paramètres dont les principaux sont l'indice foliaire et la fonction de distribution des inclinaisons des feuilles. Il a l'avantage d'être inversé plus facilement que les modèles complexes mais présente la limitation de présenter des fortes absorptions spectrales pour le modèle en loi de Beer."

Selon Baret et al (1989), la quantité du PAR absorbé par le couvert (ϵ_i) sera fonction: des propriétés optiques des feuilles actives (R_{PAR} , T_{PAR}); de la réflectance de la strate inférieure non photosynthétiquement active (sol ou végétation sénescente: R_{sPAR}); de la géométrie du couvert (en particulier l'angle d'inclinaison des feuilles θ_l) de l'indice foliaire vert (IF) et de la position du soleil (θ_s). On peut donc écrire:

$$\epsilon_i = f(\theta_s, IF, \theta_l, R_{PAR}, T_{PAR}, R_{sPAR}) \quad (I.19)$$

Ce sont également les mêmes paramètres qui déterminent la réponse spectrale du couvert:

$$R_c = g(\theta_o, \theta_s, IF, \theta_l, R_f, T_f, R_s) \quad (I.20)$$

avec:

- R_c = réflectance du couvert
- θ_o = orientation de la visée
- R_f, T_f = réflectance et transmittance des feuilles pour le domaine spectral considéré
- R_s = réflectance de la strate non verte sous jacente pour le domaine spectrale considéré

Il existe donc une relation fonctionnelle entre le facteur ϵ_i et la réflectance spectrale d'un couvert. Cette relation a été mise en évidence à partir de considérations théoriques faites par Sellers (1985), Kumar (1988) et Baret et al.(1988, 1989).

Les données expérimentales montrent, elles aussi, l'existence de la relation étroite entre ϵ_i et la réponse radiométrique des cultures comme la betterave (Kumar & Monteith, 1981); luzerne (Allirand et al.,1988); maïs (Gallo et al.,1985) et le blé (Hipps et al., 1983; Hatfield et al., 1984; Ajai et al., 1984).

Un exemple des relations entre ϵ_i et l'indice de végétation est montré dans la figure I.12. Ces données montrent, comme pour les relations entre ϵ_i et l'indice foliaire, qu'il existe un effet évident de la phase phénologique de la plante. La dispersion des données est plus accentuée dans la phase de sénescence et, plus particulièrement, avec les plus faibles valeurs de la différence normalisée. Les auteurs ont attribué cette dispersion à la mauvaise relation entre ϵ_i et l'indice foliaire puisque, dans ce cas, ϵ_i a été estimé à partir de l'indice foliaire.

Les résultats de Baret et al. (1989) montrent l'importance des propriétés optiques des sols dans l'estimation de ϵ_i à partir des données radiométriques. La variabilité de ϵ_i est plus accentuée quand le sol est foncé ou humide et, notamment, en conditions de faibles indices foliaires.

Conclusion

L'analyse bibliographique sur l'estimation de l'efficacité d'interception du rayonnement solaire dans le domaine du PAR (ϵ_i) nous a montré les aspects suivants:

-Le PAR intercepté est un des facteurs les plus importants pour la production finale d'une culture, car il y a une relation linéaire entre de PAR_i et la matière sèche produite. Cela est particulièrement vrai dans des conditions non-limitantes à la croissance ce qui correspond à une forte efficacité photosynthétique. Dans des conditions non-idéales, l'efficacité photosynthétique (ϵ_b) peut être affectée et peut jouer, elle aussi, un rôle important dans la production finale comme on le verra dans le sous-chapitre suivant;

-Le PAR_i peut être obtenu directement par des mesure sur le terrain à partir soit de la méthode du bilan radiatif soit par la prise de photos hémisphériques. L'avantage principale de la méthode basée sur les photos hémisphériques semble être liée à la distinction des feuilles photosynthétiquement actives des feuilles sénescentes, notamment après la floraison. Dans cette phase de la plante, la méthode du bilan radiatif a une tendance à surestimer les valeurs de PAR_i en fonction de l'interception du rayonnement solaire par des feuilles sénescentes;

-Le PAR_i peut être estimé à partir de la réflectance spectrale , puisque ce sont les mêmes facteurs qui affectent ces deux variables. L'indice foliaire IF est le paramètre de liaison entre ces deux variables, de façon que:

$$\rho \text{ -----IF}$$

$$\text{IF -----PAR}_i$$

L'estimation de PAR_i à partir de la réflectance spectrale peut être faite soit, à partir des modèles dites de réflectance et d'absorptance, soit par des relations établies expérimentalement. Malgré l'effort de simplification fait les dernières années, les modèles de réflectance ne sont pas encore opérationnels puisqu'ils sont souvent très complexes et utilisent des variables agronomiques d'obtention difficile comme c'est le cas pour l'angle d'inclinaison des feuilles.

Tableau I.1. Pente des ajustements linéaires ($\in b$) entre la matière sèche produite et le rayonnement intercepté ou absorbé: résultats bibliographiques (d'après Gosse et al., 1986).

Espèce	Références	Expression des résultats g MS par :		
		MJ global	MJ PAR	M de photon
		intercepté (†) ou absorbé (*)		
Plantes en C3 non légumineuses				
— Pomme de terre	• KHURANA & McLAREN, 1982 • ALLEN & SCOTT, 1980	1,21 – 1,63 (†)	2,49 – 3,42 (†)	
— Betterave à sucre	• MILFORD <i>et al.</i> , 1979 • BISCOE & GALLAGHER, 1977		3,5 (†)	
— Blé tendre d'hiver	• SPIERTZ, 1982 • GALLAGHER & BISCOE, 1978 • HOWELL & MUSICK, 1984		2,0 (†) 2,17 ± 0,06 (*) 1,90 (†)	
— Coton	• HOWELL & MUSICK, 1984		0,405 (†)	
— Plusieurs espèces : betterave, pomme de terre, orge, pommier	• MONTEITH, 1977	1,4 ± 0,2 (†)	2,55 (†) 0,542 (†)	
Plantes en C3 légumineuses				
— Pois d'Angole	• HUGUES <i>et al.</i> , 1981 • SIVAKUMAR & VIRMANI, 1984	0,55 ± 0,77 (†)	0,23 (†)	
— Vigna unguiculata	• LITTLETON <i>et al.</i> , 1979	0,87 – 1,31 (†)		
— Féverole	• FASHEUN & DENNETT, 1981		2,6 ± 0,2 4,8 ± 0,4 (*)	
— Soja	• SCHIBLES & WEBER, 1966	0,54 – 0,7 (†)		
Plantes en C4				
— Maïs	• USTENKO & YAGNOVA, 1967 • WILLIAMS <i>et al.</i> , 1968 • SIVAKUMAR & VIRMANI, 1984 • BONHOMME <i>et al.</i> , 1982		3,4 – 4,8 (†) 3,2 (†) 0,82 (†)	
— Sorgho	• SIVAKUMAR & VIRMANI, 1984 • HOWELL & MUSICK, 1984		2,05 – 3,17 (*) 3,09 (†) 0,60 (†)	

(†) : Rayonnement intercepté = rayonnement incident – rayonnement transmis au sol.

(*) : Rayonnement absorbé = rayonnement incident – rayonnement transmis au sol – rayonnement réfléchi par la culture.

-L'obtention de PAR_i à partir de la réflectance spectrale offre une perspective d'utilisation de la télédétection satellitaire, puisque la réflectance dans les domaines du rouge et du proche infrarouge, entre autres, peut être calculée à partir des images des distinctes satellites tels que SPOT, NOAA ou LANDSAT qui ont différents niveaux de résolution au sol et de fréquence de passage.

1.1.3. Efficience de la conversion du P.A.R. intercepté en biomasse (ϵ_b).

Le concept de rendement énergétique dans l'analyse de la croissance en matière sèche des différentes cultures a été beaucoup utilisé ces dernières années (Monteith, 1977; Gallagher & Biscoe, 1978; Gosse et al., 1986).

En conditions non limitantes d'alimentation hydrique et minérale, plusieurs auteurs ont montré qu'il existe une relation linéaire entre la matière sèche totale accumulée par le couvert végétal et la quantité d'énergie interceptée (Monteith, 1972; Bisco & Gallagher, 1977; Gallagher & Biscoe, 1978;).

Cependant, la pente de cette relation (ϵ_b) est variable en fonction des espèces et de leurs types de cycle photosynthétique, C3 ou C4. Les dénominations C3 et C4 sont associés aux produits intermédiaires du processus de la respiration qui contiennent, respectivement, trois ou quatre molécules de Carbone. En général, l'efficience de conversion du PAR absorbé en matière sèche (ϵ_b) est plus élevée pour les plantes type C4 et les légumineuses sont moins efficaces que les autres espèces type C3 (Tableau I.1 et Fig.I.13). Gosse et al., (1986) ont trouvé des valeurs moyennes de 2,51, 1,93 et 1,72, respectivement, pour les plantes en C4, plantes en C3 et pour les plantes en C3 légumineuses.

Pour la culture du blé les valeurs de ϵ_b , en g.MJ⁻¹ PAR, sont de l'ordre de: 1,80-2,40 (Gallagher & Biscoe, 1978); 2,00 (Spiertz, 1982); 1,90 (Howel & Musik, 1985) et 1,47-1,74 (Baret, 1986).

Ces valeurs sont inférieures à celle de $\epsilon_b=3\text{g.MJ}^{-1}$ trouvées par Fisher (1983), qui a regroupé les données de ϵ_b du blé et d'autres espèces similaires obtenus dans différents endroits (Fig.I.14). Cette valeur de ϵ_b correspond à une efficience de 5% de conversion du PAR absorbé en biomasse et est inférieure aux potentiels théoriques de 7 à 10% trouvés par Nichiporovich (1971), cité par Fisher (1983), et de 7,5% indiqué par Evans (1973). Lorsque le poids des racines a été considéré, la valeur moyenne (sur 5 ans) de ϵ_b , calculée pour la période avant l'anthèse, a été de $4,9 \pm 0,1\%$. Il est possible que l'utilisation de variétés modernes de blé (naines, feuilles érigées, bonne réponse à la fertilisation azotée et à la radiation solaire, etc.) soit une des raisons justifiant les valeurs élevées de ϵ_b trouvées par Fisher (1983).

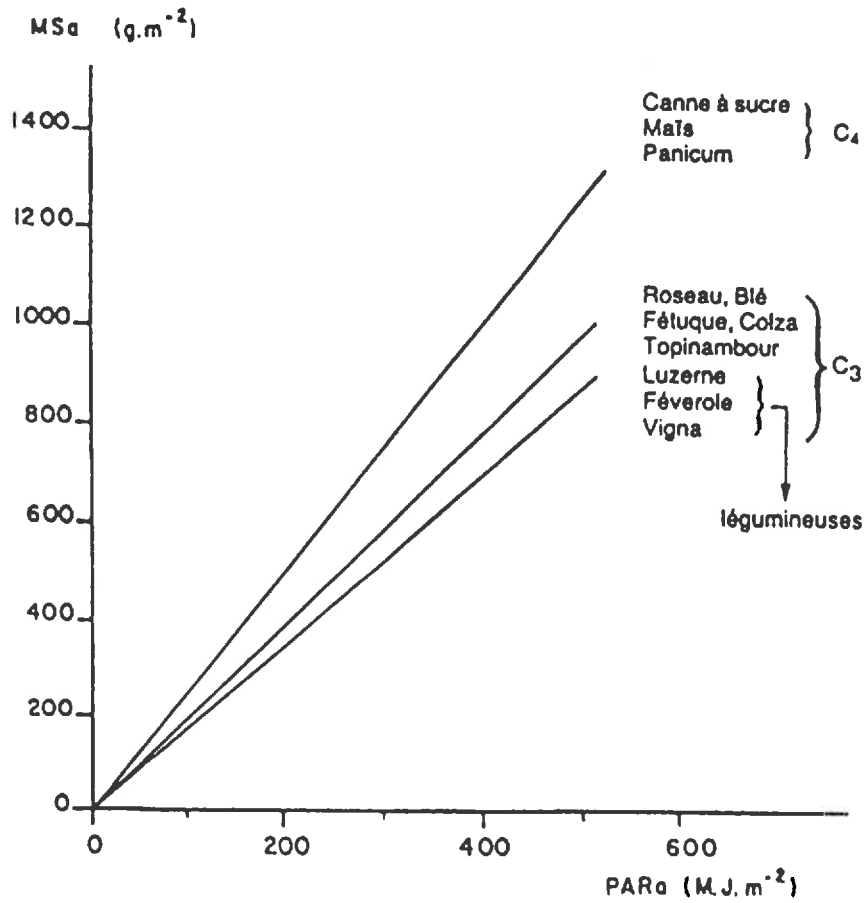


Figure 1.13. Evolution de la matière sèche aérienne d'une culture en fonction de la somme du rayonnement visible intercepté pour des espèces de type C₃ et C₄ (d'après Gosse et al., 1986).

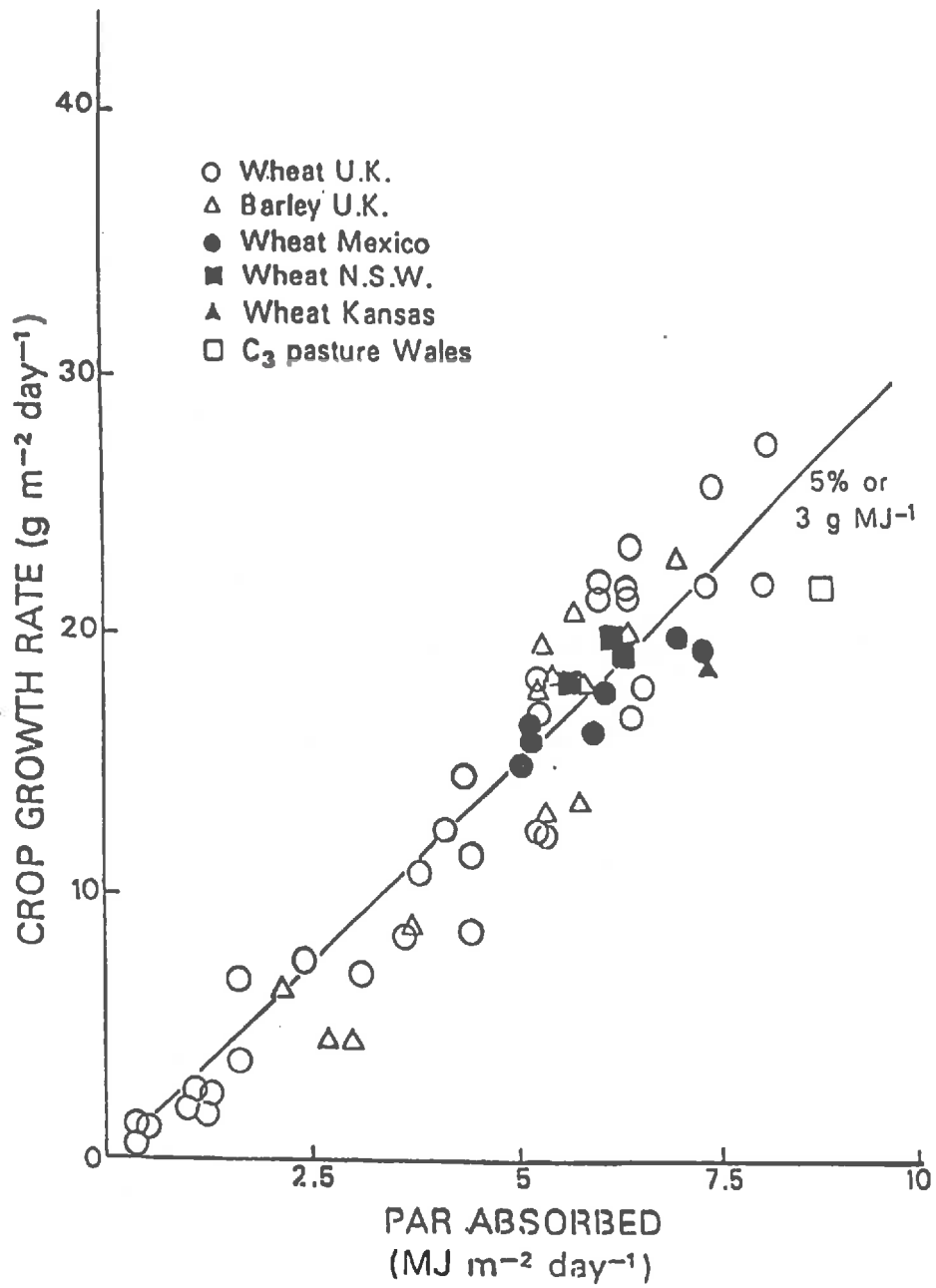


Figure 1.14. Relations entre le PAR absorbé et la production de matière sèche pour la culture du blé et espèces similaires (d'après Fisher, 1983).

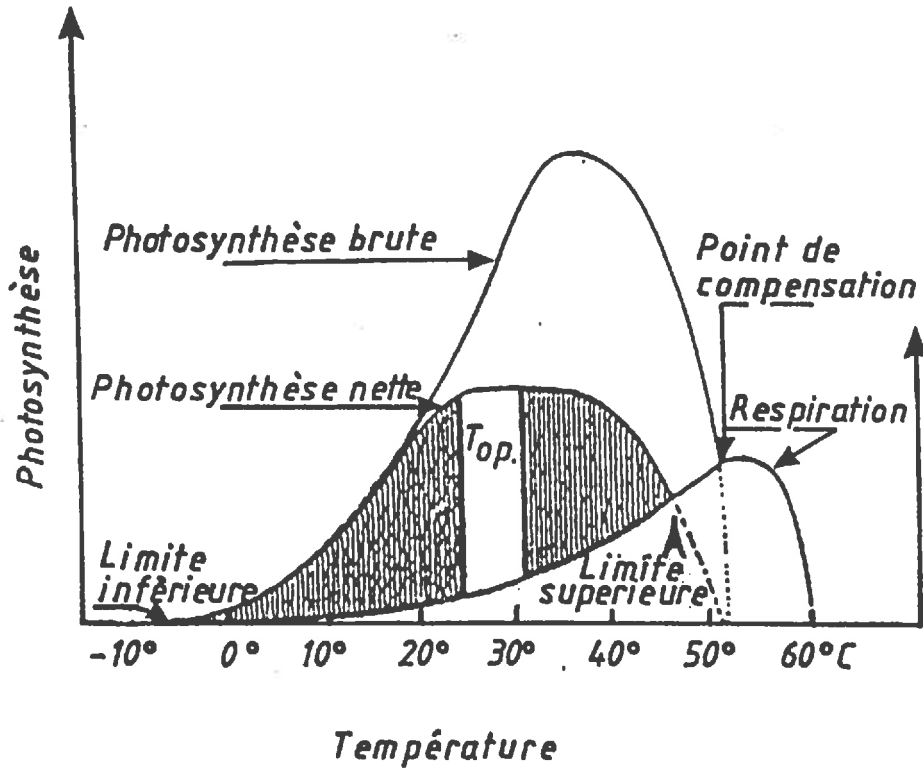


Figure I.15. Diagramme montrant l'influence de la température sur la photosynthèse et sur la respiration (d'après Tenhunen et Westrin, 1979. In: Larcher, 1980).

Contrairement aux premiers résultats obtenus qui suggéraient des valeurs de ϵ_b constantes, pendant la phase de croissance maximale, l'efficacité ϵ_b peut être affectée par la température, par la phase phénologique et par des conditions d'alimentation hydrique et minérale comme nous le verrons dans la suite.

1.1.3.1. Effet de la température

Le schéma de la figure I.15 illustre bien la variation de la photosynthèse nette en fonction de la température, à courte échelle de temps. La zone hachurée traduit la différence entre la photosynthèse brute et la respiration, soit la photosynthèse nette. Cette figure montre l'existence des températures minimales, maximales et optimales pour la photosynthèse nette. La photosynthèse nette augmente d'abord à partir d'un seuil de température minimale (limite inférieure), atteint un niveau maximum (température optimale) puis à une température donnée (limite supérieure) il se produit un phénomène d'inhibition qui provoque une diminution de l'activité photosynthétique. Le point d'équilibre entre la photosynthèse brute et la respiration est dénommé "point de compensation".

Une des façons de représenter l'effet de la température sur la respiration s'appuie sur l'équation:

$$R_2 = R_1 Q_{10}^{(T_2 - T_1)/10} \quad (I.21)$$

où R_1 et R_2 sont les niveaux de respiration associés, respectivement, aux températures T_1 et T_2 .

Selon McCree (1974), la respiration totale de la plante R_t est composée par la respiration d'entretien R_e et par la respiration de synthèse R_s . A l'échelle journalière, R_s est une fraction constante de la photosynthèse brute P_g , tandis que R_e est directement liée au poids de la matière sèche totale W_t , exprimée en g.CO₂. L'expression liant ces paramètres est la suivante:

$$R_t = a P_g - b W_t \quad (I.22)$$

avec a = la fraction de P_g respirée pendant la synthèse du matériel cellulaire nouveau;
 b = la fraction de W_t respirée chaque jour pour l'entretien de l'appareil cellulaire.

Les valeurs de a et b ont été, respectivement, de 0,37 et 0,0013 pour le coton à 20°C avec une valeur de Q_{10} égal à 2 (Baker et al., 1972). Pour l'orge, Biscoe et al.(1975) ont trouvé des valeurs de $a = 0,34$ et $b = 0,012$.

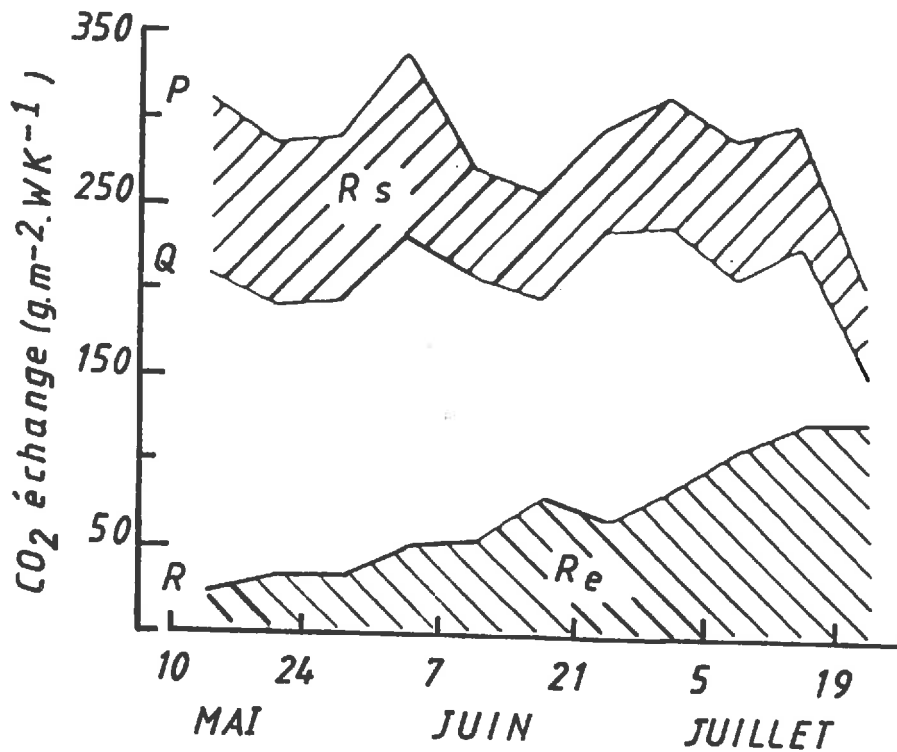


Figure 1.16. Variations hebdomadaires des valeurs de la photosynthèse brute P , de la respiration de synthèse R_s ($P-Q$) et de la respiration d'entretien R_e (R), et de l'augmentation de la matière sèche ($Q-R$) de l'orge (d'après Biscoe et Gallagher, 1977).

La figure I.16 illustre bien l'évolution hebdomadaire de la photosynthèse brute P_g et des deux types de respiration R_s et R_e . Au début du cycle, R_e (représentée par R) est inférieure à R_s (différence entre P et Q). La production de matière sèche ($Q - R$) dépend essentiellement de la photosynthèse qui est directement liée à la quantité de radiation solaire absorbée par la culture.

Avec l'évolution de la culture, le poids de la matière sèche W_t augmente avec un taux inversement proportionnel à R_e . Cela occasionne une diminution du taux de production de biomasse. Les températures élevées peuvent jouer un rôle très important dans ce processus car, selon McCree (1974), les valeurs de R_e doublent pour chaque augmentation de 10°C de la température.

Les effets de la température sur la production de biomasse sont confirmés par les résultats de plusieurs auteurs (Hodges & Kanemasu, 1977; Gallagher & Biscoe, 1978; Garcia et al., 1988). Hammer & Vanderlip (1989) ont montré que les valeurs de ϵ_b pour deux hybrides de sorgho ont été affectées différemment par la température. Ils suggèrent que la meilleure efficacité photosynthétique ($\epsilon_b = 4,89 \text{ g MJ}^{-1}$) de l'hybride ATx623/RTx430 par rapport à celle de l'hybride RS510 ($\epsilon_b = 3,81 \text{ g MJ}^{-1}$) pour les températures plus élevées est due à sa meilleure adaptation aux régions les plus chaudes des Etats-Unis.

Garcia et al. (1988) ont noté que la température affecte les valeurs de ϵ_b , non seulement après l'anthèse mais aussi pendant la phase initiale de la culture. Ils suggèrent donc que les modèles d'estimation de ϵ_b prennent en compte l'effet de la température et de la phase phénologique de la culture.

1.1.3.2. Importance de la phase phénologique

La figure I.17 illustre bien l'importance de la phase phénologique sur l'efficacité de la transformation de l'énergie interceptée par la culture. Dans la phase initiale (Fig.I.17 a), il y a une relation linéaire entre le rayonnement intercepté et la photosynthèse nette. Par contre, dans la phase finale du cycle (Fig.I.17 b), le niveau d'éclairement est un facteur moins déterminant pour la photosynthèse à cause de l'apparition d'un palier au-delà de 300 W.m^{-2} .

La linéarité de la relation entre la biomasse produite et la quantité d'énergie interceptée ou absorbée a été montrée par plusieurs auteurs. Néanmoins, ces relations ont été établies sur l'ensemble du cycle ou pendant la période de plus forte croissance des plantes et sans stress hydrique ou minéral important (Monteith, 1977; Biscoe & Gallagher, 1977; Gallagher & Biscoe, 1978; Gosse et al., 1986).

Gosse et al. (1986) suggèrent certaines précautions sur l'utilisation de la relation linéaire, établie statistiquement, entre la matière sèche aérienne et la fraction du PAR absorbée. L'application de cette relation est délicate dans la phase d'implantation de la culture, à cause de l'importance des parties souterraines, des

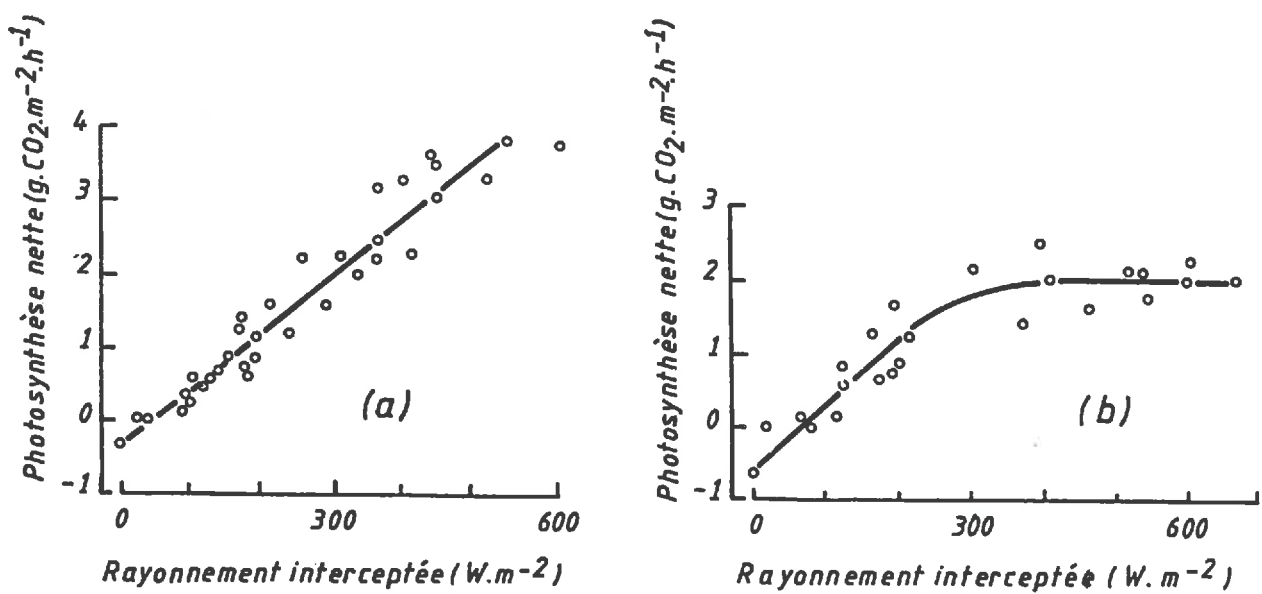


Figure 1.17. Photosynthèse nette P_n en fonction du rayonnement intercepté pendant les phases initiale (a) et finale (b) du cycle de l'orge (d'après Biscoe et Gallagher, 1975).

variations de l'efficacité de conversion et des mesures peu précises du rayonnement. De même, la phase de maturation, par le faible taux de croissance, le changement de l'orientation du métabolisme et la faible précision des mesures du rayonnement absorbé par certaines cultures, sont autant de facteurs qui compliquent l'application de cette relation.

Les résultats obtenus par Varlet-Grancher et al. (1982), sur différentes cultures, montrent que l'efficacité ϵ_b peut être très variable au cours du cycle quand elle est calculée sur des courtes périodes (Fig.I.18). Les données de Oliosio (1987) et Garcia et al.(1988) vont dans le même sens et montrent que les valeurs de ϵ_b varient selon la phase phénologique du blé. En général, les valeurs de ϵ_b sont plus faibles dans les phases d'implantation et après la floraison. L'efficacité maximale s'étale, normalement, entre le stade "épi à 1cm" et l'épiaison.

Asrar et al.(1984) ont aussi montré la variabilité de ϵ_b en fonction des phases phénologiques du blé. Par contre, leurs résultats indiquent une diminution de ϵ_b avec le temps ce qui n'est pas en accord avec les données d'Oliosio (1987) ni avec celles de Garcia et al.(1988).

Gallagher & Biscoe (1978) ont trouvé des valeurs de ϵ_b , intégrées sur l'ensemble du cycle du blé et de l'orge de 30% inférieures à celles de la période avant l'épiaison. Ils ont justifié ces résultats par une diminution de la photosynthèse et par une augmentation de la respiration par unité de photoassimilats après l'anthèse.

La prise en considération ou non des racines peut causer des différences dans les valeurs de ϵ_b , notamment dans la phase d'implantation de la culture quand celles ci représentent environ 30 à 35% de la matière sèche totale (Gallagher & Biscoe, 1978; Green, 1987).

La majeure partie des résultats présentés jusqu'ici ont été obtenus en conditions d'alimentation hydrique et minérale non limitantes. Dans ces conditions, ϵ_b est relativement constante, notamment quand elle est intégrée sur de longues périodes ce qui permet l'obtention de la production maximale ou potentielle d'une culture en fonction de la disponibilité d'énergie solaire(Monteith, 1972, 1977; Gosse et al., 1986). Cependant, les cultures sont souvent affectées par des fertilisations non adéquates et par des périodes de déficit hydrique. Cette situation est particulièrement importante pour les cultures pluviales des régions tropicales ou subtropicales à cause de la faible fertilité naturelle des sols et de la distribution irrégulière des pluies (Steinmetz et al. 1985, 1990). Il est donc important de connaître les effets possibles de l'alimentation hydrique et minérale sur l'efficacité de transformation du PAR absorbé en matière sèche (ϵ_b). On traitera de ce sujet dans le sous-chapitre suivant.

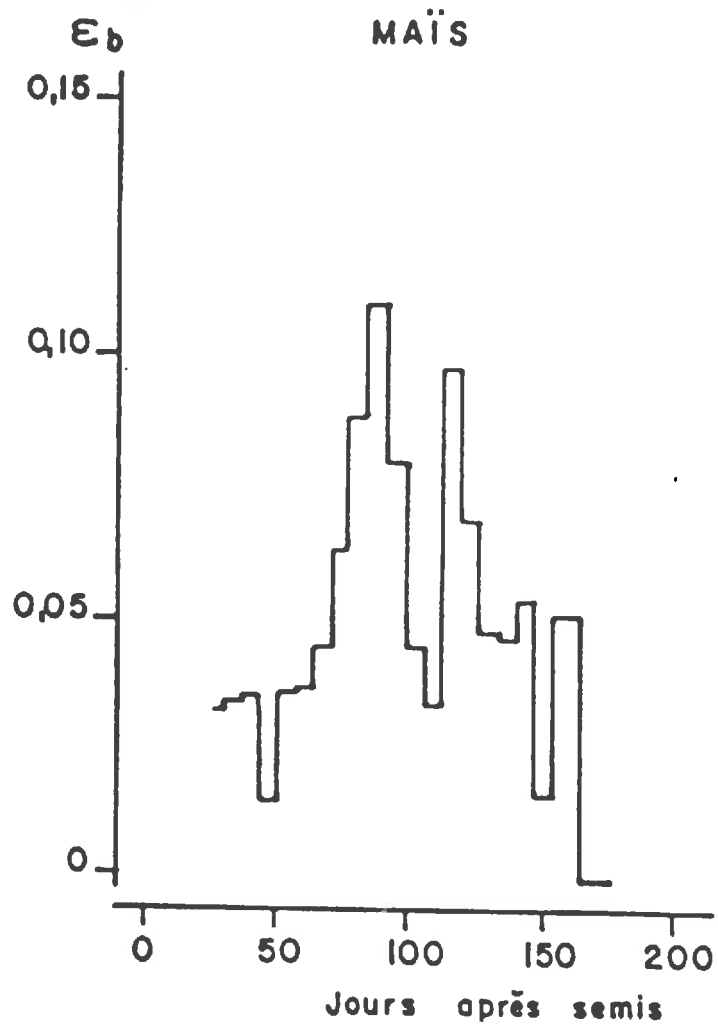


Figure 1.18. Evolution de l'efficience de conversion ϵ_b d'une culture de maïs (d'après Varlet-Grancher et al., 1982).

1.1.3.3. Influence du stress hydrique

L'effet du stress hydrique sur les plantes peut se produire de deux façons: soit par un manque d'eau pour le système racinaire (déterminé par l'état de la réserve en eau du sol) soit par une demande évaporative excessive au niveau des feuilles (déterminée par les conditions de l'atmosphère). D'un point de vue climatique, la disponibilité d'eau dans le sol dépend du bilan entre l'apport d'eau par la pluie et l'évaporation, alors que le niveau d'évaporation potentielle est affecté par la disponibilité d'énergie solaire et du déficit de saturation de l'air.

La figure I.19 illustre l'effet du stress hydrique sur la photosynthèse de l'orge en fonction des niveaux d'interception de la radiation solaire (Biscoe & Gallagher, 1977). Au début de la période de déficit hydrique, la photosynthèse nette était équivalente pour les périodes du matin et de l'après midi (Fig. 19 a). Trois jours plus tard (Fig. 19 b), les valeurs matinales étaient similaires à celles de la figure 16a, mais une réduction de près de 50% de la photosynthèse nette a été observée, dans l'après midi, par rapport aux valeurs matinales. Elle a été réduite seulement à partir du moment où le potentiel de l'eau des feuilles a dépassé 30 bars.

Gallagher & Biscoe (1978) ont montré, pour le blé, que le stress hydrique provoque une diminution de l'activité photosynthétique et de ϵ_b par son action sur la fermeture des stomates. L'effet du stress hydrique sur ϵ_b a été plus accentué dans les parcelles où les indices foliaires étaient les plus élevés. Des résultats similaires ont été obtenus sur l'orge (Legg et al., 1979) et sur légumineuses (Muchow, 1985).

Les valeurs de ϵ_b trouvées par Legg et al. (1979) pour la culture de l'orge, soumise au déficit hydrique, sont inférieures à celles indiquées par Gallagher & Biscoe (1978), obtenues en conditions d'alimentation hydrique non limitantes.

On retrouve, en interaction avec l'effet du stress hydrique d'une part celui du stade phénologique décrit auparavant et d'autre part un double effet sur ϵ_b et ϵ_i . En effet, Legg et al. (1979) ont montré que l'effet du stress hydrique sur l'absorption du PAR (ϵ_i) et sur l'efficacité photosynthétique (ϵ_b) dépend de la phase de la culture. Ainsi, la réduction de ϵ_i a occasionné des pertes de 30 à 40% dans la production de biomasse quand les plantes ont été stressées dès le début du cycle. Ces pertes ont été moins sévères (de 10 à 20%) quand le stress hydrique a été imposé plus tardivement.

Pendant la remplissage des grains, le manque d'eau a fait diminuer de façon proportionnelle ϵ_i et ϵ_b en fonction de l'accélération de la sénescence des feuilles. Quand elle est intégrée pendant tout le cycle, la diminution de ϵ_b a été inférieure ou égale à 6%. Par contre, Hughes & Keating (1983) ont montré que ϵ_b a été plus affectée que ϵ_i quand le *pigeon pea* pluvial a souffert du manque d'eau.

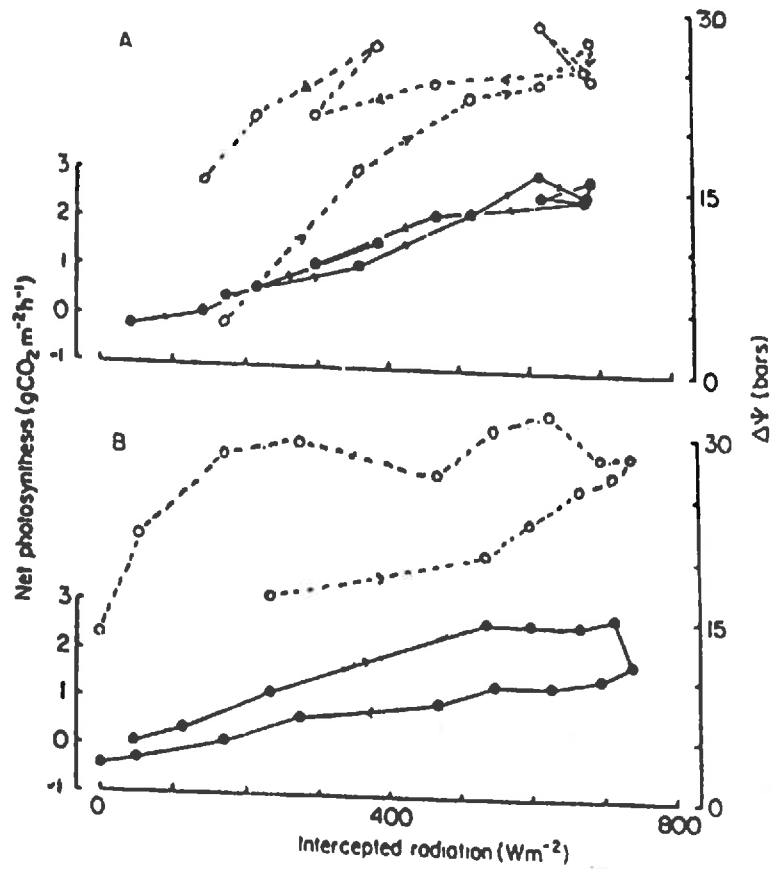


Figure 1.19. Evolution de la photosynthèse nette P_n (●—●) et du potentiel de l'eau dans les feuilles $\Delta\Psi$ (○--○) de l'orge en fonction du rayonnement intercepté pendant une journée au début (a) et à la fin (b) d'une période de déficit hydrique. Les flèches indiquent l'évolution des mesures dans la journée (d'après Biscoe et Gallagher, 1977).

Muchow (1985) a étudié l'effet de trois régimes d'alimentation hydrique sur ϵ_i et ϵ_b de plusieurs espèces de légumineuses. Ses principaux résultats montrent que:

-quand le déficit hydrique s'est développé lentement de l'émergence à la maturité, ϵ_i a été plus affectée que ϵ_b et ceci jusqu'à 6 semaines après la levée. Après cette période, ϵ_b a été plus affectée que ϵ_i ;

-sur l'ensemble du cycle, les réductions relatives de ϵ_i ont été plus accentuées que celles de ϵ_b pour certaines espèces (Black gram cv.Regur; Pigeon pea; Soja cv.Buchanan) tandis que d'autres espèces (Green gram cv.Berken; Cowpea cv.Red Caloona) ont montré des réductions similaires de ϵ_i et de ϵ_b ;

Les résultats obtenus par Olioso (1987) ont aussi montré l'importance de la disponibilité en eau sur ϵ_b . Une seule irrigation a provoqué une augmentation de 3,00 à 3,22 g.MJ⁻¹, trois semaines plus tard.

1.1.3.4. influence de la fertilisation minérale

Une revue de la littérature indiquant les effets de la fertilisation azotée sur la photosynthèse et sur l'efficacité ϵ_b pour les cultures de soja, riz et maïs a été publiée par Sinclair & Horie (1989). Pour des valeurs moyennes d'assimilation de CO₂, l'efficacité d'utilisation du rayonnement ϵ_b a été estimée à 1,2 g MJ⁻¹ pour le soja, à 1,4 g MJ⁻¹ pour le riz et à 1,7 g MJ⁻¹ pour le maïs.

La figure I.20 illustre l'influence des niveaux d'azote dans les feuilles sur l'efficacité ϵ_b du maïs, du riz et du soja et montre l'existence de grandes différences entre les espèces. Le maïs présente une efficacité ϵ_b plus élevée comparativement aux deux autres cultures et cela pour tous les niveaux d'azote. Par contre, le soja présente des valeurs les plus faibles de ϵ_b . Ces réponses sont en accord avec les résultats de Brown (1978, 1985) qui a montré que l'efficacité d'utilisation de l'azote est différente pour les plantes du type C3 et C4.

Gallagher & Biscoe (1978) ont montré que la fertilisation azotée a augmenté les valeurs de ϵ_b du blé de 2,8 à 3,1 g.MJ⁻¹ et de 2,3 à 2,8 g.MJ⁻¹, respectivement, dans les stations de Rothamsted et Sutton Bonington, en Angleterre. Cette augmentation a été attribuée à une élévation des niveaux d'azote dans les feuilles qui ont entraîné une élévation des niveaux photosynthétiques du couvert. La valeur plus faible observée en 1976 (2,3 g.MJ⁻¹) a été attribuée à une fermeture persistante des stomates due au stress hydrique.

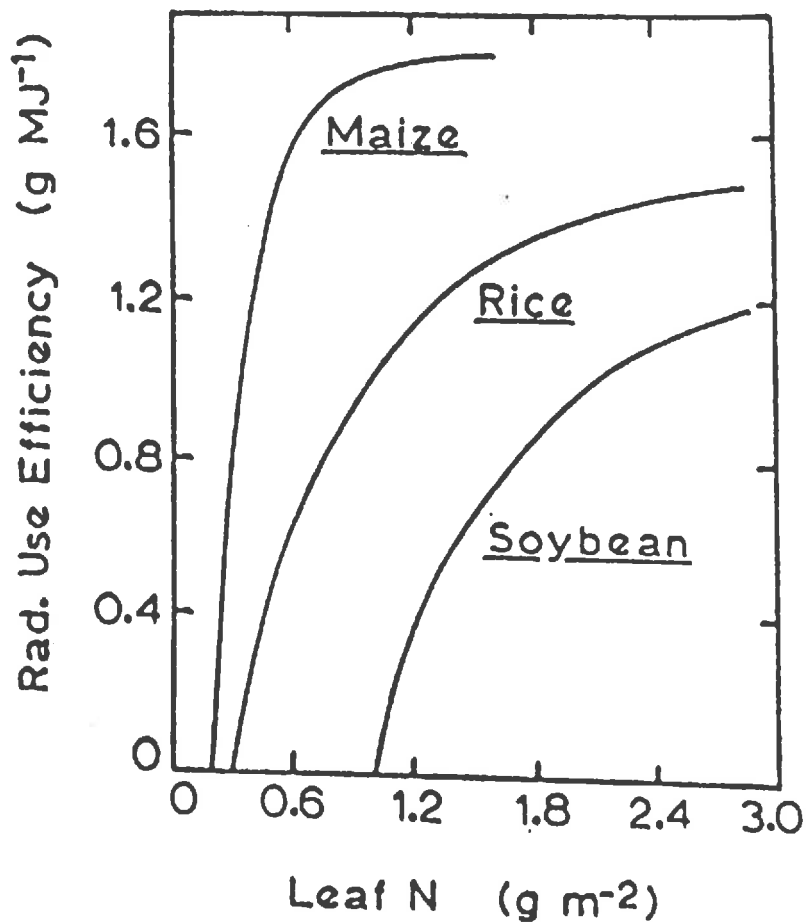


Figure I.20. Evolution de l'efficacité de conversion de l'énergie absorbée (ϵ_b) en fonction des niveaux d'azote dans les feuilles de maïs, de riz et de soja (d'après Sinclair et Horie, 1989).

Les données obtenues par Green (1987) montrent, elles aussi, une augmentation de ϵ_b en fonction des doses d'azote. Par contre, cet auteur n'a pas trouvé l'influence négative des doses très élevées d'azote comme l'ont suggérée les résultats de Gallagher & Biscoe (1978). Il faut remarquer que les valeurs de ϵ_b , pour le blé, obtenues par Green (1987), indépendamment des niveaux d'azote, sont inférieures à celles trouvées par d'autres auteurs tels que Gallagher & Biscoe (1978), Oliso (1987), et Garcia et al. (1988).

Garcia et al. (1988) ont montré qu'il y a eu une tendance à l'augmentation de ϵ_b en fonction des doses d'azote. Cependant, ces différences n'ont pas été statistiquement significatives.

Conclusion

-l'analyse bibliographique a montré que ϵ_b , terme traduisant l'efficacité de la photosynthèse est affecté par plusieurs facteurs tels que la température, la phase phénologique, et les déficits hydrique et minéral. Cependant, l'effet du stress hydrique semble être le plus gênant si l'on considère que les espèces ou variétés sont adaptées aux conditions de température des régions où elles sont cultivées et que la fertilisation est un facteur contrôlable. En effet, le déficit hydrique, causé notamment par la mauvaise répartition des pluies et la faible capacité de rétention de l'eau des sols, est l'un des problèmes majeurs de l'agriculture pluviale existant particulièrement dans certaines régions de l'Afrique et de l'Amérique Latine.

-La littérature nous a aussi montré que les valeurs de ϵ_b peuvent être considérées comme peu variables pendant la phase de croissance la plus forte et en conditions non limitantes d'alimentation hydrique et minérale. Il est alors possible d'envisager l'estimation de la production maximale ou potentielle d'une culture sur un site donné compte-tenu de l'interception du rayonnement incident (ϵ_i), lié à l'époque de semis et à la durée du cycle de la culture. Cette production maximale pourrait être considérée comme une référence pour l'analyse de la production réelle (Gosse et al., 1986).

-A partir de ces constatations, on peut se poser la question sur la possibilité d'estimer la production réelle d'une culture à partir d'une telle approche. Une voie possible consiste à formaliser l'action du stress hydrique sur la production de biomasse obtenue en conditions hydriques non-limitantes ayant, par conséquence, les valeurs de ϵ_b maximales. C'est dans cette voie que s'articulera la poursuite de cette analyse bibliographique.

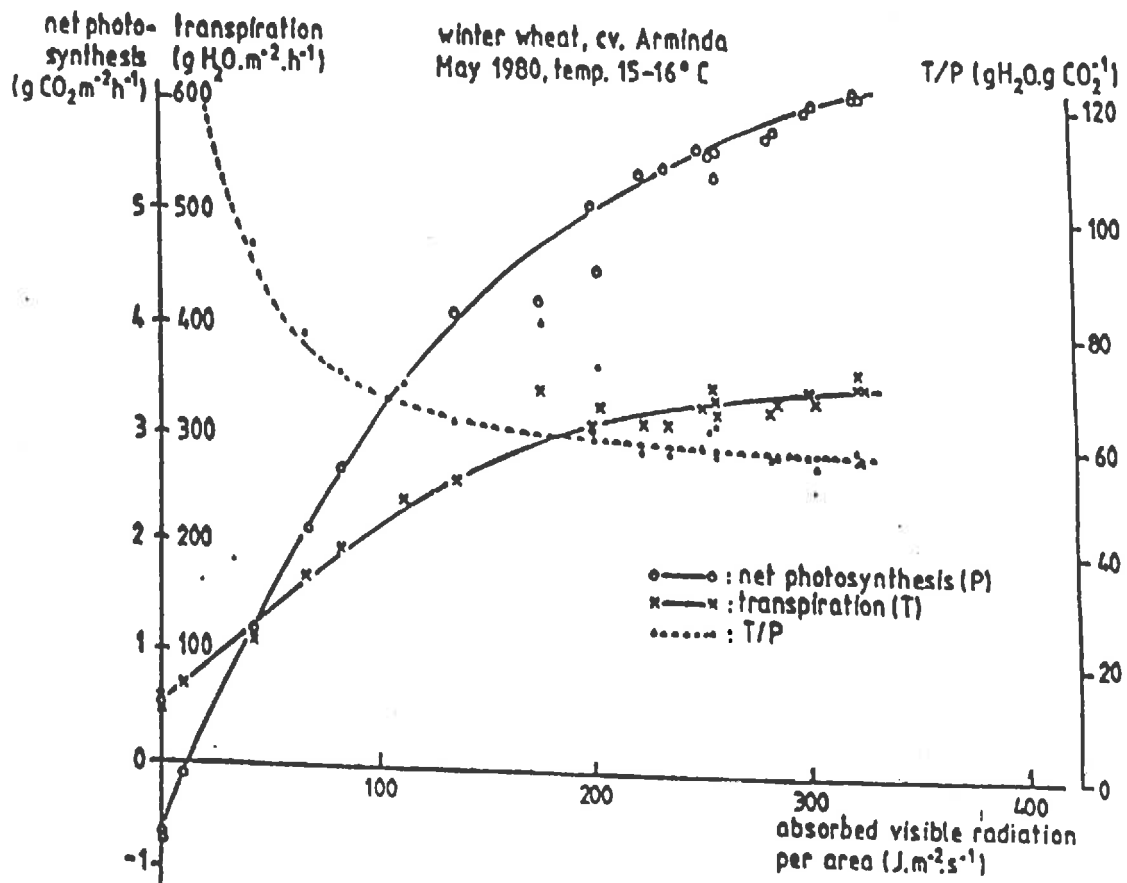


Figure 1.21. Réponse de la photosynthèse et de la transpiration au rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par la culture du blé (d'après Spiertz, 1982).

1.2. Indices de stress hydrique et ses relations avec la production de matière sèche.

1.2.1. Relations entre la production de biomasse, l'évapotranspiration et l'évapotranspiration potentielle

En général, une réduction de la transpiration, en fonction du stress hydrique, provoque aussi une diminution de la photosynthèse. Cela est dû au fait que ces deux processus ont des caractéristiques similaires. Ainsi, dès sa pénétration dans les stomates des feuilles, jusqu'à l'endroit où s'effectue la carboxylation, le CO_2 parcourt exactement le même chemin que la vapeur d'eau mais dans une direction contraire. En plus, la source d'énergie nécessaire pour la transpiration (chaleur de vaporisation) est la même utilisée pour la photosynthèse c'est à dire le rayonnement solaire (Bradford & Hsiao, 1982). La figure I.21 illustre bien les relations entre la photosynthèse et la transpiration d'une culture de blé en fonction de l'absorption du PAR incident.

La production finale d'une culture est proportionnelle à la consommation en eau pendant sa période de croissance (de Wit, 1958; Day et al., 1978; Magrin, 1990). La relation entre ces deux variables est directe et linéaire la pente de la droite étant l'efficacité de l'utilisation en eau (Fig.I.22)

L'efficacité de l'utilisation en eau dépend, essentiellement, de la quantité d'eau transpirée par la plante. Cependant, la plupart des études font la liaison entre la production de biomasse et l'évapotranspiration qui englobe non seulement la *transpiration* des plantes (T) mais aussi l'*évaporation* du sol (E). La raison est que, pour la plupart des méthodes opérationnelles de mesure, il est difficile de séparer ces deux composants.

Pour des régions semi-arides du monde de Wit (1958) a suggéré que la production de biomasse (Y) était liée à la transpiration (T) par l'équation:

$$Y = m T/E_0 \quad (I.23)$$

où E_0 est l'évaporation de l'eau dans la saison et m un facteur lié à la culture. A partir de données expérimentales, Hanks (1974) admet que, pour une culture et une année donnés, les facteurs m et E_0 sont constants, de sorte que la production relative est égale à la transpiration relative:

$$Y/Y_p = T/T_p \quad (I.24)$$

où Y_p est la production potentielle quand la transpiration est égale à la transpiration potentielle (T_p), définie comme la transpiration qui a lieu quand la disponibilité d'eau dans le sol n'est pas limitante.

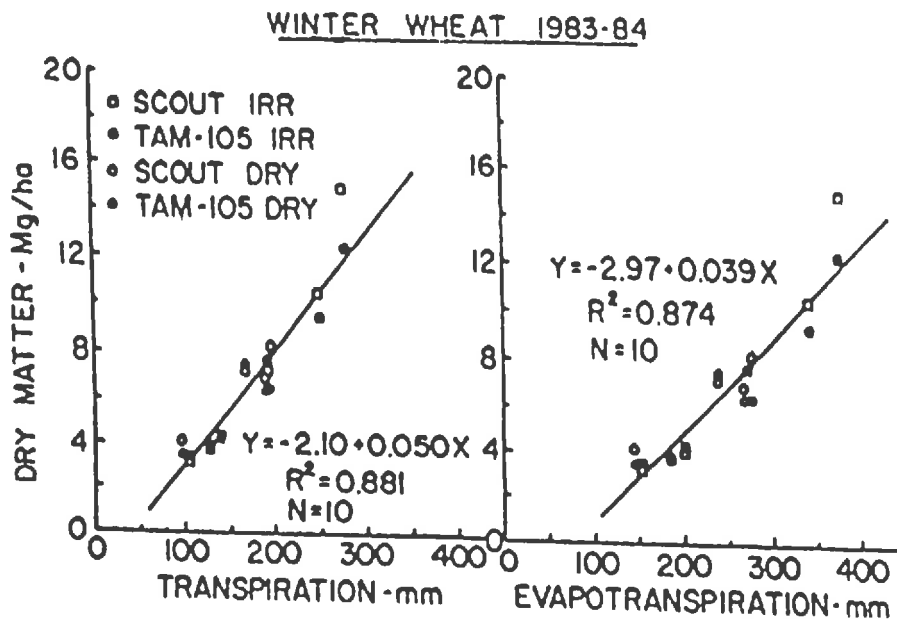


Figure 1.22. Production de biomasse par rapport à la transpiration et à l'évapotranspiration d'une culture de blé d'hiver (d'après Howel et Musick, 1985).

Cependant, il reste encore le problème de séparation entre la transpiration et l'évapotranspiration, celle-ci étant le seul paramètre accessible à l'échelle de la parcelle. Néanmoins, pour des applications pratiques il peut être satisfaisant de mesurer l'ETr et estimer la production directement. Doorenbos & Kassam (1979) ont ainsi proposé l'équation suivante:

$$(1-Y/Y_m) = k_y (1-ET_r/ET_m) \quad (I.25)$$

où Y_m et ET_m sont la production et l'évapotranspiration maximum étant k_y la pente de l'évapotranspiration relative (ET_r/ET_m). Cette équation est particulièrement utile pour prévoir la production dans une localité ou une saison en fonction des changements de l'ETr.

Doorenbos & Kassam (1979) ont utilisé ce principe pour établir, non seulement les limites des valeurs de k_y pour différentes cultures, mais également pour évaluer la réduction du rendement en fonction du déficit hydrique dans les distinctes phases phénologiques de la plante (Fig. I.23). La figure I.23 montre que le coefficient k_y et, par conséquent, le rendement en grains du blé, est variable en fonction de la phase phénologique de la culture, la phase végétative étant moins affectée que celle de la floraison et du remplissage des grains.

Malgré l'existence de modèles plus complexes qui séparent la transpiration de l'évaporation (modèles de Hanks, 1974; Kanemasu et al., 1976) les modèles basés sur le rapport ET_r/ET_m ou ET_r/ET_p ont été utilisés par plusieurs auteurs pour expliquer la production de biomasse d'une culture (Stewart et al., 1977; Doorenbos & Kassam, 1979; Asrar et al., 1985). L'avantage principal de ce modèle est sa simplicité. Si l'on considère que l' ET_p peut être estimée à partir de données climatiques il suffit d'estimer l'évapotranspiration réelle de la culture.

Récemment, on a observé une tendance à l'utilisation des techniques de télédétection pour évaluer l'effet du stress hydrique sur la production des cultures. Ainsi, Hatfield (1983) a combiné utilisation de la réflectance spectrale avec un indice de stress hydrique basé sur la température de surface (SDD) pour caractériser le rendement potentiel et réelle d'une culture de blé.

