

PARTIE III

Humidité des sols

13

Utilisation de la radiothermométrie IR pour une meilleure gestion des ressources en eau d'irrigation au Maroc

KAMAL BELABBES¹ et BERNARD ITIER²

¹ *Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Département de l'équipement et de l'hydraulique, B.P. 6202, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc;*
téléphone : +212 (7) 77-17-58; télécopieur : +212 (7) 77-58-38;
télex : AGROVET 36089 M

² *Institut national de la recherche agronomique, Station de bioclimatologie-télé-détection, 78850 Thiverval-Grignon, France;*
téléphone : +33 (1) 30-81-55-55; télécopieur: +33 (1) 30-81-55-63

Résumé

Des mesures radiothermométriques de terrain ont été réalisées durant les deux campagnes agricoles de 1990-1991 et 1991-1992 sur des couverts de blé dans deux contextes semi-arides marocains. L'étude a permis, dans un premier temps, d'établir les droites caractéristiques pour le calcul du CWSI (*Crop Water Stress Index*) du couvert de blé après la phase de tallage. Les droites obtenues se sont avérées différentes de celles établies dans d'autres contextes (USA) et, qu'en première approximation, elles sont comparables entre les deux contextes pédoclimatiques marocains. Lors d'une deuxième phase, une gestion des arrosages a été effectuée sur la base de trois seuils de stress hydrique : faible (CWSI = 0,3), moyen (CWSI = 0,5) et fort (CWSI = 0,7). Une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation a été obtenue pour le régime CWSI = 0,5. Par ailleurs, les résultats ont permis de confirmer la validité du modèle simplifié d'estimation de l'ETR à partir de la température de surface et de le calibrer sous les conditions semi-arides marocaines. Ces résultats laissent entrevoir de grandes possibilités d'application de la radiothermométrie de terrain dans l'amélioration de la gestion des ressources en eau allouées à l'irrigation dans le contexte marocain.

1. Introduction

Aujourd'hui, plus que par le passé, le monde de l'agriculture irriguée est conscient de la nécessité d'une gestion rationnelle et plus efficiente des ressources en eau allouées à l'irrigation. L'intérêt d'une telle gestion n'est plus à démontrer aussi bien sur le plan agricole que socio-économique et écologique. Toutefois, une utilisation rationnelle de l'eau d'irrigation requiert le développement de techniques fiables et sensibles pour la détection du stress hydrique du couvert végétal. Actuellement, l'une des techniques les plus pertinentes dans cette rubrique est sans conteste la radiothermométrie infrarouge. La température de surface d'un couvert végétal est en effet un bon indicateur du degré de réduction de son évapotranspiration. Le développement des techniques de télédétection en général et de la radiothermométrie infrarouge, en particulier, aussi bien de terrain que par des capteurs aéroportés, a ouvert de nouvelles perspectives à l'utilisation de cette technique pour le suivi du bilan hydrique du sol et la détection du stress hydrique. Les débuts des années 80 ont vu le développement d'une technique pour la quantification du stress hydrique par le moyen d'un indice normalisé basé sur les températures radiatives de surface (JACKSON *et al.*, 1981; PINTER and REGINATO, 1982) qui a été appelé : *Crop Water Stress Index* (CWSI). Il a été défini par JACKSON *et al.*(1981) par :

$$CWSI = 1 - (ETR / ETM) \quad (1)$$

où ETR et ETM sont respectivement l'évapotranspiration réelle et évapotranspiration maximale. Une approche théorique a été développée en vue de son estimation. IDSO *et al.*(1981) ont expérimentalement développé une procédure pour sa quantification basée sur la différence entre la température de surface du couvert (Ts) et celle de l'air (Ta) ainsi que sur le déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) comme paramètres. Sur la figure 1, on représente l'illustration graphique du CWSI : pour le point B, correspondant à un écart de température (Ts-Ta) et à un degré de déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) donnés, le CWSI est égal au rapport des distances BC et AC. Les points A et B représentent, respectivement, l'état de stress hydrique maximum (ETR = 0) et minimum (ETR = ETM). Le CWSI peut encore s'écrire :

