

**Estimation de la biomasse et du rendement des cultures à partir du satellite SPOT: résultats d'une expérimentation sur blé dur en Camargue**

**Guérif M., Seguin B.**

*in*

Deshayes M. (ed.).  
La télédétection en agriculture

Montpellier : CIHEAM

Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 4

1991

pages 115-127

Article available on line / Article disponible en ligne à l'adresse :

<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=CI911187>

To cite this article / Pour citer cet article

Guérif M., Seguin B. **Estimation de la biomasse et du rendement des cultures à partir du satellite SPOT: résultats d'une expérimentation sur blé dur en Camargue.** In : Deshayes M. (ed.). *La télédétection en agriculture* . Montpellier : CIHEAM, 1991. p. 115-127 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 4)



<http://www.ciheam.org/>  
<http://om.ciheam.org/>

# Estimation de la biomasse et du rendement des cultures à partir du satellite SPOT : résultats d'une expérimentation sur blé dur en Camargue

Martine GUERIF, Bernard SEGUIN

Institut National de la Recherche Agronomique (INRA),  
Station de Bioclimatologie, Montfavet (France)

**Résumé :** L'utilisation de la télédétection dans les domaines visible et proche infrarouge pour estimer l'état des cultures et en particulier leurs caractéristiques de rendement a fait l'objet de nombreux travaux dont les plus avancés sont réalisés à des échelles très locales. La disponibilité de satellite à haute résolution spatiale, du type de SPOT, permet d'envisager l'adaptation à l'échelle régionale de ces méthodes mises au point à l'échelle locale.

Nous avons développé dans cet objectif en 86 et 87 un programme portant sur le blé dur en Camargue dans lequel on teste une méthodologie de type semi empirique qui procède en deux étapes :

1. Estimation de la biomasse à partir des indices de végétation suivant un formalisme très simplifié dérivé de modèles d'interaction du rayonnement avec le couvert végétal et de photosynthèse :

$$MS = k \sum_{j = d_1}^{d_2} (DN_j - DN_s).PAR_j$$

où : MS est la biomasse sèche accumulée par unité de surface entre deux dates  $d_1$  et  $d_2$ .

$DN_j$  est la différence normalisée de la culture au jour  $j$ ,  $DN_s$  celle du sol nu,

$PAR_j$  est le rayonnement photosynthétiquement actif cumulé du jour  $j$ .

2. Estimation du rendement ou de ses composantes (nombre d'épis par  $m^2$ , nombre de grains par  $m^2$ ) à partir de la biomasse à des stades-clés du développement (début montaison, floraison, maturité).

Pour la mise au point des modèles on s'appuie sur une quinzaine de parcelles de blé dur regroupant différentes variétés et dates de semis pour lesquelles on dispose des caractérisations radiométrique (au sol) et biologique tout au long du cycle de végétation. Pour leur validation, on s'appuie sur un autre ensemble de 16 parcelles pour lesquelles on a mesuré la biomasse à certains stades et les composantes du rendement, la caractérisation radiométrique se faisant par des données SPOT (5 images de début mars à fin juin) que l'on aura transformées en réflectance grâce aux mesures au sol dont on dispose.

Les relations indices de végétation - biomasse trouvées sont très significatives ; elles sont effectivement linéaires et leur pente varie en fonction de la période phénologique considérée. Les relations biomasse à certains stades - composantes du rendement sont plus floues à cause en particulier de leur spécificité variétale. C'est entre le rendement final et la biomasse à la récolte que la liaison est la plus forte.

L'application de ces relations aux parcelles de validation pose le problème de la reconstitution de leur profil radiométrique à partir des 5 scènes SPOT acquises. Selon les dates de semis considérées cette reconstitution n'est pas de bonne qualité et limite, au même titre que les différentes hypothèses simplificatrices qui la sous-tendent, les performances du modèle.

## Abstract

### *Biomass and yield estimation using SPOT data: results of an experiment on durum wheat in the Camargue region*

*Remotely-sensed data in the visible and near infrared bands are often used to monitor crop condition and yield characteristics. The greatest progress has been achieved in site-specific projects. Methods developed at local scale can now be extended to a regional scale with the development of high-resolution imagery of the SPOT type.*

In 1986-1987 a program on durum wheat was established in the Camargue region in southern France to test semi-empirical methods. The program comprised two phases:

1. Estimation of biomass from vegetation indexes derived from models of the interaction between solar irradiance, and crop cover and photosynthesis:

$$MS = k \sum_{j = d_1}^{d_2} (DN_j - DN_s).PAR_j$$

where:

MS: dry biomass accumulated per unit area between two dates ( $d_1, d_2$ )

$DN_j$ : normalized difference of the crop on day  $j$

$DN_s$ : normalized difference of bare soil

$PAR_j$ : cumulative photosynthetically active radiation on day  $j$

2. Yield or yield component estimation (number of earheads/m<sup>2</sup>, number of grains/m<sup>2</sup>) based on the biomass at critical crop development stages (early elongation, flowering, maturity).

Fifteen plots of durum wheat representing different varieties and planting dates, for which ground-measured radiometric and biological data were available for the entire growing season, were used for developing models.

Sixteen other plots were used as controls. Biomass at certain development stages and yields components were measured. Radiometric characterization was based on SPOT data (5 images from early March to late June) translated into reflectance using ground measurements.

The observed biomass-vegetation index relations are highly significant. They are linear and the slope depends on the phenological period. Biomass at certain stages is not clearly correlated to yield components due to varietal specificity. Correlation is highest between final yield and harvested biomass.