Asrar et al. (1985) ont évalué l'efficacité de l'indice ET_r/ET_p pour corriger l'effet du stress hydrique sur la production de matière sèche estimée à partir du modèle de Monteith (1972). L'effet du stress hydrique C a été considéré ainsi: si $ET_r/ET_p > 0.70$, $C = 1$; pour les valeurs inférieures à 0.70 C a varié proportionnellement avec ET_r/ET_p . Leurs résultats ont montré une bonne concordance entre la matière sèche produite et celle estimée par le modèle de Monteith associé à l'indice ET_r/ET_p . Cette étude a le mérite d'être la première (à notre connaissance) à estimer la production de biomasse par l'équation de Monteith et à la corriger en utilisant un indice de stress hydrique.

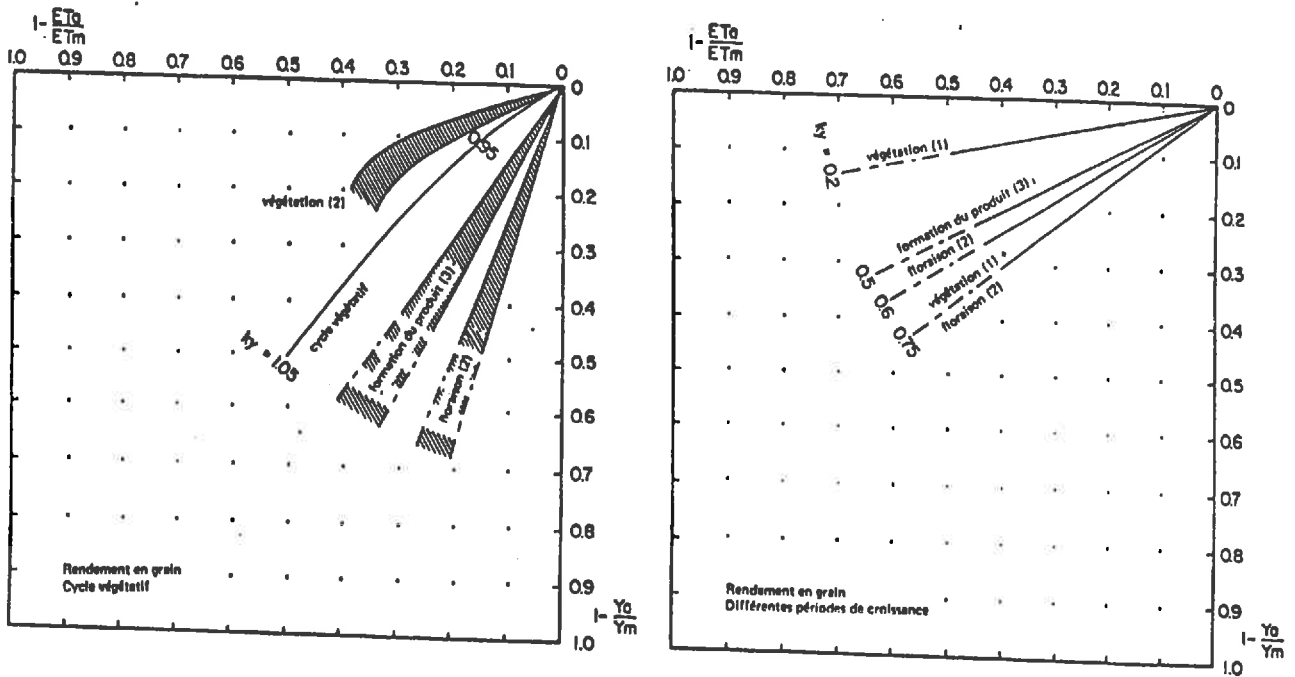


Figure 1.23. Relation entre la baisse du rendement relatif $(1 - Y_a/Y_m)$ et le déficit de l'évapotranspiration relative $(1 - ET_r/ET_m)$ du blé d'hiver (d'après Doorenbos et Kassam, 1979).

Le modèle proposé par Maas et al.(1985) utilise aussi les principes de la télédétection puisque le PAR absorbé par la culture est estimé à partir de la réflectance spectrale. L'effet du stress hydrique sur la production de biomasse est obtenu par l'application du Crop Water Stress Index (CWSI) qui correspond à $1 - E_{Tr}/E_{Tp}$ (Jackson et al., 1982).

Le principe d'utiliser l'indice E_{Tr}/E_{Tp} pour évaluer l'effet du stress hydrique sur la biomasse produite semble intéressant pour deux raisons principales: d'abord car c'est un indice qui peut être obtenu à partir des mesures de la température de surface en calculant le CWSI. Deuxièmement, si l'on considère que l'évapotranspiration potentielle E_{Tp} peut être calculée à partir des données climatiques, il suffit de mesurer l'évapotranspiration réelle E_{Tr} . C'est dans ces deux voies qu'on va aborder le sous-chapitre suivant.

1.2.2. Indices de stress hydrique

1.2.2.1. L'évapotranspiration relative (E_{Tr}/E_{Tp})

Pour obtenir cet indice, comme l'on a vu précédemment, il suffit de calculer l' E_{Tr} puisque l' E_{Tp} peut être estimée à partir des données climatiques. La méthode de calcul de l' E_{Tp} sera montrée plus loin. On examinera maintenant, les principales méthodes opérationnelles disponibles pour la mesure de l' E_{Tr} .

1.2.2.1.1. Méthodes de mesure de l'évapotranspiration réelle (E_{Tr})

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de l' E_{Tr} , en fonction du niveau de précision, de l'échelle spatiale et du pas de temps souhaités. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories: la méthode hydrologique et les méthodes micrométéorologiques.

-La méthode hydrologique consiste à faire le bilan hydrique du sol en obtenant l' E_{Tr} par l'équation suivante:

$$E_{Tr} = P + I - (R + D + \Delta W) \quad (L26)$$

où P =pluies; I =irrigation; R =écoulement superficiel; D =drainage profond et ΔW =variation de la teneur en eau du sol entre deux dates de mesure. Cette méthode, par sa facilité d'utilisation, est beaucoup utilisée pour plusieurs types d'applications dans le domaine agronomique. Dans le cas le plus simple, où l'écoulement superficiel et le drainage profond sont peu importants, l' E_{Tr} peut être calculée à partir de la mesure de P et I et ΔW , ce dernier pouvant être mesuré par la méthode pondérale ou directement avec la sonde à neutrons.

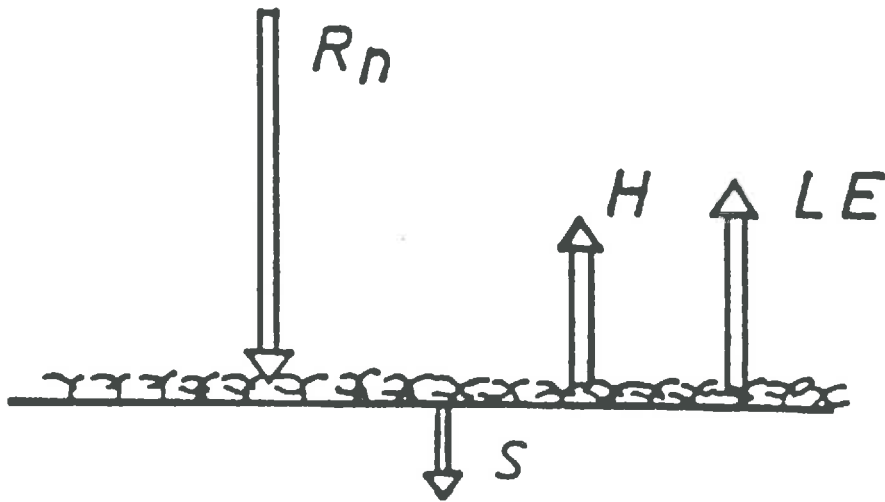


Figure 1.24. Composantes du bilan d'énergie pendant la journée (d'après Seguin, 1989).

-Les méthodes micrométéorologiques sont basées sur l'analyse des variables caractérisant l'état de l'atmosphère près de la surface. La méthode du rapport de Bowen et la méthode aérodynamique reposent sur les mesures de gradient de température, d'humidité de l'air et de la vitesse du vent alors que la méthode de fluctuation repose sur une analyse plus fine de la turbulence (Rosenberg 1974).

Les méthodes micrométéorologiques s'appuient en général sur l'équation du bilan d'énergie (Fig.I.24):

$$R_n + LE + H + S = 0 \quad (I.27)$$

où R_n = rayonnement net
 L = chaleur latente de vaporisation
 E = flux massique
 H = flux de chaleur sensible
 S = flux de chaleur entre le sol et sa surface

Les flux correspondent à des échanges d'énergie par unité de temps et de surface. Ils sont exprimés en $\text{cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ou en W.m^{-2} . La correspondance entre ces unités est la suivante:

$$1 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1} = 700 \text{ W.m}^{-2} = 1 \text{ mm.h}^{-1}$$

Au niveau de la surface, et à un instant donné, les apports d'énergie sont comptés positivement et les pertes négativement.

D'une façon très synthétique les différents flux intervenant dans le bilan d'énergie peuvent s'exprimer ainsi:

a) le rayonnement net (R_n)

$$R_n = (1-a)R_g + R_a - \epsilon \sigma T_s^4 \quad (I.28)$$

où a = albédo
 R_g = rayonnement global
 R_a = rayonnement atmosphérique
 ϵ = émissivité de la surface
 σ = constante de STEPHAN-BOLTZMAN

b) le flux de chaleur dans le sol (S)

$$S = K_s (T_s - T_g) / Z_g \quad (I.29)$$

avec K_s = coefficient de conductibilité thermique moyen entre z et z_g
 T_s = température à la surface du sol
 T_g = température du sol à la profondeur z_g ,

En conditions humides, le flux de chaleur dans le sol est faible, comparativement aux autres échanges d'énergie et reste inférieur à 50 w.m^{-2} (de l'ordre de $0,1 R_n$). En conditions sèches, ce flux est beaucoup plus important, en particulier sur sol nu où il peut atteindre 150 w.m^{-2} ou plus. Pour des périodes de 24 heures il peut être considéré comme nul car l'énergie accumulée pendant la journée est restituée pendant la nuit.

c) le flux de chaleur sensible (H)

$$H = \rho C_p K_H (\Delta T / \Delta Z) = \rho C_p h(Z) (T_s - T_a) \quad (I.30)$$

où ρ = masse volumique de l'air
 C_p = chaleur spécifique de l'air
 K_H = coefficient d'échange pour la chaleur
 $\Delta T / \Delta Z$ = gradient de la température de l'air
 $h(Z)$ = coefficient de transfert
 T_s = température de surface
 T_a = température de l'air

d) le flux de chaleur latente (LE)

$$LE = \rho C_p K_E (\Delta f / \Delta Z) = \rho C_p h(Z) ((e_s - e_a) / (\gamma)) \quad (I.31)$$

avec K_E = coefficient d'échange pour la vapeur d'eau
 $\Delta f / \Delta Z$ = gradient de l'humidité spécifique de l'air
 e_s = tension de vapeur à la surface
 e_a = tension de vapeur à une hauteur donnée au dessus de la surface.
 γ = constante psychrométrique

Le coefficient d'échange turbulent $h(z)$ pour les flux de chaleur sensible et latente sera défini plus loin (chapitre III).

L'analyse bibliographique suggère deux tendances distinctes en ce qui concerne l'utilisation des méthodes micrométéorologiques pour estimer l'évapotranspiration:

-La première est liée à l'effort de simplification des méthodes d'obtention des différents paramètres du bilan d'énergie et, notamment, du flux de chaleur sensible comme l'indiquent les études de Itier (1981, 1982, 1985) et de Riou et Itier (1983).

-La deuxième tendance correspond à l'utilisation de la température de surface des couverts végétaux, soit liée aux méthodes classiques soit dans une approche simplifiée en utilisant l'écart $T_s - T_a$ vers le midi solaire (Jackson et al., 1977; Seguin et al., 1982; Seguin et Itier, 1983). L'intérêt de l'utilisation de T_s est lié à la possibilité d'estimer E_{Tr} à l'échelle régionale à partir des données satellitaires.

Les principes de la méthode simplifiée proposée par Itier (1981) seront présentés dans le chapitre III puisque elle sera utilisée pour estimer l' E_{Tr} dans cette étude. L'utilisation de la température de surface non seulement pour estimer l' E_{Tr} mais également pour calculer différents indices de stress hydrique sera discutée dans le sous-chapitre suivant.

1.2.2.1.2. L'évapotranspiration potentielle (E_{Tp})

L'évapotranspiration potentielle peut être calculé à partir de l'équation de Penman:

$$E_{Tp} = Rad + Adv \quad (I.32)$$

$$Rad = [0,48 + (0,01 T_a)] (R_n - S)$$

$$Adv = 0,0275 [0,26 (1 + 0,54U)] (T_a - T_h)$$

- où
- Rad = évaporation due à l'énergie radiative
 - Adv = évaporation due à l'énergie advective
 - R_n = rayonnement net
 - S = flux de chaleur dans le sol
 - T_a, T_h = température sèche et humide de l'air à 2m
 - U = vitesse du vent à 2m

Doorenbos et Kassam (1979) ont utilisé le concept des coefficients culturaux (K_c) pour estimer l'évapotranspiration maximale (ET_m) à partir de l'évapotranspiration de référence (ET_o) correspondant à une situation dans laquelle l'eau est suffisante pour assurer une croissance et un développement sans restrictions:

$$ET_m = K_c ET_o \quad (L33)$$

Les coefficients culturaux K_c sont déterminés empiriquement pour des conditions données de climat, selon le type de culture et le stade de développement.

1.2.2.2. Indices de stress hydrique basés sur la température de surface

1.2.2.2.1. Le bilan d'énergie de surface et son influence sur les relations entre la température de surface et l'évapotranspiration

1.2.2.2.1.1. Bilan d'énergie d'une surface mince

En suivant le schéma utilisé par Seguin (1989) on peut considérer que pour une surface mince (sol nu, gazon), à un instant donnée de la journée (Fig.I.24), le bilan d'énergie peut être exprimé par l'équation:

$$R_n = S + H + LE \quad (L34)$$

$$\text{dont } R_n = (1-a)R_g + R_a - \sigma T_s^4 \quad (L35)$$

si l'on considère l'émissivité $\epsilon = 1$.

En utilisant le rayonnement net climatique R_n^* où T_s est remplacée par T_a , et en supposant l'émissivité égale à 1:

$$R_n^* = (1-a)R_g + R_a - \sigma T_a^4 \quad (L36)$$

la différence $(R_n - R_n^*)$ est égale à $\sigma T_s^4 - \sigma T_a^4$ soit $4\sigma T^3 (T_s - T_a)$.

L'équation du bilan d'énergie (I.27) devient alors:

par le biais du coefficient d'échange h , on a la relation:

$$R_n = R_n^* + 4\sigma T^3 (T_s - T_a) = S + H + 4\sigma T^3 (T_s - T_a) + LE \quad (L37)$$

$$\text{avec } H = \rho C_p h (T_s - T_a) \quad (L38)$$

il vient alors:

$$R_n^* - S = (\rho C_p h + 4\sigma T^3) (T_s - T_a) \quad (L39)$$

qui permet d'exprimer l'écart $T_s - T_a$ par

$$T_s - T_a = (R_n^* - S - LE) / (\rho C_{ph} + 4\sigma T^3) \quad (I.40)$$

On voit aussi que l'écart entre les températures de surface et de l'air dépend fortement du niveau d'évaporation LE.

1.2.2.1.2. Relations entre T_s et évapotranspiration

En considérant que le flux de chaleur dans le sol S est soit négligeable (cas du sol humide ou des couverts denses) soit une fraction constante de R_n^* , on voit que pour des conditions atmosphériques données (R_n^* et T_a), $T_s - T_a$ varie selon une relation linéaire inverse avec LE. La pente de cette relation dépend donc essentiellement du coefficient d'échange h .

Les lois des transferts turbulents dans la couche de surface donnent comme expression de h (voir Seguin, 1981):

$$h = h_N F(z/L) \quad (I.41)$$

où $F(z/L)$ (voir chapitre III) est une fonction de stabilité et h_N le coefficient d'échange en conditions de neutralité thermique:

$$h_N = (k u^*) / (\text{Log}(z/z_{ot})) \quad (I.42)$$

La vitesse de frottement u^* est obtenue à partir du profil logarithmique de vitesse du vent:

$$u^* = (k u(z)) / (\text{Log}(z/z_0)) \quad (I.43)$$

z_0 et z_{ot} désignent la rugosité aérodynamique et la rugosité thermique respectivement; k est la constante de VON KARMAN ($\approx 0,4$). $F(z/L)$ est obtenue en faisant intervenir la longueur de MONIN-OBUKHOV L (voir chapitre III).

Au total, h dépend donc:

- de la vitesse du vent par le biais de u^*
- de la stratification thermique (L étant lié à u^* et $T_s - T_a$)
- de la rugosité aérodynamique de la surface z_0 (qui est liée à l'hauteur moyenne de la surface h , z_0 étant de l'ordre de 0,10 à 0,15h).

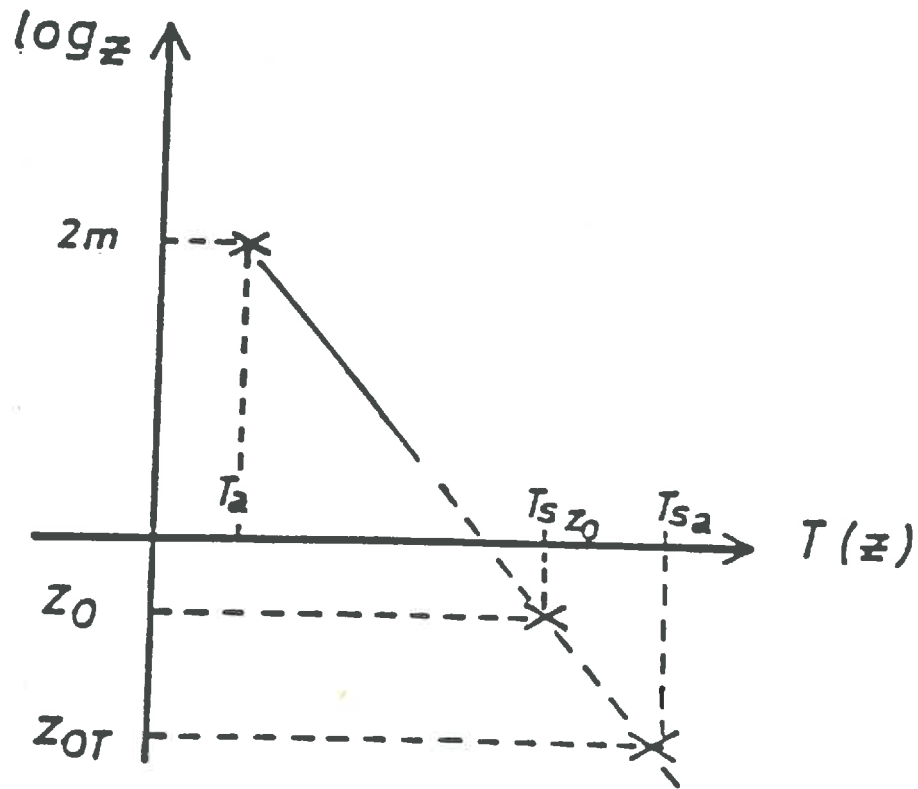


Figure 1.25. Profil semi-logarithmique de la température permettant la séparation de z_{OT} et z_0 (d'après Seguin, 1989).

En général, la relation entre Ts et LE dépend:

- des variables atmosphériques: R_n^* , T_a , u ;
- des paramètres de surface: a et z_0 .

1.2.2.2.1.3. Les problèmes posés par l'extension aux couverts élevés

Pour les couverts végétaux plus développés, le principe du bilan d'énergie est encore valable, mais des difficultés apparaissent avec la définition des niveaux de surface et de leurs propriétés.

Il y a deux différences importantes par rapport au cas des surfaces minces:

-la rugosité thermique z_{0t} devient significativement différente de la rugosité aérodynamique z_0 ; ceci correspond à une résistance supplémentaire pour le transfert de chaleur pour les surfaces rugueuses (Fig.I.25) (Voir Thom, 1975; Garrat, 1978; Brutsaert, 1982). Le rapport z_{0t}/z_0 est de l'ordre de 0,2 à 0,1 pour des cultures de hauteur faible à moyenne (gazon, soja, blé). Il n'y a pas de résultats pour des cultures plus développées (maïs, arbres fruitiers, forêts, etc..)

-la "température de surface aérodynamique" qu'on peut appeler T_{sa} , et qui est obtenue par extrapolation des profils de la température de l'air à l'intérieur du couvert jusqu'au niveau z_{0t} , peut être différente de la "température de surface radiative" T_{sr} mesurée par les radiothermomètres. Cette dernière est fonction de la radiation émise par les différentes couches à l'intérieur du couvert et peut incorporer une contribution importante de feuilles plus froides (Fig.I.26) et du sol s'il n'est pas entièrement couvert.

Cette hypothèse est confirmée par Steinmetz (1977) qui, en mesurant la température des feuilles avec des thermocouples à trois niveaux à l'intérieur du couvert (T_{TC3} =haut; T_{TC2} =milieu; T_{TC1} =bas), a montré que le profil de température dépend du type de culture. Ainsi, pour le soja et la luzerne, pendant la journée, $T_{TC3} > T_{TC2} > T_{TC1}$ tandis que le sorgho présente des températures similaires dans les trois niveaux. La température de surface, mesurée par le radiothermomètre (T_{IR}), présente une meilleure concordance, notamment pour le soja et la luzerne, avec la température des feuilles supérieures qu'avec celles de l'intérieur du couvert (Fig.I.27). Ces données démontrent que, en général, T_{sr} est inférieure à T_{sa} . Cette différence est d'environ 1°K pour la culture du blé (Huband et Monteith, 1986). Des observations analogues ont été faites par Boissard et Guyot (1984) sur betterave et maïs.

La différence entre T_{sr} et T_{sa} contribue à rendre délicate la compréhension de la relation exacte entre Ts et LE pour des couverts élevés.

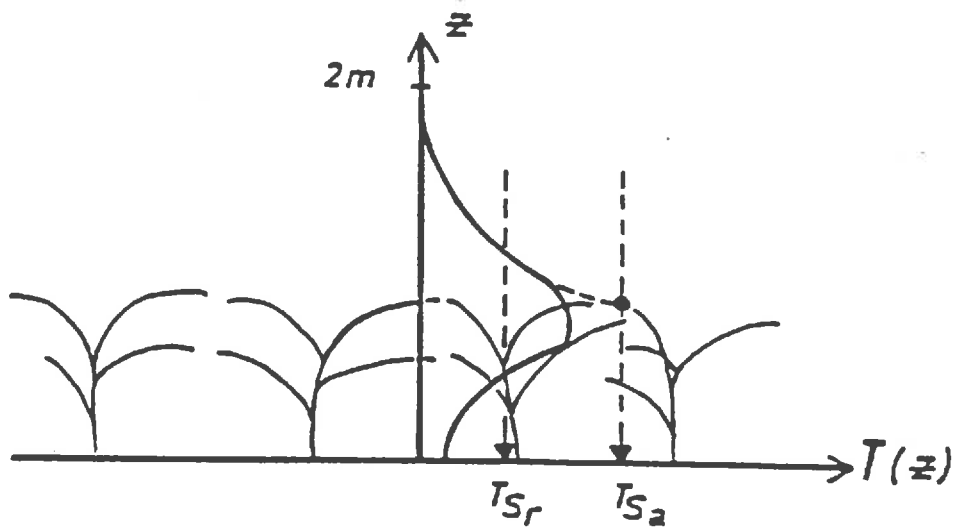


Figure I.26. Schéma de l'influence d'un couvert développé sur les températures T_{sr} et T_{sa} (d'après Seguin, 1989).

Enfin, la mesure du rayonnement de la surface dans infrarouge thermique ne fournit pas directement la température de surface T_s , si l'émissivité ϵ est inférieure à 1. En effet, la mesure de l'irradiance émise (qui correspond à une température radiative apparente T_r , en supposant $\epsilon = 1$) résulte de l'émission de la surface $\epsilon \sigma T_s^4$, mais aussi de la réflexion d'une partie du rayonnement atmosphérique R_a :

$$\sigma T_r^4 = \epsilon \sigma T_s^4 + (1-\epsilon)R_a \quad (I.44)$$

Ceci entraîne une correction sur T_s de l'ordre de 0,2 à 0,3° par 0,01 de déviation de ϵ , en conditions naturelles.

Pour avoir plus de précision sur des mesures de T_s , il faut déterminer la valeur de l'émissivité de la culture en question: on peut ici utiliser la procédure décrite par Fuchs et Tanner (1966). Steinmetz (1977) a montré que l'émissivité varie légèrement en fonction de l'espèce végétale. Ainsi, l'émissivité est de 0,954 pour un sol nu, 0,971 et 0,974 pour le sorgho avec et sans épis, 0,976 pour le soja, 0,977 pour le gazon et 0,981 pour la luzerne.

1.2.2.2. Utilisation de la température de surface pour caractériser l'état hydrique de la culture

L'application des relations entre T_s et évapotranspiration peut être envisagée à différentes échelles d'espace (de quelques m^2 pour les mesures au sol et de l'hectare au km^2 pour les mesures aéroportées ou satellitaires) et/ou de temps (de la journée ou mois en général).

1.2.2.2.1. Indices de stress hydrique à l'échelle de la parcelle

L'utilisation pratique de la relation existant entre T_s-T_a et le niveau d'évapotranspiration LE repose sur la mesure de T_s par radiothermométrie au sol. Ceci a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années tout particulièrement à Phoenix, aux Etats Unis et à l'INRA Avignon.

Idso et al.(1977) ont proposé l'indice de stress SDD (Stress Degree Day) qui est la somme algébrique de l'écart T_s-T_a vers le midi solaire:

$$SDD = \Sigma (T_s-T_a) \quad (I.45)$$

Les auteurs ont trouvé une relation linéaire entre le rendement du blé et le SDD entre l'épiaison et la maturité. Jackson et al. (1977) ont montré que le SDD caractérise bien les différents traitements d'irrigation (Fig.I.28) et que la culture devrait être irriguée quand la somme T_s-T_a dépassait le seuil de 10°C. Pour une culture de haricot, Walker et Hatfield (1979) ont mis en évidence une relation linéaire et inverse du SDD non

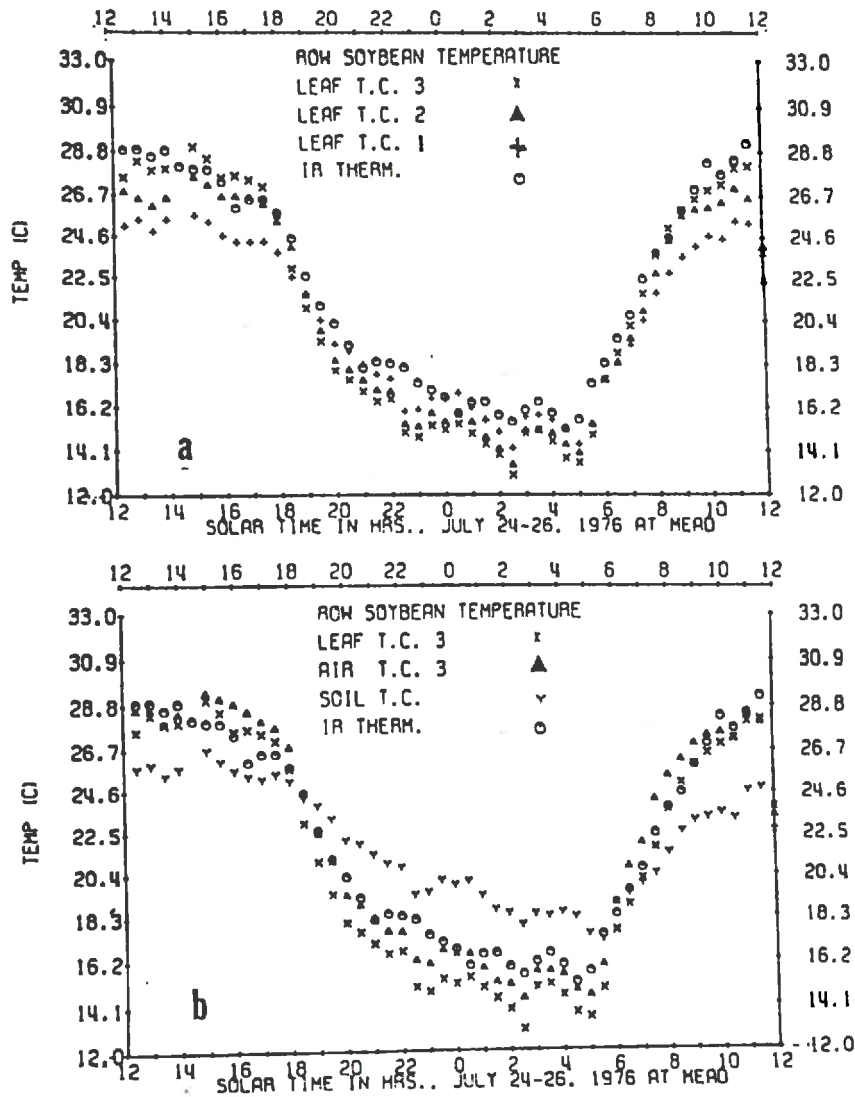


Figure 1.27. Evolution de la température de surface du soja mesurée avec thermocouples (T_{TC}) en trois niveaux à l'intérieur du couvert (T_{TC3} =supérieur; T_{TC2} =intermédiaire; T_{TC1} =inférieur) et avec le radiothermomètre (T_{IR}) (a). Relations entre les températures de la culture, de l'air et du sol (b) (d'après Steinmetz, 1977).

seulement avec la production de grains mais aussi avec la consommation en eau, entre la floraison et la maturation.

Compte-tenu des nombreux facteurs qui influent sur la relation T_s/LE , comme nous l'avons vu auparavant, la nature de cette relation dépend à la fois des conditions climatiques locales et du type de couvert: de nature empirique, elle présente cependant des possibilités d'applications certaines.

D'autres auteurs ont envisagé des critères différents. Ainsi, la variabilité de T_s caractérisée par l'écart type σT augmente avec le niveau de stress (Gardner et al., 1981; Clawson et Blad, 1982); le suivi de l'écart de T_s par rapport à une parcelle de référence irriguée à l' ET_m est aussi une voie (Gardner et al., 1981). Cependant, la nature également empirique de la première méthode et les contraintes pratiques de la deuxième ont limité leurs applications opérationnelles.

Idso et al. (1981) et par Jackson et al. (1981) ont proposé un autre indice, le Crop Water Stress Index (CWSI) qui reprend les équations générales du bilan énergétique et fait intervenir les facteurs climatiques par le biais du déficit de saturation. Le CWSI situe, pour un déficit de saturation donné, le niveau de stress par comparaison de l'écart T_s-T_a avec les valeurs correspondant au cas complètement sec ($LE=0$) et au cas complètement humide (culture alimentée à l' ET_m) (Fig.I.29). Jackson et al. (1981) démontrent que le CWSI est analogue à $1-ET_r/ET_p$.

Selon Idso et al. (1981a), quand les plantes transpirent à leurs niveau maximum, il y a une relation linéaire entre T_s-T_a et le déficit de pression de vapeur (VPD), indépendamment des autres facteurs ambiants, à l'exception de la couverture nuageuse. Des résultats différents ont été mentionnés par d'autres auteurs qui indiquent que la relation T_s-T_a et VPD est affectée par l'âge de la plante et par les facteurs du sol qui conditionnent la croissance racinaire (Choudhury, 1983), par le rayonnement net et par la résistance aérodynamique (Walker et Hatfield, 1983). L'influence de la vitesse du vent sur la limite supérieure du CWSI a été montrée par O'Toole et Hatfield (1983).

L'utilisation du CWSI peut être plus délicate dans les régions avec un climat plus froid et plus humide caractérisées par une variation plus étroite des valeurs de VPD (Idso et al., 1981b, Keener et Kircher, 1983).

Pour obtenir une croissance maximale, le blé doit être irrigué quand le CWSI est supérieur à 0,3 selon Jackson et Pinter (1981) et supérieur à 0,5 selon Travasso (1986).

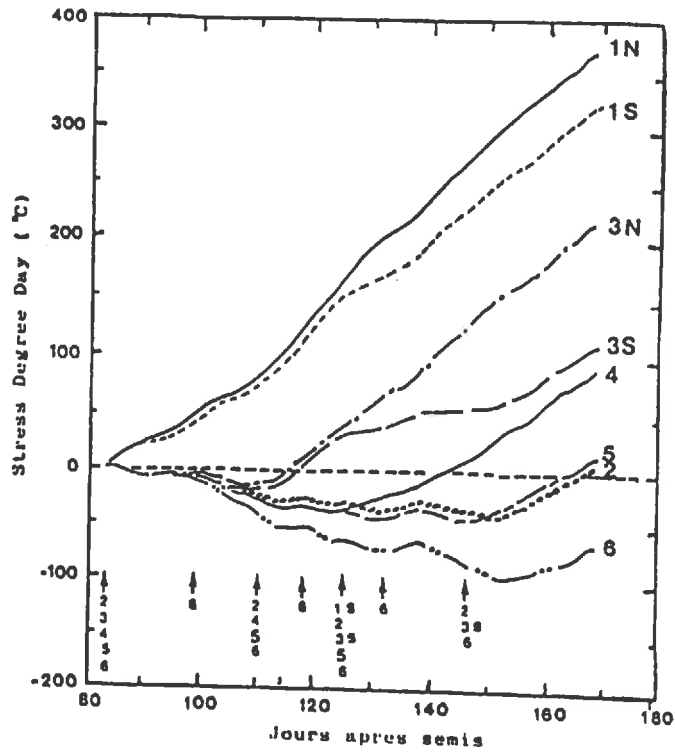


Figure 1.28. Evolution de l'indice SDD pour des parcelles de blé soumises à diverses contraintes hydriques. Les parcelles qui ont subi des apports d'eau sont représentées sous les flèches (d'après Jackson et al., 1977).

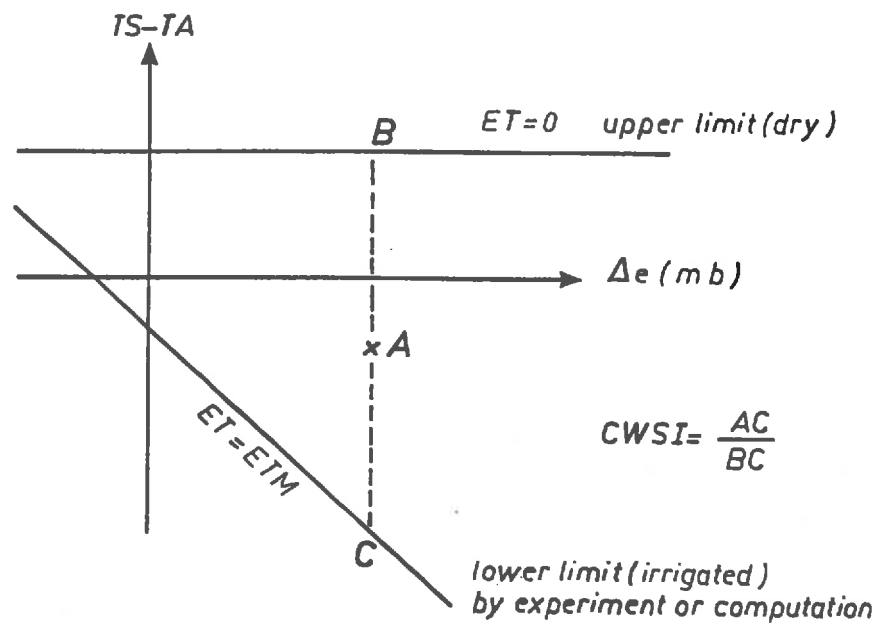


Figure 1.29. Représentation graphique du CWSI (d'après Jackson, 1982).

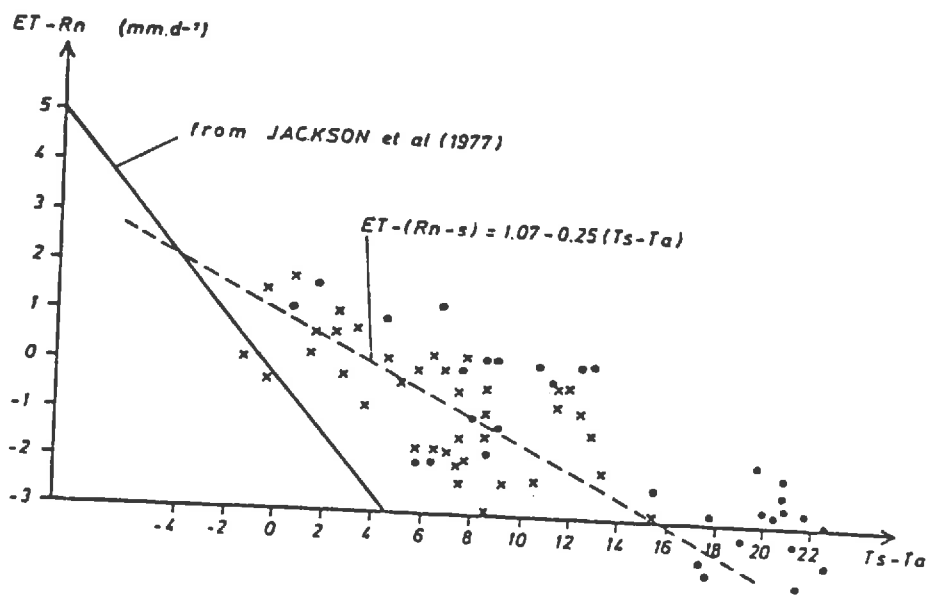


Figure 1.30. Relation entre $ET - (Rn - S)$ et $Ts - Ta$ pour 32 journées de l'été 1978 sur le site de la Crau (x Crau irriguée, Crau sèche) (d'après Seguin et al., 1982).

1.2.2.2.2. Estimation de l'évapotranspiration à partir de la température de surface.

Une relation simplifiée à été proposée par Jackson et al. (1977) pour estimer l'évapotranspiration journalière d'une culture de blé à Phoenix, Arizona, à partir des mesures du rayonnement net journalier et de l'écart $T_s - T_a$, vers le midi solaire:

$$ET_j - R_{nj} = -0,64 (T_s - T_a) \quad (I.46)$$

Ce type de simplification doit être considéré avec précaution, car elle suppose des journées avec ciel bien dégagé pour que $T_s - T_a$ vers la mi journée soit représentatif de toute la journée. La précision de cette méthode peut aussi être affectée par la fluctuation des facteurs climatiques comme la vitesse du vent au moment de la mesure de T_s .

Seguin et al. (1982), dans une étude dans la région de la Crau (Sud-Est de la France), reprenant la même démarche, ont trouvé la relation:

$$ET_j - R_n = 1,07 - 0,25 (T_s - T_a) \quad (I.47)$$

qui est très différente de celle proposée par Jackson et al. (1977) (Fig.I.30). La valeur inférieure du coefficient B (0,25) comparé à 0,64 a été attribuée à la rugosité du gazon (qui était inférieure à celle du blé) et à la présence d'advection sur la parcelle de blé étudiée à Phoenix (parcelle irriguée de petites dimensions dans un environnement désertique). Vidal et al. (1987) ont généré la relation (I.47) à partir des données simulées par un modèle agrométéorologique et ont retrouvé un jeu de coefficients analogue à celui de Seguin et al. (1982).

Une analyse critique de l'influence du vent, de la stratification thermique et de la rugosité sur les paramètres de la relation simplifiée a été faite par Seguin et Itier (1983).

L'influence de la rugosité sur le coefficient B a été vérifiée dans plusieurs études (Seguin et Itier, 1983; Riou et al., 1988) tandis que l'influence de la rugosité et de la vitesse du vent sur les paramètres A et B a été étudiée par Lagouarde et Brunet (1988).

La relation simplifiée permet de calculer l'évapotranspiration cumulée sur des périodes de plusieurs jours (pour lisser les variations journalières sur le coefficient d'échange de chaleur, h):

$$\Sigma ET_j = \Sigma R_{nj} + \Sigma A - B \Sigma (T_s - T_a) \quad (I.48)$$

Cette expression permet de retrouver le "Stress Degree Day" proposé par Jackson et al.(1977).

Une application possible de ce principe est l'estimation de la variabilité spatiale de l'évapotranspiration à partir de la température de surface obtenue à partir des images satellitaires (Nieuwenhuis et al. 1985; Rambal et al. 1985).

Conclusion

La bibliographie montre qu'il y a une relation linéaire entre la photosynthèse et la transpiration ou l'évapotranspiration et que la pente de cette relation caractérise l'efficacité de l'utilisation en eau par la culture. Ce comportement est expliqué par le fait que la source principale d'énergie, le rayonnement solaire, est la même pour les deux processus.

L'indice E_{Tr}/E_{Tp} est l'un des plus utilisés pour évaluer l'effet du stress hydrique sur la production de matière sèche. Il peut être amélioré en calculant l' E_{Tm} au lieu de l' E_{Tp} par l'intermédiaire des coefficients culturaux qui varient en fonction des phases phénologiques de la plante. En considérant que l' E_{Tp} peut être obtenue à partir des données climatiques classiques, il suffit de calculer l' E_{Tr} , soit par la méthode du bilan hydrique au sol, soit par l'un des méthodes micrométéorologiques classiques ou en faisant intervenir la température de surface.

L'effet du stress hydrique sur la production de matière sèche peut aussi être caractérisé à partir des méthodes basées sur la température de surface. Le SDD et le CWSI sont les plus utilisés, le premier à cause de sa simplicité et le deuxième pour être moins empirique et pour être analogue à $1 - E_{Tr}/E_{Tp}$. A l'échelle régionale l' E_{Tr} peut être estimée à partir de données satellitaires de température de surface en utilisant la relation simplifiée proposée par Jackson et al. (1977) puis par Seguin et al. (1982).

La littérature nous indique la possibilité d'estimer la production de biomasse d'une culture à partir d'un modèle d'interception du rayonnement solaire comme celui proposé par Monteith (1972). Elle fait également apparaître une relation étroite entre la biomasse produite et les indices de stress hydrique. L'exploitation conjointe de ces deux approches nous semble intéressante puisque la première permet d'établir les productions maximales d'une culture pour une région donnée en fonction notamment de la disponibilité d'énergie solaire tandis que l'application d'un indice de stress hydrique permet de quantifier les écarts par rapport à cette production maximale. C'est dans ce sens que notre étude a été idéalisée.

CHAPITRE 2

CHAPITRE II. L'EXPERIMENTATION

2.1. Le milieu

2.1.1. Situation

L'expérimentation a été menée pendant deux années (1986/87 et 1987/88) dans une ferme privée de la région de la Crau irriguée (commune de Moulès), Sud-Est de la France (Fig.II.1).

2.1.2. Le sol

Le sol est constitué d'un premier horizon de 30-35cm d'épaisseur, mélange de terre fine et de quelques galets, correspondant à la couche arable. Dans cette couche la texture est argilo-limono-sableuse (26% argile, 38% limons et 36% sable). Le deuxième horizon (35-50cm) se différencie par une présence plus importante de galets. Au delà de 50cm il y a un conglomérat calcaire légèrement friable et fissuré qui constitue le sous-sol. Dans la couche de 50-80cm il y a 8% d'argile, 29% de limons et 62% de sable.

Ce type de sol, par sa faible profondeur utile et la présence de galets, présente une capacité de rétention en eau de faible à moyenne (environ 65mm), selon les estimations des techniciens de la Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône (non publié).

2.1.3. Le climat

De type méditerranéen, il se caractérise par une très grande variabilité inter et intra annuelle de la pluviométrie et par un fort déficit hydrique particulièrement pendant l'été. Le climat est fortement marqué par le "Mistral" vent sec et froid, souvent violent, de secteur Nord-Nord-Ouest qui souffle environ 140 jours par an. En balayant les nuages du ciel il favorise l'ensoleillement (2.700 heures par an).

Les données climatiques enregistrées pendant les deux années (Fig.II.2 et 3) montrent que:

-dans la première année (Fig.II.2a), les pluies ont été relativement abondantes et bien distribuées jusqu'à la mi-Avril, période pendant laquelle l'ETp a été relativement faible. La période après la mi-Avril est caractérisée par une élévation de l'ETp et par des faibles pluies qui ont provoqué un stress hydrique pour les traitements non-irrigués, comme on le montrera dans le chapitre suivant. Par contre, dans la deuxième année (Fig.II.2b), les périodes de déficit hydrique ont eu lieu entre mi-Février et mi-Mars et à

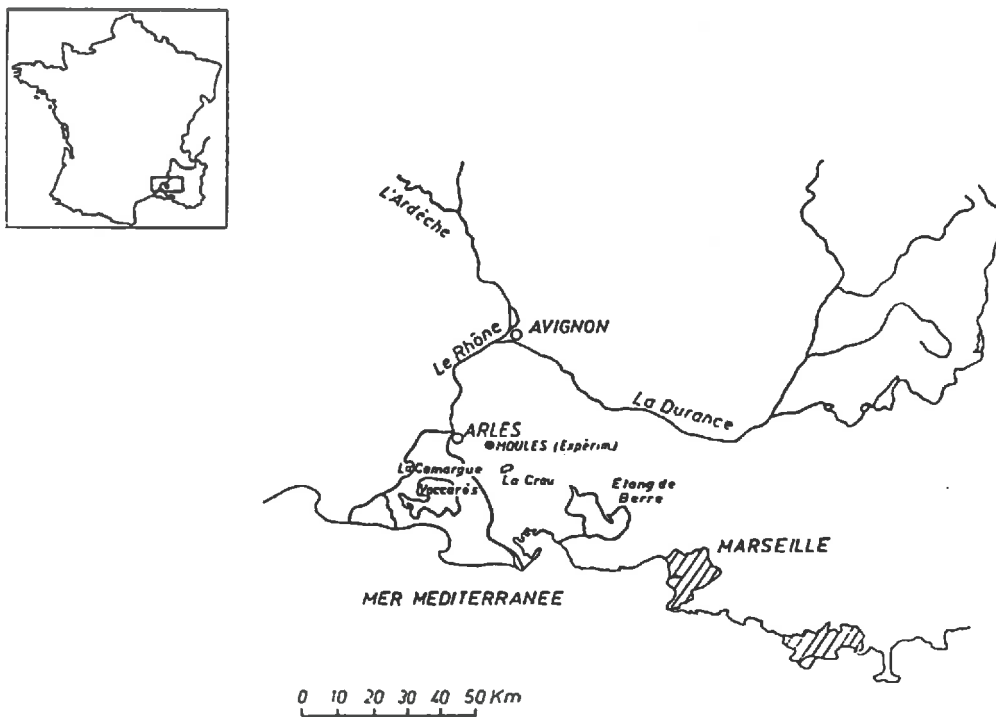


Figure II.1. Localisation du lieu de l'expérimentation.

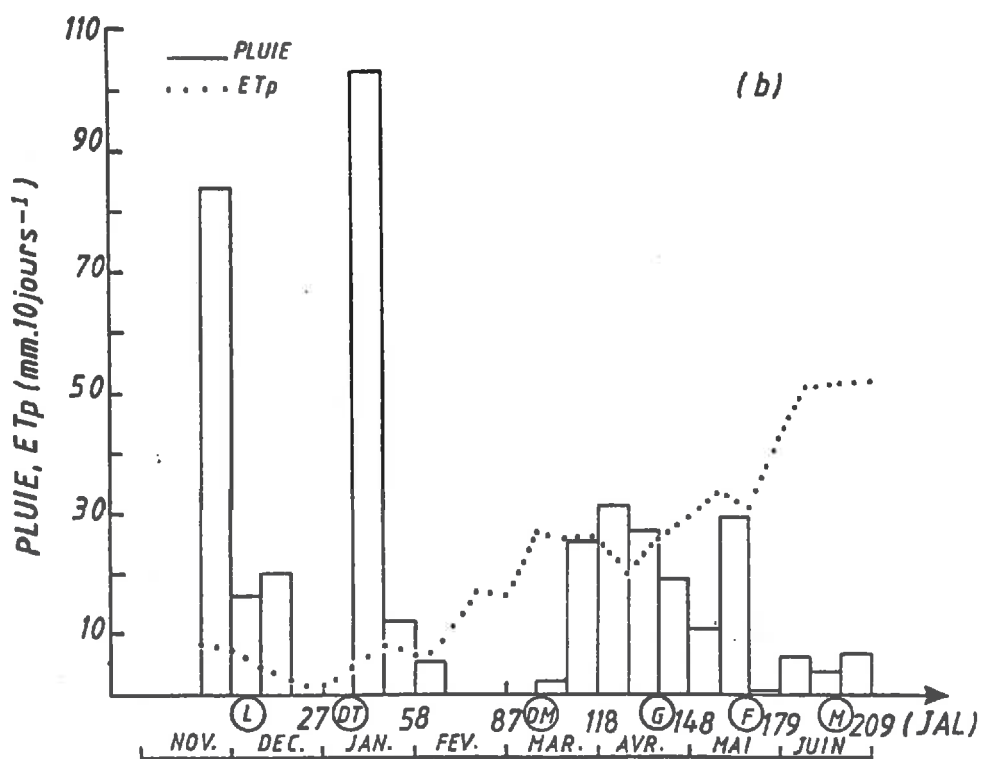
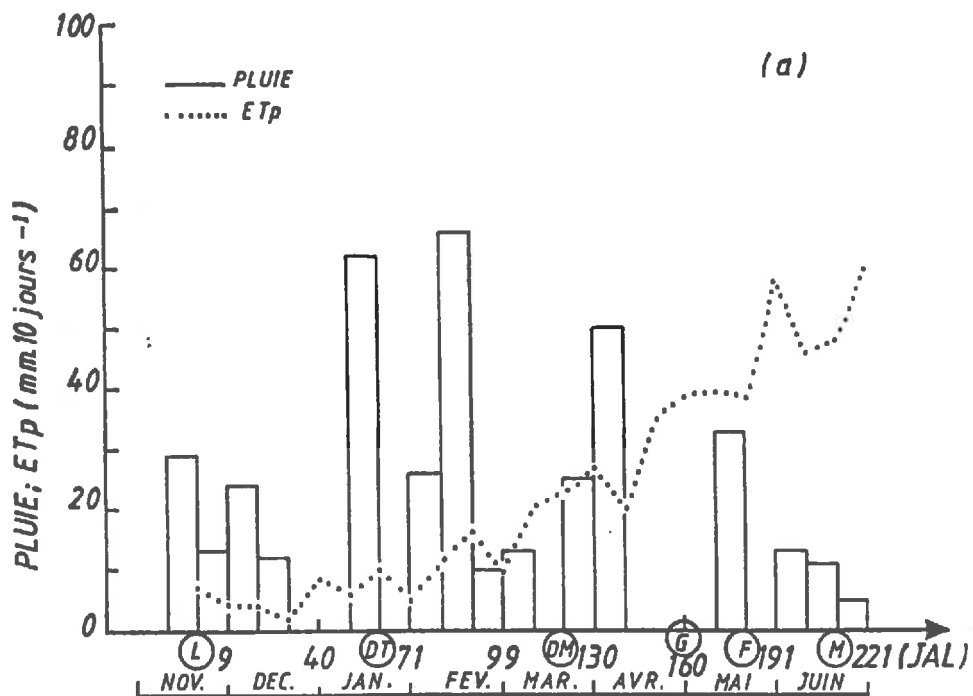


Figure II.2. Evolution de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle (ETp) pendant les années 1986/87 (a) et 1987/88 (b).

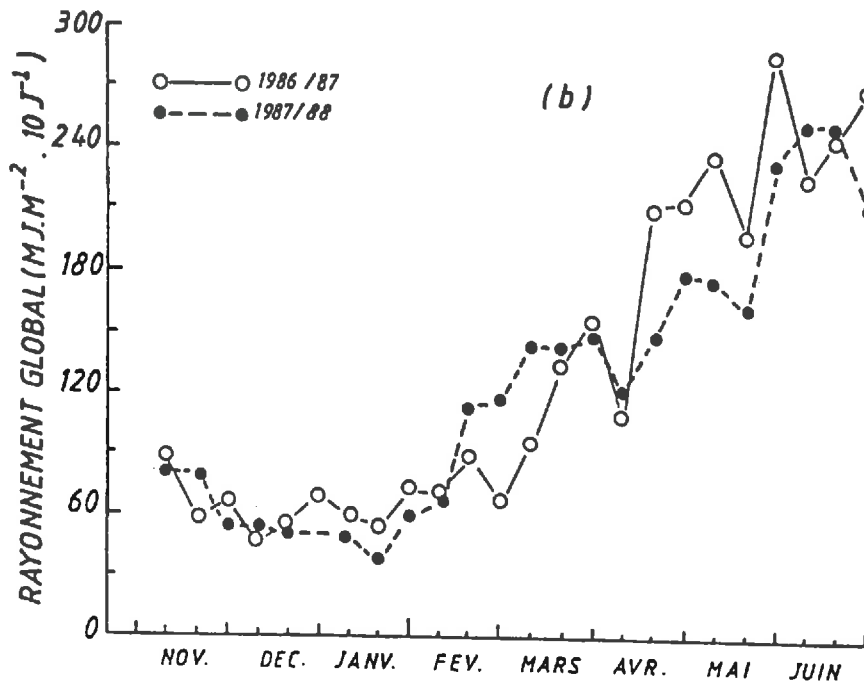
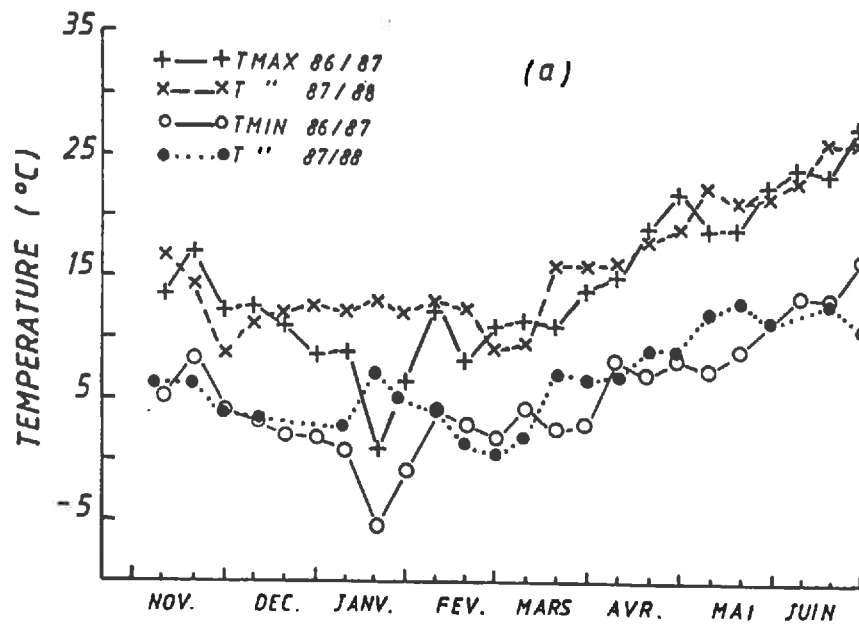


Figure II.3. Evolution des températures maximales et minimales (a) et du rayonnement global (b) pendant le cycle du blé en 1986/87 et 1987/88.

fig 23

partir du 20 Mai. Le nombre de jours de pluie a été de 35 et 52 dans la première et la deuxième années, respectivement;

-L'hiver de la première année a été plus rigoureux. Dans les mois de Décembre et Janvier les températures étaient plus basses en 1986/87 avec une forte chute (-5,6°C) entre 10 et 20 Janvier (Fig.II.3a);

-Le rayonnement global (Fig.II.3b) suit bien l'évolution du régime pluviométrique. Ainsi, la disponibilité d'énergie a été inférieure dans la deuxième année dans la majeure partie du cycle de la culture à l'exception de la période entre mi-Février et mi-Mars.

2.2. Dispositif expérimental et protocole de mesures

2.2.1. Dispositif expérimental

Le choix de la parcelle expérimentale et des traitements utilisés a eu pour objectif de provoquer des niveaux variables de production de matière sèche et de stress hydrique.

Le dispositif expérimental a été constitué par quatre traitements (deux niveaux d'azote et deux niveaux d'irrigation) avec deux répétitions. Les huit parcelles de 20m x 20m ont été disposées au centre d'un champ de blé de 360m de long par 90m de large (Fig.II.4). Deux parcelles supplémentaires de 80x90m, caractérisant les deux traitements les plus contrastés (SPOT_{T1} et SPOT_{T4}) ont été destinés au suivi de la culture à partir des images du satellite SPOT (cette partie ne sera pas présentée ici car elle fait objet d'une étude spécifique sur ce sujet).

Deux stations micrométéorologiques (voir détails plus loin) ont été installées dans le centre des deux parcelles les plus contrastées (T1 et T4).

En fonction des particularités de la parcelle expérimentale, notamment le type d'irrigation (par inondation) pratiquée dans la région, aucun schéma statistique n'a été appliqué. Les parcelles ont été disposées de façon à faciliter l'irrigation et l'application mécanique de l'azote.

A cause des contraintes de rotation inhérents à l'exploitation agricole, l'expérimentation a été conduite sur deux parcelles différentes mais voisines en 1986/87 et 1987/88, avec le même schéma expérimental.