$$CWSI = [(Ts-Ta) - (Ts-Ta)_{min}] / [(Ts-Ta)_{max} - (Ts-Ta)_{min}] \quad (2)$$

La présente recherche, qui s'intègre dans une thématique du Département de l'équipement et de l'hydraulique de l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (BELABBES, 1990; AJAJ, 1991; LYAMANI, 1992) a comme objectif de développer une méthodologie pour l'utilisation de la température de surface pour, d'une part, une gestion des arrosages par le critère CWSI (ITIER *et al.*, 1992) et, d'autre part, l'estimation de l'évapotranspiration réelle en vue de suivre le bilan hydrique du sol (JACKSON *et al.*, 1977; SEGUIN and ITIER, 1983). Des couverts de blé ont fait l'objet de mesures radiothermométriques de terrain durant les deux campagnes agricoles 1990-1991 et 1991-1992 et dans deux contextes semi-arides marocains : la Chaouia et les Doukkala.

Cette étude a été menée en collaboration avec l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) français (Station de bioclimatologie et télédétection de Thiverval-Grignon) et le Centre aridoculture de l'INRA marocain.

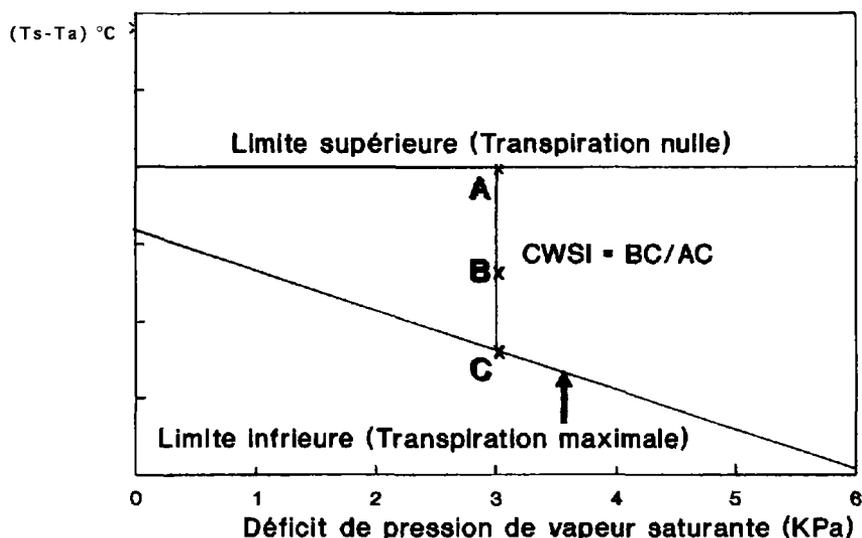


Figure 1. Représentation graphique du CWSI (*Crop Water Stress Index*)

2. Matériel et méthode

L'expérimentation s'est déroulée au cours des deux campagnes agricoles de 1990-1991 et de 1991-1992 sur des couverts de blé tendre, variété Merchouch 8, semés en ligne (30 cm d'interligne) avec une dose de semis de 1,5 quintaux/hectare.

La première campagne était conduite sur le site de la station expérimentale de l'INRA-Maroc à Sidi El Aydi dans la région de la Chaouia (33° N, $9^\circ 22'$ O). Le climat est de type semi-aride avec un régime pluviométrique très irrégulier en quantité et en distribution. La moyenne des précipitations est de 386 mm avec des extrêmes de 200 mm et de 750 mm. Le sol est profond, à texture argileuse (71 % d'argile, 22 % de limon et 7 % de sable) et peu humifère en surface. La parcelle expérimentale avait des dimensions de 189 m x 52 m, afin de minimiser les effets de l'advection sur les mesures microclimatiques et de température radiative de surface. Cinq emplacements à l'intérieur de la parcelle faisaient l'objet de mesures de température de surface et du bilan hydrique du sol (tubes d'accès de la sonde à neutron). Une placette de 5 m x 5 m était maintenue en confort hydrique (ETM) par des arrosages fréquents. Le mode d'irrigation est l'aspersion.