Application of the correlations to the 16 control plots raised the problem of reconstituting their radiometric profile from the five SPOT images. Reconstitution is not uniformly reliable for different planting dates; this problem and the underlying simplification hypotheses affect the model's efficiency.

## I. – Introduction

La possibilité d'utiliser les données satellitaires pour le suivi des cultures est apparue il y a une dizaine d'années, à partir des satellites américains Landsat. Elle introduit deux possibilités nouvelles, par rapport à la surveillance traditionnelle assurée par les agriculteurs ou les services d'enquêtes statistiques :

- l'accès simultané, sur un support informatique, à l'ensemble des parcelles d'une même zone,
- la vision globale des propriétés spatiales des cultures, dont on sait depuis longtemps (par les photographies aériennes, par exemple) qu'elle apporte des informations d'une autre nature que celles que l'on peut avoir simplement en rentrant dans le champ.

Il faut bien évidemment, pour tirer parti de ces nouvelles sources d'informations, d'abord établir quels sont les liens entre les propriétés mesurées par les satellites dans les différentes longueurs d'onde et les paramètres biologiques et agronomiques qui définissent l'état d'une culture et ses caractéristiques de rendement. Ce point a fait l'objet de nombreux travaux ces dix dernières années, tant à l'étranger (essentiellement aux USA) qu'en France. Ceux-ci ont permis de mettre au point des méthodes, qui permettent de relier ces différentes mesures (en général combinées sous forme d'indices de végétation) et les paramètres de rendement (en particulier la biomasse). Mais ces relations, d'une part n'ont été établies qu'à une échelle locale (de l'ordre du m<sup>2</sup>, avec des radiomètres au sol qui simulent les mesures satellitaires), d'autre part ne tiennent pas compte des limitations liées aux fréquences de passage des satellites (une fois tous les 18 jours pour Landsat, par exemple). Ce qui explique que, si les applications satellitaires à l'estimation des surfaces cultivées sont entrées quasiment dans le domaine de l'opérationnel, peu d'utilisations effectives (en dehors de la surveillance globale des grandes zones céréalières de USA et d'URSS) ont déjà vu le jour dans le domaine de la prévision du rendement unitaire.

L'arrivée du satellite français SPOT est un élément nouveau important pour deux aspects :

- 1° – sa résolution spatiale (20 m) qui permet d'accéder aux dimensions caractéristiques des parcelles de culture en Europe,
- 2° – sa possibilité de visée latérale qui permet d'obtenir des mesures répétitives sur une zone programmée et donc d'avoir une fréquence plus élevée et plus souple d'accès qu'avec Landsat.

Le lancement de SPOT en 1986 nous a conduit à proposer un programme de recherche visant à établir les possibilités d'applications au niveau satellitaire des travaux effectués à l'échelle locale. Ce programme a eu comme support expérimental le blé dur dans la basse vallée du Rhône et ce pour trois types de raisons :

- la première tient à l'implantation de notre laboratoire dans cette région,
- la seconde aux caractéristiques climatiques très favorables pour l'utilisation des satellites, en tous cas dans le contexte français (en tant que pourcentage de situations avec ciel dégagé).
- la troisième à la présence d'exploitations céréalières de grandes dimensions, en relief plan, dans la région de la basse vallée du Rhône (Camargue et nord de la Crau)

Ce programme a porté sur les deux années 86 et 87 avec comme objectifs : dans un premier temps, la mise au point des protocoles expérimentaux pour l'acquisition de la vérité – sol sur blé dur : définition des paramètres à mesurer et surtout des normes d'échantillonnage à respecter pour mesurer les caractéristiques moyennes des parcelles (taille de la placette élémentaire de mesure, nombre de placettes en fonction de l'hétérogénéité des parcelles...).

Dans un deuxième temps, la définition et la mise au point d'une méthodologie d'estimation de la biomasse et du rendement dans le cas du blé dur, sur une douzaine de parcelles suivies au sol ; la validation s'effectuant sur un autre ensemble de parcelles grâce aux données SPOT.

## II. – L'expérimentation

### 1. L'expérimentation au sol

L'expérimentation principale s'est déroulée en Camargue (delta du Rhône) en 1987.

Pour établir le modèle biomasse-indices de végétation, nous voulions obtenir des états de croissance les plus contrastés possibles ; nous avons donc sélectionné 9 parcelles représentant différentes variétés (3 Arcour, 2 Capdur, 3 Creso et 1 Olint) et une gamme de dates de semis la plus étalée possible (du 26 octobre au 26 novembre 1986). Cela permet en outre de se placer dans les conditions réelles de la problématique «prévision du rendement à l'échelle régionale».

A ces parcelles s'ajoutent :

- 2 parcelles (var. Agatée) semées à 1 mois d'intervalle en 1986 au même endroit.
- une parcelle (var. Arcour) située en Crau (en conditions très sèches) en 1987 qui comporte 4 traitements croisant 2 régimes d'irrigation et 2 régimes de fertilisation azotée de manière à créer des états de croissance différents et apprécier l'effet du stress hydrique sur la production de biomasse et le rendement.