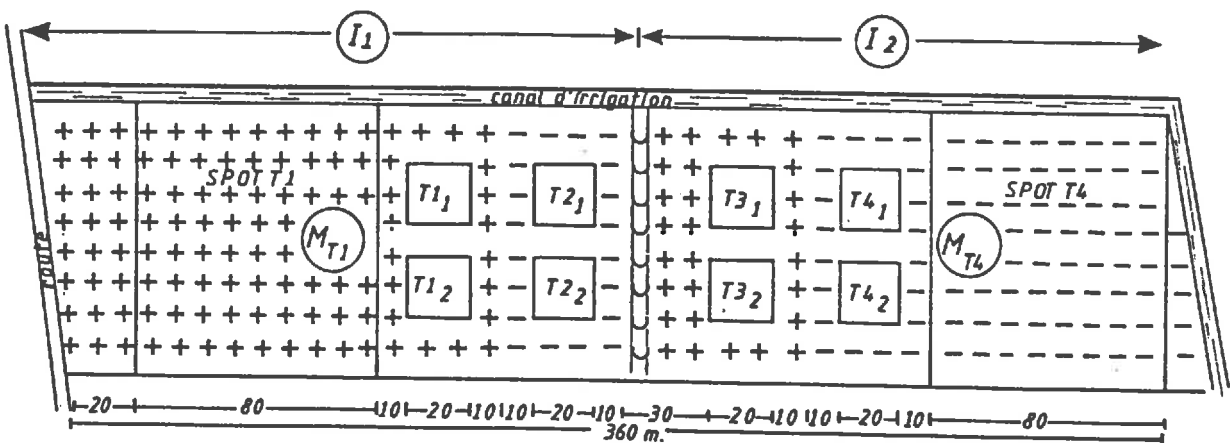


Figure II.4. Schéma du dispositif expérimental. Légende: I_1 =surface irriguée; I_2 =surface non-irriguée; (+ +)=dose plus élevée d'azote; (- -)=dose plus faible d'azote; M=stations micrométéorologiques; SPOT=parcelles pour les mesures de la réflectance à partir des images du satellite SPOT; ∪ =sillon de séparation entre les parcelles I_1 et I_2 .

fig 14

2.2.1.1. Les traitements

Les traitements d'azote et d'irrigation seront dénommés de la façon suivante:

- I1 et I2 = avec et sans irrigation
- A1 et A2 = fertilisation azotée plus forte et plus faible

Ainsi, les quatre traitements sont: T1 (I1A1), T2 (I1A2), T3 (I2A1) et T4 (I2A2). Les caractéristiques de ces quatre traitements, pendant les deux années de l'étude, sont montrés dans les tableaux II.1 et 2.

Les apports d'azote étaient constitués d'ammonitrate (33,5% d'azote) et d'urée (46% d'azote). La méthode d'irrigation pratiquée dans la région est par planche ou par calans qui ne permet pas un bon contrôle de la quantité d'eau apporté. En général, la parcelle est inondée de façon à bien humecter la couche de 30 à 40cm de sol. Les paramètres de base utilisés pour établir l'irrigation de la parcelle où l'étude a été faite sont les suivants: périodicité = 8 jours (fixe et pré-établie à l'avance); débit = 89,4 l.s⁻¹; durée de l'irrigation à l'hectare = 2h34'.

2.2.2. Protocole de mesures

2.2.2.1. Mesures et calcul des paramètres biologiques

2.2.2.1.1. Matière sèche aérienne

Cinq placettes de 0,27m² (3 rangs adjacents de 0,5m de longueur) ont été récoltées au hasard dans chaque parcelle. Toute la partie aérienne des plantes a été prélevée en les coupant au ras du sol. Les prélèvements ont été effectués chaque 2 semaines avant le début montaison et une fois par semaine après ce stade phénologique.

Les mesures faites sur les échantillons prélevés sont les suivantes: 1) poids frais total de chaque placette (MFt); 2) poids frais d'un échantillon (MFe) de chaque placette prélevée; 3) poids sec de cet échantillon (MSe) après passage au moins 24 heures dans une étuve réglée à 105°C.

La matière sèche totale, en g.m⁻², est calculée en utilisant un coefficient (C) de passage de la matière fraîche à la matière sèche:

$$MSt = (C * MFt)/S \quad \text{avec } C = MSe/MFe \quad (\text{II.1})$$

où S est la surface récoltée.

Les coefficients de variation des mesures de la matière sèche ont été, en général, entre 10 et 25%. Le coefficient de variation moyen, pour tous les traitements et les deux années confondus a été de l'ordre de 17%.

Tableau II. 1. : Traitements d'irrigation et de fertilisation azotée utilisés dans l'expérimentation de 1986/87.

Fertilisation azotée					Irrigations			
Stade phénologique (Feekes)	Date	JAL	Doses (kg.ha ⁻¹)		I 1		I 2	
			A1	A2	Date	JAL	Date	JAL
Semis	10/11/86		30(100:70)	30(100:70)	28/04	158		
					6/05	166		
Plein tallage (3)	9/02/87	80	50	0	14/05	174	14/05	174
					22/05	182		
Epi à 1 cm	31/03/87	130	100	70	30/05	190		
					7/06	198		
					15/06	206	15/06	206
					23/06	214		

Tableau II. 2. : Traitements d'irrigations et de fertilisation azotée utilisés dans l'expérimentation de 1987/88.

Fertilisation azotée					Irrigations	
Stade phénologique (Feekes)	Date	JAL	Doses (kg.ha ⁻¹)		I 1	I 2
			A1	A2	Date	JAL
Semis	11/11/86		30(100:70)	30(100:70)	27/03	114 pas d'irrigation
Plein tallage (3)	27/01/88	54	40	0	6/05	154
Epi à 1 cm (5)	7/03/88	94	100	70	29/05	177
Gonflement (8)	28/04/88	146	70*	70*	7/06	186

Les chiffres entre parenthèse sont des doses de P₂O₅ et K₂O : * fertilisation faite pour améliorer la qualité des grains.

2.2.2.1.2. L'indice des organes verts

L'indice foliaire vert (rapport entre la surface des feuilles vertes et la surface du sol) est l'un des paramètres les plus importants pour le suivi de la culture. Cependant, la mesure directe de la surface des feuilles, à l'aide d'un planimètre, est longue. On a fait une estimation indirecte en utilisant la relation linéaire existante entre la matière sèche et la surface des feuilles vertes (Jappiot, 1987).

Sur chaque parcelle, pour les mêmes dates de prélèvement de la matière sèche, cinq lots de cinq plantes consécutives ont été prélevés au hasard. Au laboratoire, les divers organes (feuilles, tiges, épis) ont été séparés. Puis la partie verte de chaque organe a été séparée de la partie sénescence. Pour les épis on a utilisé une estimation visuelle basée sur le pourcentage de vert et de sénescence.

Les surfaces des différents organes verts ont été mesurées grâce à un planimètre toutes les deux ou trois mesures de façon à déterminer la surface spécifique k (rapport entre la surface et le poids) de chaque organe. Les différentes parties ont été mises à l'étuve à 105°C pendant au moins 24 heures. Les poids secs ont été ensuite relevés. En connaissant la surface spécifique de chaque organe, la proportion des parties vertes de chaque organe dans la matière sèche des cinq plantes prélevées et la matière sèche totale par unité de surface on a calculé les indices de surface des différents organes par la relation suivante:

$$\text{Indice vert}_{(o)} = k_{(o)} (MS_{(o)}/MS_{5p}) (MSt/S) \quad (II.2)$$

où

- $k_{(o)}$ = surface spécifique de l'organe
- $MS_{(o)}$ = matière sèche de l'organe
- MS_{5p} = matière sèche de l'échantillon de cinq plantes
- MSt = matière sèche totale prélevées dans la placette
- S = surface de la placette

Ainsi, on a pu calculé les indices verts suivants:

-IFV; ITV; IEV: les indices verts de chaque type d'organe (feuille, tige, épi)

-IFTV : l'indice des feuilles + tiges verts

-IV: l'indice vert (la somme des tous les indices verts).

Les coefficients de variation des mesures de l'indice foliaire vert (IFV), tous les traitements confondus, ont été de 13,4% et 16% dans la première et deuxième années, respectivement.

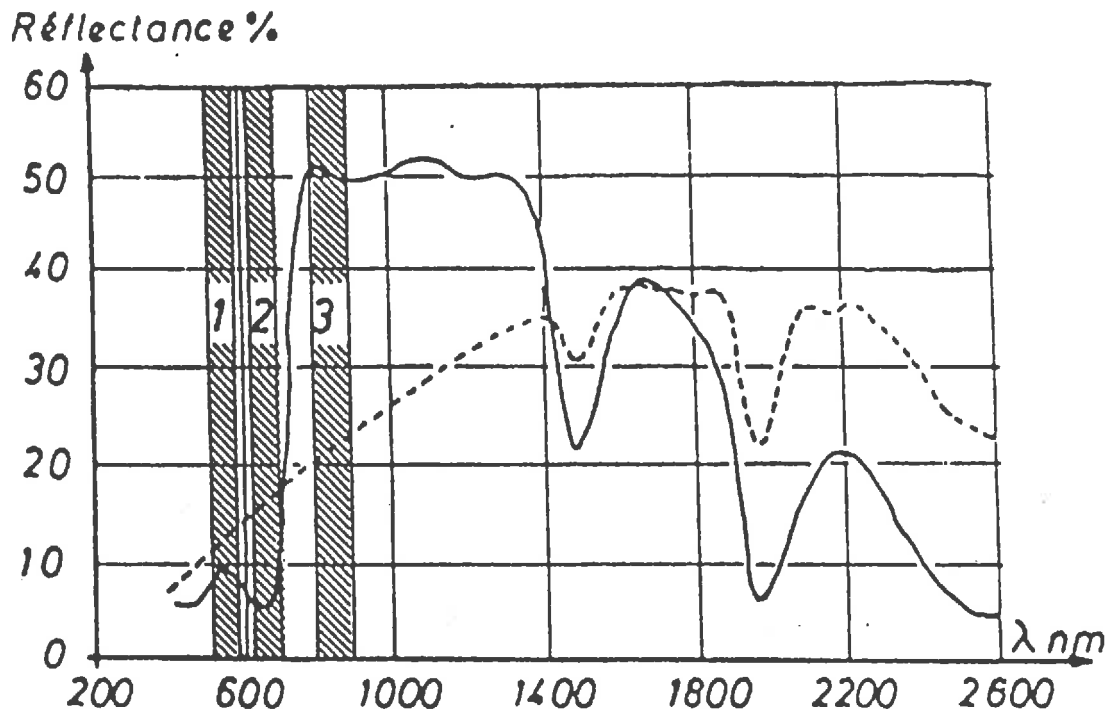


Figure 11.5. Bandes spectrales du satellite SPOT confrontées avec le spectre de réflectance d'une plante (trait continu) et d'un sol nu (trait interrompu).

2.2.2.1.3. Le rendement et les composantes du rendement

A la récolte, le rendement et les composantes du rendement ont été déterminés à partir des prélèvements de 6 placettes de $0,36\text{m}^2$ (2 rangs adjacents de 1m linéaire de longueur) pris au hasard dans la parcelle (ITCF, 1984). Les paramètres suivants ont été déterminés:

- nombre d'épis par m^2
- nombre de grains par épi
- nombre de grains par m^2
- poids de 1000 grains.

2.2.2.2. Mesure de la réflectance spectrale et calcul des indices de végétation

2.2.2.2.1. L'appareil de mesure: le radiomètre

L'appareil utilisé est un radiomètre CIMEL de simulation de SPOT. Il comporte trois canaux identiques à ceux du satellite:

- Canal 1 (SP1): 500 - 590nm (vert)
- Canal 2 (SP2): 610 - 680nm (rouge)
- Canal 3 (SP3): 790 - 890nm (proche infrarouge)

Il s'agit des bandes spectrales les mieux adaptées pour identifier et suivre l'évolution des cultures par télédétection (Fig.II.5).

Ce radiomètre a la particularité de mesurer simultanément la luminance et l'éclairement, dans les trois longueurs d'onde, et d'afficher la réflectance correspondante. Les deux têtes, mesurant la luminance et l'éclairement, sont maintenues dans la position verticale à l'extrémité d'une potence à une hauteur de 2,5m du sol. L'angle d'ouverture de la tête de luminance étant de 12° , la surface visée au sol est un cercle de 0,52m de diamètre, soit une surface de $0,212\text{m}^2$.

L'étalonnage du radiomètre a été réalisé en visant périodiquement un panneau blanc de référence (aluminium recouvert de sulfate de baryum) lui-même étalonné grâce au spectrophotomètre du laboratoire.

2.2.2.2.2. Les mesures. Variabilité des mesures

Les mesures ont été faites, pendant le cycle de la culture, dans l'heure qui entoure le midi solaire par ciel dégagé et absence de vent (Mistral). Dix mesures de réflectance ont été faites au hasard dans chaque parcelle. Elles ont suivi le rythme des prélèvements biologiques dans la mesure où les conditions atmosphériques le

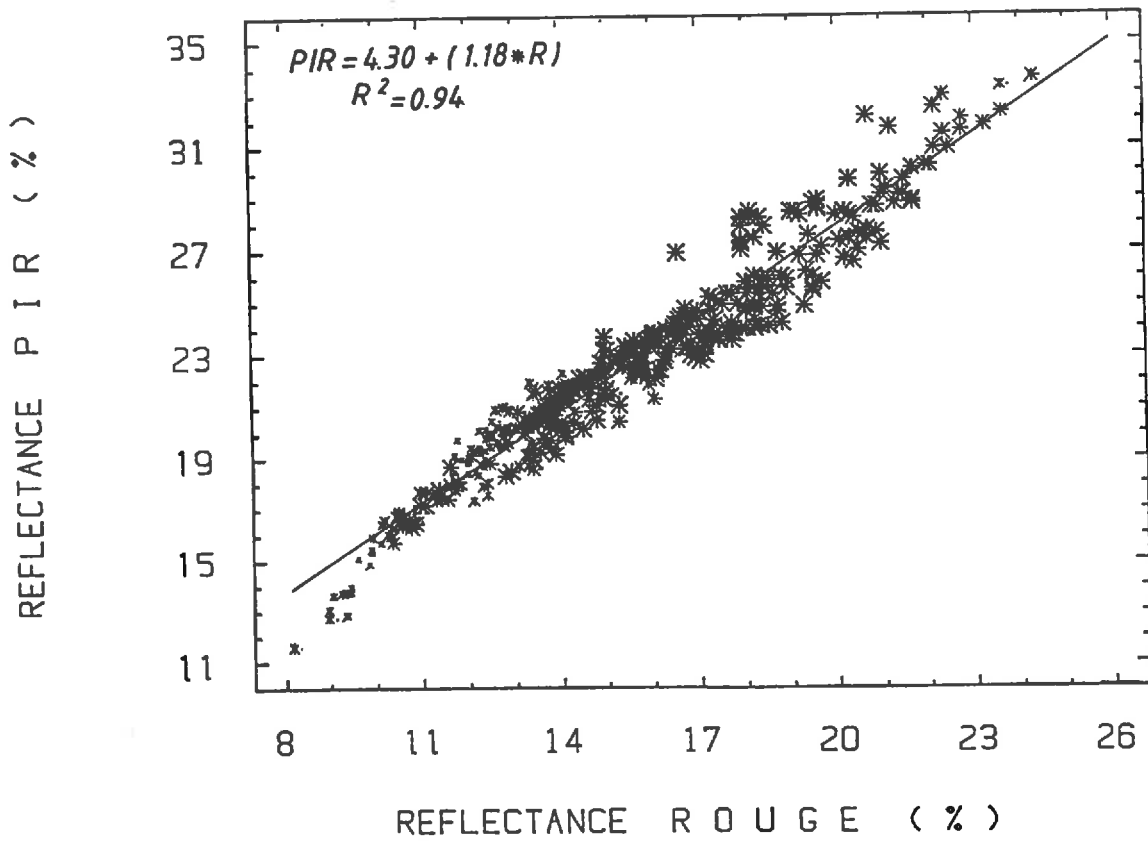


Figure II.6. Relation entre la réflectance dans le rouge et le proche infrarouge pour le sol nu (droite du sol) de la parcelle expérimentale.

permettaient. Les données ont été obtenues pour 11 et 16 dates dans la première et deuxième années, respectivement. Le canal SP1 n'a pas été pris en compte parce que sa réponse est très proche de celle du SP2 (Baret, 1986).

Les données de réflectance de chaque canal ont été corrigées en fonction de l'évolution de la hauteur du soleil dans la saison et de la réponse directionnelle du panneau de référence de façon à tenir compte de la variation de l'étalonnage sur le panneau de référence due à sa non-lambertiannité (Guerif, non publié). L'équation de correction a été la suivante:

$$R_c = (R_m (R_p/R_b))/(R_{\theta}/R_0) \quad (\text{II.3})$$

où

- R_c = réflectance corrigée
- R_m = réflectance mesuré par le radiomètre
- R_p/R_b = coefficient d'étalonnage entre la réflectance du panneau de référence (R_p) et celle mesurée par le radiomètre (R_b).
- R_{θ} = réflectance du panneau éclairé avec une incidence θ
- R_0 = réflectance du panneau éclairé à la verticale.

La variabilité des mesures de réflectance a présenté des chiffres similaires dans les deux années. Ils ont été, en général, plus faibles (inférieur à 10%) dans les canaux 1 (vert) et 3 (proche infrarouge) et un peu plus élevées (entre 10 et 20%) dans le canal 2 (rouge). Pour ce dernier, les coefficients de variation ont montré une tendance à être plus élevés au début du cycle quand les indices foliaires étaient faibles.

2.2.2.3. Détermination de la droite du sol

La droite du sol a été déterminée à partir des mesures de réflectance faites dans deux parcelles de sol nu d'environ 4m^2 ($2\text{m} \times 2\text{m}$) localisées l'une dans la partie irriguée et l'autre dans la partie non-irriguée. Les mesures ont été faites avec les têtes de luminance et d'éclairement du radiomètre étant à environ 1m de la surface du sol pour éviter l'influence de la végétation au tour.

Avant de commencer les traitements d'irrigation les mesures ont été faites dans une seule parcelle et dans les deux parcelles après cette date en faisant 10 répétitions par canal. Au total, les mesures ont été faites pour 20 dates, constituant des conditions très variables d'humidité de surface. Lorsque après une irrigation, la surface du sol était sèche on l'a ratissée pour avoir à la fois une situation plus similaire au sol (humide) au dessous du couvert végétal et un plus grand contraste avec la parcelle non-irriguée. Le résultat de la régression entre la réflectance des canaux SP2 et SP3 est montré dans la figure II.6.

2.2.2.2.4. Calcul des indices de végétation

Trois indices de végétation ont été calculés à partir des valeurs de la réflectance dans les domaines du rouge (R) et du proche infrarouge (PIR):

$$\text{-Le rapport: } Ra = \text{PIR}/R \quad (\text{II.4})$$

$$\text{-La différence normalisée: } DN = (\text{PIR}-R)/(\text{PIR}+R) \quad (\text{II.5})$$

$$\text{-L'indice perpendiculaire: } PVI = (\text{PIR} - aR - b)/(1+a^2)^{1/2} \quad (\text{II.6})$$

où a et b représentent les paramètres de la droite du sol déterminée auparavant:

$$Y = a X + b \quad (\text{II.7})$$

où X et Y représentent, respectivement, la réflectance du sol dans le rouge et dans le proche infrarouge

2.2.2.3. Mesures de l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PARI)

L'interception du PARI (ϵ_i) a été mesurée à partir de photos hémisphériques prises au dessus du couvert végétal. Comme la méthode a été déjà décrite en détail par Olioso (1987) et par Baret et al.(1989), seulement les aspects les plus importants seront mentionnés.

2.2.2.3.1. La prise des photos hémisphériques

Les photos hémisphériques ont été prises en utilisant un objectif "fish-eye" NIKKOR (7,5mm de focale) équipé d'un filtre rouge ne laissant passer que les longueurs d'ondes supérieures à 600nm et le film couleur EKTACHROME 2236. L'appareil a été monté sur un trépied qui permettait le réglage de la hauteur en fonction de la croissance des plantes. Les photographies ont été prises à environ 0,10m au-dessus du couvert.

Douze photographies (six sur le rang et six sur l'inter-rangs) ont été prises pour chaque traitement en chaque date de mesure. Les réglages du diaphragme et de la vitesse d'obturation sont délicats, car il n'existe pas de posemètre étalonné pour les films infrarouges utilisés. Le diaphragme est fixé arbitrairement à 5-6. La vitesse est déterminé par un appareil photo indépendant réglé pour un diaphragme de 5-6 et une sensibilité de 100 ASA. Trois photographies sont prises: à la vitesse indiquée et aux vitesses voisines inférieure et supérieure.

Pour éviter le problème d'avoir des zones ombrées ou trop éclairées qui rendent difficile la discrimination entre le sol et la végétation (Olioso, 1987), les

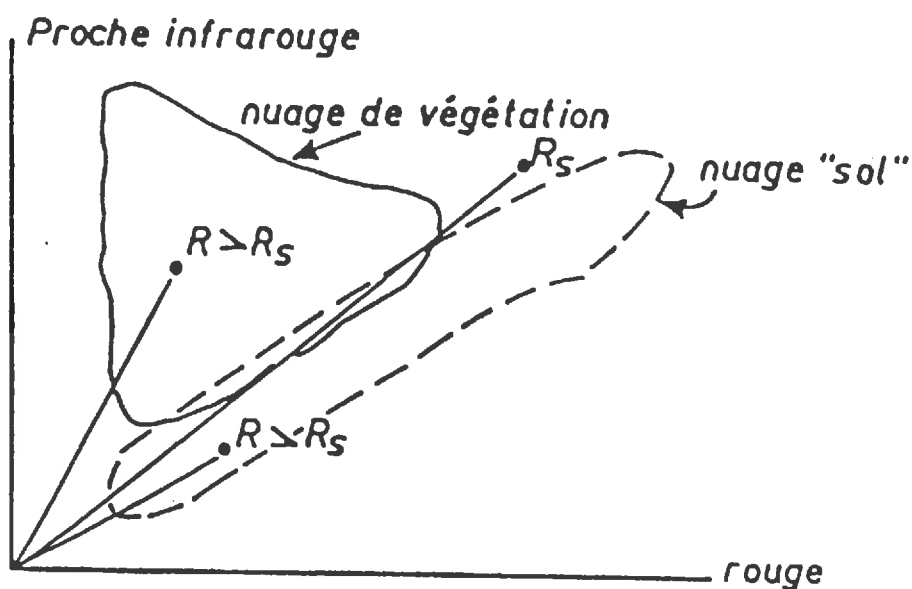


Figure II.7. Principe de séparation des éléments verts photosynthétiquement actifs des autres éléments (sol, végétation sénéscente) à partir de la combinaison d'images rouge et proche infrarouge: on recherche le point correspondant au minimum dans le rouge et dans le proche infrarouge. Ce point constituera une nouvelle origine. Dans ce système, le rapport $R = \text{Infrarouge/Rouge}$ est calculé. On cherche alors une valeur seuil, R_s , permettant de séparer la végétation ($R > R_s$) du sol ($R < R_s$) (d'après Baret et al., 1989).

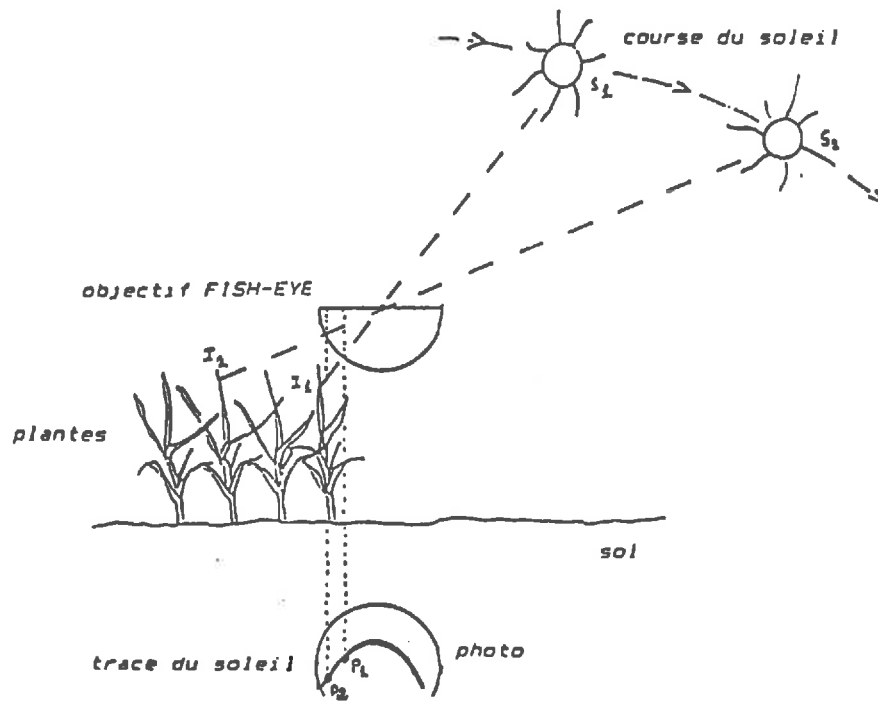


Figure:II.8. Utilisation de photographies hémisphériques et construction de la trace du soleil. Les rayons solaires incidents pour deux positions du soleil (S_1 et S_2) sont représentés en tirets. I_1 et I_2 représentent les points d'interception par le couvert correspondant respectivement aux positions S_1 et S_2 . P_1 et P_2 sont les projections des points I_1 et I_2 vus au travers de l'objectif "fish-eye" (d'après Baret et al., 1989).

photographies ont été prises soit dans les journées complètement couvertes soit sous la protection d'un parasol de plage pour les journées ensoleillées. Les photographies ont été prises pendant sept dates, couvrant les différentes phases du cycle du blé: 5 et 22 Février; 4 Mars; 18 Avril; 5 et 20 Mai; 2 et 16 Juin.

2.2.2.3.2. La numérisation

La numérisation des films photographiques est effectuée à l'aide d'une caméra CCD de résolution 500 x 500 équipée de filtres permettant d'extraire séparément les images rouge et proche infrarouge. La caméra est reliée à un micro-ordinateur par l'intermédiaire d'une carte de numérisation. Après la combinaison des images rouge et infrarouge, un seuillage assure la séparation entre la partie végétation verte et les autres éléments en utilisant l'algorithme présenté dans la figure II.7. Cette opération s'effectue en comparant, visuellement, l'image originelle à l'image bimodale, sol-végétation, obtenue. L'indétermination sur la valeur seuil conduit à une imprécision de l'ordre de 10% pour chaque photographie (Baret et al., 1989).

2.2.2.3.3. Obtention des valeurs journalières de ϵ_i

L'image numérique est divisée en cases élémentaires de 10° en azimut et 10° en zénith. La part du rayonnement intercepté dans la direction correspondante est représentée par la proportion de points de végétation dans la case. Chaque photographie fournit une matrice 36 x 9 de coefficients d'interception directionnelle. Pour chaque date de mesure, une matrice représentant l'ensemble de la culture est obtenue par la moyenne des photos sur le rang et des photos sur l'inter-rang.

En déterminant la course du soleil sur les photos (Fig.II.8) il est possible de calculer l'évolution de l'interception au cours de la journée. Les valeurs instantanées de ϵ_i obtenues à partir des photos hémisphériques sont transformées en valeurs journalières en négligeant le rayonnement diffus et en supposant l'énergie solaire incidente proportionnelle au cosinus de l'angle zénithal solaire (Baret et al., 1989):

$$\epsilon_i = \frac{\sum_{\text{lever}}^{\text{midi}} \epsilon_i(\theta_s) \cos\theta_s}{\sum_{\text{lever}}^{\text{midi}} \cos\theta_s} \quad (\text{II.8})$$

avec: ϵ_i = valeur de ϵ_i intégrée dans la journée
 θ_s = angle solaire zénithal
 lever = lever du soleil
 midi = midi solaire.

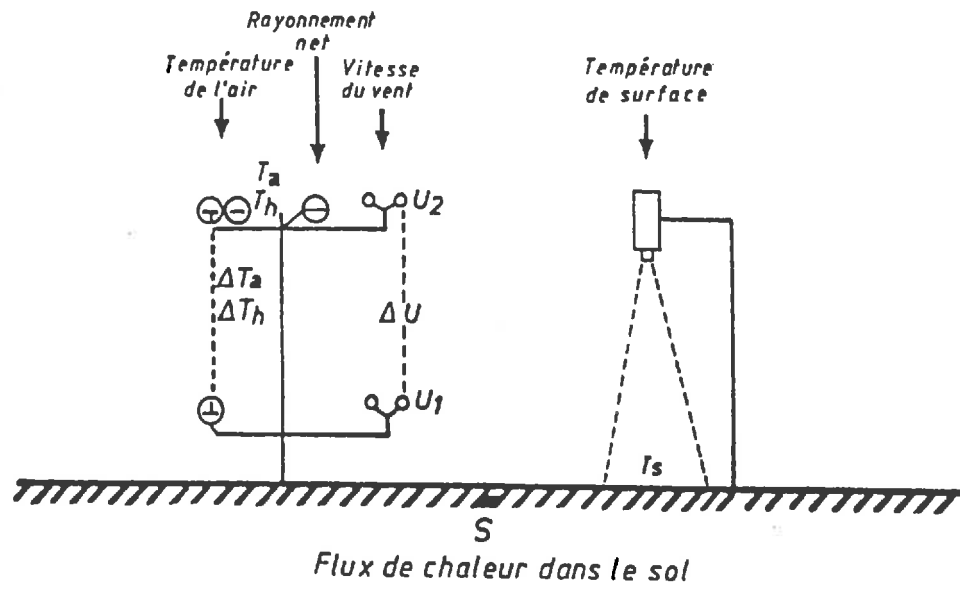


Figure II.9. Dispositif pour les mesures micrométéorologiques

fig 17

2.2.2.4. Mesures micrométéorologiques

2.2.2.4.1. Dispositif des mesures pour le calcul des flux et de température de surface.

Le dispositif de mesures a été conçu à partir de ceux mis au point à la Station de Bioclimatologie INRA d'Avignon au cours de campagnes expérimentales précédentes par J.P.Lagouarde (Lagouarde et al., 1986 pour le Sénégal, André et al., 1988 pour la campagne HAPEX-MOBILHY), qui a également directement contribué à la mise en place et au suivi de notre expérimentation.

2.2.2.4.1.1. Année 1986/87

Comme on a vu sur le dispositif expérimental (Fig.II.4), une station micrométéorologique a été installée au centre de la parcelle irriguée (T1) et une autre dans la parcelle non-irriguée (T4).

Le dispositif de mesure utilisé en 1986/87 est montré sur la figure II.9. Pour chaque station, les données suivantes ont été obtenues: rayonnement net R_n ; vitesse du vent U ; température absolue sèche T_a et humide T_h ; gradient des températures ΔT_a et ΔT_h et de la vitesse du vent entre deux niveaux; flux de chaleur dans le sol et température de surface T_s .

Le rayonnement net a été mesuré au moyen de pyrromètres CROUZET. La vitesse du vent a été fournie par des anémomètres MCB; les températures absolues sèche et humide au niveau supérieur sont mesurées, à l'aide de psychromètres INRA, par un montage différentiel de 2 thermocouples Cuivre-Constantan (soit une sensibilité de $80 \mu\text{v}.\text{C}^{-1}$), les soudures de référence étant enfoncées à 1m de profondeur. Deux montages différentiels de 3 thermocouples fournissent directement les écarts entre les températures sèche ΔT et humide ΔT_h aux 2 niveaux. Le flux de chaleur dans le sol a été mesuré à l'aide d'une plaque de flux THORNTHWAITE, installée à 2cm de profondeur. L'étalonnage des pyrromètres et des anémomètres a été fait par comparaison avec des capteurs de référence.

La température de surface T_s a été mesurée à l'aide d'un radiothermomètre HEIMAN KT 17 installé sur un trépied de 3m de hauteur de sorte que la surface visée au sol (visée verticale) était un cercle d'environ 1,50m de diamètre. L'appareil a été étalonné avant le début de l'expérimentation à l'aide d'un corps noir thermostaté et sa stabilité dans le temps vérifiée. La réponse de ce type d'appareil dépendant fortement de sa température interne, celle-ci a été mesurée également au moyen d'un montage différentiel de thermocouples (référence à 1m de profondeur).

L'alimentation électrique des différents capteurs était assurée à partir du 220V et installée dans une cabane en bois installée au milieu de la parcelle expérimentale à une distance d'environ 100m de chaque station micrométéorologique.

Les systèmes d'acquisition des données (Campbell 21X micrologger) ont été installés à l'intérieur d'une petite cabane en bois située à environ 10m de chaque station de mesure. La Campbell 21X a été programmée pour scruter les données tous les trois secondes et en faire la moyenne sur des périodes de 15 minutes. Les données stockées dans la Campbell 21X ont été transférées à un micro-ordinateur portable une ou deux fois par semaine pour être finalement analysées à l'aide d'un mini ordinateur à Avignon.

Les mesures ont été faites pendant une période de 65 jours à partir du 4 Mai 1987 (164 jours après la levée).

2.2.2.4.1.2. Année 1987/88

Lors de la deuxième année, le dispositif des mesures légèrement réduit par rapport à celui de l'année précédente en raison de la disponibilité d'un seul système d'acquisition de données, quelques paramètres ont dû être supprimés. Ainsi, les paramètres mesurés ont été les suivants: rayonnement net; température absolue de l'air (sur la station 1 seulement); écart de température entre les niveaux supérieur et inférieur et température de surface.

Ne pouvant plus être enregistrée automatiquement, la température de référence au sol à 1m de profondeur a été contrôlée manuellement presque tous les jours, à l'aide d'un microvoltmètre qui mesurait la différence de tension entre un montage différentiel de thermocouples enterrés à 1m de profondeur et de thermocouples placés à la surface dans un milieu de température connue (bouteille d'eau dont la température était mesurée à l'aide d'un thermomètre à mercure).

En raison des problèmes électroniques, l'obtention des données a commencé plus tard que prévu et les données des premiers jours ont dû être éliminées. La période utile de mesure a été de 30 jours à partir de 28 Mai, 1988 (176 jours après la levée).

Pendant les deux années de l'expérimentation la hauteur des capteurs au dessus de la culture et l'écart entre eux ont été ajustés en fonction de la croissance des plantes comme l'on verra plus loin.

En plus de son enregistrement en continu sur les deux stations, la température de surface a été aussi mesurée, pour les quatre traitements, à l'aide d'un radiothermomètre portable Micron modèle M80 G. Les mesures ont été faites vers le midi solaire pour les journées avec le ciel dégagé ou sans passages nuageux trop importants.

Vingt mesures ont été faites sur chacune des quatre parcelles (une répétition de chaque traitement), dix visant le nord et dix visant le sud. Le temps de mesure pour une orientation de visée était d'environ 30 minutes. Pour éviter un écart de

Angles de visées +
Radinometre portable -

temps trop important entre les mesures sur les différentes parcelles, elles ont été faites pour toutes les parcelles avec un azimuth de visée (nord par exemple). En revenant, après les mesures sur la dernière parcelle, les températures ont été mesurées avec le radiothermomètre orienté vers l'autre azimuth de visée. La température de la parcelle a été considérée comme la moyenne entre les deux orientations de visée.

L'angle zénital de visée au dessus de la végétation était d'environ 30 degrés et la distance appareil-cible était de 1m environ. L'émissivité du blé a été considérée comme égale à 0,98 (Huband et Monteith, 1986).

Le radiothermomètre portable a été étalonné avec le même corps noir que pour l'étalonnage du Heiman KT 17. Les mesures ont été faites pendant un période de 48 jours à partir de 5 Mai (153 jours après la levée).

2.2.2.5. Mesures de la tension de l'eau dans le sol

Lors des deux années d'expérimentation, le suivi de la tension de l'eau dans le sol a été fait en coopération avec les techniciens de la Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône.

En 1986/87, deux tensiomètres (type manomètre) ont été installés dans une des deux parcelles du traitement 1 et deux dans une des parcelles du traitement 4. Ils étaient à la profondeur de 30cm et 45cm. Les mesures ont commencé le 17 Avril 1987 (147 jours après la levée).

La deuxième année, huit tensiomètres ont été installés à la profondeur de 30cm sur quatre parcelles correspondant aux quatre traitements. Malgré leur faible représentativité spatiale les données sont présentées dans le chapitre III à titre d'indication sur les niveaux de tension de l'eau dans le sol pendant le cycle du blé.

2.3. Les cultures

2.3.1. Matériel végétal et techniques culturales

La variété de blé dur utilisée (Arcour) est recommandée par l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF) et par l'Association Blé Dur Développement (ABDD). Elle est considérée régulière et productive, assez résistante à la rouille brune et au mitadinage.

Le semis a été réalisé avec une densité d'environ 400 grains.m⁻² et un écart de 18cm entre rangs. Les mauvaises herbes ont été contrôlées efficacement par l'application des herbicides antigraminées et anti-dicotylédones de post-levée. Dans la deuxième année, le contrôle de l'avoine sauvage (*Avena strigosa*) a été efficace mais il a

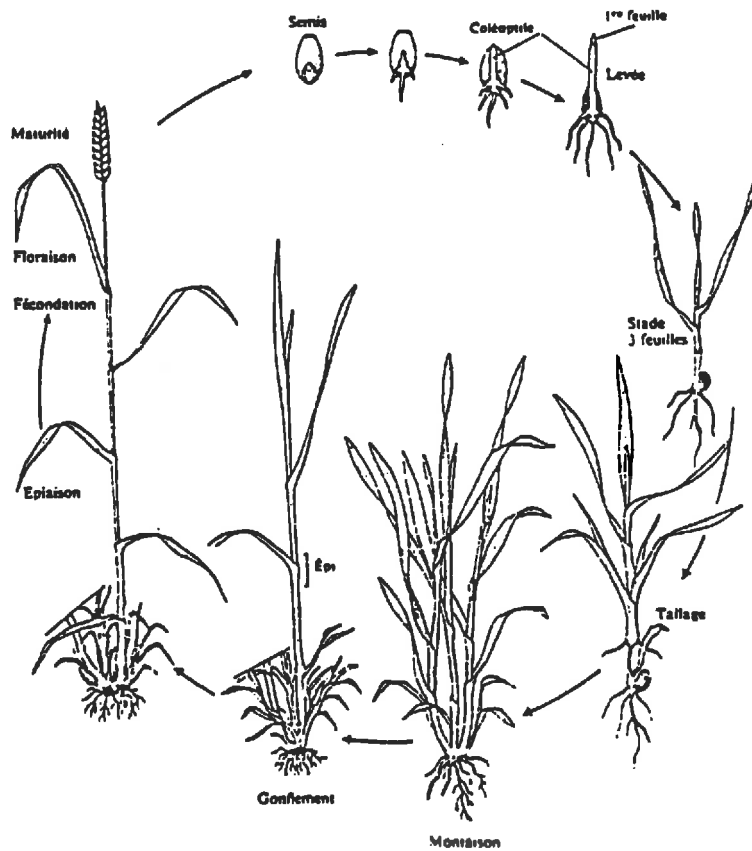


Figure II.10. Schéma du cycle de développement du blé (d'après Boyeldieu, 1980).

été retardé de quelques jours en fonction de l'état relativement sec du sol lorsque le produit a été appliqué, le 16 Février 1988.

2.3.2. Stades phénologiques

La figure II.10 illustre bien les différentes étapes de développement d'une plante de blé.

Les principaux stades phénologiques de la culture pendant les deux années sont montrés dans les tableaux II.3 et 4. En général, les traitements non-irrigués ont atteint certains stades plus tôt que les parcelles irriguées. Ces différences ont été plus marquantes dans la première année (tableau II.3) puisque le stress hydrique a été plus sévère.

Ces stades ont été déterminés à partir des recommandations de l'ITCF (ITCF, 1981) en utilisant l'échelle de Feekes comme référence. La détermination des dates de certains stades est basée sur une estimation visuelle globale de la culture avec une fréquence variable entre une et deux fois par semaine. Il faut alors accorder un intervalle de confiance de l'ordre de 4 à 7 jours.

2.3.3. Le rendement et les composantes du rendement

Les données de rendement, des composantes du rendement, de la matière sèche aérienne et des coefficients de récolte des deux années d'expérimentation sont dans les tableaux II.5 et 6.

Les rendements, qui ont été un peu plus élevés dans la deuxième année, et les composantes du rendement ont été affectés par les niveaux de fertilisation azotée et par le stress hydrique dans les deux années. Le traitement 3, qui était plus développé au moment de l'arrivée du stress hydrique, a été plus sévèrement affecté que le traitement 4. Le nombre de grains par épi et le poids de 1000 grains ont été les composantes plus affectés par le stress hydrique.

Tableau II. 3. : Evolution des stades phénologiques de la variété *Arcour* pendant l'année 1986/87.

Stades phénologiques	Traitements				Echelle de Feekes**
	Irrigués (T ₁ , T ₂)		Non irrigués (T ₃ , T ₄)		
	Date	JAL*	Date	JAL	
Semis	10/11/86		10/11/86		
Levée	21/11/86		21/11/86		1
Début tallage	15/01/87	55	15/01/87	55	2
Début montaison (épi 1 cm)	15/03/87	114	15/03/87	114	5
Gonflement	2/05/87	162	30/04/87	160	8
Epiaison	15/05/87	175	10/05/87	170	10-3
Floraison	25/05/87	185	20/05/87	120	10-5-2
Grain laiteux	9/06/87	200	4/06/87	195	11-1
Grain pâteux	21/06/87	212	14/06/87	205	11-2
Grain mûr	5/07/87	226	28/06/87	219	11-4

* JAL= Jours après la levée,

** = Echelle de Feekes (1954) (ITCF, 1981).

Tableau II. 4. : Evolution des stades phénologiques de la variété *Arcour* pendant l'année 1987/88.

Stades phénologiques	Traitements				Echelle de Feekes **
	Irrigués (T ₁ , T ₂)		Non irrigués (T ₃ , T ₄)		
	Date	JAL *	Date	JAL	
Semis	11/11/87		11/11/87		
Levée	5/12/87		5/12/87		1
Début tallage	7/01/88	34	7/01/88	34	2
Début montaison (épi 1 cm)	15/03/88	102	15/03/88	102	5
Gonflement	26/04/88	144	26/04/88	144	8
Epiaison	10/05/88	158	10/05/88	158	10-3
Floraison	17/05/88	165	17/05/88	165	10-5-2
Grain laiteux	31/05/88	179	28/05/88	176	11-1
Grain pâteux	14/06/88	193	10/06/88	189	11-2
Grain mûr	28/06/88	207	23/06/88	202	11-4

* JAL = jours après la levée

** Echelle de Feekes (1954)(ITCF, 1981)

Tableau II. 5. : Rendement, composants du rendement, matière sèche totale et coefficient de récolte du blé (variété *Arcour*) pendant la saison 1986/87.

Rendement ou composant	Traitements			
	T1	T2	T3	T4
Densité d'épi (épi.m ⁻²)	444	364	331	302
Fertilité de l'épi (grain.épi ⁻¹)	27,7	26,4	16,5	21,0
Densité de grains (grain.m ⁻²)	12299	9610	5462	6342
Poids 1000 grains (g)	38,9	38,4	36,6	38,9
Rendement en grains (t.ha ⁻¹)	4,89 (5,60)	3,85 (4,41)	2,08(2,38)	2,73(3,13)
Matière sèche totale (t.ha ⁻¹)	14,76	11,48	9,46	8,53
Coefficient de récolte (%)	33,1	33,5	22,0	32,0

Les poids reportés correspondent aux poids secs à l'exception des chiffres entre parenthèses, qui sont basés sur 14,5% d'humidité.

Tableau II. 6. : Rendement, composant du rendement, matière sèche totale et coefficient de récolte du blé (variété *Arcour*) pendant la saison 1987/88.

Rendement ou composant	Traitements			
	T1	T2	T3	T4
Densité d'épi (épi.m ⁻²)	724	640	754	668
Fertilité de l'épi (grain.épi ⁻¹)	18,6	16,3	11,9	16,8
Densité de grains (grain.m ⁻²)	13466	10432	8973	11222
Poids 1000 grains (g)	37,4	39,5	27,7	28,8
Rendement en grains (t.ha ⁻¹)	4,94(5,66)	4,10(4,69)	2,46(2,82)	3,18(3,64)
Matière sèche totale (t.ha ⁻¹)	14,83	13,02	11,60	11,25
Coefficient de récolte (%)	33,3	31,5	21,2	28,3

Les poids reportés correspondent aux poids secs à l'exception des chiffres entre parenthèses, qui sont basés sur 14,5% d'humidité.

CHAPITRE 3

CHAPITRE III. QUANTIFICATION DU STRESS HYDRIQUE DE LA CULTURE

3.1. Introduction

Comme nous l'avons vu dans l'analyse bibliographique, le stress hydrique joue un rôle très important sur l'interception du rayonnement solaire (ϵ_i), sur l'efficience avec laquelle cette énergie est transformée en biomasse (ϵ_b) et, par conséquent, sur la production finale de matière sèche de la culture.

L'objectif majeur de ce chapitre est de caractériser le stress hydrique pour les deux années de l'expérimentation, en utilisant des mesures de niveaux de complexité variables, mais reliées physiquement et complémentaires telles que la tension de l'eau dans le sol, l'évapotranspiration et la température de surface. Les principaux résultats obtenus seront présentés, après un bref rappel sur les méthodes de calcul de ces différents paramètres.

3.2. Rappels méthodologiques

3.2.1. Calcul de l'évapotranspiration réelle (ET_r)

L'évapotranspiration réelle d'une culture peut être déduite du bilan d'énergie comme l'on a vu au chapitre I:

$$L \cdot ET_r = R_n - S - H \quad (\text{III.1})$$

où R_n est le rayonnement net, S le flux de chaleur dans le sol et H le flux de chaleur sensible dans l'air. Les flux R_n et S sont directement mesurables à partir de capteurs comme le pyrromètre et le fluxmètre. La détermination de H nécessite le recours à des méthodes plus complexes.

La méthode basée sur la détermination du rapport de Bowen ($H/L \cdot ET_r$) est une méthode classique; elle permet l'obtention du flux de chaleur sensible H à partir des mesures de gradients verticaux de température de l'air et de la température humide (température thermomètre mouillé) ΔT_a et ΔT_h au-dessus d'un couvert végétal. Malgré l'amélioration obtenue avec le système B.E.A.R.N. (Bilan d'énergie automatique et numérique) (Perrier et al., 1975), qui permet d'augmenter la précision de mesure de ΔT_h par une inversion périodique des niveaux de T_a et T_h , le rapport de Bowen reste une méthode de mise en oeuvre délicate en raison des difficultés de mesure de T_h (problèmes d'humectation des mèches du psychromètre).

La "méthode aérodynamique combinée" a l'avantage de ne pas utiliser la température T_h puisque le flux de chaleur sensible H est déterminé à partir des profils de vitesse du vent et de température à différentes hauteurs au-dessus du couvert végétal. L'évapotranspiration est ensuite obtenue à partir de l'équation du bilan d'énergie, une

fois connus les flux RN, S et H. Itier (1981) a proposé la "méthode aérodynamique simplifiée" ne mettant en oeuvre que deux niveaux de mesure. Comme ces deux méthodes sont déjà bien connues, seules les aspects plus importants seront exposés dans la suite.

3.2.1.1. Estimation du flux de chaleur sensible H par la méthode aérodynamique à deux niveaux

Cette méthode est basée sur l'analyse des profils de la vitesse du vent U et de la température T au dessus du couvert:

$$\frac{U}{U^*} = \frac{1}{k} \left\{ \log \frac{z-d}{Z_0} - \psi_m(\zeta) \right\} \quad (\text{III.2})$$

$$\frac{T - T_s}{T^*} = \frac{1}{k} \left\{ \log \frac{z-d}{Z_{ot}} - \psi_t(\zeta) \right\} \quad (\text{III.3})$$

où U^* et T^* sont les grandeurs de "frottement" pour la vitesse du vent et de la température, respectivement; k est la constante de von Karman (0,4); z est la hauteur considérée; d est la hauteur de déplacement qui, dans cette étude, a été prise égale à $0,67H$, H étant la hauteur de la culture; Z_0 et Z_{ot} sont les rugosités mécanique et thermique, respectivement. Les fonctions ψ_i , définies par Paulson (1970), caractérisent l'état de stabilité de l'atmosphère.

$$\zeta = \frac{Z}{L} \quad \text{où } L \text{ est la longueur de Monin-Obukhov:}$$

$$L = \frac{\rho C_p T U^{*3}}{k g H} \quad (\text{III.4})$$

où ρ et C_p sont la masse volumique et la chaleur spécifique de l'air, respectivement et g l'accélération due à la gravité.

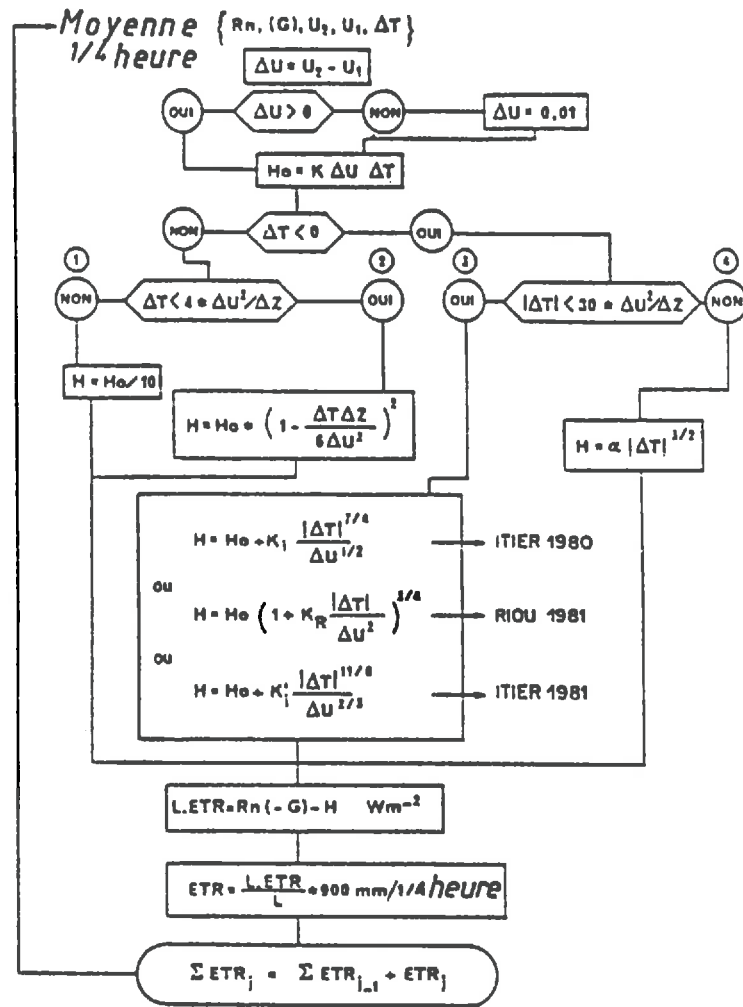


Figure III.1. Organigramme de calcul de l'évapotranspiration réelle à partir des mesures de rayonnement net (R_n), flux de chaleur dans le sol (G), vitesse du vent à deux niveaux (U_2, U_1) et de l'écart de température entre ces niveaux (ΔT).

Les mesures aux les niveaux Z_1 et Z_2 permettent de calculer U^* et T^* comme suit:

$$U^* = k (U_2 - U_1) \left\{ \log \frac{Z_2}{Z_1} - \psi_m \left(\frac{Z_2}{L} \right) + \psi_m \left(\frac{Z_1}{L} \right) \right\}^{-1} \quad (\text{III.5})$$

$$T^* = k (T_2 - T_1) \left\{ \log \frac{Z_2}{Z_1} - \psi_t \left(\frac{Z_2}{L} \right) + \psi_t \left(\frac{Z_1}{L} \right) \right\}^{-1} \quad (\text{III.6})$$

avec, pour simplifier la présentation des équations, $Z_1 = z_1 - d$ et $Z_2 = z_2 - d$.

Le flux de chaleur sensible peut alors être calculé par:

$$H = \rho C_p U^* T^* \quad (\text{III.7})$$

Comme le flux H intervient dans les fonctions de Paulson (1970) par l'intermédiaire de L , un calcul itératif est nécessaire. La convergence est testée sur la longueur de Monin-Obukhov L .

Dans le cas de la convection libre, le flux de chaleur sensible est estimé par l'équation:

$$H = \rho C_p \left(\frac{\Delta T}{3.21} \right)^{3/2} \left(\frac{g}{T} \right)^{1/2} \left(Z_1^{-1/3} - Z_2^{-1/3} \right)^{-3/2} \quad (\text{III.8})$$

3.2.1.2. Estimation du flux de chaleur sensible H par la méthode aérodynamique simplifiée

Cette méthode est dérivée de la méthode aérodynamique présentée auparavant. Le flux de chaleur sensible H est calculé à partir des gradients de température et de vitesse du vent entre les niveaux Z_1 et Z_2 en distinguant divers états de stabilité thermique des basses couches atmosphériques (Itier, 1981). L'organigramme de la méthode est donné dans la figure III.1.

Les variables qui interviennent dans le calcul de H sont les suivantes: U la vitesse du vent, T la température, Z l'altitude et Δ l'opérateur différence: $\Delta Z = Z_{\text{sup}} - Z_{\text{inf}}$; $\Delta U = U(Z_{\text{sup}}) - U(Z_{\text{inf}})$; $\Delta T = T(Z_{\text{sup}}) - T(Z_{\text{inf}})$. Dans tous les cas, le flux de chaleur H est écrit sous la forme $H = f(\Delta U, \Delta T)$, la forme de f dépendant de ΔT et/ou de $\Delta T/\Delta U$.

Les niveaux ont été réglés de tel façon que le niveau inférieur reste toujours de l'ordre de deux fois la hauteur du couvert et que l'écart entre les deux niveaux soit constamment de 1,5m.

Le flux de chaleur sensible H_0 est d'abord calculé dans des conditions de neutralité thermique à l'aide du coefficient K qui est une fonction simple des hauteurs Z_1 et Z_2 :

$$K = \frac{\rho C_p k^2}{\log(Z_2/Z_1)^2} \approx \frac{192}{[\log(Z_2/Z_1)]^2} \quad (\text{III.9})$$

Dans des conditions d'instabilité thermique modérée (situation 3, Fig.III.1) nous avons utilisé l'équation proposée par Riou (1982):

$$K_r = 16 \left(\frac{gZ}{T} \log \frac{Z_2}{Z_1} \right) \text{ and } Z = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (\text{III.10})$$

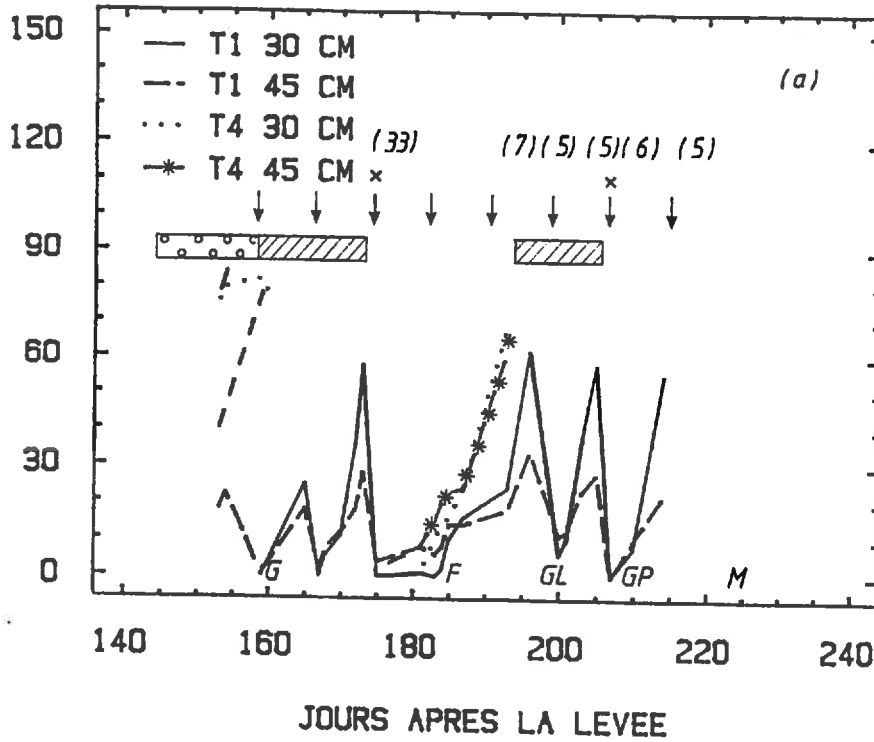
Dans le cas de forte instabilité (situation 4, Fig.III.1), α a été calculé par:

$$\alpha = \frac{1.3 \rho C_p \sqrt{g/T}}{5.2 (Z_1^{-1/3} - Z_2^{-1/3})^{3/2}} \approx 55 (Z_1^{-1/3} - Z_2^{-1/3})^{-3/2} \quad (\text{III.11})$$

Les valeurs de H calculées par les deux méthodes ont été utilisées dans le calcul de l'ETr. En général, elles étaient très proches. Nous avons en définitive retenu les valeurs issues de la méthode aérodynamique.