La deuxième année d'expérimentation s'est déroulée sur la station de l'INRA-Maroc à Khémis Ezmamra, dans la région des Doukkala ($32^\circ 24'$ N, $8^\circ 30'$ O). Le climat est de type méditerranéen à tendance semi-aride. La pluviométrie moyenne annuelle est de 332 mm. Le sol est de type sableux limoneux (46 % de sable, 22 % de limon et 32 % d'argile). Quatre parcelles de dimensions 18 m x 18 m correspondaient à quatre régimes hydriques. Trois seuils de CWSI conditionnaient les arrosages de trois parcelles, soit 0,3 (faible), 0,5 (moyen) et 0,7 (fort), la 4^e étant maintenue en confort hydrique par des arrosages fréquents. L'irrigation est effectuée par aspersion.

La température radiative de surface des couverts était mesurée par un radiothermomètre portatif de type HORIBA IT-330. Les mesures débutaient au cours du stade phénologique de tallage et étaient réalisées tous les jours de beau temps aux environs du midi solaire, dos

au soleil et par un balayage de 180° du couvert par le radiothermomètre incliné à environ 30 % par rapport à l'horizontale. L'émissivité était prise égale à 1 sur l'appareil. Afin d'avoir une bonne représentativité de la mesure au niveau de la parcelle, huit répétitions étaient réalisées à chaque passage et sur les mêmes emplacements.

Le déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) est calculé à partir des températures sèche et humide d'un psychromètre à aspiration placé au niveau de la parcelle où s'effectue la mesure de la température radiative de surface. Les deux mesures sont conduites simultanément.

L'évapotranspiration réelle (ETR) a été estimée par bilan hydrique du sol à partir de mesures hebdomadaires par une sonde à neutrons de type CPN 503 sur un profil de 80 cm.

Une station météorologique automatique de type Campbell CR10 était installée au niveau des parcs météorologiques des stations pour une acquisition fine des données climatiques. Le rayonnement net (Rn) a été estimé à partir du rayonnement solaire (Rs) par un modèle linéaire développé sur blé tendre à Sidi El Aydi (Chaouia, Maroc) (BELABBES, 1992) et qui s'écrit, pour Rn et Rs exprimés en kJ/m²/jour :

$$Rn = 0,669 Rs - 550,416 \quad (r = 0,99) \quad (3)$$

Le rayonnement solaire Rs était mesuré par un pyranomètre de type Licor-LI200S monté sur la station météorologique automatique.

3. Résultats et discussion

3.1. Le CWSI : droites caractéristiques

Sur les figures 2 et 3, on présente les droites de stress minimales (parcelles à l'ETM ou après un arrosage ou pluie) respectivement pour le contexte de Khémis Ezmamra et celui de Sidi El Aydi. On peut observer la forte corrélation entre le différentiel (Ts-Ta) et le DPVS. Ceci confirme les résultats obtenus par d'autres chercheurs (IDSO *et al.*, 1981). En outre, et en première approximation, les deux droites sont comparables :

$$(Ts-Ta)_{min} = -1,88 DPVS + 1,6 \quad (r = 0,94) \quad (4)$$

$$(Ts-Ta)_{min} = -1,70 DPVS + 1,71 \quad (r = 0,92) \quad (5)$$

Cependant, ces droites caractéristiques de stress minimum sont différentes de celle proposée pour le blé par IDSO (1982) pour le contexte des USA, et qui s'écrit :

$$(Ts-Ta)_{min} = -2,11 DPVS + 2,88 \quad (r = 0,94) \quad (6)$$

Ceci n'est pas en accord avec ce que rapportait IDSO (1982) quant à l'universalité de ces droites caractéristiques de stress minimum et leur indépendance de la variabilité des conditions de l'environnement sauf pour la couverture nuageuse. Ceci nous conduit à recommander que ces droites soient déterminées pour chaque contexte climatique considéré.