L'ensemble de ces parcelles a fait l'objet d'un suivi régulier, au cours du cycle de végétation, de leurs caractéristiques biologiques et radiométriques moyennes :

- mesure de la biomasse aérienne totale, de l'indice foliaire vert sur 10 placettes représentant environ 0,25m<sup>2</sup>. En 1986, le protocole d'échantillonnage était différent : dans chacune des parcelles, l'une homogène, l'autre très hétérogène, étaient disposées 3 stations de 400 m<sup>2</sup> dans lesquelles on prélevait 10 placettes.
- suivi de l'évolution phénologique et mesure à la récolte des composantes du rendement sur la même base d'échantillonnage,
- mesure des réflectances dans les 3 canaux de SPOT avec un radiomètre (Cimel) monté sur un support permettant une visée verticale (2,5 m de hauteur) d'une surface d'environ 0,25 m<sup>2</sup>, sur 10 à 15 placettes (30 en 1986, correspondant exactement aux placettes de prélèvement biologique), et ce dans des conditions garantissant au maximum la standardisation (midi solaire, ciel clair, temps calme).

Pour la validation, nous nous sommes appuyés en grande partie sur des réseaux de parcelles d'observation existants (Association blé dur – développement, LECSA) pour mesurer à certains stades la biomasse totale et les composantes du rendement. Au total 16 parcelles ont été retenues.

## 2. Les données satellitaires SPOT

Les scènes SPOT couvrent une surface de 60 km × 60 km et permettent d'obtenir des données numériques de luminance dans les trois canaux XS1 (500-590 nm), XS2 (610-680 nm), XS3 (700-890 nm) avec une résolution de 20 m.

Nous avons fait une demande de programmation du satellite pour 6 périodes : 5 scènes ont été obtenues (5 et 30 mars, 15 avril, 6 et 27 juin), la période n'ayant pu être couverte (mai) correspond malheureusement au maximum des indices de végétation du blé.

Les données numériques dans les bandes rouge (XS2) et proche infrarouge (XS3) sont d'abord calibrées (application de coefficients de calibration fournis par SPOT Image). Les luminances ainsi obtenues sont ensuite corrigées des effets d'éclairement (hauteur du soleil au moment du passage du satellite) et d'angle de prise de vue. Le problème, dans l'utilisation de données multitemporelles, est de s'affranchir des effets liés à l'atmosphère (dont les états varient d'une date à l'autre). On montre que l'action de ces effets (globalement transmission et diffusion) sur la luminance réelle au sol peut être additif et qu'inversement on peut déduire la réflectance au sol  $r$  de la luminance enregistrée par le satellite  $L$  par une relation linéaire :

$$r = aL + b$$

L'indice de végétation le plus classique, la différence normalisée (DN), est ensuite calculé à partir des réflectances dans le rouge et le proche infrarouge :

$$DN = \frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2}$$

Ce calcul étant fait pour les 5 dates, il est alors possible d'obtenir l'évolution dans le temps de DN pour les parcelles suivies en faisant une interpolation linéaire entre ces dates.

On procède de même entre la date de semis, connue (où  $DN = DN_{sol\ nu}$ ), et celle de la première donnée SPOT ; pour la reconstitution du maximum, on a pris 2 options : l'option minimale, par défaut, et l'option maximale définie par l'intersection des 2 segments encadrant le maximum ou leur intersection et la droite  $DN = 1$ .

Suivant que les parcelles ont été semées tardivement ou précocement (en gros, après ou avant le 15 novembre), les données SPOT obtenues permettent de décrire plus ou moins bien cette évolution (en particulier, on surestime beaucoup le début dans le cas des semis précoces).

## III. – Les résultats obtenus

Le but du programme proposé était d'établir, dans les conditions de l'agriculture française (et plus particulièrement de la région sud-est, compte tenu de ses caractéristiques favorables d'ensoleillement), la possibilité de caractériser les rendements des céréales (essentiellement blé dur, puis dans un deuxième temps riz) à partir des données de luminance fournies par SPOT. La voie la plus réaliste à l'heure actuelle consiste à essayer d'utiliser ces données (combinées en indices de végétation) pour prédire la biomasse, et utiliser celle-ci pour atteindre le rendement.

La façon la plus directe de relier la biomasse de la culture au rendement est de calculer, au moment de la récolte, le rapport entre les deux ou l'indice de récolte. Mais l'inconvénient de ce critère, son manque de validité générale, est prévisible et il semble préférable de mieux prendre en compte la façon dont s'est élaboré le rendement en étudiant plutôt les relations entre les états de croissance à certains stades-clés du développement et les composantes du rendement.

Les agronomes ont l'habitude de travailler sur ce type de relation qui leur permet de définir des potentiels de rendement. Il s'agit essentiellement, dans le cas du blé tendre de relier le nombre potentiel d'épis à la biomasse sur pied au stade blé (peu différent du début montaison) et le nombre potentiel de grains à la biomasse sur pied à la floraison. Ces relations exprimant des potentiels (c'est-à-dire des niveaux probables sous réserves que toutes les conditions de croissance sont à l'optimum) sont de forme généralement paraboliques, ce sont les enveloppes de courbes reliant les états de croissance (biomasse), aux stades cités, aux niveaux réels des composantes du rendement. Ce sont ces dernières courbes que nous nous proposons d'établir. La grande limitation de ce type de relation dans notre cas est leur spécificité variétale.

### 1. Description de la production de biomasse

La méthode est basée sur la relation proposée initialement par Monteith, reprise et adaptée par Gosse et Varlet-Grancher.

$$\frac{dMST}{dt} = \varepsilon_b \varepsilon_i \varepsilon_c \cdot RG$$

où le taux de production de matière sèche totale  $dMST/dt$  est relié au rayonnement global  $RG$  par le biais de son équivalence en rayonnement photosynthétiquement actif  $PAR$  ( $\varepsilon_c \cdot RG$ ), de son absorption par le couvert végétal (traduite par le coefficient  $\varepsilon_i$ ) et de sa conversion en matière sèche (traduite par  $\varepsilon_b$ ).