Après l'obtention de H et des mesures de R_n , l'évapotranspiration réelle journalière a été déduite de l'équation du bilan d'énergie, en considérant que le flux de chaleur dans le sol était nul pendant des périodes de 24 heures (l'énergie stockée par conduction dans le sol de jour étant restituée la nuit).

TENSION DE L'EAU (CB)



TENSION DE L'EAU (CB)

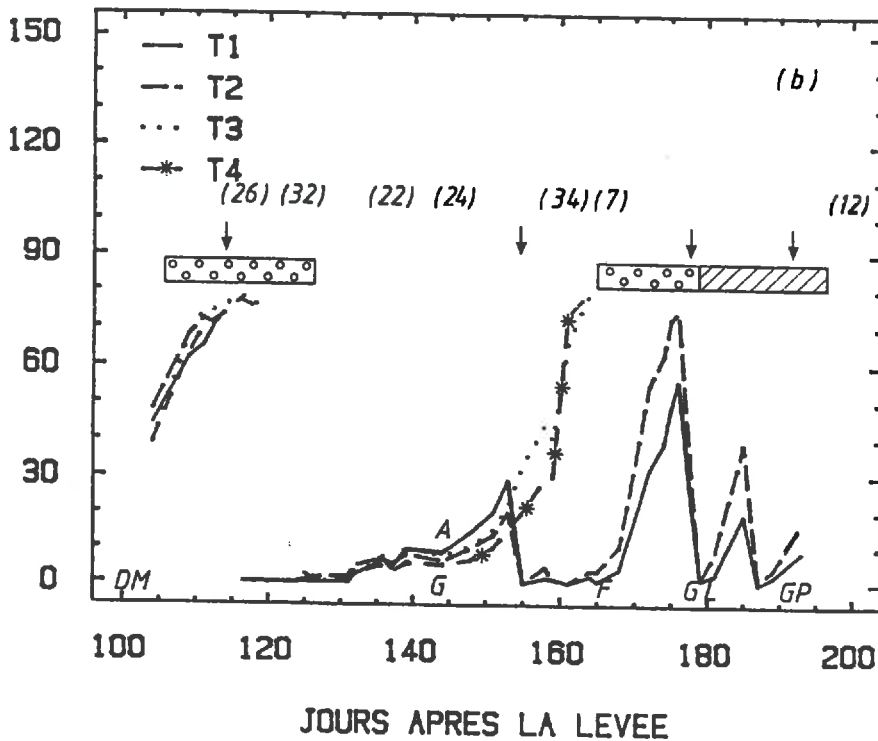


Figure III.2. Evolution de la tension de l'eau dans le sol, en centibars, pendant les années 1986/87 (a) et 1987/88 (b). Légende: G = Gonflement; F = Floraison; GL = Grain laitieux; GP = Grain pâteux; M = Maturation; (↓) = Irrigation T1 et T2; (×) = Irrigation T3 et T4; ○ ○ ○ ○ = stress hydrique modéré; / / / / = stress hydrique sévère; chiffres entre parenthèse = pluie.

3.2.2. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETp)

L'ETp a été calculé par l'équation de Penman en utilisant un programme disponible au STEFCE (Service Technique d'Etudes des Facteurs du Climatiques et de l'Environnement):

$$ETp = Rad + Adv \quad (III.12)$$

$$Rad = (\Delta \cdot Rn) / (\Delta + \gamma)$$

$$Adv = (\gamma \cdot Ea) / (\Delta + \gamma)$$

où Δ = pente de la courbe de tension de vapeur saturante
 γ = constante psychrométrique
 Rn = rayonnement net
 $Ea = (0,26 (1 + 0,54 U)) Ew$
 Ew = déficit de saturation

Les données d'entrée ont été les suivantes: températures (°C): minimale, maximale, du point de rosée; vitesse du vent ($m.s^{-1}$); rayonnement net ($mm.jour^{-1}$). Les températures et la vitesse du vent sont celles du niveau supérieur des stations micrométéorologiques décrites auparavant.

3.3. Résultats et discussion

3.3.1. Evolution de la tension de l'eau dans le sol

La figure III.2a illustre bien l'évolution de la tension de l'eau dans le sol, mesurée à partir des tensiomètres installés à 30 et 45cm de profondeur pour les deux traitements les plus contrastés (T1 et T4), lors de la campagne 1987/88.

Lorsque les tensiomètres ont été installés le 17 Avril (jour 147), le sol était déjà relativement sec malgré les 50mm de pluie tombés dans la première décade du mois. La tension est montée très vite pour les deux traitements, le seuil de 80 centibars (cb) étant atteint d'abord pour le traitement 1 qui avait un indice foliaire plus développé (IFV=2,6) puis pour le traitement 4 (IFV=1,7). La faible capacité de rétention de l'eau par le sol associée à une augmentation de la demande évapotranspirative (ETp) (Fig.II.3), semblent être les raisons les plus probables de ce dessèchement rapide du sol.

La première irrigation, faite le jour 158, a fait baisser la tension de l'eau pour T1, alors que le traitement non-irrigué (T4) subi une période de fort stress hydrique qui a été interrompue, temporairement, par l'irrigation faite le jour 174 et par la pluie de 33mm du jour 178. T4 a connu une deuxième période de stress hydrique entre les jours 193 et 205, alors que la tension du T1 est restée relativement faible en raison des irrigations appliquées tous les 8 jours.

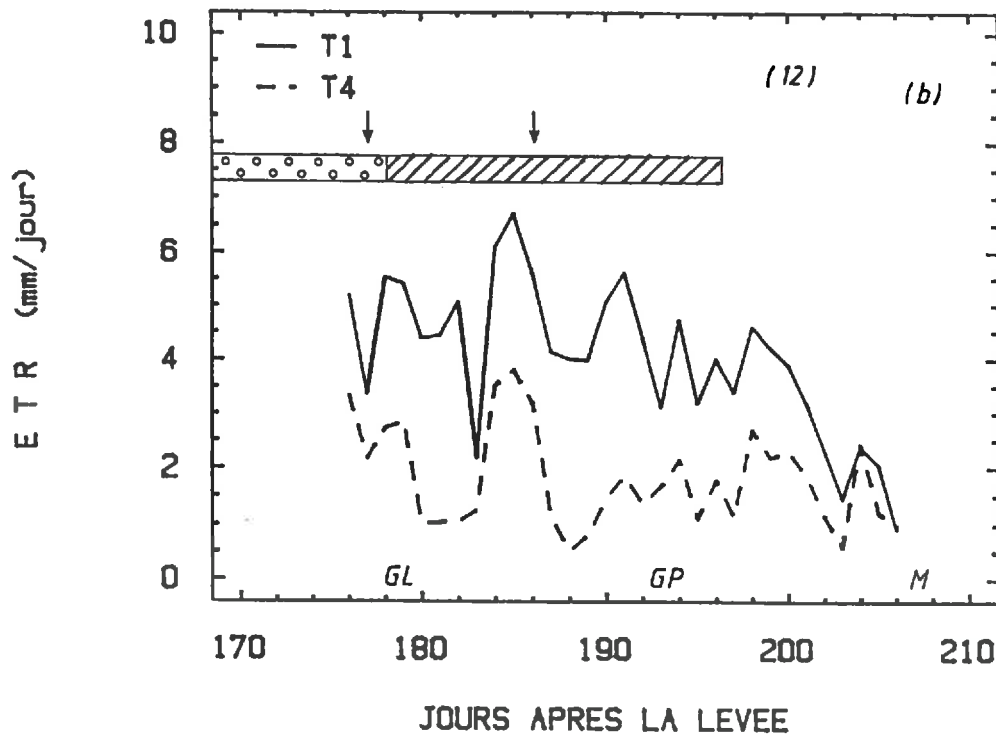
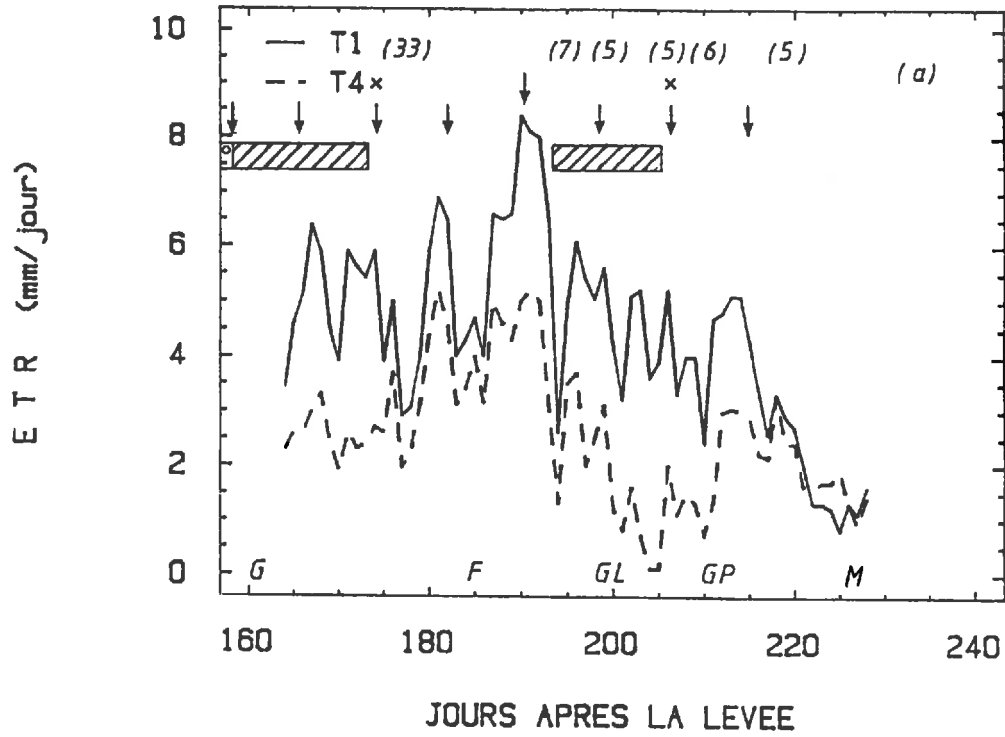


Figure III.3. Evolution de l'évapotranspiration réelle (ETr) journalière pendant la première (a) et la deuxième (b) année pour les traitements 1 et 4. Légende identique à celle de la Fig.III.2.

Les périodes de stress hydrique ont été caractérisées par la combinaison des données des tensiomètres (tension $>80C_b$) et par le rapport E_{Tr}/E_{Tp} ($<0,70$) quand ils étaient disponibles.

Les données de l'année 1987/88 (Fig.III.2b) montrent une situation similaire à celle de l'année précédente. La tension de l'eau est montée très vite après l'installation des tensiomètres le 17 Mars (jour 104), puisque le sol était relativement sec après d'une longue période sans pluie (seulement 10mm depuis le 29 Janvier) comme l'indique la figure II.3. L'irrigation faite le 27 Mars (jour 114) et les pluies abondantes qui sont tombées après le 30 Mars ont maintenu le sol bien humide jusqu'à mi-Mai, quand une période de stress hydrique a commencé pour les traitements non-irrigués (T3 et T4). Les chiffres entre parenthèse indiquent les pluies cumulées entre ces dates pour la deuxième année (Fig.III.2b. Ex.: 22mm sont tombées entre les jours 125 (32mm° et 137)). Les valeurs de la figure III.2a montrent les dates auxquelles les pluies sont tombées.

3.3.2. Evolution de l'évapotranspiration réelle (E_{Tr})

Les mesures de l' E_{Tr} montrent, comme l'on pouvait l'attendre, une consommation en eau plus élevée pour le traitement 1 dans les deux années de l'expérimentation. Les figures III.3a et 4a montrent les valeurs journalières et hebdomadaires d' E_{Tr} pour la première année. En général, l' E_{Tr} a varié entre 4 et 6 $mm.jour^{-1}$ pour T1 et entre 2 et 4 $mm.jour^{-1}$ pour T4. Pour T1, les valeurs plus élevées se situent entre les phases de gonflement et floraison, avec une nette diminution après la floraison. Pour T4, l'évolution de l' E_{Tr} a été fonction de la disponibilité d'eau. Ainsi, elle était très faible pendant les deux périodes de stress hydrique mais a montré une augmentation significative d' E_{Tr} après l'irrigation du jour 174 et de la pluie de 33mm du jour 178 (Fig.III.3 et 4).

Les valeurs plus élevées d' E_{Tr} ont coïncidé avec les périodes de vent fort (Mistral), comme pour les jours 167, 181, et 190 pour le T1. Pour ces trois jours, l' E_{Tr} était de 6,4, 6,9 et 8,4mm pour des vitesses de vent de 9,6, 7,4 et 5,7 $m.s^{-1}$, respectivement.

Au cours de la deuxième année, l'évolution de l' E_{Tr} a montré une situation similaire à celle de l'année précédente (Fig.III.3b et 4b). Cependant, l'écart entre les E_{Tr} de T1 et T4 a été plus accentué qu'en 1986/87, puisque T4 a été soumis au stress hydrique pendant toute la période de mesure et notamment à partir du jour 178.

L'évolution des valeurs cumulées de l' E_{Tp} et d' E_{Tr} des traitements 1 et 4 (Fig.III.5) montre que, pendant les deux années, l' E_{Tr} du T1 a été très proche de l' E_{Tp} durant la majeure partie de la période de mesure, alors que l' E_{Tr} du T4 lui est restée bien inférieure. Les valeurs cumulées dès le début des

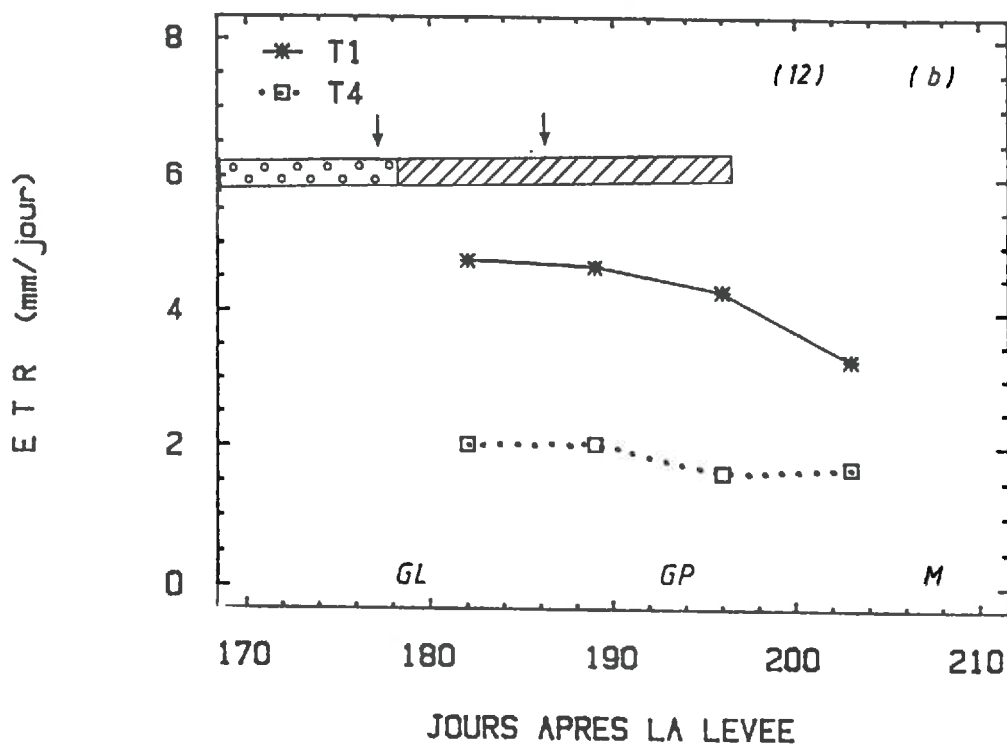
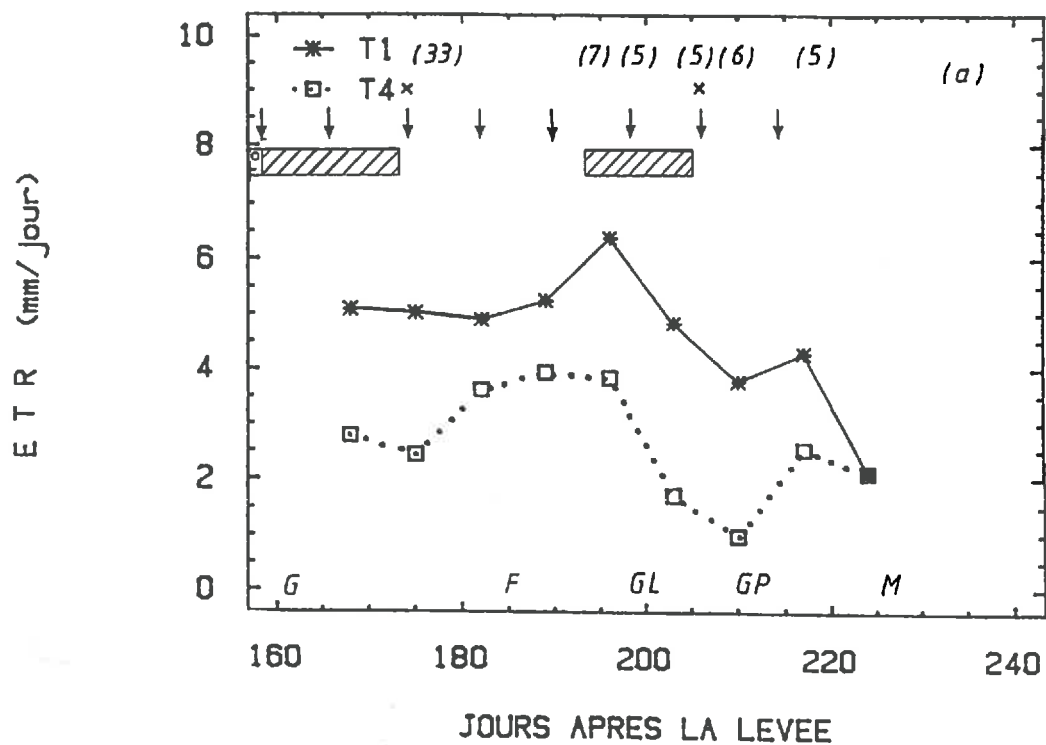


Figure III.4. Evolution de la moyenne hebdomadaire de l'évapotranspiration réelle (ETr) pendant les années 1986/87 (a) et 1987/88 (b) pour les traitements 1 et 4.

mesures jusqu'à la fin du palier hydrique (grains à le stade pâteux, GP) ont été les suivantes:

-1986/87: $ET_p = 258\text{mm}$; ET_r du T1 = 260mm; ET_r du T4 = 118mm.

-1987/88: $ET_p = 99\text{mm}$; ET_r du T1 = 84mm; ET_r du T4 = 35mm.

3.3.3. Evolution du rapport ET_r/ET_p

L'évolution du rapport ET_r/ET_p pendant les deux années de l'expérimentation, indique nettement l'influence de l'irrigation et de la phase phénologique de la culture (Fig.III.6 et 7). Les figures III.6a et 7a montrent que, lorsque l'alimentation en eau n'est pas limitante, le rapport ET_r/ET_p suit l'évolution de la sénescence de la culture. Ainsi, il est de l'ordre de 1 jusqu'au début du palier hydrique (jour 200), et présente une diminution progressive après cette phase.

Le traitement 4 met aussi en évidence l'effet en second lieu de la phase phénologique. Ainsi, le rapport ET_r/ET_p faible pendant la première période de stress hydrique a-t-il atteint ses valeurs maximales après l'irrigation du jour 174 et la pluie de 33mm du jour 178; il est minimale dans la deuxième période de stress hydrique. La deuxième irrigation (jour 206) a provoqué une récupération du rapport ET_r/ET_p du T4, qui semble être due plus à l'évaporation de l'eau du sol que de la transpiration des plantes puisque à cette époque l'indice foliaire était pratiquement nul comme l'indique la figure IV.1.

Pendant la deuxième année (Fig.III.6b et 7b), pour laquelle les mesures ont commencé à un stade phénologique plus avancé, l'évolution du rapport ET_r/ET_p a montré une tendance similaire à celle de la première année.

Le rapport ET_r/ET_p semble avoir été affecté par la vitesse du vent. Ainsi, en conditions de vent fort le rapport ET_r/ET_p apparaît inférieur aux valeurs obtenues en conditions similaires mais avec des vents faibles. Les données de la période 164 à 167 illustrent bien cette observation; le vent a en effet été très fort (jusqu'à $9,6 \text{ m.s}^{-1}$). Les valeurs d' ET_r/ET_p ont remonté dès l'arrêt du vent. Entre les jours 180 et 182 le Mistral a à nouveau provoqué une diminution du rapport ET_r/ET_p .

L'effet des vents forts sur ET_r/ET_p est aussi vérifié dans la deuxième année comme l'indique la figure III.6b. Ainsi, ET_r/ET_p a été plus faible pendant les jours de vent fort (jours 180 ($5,92 \text{ m.s}^{-1}$), 181 ($3,84 \text{ m.s}^{-1}$)) et plus forts lorsque le vent était plus faible (jour 178 avec $1,44 \text{ m.s}^{-1}$ et jour 183 avec $1,85 \text{ m.s}^{-1}$).

L'influence des vents forts sur le rapport ET_r/ET_p peut être due à des erreurs de mesure: soit une sous-estimation de l' ET_r mesurée par la méthode aérodynamique soit une surestimation de l' ET_p par l'équation de Penman. Il apparaît que la deuxième hypothèse est la plus probable puisque les coefficients de la fonction du

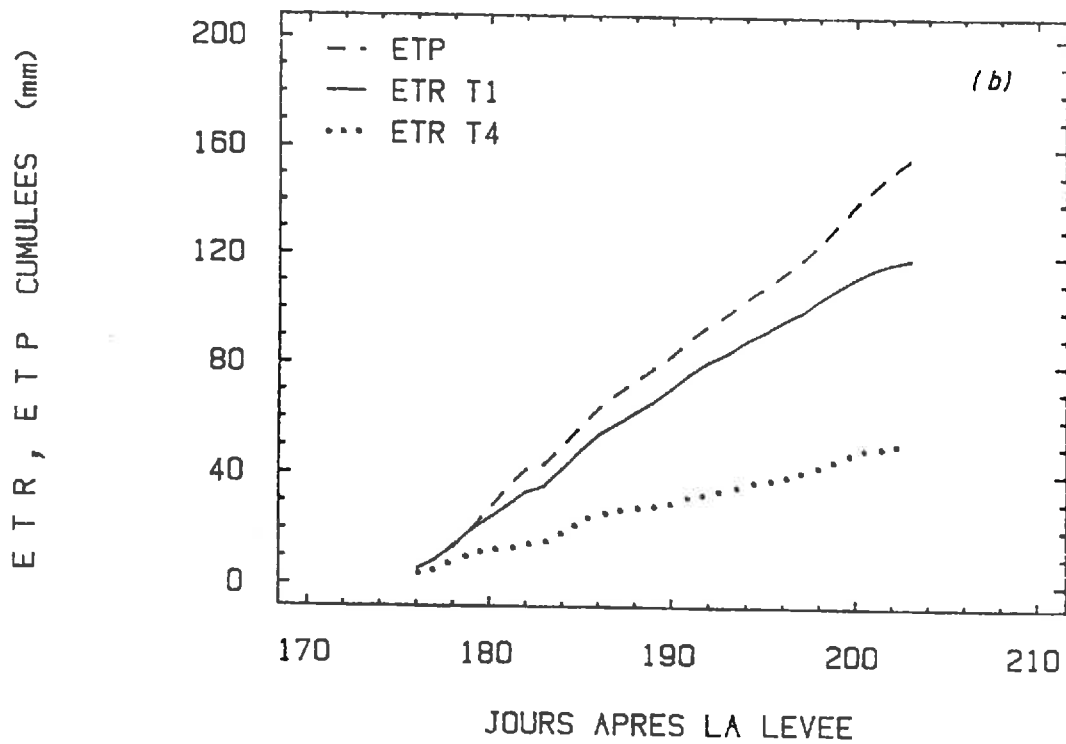
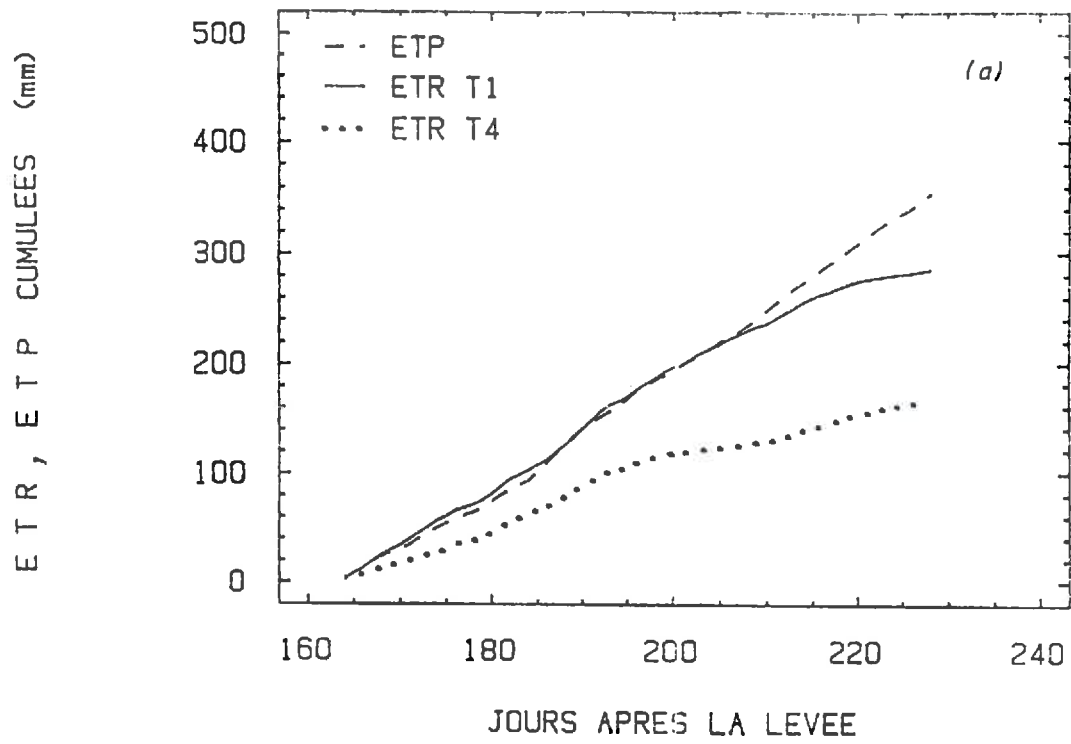


Figure III.5. Evolution des valeurs cumulées de l'évapotranspiration potentielle (ETp) et de l'évapotranspiration réelle des traitements 1 (ETr T1) et 4 (ETr T4) pendant les années 1986/87 (a) et 1987/88 (b).

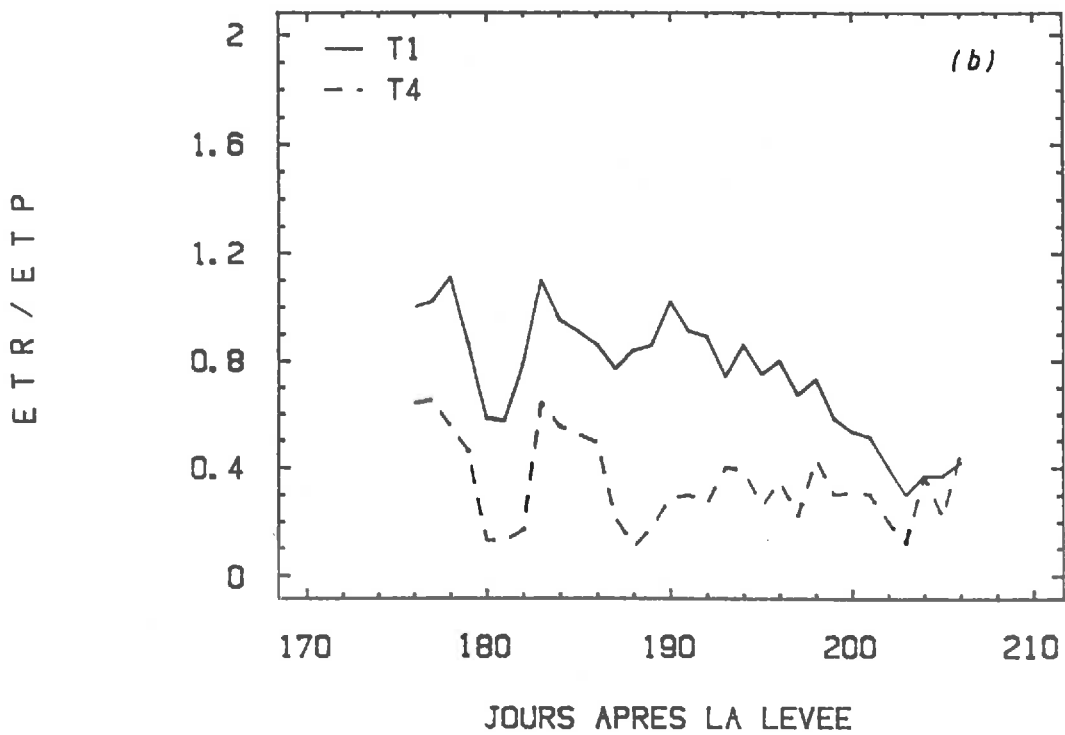
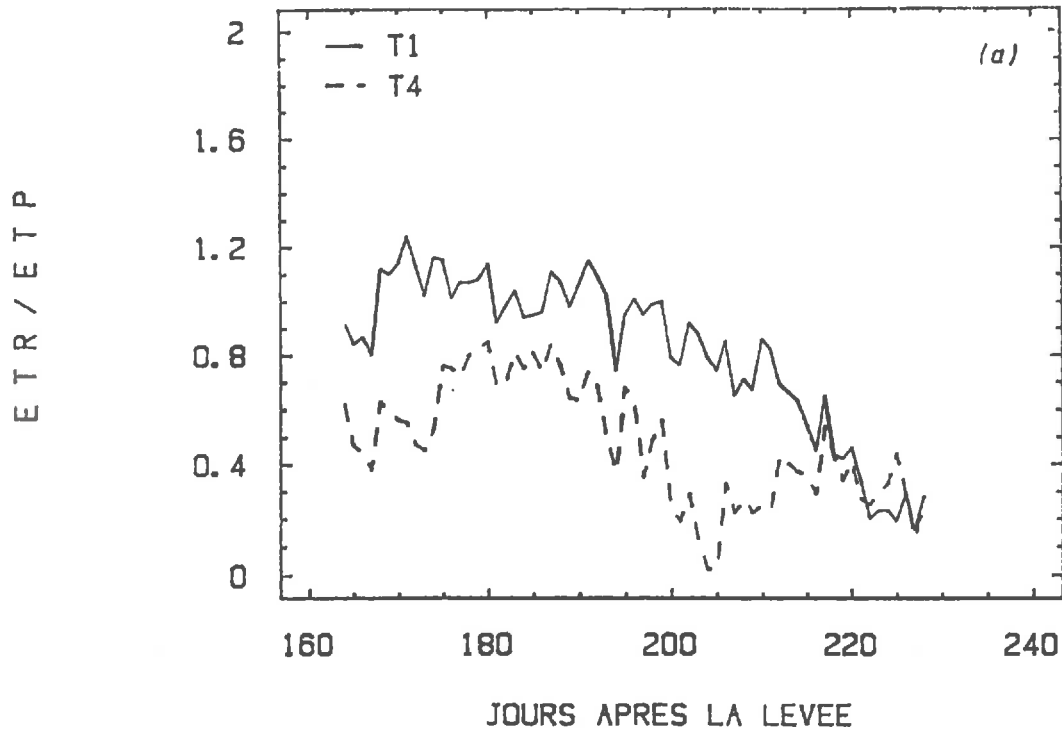


Figure III.6. Evolution journalière du rapport ETr/ETp pendant les années 1986/87 (a) et 1987/88 (b) pour les traitements 1 et 4.

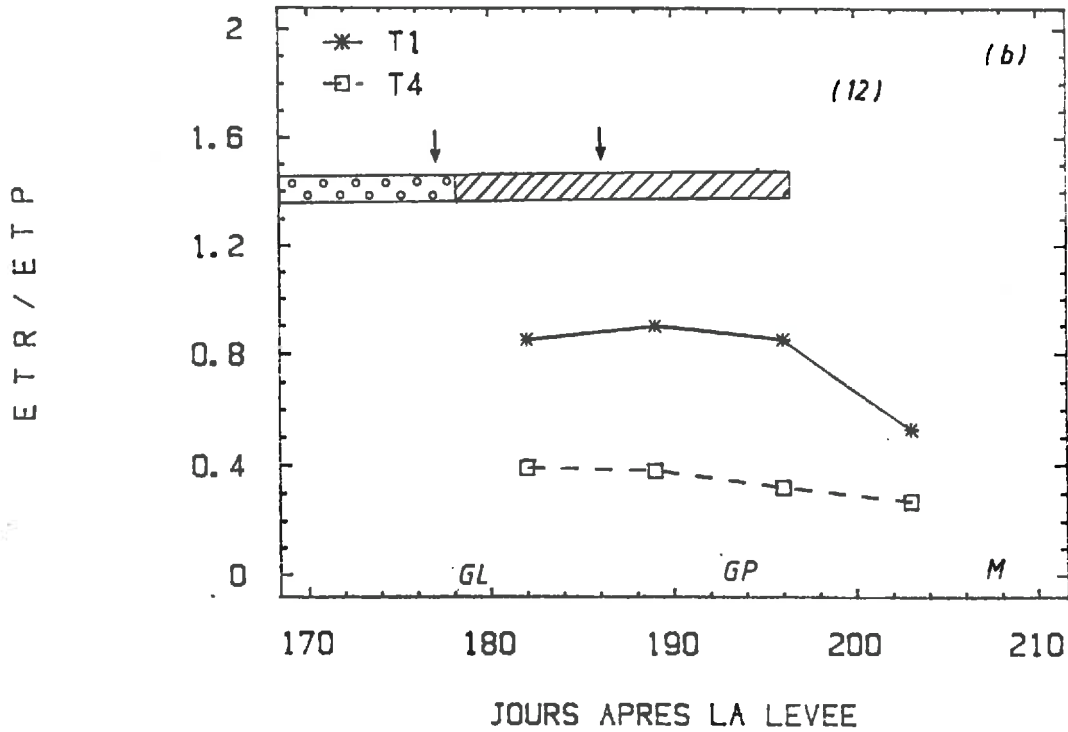
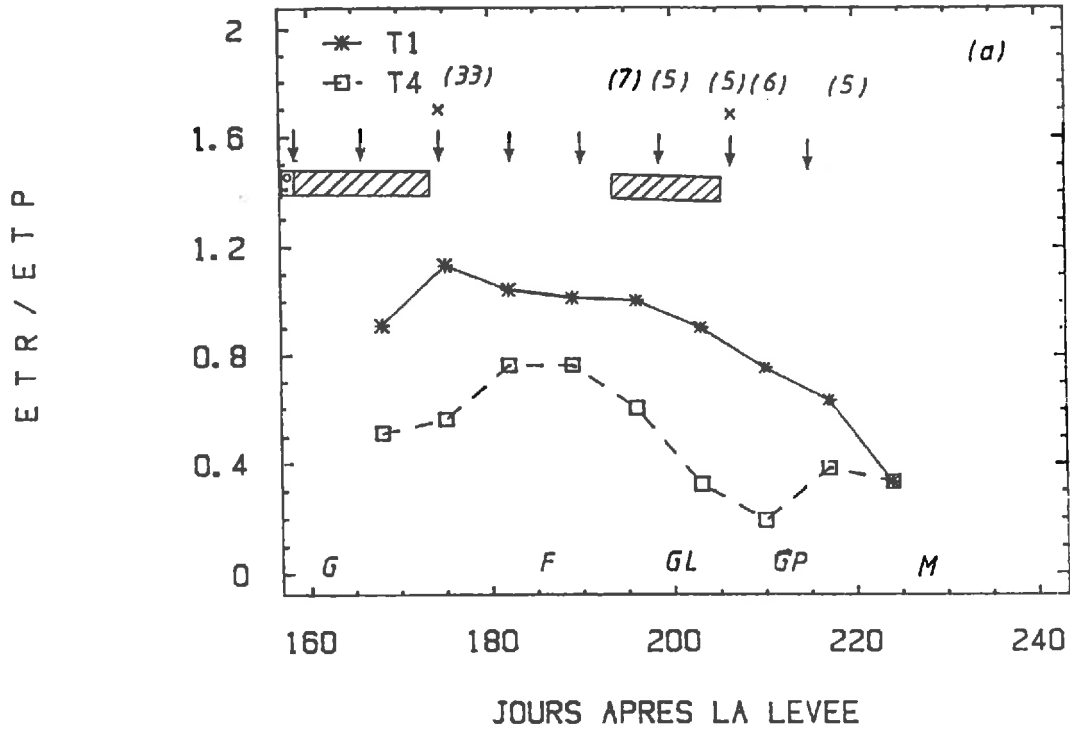


Figure III.7. Evolution hebdomadaire du rapport ET_r/ET_p pendant les années 1986/87 (a) et 1987/88 (b) pour les traitements 1 et 4.

vent n'ont pas été ajustés pour cette région très affectée par le Mistral. Ces ajustements sont importants pour avoir des estimations plus précises de l'ETp calculée par l'équation de Penman (Slatyer et McIlroy, 1961). Ils peuvent aussi traduire un effet physiologique, traduisant l'incapacité de la culture à s'adapter à une trop forte demande évaporative.

Les résultats, et notamment ceux du traitement 1 dans la première année (Fig.III.6a et 7a), montrent que le rapport E_{Tr}/ETp est supérieur à 1 dans la phase plus active de la plante. Ces données sont en accord avec la littérature, d'abord car l' E_{Tr} peut être supérieure à l'ETp dans des climats secs et affectés par des vents forts (Doorembos et Pruitt, 1977). Deuxièmement, il est normal d'avoir des coefficients culturaux (E_{Tr}/ETp) supérieurs à 1 quand l'évapotranspiration d'une culture bien irriguée (évapotranspiration maximale, ETm) est comparée à l'évapotranspiration d'une culture de référence différente comme le gazon dans le calcul de l'ETp par la méthode de Penman (Wright, 1985).

3.3.4. Evolution de la température de surface du blé

La figure III.8 montre que l'écart $T_s - T_a$ était en moyenne proche de zéro pour la parcelle irriguée (T1) et plus élevé (jusqu'à 8°C) sur la parcelle non-irriguée (T4). Ces données sont en accord avec les observations classiques: le manque d'eau provoque en effet une diminution de la transpiration et, par conséquent, une augmentation de la température des feuilles. Dans ce cas, les feuilles sont plus chaudes que l'air environnant et convertissent une partie plus importante du rayonnement net en flux de chaleur sensible (Jackson, 1982).

L'écart de $T_s - T_a$ était très fort (jusqu'à 8°C) entre les deux traitements à la fin de la première période de stress hydrique (jours 164 à 173) (Fig.III.8a). Cet écart est expliqué par le fait que les plantes du T1 présentaient un taux élevé d'évapotranspiration (jusqu'à 6,5 mm.jour⁻¹), alors que celles de la parcelle stressée étaient limitées à un taux d' E_{Tr} beaucoup plus faible (environ 2,5 mm.jour⁻¹) (Fig.III.3a).

L'irrigation faite le jour 174 et la pluie de 33mm du jour 178 a fait baisser l'écart de $T_s - T_a$ des deux traitements. Il a normalement augmenté à nouveau après cette date pour atteindre les valeurs plus élevées dans la deuxième période de stress hydrique, pour une E_{Tr} très faible (Fig.III.3a).

Une situation similaire a été observé au cours de la deuxième année (Fig.III.8b), l'écart $T_s - T_a$ étant plus important par suite d'un stress hydrique plus intense. Cette tendance a été confirmée par les mesures du radiothermomètre portable faites sur une période plus longue, pour les quatre traitements, comme l'indique la figure III.9. Ces données confirment l'écart entre les traitements avec différents niveaux d'irrigation, mais pas pour les traitements ayant reçu la même quantité d'eau (T3 et T4, par exemple). Le cumul de $T_s - T_a$ (Stress Degree Day) pour la deuxième année (Fig.III.10) caractérise bien cette situation, notamment pour les deux traitements affectés par le stress hydrique.

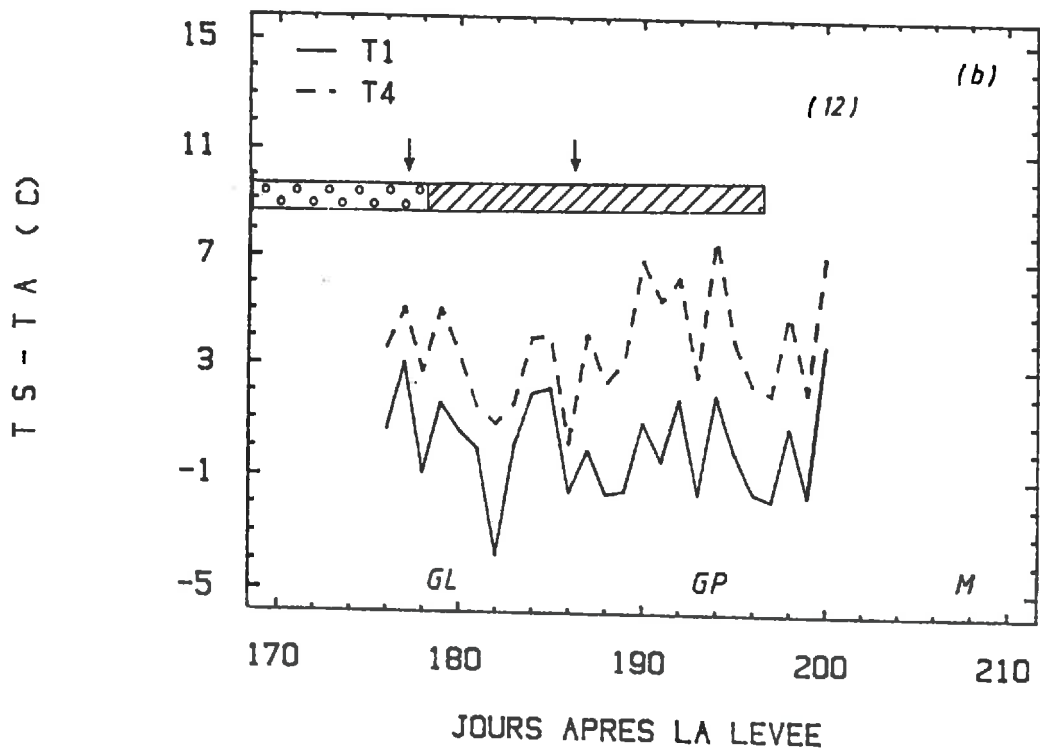
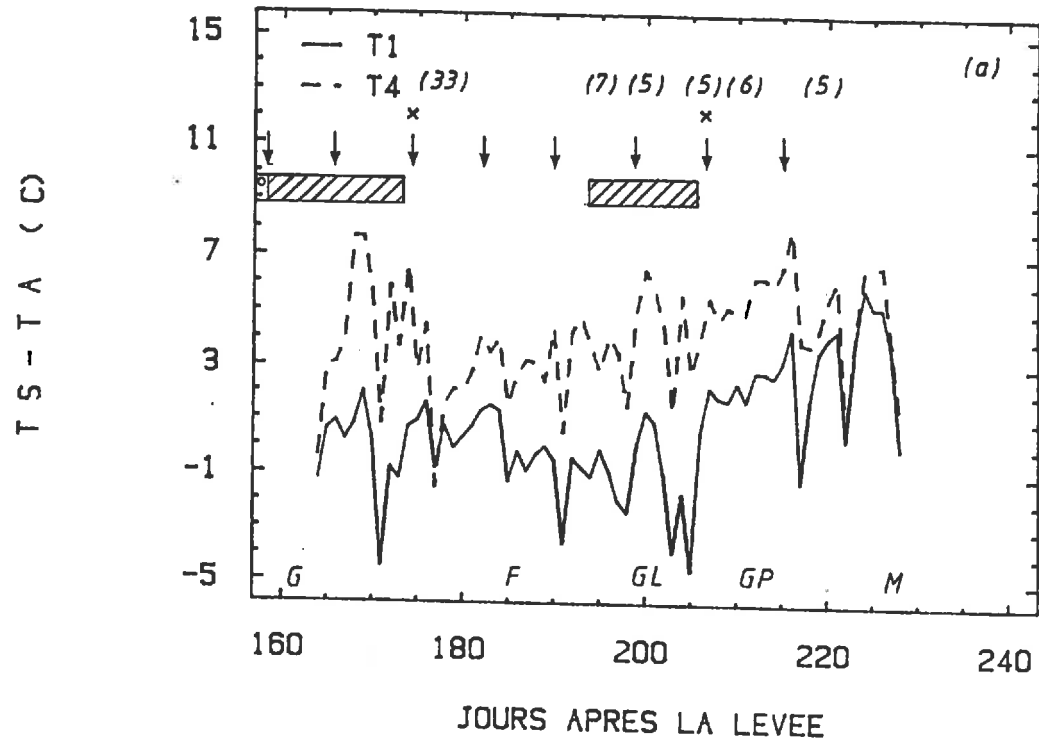


Figure III.8. Evolution journalière de l'écart $T_s - T_a$ pendant les années 1986/87 et 1987/88 pour les traitements 1 et 4.

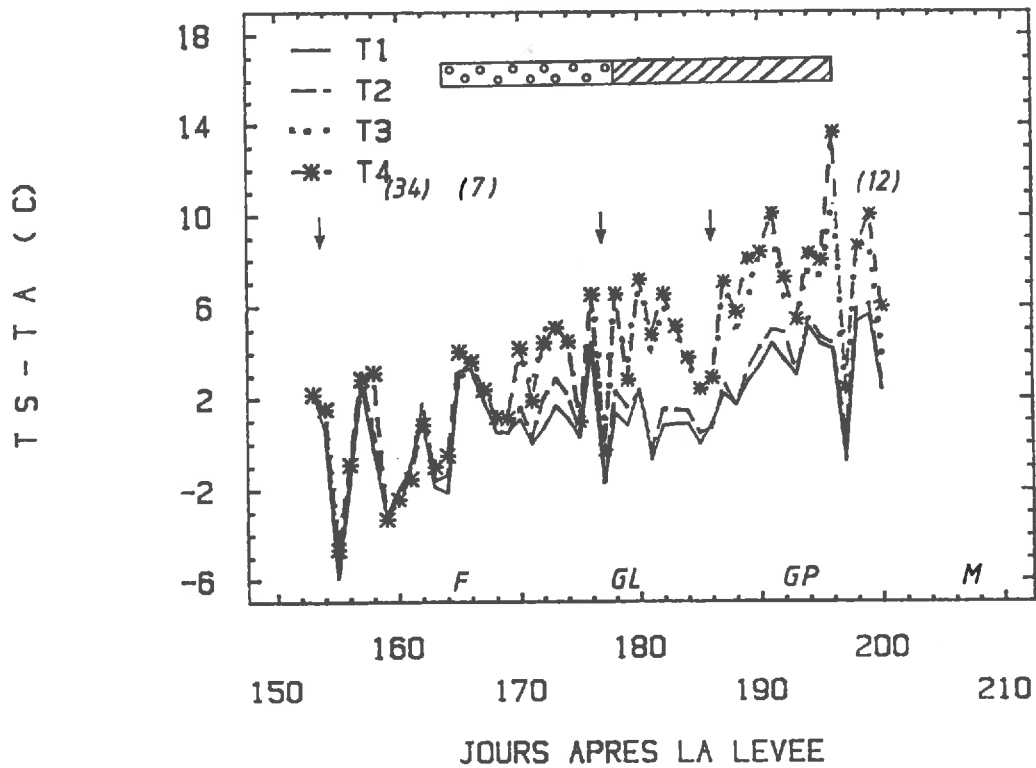


Figure III.9. Evolution journalière de l'écart $T_s - T_a$ mesuré avec le radiothermomètre portable (Pistolet) pendant l'année 1987/88 pour les quatre traitements. Légende identique à celle de la Fig.III.2.

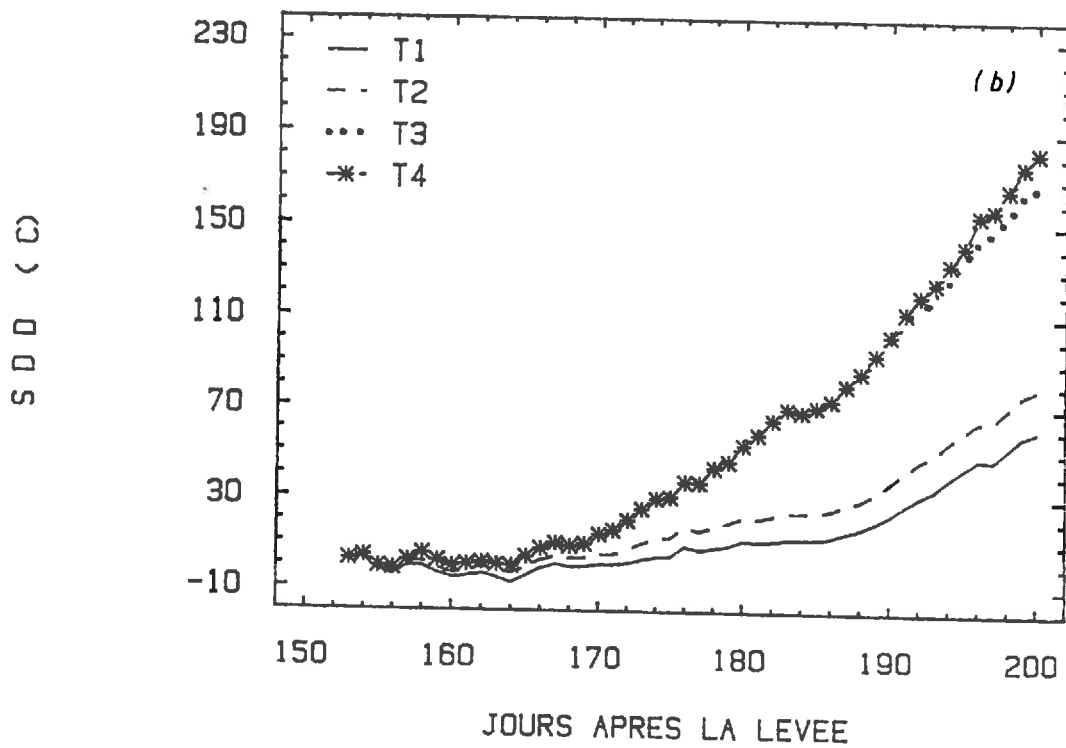
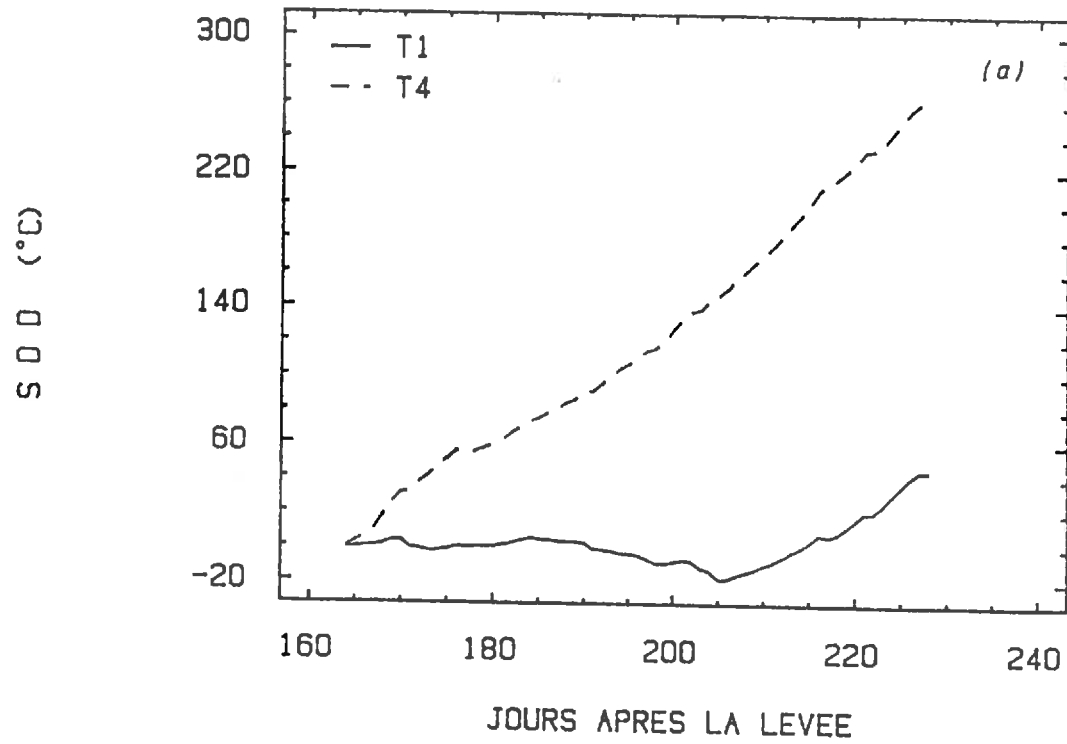


Figure III.10. Evolution des valeurs de $T_s - T_a$ cumulées pendant les années 1986/87 (a) et 1987/88 (b) pour deux et quatre traitements, respectivement.

La cause probable de températures plus élevées pour T2 par rapport à T1 (Fig.III.9 et 10) est que T2 a été moins affecté par la rouille (non détectée au niveau des mesures de l'indice foliaire et de la radiométrie). Cela aurait entraîné une demande transpiratoire plus élevée, qui ne serait pas complètement satisfaite en raison d'un léger manque d'eau dans le sol. La figure III.9 montre que l'écart de $T_s - T_a$ entre T1 et T2 a commencé à se manifester à partir du jour 170, date où la tension de l'eau dans le sol était plus élevée (proche de 80 cb) pour T2 que pour T1 (Fig.III.2b). Une situation similaire semble avoir eu lieu avant l'irrigation suivante (jour 186) mais avec un niveau de tension de l'eau dans le sol plus faible. Il est aussi possible que le sol, un peu plus sec pour le traitement 2, associé à un taux de couverture inférieur (environ 70% pour T2 et 90% pour T1) puisse avoir contribué à augmenter la température de T2 malgré l'angle oblique de visée qui minimise, en principe, l'effet du sol. Le taux de couverture du sol du T2 était, cependant, inférieur à la limite de 85%, à partir duquel l'influence du sol sur T_s devient presque nulle (Hatfield, 1979).

3.3.5. Estimation de l'évapotranspiration à partir de la température de surface.

Dans les sous-chapitres 3.3.2 et 3.3.4 nous avons caractérisé l'effet du stress hydrique du blé à partir des données d'évapotranspiration et de la température de surface. Nous présentons ici, l'estimation directe de l'ETr à partir de la température de surface.

La figure III.11 permet de confronter les données d'ETr et la température de surface, et de les comparer à la relation linéaire:

$$ETr_j - Rn_j = A + B (T_s - T_a) \quad (III.13)$$

La dispersion des données à l'échelle journalière observée sur la figure III.11a s'explique principalement par la variabilité, à cette échelle de temps, de la vitesse du vent.

La valeur de B trouvée dans cette étude (0,38) est supérieure à celle (0,25) obtenue en Crau sur prairie naturelle sèche. Ceci est dû à la rugosité plus importante du blé. Par contre, elle est inférieure à la valeur de 0,64 obtenue par Jackson et al. (1977) sur le blé cultivé dans une région de climat aride mais cette dernière a vraisemblablement été affectée par l'advection de chaleur sensible provenant de l'extérieur de la parcelle.