Par ailleurs, les états de stress maximum des couverts de blé obtenus en fin de phases de dessèchement, ont mis en évidence la valeur 3,5 °C comme écart maximum du différentiel (Ts-Ta) et il est indépendant du déficit de pression saturante (DPVS). Cette valeur a constitué donc la droite de stress maximum pour le calcul du CWSI (fig.1).

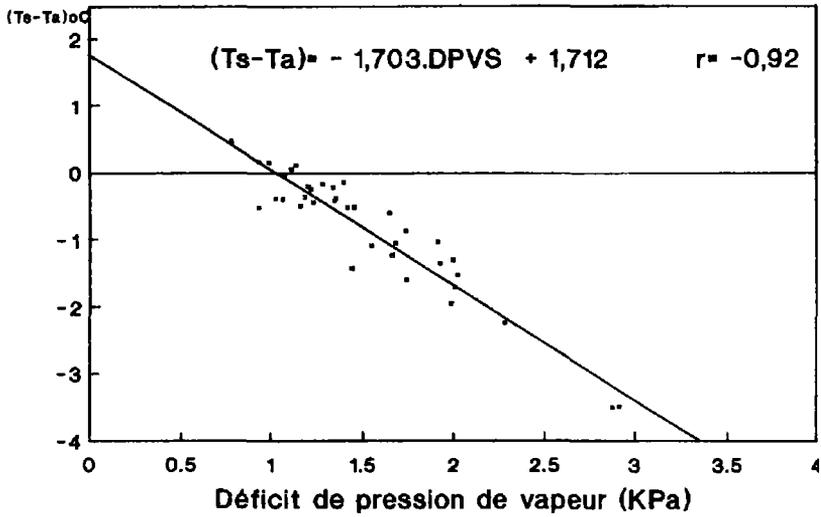


Figure 2. Droite reliant le différentiel $(T_s - T_a)$ au déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) en conditions de stress minimum : cas du couvert de blé tendre (Khémis Ezmamra, 1991-1992)

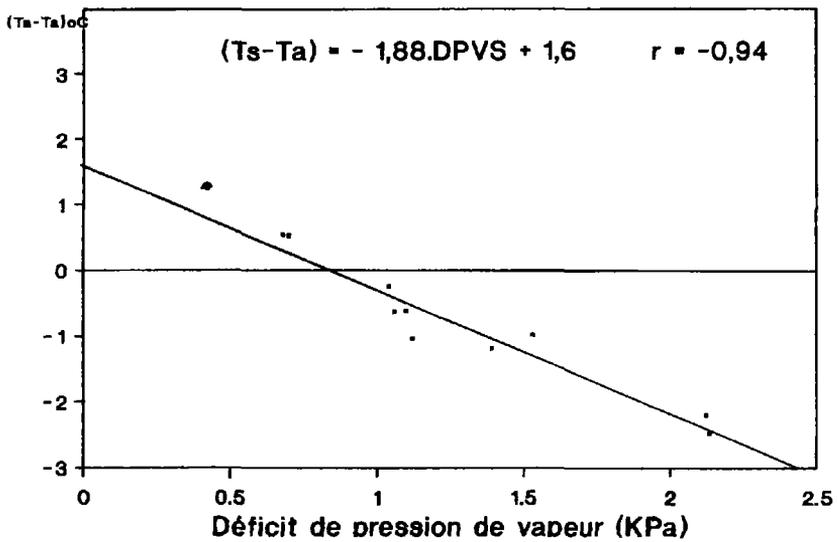


Figure 3. Droite reliant le différentiel $(T_s - T_a)$ au déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) en conditions de stress minimum : cas du couvert de blé tendre (Sidi El Aydi, 1990-1991)