Dans l'approche adoptée, les données d'indice de végétation  $DN$  sont utilisées pour reconstituer l'efficacité d'interception  $\varepsilon_i$  par :  $\varepsilon_i = a (DN - DN_0)$ ,  $DN_0$  étant l'indice de végétation du sol nu.  $\varepsilon_c$  est pris égal à 0,42 (d'après les mesures de la parcelle expérimentale de Montfavet).

Par intégration de l'expression précédente avec un pas de temps journalier, et moyennant les hypothèses de constance de  $a$  et  $\varepsilon_b$  (elles seront discutées dans la suite), la matière sèche  $MST_i$  produite entre deux dates  $d_i$  et  $d_{i+k}$  peut s'écrire :

$$MST_i = a \cdot \varepsilon_b \cdot \varepsilon_c \cdot \sum_{j=i}^{i+k} (DN_j - DN_0) \cdot RG_j$$

L'application de cette relation aux conditions expérimentales de l'année 1987 (**figure 4**) en utilisant les données climatiques du poste de Fourques, permet d'obtenir des relations significatives entre  $MST$  produite pendant différentes phases et  $\sum DN \cdot RG$  (**figure 1**).

Si l'on considère les périodes emboîtées à partir du semis on constate que les relations restent bonnes car le schéma de développement pour les différentes parcelles est très semblable. Sur les graphiques, on a fait apparaître les points correspondant aux traitements «Crau non irrigués» pour montrer la sensibilité de la relation au stress hydrique (via  $\varepsilon_b$ ) mais étant donné leur caractère parfaitement non naturel, nous ne les avons pas pris en compte dans le calcul de la relation.

A partir des coefficients de régression calculés ( $a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ ), on peut, en prenant  $\varepsilon_c = 0,42$  et  $a = 1,2$ , calculer les valeurs de  $\varepsilon_b$  suivantes :

semis – début montaison	0,95g/MJ/m <sup>2</sup>
début montaison – floraison	2,43 "
floraison – récolte	1,70 "
semis – floraison	1,89 "
semis – récolte	1,80 "

Ces valeurs sont évidemment plus faibles que les valeurs trouvées habituellement dans la littérature et fluctuent en fonction des périodes pour différentes raisons (limitation à la biomasse aérienne et répartition variable entre parties aériennes et souterraines) auxquelles on peut ajouter la sous-estimation de la mesure de la matière sèche sur pied, de plus en plus marquée au fur et à mesure qu'on avance dans le temps car les feuilles sénescentes ne sont pas récoltables (elles disparaissent).

## 2. Passage de la biomasse aux composantes du rendement

Les relations établies entre le nombre d'épis par m<sup>2</sup> et la biomasse au début de la montaison d'une part, le nombre de grains par m<sup>2</sup> et la biomasse à la floraison d'autre part (**figure 2**) sont, comme prévu, significatives mais assez lâches en partie à cause de l'effet variétal (cf. Olinto, variété haute à très larges feuilles) et de l'influence des conditions de culture (cf. traitements secs en Crau et problèmes de salinité notoire en Camargue). Il faut noter que, à cause de la difficulté à obtenir des mesures précises de la date d'occurrence d'un stade (phénomène continu et non pas discret, suivi non quotidien mais quasi-hebdomadaire sur le terrain), la détermination de la biomasse à un stade donné est entachée d'une erreur non négligeable, particulièrement à la floraison où sa vitesse d'évolution est très grande.

L'indice de récolte (**figure 2**) se révèle le critère le plus intéressant (73 à 82 % de la variance des rendements expliquée par la biomasse à la récolte). Comme par ailleurs la biomasse produite pendant la période semis-récolte est bien reliée à la somme des DN\*RG, le modèle que nous retiendrons est constitué des deux relations suivantes :

$$MST_{rec} = 0,906 \sum_{sem}^{rec} (DN_j - DNO).RG_j + 14$$

avec  $DN_0 = 0,12$  pour la Camargue,  $0,17$  pour la Crau et  $rendement = 0.353 MST_{rec} + 34$ .

## 3. Passage à l'échelle de SPOT

L'application de ces relations aux parcelles de validation suivies par SPOT, permet d'obtenir des résultats relativement intéressants pour la biomasse, beaucoup plus dispersés au niveau du rendement final (**fig. 3**).

La surestimation des indices de végétation dans la période hivernale pour les semis précoces conduisent à une surestimation systématique de la biomasse et du rendement pour ces derniers. L'absence de données SPOT au cours du mois de mai introduit des erreurs supplémentaires. D'autres facteurs interviennent pour expliquer ces résultats : ils sont liés aux hypothèses fortes sur lesquelles est fondée cette méthode :

- la variabilité de  $\varepsilon_b$  en fonction des stades. Or toutes les parcelles ne franchissent pas les mêmes stades au même moment et pas avec les mêmes états de croissance, des situations culturales pouvant créer ou non des stress (hydrique, azoté, dû à la salinité excessive),
- l'influence de la structure (et donc de l'effet variétal) et des propriétés optiques des cultures (donc de leur état de sénescence ou sanitaire) sur le  $a$  de la relation  $\varepsilon_i - DN$ ,
- la grande dépendance variétale des relations biomasse-composantes du rendement et leur validité contestable en dehors de conditions de cultures optimales.