Pour éviter le problème de la forte dispersion de la relation simplifiée calculée sur une base journalière, il est recommandé de calculer ETr sur des périodes de plusieurs jours. Ainsi on peut écrire:

$$\sum ETr_j = \sum Rn_j + \sum A - B \sum (T_s - T_a) \quad (III.14)$$

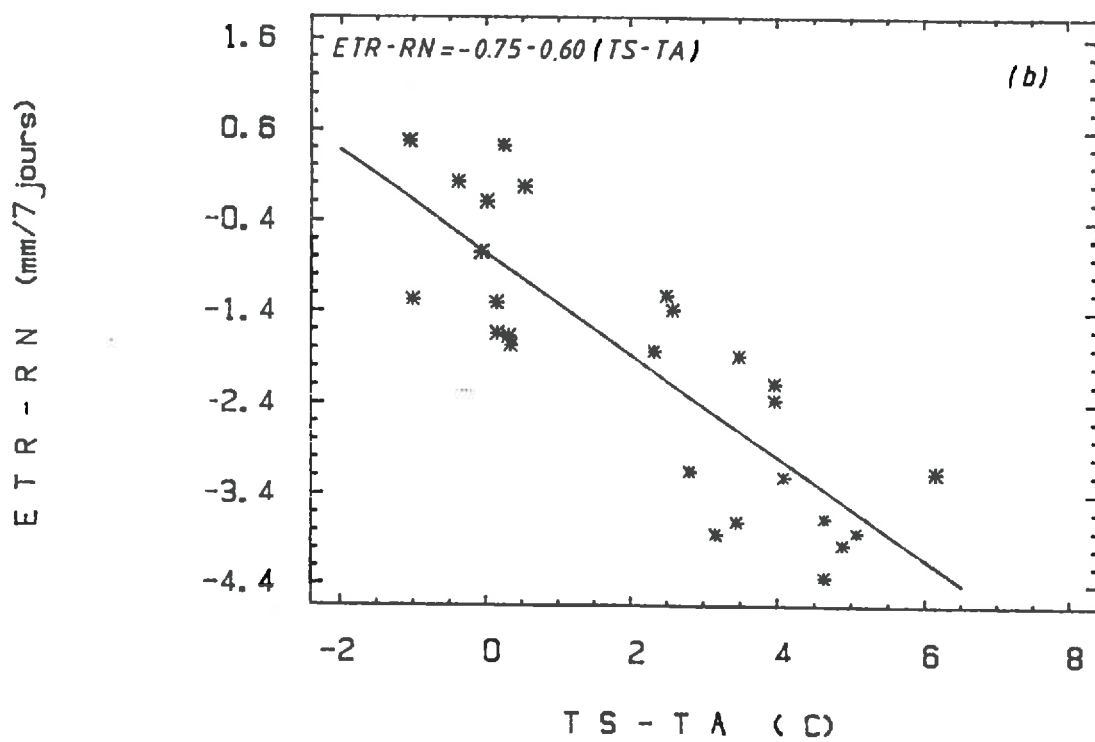
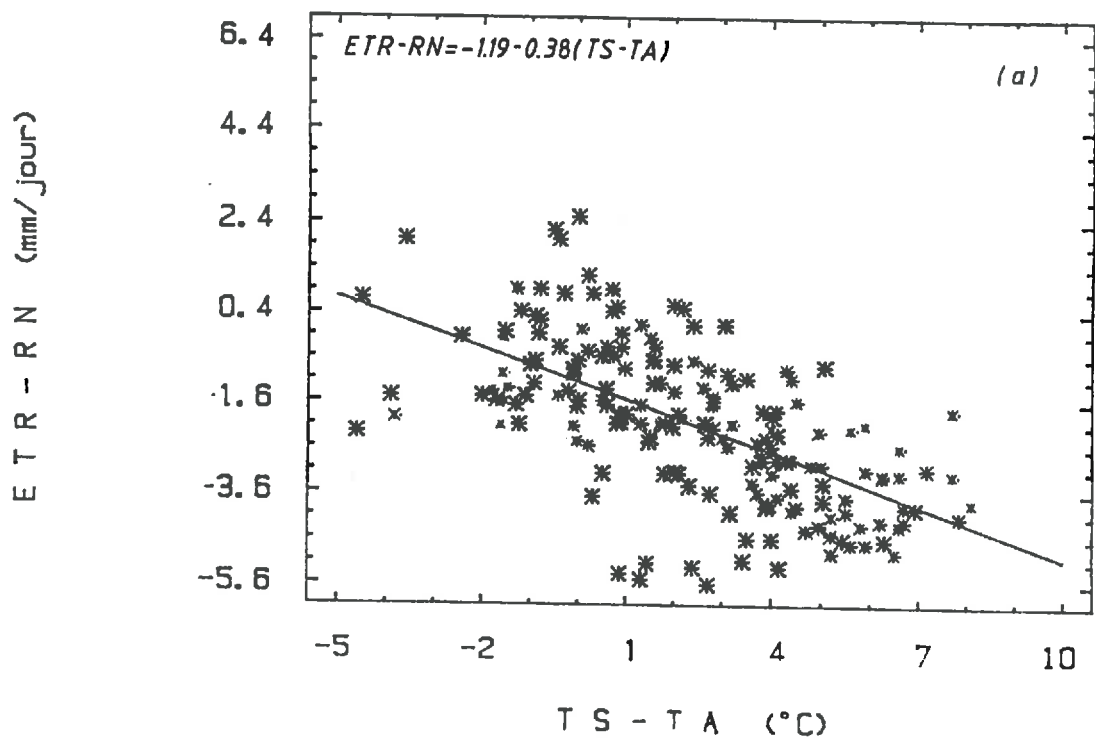


Figure III.11. Relation simplifiée obtenue avec les données journalières (a) et hebdomadaires (b) des deux années de mesure.

où se retrouve le concept du Stress Degree Day $SDD = \sum(T_s - T_a)$ proposé par Jackson et al.(1977). La figure III.1b indique une dispersion moins importante quand les valeurs concernées sont moyennées sur 7 jours.

Une deuxième façon d'améliorer la performance de cette méthode d'estimation d'ETr est de corriger les valeurs de A et B pour les effets de la rugosité et de la vitesse du vent (Lagouarde et Brunet, 1989). L'utilisation de ces corrections sur les données de 1986/87 a montré que l'ETr estimée par la relation simplifiée (périodes de 5 jours) était proche (16% d'erreur) de celle calculée par la méthode aérodynamique (Steinmetz et al., 1989).

La relation simplifiée peut être un outil intéressant pour l'estimation de l'ETr au niveau régional en utilisant la température de surface satellitaire comme l'indiquent les études de Seguin et al.(1982 :), Assad (1987), Vidal et al.(1987), Lagouarde et Brunet (1989). La majeure partie de ces études utilisent la température de surface à 14h00 TU (l'heure de passage du satellite NOAA-AVHRR) et la température maximale de l'air.

3.4. Conclusion

L'état hydrique de la culture a pu être caractérisé par les données de tension de l'eau dans le sol, d'évapotranspiration et de température de surface. Par rapport au traitement non-irrigué (T4), le traitement irrigué (T1) a montré des valeurs plus élevées d'évapotranspiration et du rapport ETr/ETp et des valeurs plus faibles de tension de l'eau dans le sol et de température de surface ($T_s - T_a$). Ces différences ont été plus marquantes quand le stress hydrique a été plus sévère.

Le rapport ETr/ETp a montré des valeurs proches de 1 pour le traitement irrigué (T1) et nettement au-dessous de cette valeur pour le traitement stressé (T4). L'influence des vents forts (Mistral) typiques de la région de la basse vallée du Rhône semble avoir provoqué une surestimation de l'évapotranspiration potentielle (ETp) vraisemblablement due au fait que les coefficients de la partie aérodynamique de l'équation de Penman n'ont pas été ajustés pour la région.

Les résultats présentés dans ce chapitre seront repris dans la suite pour mieux décrire la réaction de la culture au stress hydrique par le biais de l'indice foliaire, de l'efficacité d'interception du rayonnement solaire (ϵ_i) ou de l'efficacité avec laquelle l'énergie interceptée est transformée en biomasse (ϵ_b). L'évaluation de l'effet du stress hydrique sur ces différents paramètres sera présentée dans les chapitres IV et V, tandis que dans le chapitre VI on mettra en relation les paramètres indicateurs du stress hydrique et la production de biomasse et/ou ϵ_b .

CHAPITRE 4

CHAPITRE IV. ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE ET DU P.A.R. INTERCEPTÉ A PARTIR DE LA REFLECTANCE SPECTRALE.

4.1 Introduction

La production de matière sèche MS peut être décrite par le formalisme proposée par Monteith (1972)

$$MS = \int_t \epsilon_c \epsilon_i \epsilon_b R_g dt \quad (IV.1)$$

- où
- R_g = rayonnement solaire global incident
 - ε_c = proportion d'énergie photosynthétiquement active (P.A.R.) du rayonnement solaire global
 - ε_i = efficacité de l'interception du P.A.R. incident par le couvert végétal
 - ε_b = efficacité de conversion en matière sèche du P.A.R. intercepté par le couvert
 - t = période de temps.

Comme nous avons montré dans le sous-chapitre 1.1.2 de l'analyse bibliographique, le terme ε_i joue un rôle très important dans la production de biomasse d'une culture et qu'il dépend fondamentalement de l'indice foliaire et de la structure géométrique de la plante.

Plusieurs études ont montré que ε_i peut être estimé à partir de la réflectance spectrale de la culture exprimé sous la forme d'un indice de végétation (Kumar et Monteith, 1981; Hipps et al., 1983; Hatfield et al., 1984). Cette relation passant cependant par l'intermédiaire de l'indice foliaire. Dans le cadre de notre étude, les résultats seront présentés et discutés en deux parties. L'une montrera l'évolution des données radiométriques et des indices foliaires et la relation entre ces deux variables, tandis que la deuxième partie analysera la relation entre les données radiométriques et l'interception du rayonnement dans le domaine du P.A.R..

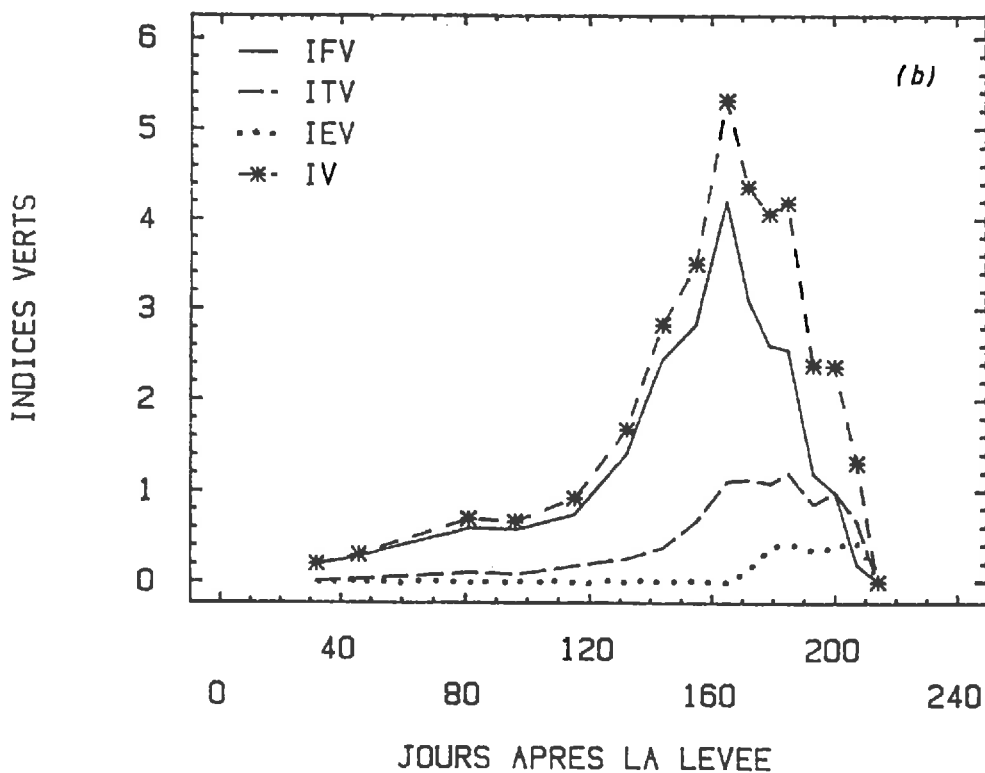
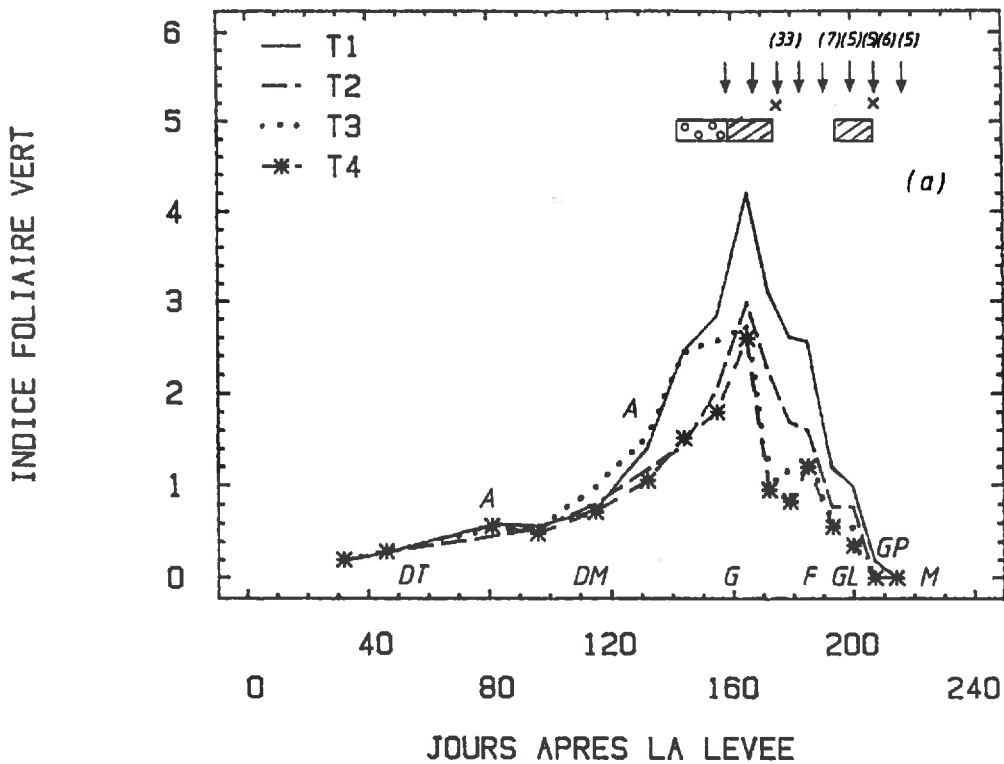


Figure IV.1. Evolution de l'indice foliaire vert (a) et de l'indice vert total (feuilles, tiges, épis) (b) pendant le cycle du blé dans la saison 1986/87. Légende: G=Gonflement; F=Floraison; GL=Grain laiteux; GP=Grain pâteux; M=Maturation; (∨)=Irrigation T1 et T2; (×)=Irrigation T3 et T4; □□□□=stress hydrique modéré; ▨▨▨▨= stress hydrique sévère; chiffres entre parenthèses = pluie.

4.2. Resultats et discussion

4.2.1. Estimation de l'indice foliaire à partir de la réflectance spectrale

4.2.1.1. Evolution des indices foliaires

L'évolution de l'indice foliaire vert (IFV) pendant le cycle du blé pour les deux années d'expérimentation est montrée dans les figures IV.1 et 2. La figure IV.1 montre que, dans la campagne de mesures de 1986/87, l'IFV est resté faible (inférieur à 1) pendant la phase initiale de la culture. Il est monté rapidement après le début montaison et a atteint le maximum (4,2 pour le traitement 1) entre la phase du gonflement et de l'épiaison.

L'effet des meilleures conditions de fertilisation et d'irrigation s'est manifesté sur le traitement 1 (T1) qui a montré les valeurs plus élevées d'indice foliaire pendant tout le cycle (Fig.IV.1a). Le traitement 3 (T3), qui a reçu la même dose d'azote que T1, a présenté des valeurs de IFV similaires à ceux du T1 jusqu'au début de la première période de déficit hydrique. Son taux de croissance a été réduit ensuite à partir du jour 144 après la levée (JAL).

La forte chute de l'IFV des traitements non-irrigués (T3 et T4) le jour 165 (Fig.IV.1a) est attribuée au stress hydrique, qui a été accentué par des vents très forts (de 6,3 à 9,6 m.s⁻¹) pendant 4 jours consécutifs. Le vent, qui est bien connu sous le nom de Mistral, a causé un dessèchement des bouts des feuilles, même dans les parcelles irriguées. Cela peut expliquer la chute brusque de l'IFV pour les traitements 1 et 2.

Il est important d'observer sur la figure IV. 1a que pendant la première période de stress hydrique (144 à 173) la réduction de l'indice foliaire du traitement 3 (de 2,4 à 1,0 soit -58%) a été beaucoup plus forte que celle du traitement 4 (de 1,5 à 1,0 soit -33%). Cette réduction de l'IFV pourrait être associée au mécanisme de régulation stomatique pour contrôler la transpiration, qui aurait affecté plus le traitement 3 qui avait un indice foliaire plus élevé. En effet, Bradford et Hsiao (1982) distinguent trois phénomènes liés à la réduction de la transpiration: réduction de la surface foliaire effective, réduction de l'absorption du rayonnement solaire par unité de surface foliaire effective et augmentation de la résistance pour le flux de vapeur d'eau dans la plante. La figure IV.1a suggère que le traitement 3 a eu une chute plus grande de sa surface foliaire effective et, par conséquent de la photosynthèse, parce que la transpiration a été réduite plus brusquement que celle du traitement 4. Celui-ci, en ayant un IFV moins développé, a eu une demande de transpiration inférieure à celle du T3 et, par conséquent, a pu continuer sa croissance jusqu'au jour 165 même étant soumis au stress hydrique. Si l'on considère les réductions de l'IFV à partir des niveaux maximum atteints (vers le jour 165) l'effet du stress hydrique a été similaire pour T3 et T4.

L'irrigation faite le jour 174, pour les quatre traitements et la pluie de 33 mm, qui est tombée le jour 178, a fait remonter un peu l'IFV du T3 et T4, qui a été à nouveau affecté par la deuxième période de stress hydrique de 193 à 205 JAL.

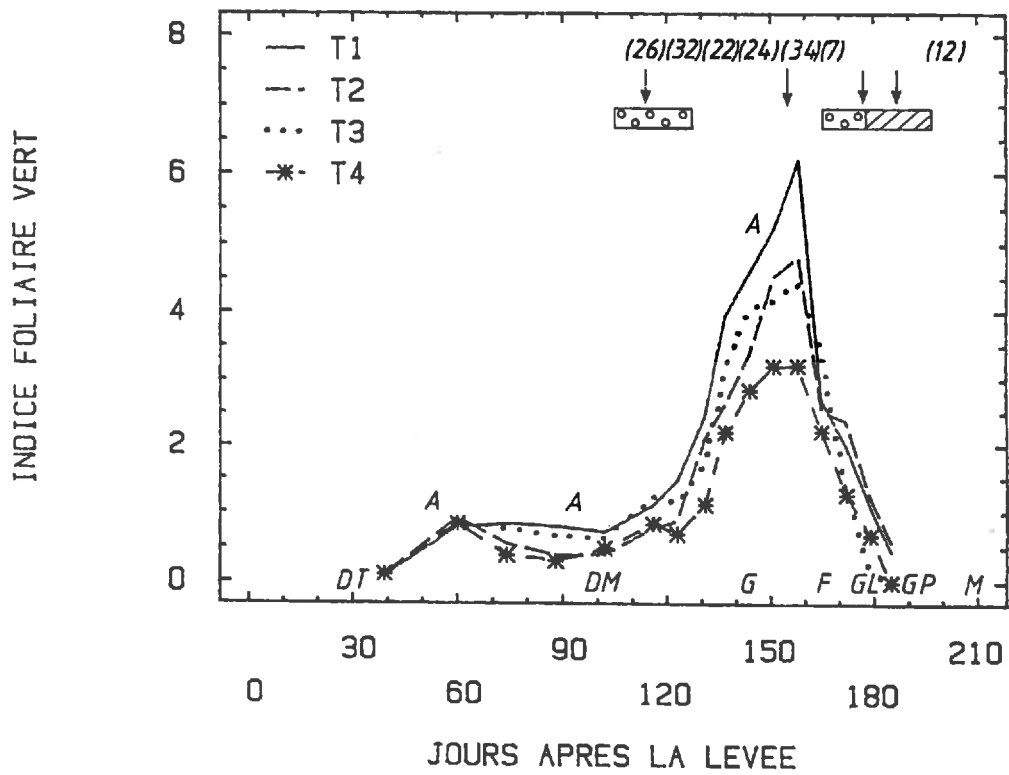


Figure IV.2 Evolution de l'indice foliaire vert pendant le cycle du blé dans la saison 1987/88. Légende identique à celle de la Fig.IV.1.

La figure IV.1b montre la participation des feuilles, des tiges et des épis dans l'indice vert total pour le traitement 1. Les feuilles ont la plus grande influence dans la formation de cet indice dans la majeure partie du cycle de la plante. Les tiges jouent un rôle plus important à partir du début de la montaison, alors que les épis ont une participation relative plus importante à la fin du cycle en raison de la sénescence des feuilles.

Malgré la disponibilité de l'indice vert total, nous avons décidé d'en utiliser que l'indice de feuilles vertes pour les raisons suivantes: 1) c'est le plus utilisé par la majorité des chercheurs dans le domaine de l'agronomie et de la physiologie végétale; 2) sa relative facilité d'obtention et 3) parce que les relations entre les mesures radiométriques et les indices foliaires n'ont pas été améliorées par l'inclusion des tiges et des épis.

L'évolution de l'indice foliaire pendant le cycle du blé dans la saison 1987/88 (Fig.IV.2) a montré une allure générale semblable à celle de la saison précédente, mais avec quelques particularités.

Les pluies abondantes dans la phase d'implantation de la culture (257 mm jusqu'au 31 Janvier (58 JAL)), en augmentant le lessivage de l'azote appliqué au semis, puis une période relativement sèche pendant les mois de Février et Mars (34 mm de pluies) ont contribué à de faibles valeurs de l'indice foliaire de la culture au début du cycle. Une augmentation plus accentuée de l'IFV a ensuite été observée après le début montaison (notamment, pour les traitements 1 et 2 après la 1^{ère} irrigation faite le jour 114). L'accroissement de l'IFV pour les traitements 3 et 4 semble avoir été affecté par le stress hydrique, particulièrement entre les jours 116 et 123. Malgré l'absence d'un stress hydrique important après cette date, jusqu'au jour 156, ils étaient (notamment pour T4) inférieurs à ceux des traitements irrigués (T1 et T2). Les indices foliaires plus élevés sont ceux du traitement 1 (maximum de 6,2) et, comme pour la saison précédente, ils ont été obtenus pendant la période entre le gonflement et l'épiaison.

La chute brusque de l'IFV pour tous les traitements (particulièrement pour le traitement 1) est attribuée à une attaque de rouille brune (*Puccinia graminis*). Cette maladie n'a pas été détectée dès son apparition ce qui a eu pour conséquence de retarder son contrôle. Les traitements non-irrigués ont été affectés, en plus, par le stress hydrique, qui s'est développé de la floraison jusqu'à la fin du palier hydrique (de 164 à 196 JAL).

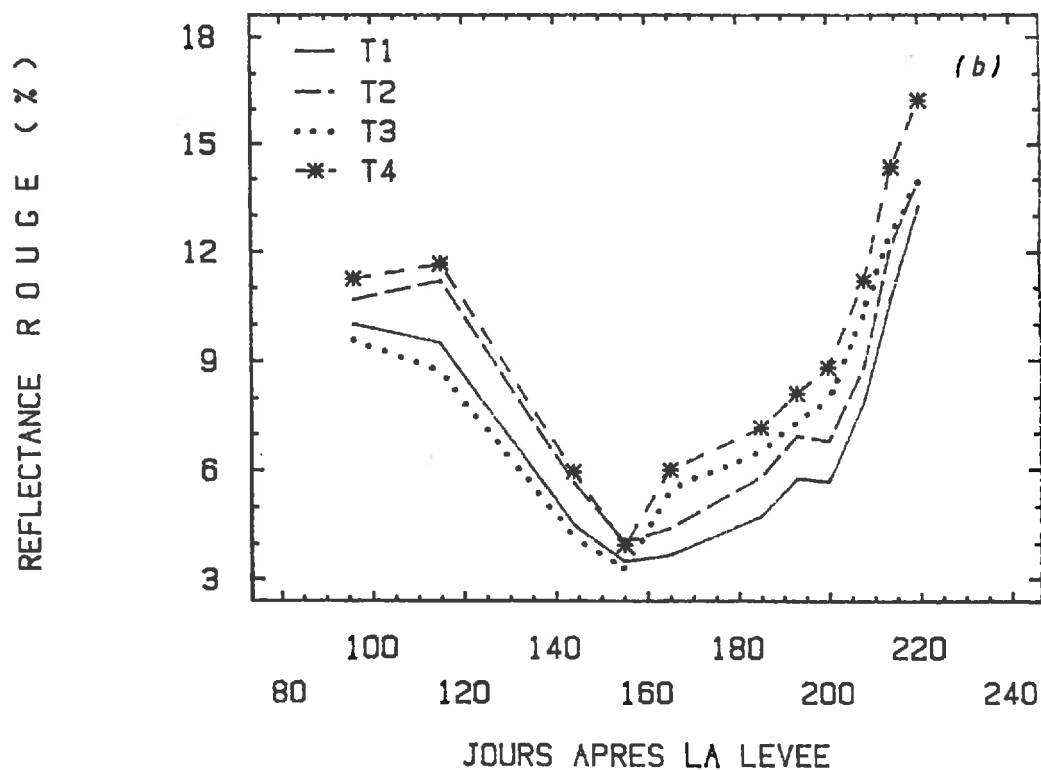
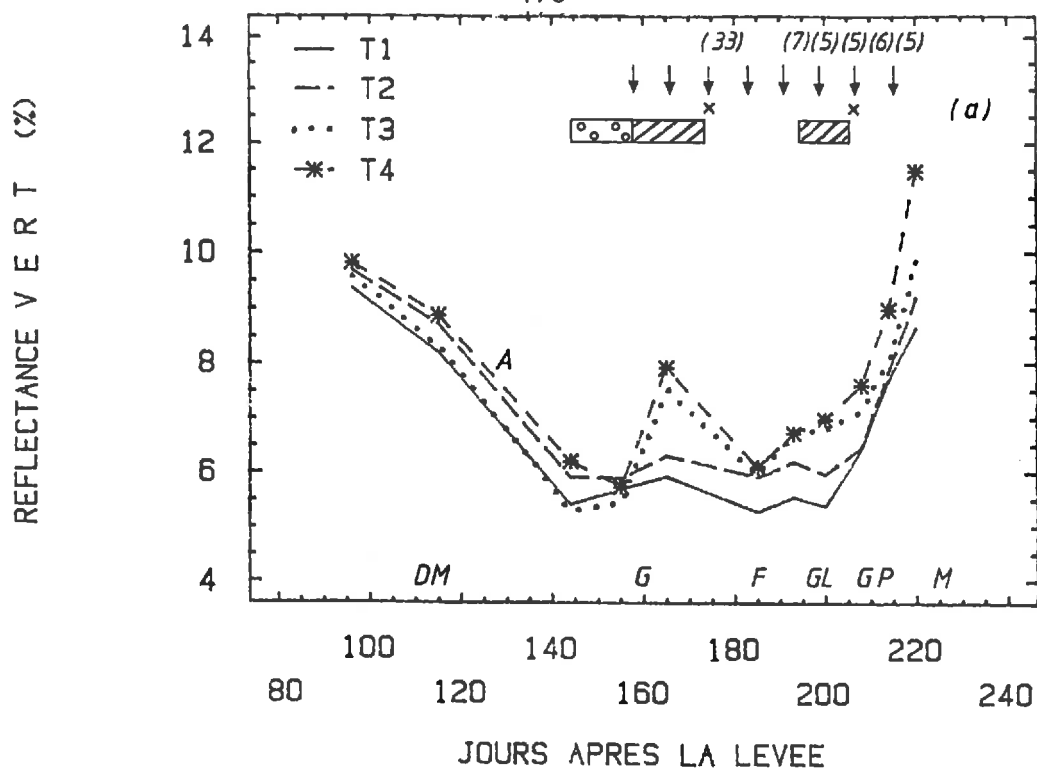


Figure IV.3. Evolution de la réflectance dans les domaines du vert (a), et du rouge (b) pendant le cycle du blé dans la saison 1986/87. Légende identique à celle de la Fig.IV.1.

4.2.1.2. Evolution de la réflectance dans les domaines du visible et du proche infrarouge.

Les données de réflectance dans les domaines du vert (500-590 nm), du rouge (610-680 nm) et du proche infrarouge (790-890 nm), pour les deux années, sont reportées dans les figures IV.3 à IV.6. Les réflectances du vert et du rouge sont élevées au début du cycle, atteignent un minimum quand la plante est au maximum de son développement foliaire et augmentent à nouveau dans la phase finale du cycle. Ceci est dû au fait que le rayonnement solaire est absorbé presque intégralement par les pigments foliaires (Gates et al., 1965; Gates, 1970; Guyot, 1989). Cependant, les données montrent qu'il y a eu une saturation de la réponse spectrale en fonction de l'augmentation de l'indice foliaire.

Les données de 1986/87 montrent que dans le domaine du vert (Fig.IV.3a) cette saturation a eu lieu vers le jour 144, quand l'indice foliaire des traitements 1 et 3 était d'environ 2,5. Dans le rouge (Fig.IV.3b), la saturation s'est établie vers le jour 155 avec un IFV maximum de 2,8 pour les traitements 1 et 3 et d'environ 1,5 pour les traitements 2 et 4.

Avant la première période de stress hydrique, les deux traitements avec les doses plus élevées d'azote (T1 et T3), en fonction de leur développement foliaire plus abondant, ont montré des niveaux de réflectances plus faibles par rapport aux traitements moins fertilisés (T2 et T4). Le stress hydrique qui s'est développé à partir du jour 144 a provoqué une diminution de l'indice foliaire vert des traitements 3 et 4, entraînant une augmentation de la réflectance dans le vert et le rouge.

La chute brusque de la réflectance dans le vert, notée le jour 185 pour les traitements 3 et 4 (Fig.IV.3a), semble être liée aux changements des propriétés optiques du couvert. Une explication possible réside dans l'apparition des épis dans l'intervalle de 17 jours entre les deux mesures. Au jour 165, la culture était entre les stades de fin gonflement et début épiaison, alors qu'au jour 185 elle était à 50% de la floraison. Néanmoins, il reste à comprendre pourquoi la diminution de la réflectance a été plus forte pour les traitements affectés par le stress hydrique. Il est possible que le redressement des feuilles et l'augmentation de l'indice foliaire (Fig.IV.1a) après l'irrigation du jour 174 et la pluie de 33mm du jour 178 soient les raisons de ce comportement.

L'évolution de la réflectance dans le domaine du PIR (Fig.IV.4) suit bien l'évolution de l'indice foliaire mais dans un sens contraire à la réflectance du rayonnement visible. Ainsi, elle était plus faible au début du cycle et a atteint son maximum quand l'indice était lui aussi plus développé. Ce comportement est dû au fait que dans ce domaine il n'y a pratiquement pas d'absorption du rayonnement incident ni par les pigments de la feuille ni par l'eau. C'est la structure du mésophylle et particulièrement la participation des vides d'air (Sinclair et al., 1973) et l'épaisseur de la feuille (Gausman, 1974) qui détermineront ses propriétés optiques dans ce domaine.

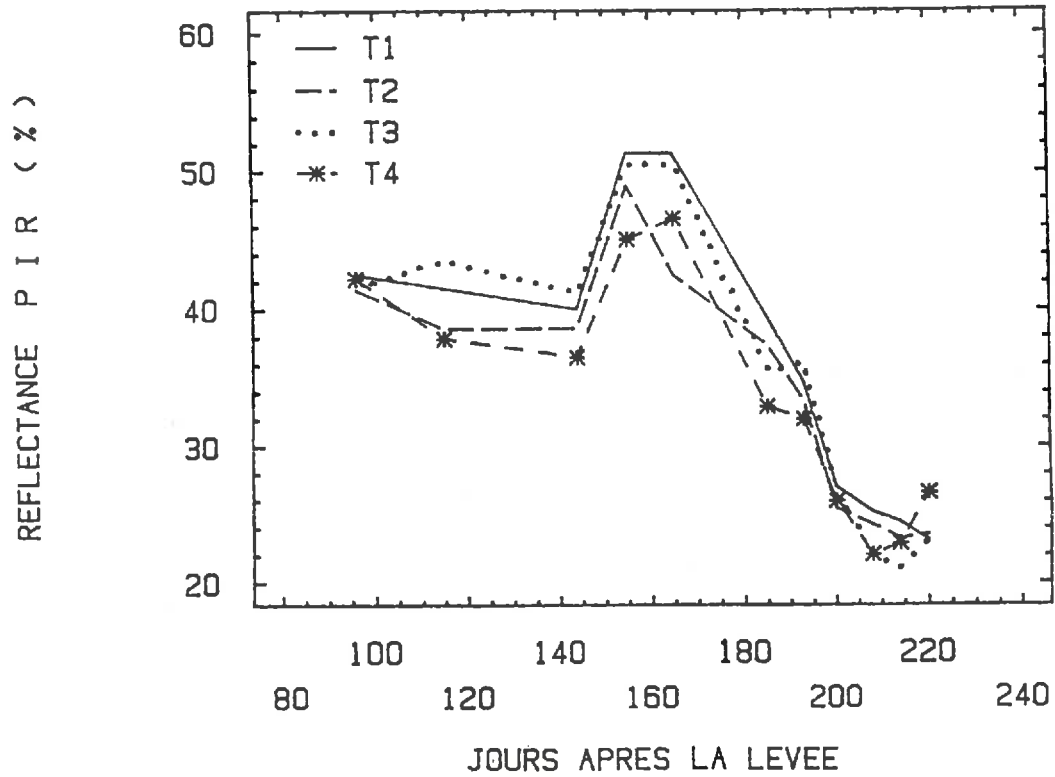


Figure IV.4. Evolution de la réflectance dans le proche infrarouge pendant le cycle du blé dans la saison 1986/87.

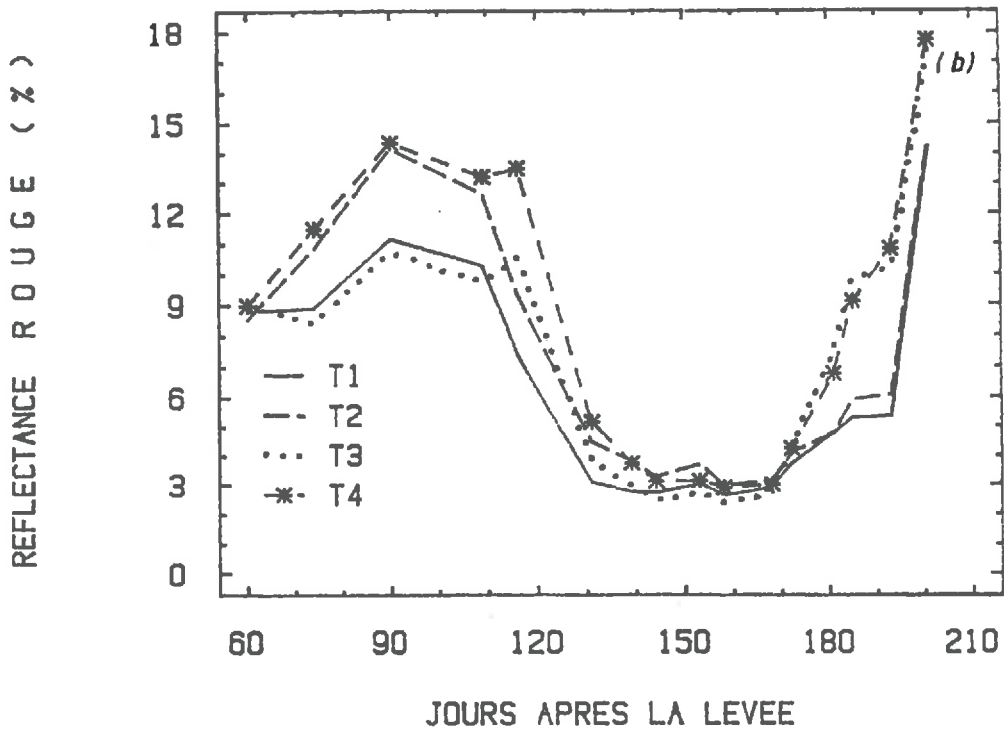
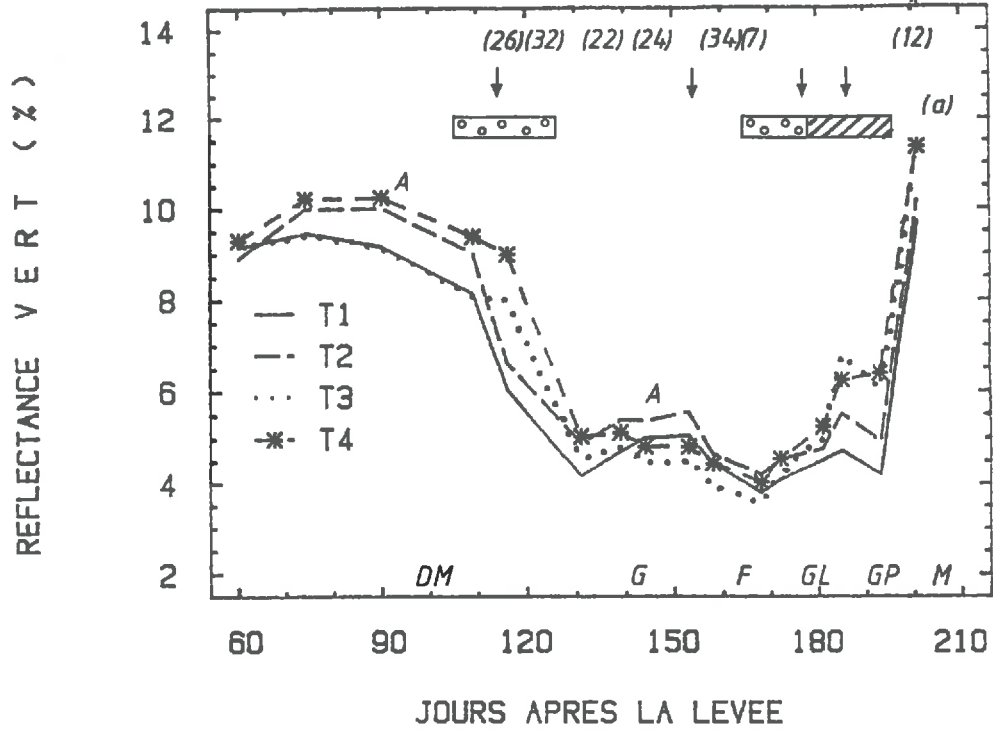


Figure IV.5. Evolution de la réflectance dans les domaines du vert (a) et du rouge (b) pendant le cycle du blé dans la saison 1986/87. Légende identique à celle de la Fig.IV.1.

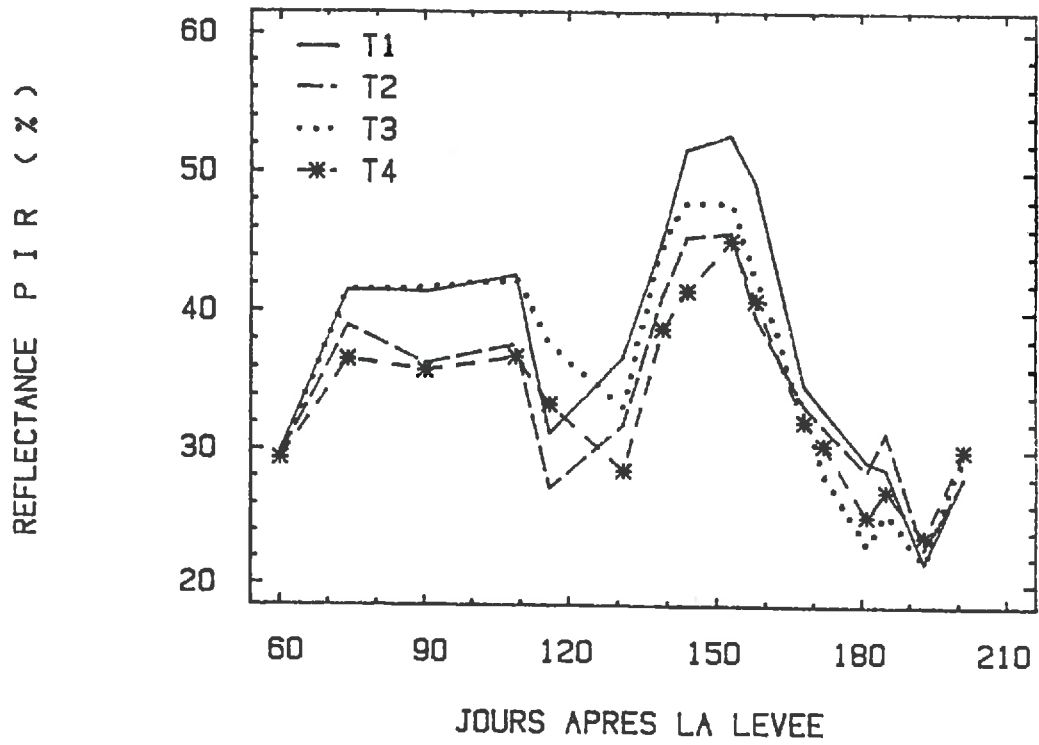


Figure IV.6. Evolution de la réflectance dans le proche infrarouge pendant le cycle du blé dans la saison 1987/88.

Les données réflectance de 1987/88 montrent un comportement similaire à celui de l'année précédente (Fig.IV.5 et 6). Cependant, comme les mesures ont commencé plus tôt dans la saison, elles montrent une allure un peu différente dans la phase d'implantation de la culture en fonction des faibles indices foliaires et, par conséquent, de l'influence du sol dans la réflectance mesurée par le radiomètre.

Au début du cycle, la réflectance dans le visible a été plus faible pour les traitements 1 et 3 qui ont reçu les doses plus élevées d'azote (Fig.IV.5a,b). Dans le proche infrarouge la situation s'est inversée puisque la réflectance a été plus forte pour les traitements 1 et 3 (Fig.IV.6).

Dans la phase phénologique proche de l'épiaison, les variations de la réflectance dans le domaine du vert (Fig.IV.5a) ont été de la même nature que celles de l'année précédente et semblent confirmer l'hypothèse liée aux modifications des propriétés optiques du couvert en fonction de l'évolution phénologique de la plante. On peut associer ces réponses à trois situations distinctes: on observe d'abord une saturation de la réponse spectrale avant la période du gonflement (jour 144), quand l'indice foliaire était aux environs de 2,5; ensuite et, notamment pour les deux traitements irrigués (T1 et T2), il y a une augmentation de la réflectance jusqu'au jour 151 qui correspond au début épiaison et, finalement, les réflectances décroissent jusqu'au jour 165 qui correspond au stade de 50% de la floraison. La réflectance dans le rouge présente des évolutions similaires à celles observées dans le vert, mais dans une moindre mesure.

Comme pour l'année précédente, la saturation dans le rouge a eu lieu quand l'indice foliaire était entre 2,5 et 3 (Fig.IV.5b) ce qui est d'accord avec des résultats trouvés par d'autres auteurs (Ahlrichs et Bauer, 1983; Hinzman et al., 1986 et Guyot, 1989). L'effet du stress hydrique a été bien caractérisé dans le domaine du rouge, puisque les valeurs de réflectance ont été plus élevées pour les traitements 3 et 4. Cela a été vérifié, soit dans la période de stress hydrique moins sévère au début du cycle (jour 116), soit dans le stress plus fort qui a commencé vers la floraison.

Dans le proche infrarouge, les réponses ont été aussi semblables à celles de l'année précédente, mais les mesures ont commencé plus tôt dans la saison et, par conséquent, ont été affectées par les propriétés optiques du sol au dessous de la culture. Les valeurs plus faibles de la réflectance pour la première date de mesures le 2 Février (jour 60) correspond à une situation dans laquelle le sol était relativement humide, à cause des pluies qui sont tombées avant la date des mesures (Fig.IV.6). Les niveaux de réflectances similaires pour les quatre traitements semblent être dus aux pluies abondantes (total de 257mm) qui sont tombées dans la phase initiale de la culture, entraînant le lessivage des 30 kg/ha d'azote appliqué au semis pour tous les traitements. Les deux apports d'azote, en doses différentes en fonction des traitements, faits les jours 54 et 94 après la levée, ont affecté différemment la réflectance spectrale comme le montrent les données des jours 74, 90 et 109 (Fig.IV.6).

Contrairement aux données des jours 74, 90 et 109, quand le sol était relativement sec, les mesures des jours 116 et 131 ont été faites quand le sol était plus

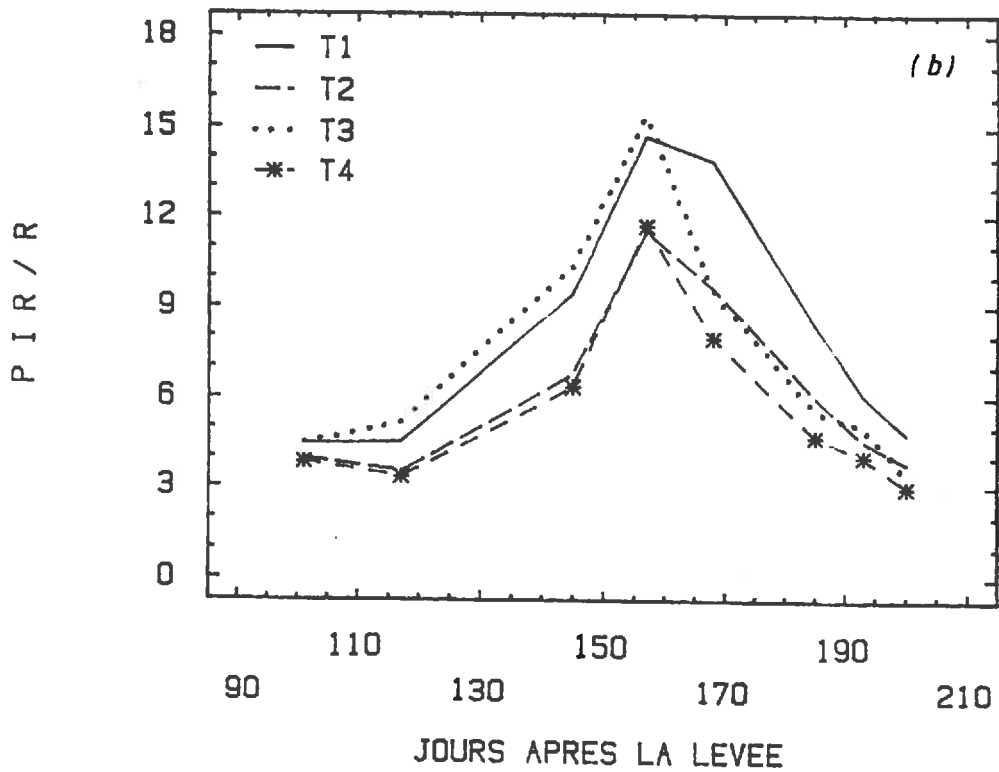
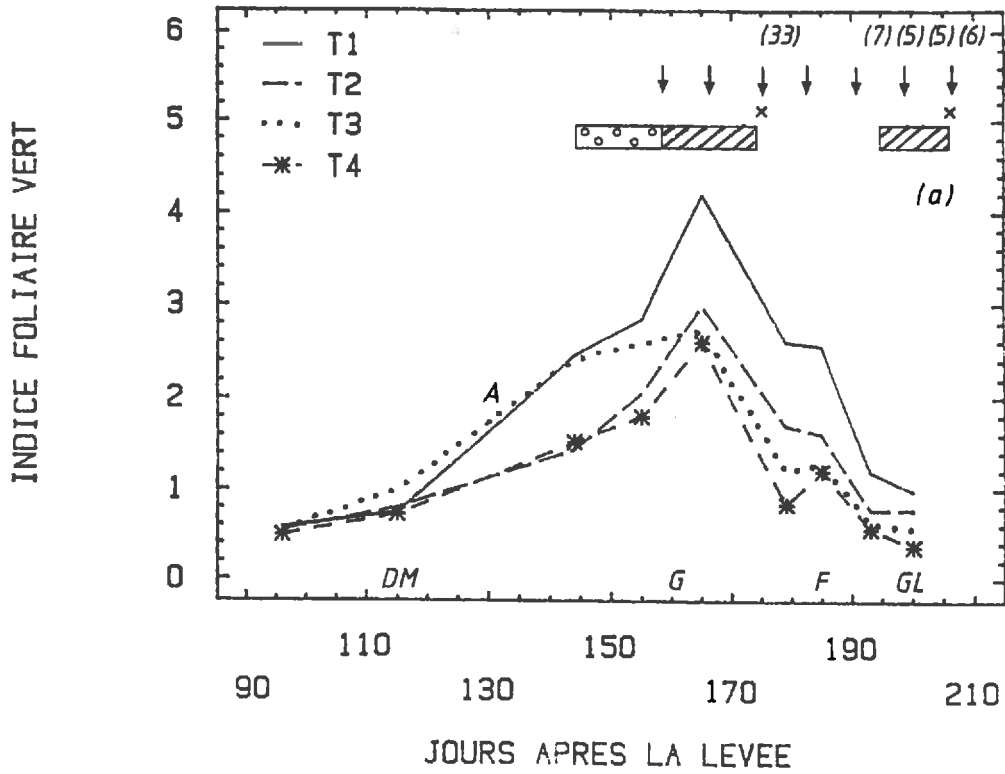


Figure IV.7. Evolution de l'indice foliaire vert (a) et du rapport PIR/R (b) pour la culture du blé dans la saison 1986/87. Légende identique à celle de la Fig.IV.1.

humide à cause de l'irrigation du jour 114, pour les traitements 1 et 2 et des pluies qui sont tombées avant la mesure du jour 131 (Fig.IV.6). Cependant, le jour 116, le sol était sec dans les parcelles des traitements 3 et 4 comme le montrent les données tensiométriques (Fig.III.2b). L'explication la plus probable de la diminution de la réflectance est liée aux modifications des propriétés optiques du couvert en fonction de l'effet du stress hydrique. Ces changements ont été aussi détectés dans le domaine du rouge (Fig.IV.5b) et sont confirmés par la diminution de l'indice foliaire prélevé une semaine après comme le montre la figure IV.2.

Dans le proche infrarouge, la réflectance maximale a été observée pour le traitement 1 le jour 153, quand l'indice foliaire était de 5,2 (Fig.IV.6). Cela indique le point de saturation de la réflectance aux indices foliaires, puisqu'elle n'a pas augmenté jusqu'au jour 158 quand l'indice foliaire maximum (6,2) a été atteint. Les points de saturation atteints pour les IFV proche de 5 en 1987/88 et de 3 pour l'année précédente sont parmi ceux indiqués dans la littérature qui montre une relation linéaire entre le PIR et l'IFV notamment quand les IFV sont faibles (< 3) (Ahlrichs et Bauer, 1983; Hinzman et al., 1986) mais qu'il y a une tendance à la saturation avec des IFV plus élevées.

4.2.1.3. Estimation de l'indice foliaire à partir du rapport PIR/R

Il existe plusieurs indices de végétation qui ont été développés afin de permettre une meilleure caractérisation spectrale de la végétation verte et pour diminuer l'influence des facteurs perturbateurs tels que les propriétés optiques du sol, l'angle solaire et la végétation sénescente.

Le rapport PIR/R et la différence normalisée sont des indices de végétation fonctionnellement équivalents (Perry et Lautenschlager, 1984) mais montrent, en général, des comportements différents par rapport aux indices foliaires. Le simple rapport est plus souvent utilisé dans les études concernées avec la fertilisation azotée ou l'irrigation (Jackson et al., 1980; Hatfield et al., 1983; Hinzman et al., 1986; Fagerlund, 1987). La raison principale de cette préférence pour le PIR/R semble être due au fait qu'il a une tendance à saturer moins vite que la différence normalisée (Hinzman et al., 1986).

Les figures IV.7 et 9 montrent l'évolution simultanée de l'indice foliaire et du rapport PIR/R pour les dates dans lesquelles les deux mesures ont été effectuées pendant les deux années de l'expérimentation.

Les données de 1986/87 indiquent que l'évolution du rapport PIR/R, d'une façon générale, caractérise bien l'effet des différentes conditions de fertilisation azotée et du stress hydrique. Les traitements qui ont reçu plus d'azote (T1 et T3) correspondent à de valeurs plus élevées du PIR/R que les traitements avec moins d'azote (T2 et T4). La présence d'un déficit hydrique dans la période de 144 à 173 jours

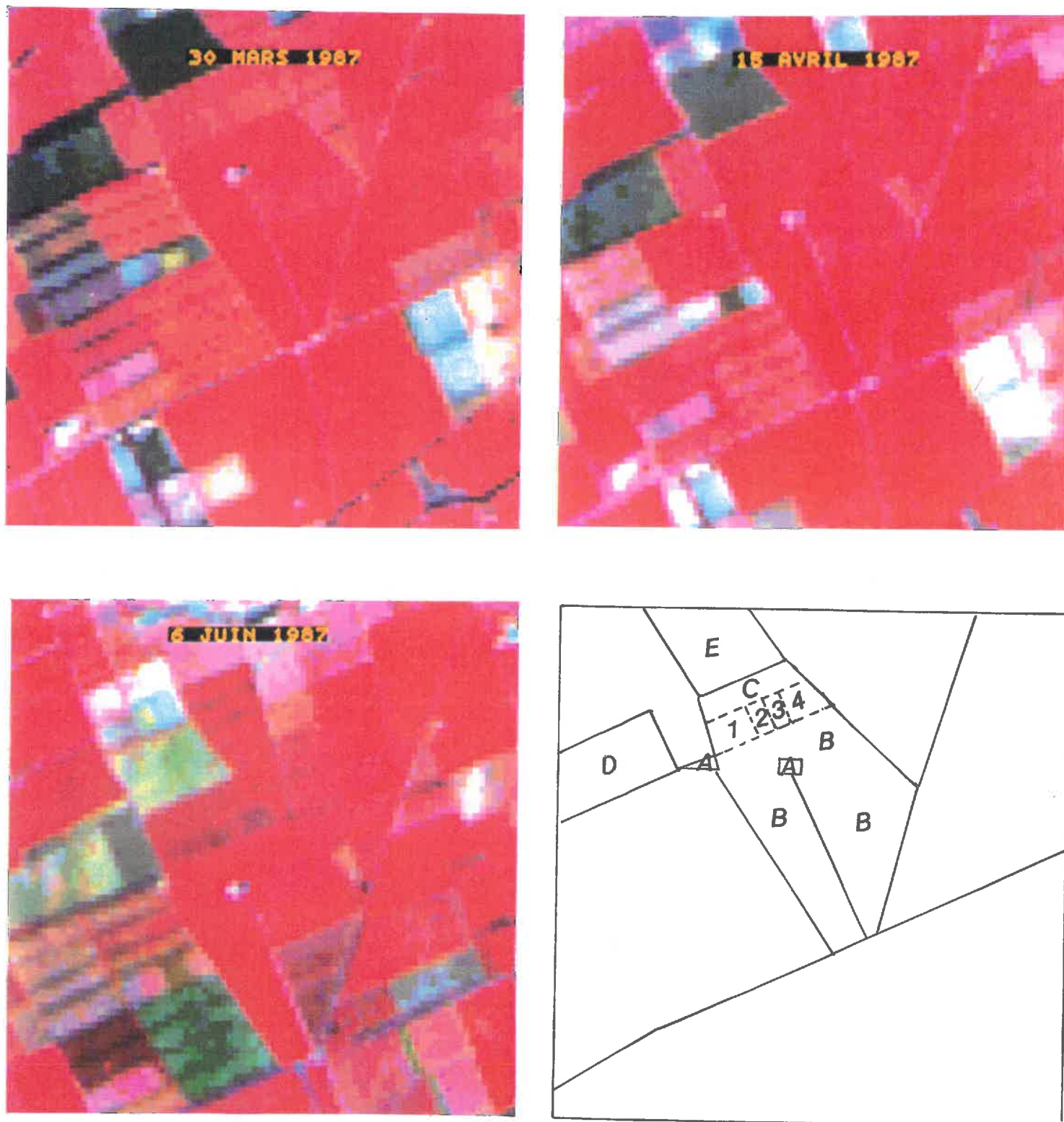


Figure IV.8. Compositions colorées des images SPOT du 30/03, 15/04 et 06/06/1987. On a figuré sur le schéma la parcelle expérimentale en pointillés; 1, 2, 3, 4 représentent respectivement les traitements 1, 2, 3 et 4. La légende de l'occupation du sol est la suivante : A = mas; B = prairie; C = blé; D = verger; E = tournesol.

après la levée a provoqué une baisse du PIR/R dans les traitements 3 et 4, mais avec une chute plus accentuée pour le traitement 3 après le jour 157.

En analysant l'évolution des courbes de l'indice foliaire et du rapport PIR/R, l'impression de similitude entre les deux courbes est moins nette pendant la phase d'indice foliaire élevé que pendant le reste du cycle. Le maximum du PIR/R est observé le jour 157, alors que le maximum de l'indice foliaire a eu lieu le jour 165. L'explication de cette observation est que, pour les deux dates en question (155 et 165), les mesures radiométriques ont été faites, respectivement, 2 et 3 jours en retard par rapport aux prélèvements des indices foliaires. Cela explique la petite différence entre le PIR/R du traitement 1 pour ces deux dates puisque les mesures ont été faites quand l'indice foliaire était proche de 3,2.

La chute du PIR/R pour le traitement 3 le jour 168 peut, elle aussi, être expliquée: à cette date, l'indice foliaire, sérieusement affecté par le stress hydrique, était de l'ordre de 1,8. Par contre, il est difficile de comprendre la raison pour laquelle le PIR/R du traitement 3 le jour 157 était un peu plus élevé que celui du traitement 1, lorsque l'indice foliaire du traitement 1 était plus élevé que celui du traitement 3 (Fig.IV.7a).

L'efficacité des mesures de réflectance pour caractériser la récupération de l'indice foliaire, notamment des traitements 3 et 4, après l'irrigation du jour 174 n'a pas pu être vérifiée, les mesures n'ayant pu être faites à cause du temps couvert.

La figure IV.8 montre le site expérimental vu à trois dates différentes par le satellite SPOT. Il s'agit de compositions colorées où les canaux du visible sont codés en vert et bleu et le canal proche infrarouge en rouge. Elles caractérisent bien les quatre traitements montrés dans le schéma expérimental (Fig. II.4). La différenciation des traitements sur les images du 30 Mars (129 jours après la levée) et du 15 Avril semble être due notamment à la fertilisation azotée. Pour ces deux dates le rapport PIR/R était plus élevé pour les traitements avec les doses plus élevées d'azote (traitements 1 et 3) par rapport aux traitements moins fertilisés (T2 et T4) comme l'indique les données de la figure IV.7. Le 6 Juin la culture était déjà en phase de sénescence (157 JAL, stade de grain laiteux); les différences de réflectance entre les traitements étaient moins marquées (Fig.IV.7) bien qu'encore visibles.

La comparaison de l'évolution des données radiométriques et des indices foliaires, pour l'année 1987/88 (Fig.IV.9), montre qu'en général le rapport PIR/R caractérise bien les changements des indices foliaires en fonction des traitements appliqués. Cependant, pour les jours 144, 151 et 158, la relation entre ceux deux paramètres mérite une analyse plus détaillée. La figure IV.9b montre que les valeurs de PIR/R sont plus élevées pour les traitements qui ont reçu plus d'azote (T1 et T3) par rapport à ceux qui ont reçu moins d'azote (T2 et T4), alors que les différences entre deux traitements avec un même niveau d'azote sont faibles. Ces résultats ne sont pas en accord avec l'évolution de l'indice foliaire en ce que concerne ces trois dates.

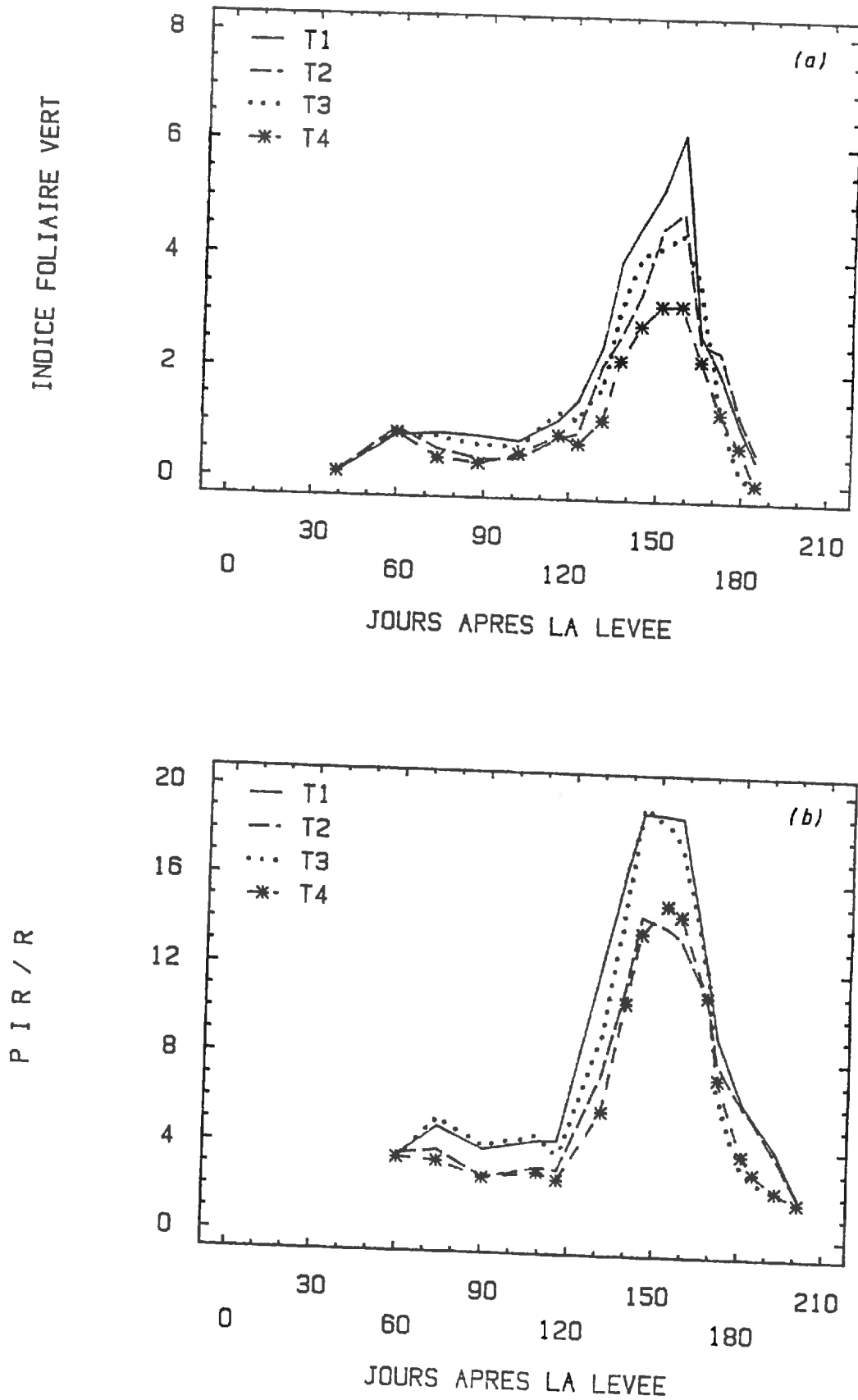


Figure IV.9. Evolution de l'indice foliaire vert (a) et du rapport PIR/R (b) pour la culture du blé dans la saison 1987/88. Légende identique à celle de la Fig.IV.1.

Pour le traitement 1, la valeur maximale de PIR/R (Fig IV.9b) a été atteint le jour 144, tandis que l'indice foliaire maximum (6,2) a été enregistré deux semaines plus tard le jour 158 (Fig.IV.9a). Cela suggère une saturation de PIR/R à un seuil autour d'un indice foliaire de 4,5. Le même phénomène semble avoir eu lieu pour le traitement 3, malgré ses indices foliaires moins élevés (entre 4 et 4,5).

Pour le traitement 2, c'est le niveau de biomasse produite et non les propriétés optiques des plantes qui semble être la raison principale de la contradiction apparente entre les données radiométriques et l'indice foliaire. On rappelle que le calcul de l'indice foliaire considère la surface spécifique des feuilles, le poids des feuilles vertes par rapport au poids total de 5 plantes et la matière sèche produite sur l'ensemble de la parcelle. Les résultats montrent qu'il n'y a pas eu de différences importantes entre les traitements 2 et 4 en ce que concerne la surface spécifique et le poids des feuilles vertes. Par contre, la matière sèche produite par les parcelles du traitement 2 était supérieure à celle du traitement 4, ce qui a entraîné un indice foliaire plus élevé. Les données radiométriques suggèrent que les propriétés optiques des deux traitements étaient similaires (Fig.IV.9b), malgré l'indice foliaire plus développé du traitement 2.

La droite de régression entre les indices foliaires et les rapports PIR/R pour les deux années, toutes données confondues, est montrée dans la figure IV.10. Une relation linéaire entre ces deux variables a aussi été trouvée par Hinzman et al. (1986) et par Kamat et al. (1985). Cependant, il faut remarquer que dans leurs études les indices foliaires étaient relativement faibles (< 4). Pour des IFV plus élevées il faut s'attendre à une relation non-linéaire en fonction des niveaux de saturation dans le rouge et dans le PIR. Nos résultats suggèrent une saturation du PIR/R avec des indices foliaires supérieurs à 4.

L'efficacité de la réflectance spectrale pour caractériser l'effet du stress hydrique est moins évidente que pour l'effet de la fertilisation azotée. En général, la critique faite aux indices de végétation est qu'ils ne seraient pas efficaces pour identifier l'effet du stress avant que la croissance des plantes soit retardée (Jackson et al., 1983). Les mêmes auteurs suggèrent l'utilisation des indices basés sur la température de surface pour caractériser le début du stress hydrique. Par contre, les résultats de Richardson et Everitt (1987) suggèrent que les données radiométriques peuvent être utilisées pour le suivi du stress hydrique sur le pâturage. Ils affirment que le début du stress hydrique peut être détecté par le PIR en fonction de modifications de la structure de la plante et que l'effet d'un stress hydrique prolongé pourrait être caractérisé par la bande rouge en fonction des changements de la concentration de chlorophylle des feuilles.

Dans des conditions de stress hydrique certains auteurs ont utilisé la conjugaison des données de réflectance spectrale et de l'infrarouge thermique (Jackson et Pinter, 1981; Hatfield, 1983; Wiegand et al., 1983).

Nos résultats montrent que l'indice PIR/R a été efficace pour caractériser l'effet du stress hydrique parce qu'il a bien suivi les réductions de l'indice foliaire

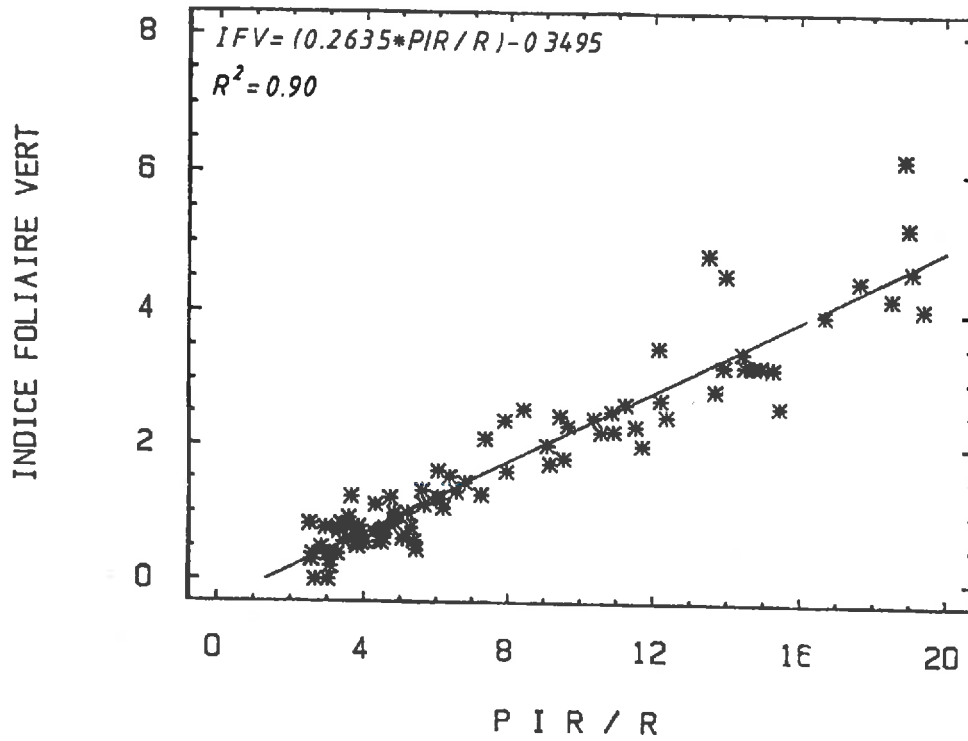


Figure IV.10. Equation de la regression entre l'indice foliaire vert et le rapport PIR/R pour la culture du blé avec le données de deux années confondues.

provoqué par le manque d'eau. Cependant, en fonction de l'obtention des données radiométriques avec un pas de temps d'environ 7 jours, il est difficile d'évaluer son efficacité pour caractériser le début du stress hydrique.

4.2.2. Estimation du PAR intercepté à partir de la réflectance spectrale

4.2.2.1. Rappels méthodologiques

4.2.2.1.1. La relation analytique entre le PAR intercepté et les indices de végétation.

L'analyse bibliographique (cf. sous-chapitre 1.1.2.2.4) a montré que les paramètres qui affectent la réflectance spectrale d'un couvert sont les mêmes qui affectent le PAR intercepté (Guyot, 1984 et Baret et al., 1989).

Des modèles de réflectance peuvent être utilisés pour caractériser l'évolution de la structure de la plante en fonction de l'indice foliaire et de l'orientation des feuilles. De même, des modèles d'absorptance peuvent être employés pour estimer la fraction du PAR intercepté ou absorbé par la culture. Ces modèles, eux aussi, utilisent l'IFV comme l'une de ses variables d'entrée. Il est donc possible d'établir, analytiquement, une relation entre la réflectance spectrale d'un couvert et le PAR intercepté en utilisant l'IFV comme l'élément de liaison entre eux de façon que:

réflectance(ρ)----- IFV

IFV----- PAR_i

Des nombreux modèles existent (Suits, 1972; Verhoef, 1984) mais ils ne sont pas directement utilisables sur un mode opérationnel à cause de leurs complexité et de la difficulté d'obtention de certains paramètres comme, par exemple, l'angle d'inclinaison des feuilles. Ceci amène à une estimative empirique du P.A.R. intercepté par une culture à partir de la réflectance spectrale.

4.2.2.1.2. La relation empirique entre le PAR intercepté et l'indice de végétation PIR/R

La relation entre les valeurs de PAR_i estimées à partir des photos hémisphériques et l'indice de végétation PIR/R est montré dans la figure IV.11 et peut être représentée par l'équation suivante:

$$\text{PAR}_i = (0.0294 * \text{PIR/R}) + 0.3669 \quad (\text{IV.2})$$

Malgré la prise des photos hémisphériques pendant tout le cycle du blé, seules les données de 5 dates avant la floraison ont pu être utilisées. En effet, des valeurs trop élevées de PAR_i ont été obtenues, par rapport aux faibles indices foliaires,

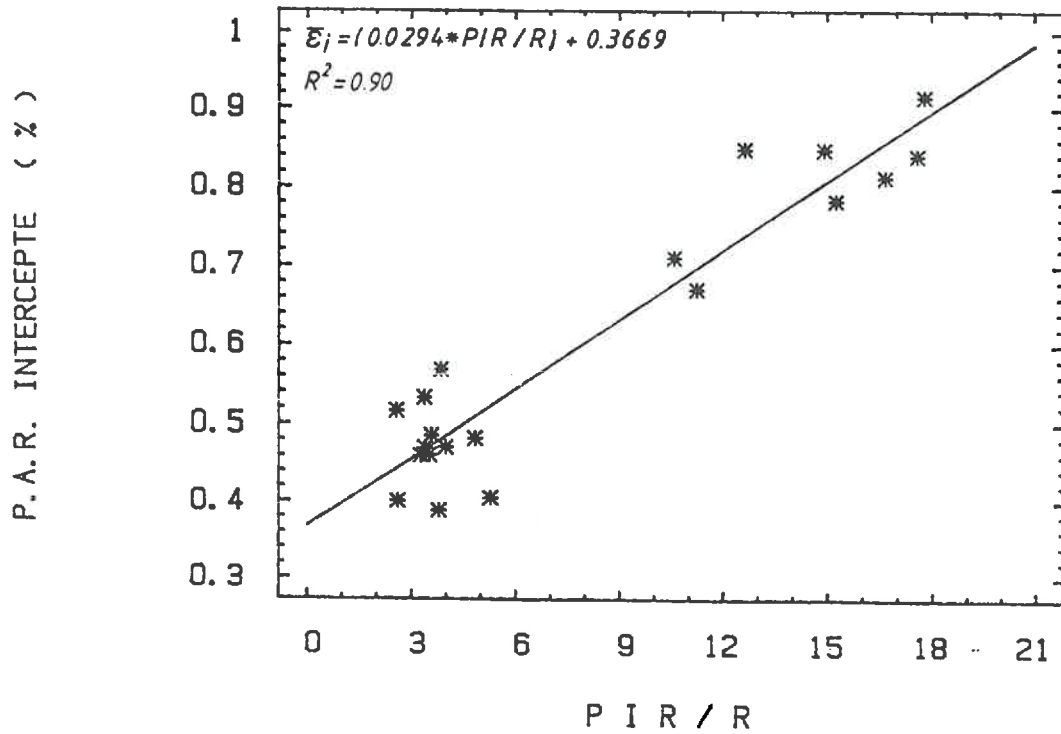


Figure IV.11. Equation de regression entre le rapport PIR/R et le rayonnement photosynthetiquement actif (PAR) intercepté par la culture et mesuré à partir des photos hémisphériques.

pendant la période de sénescence: ce phénomène a été observé par plusieurs auteurs quand la valeur de PAR_i a été mesurée par la méthode du bilan radiatif en fonction de l'interception du rayonnement par des feuilles non photosynthétiquement actives (Hatfield et al., 1984, Gallo et al., 1985).

Il est possible que, dans notre cas, une des raisons de ce comportement soit liée à la difficulté de discrimination du sol et de la végétation sénescente des feuilles vertes. Le choix du seuil qui permet de faire cette discrimination est subjectif et dépend des conditions d'éclairement du jour pendant lequel les photos ont été prises, comme cela a déjà été reporté par Olioso (1987). Malgré l'utilisation d'un parasol dans deux des cinq dates et du ciel complètement couvert dans les trois autres dates, nous avons rencontré quelques difficultés pour choisir le seuil en question.

Pendant la phase initiale de la culture, il est fort probable que les modifications de la structure de la plante, notamment l'orientation des feuilles, en fonction des différentes doses d'azote, du stress hydrique et de la phase phénologique (redressement des feuilles au début montaison) aient contribué pour augmenter la variabilité de la relation entre le PAR_i et la réflectance spectrale (Varlet-Grancher et Bonhomme, 1979; Olioso, 1987; Baret et al., 1989).

Un autre facteur qui peut avoir contribué à augmenter la variabilité des mesures de PAR_i au début du cycle est lié au fait que les photos hémisphériques ont été prises quand le sol était relativement sec. Ainsi, le sol sec et la présence des cailloux de coloration blanchâtre ont rendu difficile la bonne séparation du sol et de la végétation verte, puisque dans ces conditions la réflectance du sol est plus élevée, dans le PIR, et donc plus proche de celle des feuilles. En utilisant la même méthode d'estimation de PAR_i , Olioso (1987) a aussi trouvé des valeurs de PAR_i proche de 50% dans la phase initiale du blé.

Une relation linéaire a été aussi trouvée entre les valeurs de PAR_i et la différence normalisé (ND). Cependant, le rapport PIR/R a été choisi car il a présenté un indice de corrélation plus élevé et parce qu'il a mieux caractérisé les variations des indices foliaires provoquées par les traitements de fertilisation azotée et de déficit hydrique.

D'autres auteurs (Ajai et al., 1984 sur blé et Gallo et al., 1985 sur maïs) ont trouvé une relation non-linéaire entre PAR_i et PIR/R. Dans notre cas, le nombre relativement faible de données et le bas niveau de l'IFV maximum (entre 3 et 4,5) pour trois des quatre traitements expliquent l'obtention d'une relation linéaire.

L'équation établie entre PAR_i , estimé par les photos hémisphériques, et PIR/R a été utilisée pour estimer le PAR_i pendant le cycle. Des interpolations linéaires ont été faites entre les dates de mesure pour obtenir les valeurs journalières de PAR_i . L'influence de la fertilisation azotée et du stress hydrique sur l'évolution du PAR_i pendant le cycle du blé sera montrée dans le chapitre suivant.

4.3. Conclusion

Les traitements de fertilisation azotée et d'irrigation ont provoqué, comme cela était recherché au début de l'expérience, différents niveaux d'indices foliaires pendant les différentes phases de la culture. L'interaction entre les traitements a été intéressante en ce sens que les doses plus élevées d'azote ont montré les indices foliaires plus développés et que l'effet du stress hydrique a été plus sévère pour ces traitements. L'exemple le plus intéressante est celui montré dans la figure IV.1a, où le mécanisme de régulation des stomates semble avoir réduit la transpiration plus brusquement pour le traitement 3 (qui avait l'indice foliaire plus développé) que pour le traitement 4 et avoir provoqué, par conséquent, une chute plus accentuée de sa surface foliaire verte.

La réflectance spectrale a bien caractérisé les variations de l'indice foliaire vert, soit dans les bandes du rouge et du proche infrarouge individuellement, soit par sa combinaison sous la forme du rapport PIR/R. L'analyse de régression a montré que l'indice PIR/R explique 90 pour cent des variations des IFV et qu'il existe une relation linéaire entre ces deux variables. Cependant, la réponse spectrale a montré une saturation en fonction de l'indice foliaire, qui s'est située entre 2,5 et 3 dans le rouge, entre 3 et 5,2 dans le PIR et entre 4 et 4,5 pour le rapport PIR/R. Ceci entraîne des difficultés dans l'utilisation de cet indice pour des cultures avec indices foliaires plus élevés.

Une relation linéaire a été trouvée entre l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (P.A.R.), mesurée à partir des photos hémisphériques, et les indices de végétation PIR/R et différence normalisée (DN). Cette relation sera utilisée dans le chapitre suivant pour estimer l'interception du P.A.R. à partir des mesures de réflectance faites pendant le cycle du blé.

Ces résultats nous invitent à réfléchir sur les niveaux appropriés de développement foliaire pour des cultures pluviales cultivées en zone de risque de stress hydrique. Les conséquences du stress hydrique sont importantes, non seulement par rapport à l'interception du rayonnement solaire mais aussi pour la production finale de la culture.

Dans le chapitre suivant nous allons analyser l'influence de la fertilisation azotée et du stress hydrique sur l'efficacité d'interception du rayonnement (ϵ_i) et sur l'efficacité (ϵ_b) avec laquelle cette énergie interceptée est transformée en matière sèche.

CHAPITRE 5

CHAPITRE V. EFFET DU STRESS HYDRIQUE, DE LA FERTILISATION AZOTEE ET DE LA PHASE PHENOLOGIQUE SUR LES EFFICIENCES D'INTERCEPTION (ϵ_i) ET DE CONVERSION EN BIOMASSE (ϵ_b) DU P.A.R. INTERCEPTE.

5.1. Introduction

Plusieurs études ont montré qu'en conditions non-limitantes d'alimentation hydrique et minérale il existe une relation linéaire entre la matière sèche totale accumulée et la quantité d'énergie solaire intercepté (ϵ_i) par le couvert végétal et que les valeurs maximales de ϵ_b sont plus élevés pour les plantes du type C4 par rapport à celles du type C3.

Cependant, pour les cultures pluviales, notamment dans les régions tropicales, le risque de stress hydrique varie en fonction des zones de production, ce qu'influe sur la décision de l'agriculteur quant au niveau de technologie à utiliser par rapport à la fertilisation azotée, l'ideotype de la variété, la correction de l'acidité du sol, etc.. (Steinmetz et al., 1985, Steinmetz et al., 1990).

Pour des conditions non-idéales de culture, les résultats trouvés dans la littérature, notamment sur l'efficacité ϵ_b , sont contradictoires. Certains auteurs (Monteith et Elston, 1983) suggèrent une insensibilité aux effets de la température, de la fertilisation azotée et du stress hydrique tandis que d'autres auteurs (Varlet-Grancher, 1982; Asrar et al., 1984; Oliso, 1987; Garcia et al., 1988) ont montré que ϵ_b varie non seulement en fonction des stress subis mais aussi de la phase phénologique de la plante.

Le but principal de ce chapitre est de mieux comprendre les rôles que jouent la fertilisation azotée, le stress hydrique et la phase phénologique sur les efficacités ϵ_i et ϵ_b .

5.2. Méthode de calcul des valeurs hebdomadaires de ϵ_b

L'efficacité ϵ_b de transformation de l'énergie absorbé par le couvert en matière sèche est calculée, pour une période donnée, par le rapport:

$$\epsilon_b = \text{MST} / \Sigma \text{PARa} \quad (\text{V.1})$$

où: MST = matière sèche totale produite pendant cette période (g.m^{-2})
 ΣPARa = somme du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par la culture pendant la même période (MJ.m^{-2}).

Les valeurs hebdomadaires de matière sèche produite ont été obtenues à partir de l'interpolation linéaire entre les dates de mesures.

Le PARa a été calculé de la façon suivante:

$$\text{PARa} = \epsilon_c \cdot \epsilon_i \cdot R_g \quad (\text{V.2})$$

où: ϵ_c = proportion du PAR dans le rayonnement solaire (50% de R_g) (Monteith, 1972)
 ϵ_i = efficacité d'interception du PAR en pourcentage
 R_g = rayonnement solaire global journalier (MJ.m^{-2}).

Nous avons considéré ϵ_i ou PAR intercepté comme PAR absorbé parce que, dans le domaine du PAR, la majeure partie du rayonnement incident (94% selon Baret et al., 1989) est absorbé par les feuilles du couvert.

Les valeurs journalières de ϵ_i ou PARi ont été aussi obtenues par interpolation linéaire entre les dates pour lesquelles les estimations de ϵ_i ont été faites (Fig.V.1). Une interpolation linéaire a été utilisée pour obtenir les valeurs de ϵ_i de la levée jusqu'à la première date à laquelle ϵ_i a été mesuré.

Après l'obtention des données journalières de PARa, elles ont été cumulées par périodes de 7 jours à compter de la levée. Finalement, à partir des rapports entre les accroissements hebdomadaires de la matière sèche et du PAR absorbé, nous avons obtenu les valeurs hebdomadaires de ϵ_b qui sont exprimées en g.MJ^{-1} .

Le pas de temps de 7 jours a été choisi pour pouvoir caractériser l'effet de l'irrigation sur la production de biomasse par l'application d'un indice de stress hydrique à une échelle de temps compatible avec les besoins d'un suivi agronomique de la culture.

L'absence d'une station météorologique proche fournissant les données de rayonnement global, nous avons utilisé la station météorologique de l'INRA (Domaine St.Paul) de Montfavet qui est située à environ 40 km au nord du local de l'expérimentation.

5.3. Résultats et discussion

5.3.1. Influence de la fertilisation azotée et du stress hydrique sur l'efficacité d'interception du P.A.R. (ϵ_i)

L'évolution du PARi pendant le cycle de la culture, pour les deux années, est montrée dans la figure V.1. Le PARi a été estimé en fonction des données radiométriques à partir de l'équation établie entre les mesures de reflectance et de l'interception du PAR déterminé par les photos hémisphériques qui a été montré dans

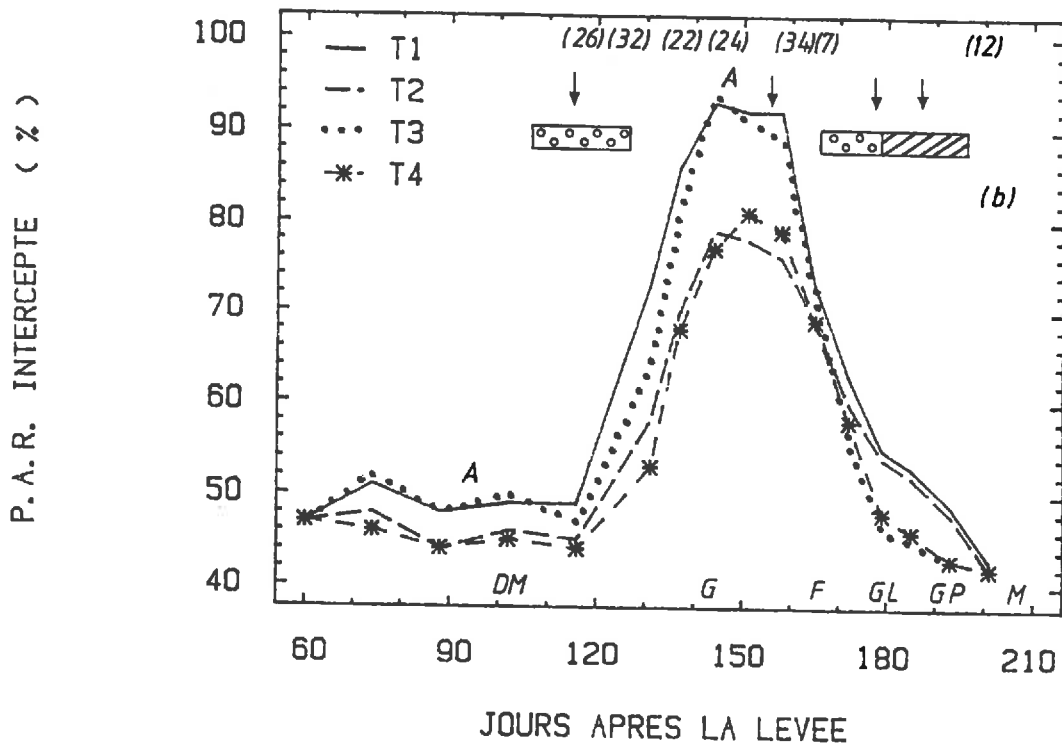
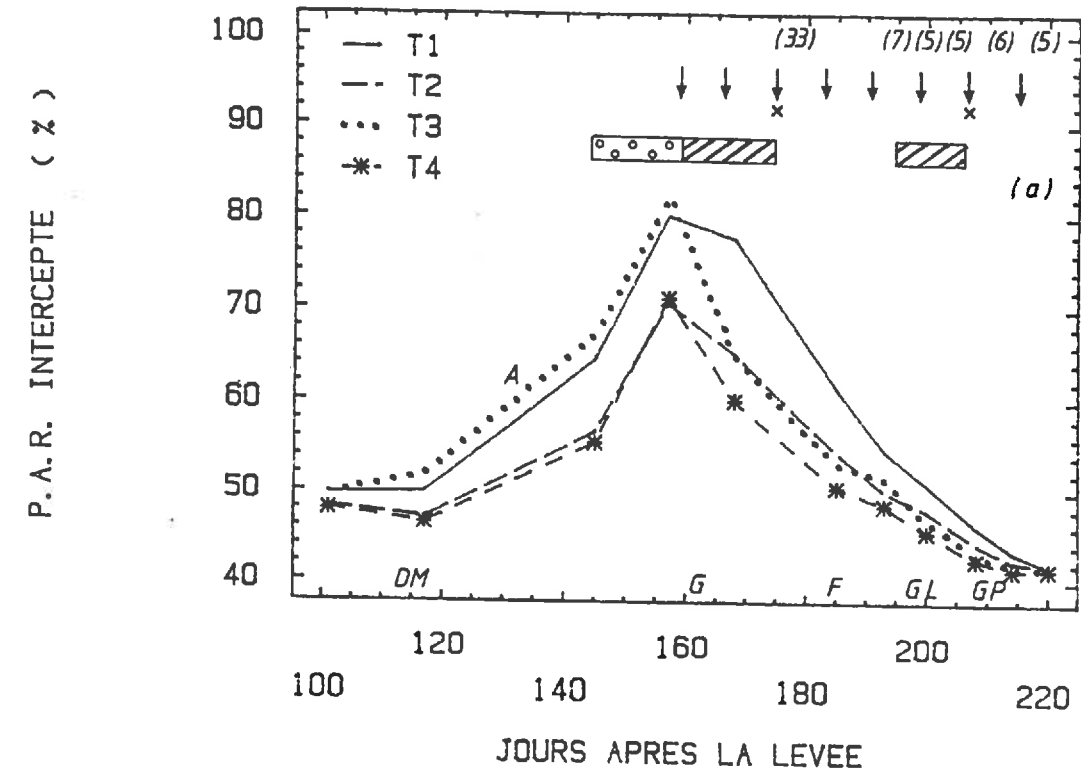


Figure V.1. Evolution du P.A.R. intercepté pendant le cycle du blé dans les saisons 1986/87 (a) et 1987/88 (b) Légende: A=apport d'azote; DT=Début tallage; DM=Début montaison; G=Gonflement; F=Floraison; GL=Grain laitieux; GP=Grain pâteux M=Maturation; (\downarrow)=Irrigation T1 et T2; (\times)=irrigation T3 et T4; \square (circles) =stress hydrique modéré; \square (hatched) =stress hydrique sévère; chiffres entre parenthèses = pluie.

le chapitre IV. L'équation qui décrit la relation entre ces deux paramètres est la suivante:

$$\text{PAR}_i = \bar{\epsilon}_i = (0,0294 * \text{PIR}/R) + 0,3669 \quad (\text{V.3})$$

La figure V.1 montre que l'évolution de PAR_i est très similaire à celle de l'indice de végétation PIR/R présenté dans le chapitre IV et suit relativement bien l'évolution des indices foliaires des différents traitements de fertilisation azotée et d'irrigation.

On peut remarquer que vers la fin du palier hydrique (GP), quand l'indice foliaire était proche de zéro, le PAR_i était proche de 40%. Des valeurs élevées de PAR_i pendant la phase de sénescence ont déjà été obtenues par d'autres auteurs (Hatfield et al., 1984. Gallo et al., 1985) quand le PAR_i a été mesuré par la méthode du bilan radiatif. Ils ont attribué ce comportement à l'interception du rayonnement par les feuilles non vertes. Dans nos résultats, l'explication est due au fait que seules les mesures faites avant l'épiaison ont été considérées pour établir la relation entre PAR_i et le rapport PIR/R et que les valeurs de PAR_i étaient relativement élevées dans la phase initiale de la culture.

5.3.1.1. Effet de la fertilisation azotée sur l'efficience ϵ_i

Pendant les deux années, les valeurs de PAR_i pour les traitements avec les doses plus élevées d'azote (T1 et T3) ont été supérieures aux traitements moins fertilisés (T2 et T4). Dans la phase d'interception maximale, la différence entre ces traitements a été de l'ordre de 10% en 1986/87 et de 15% en 1987/88. Ces réponses sont associées à l'effet que la fertilisation azotée a sur l'indice foliaire et sont en accord avec des résultats trouvés par Green (1987) et par Garcia et al.(1988).

En supposant que l'azote ne change pas les propriétés optiques du couvert, Green (1987) suggère que l'indice foliaire est le paramètre plus important pour l'interception du rayonnement qui peut être affecté par quatre facteurs: 1) la vitesse de croissance qui va affecter la durée de la période entre la levée et le taux maximum de couverture du sol; 2) l'indice foliaire maximum atteint qui va déterminer la limite maximale d'absorption du rayonnement; 3) la persistance des feuilles vertes et 4) la vitesse et durée de la sénescence du couvert.

La valeur maximale de PAR_i (94%) pour les traitements 1 et 3 dans la deuxième année (Fig.V.1b) est très proche de l'asymptote 93,5% trouvé par Hipps et al. (1983) et Hatfield et al. (1984) et de 90% proposée par Olioso (1987). Cependant, dans la première année (Fig.V.1a) le PAR_i maximum a été de 82% pour le traitement 3.

L'interception de PAR en fonction de la persistance des feuilles vertes a été affectée par le stress hydrique qui a réduit considérablement l'indice foliaire dans les deux années ainsi que nous allons le voir.

5.3.1.2. Effet du stress hydrique sur l'efficacité ϵ_i

Les résultats de Legg et al. (1979) sur sorgho montrent que l'effet du stress hydrique sur l'interception de la lumière et, par conséquent sur la production finale, est fonction de la phase pendant laquelle le stress hydrique s'est développé. Ainsi, ils ont trouvé que le rendement de grains a diminué entre 30 et 40% et entre 10 et 20% quand le stress a été imposé à partir de la levée et à partir d'un mois après la levée, respectivement. L'effet principal du stress hydrique sur la réduction du PAR_i a été de diminuer l'indice foliaire et de provoquer la sénescence prématurée. Muchow (1985) a trouvé des résultats similaires pour le soja et d'autres légumineuses à graines.

Nos résultats montrent que pendant les deux années, l'effet du stress hydrique n'a pas été limitant pour l'interception du PAR_i dans la phase initiale de la culture, malgré l'occurrence d'une période relativement sèche qui s'est manifestée notamment dans la mesure faite le jour 116 de la saison 1987/88 (Fig.V.1b). Cependant, l'interception du PAR a été très affectée par le stress hydrique à partir du jour 155 dans la première année (Fig.V.1a) et à partir du jour 164 dans la deuxième année (Fig.V.1b).

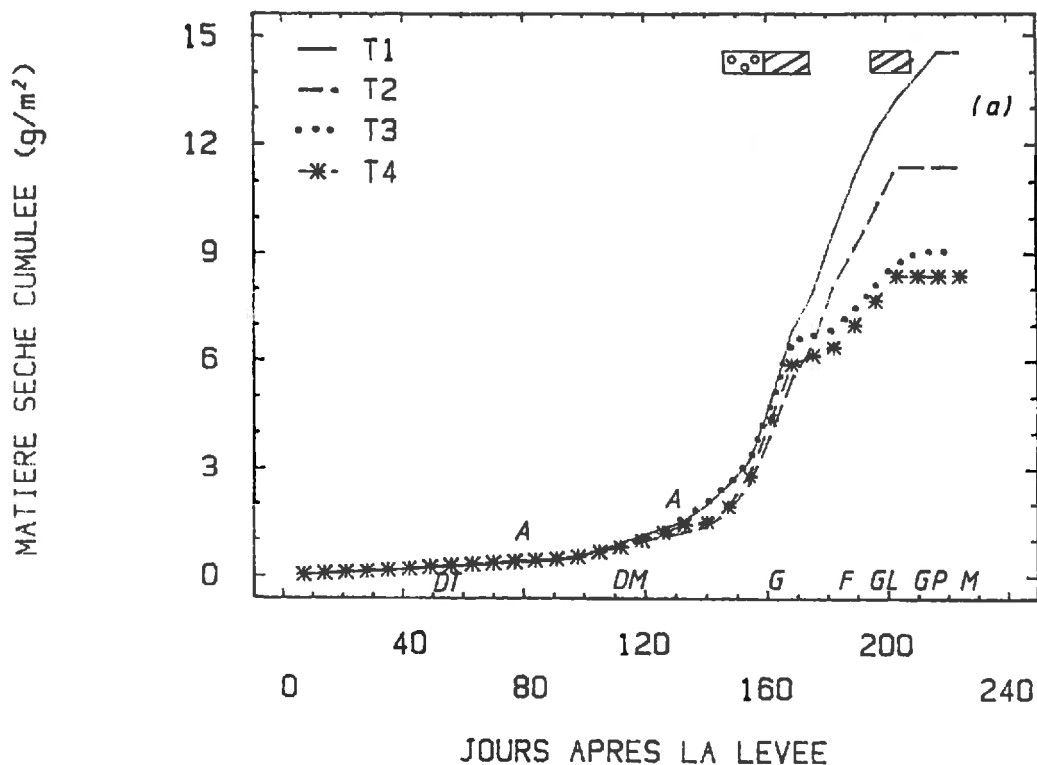
Pendant la saison 1986/87, le stress hydrique a provoqué une diminution de 17% et de 8% de l'interception du PAR pour les traitements 3 et 4, respectivement. Cette chute du PAR_i peut être attribuée à la diminution de l'IFV, notamment en fonction de la fermeture des stomates qui a été plus brusque pour le traitement possédant l'indice foliaire plus développé au moment du début du stress hydrique (Bradford et Hsiao, 1982).

5.3.2. Effet de la fertilisation azotée, du stress hydrique et de la phase phénologique sur l'efficacité ϵ_b

Dans ce sous-chapitre, nous allons d'abord présenter les principaux résultats liés à l'évolution de la biomasse produite, du PAR absorbé et de l'efficacité ϵ_b pour, dans une deuxième étape, analyser et discuter les résultats relatifs à l'influence de la fertilisation azotée, du stress hydrique et de la phase phénologique sur l'efficacité ϵ_b .

(X 100)

206



(X 100)

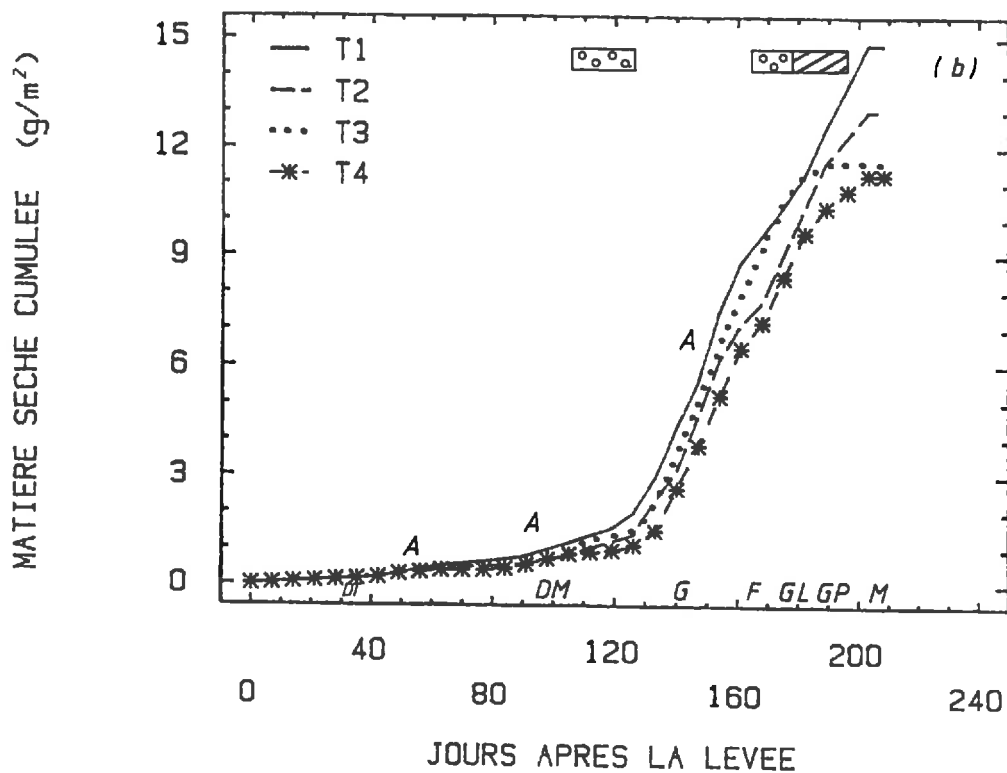


Figure V.2. Evolution de la matière sèche produite cumulée pour les 4 traitements dans les années 1986/87 (a) et 1987/88 (b). Légende identique à celle de la Fig.V.1.

5.3.2.1. Evolution de la production de biomasse et du PAR absorbé pendant le cycle du blé.

La figure V.2 montre l'évolution des valeurs cumulées de la matière sèche produite dans les deux années de l'expérimentation.

La production de biomasse pendant le cycle du blé a varié en fonction des traitements et des années. La distinction entre les traitements irrigués (T1 et T2) et non-irrigués (T3 et T4) a été plus nette dans la première année (Fig.V 2a) parce que le stress hydrique a provoqué une forte diminution de la croissance des plantes de T3 et T4. Pour la deuxième année, l'écart entre les traitements est inférieur car le stress hydrique plus sévère est intervenu après la floraison, alors que la croissance végétative était déjà accomplie. En outre, le troisième apport d'azote, fait pour améliorer la qualité des grains, cette année-là, semble avoir contribué à réduire les écarts entre les traitements.

Les figures V.3a et 4a montrent l'évolution des accroissements hebdomadaires de matière sèche et du PAR absorbé pendant les deux années d'expérimentation. En 1986/87, l'effet de la première période de stress hydrique (de 144 à 173 JAL) a réduit sévèrement le taux de croissance des traitements 3 et 4 (Fig.V.3a).

La chute des taux de croissance des traitements irrigués (T1 et T2) dans le prélèvement du jour 172, après avoir atteint la croissance maximale vers le gonflement, correspond à la diminution brusque de l'indice foliaire à cause des vents très forts qui ont provoqué un dessèchement des bouts des feuilles même dans les parcelles irriguées. L'accroissement du taux de croissance observé après cette date semble être lié à l'irrigation faite le jour 174 et à la pluie de 33mm qui est tombée le jour 178.

L'évolution de la croissance hebdomadaire de matière sèche en 1987/88 (Fig.V.4a) montre une allure différente de celle de l'année précédente, puisque tous les traitements ont connu une période plus longue avec des taux élevés de production de biomasse. La raison principale de ce comportement est que le stress hydrique est intervenu plus tard (après la floraison), alors que la culture avait déjà atteint sa croissance végétative maximale. La troisième application d'azote faite le jour 146, pour améliorer la qualité des grains, semble avoir aussi contribué à maintenir des taux plus élevés de croissance pour longtemps. La forte augmentation de la production de biomasse, notamment pour les traitements irrigués, suggère que la culture avait besoin de cette fertilisation.

La forte chute des taux de croissance observée le jour 165 correspond à une forte attaque de rouille brune (*Puccinia graminis*) qui a été contrôlée avec un peu de retard pour les raisons déjà mentionnées dans le chapitre précédent.

Les figures V.3b et 4b montrent l'évolution des taux du PAR absorbé par les cultures pendant les deux années. Elles indiquent une allure semblable caractérisée par de valeurs faibles pendant la phase initiale, atteignent valeurs maximales vers le

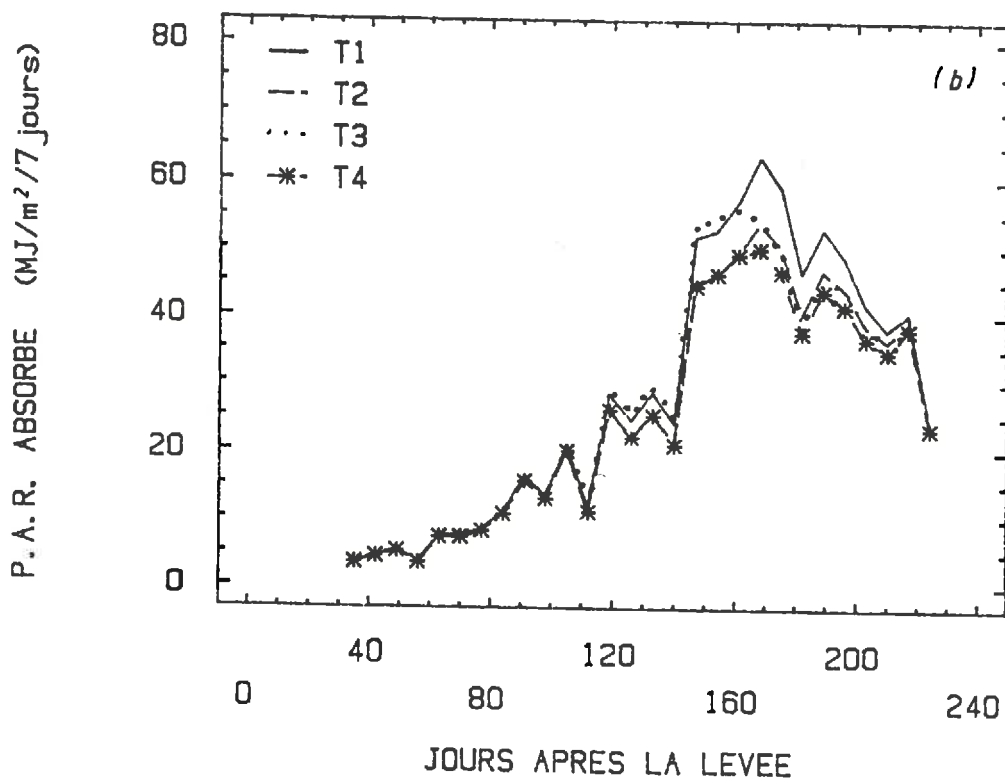
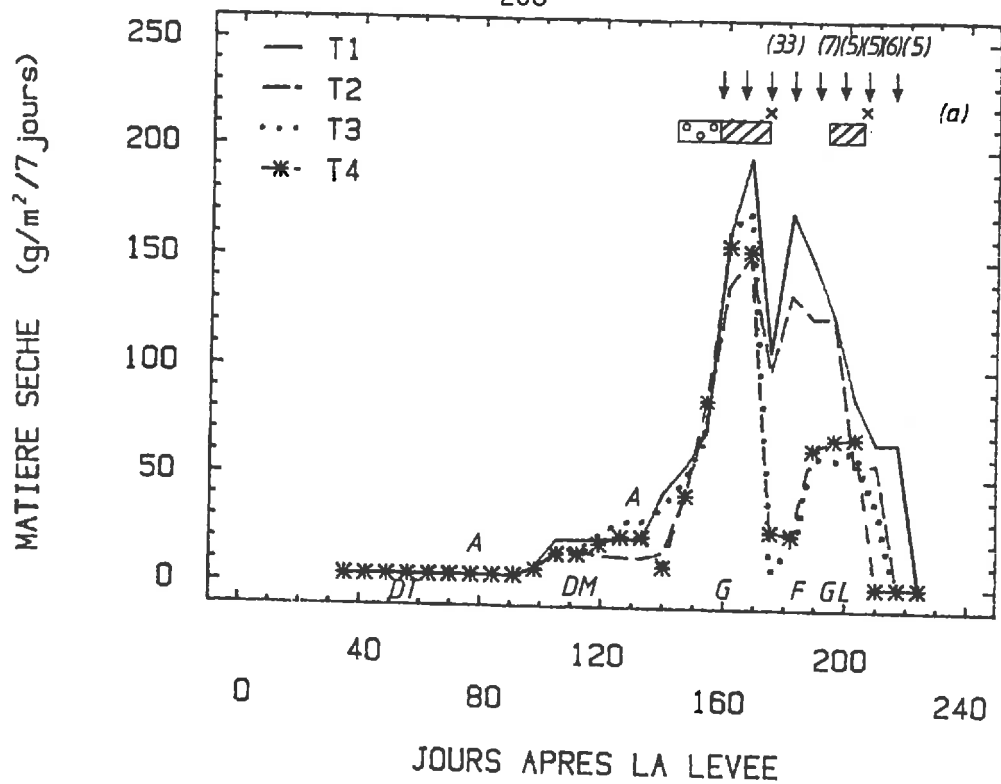


Figure V.3. Evolution des gains de matière sèche produite (a) et du PAR absorbé (b) par périodes de 7 jours pendant l'année 1986/87. Légende identique à celle de la Fig.V.1.

gonflement et diminuent progressivement vers la fin du cycle. En 1986/87, le traitement 1 a présenté une valeur maximale de PARa pour le jour 168 qui correspond à l'indice foliaire maximum (Fig.IV.1a) et aussi à la production maximale de biomasse (Fig.V.3a). La fertilisation azotée plus faible des traitements 2 et 4 a provoqué une réduction de l'indice foliaire et, par conséquent, de l'interception du rayonnement solaire notamment entre le début montaison et le gonflement.

L'évolution du PAR absorbé en 1987/88 (Fig.V.4b) montre que l'effet conjugué de la fertilisation moins abondante et du stress hydrique ont provoqué des indices foliaires plus faibles pour le traitement 4 (maximum de 3,2) et, par conséquent, des taux d'absorption du rayonnement solaire inférieurs aux autres traitements dans la majeure partie du cycle. L'effet du stress hydrique a provoqué une réduction du PARa des traitements 3 et 4 à partir du jour 172. La chute du PARa le jour 160 semble être due aux changements des indices foliaires et/ou des propriétés optiques des feuilles en fonction de l'incidence de la rouille.

Connaissant l'évolution de la production de matière sèche et du PAR absorbé par la culture, en fonction des différents traitements d'irrigation et de fertilisation azotée, on peut passer à la présentation des résultats relatifs à l'efficacité de conversion du rayonnement solaire absorbé en biomasse (ϵ_b).

5.3.2.2. Evolution des valeurs hebdomadaires de ϵ_b pendant le cycle du blé

L'évolution des valeurs hebdomadaires de ϵ_b pendant le cycle du blé est montrée dans les figures V.5 et 6. Elle peut être caractérisée par quatre phases distinctes: il y a d'abord une tendance à des valeurs basses de ϵ_b de la levée jusqu'au jour 80-90 (qui correspond à la période de tallage) et qui s'explique, en partie, par le fait que la croissance des plantes était presque nulle tandis que l'absorption du rayonnement PAR augmentait.

L'augmentation brusque de ϵ_b , notamment entre les jours 42 et 63 de la deuxième année (Fig.V.6a), correspond à une forte croissance des plantes en raison de l'augmentation de la température (voir Fig.II.3a) ce qui semble avoir accéléré le tallage qui a commencé vers le jour 34. Il paraît que cette forte croissance a épuisé les réserves d'azote du sol et des plantes, qui n'ont pu être récupérées qu'après le jour 77. Cette date correspond à environ 3 semaines depuis le premier apport d'azote de $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ pour T1 et T3 et de $0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ pour T2 et T4. La faible réponse à la fertilisation azotée semble être due au fait que le sol était relativement sec, puisque seulement 8,5 mm de pluies sont tombés dans ces trois semaines.

Dans une deuxième phase, autour de la montaison, l'efficacité ϵ_b augmente jusqu'à un plateau proche de 1 dans l'année 1986/87 (Fig.V. 5) mais atteint des valeurs plus faibles dans la deuxième année (Fig.V.6a) probablement en raison de l'état relativement sec du sol comme a été mentionné auparavant. Dans une troisième étape, les valeurs de ϵ_b atteignent le maximum entre le gonflement et la floraison pour diminuer après jusqu'à la maturation.

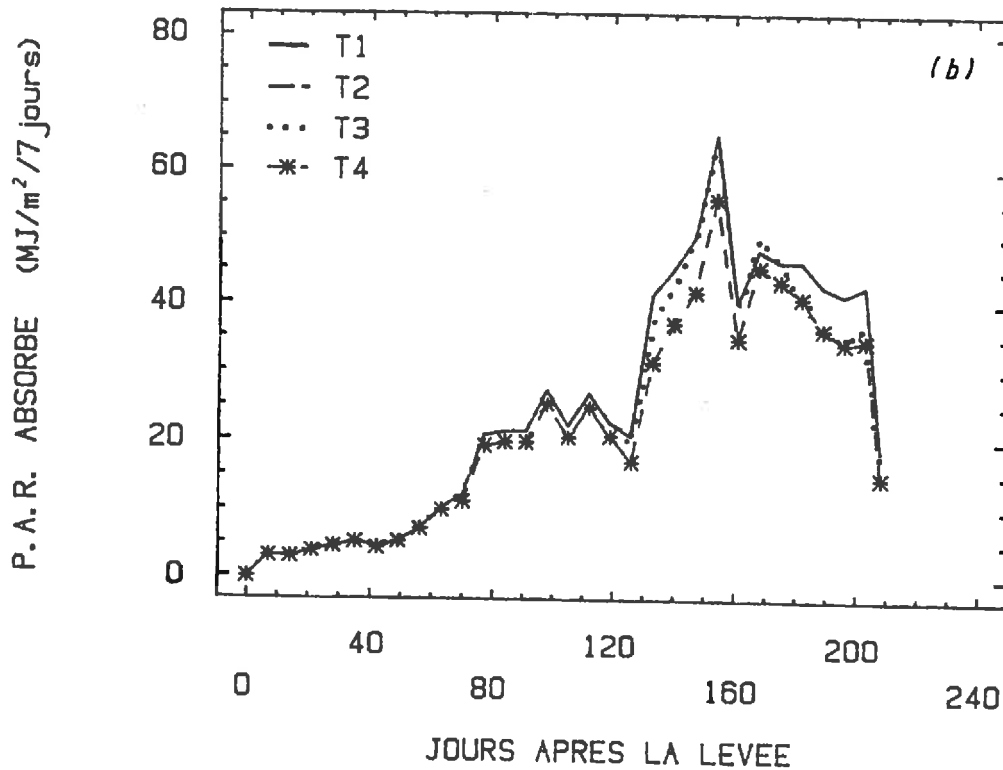
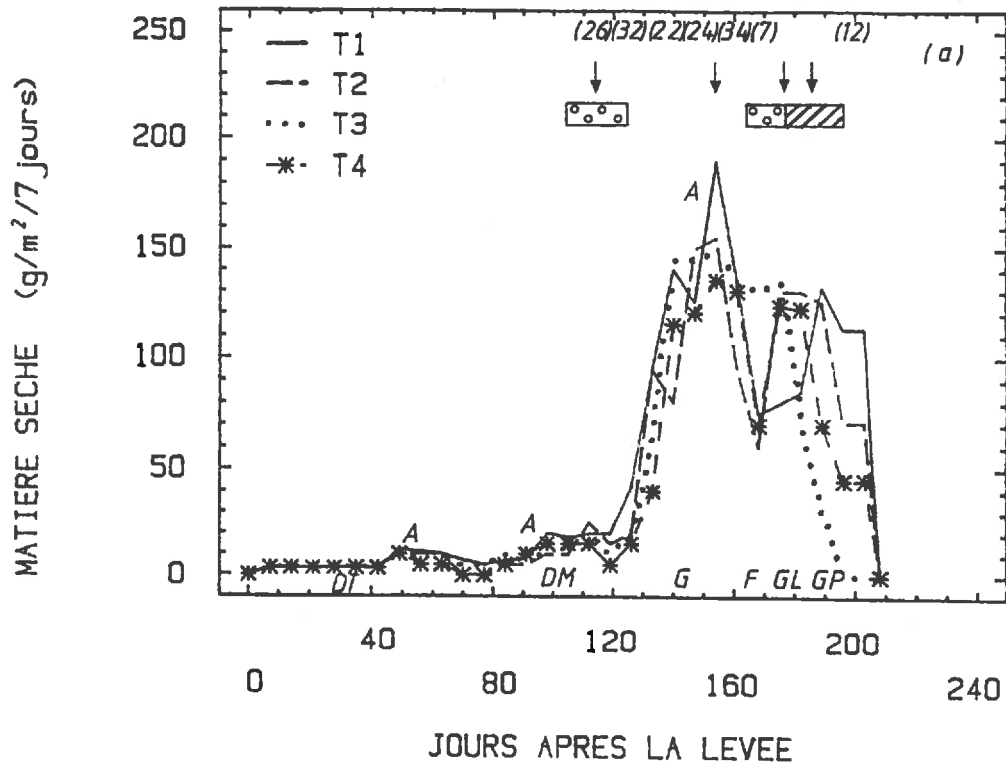


Figure V.4. Evolution de la matière sèche produite cumulée (a) et du P.A.R. absorbé (b) par périodes de 7 jours pendant l'année 1987/88. Légende identique à celle de la Fig.V.1.