On peut ajouter d'autres sources d'erreur :

- la mauvaise précision obtenue sur les mesures ponctuelles de biomasse à la récolte (échantillonnage très faible et pas de possibilité de lissage de l'erreur sur la mesure finale par l'ajustement logistique),
- la méthode utilisée permet le cumul des erreurs au cours des deux étapes de l'estimation.

## IV. – Conclusion

On voit ici les difficultés rencontrées dans la phase de validation d'un modèle qui se veut applicable en grandeur nature avec des données satellitaires. Elles tiennent à deux types de considérations :

**Sur la forme du modèle** : bien que, pour la première partie, les fondements physiques en soient assurés, les hypothèses simplificatrices faites lui confèrent un fort degré d'empirisme. Des améliorations peuvent lui être apportées par :

- une meilleure modélisation de  $\varepsilon_i$  en fonction des réflectances rouge et proche infrarouge, mieux paramétrée en fonction des changements de structure liés aux différentes phases du développement,
- une meilleure prise en compte de la variabilité de  $\varepsilon_b$  à la fois en fonction du stade de développement de la culture et en fonction des conditions climatiques.

La deuxième partie du modèle peut également être améliorée par une modélisation de type agrométéorologique et donner :

- des estimations des niveaux réels des composantes du rendement à partir des niveaux potentiels,
- directement une composante du rendement (le poids des grains par exemple),

**Sur la grande variabilité des situations qui existent à l'échelle régionale** (variétés, dates de semis, techniques culturales) et qui, quel que soit le modèle utilisé sera à prendre en compte.

Au-delà de ces considérations précises, qui délimitent les axes de recherche sur lesquels nous devons faire porter l'effort dans les années à venir, il est possible de tirer de cette première expérimentation en vraie grandeur avec les données SPOT les enseignements suivants :

– Le suivi des cultures avec un satellite tel que SPOT est techniquement possible, même si apparaissent de sérieux problèmes (périodes nuageuses, concurrence des programmations) pour obtenir les données souhaitées.

– L'approche de la biomasse par la démarche «interception de l'énergie lumineuse» est envisageable pour un climat de type méditerranéen, alors que dans les autres régions productrices françaises (type bassin parisien ou sud ouest), il n'apparaît guère possible de faire autrement que d'espérer obtenir des données à des dates significatives et utiliser ensuite des relations empiriques entre biomasse, rendement et indices de végétation.

Ces travaux ont été conduits en conditions méditerranéennes assez particulières puisque, grâce à la présence d'une nappe phréatique très superficielle, les cultures peuvent être considérées comme «protégées» du stress hydrique. Cependant la forme du modèle proposé peut fort bien prendre en compte des situations hydriques moins favorisées, à condition de quantifier l'effet du stress hydrique sur la production de biomasse via  $\varepsilon_b$ , effet nettement visible pour les parcelles de Crau non irriguées sur les **figures 1 et 2**. Des travaux ont été entrepris dans ce sens à une échelle locale et visent à coupler cette approche radiométrique de la biomasse avec une caractérisation de l'état hydrique du couvert par l'information radiométrique dans l'infrarouge thermique. Les retombées de ce type de travaux seront évidemment d'un grand intérêt pour les études de la productivité des cultures en zone aride, envisageables à grande échelle grâce aux données satellitaires.

## Références

- KUMAR (M.), MONTEITH (J.L.), 1982, Remote sensing of crop growth, in *Plants and the daylight spectrum*, Smith H., Academic Press, pp. 133-144.
- STEVEN (M. D.), BISCOE (P.V.) and JAGGARD (K.W.), 1983, Estimation of sugar beet productivity from reflection in the red and infrared spectral bands, *Int. J. Remote Sensing* 4(2), pp. 325-334.
- JAPPIOT (M), 1987, *Estimation de la biomasse d'une culture de blé à partir des indices de végétation SPOT*, Marseille : Fac. St Jérôme, 30 p. + annexes (mémoire DEA).
- STEINMETZ (S.), GUERIF (M.), DELÉCOLLE (R.), BARET (F.), 1989, Spectral estimates of intercepted photosynthetically active radiation and biomass production of a durum winter wheat affected by nitrogen and water deficiencies. *Application of remote sensing in agriculture, Remote sensing Workshop*, University of Nottingham (UK), 3-7 April 1989.
- DELÉCOLLE (R.), GUERIF (M.), 1988, Introducing spectral data into a plant process model for improving its predicting ability, *Proc. 4th Intern Symp. Sign Spectr*, Aussois, 18-22 janvier 1988.
- VARLET-GRANCHER (C.), CHARTIER (M.), ARTIS (P.), 1982, Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal, *Acta Oecologica, Oecol. Plant.* 3(17), pp. 3-26.
- HATFIELD (J.L.), ASRAR (G.), KANEMASU (E.T.), 1984, Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 14, pp. 65-75.
- BARET (F.), CHARRIER (X.), MEYNARD (J.M.), 1987, *Estimation du potentiel de rendement d'une culture de blé au stade début montaison*, Avignon : INRA, 22 p. (note interne Stat. Bioclim.)
- MASLE (J.), 1980, L'élaboration du nombre d'épis chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière, Paris-Grignon : INA, 274 p. (thèse de Docteur-Ingénieur).

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une ATP-CNES-CNRS-INRA et a reçu un soutien financier du Conseil Général de la Région PACA.

### Figure 1 : Localisation des parcelles expérimentales.

(Le carré en pointillé figure la zone de l'image SPOT présentée sur les photos)

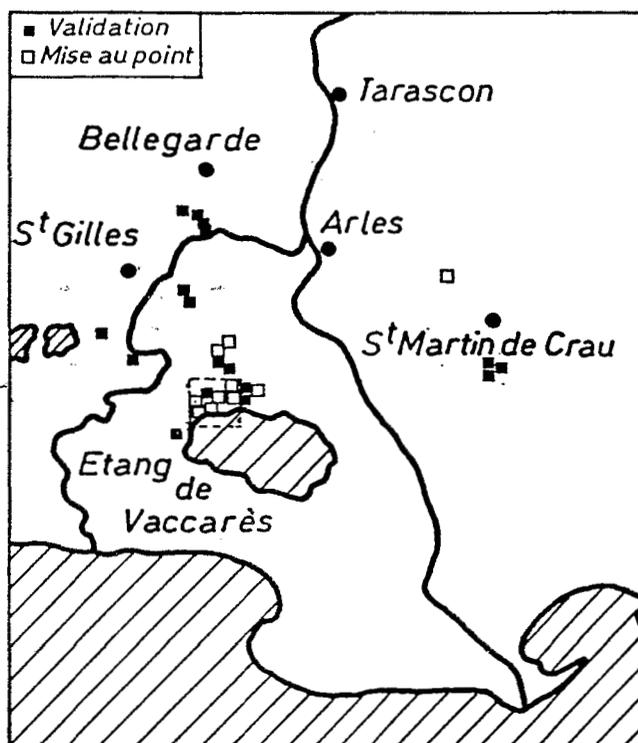


Figure 2 : Evolution des indices de végétation (DN) sur une zone 5\*5 km<sup>2</sup>

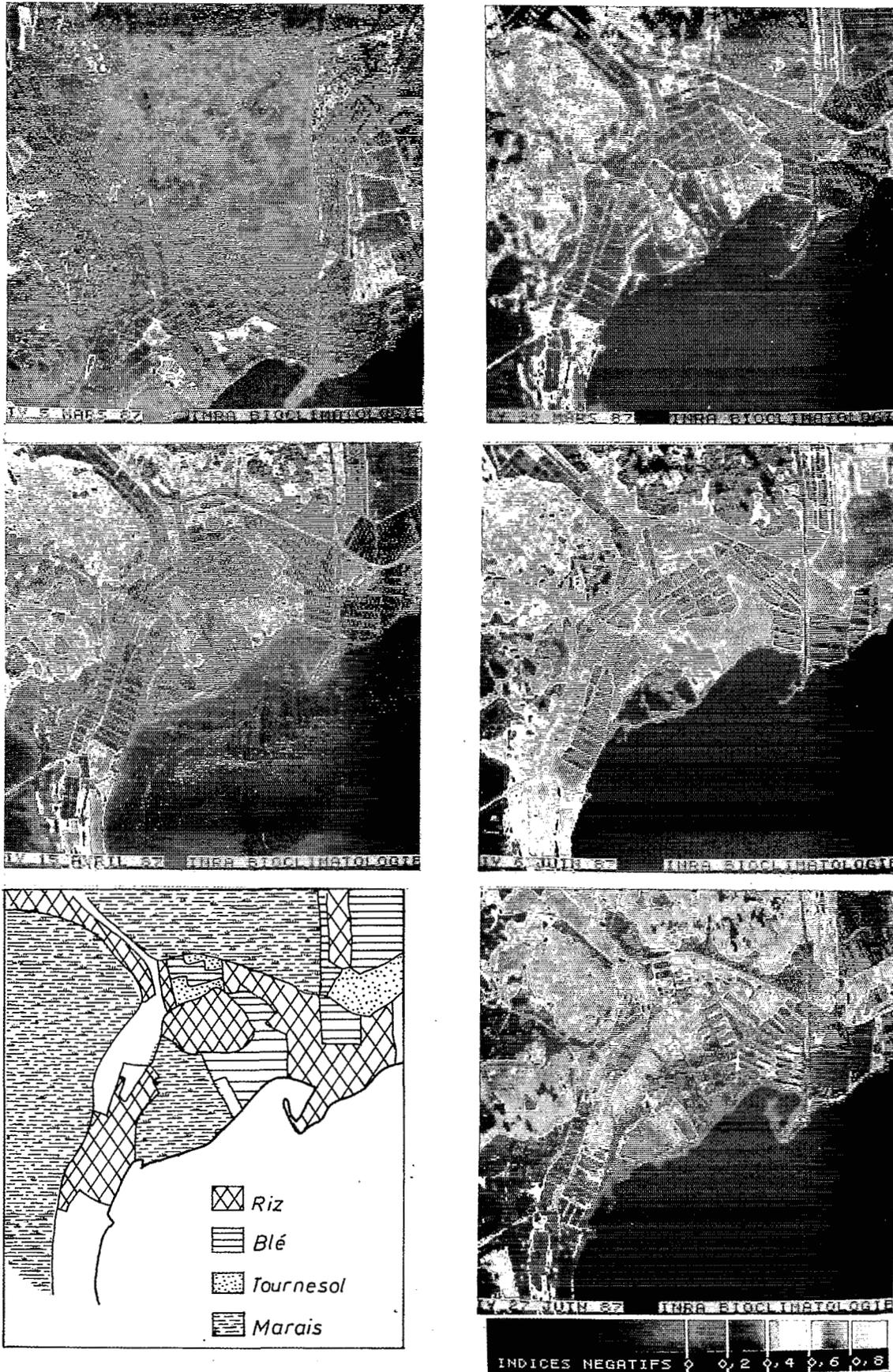


Figure 3 : Reconstitution de l'évolution de la différence normalisée à partir des données SPOT Options mini (---) et maxi (—)