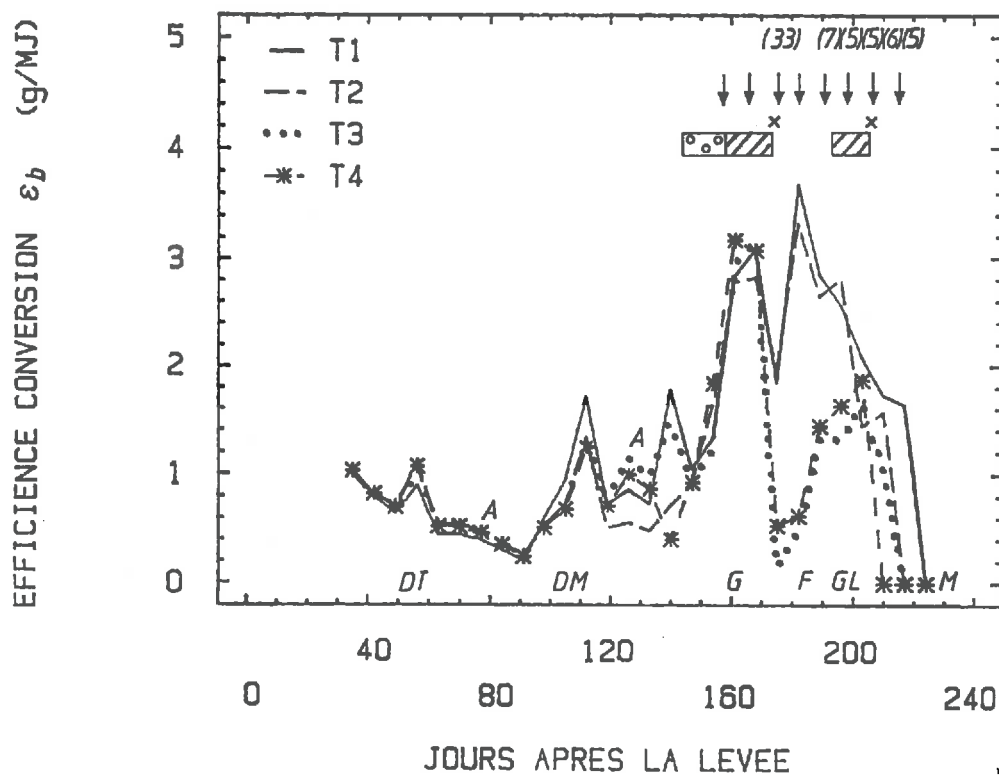


Figure V.5. Evolution de l'efficacité de conversion ϵ_b par périodes de 7 jours pendant le cycle du blé dans l'année 1986/87. Légende identique à celle de la Fig.V.1.

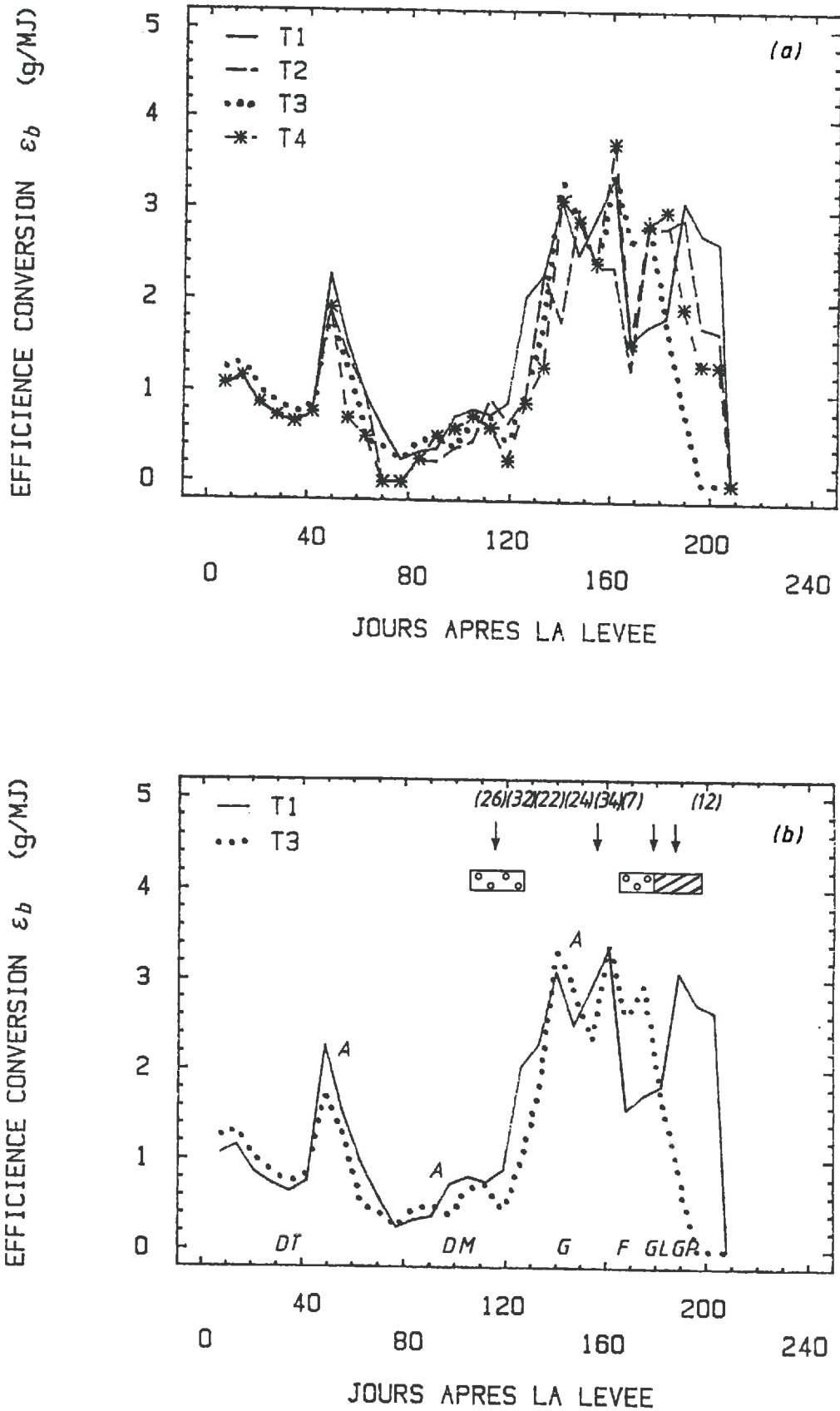


Figure V.6. Evolution de l'efficacité de conversion ϵ_b par périodes de 7 jours pour les quatre traitements (a) et pour les traitements 1 et 3 (b) pendant l'année 1987/88. Légende identique à celle de la Fig.V.1.

La figure V.6 montre que, pour la deuxième année, malgré le problème de la rouille, il y a eu une période plus grande dans laquelle les plantes ont montré une efficacité élevée de conversion de l'énergie absorbé en biomasse. La bonne distribution de pluies vérifiée avant la floraison, le troisième apport d'azote et l'apparition du stress hydrique plus tardif expliquent ce comportement.

La figure V.6b illustre bien les variations de ϵ_b en fonction du troisième apport d'azote sur les traitements 1 et 3, de l'incidence de la rouille sur T1 et du stress hydrique sur T3. L'apport d'azote a fait augmenter ϵ_b des deux traitements, tandis que la rouille a affecté plus sévèrement T1 que T3 pour des raisons déjà mentionnées. Par contre, après le contrôle de la maladie il y a eu une forte augmentation de ϵ_b pour T1 pendant trois semaines tandis que pour T3 ϵ_b a chuté très brusquement en fonction du stress hydrique. Ces trois dernières valeurs de ϵ_b du T1 sont difficiles à expliquer car à cette époque l'IFV était proche de zéro. Le traitement 2 a montré une réponse similaire mais la diminution de ϵ_b s'est vérifié plus tôt.

5.3.2.3. Effet de la fertilisation azotée sur l'efficacité ϵ_b

L'effet de la fertilisation azotée sur ϵ_b peut être évaluée soit sur l'évolution de valeurs hebdomadaires présentées auparavant soit sur les valeurs moyennes par phase phénologique (Tableaux V.1,2,3 et Fig.V.7).

L'évolution hebdomadaire de ϵ_b montre que, en absence de stress hydrique (ou de l'attaque de la rouille de la deuxième année), les traitements avec les doses plus élevées d'azote (T1 et T3) présentent les valeurs plus élevées de ϵ_b par rapport aux traitements moins fertilisés (T2 et T4). Cette réponse est associée à l'influence de l'azote sur l'indice foliaire et, par conséquent, sur l'interception du rayonnement solaire et notamment sur l'efficacité photosynthétique du couvert. Ces données sont en accord avec la littérature qui montre la liaison entre ϵ_b et la capacité photosynthétique du couvert qui est, elle-même, fonction de la teneur en azote et/ou de chlorophylle des feuilles (Natr, 1975; Evans, 1983; Sinclair et Horie, 1989).

Pour des valeurs intégrées sur l'ensemble du cycle, le traitement qui a reçu plus d'azote (T1) a montré des valeurs de ϵ_b supérieures de 14 et 11%, par rapport à celles du traitement 2, dans la première et la deuxième années, respectivement (Tableau V.3). Ces résultats sont similaires aux 11% d'augmentation de ϵ_b (de 2,8 à 3,1 g.MJ⁻¹), en fonction de la fertilisation azotée, qui ont été montrés par Gallagher et Biscoe (1978) mais inférieurs aux 19% (de 2.68 à 3.18 g.MJ⁻¹) de Garcia et al. (1988).

Les valeurs de ϵ_b intégrées dans l'ensemble du cycle (Tableaux V. 1,2) sont inférieures à celles trouvées dans les deux études citées auparavant, mais très proches des résultats montrés par Green (1987) lesquelles ont varié entre 1.02 et 1.83 g.MJ⁻¹. Quand on considère seulement la phase de croissance maximale (levée-floraison) des traitements irrigués, nos résultats montrent une moyenne de 1,34 g.MJ⁻¹ tandis que celle

Tableau V. 1. : Efficience ϵ_b en fonction des phases phénologiques du blé et des traitements de fertilisation azotée et de stress hydrique pendant l'année 1986/87. Les données entre parenthèses correspondent à l'intégration de la levée jusqu'à la phase en question et les chiffres à droite des valeurs de ϵ_b sont les erreurs types.

Phase phénologique	ϵ_b (g.MJ ⁻¹)			
	T1	T2	T3	T4
L - DM	0.71±0.10	0.68±0.08	0.72±0.08	0.70±0.07
DM - F	2.04±0.37	1.83±0.38	1.42±0.39	1.43±0.40
(L - F)	(1.38)	(1.26)	(1.07)	(1.07)
F - M	1.81±0.41	1.41±0.50	0.89±0.29	0.82±0.37
(L - M)	(1.52)	(1.31)	(1.01)	(0.98)

L = Levée, DM = début montaison, F = floraison, M = maturation.

Tableau V.2. : Efficience ϵb en fonction des phases phénologiques du blé et des traitements de fertilisation azotée et de stress hydrique pendant l'année 1987/88. Les données entre parenthèses correspondent à l'intégration de la levée jusqu'à la phase en question et les chiffres à droite des valeurs de ϵb sont les erreurs types.

Phase phénologique	ϵb (g.MJ ⁻¹)			
	T1	T2	T3	T4
L - DM	0.87±0.13	0.71±0.13	0.82±0.12	0.70±0.12
DM - F	2.15±0.31	1.73±0.27	2.07±0.40	1.85±0.40
(L - F)	(1.51)	(1.22)	(1.45)	(1.28)
F - M	2.00±0.46	1.99±0.46	0.92±0.49	0.73±0.45
(L - M)	(1.67)	(1.48)	(1.27)	(1.43)

L = Levée, DM = début montaison, F = floraison, M = maturation.

Tableau V. 3. : Effet de la fertilisation azotée sur l'efficacité ϵb pendant les phases phénologiques du blé pendant les deux années. Les chiffres entre parenthèses correspondent à l'intégration de la levée jusqu'à la phase en question.

Phase phénologique	Valeurs relatives de ϵb (%)			
	1986/87		1987/88	
	Irrigué (T2/T1)	Non irrigué (T4/T3)	Irrigué (T2/T1)	Non irrigué (T4/T3)
L-DM	96	97	82	85
DM-F	90	101	80	89
(L-F)	(91)	(100)	(81)	(88)
F-M	78	92	99	188
(L-M)cycle	(86)	(97)	(89)	(112)

L = Levée, DM = début montaison, F = floraison, M = maturation.

des toutes les données publiés par Green (1987) est de $1,67 \text{ g.MJ}^{-1}$. Malgré la difficulté de comparer résultats obtenus en conditions diverses, on peut dire qu'une des raisons de cette différence est liée aux faibles valeurs de ϵ_b pendant la phase levée-début montaison pour les deux années de l'expérimentation. Ces valeurs de ϵ_b auraient été certainement plus élevées avec un contrôle plus efficace de l'irrigation et, notamment, avec la possibilité d'irriguer les parcelles en cas de stress hydrique au début du cycle comme cela a été le cas en 1987/88. Cependant, ces irrigations doivent être bien contrôlées pour éviter le lessivage excessif des fertilisants et, particulièrement, de l'azote.

Un autre facteur qui a probablement contribué à l'obtention de faibles valeurs de ϵ_b est le type de sol qui, à cause de sa couche calcaire compacte à la profondeur de 50-55cm, rend très difficile le développement racinaire en profondeur.

5.3.2.4. Effet du stress hydrique sur l'efficience ϵ_b

Les effets principaux du stress hydrique sur les plantes sont souvent liés aux niveaux de croissance et/ou sénescence des feuilles, à la photosynthèse nette laquelle est influencée par le comportement des stomates et à la distribution des photoassimilats dans les différents organes de la plante (Slatyer, 1973; Slavik, 1975; Biscoe et al., 1976; Turner et Begg, 1981; Jordan, 1983). Ces effets du stress hydrique ont été observés dans nos résultats mais avec des conséquences variables en fonction de la sévérité du stress, de la phase phénologique de la culture et de son état de développement comme on verra dans la suite.

L'effet du stress hydrique sur ϵ_b a été plus sévère pour la première que dans la deuxième année, en raison de son intensité et de la phase phénologique de la culture. Ainsi, les fortes chutes de ϵ_b pendant la première période de déficit hydrique, entre les jours 144 et 173 après la levée (Fig.V.5), sont expliquées par son effet sur la réduction de la croissance de feuilles provoquant une diminution de l'indice foliaire vert. La capacité de produire les feuilles photosynthétiquement actives est l'un des facteurs plus importants pour la production des cultures (Monteith, 1977; Lawlor et al., 1981) mais il est aussi un des facteurs les plus sensibles au stress hydrique (Hsiao, 1973).

L'effet plus marqué du stress hydrique sur l'indice foliaire du traitement 3 par rapport au traitement 4 est dû, à une réduction plus brusque de la transpiration et, vraisemblablement, de la photosynthèse en raison de son indice foliaire plus élevé au moment du début du stress hydrique. Des réponses similaires ont été observées par d'autres auteurs (Legg et al., 1979; Stone et Steinmetz, 1979; Muchow, 1985). Cependant, à la fin de la période de stress hydrique (jour 173) les indices foliaires étaient très faibles pour les deux traitements et, par conséquent, avec une faible capacité photosynthétique. C'est, peut-être, pour cette raison que les valeurs de ϵ_b étaient similaires pour les deux traitements (Fig.V.5).

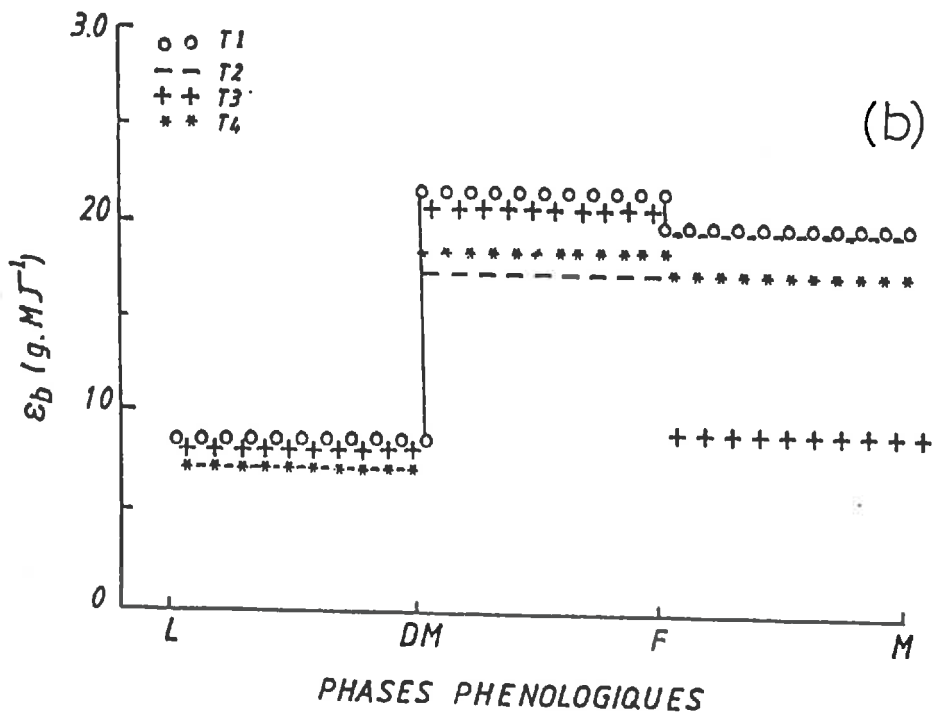
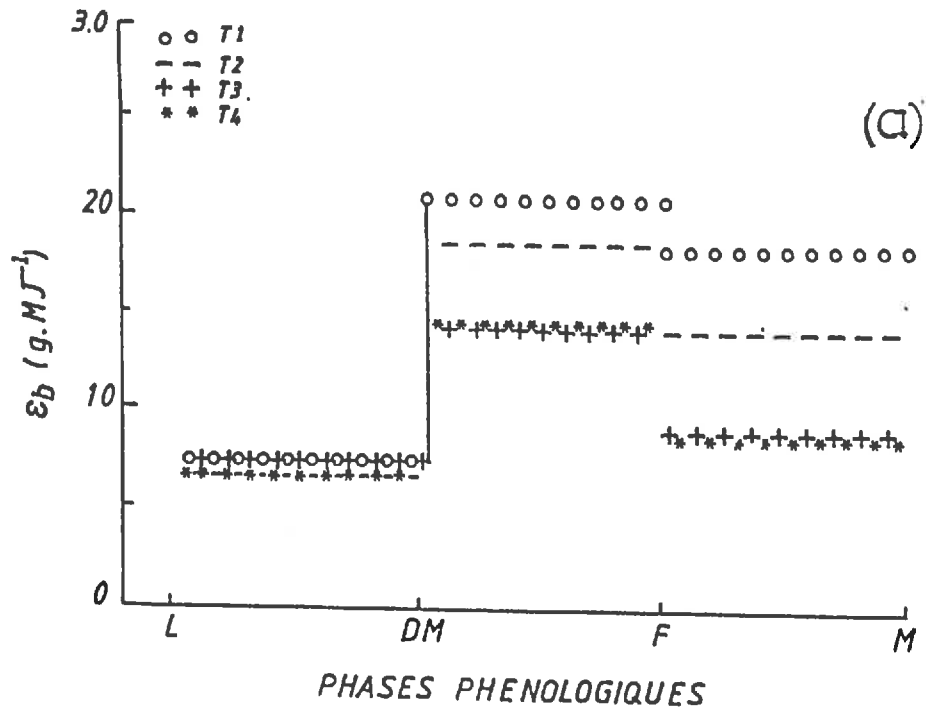


Figure V.7. Influence de la phase phénologique sur l'efficacité de conversion ϵ_b des quatre traitements pendant l'année 1986/87 (a) et 1987/88 (b). Les lettres indiquent les phases phénologiques comme sur la Fig.V.1.

L'analyse de l'effet du stress hydrique pour la deuxième année, qui est intervenu dans la phase de remplissage des grains, a été perturbée par l'incidence de la rouille qui a affecté différemment les traitements. Le traitement 3 a été le moins affecté par cette maladie mais a montré les chutes les plus accentuées de ϵb en fonction du stress hydrique (Fig.V.6b).

La diminution de ϵb du T3 semble être due à une accélération de la sénescence des feuilles, les empêchant soit de produire des photoassimilats soit de les transférer vers les grains (Lawlor et al., 1981; Jordan, 1983). Il est aussi possible que les températures plus élevées aient contribué à augmenter le taux de respiration des plantes provoquant une diminution de la photosynthèse nette et, par conséquent, de la matière sèche produite (McCree, 1974; Biscoe et Gallagher, 1977; Squire et al., 1984; Hodges et Kanemasu, 1977). Cette hypothèse est aussi valable pour l'année 1986/87, et peut-être avec plus de raisons parce que le stress a été plus sévère.

Lorsque l'on considère les valeurs de ϵb intégrées par phase phénologique ou sur l'ensemble du cycle, elles ont été plus affectées par le stress hydrique que par la fertilisation azotée. Le stress plus sévère de la première année (Tableau V.1 et Fig.V.7a) a provoqué des valeurs de ϵb faibles, mais similaires pour les traitements 3 et 4 pour les phases de début **montaison-floraison** et **floraison-maturation** pour des raisons déjà discutées. Par contre, pour la deuxième année, la chute de ϵb a été plus forte pour T3 que pour T4, au cours de la phase **floraison-maturation** (Tableau V.2 et Fig.V.7). Cette réponse semble être due à une chute plus brusque de la transpiration et de la photosynthèse en raison de son indice foliaire plus élevé au début de la période de stress hydrique (Legg et al., 1979; Muchow, 1985).

L'effet du stress hydrique sur les valeurs de ϵb , exprimé en pourcentage, est montré sur le tableau V.4, qui est un complément des tableaux V. 1 et 2.

5.3.2.5. Effet de la phase phénologique de la plante sur ϵb

Les tableaux V.1 et 2 et la figure V.7 montrent que la phase phénologique a une grande influence sur l'efficacité ϵb . Ainsi, elles sont plus élevées pendant la phase **début montaison-floraison** (DM-F), puis par la période après la floraison (F-M), tandis que les valeurs plus faibles sont observées pendant l'implantation de la culture (L-DM).

Lorsqu'elles sont intégrées pendant tout le cycle, les valeurs de ϵb pour les traitements irrigués (T1 et T2) ont été supérieures à celles des traitements non-irrigués (T3 et T4) comme on pouvait l'attendre. Ce comportement de T3 et T4 est justifié par les faibles valeurs de ϵb pendant les phases **début montaison-floraison** et **floraison-maturation**, à cause du stress hydrique qui est intervenu dans ces deux phases de la

Tableau V. 4. : Effet du stress hydrique sur l'efficacité ϵ_b pendant les phases phénologiques du blé pendant les deux années. Les chiffres entre parenthèses correspondent à l'intégration de la levée jusqu'à la phase en question.

Phase phénologique	Valeurs relatives de ϵ_b (%)			
	1986/87		1987/88	
	Azote 1* (T3/T1)	Azote 2* (T4/T2)	Azote 1* (T3/T1)	Azote 2* (T4/T2)
L-DM	101	103	94	99
DM-F	70	78	96	107
(L-F)	(77)	(85)	(96)	(105)
F-M	49	58	46	87
(L-M)cycle	(66)	(75)	(76)	(97)

L = Levée, DM = début montaison, F = floraison, M = maturation.

*Azote 1 et 2 = doses plus élevées et plus faibles d'azote, respectivement.

plante dans l'année 1986/87. En 1987/88 le stress hydrique a affecté plus sévèrement le traitement 3 faisant diminuer la valeur moyenne de ϵ_b dans la phase **floraison-maturation** (Tableau V.2).

Sur l'ensemble du cycle, les valeurs de ϵ_b de l'année 1987/88 sont plus élevées que celles de l'année 1986/87 vraisemblablement en fonction d'un apport supplémentaire d'azote fait vers le gonflement (jour 146), de la meilleure distribution des pluies et parce que le stress hydrique n'est arrivé qu'après la floraison.

Pendant les deux années de l'expérience l'effet des traitements sur ϵ_b est évident et notamment celui de l'irrigation. Cependant, les différences entre traitements n'ont pas pu être calculées statistiquement parce que le schéma expérimental utilisé et le mode de calcul de ϵ_b (moyenne par traitement) ne permettait pas d'avoir de répétitions spatiales mais seulement de répétitions temporelles.

Les résultats des tableaux V.1,2 et de la figure V.7 montrent que les valeurs de ϵ_b sont variables en fonction de la phase phénologique de la plante et, dans chaque phase, en fonction de la fertilisation azotée et du stress hydrique. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux de Gallagher et Biscoe (1978) et de Monteith et Elston (1983) qui montrent des valeurs constantes de ϵ_b pendant la phase de croissance maximale de la plante. Par contre, ils sont en accord avec d'autres auteurs qui ont montré que ϵ_b varie en fonction non seulement de la phase phénologique mais aussi de la fertilisation et des techniques culturales utilisés (Asrar et al., 1984; Garcia et al., 1988 Muchow et Davis, 1988).

Les faibles valeurs de ϵ_b , pour tous les traitements, pendant la phase initiale de la culture s'expliquent par l'évolution très lente des indices foliaires en fonction d'une alimentation hydrique non optimale, notamment pour l'année 1987/88. La seule prise en compte de la biomasse aérienne a probablement contribué aux faibles valeurs de ϵ_b car le poids des racines, pendant cette phase, correspond à 30-35% de la matière sèche totale de la plante (Gallagher et Biscoe, 1978; Green, 1987).

Les valeurs maximales de ϵ_b ont été observées pendant la phase **début montaison-floraison** puisque la croissance de la surface foliaire et, par conséquent, de la matière sèche produite a été aussi plus élevée dans cette phase. La même tendance a été observée par Garcia et al. (1988). Le stress hydrique a provoqué une diminution de ϵ_b à cause de la réduction de la surface photosynthétiquement active de la plante.

La diminution de ϵ_b après la floraison s'explique en partie par la réduction de la photosynthèse nette en fonction de la sénescence des feuilles qui s'accélère après cette phase comme cela a déjà été montré par d'autres auteurs comme Gallagher et Biscoe (1978) et Green (1987) sur le blé et par Muchow et Davis (1988) sur le sorgho et le maïs. Les traitements non-irrigués ont montré des valeurs de ϵ_b plus faibles pendant cette phase, à cause d'une sénescence plus accentuée (Jordan, 1983).

Un deuxième aspect important pour la phase après la floraison est que les photoassimilats (carbohydrates et azote) sont transférés des feuilles et d'autres organes de la plante vers les grains. En Angleterre, Marshall et Biscoe (1981), cités par Green (1987), ont montré qu'entre 50 et 70% d'azote a été transféré des feuilles sénescentes vers les grains. Lorsque peu d'azote est disponible dans le sol, l'augmentation de la demande de cet élément par les grains peut accélérer la sénescence des feuilles (Green, 1987). Cela pourrait être la raison de la réduction plus accentuée de ϵ_b pour le traitement qui a reçu moins d'azote (T2) par rapport à T1, dans l'année 1986/87 (Tableaux V.1,3). Par contre, pour l'année 1987/88 (Tableaux V.2,3), l'apport supplémentaire d'azote fait le jour 146, pour tous les traitements, semble avoir contribué à ce que la réduction de ϵ_b pour T1 soit inférieure à celle de l'année précédente. Pour T2, il y a même eu une augmentation de ϵ_b après la floraison. Cependant, il faut rester prudent sur cette hypothèse, parce que au cours de cette deuxième année il y a eu l'incidence de la rouille qui a affecté différemment les traitements. Ainsi, il est possible que les différences entre ϵ_b pour T2 avant et après la floraison (1,73 et 1,99 g.MJ⁻¹) soit dues non pas à la disponibilité d'azote mais à l'effet différencié de la maladie entre les deux phases.

Il faut remarquer que, pour les traitements irrigués et les deux années, les valeurs de ϵ_b intégrées sur l'ensemble du cycle ont été supérieures aux valeurs de ϵ_b de la levée à la floraison, ce qui est normalement, la phase de croissance maximale de la plante (Tableaux V.1,2). La raison de ce comportement semble être les valeurs très faibles de ϵ_b de la levée au début montaison. Une situation similaire a été observée par Green (1987) quand le développement du blé a été faible dans la phase initiale du cycle.

Dans une situation de développement normal de la culture du blé, Gallagher et Biscoe (1978) ont montré que l'efficacité ϵ_b , après l'épiaison, a été inférieure de 30% à celle observée avant l'épiaison. Ils ont donné deux explications pour ce comportement: 1) "l'efficacité photosynthétique est inférieure après l'épiaison parce qu'il n'y a pas de production de nouvelles feuilles et l'activité photosynthétique des feuilles existantes diminue avec l'âge; 2) la respiration, par unité de photoassimilats, augmente après la floraison ce qui diminue la production de matière sèche".

5.5. Conclusion

Les résultats de ce chapitre montrent que la fertilisation azotée et le stress hydrique ont affecté non seulement l'interception du rayonnement solaire par le couvert (ϵ_i) mais également l'efficacité avec laquelle ce rayonnement intercepté est transformé en matière sèche (ϵ_b). L'effet du stress hydrique a été plus accentué sur les valeurs de ϵ_b .

L'efficacité ϵ_b a été affectée non seulement par la phase phénologique de la culture, par la fertilisation azotée et par le stress hydrique mais aussi par le niveau de développement de la culture au moment du stress hydrique. Ces données confirment les études faites dernièrement (Varlet-Grancher, 1982; Asrar et al., 1984; Garcia et al., 1988) qui caractérisent la variabilité de ϵ_b tandis que les premières expériences (Gallagher et Biscoe, 1978; Monteith et Elston, 1983) montraient que ϵ_b n'était pas affectée par ces différents facteurs notamment dans la phase de croissance plus active (levée-floraison).

Les résultats suggèrent une interaction entre la fertilisation azotée et le stress hydrique puisque le traitement 3, qui avait un indice foliaire plus développé, a montré les chutes plus fortes de l'indice foliaire aussi bien que de ϵ_b . Ces réponses sont dues à une demande plus élevée de transpiration au moment de l'arrivée du stress hydrique.

Les résultats obtenus dans ce chapitre nous invitent à la réflexion suivante: en estimant l'efficacité ϵ_i et en utilisant les valeurs de ϵ_b obtenues en conditions non-limitantes on peut estimer la production maximale de matière sèche d'une culture dans une région quelconque en fonction de la durée de son cycle et de la disponibilité d'énergie pendant cette période comme a été montré par Gosse et al., (1986). Cependant, la question qu'on doit se poser est la suivante:

comment peut on estimer la production réelle de matière sèche d'une culture faite en conditions non-optimales si l'efficacité ϵ_b est affectée par plusieurs facteurs et notamment par le stress hydrique?

Nos résultats nous indiquent le chemin suivant: en considérant que ϵ_i peut être estimé à partir de la réflectance spectrale, comme a été montré dans le chapitre IV, il faut estimer parallèlement un indice de stress hydrique qui puisse affecter la matière sèche produite ou l'efficacité ϵ_b obtenues en conditions optimales. C'est cette voie que nous allons explorer dans le dernier chapitre.

CHAPITRE 6

CHAPITRE VI. RELATIONS ENTRE LES INDICES DE STRESS HYDRIQUE ET LA PRODUCTION DE MATIERE SECHE ET/OU L'EFFICIENCE ϵ_b

6.1. Introduction

Dans le chapitre III, nous avons montré que l'effet du stress hydrique a été bien caractérisé par les mesures d'évapotranspiration (E_{Tr}), du rapport E_{Tr}/E_{Tp} et de la température de surface (T_s-T_a). Nous avons ensuite évalué l'effet du stress hydrique et de la fertilisation azotée sur les efficacités d'interception du rayonnement solaire (ϵ_i) et de transformation en matière sèche ce rayonnement intercepté (ϵ_b). Il nous reste, dans un chapitre de synthèse, à mettre en relation les paramètres biologiques (tels que la matière sèche produite pendant le cycle et/ou l'efficacité ϵ_b) et les paramètres physiques (E_{Tr} , rapport E_{Tr}/E_{Tp} ou ΣT_s-T_a).

6.2. Resultats et discussion

6.2.1. Relations entre la matière sèche et les paramètres indicateurs de l'état hydrique de la culture.

6.2.1.1. Relations entre la matière sèche et l'évapotranspiration

La figure VI.1 montre qu'en conditions d'alimentation hydrique non-limitantes (T1), la production de biomasse augmente avec la consommation en eau de la culture. Par contre, le manque d'eau occasionne une diminution de la production de biomasse, vraisemblablement en raison de la fermeture des stomates qui provoque, par conséquent, une réduction de la photosynthèse et de la transpiration des plantes. La différence des pentes de l' E_{Tr} et de la production de biomasse pour les traitements 1 et 4 illustre bien l'importance de l'irrigation pour ces deux paramètres.

La figure VI.1 montre aussi que l'évapotranspiration, malgré un changement de sa pente, a continué même après l'asymptote maximale de production de biomasse quand la sénescence des feuilles était presque totale. Cette situation est bien illustré pour le traitement 4 de l'année 1986/87 (Fig.VI.1a) lorsque l'irrigation du jour 206 et les pluies qui sont tombées après cette date ont provoqué une récupération de l' E_{Tr} . Dans ce cas, c'est l'évaporation du sol qui constitue le principal composant du transfert d'eau vers l'atmosphère.

La regression entre l'évapotranspiration cumulée et la matière sèche cumulée, en utilisant uniquement la période de croissance plus active des plantes, les deux années et les deux traitements confondus, est représentée par une équation linéaire (Fig.VI.2). La pente de cette équation est connue comme "efficacité de l'utilisation de l'eau par la culture". La pente de la regression indique une production de 3,53 grammes de matière sèche par mètre carré, pour chaque millimètre d'eau consommé par la culture. Cette valeur est très proche de celles observées par Magrin (1990) en

(X 100)

230

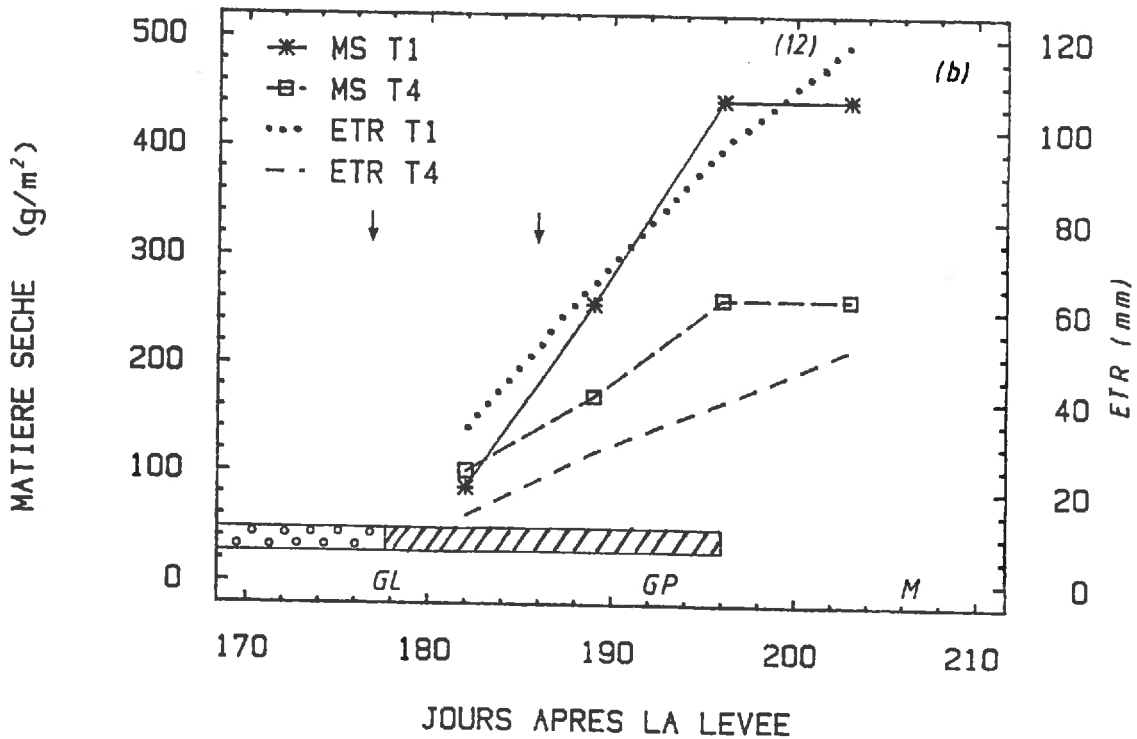
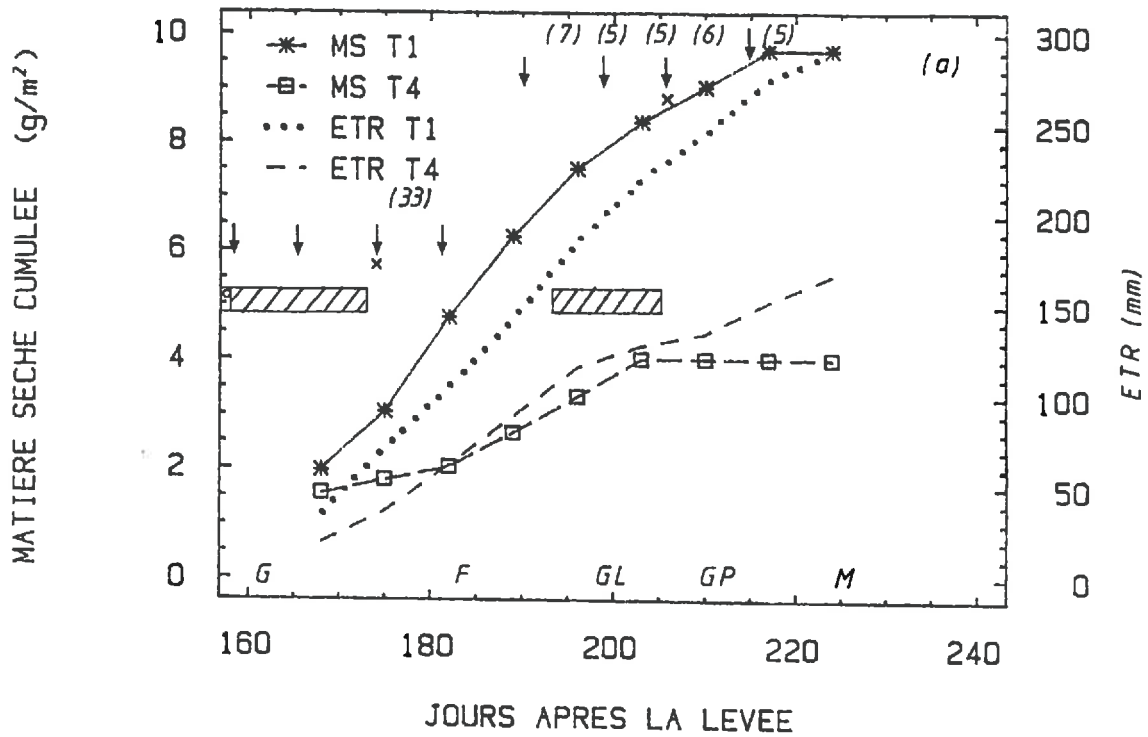


Figure VI.1. Evolution des valeurs hebdomadaires cumulées de matière sèche et d'évapotranspiration réelle (ETr) pour les traitements 1 et 4 dans les années 1986/87 (a) et 1987/88 (b). Légende: G=Gonflement; F=Floraison; GL=Grain laiteux; GP=Grain pâteux; M=Maturation; (▼)=Irrigation T1 et T2; (×)=Irrigation T3 et T4; ○○○○ = Stress hydrique modéré; ▨ = stress hydrique sévère; chiffres entre parenthèses = pluie.

Argentine pour les différentes phases du blé et qui ont varié entre les limites de $3,54 \text{ g.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$ pour la phase de montaison jusqu'à $4,42 \text{ g.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$ pendant le tallage. Notre résultat est légèrement inférieur à celui de $3,9 \text{ g.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$ trouvé par Howel et Musick (1985) ce qui est expliqué par le fait que notre relation a été construite en utilisant uniquement les périodes pour lesquelles on disposait de mesures d'ETr. Ces mesures n'ont pas été faites pendant la phase de plus forte croissance végétative, mais à partir du gonflement dans la première année et après la floraison dans la deuxième année quand la sénescence des feuilles avait déjà commencé.

6.2.1.2. Relations entre la production de matière sèche et la température de surface

L'évolution de la matière sèche produite et la somme des valeurs positives de l'écart $T_s - T_a$ (SDD) (Fig.VI. 3 et 4) illustre bien la forte influence de l'irrigation sur ces variables. Ainsi, pour la première année (Fig.VI.3), le SDD est resté proche de zéro pour le traitement irrigué (T1) pendant presque toute la période de mesure à l'exception de la fin du cycle (à partir du jour 210) quand la pente du SDD a augmenté plus significativement. Cette période correspond à la sénescence complète des feuilles et à l'asymptote maximale de la matière sèche.

L'augmentation de la température des feuilles par rapport à celle de l'air, pendant la sénescence et/ou les périodes de sévère stress hydrique, est expliqué par le manque du mécanisme de refroidissement des feuilles (transpiration) pour dissiper la chaleur due à l'absorption du rayonnement solaire (Jackson, 1982).

La relation entre le SDD et la matière sèche produite est complètement différente pour le traitement affecté par le stress hydrique (T4). Ainsi, la pente de cette relation est plus forte pour les deux périodes de stress hydrique et plus faible après l'irrigation du jour 174 et la pluie de 33mm du jour 178. L'asymptote maximale de la matière sèche a été atteinte environ deux semaines avant celle du T1, en raison de la sénescence précoce des feuilles ce qui a provoqué une augmentation encore plus forte de l'écart $T_s - T_a$.

Pour la deuxième année, la relation entre le SDD et la matière sèche a été similaire à celle observée l'année précédente. Cependant, la mesure de la température de surface avec le pistolet, sur les quatre traitements, nous permet d'évaluer l'effet du stress hydrique pour deux traitements ayant reçu la même fertilisation azotée. La figure VI.4 montre que, pendant la période de mesures de T_s , la production de biomasse a été plus élevée pour les traitements stressés (T3 et T4) par rapport aux traitements irrigués (T1 et T2). Ce comportement est expliqué par l'incidence de la rouille, qui a affecté moins sévèrement les traitements avec un microclimat plus sec, comme a été montré dans le chapitre V. Les différences sont plus faibles entre les traitements T2 et T4 (Fig.VI.4b) vraisemblablement en raison d'un microclimat moins humide à cause des couverts moins denses (indices foliaires plus faibles) favorisant l'aération à l'intérieur du couvert.

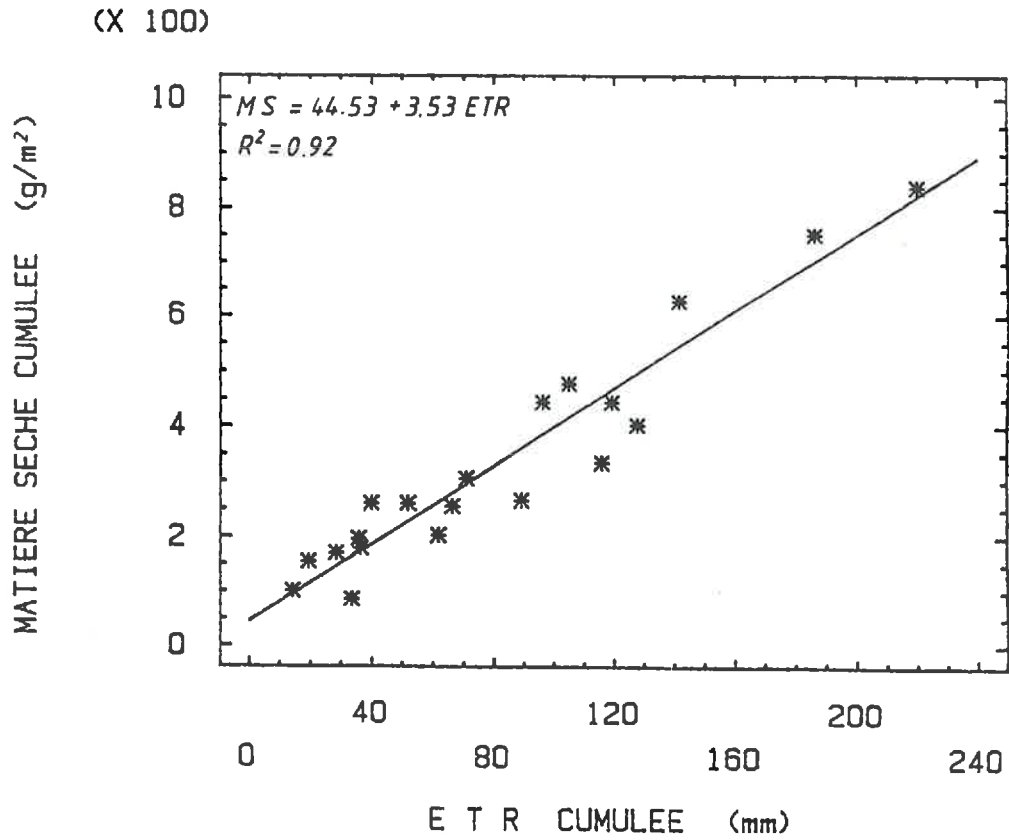


Figure VI.2. Regression entre les valeurs hebdomadaires cumulées de matière sèche et d'évapotranspiration réelle (ETr) pour les deux années d'expérimentation.

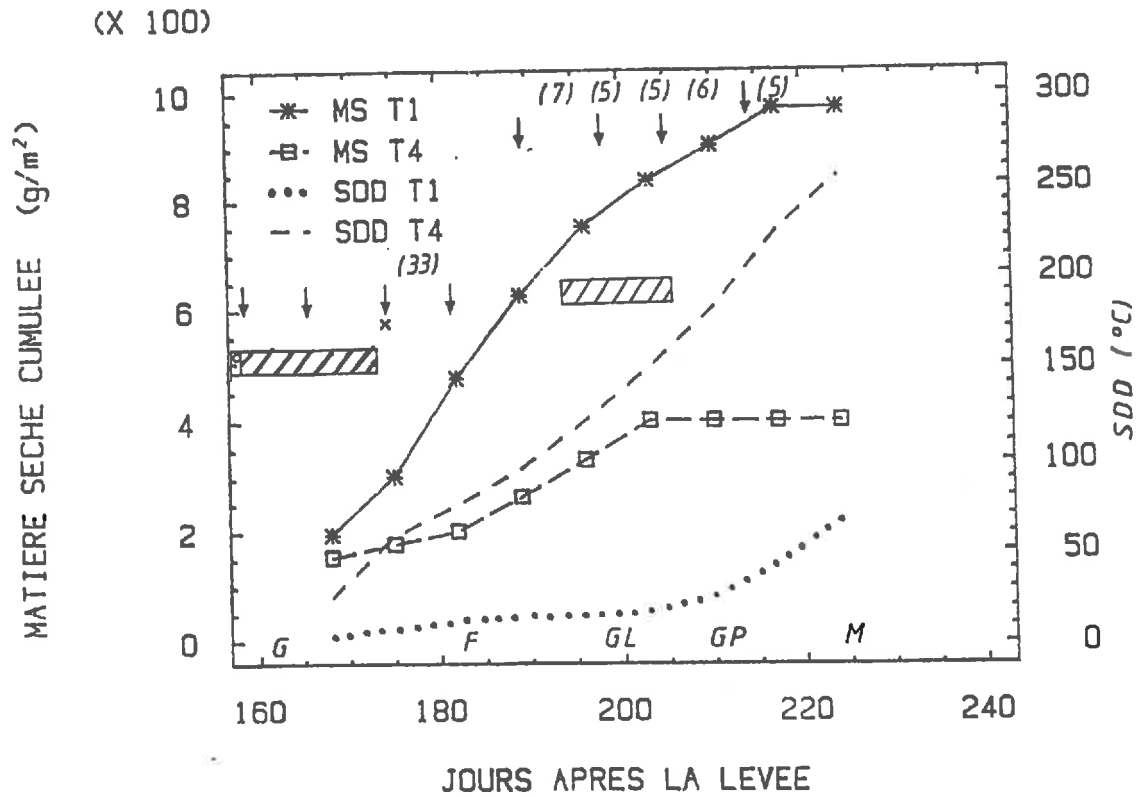


Figure VI.3. Evolution des valeurs hebdomadaires cumulées de matière sèche et de l'écart $T_s - T_a$ (SDD) pour les traitements 1 et 4 en 1986/87.

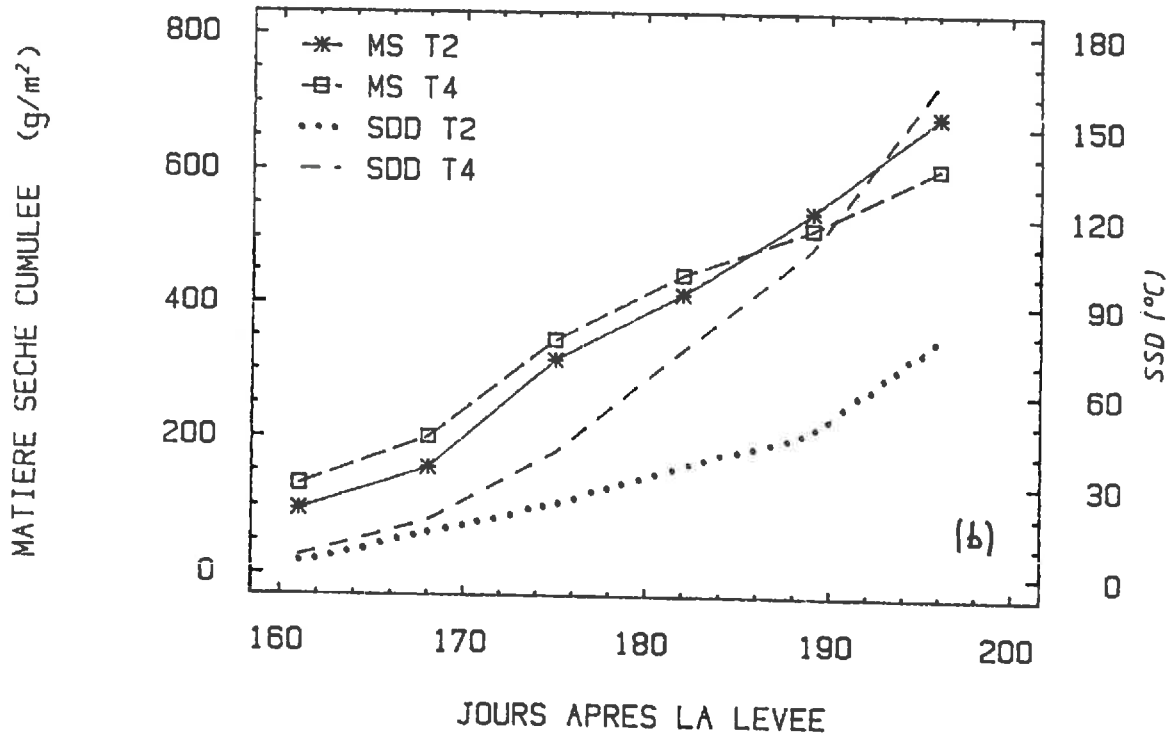
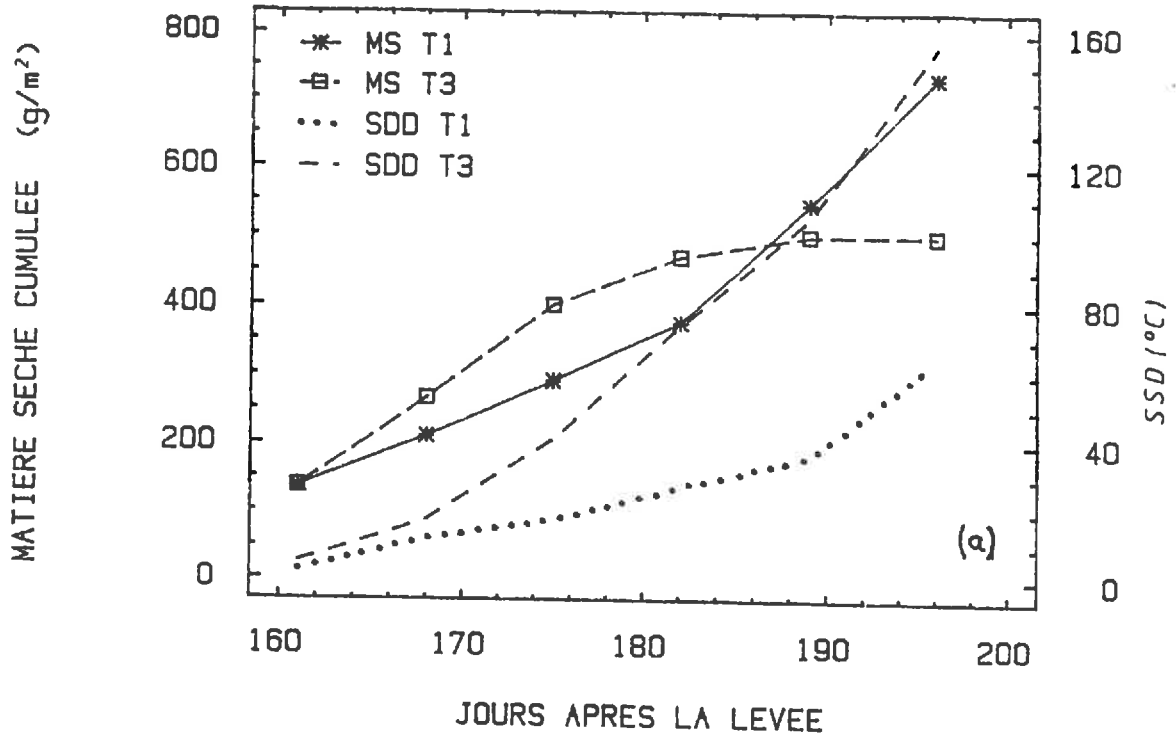


Figure VI.4. Evolution des valeurs hebdomadaires cumulées de matière sèche et de l'écart $T_s - T_a$ (SDD) en 1987/88 pour les traitements 1 et 3 (a) et 2 et 4 (b).

Ces résultats montrent nettement la liaison entre la production de matière sèche et l'évapotranspiration en ce qui concerne les données cumulées. Ils ouvrent la perspective d'utilisation conjointe des modèles basés sur l'interception du rayonnement solaire (Monteith, 1972, 1977) et ceux basés sur la transpiration ou l'évapotranspiration des plantes (De Witt, 1958). Cependant, dans une approche plus opérationnelle, il est important d'évaluer les relations entre la production de biomasse et les paramètres indicateurs du stress hydrique pour des périodes plus courtes. On peut ainsi envisager une éventuelle correction de la biomasse produite par l'application d'un indice de stress hydrique. C'est dans ce sens que nous allons développer le sous-chapitre suivant en faisant intervenir, non plus la matière sèche cumulée mais les valeurs hebdomadaires de l'efficacité ϵ_b .

6.2.2. Relations entre l'efficacité ϵ_b et les paramètres indicateurs de l'état hydrique de la culture.

6.2.2.1. Relations entre l'efficacité ϵ_b et l'évapotranspiration

La figure VI.5 caractérise bien la relation linéaire des données hebdomadaires de l'efficacité ϵ_b avec l'évapotranspiration réelle E_{Tr} et le rapport E_{Tr}/E_{Tp} . La même tendance est observée pour la régression entre ϵ_b et E_{Tr}/R_n (Fig. VI.6a). Ces équations représentent les données des deux années et des deux traitements confondus. Il faut préciser que les données plus aberrantes, notamment ceux liés à l'incidence de la rouille dans la deuxième année, ont été éliminées.

La dispersion relativement importante des points de la régression entre ϵ_b et l' E_{Tr} et/ou le rapport E_{Tr}/E_{Tp} sont partiellement expliquées par les conditions dans lesquelles l'expérimentation a été faite et par les caractéristiques climatiques particulières de la région. Plus particulièrement, les facteurs qui semblent avoir contribué à augmenter la dispersion des données ont été les suivants:

1) Facteurs associés au lieu de l'expérimentation:

Le fait d'avoir réalisé l'étude en plein champ n'a pas permis de contrôler certains facteurs perturbateurs au bon développement de la culture. Ces facteurs sont plus facilement contrôlables dans des petites parcelles situées dans les domaines d'une station expérimentale. L'exemple le plus marquant a été l'incidence de la rouille dans la deuxième année qui, ayant été contrôlée avec un peu de retard, a provoqué une réduction sensible de l'efficacité ϵ_b et notamment pour les traitements irrigués (T1 et T2).

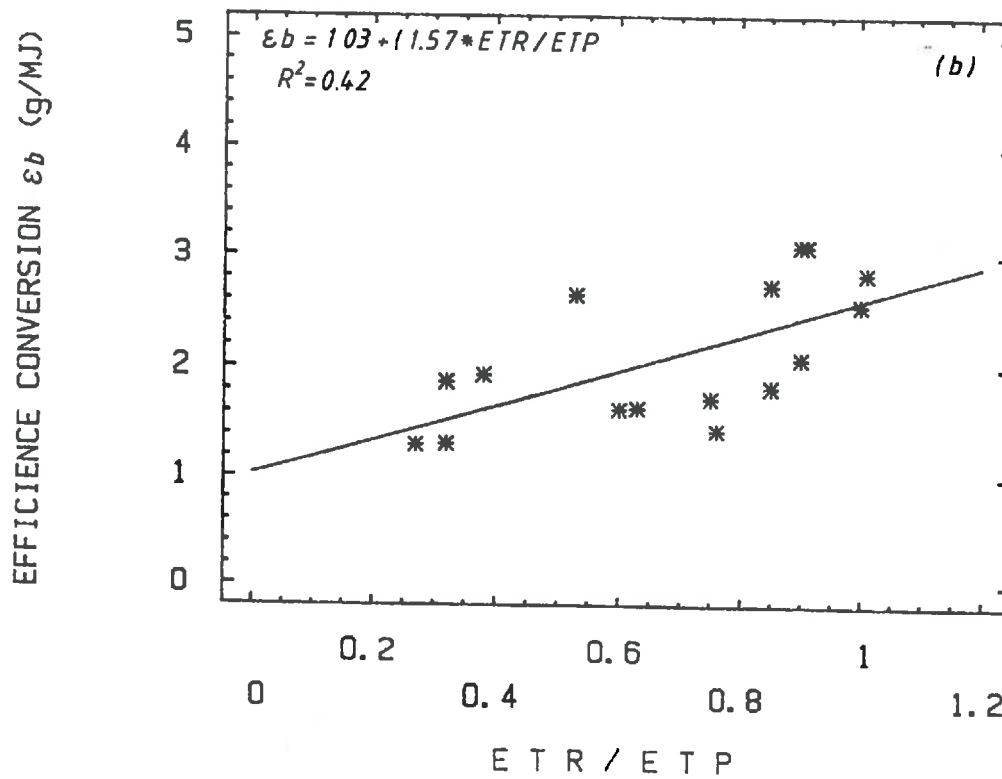
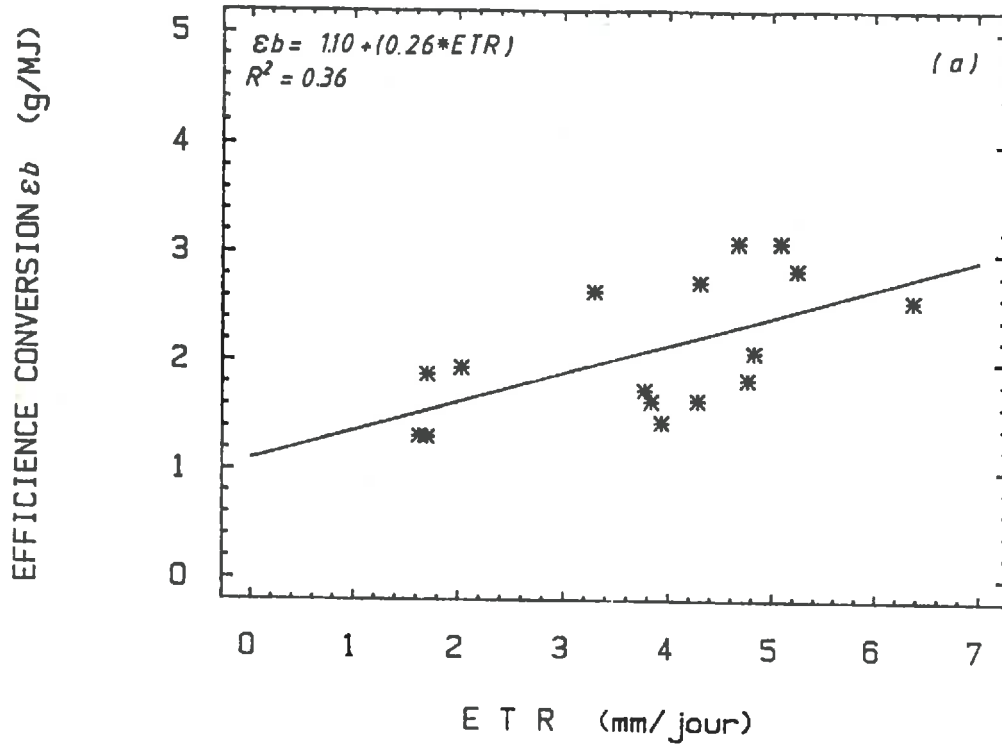


Figure VI.5. Regression entre les valeurs hebdomadaires de l'efficacité ϵ_b et l'évapotranspiration réelle (a) et le rapport ET_r/ET_p (b).

2) Facteurs liés aux mesures biologiques et physiques:

Le calcul des valeurs de ϵ_b pour des périodes hebdomadaires, associé aux autres facteurs qui l'ont fait varier, semble avoir contribué de façon importante dans la dispersion des points des figures VI.5 et 6. On pourrait s'attendre à une variabilité moins importante par l'utilisation de périodes plus longues d'intégration des valeurs de ϵ_b . Cependant, pour le suivi agronomique de la culture, et notamment des facteurs liés au stress hydrique, le pas de temps ne peut pas être trop long. Un pas de temps de l'ordre de la semaine semble être approprié.

Cette dispersion a été, vraisemblablement, aussi affectée par le niveau de précision avec laquelle l' E_{Tr} a été mesuré. Selon Seguin (1989) la détermination de l' E_{Tr} par la combinaison de l'équation du bilan d'énergie et de l'expression aérodynamique du flux de chaleur sensible (méthode utilisée dans cette étude) se situe dans une gamme de précision de 10 à 15%.

3) Facteurs liés au climat:

L'incidence du Mistral qui a parfois soufflé très fortement (jusqu'à $9,6 \text{ m.s}^{-1}$ comme moyenne journalière) semble avoir aussi contribué à la dispersion des données des figures VI.5 et 6.

-Au niveau de la culture, l'exemple le plus marquant a été lié aux indices foliaires des traitements 3 et 4, qui ont été fortement réduits par le fort vent (de $6,3$ à $9,6 \text{ m.s}^{-1}$) qui a soufflé pendant quatre journées consécutives à partir du jour 164 de l'année 1986/87. Le vent, en augmentant la demande évaporative, a non seulement aggravé le stress hydrique des traitements non-irrigués mais a également fait chuter l'indice foliaire des traitements irrigués T1 et T2 (Fig.IV.1).

-Le vent semble avoir aussi affecté les mesures micrométéorologiques et notamment le rapport E_{Tr}/E_{Tp} , qui a montré des valeurs plus faibles avec des vents forts, comme il a été montré dans le chapitre III.

6.2.2.2. Relations entre l'efficacité ϵ_b et la température de surface

L'efficacité ϵ_b a montré une relation linéaire inverse avec la somme de l'écart $T_s - T_a$ pour des périodes de 7 jours, avec une dispersion plus faible ($R^2 = 0,54$) par rapport aux régressions de ϵ_b avec les paramètres basés sur l'évapotranspiration.

Il faut rappeler que les données de T_s et T_a correspondent, respectivement, à la température prise avec le radiothermomètre Heiman KT 17 (visée verticale) vers 14h00 TU et la température maximale journalière de l'air. Cet horaire de mesure de T_s est adopté en fonction des applications possibles dans le domaine de la télédétection et correspond à l'heure de passage du satellite NOAA-AVHRR. On peut s'attendre à un changement de la pente de la régression entre ϵ_b et SDD si les données

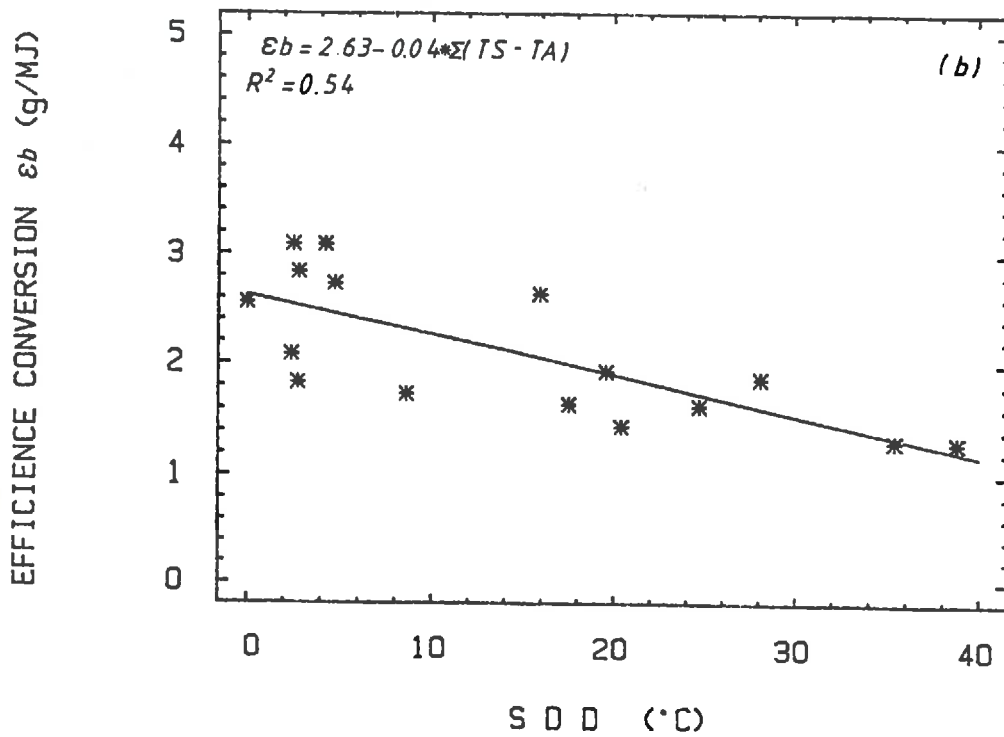
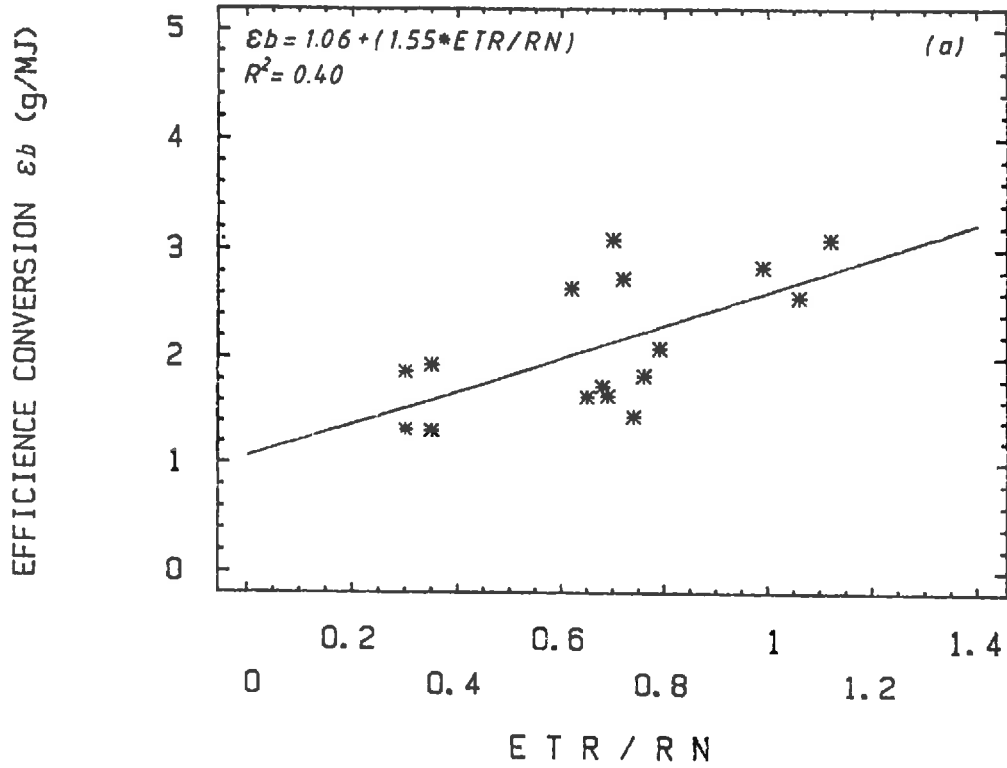


Figure VI.6. Regression entre les valeurs hebdomadaires de l'efficiency ϵ_b et le rapport ETr/Rn (a) et le cumul de $T_s - T_a$ (SDD) (b).

de T_s sont prises vers le midi solaire, puisqu'à ce moment la température de surface est plus élevée par rapport à celle de 14h00 TU. Cette constatation a été faite par Seguin et al. (1986) et par Vidal et al. (1987) lorsque les données de T_s - T_a , T_s étant obtenue à partir des images satellitaires, ont été corrélées avec celles de E_{Tr} - R_n pour établir la relation simplifiée d'estimation d' E_{Tr} .

Les relations entre ϵ_b et les paramètres indicateurs de l'état hydrique de la culture ont été établies en utilisant les périodes pour lesquelles nous disposions des mesures des paramètres concernés. Cependant, il faut rappeler que la majorité des données correspondent à la période après le gonflement pour la saison 1986/87 et à partir du stade de grain laiteux pour la saison suivante. Dans ces périodes, et notamment dans la deuxième année, la culture était en sénescence progressive ce qui a provoqué une diminution de l'efficacité ϵ_b pour la phase floraison-maturation, particulièrement pour les traitements stressés. Ainsi, on peut s'attendre à un changement des relations entre ϵ_b et les paramètres indiqués dans les figures VI.5 et 6 par l'inclusion des données concernant la phase initiale de la culture. Cette hypothèse est basée sur la dépendance de ϵ_b de la phase phénologique comme l'indiquent les données des figures V.5 et 6 et des tableaux V.1 et 2.

6.3 Conclusion

La relation linéaire trouvée entre les valeurs hebdomadaires cumulées de matière sèche et les indices basés sur l'évapotranspiration et sur la température de surface caractérisent bien la similarité des processus liés à l'efficacité photosynthétique et à la transpiration des plantes.

Une relation linéaire a aussi été trouvée entre les valeurs hebdomadaires de l'efficacité ϵ_b et les variables liées à l'évapotranspiration et à la température de surface. Cependant, la dispersion des données a été plus importante que celle des données cumulées comme on pourrait s'attendre. Cette dispersion semble avoir été affectée par les facteurs associés au lieu de l'expérimentation, à la précision des mesures biologiques et physiques et au climat notamment le vent fort (Mistral), typique de la région de la basse vallée du Rhône.

Les résultats trouvés dans ce chapitre suggèrent la possibilité d'estimer la production de matière sèche d'une culture en utilisant la combinaison des modèles d'interception du rayonnement solaire comme celui proposé par Monteith (1972, 1977) avec des modèles d'évapotranspiration. Le principe d'utilisation de ces deux modèles serait le suivant:

a) le modèle d'interception pourrait estimer la production maximale espérée pour une culture en fonction de:

-la détermination du rayonnement intercepté (ϵ_i) par la culture tout au long de son cycle; l'estimation de cette variable pourrait se faire à l'aide de la réflectance spectrale comme on l'a montré dans le chapitre IV;

-l'utilisation des valeurs maximales de ϵ_b (obtenues en conditions idéales de fertilisation et d'alimentation en eau) associée à celles de ϵ_i mesurée, indiquerait la production maximale ou de référence pour la culture en question;

b) le modèle d'évapotranspiration fournirait l'indice de l'état hydrique de la culture qui corrigerait la production maximale. Cette production de matière sèche corrigée constituerait la production réelle espérée pour la culture. L'utilisation de cette approche serait basée sur l'hypothèse que le stress hydrique serait le seul responsable des réductions par rapport à la production maximale.

Cette approche paraît, à l'heure actuelle, la seule susceptible de permettre l'estimation de la biomasse à partir des données satellitaires par une voie analytique. Une démarche similaires a été utilisée par Asrar et al.(1985) en combinant les données de réflectance spectrale et de l'infrarouge thermique avec de résultats plutôt encourageants. Cependant, ces auteurs ont utilisé un indice de stress hydrique basé sur le rapport E_{Tr}/E_{Tp} pré-établi par Hodges et Kanemasu (1977).

Dans notre cas, les résultats obtenus (et essentiellement ceux reliant ϵ_b au rapport E_{Tr}/E_{Tp} ou au SDD) sont à la fois encourageants et problématiques, compte tenu des coefficients de détermination obtenus (respectivement $R^2=0,42$ et $0,54$). Ceux-ci sont à la fois suffisamment élevés pour montrer que l'approche paraît réaliste et trop faibles pour proposer une application opérationnelle. Des travaux complémentaires sont donc encore nécessaires pour approfondir cette relation, en tenant compte des enseignements et des limites de notre travail.

CONCLUSION GENERALE

ET

PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'expérimentation s'est développée pendant deux campagnes de mesures (1986/87 et 1987/88), avec des conditions climatiques distinctes notamment en ce qui concerne la quantité et la distribution de pluies pendant le cycle du blé. Les quatre traitements (deux niveaux de fertilisation azotée et deux niveaux d'irrigation) ont provoqué différents niveaux non seulement de matière sèche mais également de stress hydrique subi par la culture.

L'état hydrique de la culture a été bien caractérisé par les données de l'évapotranspiration réelle (E_{Tr}) et de la température de surface. Le traitement irrigué (T1), par rapport au traitement non-irrigué (T4), a montré des valeurs plus élevées d'E_{Tr}, du rapport E_{Tr}/E_{Tp} et plus faibles de température de surface (T_s-T_a). L'E_{Tr} a été, en général, entre 4 et 6 mm.jour⁻¹ et 2 et 4 mm.jour⁻¹, respectivement, pour les traitements irrigués et non-irrigués. L'écart maximum de T_s-T_a entre ces deux traitements a atteint des valeurs entre 8 et 10°C.

Le rapport E_{Tr}/E_{Tp} a montré des valeurs proches de 1 pour le traitement irrigué (T1) et nettement au-dessous de cette valeur pour le traitement stressé (T4). L'influence des vents forts (Mistral) typiques de la région de la basse vallée du Rhône semble avoir provoqué une surestimation de l'évapotranspiration potentielle (E_{Tp}) vraisemblablement due au fait que les coefficients de la partie aérodynamique de l'équation de Penman n'ont pas été totalement ajustés pour la région.

La réflectance spectrale a bien caractérisé les variations de l'indice foliaire vert, soit dans les bandes du rouge et du proche infrarouge individuellement, soit par sa combinaison sous la forme du rapport PIR/R. L'analyse de régression a montré que l'indice PIR/R explique 90 pour cent des variations des IFV et qu'il existe une relation linéaire entre ces deux variables. Cependant, la réponse spectrale a montré une saturation en fonction de l'indice foliaire, qui s'est située entre 2,5 et 3 dans le rouge, entre 3 et 5,2 dans le PIR et entre 4 et 4,5 pour le rapport PIR/R. Ceci entraîne des difficultés d'utilisation non seulement de cet indice, mais également d'autres indices basés sur la réflectance du rouge et du proche infrarouge pour des cultures avec indices foliaires plus élevés.

Une relation linéaire a été trouvée entre l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (P.A.R.), mesurée à partir des photos hémisphériques, et les indices de végétation PIR/R et différence normalisée (DN).

L'influence de la fertilisation azotée a été plus accentuée sur ϵ_i en raison de son effet sur l'indice foliaire. Par contre, l'effet du stress hydrique a été plus fort sur les valeurs de ϵ_b . Ces résultats confirment ceux des travaux précédents qui indiquent l'influence plus marquée du stress hydrique sur ϵ_b par rapport à ϵ_i lorsqu'il intervient dans la phase finale du cycle de la culture.

L'efficacité ϵ_b a été affectée non seulement par la phase phénologique, par la fertilisation azotée et par le stress hydrique mais aussi par le niveau de développement de la culture au moment du stress hydrique. Ces résultats confirment les études faites dernièrement, par d'autres auteurs, caractérisant la variabilité de ϵ_b en fonction de différents facteurs, contrairement aux premières expériences qui montraient des valeurs constantes de ϵ_b pendant la phase de croissance plus active de la plante (levée-floraison).

Les résultats suggèrent une interaction entre la fertilisation azotée et le stress hydrique puisque le traitement 3, qui avait un indice foliaire plus développé a montré les chutes plus fortes de l'indice foliaire aussi bien que de ϵ_b . Ces réponses sont dues à une demande plus élevée de transpiration au moment de l'arrivée du stress hydrique et confirment les résultats trouvés par d'autres auteurs.

La relation linéaire trouvée entre les valeurs cumulées de matière sèche, de l'évapotranspiration et de l'écart $T_s - T_a$ (Stress Degree Day) caractérisent bien la similarité des processus liés à l'efficacité photosynthétique et à la transpiration des plantes.

Une relation linéaire a aussi été trouvée entre les valeurs hebdomadaires de l'efficacité ϵ_b et les variables liées à l'évapotranspiration (E_{Tr} , E_{Tr}/E_{Tp} , E_{Tr}/R_n) et à la température de surface (SDD). Cependant, la dispersion des données a été plus importante que celle des données cumulées, comme on pouvait l'attendre. Cette dispersion semble avoir été affectée par les facteurs associés au lieu de l'expérimentation, à la précision des mesures biologiques et physiques et au climat notamment le vent fort (Mistral), typique de la région de la basse vallée du Rhône.

Les résultats trouvés dans cette étude indiquent la possibilité d'estimer la production de matière sèche d'une culture en utilisant la combinaison des modèles d'interception du rayonnement solaire comme celui proposé par Monteith (1972, 1977) avec des modèles basés sur l'évapotranspiration ou la température de surface. Cette approche paraît, à l'heure actuelle, la seule susceptible de permettre l'estimation de la biomasse à partir des données satellitaires par une voie analytique en combinant les rayonnements du visible et du proche infrarouge.

Nos résultats (et essentiellement ceux reliant ϵ_b au rapport E_{Tr}/E_{Tp} ou au SDD) sont à la fois encourageants et problématiques, compte tenu des coefficients de détermination obtenus (respectivement $R^2=0,42$ et $0,54$). Ceux-ci sont à la fois suffisamment élevés pour montrer que l'approche paraît réaliste et trop faibles pour proposer une application opérationnelle. Des travaux complémentaires sont donc encore nécessaires pour approfondir cette relation, en tenant compte des enseignements et des limites de notre travail.

Il nous paraît que les recherches futures sur ce sujet peuvent être séparées en deux étapes. Dans une première étape, la priorité serait faire des études de base pour

essayer d'améliorer les coefficients de détermination de la regression entre les valeurs de ϵb hebdomadaires et les indices de stress hydrique. Sans doute faudrait-il aussi introduire les effets thermiques qui sont nécessairement associés au stress hydrique. Pour cela, les études doivent être faites en conditions expérimentales qui permettent un contrôle plus efficace des variables étudiées. Si ces études confirment la validité de cette approche, on pourrait passer à une deuxième étape déjà plus appliquée qui consisterait en:

- déterminer les valeurs maximales de production de matière sèche et/ou ϵb pour une région donnée pour des cultures maintenues en conditions optimales de développement pendant tout le cycle;

- établir les fonctions de réduction de production de matière sèche et/ou ϵb dues au stress hydrique pour les différentes phases phénologiques de la plante.

Enfin, il serait intéressant d'évaluer la performance de cette approche de type semi-empirique par rapport à des approches plus déterministes d'estimation de la matière sèche et du rendement (Ex. modèles Ceres-Blé, Arcwheat, etc.)

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Ajai, S.M.N., Kamat, D.S., Aggarwal, P.K. and Sinha, S.K., 1984. Spectral estimates of intercepted photosynthetically active radiation by wheat canopies. Proc. of crop growth conditions and remote sensing. 22-23 June 1984, ISRO-IARI:411-419.

Ahlich, J.S. and Bauer, M.E., 1983. Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat canopies. *Agron.J.*, 75: 987-993.

Allirand, J.M., Chartier, M., Gosse, G., 1988. Estimation de l'efficience de l'interception d'un couvert de luzerne à partir d'un indice de végétation. In: 4^{ème} Coll.Int.Signat.Objets Télédétec. Aussois, France, 18-22 Janvier, 1988. ESA SP-287, p.163-166.

Anderson, M.C., 1964. Studies of the woodlands light climate. 1. The photographic computation of light conditions. *J. Ecol.*, 52:27-41.

Anderson, M.C., 1971. Radiation and crop structure. Plant photosynthetic production. Manual of Methods. In: Sestak, Z., Catsky, J. & Jarvis, P.G.(ed.) W. Junk, The Hague, p.412-466.

André, J.C., Goutorbe, J.P., Perrier, A., Becker, F., Bessemoulin, P., Bougeault, P., Brunet, Y., Brutsaert, W., Carlson, T., Cuenca, R., Gash, J., Gelpe, J., Hildebrand, P., Lagouarde, J.P., Lloyd, C., Mahrt, L., Mascart, P., Mazaudier, C., Noilhan, J., Ottlé, C., Payen, M., Phulpin, T., Stull, R., Shuttleworth, J., Schmugge, T., Taconet, O., Tarrieu, C., Thepenier, R.M., Valencogne, C., Vidal-Madjar, D., Weil, A., 1988. Evaporation over land-surfaces: First results from HAPEX-MOBILHY special observing period. *Annales Geophysicae*, 6(5):477-492.

Asrar, G., Hipps, L.E. and Kanemasu, E.T., 1984. Assessing solar energy and water use efficiencies in winter wheat: a case study. *Agric. For. Meteorol.*, 31:47-58

Asrar, G., Kanemasu, E.T., Jackson, R.D., Pinter, P.J., 1985. Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.*, 17:211-220.

Assad, E., 1987. Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne. Cas du Sénégal. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier. 258 p.

Baker, D.N., Hesketh, J.D., Duncan, W.G., 1972. Simulation of growth and yield in cotton. I. Gross photosynthesis, respiration and growth. *Crop Sci.* 12:431-435.

- Baret, F., Huet, M., 1979. Contribution à l'utilisation agronomique de la télédétection: analyse des relations entre la structure d'un couvert végétal, son état physiologique et les données radiométriques. Rapport de fin de stage; INRA, Station de Bioclimatologie, 84140 Montfavet (France), 115 p.
- Baret, F., 1986. Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse de Doctorat. Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay, n° ordre:98, 182 pp.
- Baret, F., Guyot, G., 1986. Suivi de la maturation de couverts de blé par radiométrie dans les domaines visible et proche infra-rouge. *Agronomie* 6 (6):509-516.
- Baret, F., 1988. Un modèle simplifié de réflectance et d'absorptance d'un couvert végétal. In: 4^{ème} Colloque International Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Aussois (Modane), France, 18-22 Janvier, 1988. ESA SP-287, p.113-120.
- Baret, F., Guyot, G., Terres, J.M., Rigal, D., 1988. Profil spectral et estimation de la biomasse. In: 4^{ème} Colloque International Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Aussois (Modane), France, 18-22 Janvier, 1988. ESA SP-287, p.93-98.
- Baret, F., Olioso, A., Luciani, J.L., Hanocq, J.F., Monterrot, J.C., 1989. Estimation à partir de mesures de réflectance du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par une culture de blé. *Agronomie*, 9:885-895.
- Becker, F., Podaire, A., Walter, L., 1988. Modèles de réponse spectrale des surfaces naturelles. In: 4^{ème} Colloque International Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Aussois (Modane), France, 18-22 Janvier, 1988. ESA SP-287, Conclusions, p.500-503.
- Biscoe, P.V., Scott, R.K., Monteith, J.L., 1975. Barley and its environment. III. Carbon budget of the stand. *J.Appl.Ecol.*, 12(1):269-293.
- Biscoe, P.V., Cohen, Y., Wallace, J.S., 1976. Daily and seasonal changes of water potential in cereals. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 273:565-580.
- Biscoe, P.V., Gallagher, J.N., 1977. Weather, dry matter production and yield. In: Landsberg, J.J., Colling, C.V. (ed.). *Environmental effects on crop physiology*. New York, Academic Press, p. 75-100.
- Boissard, P., Guyot, G., 1984. Analyse de la signification de la température radiative d'un couvert végétal. In: II^{ème} Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Bordeaux, 12-16 Sept., 1983. Ed. INRA Publ., 1984 (Les Colloques de l'INRA, n° 23), p.407-426.

- Bonhomme, R. and Chartier, P., 1972. The interpretation and automatic measurements of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage and gap frequency. *Israel.J.Agric.Res.*, 22(2):53-61.
- Bonhomme, R., Varlet-Grancher, C., Chartier, 1974. The use of hemispherical photographs for determining the leaf area index of young crops. *Photosynthetica* 8 (3):299-301.
- Bonhomme, R., 1976. Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites in situ. *Ann. agron.*, 27 (I), 33-59.
- Bowers, S.S., Hanks, R.J., 1965. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Sci.*, 100 (2):130-138.
- Boyeldieu, J., 1980. *Les Cultures céréalières*. Hachette.
- Bradford, K.J., Hsiao, T.C., 1982. Physiological responses to moderate water stress. In: Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., Ziegler, H. (Eds.), *Physiological plant ecology II. water relations and carbon assimilation*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, p.263-324.
- Brown, R.H., 1978. A difference in N use efficiency in C₃ and C₄ plants and its implications in adaptation and evolution. *Crop Sci.*, 18:93-98.
- Brown, R.H., 1985. Growth of C₃ and C₄ grasses under low N levels. *Crop Sci.*, 25:954-957.
- Brutsaert, W., 1982. *Evaporation into the atmosphere*. D. Reidel (Ed.), 299 pp.
- Charles-Edwards, D.A., 1982. *Physiological determinants of crop growth*. Academic Press, New York.
- Choudhury, B., 1983. Simulating the effects of weather variables and soil water potential on a corn canopy temperature. *Agric. For. Meteor.* 29: 169-182.
- Clawson, K.L. and Blad, B.L., 1982. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agron. J.* 74: 311-317.
- Deering, D.W., Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., 1975. Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data. In: *Proceedings of the 10th International Symposium Remote Sensing of Environment*, Vol.II, p.1169-1178.
- De Wit, C.T., 1958. *Transpiration and crop yields*. Versl. Landbouwk, Onderz, 64.6 88p. Institute of Biological and Chemical Research of Field Crops and Herbage, Wageningen, The Netherlands.

- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO, Rome, Irrigation and Drainage Paper n° 24.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. FAO, Rome, Irrigation and Drainage Paper n° 33.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA), 1981. Departamento Técnico-Científico. Brasília, DF. Programa Nacional de Pesquisa de Arroz. Brasília, EMBRAPA-DID, 69p.
- Evans, G.C., Coombe, D.E., 1959. Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. *J.Ecol.*, 47:103-113.
- Elvidge, C.D., Lyon, R.J.P., 1985. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass. *Remote Sens. Environ.*, 17:265-279.
- Ezra, C.E., Tinney, L.R., Jackson, R.D., 1984. Effect of soil back-ground on vegetation discrimination using Landsat data. *Remote Sens. Environ.* 16:233-242.
- Evans, L.T., 1973. The effect of light on plant growth, development and yield. In: Slatyer, R.O. (ed.), *Plant response to climatic factors. Proceedings Uppsala Symposium, Unesco, Paris.* p. 21-35.
- Evans, J.R., 1983. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiol.*, 72:297-302.
- Fasheun, A., Dennett, M.D., 1982. Interception of radiation and growth efficiency in field beans (*Vicia faba* L.). *Agric. Meteorol.*, 26:221-229.
- Fisher, R.A., 1983. Wheat. In: *Potential productivity of field crops. Proceedings of a Symposium at the International Rice Research Institute, Manila, Los Banos, Phillipines,* p.133-153.
- Fuchs, M., Tanner, C.B., 1966. Infrared thermometry of vegetation. *Agron.J.* 58:597-601.
- Gallagher, J.N. and Biscoe, P.V., 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J.Agric.Sci.,Camb.*,91:47-60.
- Gallo, K.P., Daughtry, C.S.T. and Bauer, M.E., 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Remote Sens. Environ.*, 17:221-232.
- Garrat, J.H., 1978. Transfer characteristics for a heterogeneous surface of large aerodynamic roughness. *Quart. J. Met. Soc.* 104: 491-502.

- Garcia, R., Kanemasu, E.T., Blad, B.L., Bauer, A., Hatfield, J.L., Major, D.J., Reginato, R.J. and Hubbard, K.G., 1988. Interception and use of light in winter wheat under different nitrogen regimes. *Agric.For.Meteorol.*,44:175-186.
- Gardner, B.R., Blad B.L., Maurer, R.E. and Watts, D.G., 1981. Relationship between corn temperature and the physiological and phenological development of differentially irrigated corn. *Agron. J.* 73: 743-748.
- Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C., Weidner, V.R., 1965. Spectral properties of plants. *Appl. Optics*, 4 (1):11-20.
- Gates, D.M., 1970. Physical and physiological properties of plants. In: Remote sensing with special reference to agriculture and forestry, National Academy of Science, Chap.V, 224-252.
- Gausman, H.W., Allen, W.A., Myers, V.I., Cardenas, R., 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hirsutum L.*. *Agron. J.*, 61:374-376.
- Gausman, H.W., Allen, W.A. and Wiegand, C.L., 1972. Plant factors affecting electromagnetic radiation. SWC Research Report 432, A.R.D., U.S.D.A., Weslaco, Texas. 41p.
- Gausman, H.W., 1974. Leaf reflectance of near infrared. *Photogram. Eng.* 40(2):183-191.
- Gausman, H.W., 1977. Reflectance of leaf components. *Remote Sens. Environ.*, 6:1-9.
- Gosse, G., Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M., Allirand, J.M., Lemaire, G., 1986. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 6:47-56.
- Grant, L., 1987. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. *Remote Sens. Environ.*, 22:309-322.
- Green, C.F., 1987. Nitrogen nutrition and wheat growth in relation to absorbed solar radiation. *Agric.For.Meteorol.*, 41:207-248.
- Guyot, G., 1980. Analysis of factors acting on the variability of spectral signatures of natural surfaces. In: Proc.Intl.Symp.I.S.P. Hamburg, Int. Arch. Photogram. XXII (B7), Commission VII, 382-393.
- Guyot, G., 1983. Variabilité angulaire et spatiale des données spectrales dans le visible et le proche infrarouge. In: II^{ème} Coll.Int.Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Bordeaux, 12-16 Sept., 1983. Ed.INRA Publ., 1984 (Les Colloques de l'INRA, n° 23), p.27-44.

- Guyot, G., 1984. Caractérisation spectrale des couverts végétaux dans le visible et le proche infrarouge. Application à la télédétection. Bull.Soc.Franc.Photogram.Téledét. n° 95, 3:5-22.
- Guyot, G., 1989. Signatures spectrales des surfaces naturelles. Télédétection Satellitaire 5. Ed. Paradigme, Caen. 178p.
- Hammer, G.L., Vanderlip, R.L., 1989. Genotype-by-environment interaction in grain sorghum I. Effects of temperature on radiation use efficiency. Crop Science, 29:370-376.
- Hanks; R.J., 1974. Model for predicting plant yield as influenced by water use. Agron. J., 66:660-665.
- Hatfield, J.L., 1979. Canopy temperatures. The usefulness and reliability of remote measurements. Agron. J., 71:889-892.
- Hatfield, J.L., 1983. Remote sensing estimators of potential and actual crop yield. Remote Sens. Environ., 13: 301-311.
- Hatfield, J.L., Asrar, G. and Kanemasu, E.T., 1984. Intercepted photosynthetically active radiation in wheat canopies estimated by spectral reflectance. Remote Sens.Environ. 14:65-75.
- Hinzman, L.D., Bauer, M.E. and Daughtry, C.S.T., 1986. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. Remote Sens. Environ.,19:47-61.
- Hipps, L.E., Asrar, G., and Kanemasu, E.T., 1983. Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat. Agric.For.Meteorol., 28:253-259.
- Hodges, T., Kanemasu, E.T., 1977. Modeling daily dry matter production of winter wheat. Agron. J., 69:974-978.
- Hooper, B.E., 1976. The application of hemispherical photography to cereal canopies. J. Appl. Ecol., 13 (2):555-561.
- Howell, T.A., Musick, J.T., 1985. Relationship of dry matter production of field crops to water consumption. Les besoins en eau des cultures. Conférence internationale, Paris, 11-14 Sept., 1984, INRA, Paris, 1985.
- Hsiao, T.C., 1973. Plant responses to water stress. Ann. Rev. Plant Physiol., 24:519-570.
- Huband, N.D.S. and Monteith, J.L., 1986. Radiative surface temperature and energy balance of a wheat canopy. Bound. Layer Meteor. 35 (I/II): 1-18, 107-116.

- Huete, A.R., Jackson, R.D. and Post, D.F., 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sens. Environ.*, 17:37-53.
- Hughes, G., Keatinge, J.D.H., 1983. Solar radiation interception, dry matter production and yield in pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh). *Field Crops Research*, 6:171-178.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J., 1977. Remote sensing of crop yield. *Science*, 196:19-25.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato R.J., Hatfield, J.L., 1981, a. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. *Agric. Meteor.* 24: 45-55.
- Idso, S.B., Reginato R.J. and Reicosky, 1981b. Determining soil induced plant water potential depressions in alfalfa by means of infrared thermometry. *Agron. J.* 73: 826-830.
- Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF), 1981. Les stades du blé. In: *Perspectives Agricoles*, n° 45, Février, 1981, p.57-72.
- Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF), 1984. Comparaison de différentes méthodes d'échantillonnage. Note Interne ITCF 30 pp.
- Itier, B., 1981. Une méthode simple pour la mesure de l'évapotranspiration réelle à l'échelle de la parcelle. *Agronomie* 1(10): 869-876.
- Itier, B., 1982. Révision d'une méthode simplifiée pour la mesure du flux de chaleur sensible. *J. Rech. Atmos.*, 16:85-90.
- Itier, B., Cellier, P., Riou, C., 1985. Actual evapotranspiration by a simplified aerodynamic system. In: *Advances in evapotranspiration*, Proc. National Conference on the Advances in evapotranspiration, December 16-17, 1985, Chicago. ASAE Publication 14-85, p. 201-207.
- Jackson, R.D., Reginato, R.J. and Idso, S.B., 1977. Wheat canopy temperature. A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resource Research*, 13(3):651-657.
- Jackson, R.D., Pinter, P.J., Idso, S.B., Reginato, R.J., 1979. Wheat spectral reflectance: interaction between crop configuration, sun elevation, and azimuth angle. *Appl. Optics*, 18 (22):3730-3732.
- Jackson, R.D., Jones, C.A., Uehara, G., Santo, L.T., 1980. Remote detection of nutrient and water deficiencies in sugarcane under variable cloudiness. *Remote Sens. Environ.*, 11:327-331.

Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato R.J., Pinter P.J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Wat. Resour. Res.* 17: 1133-1138.

Jackson, R.D. and Pinter, P.J., 1981. Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation. In: *Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*. Avignon, 8-11 Sept. 1981 Les Colloques de l'INRA n° 5.

Jackson, R.D., 1982. Canopy temperature and crop water stress. In: Hillel (Ed.) *Advances in Irrigation*, Academic Press Network, 2, 43-85.

Jackson, R.D., 1983. Spectral indices in n-space. *Remote Sens. Environ.*, 13:409-421.

Jackson, R.D., Slater, P.N., Pinter, P.J., 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sens. Environ.*, 13:187-208.

Jappiot, M., 1987. Estimation de la biomasse d'une culture de blé à partir des indices de végétation SPOT. Essai d'estimation du rendement. Mémoire de D.E.A. INRA, Station de Bioclimatologie, Domaine St.Paul, 84140 Montfavet (France).

Jordan, W.R., 1983. Whole plant response to water deficit: an overview. In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (ed.) *Limitations of efficient water use in crop production*, Chapter 7A, ASA-CSSA-SSSA, p.289-317.

Kamat, D.S., Gopalan, A.K.S., Ajai Shashikumar, M.N., Sinha, S.K., Chaturvedi, G.S., Singh, A.K., 1985. Assessment of water-stress effects on crops. *Int. J. Remote Sensing*, 6:577-589.

Kanemasu, E.T., Stone, L.R., Powers, W.L., 1976. Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum. *Agron.J.*, 68:569-572.

Kauth, R.J., Thomas, G.S., 1976. The tasseled cap. a graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: *Proc. Symp. Machine Remotely Sensed Data*. IEE Catalog N° 761103-1, MPRSD, New York.

Keener, M.E., Kircher, P.L., 1983. The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. *Agric. Meteor.* 28:339-349.

Kimes, D.S., Holben, B.N., Tucker, C.J., 1984. Optimal directional view angles for remote-sensing missions. *Int. J. Remote Sensing*, 5 (6):887-908.

Kumar, M. and Monteith, J.L., 1981. Remote sensing of crop growth. *Plants and the day light spectrum*. Ed. by Smith H., Academic Press, 133-144.

Kumar, M., 1988. Crop canopy spectral reflectance. *Int.J.Remote Sens.*, 9 (2):285-294

- Lagouarde, J.P. and Brunet, Y., 1988. Spatial integration of surface latent heat flux and evaporation mapping. XXVII COSPAR Plenary Meeting, Helsinki (Finland), 18-29 July. To be published in *Adv. Space Res.* 11 p.
- Lagouarde, J.P. and Brunet, Y., 1989. Mapping of actual evapotranspiration in the South-West of France using NOAA-AVHRR data. French-Indien Symposium on Bioclimatologie, February, 1989, Mukteshwar, India. 16 p.
- Lawlor, D.W., Day, W., Johnston, A.E., Legg, B.J., Parkinson, K.J., 1981. Growth of spring barley under drought: crop development, photosynthesis, dry-matter accumulation and nutrient content. *J.Agric.Sci., Camb.*, 96:167-186.
- Legg, B.J., Day, W., Lawlor, D.W. and Parkinson, K.J., 1979. The effects of drought on barley growth: models and measurements showing the relative importance of leaf area and photosynthetic rate. *J.Agric.Sci., Camb.*, 92:703-716.
- Lord, D., Desjardins, R.L., Dubé, P.A., 1985. Influence of wind on crop canopy reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.*, 18:113-123.
- Maas, S.J., Richardson, A.J., Wiegand, C.L. and Nixon, P.R., 1985. Use of plant, spectral and weather data in modeling corn growth. Presented at the Nineteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, October 21-25, 1985.
- Magrin, G., 1990. Facteurs de stress agissant sur la production du blé en Argentine. Evaluation de mécanismes d'adaptation à la sécheresse. Thèse Docteur Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 80 pp.
- Marshall, B., Biscoe, P.V., 1981. Environmental and physiological factors affecting assimilate supply grain growth. In: Opportunities for Manipulation of Cereal Productivity, British Plant Growth Regulator Group, Monograph 7:179-192.
- McCree, K.J., 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.*, 10:443-453.
- McCree, K.J., 1974. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum as functions of dry weight, photosynthetic rate and temperature. *Crop Science*, 14:509-514.
- Monsi, M., Saeki, T., 1953. Uber den Lichtfactor in de pflanzengetellschaften und seine Bedeutung fur die stottproduction. *Jap.J.Bot.*, 14:22-52.
- Monteith, J.L., 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Ann. Bot.*, 29:17-37.

- Monteith, J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J.Appl.Ecol.*, 9:747-766.
- Monteith, J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil.Trans.R.Soc.Lond.*, 281:277-294.
- Monteith, J.L. and Elston, J., 1983. Performance and productivity of foliage in the field. In: J.E.Dale and F.L.Milthorpe (Editors), *Functioning of leaves*. Cambridge University Press, London, pp.449-518.
- Muchow, R.C., 1985. An analysis of the effects of water deficits on grain legumes grown in a semi-arid tropical environment in terms of radiation interception and its efficiency of use. *Field Crops Res.*, 11:309-323.
- Muchow, R.C., Davis, R., 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Research*, 18:17-30.
- Natr, L., 1975. Influence of mineral nutrition on photosynthesis and the use of assimilates. In: Cooper, J.P. (ed.) *Photosynthesis and productivity in different environments*, Cambridge University Press, p.537-555.
- Nieuwenhuis, G.J.A., Smidi, E.H., Thunissen, H.A.M., 1985. Estimation of regional evapotranspiration of arable crops from thermal infrared images. *Int. J. Remote Sens.*, 6 (8):1319-1334.
- Olioso, A., 1987. Utilisation de photos hémisphériques pour étudier l'efficience de la conversion de l'énergie solaire en biomasse par une culture de blé. Mémoire INRA/ENSAM. INRA, Station de Bioclimatologie, BP 91, 84140 Montfavet (France).
- Osman, A.M., 1971. Dry-matter production of a wheat crop in relation to light interception and photosynthetic capacity of leaves. *Ann. Bot.*, 35:1017-1035.
- O'Toole, J.C. and Hatfield J.L., 1983. Effect of wind on the Crop Water Stress Index derived by infrared thermometry. *Agron. J.* 75:811-817.
- Paulson, C.A., 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journ. Appl. Meteor.* 9: 857-861.
- Pearson, R.L., Miller, L.D., 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: Proc. 8th Int. Symp. on Remote Sens. of Environ., Ann Arbor, 1357-1381.
- Perrier, A., Itier, B., Bertolini, J.M., Blanco de Pablos, A., 1975. Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture: exemple d'application. *Ann. agron.*, 26(1):19-40.

- Perry, C.R. and Lautenschlager, L.F., 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 14:169-182.
- Rambal, S., Lacaze, B., Mazurek, K. and Debussche, G., 1985. Comparaison of hydrologically simulated and remotely sensed actual evapotranspiration from some Mediterranean vegetation formations. *Int. J. Rem. Sens.* 6 (8): 1475-1481.
- Richardson, A.J., Wiegand, C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil-background information. *Photogram. Engr. Remote Sens.*, 43:1541-1542.
- Richardson, A.J., Everitt, J.H., 1987. Monitoring water stress in buffelgrass using hand-held radiometers. *Int. J. Remote Sensing*, 8 (12):1797-1806.
- Riou, C., 1982. Une expression analytique du flux de chaleur sensible en conditions suradiabatiques à partir de mesures du vent et de la température à deux niveaux. *J. Rech. Atmos.* 16: 15-22.
- Riou, C., Itier, B., 1983. Modification de la formule de Dalton à partir d'une nouvelle formulation du flux de chaleur sensible en conditions suradiabatiques. *Journal Of Hydrology*, 63:359-371.
- Riou, C., Itier, B. and Seguin B., 1988. The influence of surface roughness on the simplified relationship between daily evaporation and surface temperature. *Int. J. Rem. Sens.* 9: 1529-1533.
- Rosenberg, N., 1974. *Micro-climate: The Biological Environment*. John Wiley & Sons, New York. p.159-205.
- Ross, J., 1975. Radiative transfer in plant communities. In: Monteith, J.L. (ed.), *Vegetation and the atmosphere, Vol.1: Principles*. Academic Press, New York, 278 pp.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC Type III. Final Report, Greenbelt, MD, PP371.
- Saeki, T., 1963. Light relations in plant communities. In: Evans, L.T. (ed.), *Environmental Control of Plant Growth*, New York, Academic Press.
- Schnetzler, C.C., 1981. Effect of sun and sensor geometry, canopy structure and density, and atmospheric condition on the spectral response of vegetation, with particular emphasis on across-track pointing. In: Proc. Int. Colloquium on Spectral signatures of objects in remote sensing, Avignon, Sept. 8-11, 1981. *Les Colloques de l'INRA n° 5*, p.509-520.
- Seguin, B., 1981. Bioclimatological aspects of crop production. In: *Applications of Remote Sensing to Agricultural Production Forecasting*. A. Berg (Ed.), Balkema, 33-47.

Seguin, B., Baelz, S., Monget, J.M. and Petit, V., 1982. Utilisation de la thermographie IR pour l'estimation de l'évaporation régionale. I. Mise au point méthodologique sur le site de la Crau. *Agronomie* 2 (1): 7-16. II. Résultats obtenus à partir des données de satellite. *Agronomie* 2 (1): 113-118.

Seguin, B. and Itier, B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *Int. J. Rem. Sens.* 4(2): 371-383.

Seguin, B., Lagouarde, J.P., Kerr, Y., 1986. Estimation of regional evaporation using midday surface temperature from satellite thermal IR data. In: *Proc.ISLSCP Conference, Rome, Italy, 2-6 December 1985, ESA SP-248, p.339-344.*

Seguin, B., 1989. Use of surface temperature in agrometeorology. In: Toselli, F. (ed.), *Applications of Remote Sensing to Agrometeorology, ECSC, EEC, EAEC, Brussels and Luxembourg, p.221-240.*

Sellers, P.J., 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int.J.Remote Sens.*, 6(8):1335-1372.

Sinclair, T.R., Schreiber, M.M., Hoffer, R.M., 1973. Diffuse reflectance hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves. *Agron. J.*, 65:276-283.

Sinclair, T.R., Horie, T., 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Sci.*, 29:90-98.

Slatyer, R.O., McIlroy, I.C., 1961. *Practical climatology. CSIRO, Melbourne, UNESCO, Paris, 340 pp.*

Slatyer, R.O., 1973. The effect of internal water status on plant growth, development and yield. In: Slatyer, R.O. (ed.), *Plant Response do Climatic factors, UNESCO, Paris, p.177-191.*

Slavik, B., 1975. Water stress, photosynthesis and the use of photosynthates. In: Cooper, J.O. (ed.), *Photosynthesis and productivity in different environments, Cambridge University Press, p.511-536.*

Spiertz, J.H.J., 1982. Physiological and environmental determinants of potential crop productivity. In: *Proc. 12th International Potash Institute, June 1982, Goslar, FRG, p.27-46.*

Squire, G.R., Marshall, B., Terry, A.C., Monteith, J.L., 1984. Response to temperature in a stand of Pearl Millet. VI. Light interception and dry matter production. *Journal of Experimental Botany*, 35(153):599-610.

- Steinmetz, S., 1977. Temperatures of Alfalfa, Sorghum, Soybean and Grass as measured with leaf thermocouples and an infrared thermometer. M.Sc. Thesis, University of Nebraska (Lincoln, USA), 94 pp.
- Steinmetz, S., 1985. Upland rice environments in Brazil and the fitness of improved technologies. In: 2nd International Upland Rice Conference, Feb. 28 March 3, Jakarta, Indonesia. 17 pp.
- Steinmetz, S., Lagouarde, J.P., Delecolle, R., Guerif, M., Seguin, B., 1989. Evapotranspiration and water stress using thermal infrared measurements. A general review and a case study on winter durum wheat in southern France. In: International Symposium on Physiology/Breeding of winter cereals for stress mediterranean environments, July 3-6, 1989, Montpellier, France. 18 pp.
- Steinmetz, S., Reyniers, F.N., Forest, F., 1990. Caractérisation régionale des regimes pluviométriques et des bilans hydriques du riz pluvial au Brésil.(Soumis à l'Agronomie Tropicale).
- Stone, L.F., Steinmetz, S., 1979. Indice de area foliar e adubação nitrogenada em arroz. *Pesq. agropec.bras.*, Brasilia, 14(1):25-28.
- Stewart, J.I., Danielson, R.E., Kanks, R.J., Jackson, E.B., Hagan, R.M., Pruitt, W.O., Franklin, W.T., Riley, J.P., 1977. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. Utah Water Lab. Tech. Rep. PRWG 151-1. Logan, 191 pp.
- Suits, G.H., 1972. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sens. Environ.*, 2:117-125.
- Szeicz, G., 1970. Spectral composition of solar radiation. Ph.D. Thesis, University of Reading.
- Thom, A.S., 1975. Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: Monteith, J.L. (ed.), *Vegetation and the Atmosphere*. Academic Press, London, Vol.1. p.57-109.
- Travasso, M.I., 1986. Etude des relations entre la disponibilité hydrique et la température de surface du blé. Mémoire DEA d'Ecologie Générale. Université de Paris-Sud, Orsay. 28 p.
- Tucker, C.J., Garrat, M.W., 1977. Leaf optical system modeled as a stochastic process. *Appl. Optics*, 16:635-642.
- Tucker, C.J., Miller, L.D., 1977. Soil spectra contributions to grass canopy spectral reflectance. *Photogram. Engr. Remote Sens.*, 43 (6):721-726.

Turner, N.C., Begg, J.E., 1981. Plant-water relations and adaptation to stress. In: ICARDA, Martinus Nijhoff (ed.), *Plant and Soil*, 58:97-131.

Vanderbilt, V.C., Kollenkark, J.C., Biehl, L.L., Robinson, B.F., Bauer, M.E., Ranson, K.J., 1981. Diurnal changes in reflectance factor due to sun-row direction interactions. In: Proc. Int. Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing, Avignon, Sept. 8-11, 1981. Les Colloques de l'INRA n° 5, 499-508.

Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., 1979. Application aux couverts végétaux des lois du rayonnement en milieu diffusant. II. Interception de l'énergie solaire par une culture. *Ann. Agron.*, 30 (1):1-26.

Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M. and Artis, P., 1982. Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Acta Oecologica. Oecol. Plant.* Vol.3 (17) n° 1:3-26.

Verhoef, W., Bunnik, N.J.J., 1981. Influence of crop geometry on multispectral reflectance determined by the use of canopy reflectance models. In: Proc. Int. Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing, Avignon, Sept. 8-11, 1981. Les Colloques de l'INRA n° 5, 273-290.

Verhoef, W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sens. Environ.*, 16:125-141.

Vidal, A., Kerr, Y., Lagouarde, J.P., Seguin, B., 1987. Télédétection et bilan hydrique: utilisation combinée d'un modèle agrométéorologique et des données de l'IR thermique du satellite NOAA-AVHRR. *Agric. For. Meteorol.*, 39:155-175.

Walker, G.K., Hatfield, J.L., 1979. Test of the stress degree day concept using multiple planting dates of red kidney beans. *Agron. J.*, 7:967-971.

Walker, G.K., Hatfield, J.L., 1983. Stress measurement using foliage temperatures. *Agron. J.*, 75:623-629.

Wiegand, C.L., Nixon, P.R., Jackson, R.D., 1983. Drought detection and quantification by reflectance and thermal responses. *Agric. Water Management*, 7:303-321.

Wright, J.L., 1985. Evapotranspiration and irrigation water requirements. In: Proc. National Conference on Advances in Evapotranspiration, December 16-17, Chicago, IL, USA, p.105-113.

ANNEE : 1990

NOM DE L'AUTEUR (Prénom) : STEINMETZ Silvio

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC
(MONTPELLIER II)

**ESTIMATION DE L'EFFICIENCE DE CONVERSION EN MATIERE SECHE DU
RAYONNEMENT SOLAIRE INTERCEPTE PAR UNE CULTURE DE BLE A PARTIR
DE LA REFLECTANCE SPECTRALE. RELATIONS AVEC L'EVAPOTRANS-
PIRATION ET LA TEMPERATURE DE SURFACE.**

RESUME

L'étude qui a été réalisée au cours de deux cycles de la culture du blé (années 1986/87 et 1987/88) a porté sur l'effet du stress hydrique et de la fertilisation azotée sur l'efficacité d'interception (ei) du rayonnement solaire dans le domaine du visible (P.A.R.) ainsi que sur l'efficacité de conversion (eb) en matière sèche du rayonnement intercepté. Le rayonnement intercepté a été déterminé à l'aide de photos hémisphériques et de la réflectance spectrale mesurée avec un radiomètre de simulation du satellite SPOT.

D'autre part, l'étude a évalué les relations entre la matière sèche produite et l'efficacité eb avec des paramètres caractérisant l'état hydrique de la culture tels que l'évapotranspiration réelle (ETR), le rapport entre l'ETR et l'évapotranspiration potentielle (ETR/ETP) ainsi que le "Stress Degree Day" (SDD). Ces données ont été acquises à partir d'un dispositif de mesures micrométéorologiques implantés sur les parcelles sèche et irriguée.

La relation linéaire obtenue entre les valeurs hebdomadaires d'efficacité eb et les indices caractérisant l'état hydrique de la culture tels que l'ETR, rapport ETR/ETP et le SDD suggère la possibilité d'utilisation conjointe des modèles d'interception du rayonnement solaire et des modèles d'évapotranspiration pour estimer la production de matière sèche du blé en conditions de stress hydrique. Les bonnes performances des données de réflectance spectrale pour caractériser l'évolution de l'indice foliaire et du rayonnement intercepté et de la température de surface pour évaluer l'état hydrique de la culture indiquent la perspective d'utilisation de la télédétection satellitaire dans ces modèles.

MOTS-CLES : matière sèche, rayonnement photosynthétiquement actif (P.A.R.), interception du P.A.R. (ei), efficacité de conversion en matière sèche (eb), photos hémisphériques, réflectance spectrale, évapotranspiration, température de surface, stress hydrique, fertilisation azotée, climat méditerranéen.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
I. N. R. A.
Station de Bioclimatologie
B.P. 91 - Domaine Saint-Paul
84143 MONTFAVET CEDEX
FRANCE

19 AVR. 1991