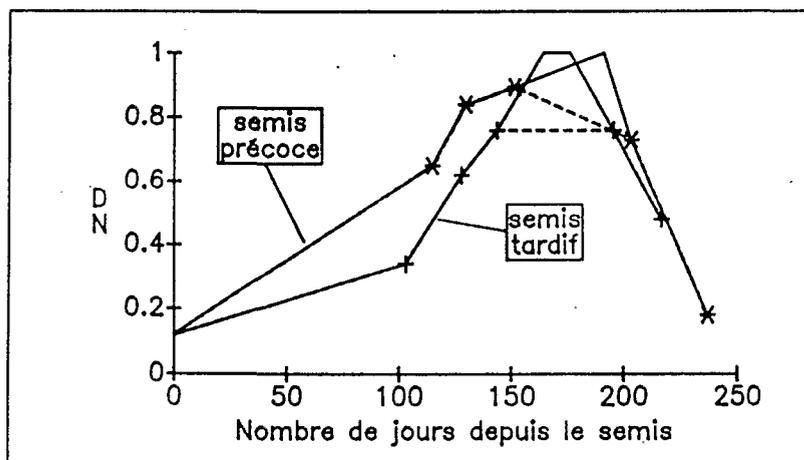
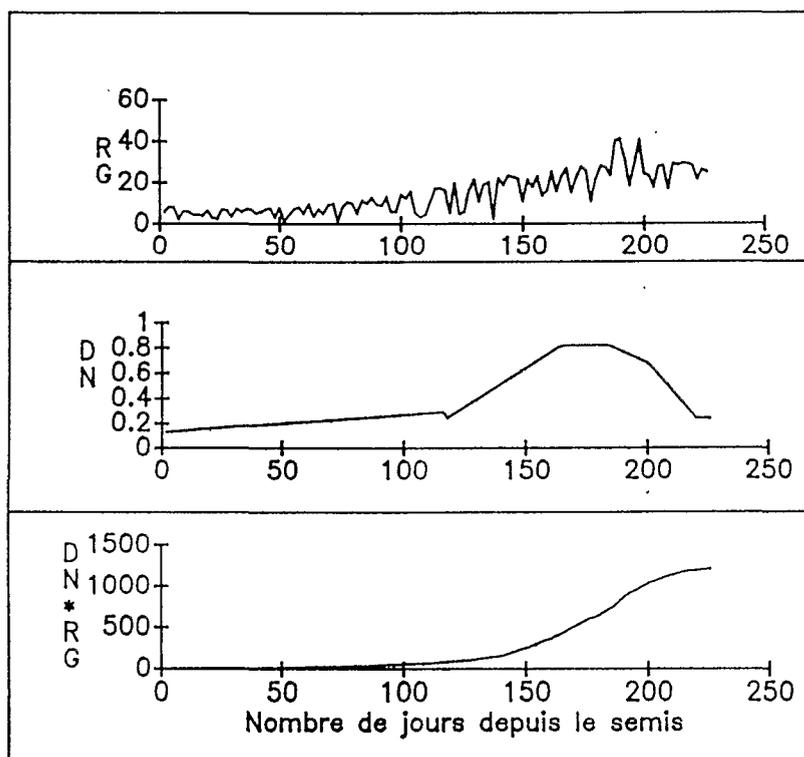


Figure 4 : Evolution comparée de RG, DN,  $\Sigma DN.RG$  pour une parcelle



**Figure 5 : Relations biomasse- $\Sigma$ DN.RG pour les trois périodes**

- a) semis-montaison, montaison-floraison et floraison-récolte
  - b) semis-montaison, semis-floraison et semis-récolte
- (les points Crau sec (O) sont exclus de la régression)

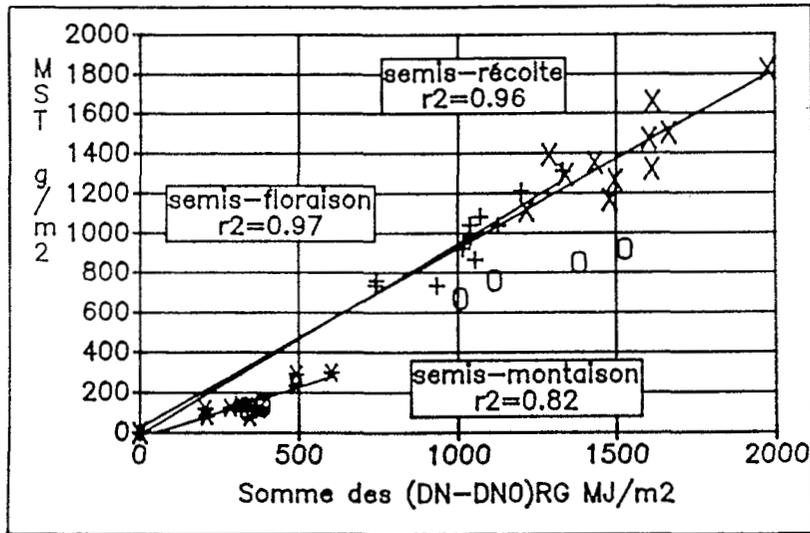
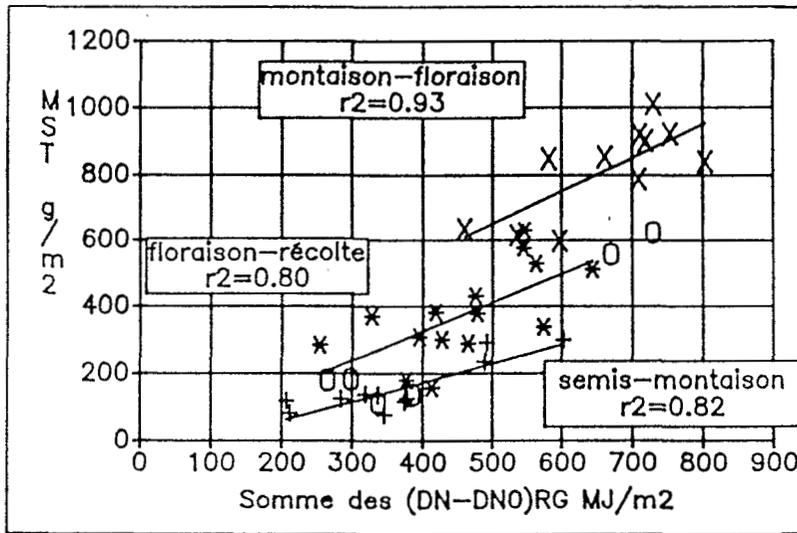
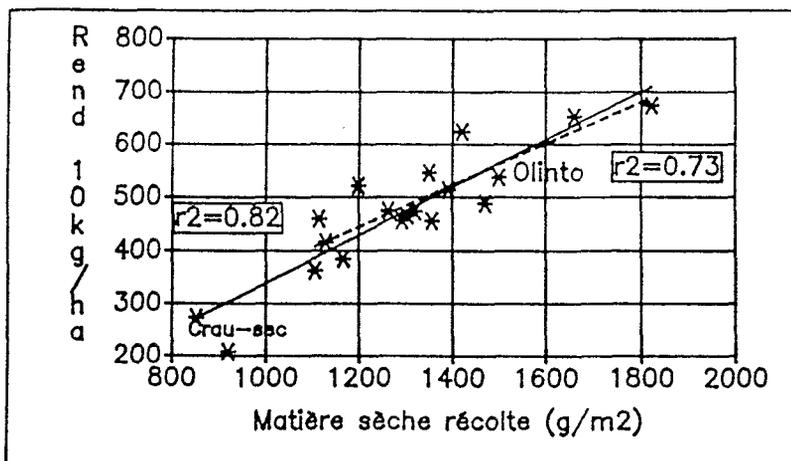
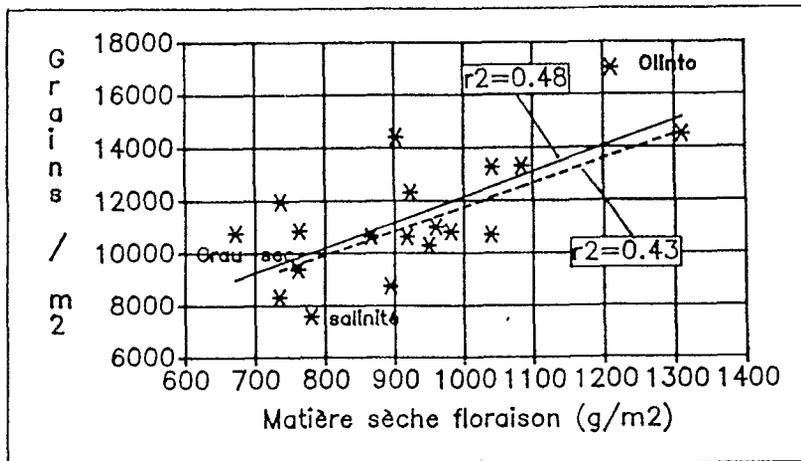
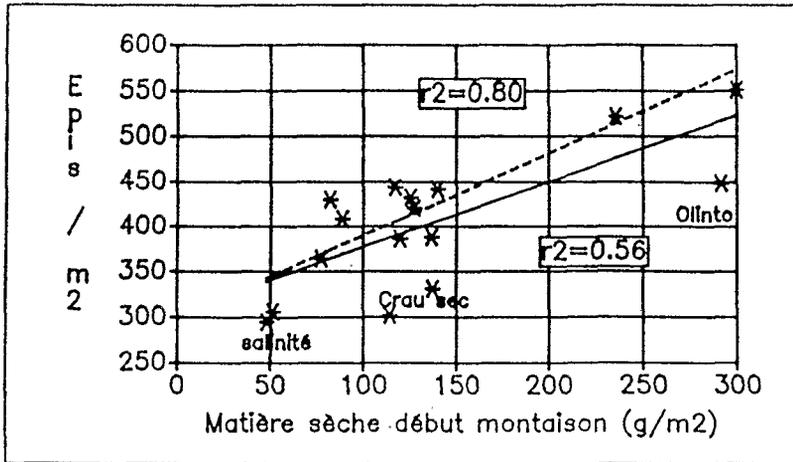


Figure 6 : Relations biomasse-composantes du rendement.

Les régressions sont faites sur l'ensemble des points (—)  
ou après avoir exclu la Crau sèche et la var. Olinto (---)



**Figure 7 : Comparaison des biomasses et rendements estimés/mesurés.**  
 (On a relié entre elles les estimations dérivant des options mini et maxi de DN)