3.2. CWSI : outil pour la gestion des arrosages ?

Au cours de la campagne de 1991-1992, la gestion des arrosages de complément du blé s'est faite sur la base de trois seuils de l'indice CWSI : faible (0,3), moyen (0,5) et fort (0,7). Le CWSI a été calculé suivant l'approche empirique (IDSO *et al.*, 1981; GARROT *et al.*, 1990) avec les droites caractéristiques établies lors de la première phase de l'étude. Sur les figures 4a, 4b et 4c, on illustre l'évolution du CWSI à partir de la phase de tallage du blé, respectivement pour les régimes CWSI 0,3, CWSI 0,5 et CWSI 0,7. Sur le graphique de la figure 5, on représente le cas de la parcelle conduite à l'ETM (confort hydrique) et où le CWSI a été maintenu en moyenne à 0,2. On peut relever, sur l'ensemble des figures 4a, 4b, 4c et 5, la grande sensibilité de cet indice au dessèchement du couvert et aux différents apports d'eau (arrosages ou pluie).

Sur le tableau 1, on présente le nombre d'arrosages, les volumes d'eau apportés en supplément à la pluie et les consommations en eau (ETR) à partir de la phase de tallage, pour les quatre régimes. On peut y relever la corrélation positive entre le degré de stress hydrique permis, d'une part, et les apports de complément et les consommations en eau, d'autre part. Le régime ETM a enregistré les apports d'eau et les consommations en eau les plus élevés alors que le régime CWSI 0,7 a conduit aux valeurs les plus faibles. L'évolution du stock d'eau dans le sol pour les quatre régimes hydriques, illustrée sur la figure 6, vient confirmer cette différenciation.

La relation entre les rendements et le CWSI peut être déduite du tableau 2 qui montre que les rendements (grain et paille) sont d'autant plus faibles que le seuil du CWSI pour le déclenchement des arrosages est élevé. Le régime ETM (CWSI = 0,2) a conduit au rendement en paille le plus élevé, au détriment du rendement grain. Ceci est parfaitement en accord avec ce qui est admis en matière de réponse des plantes à l'eau (DOORENBOS and KASSAM, 1979). La meilleure efficacité d'utilisation de l'eau, définie par le rapport entre le rendement en grain et la consommation en eau du couvert, a été obtenue pour le régime CWSI 0,5.

3.3. Un modèle pour l'estimation de l'ETR à partir de Ts

À partir de l'équation du bilan d'énergie, JACKSON *et al.*(1977) avaient proposé un modèle simplifié pour l'estimation de l'ETR d'un couvert végétal à partir de sa température radiative de surface qui s'écrit :

$$ETR = R_n - B (T_s - T_a) \quad (7)$$

où ETR et R_n sont respectivement l'évapotranspiration réelle journalière du couvert (en mm/jour) et le rayonnement net journalier. $T_s - T_a$ est le différentiel de température entre la surface et l'air mesuré au midi solaire, et B est un coefficient qui dépend du couvert végétal considéré et du contexte climatique. Pour le contexte de Phoenix (USA), JACKSON *et al.*(1977) rapportaient un coefficient B égal à 0,64. À partir d'une analyse théorique et d'expérimentation dans le sud de la France, SEGUIN et ITIER (1983) ont mis en évidence l'influence du vent, des conditions de stabilité thermique et de la rugosité de la surface sur le coefficient B et trouvaient un coefficient B = 0,25. Dans les conditions de nos essais à Khémis Ezmamra (Doukkala, Maroc), on a trouvé un coefficient B de l'ordre de 0,91. La relation obtenue est sous la forme :

$$ETR - R_n = -0,912 (T_s - T_a) - 2,5 \quad (r = 0,89) \quad (8)$$

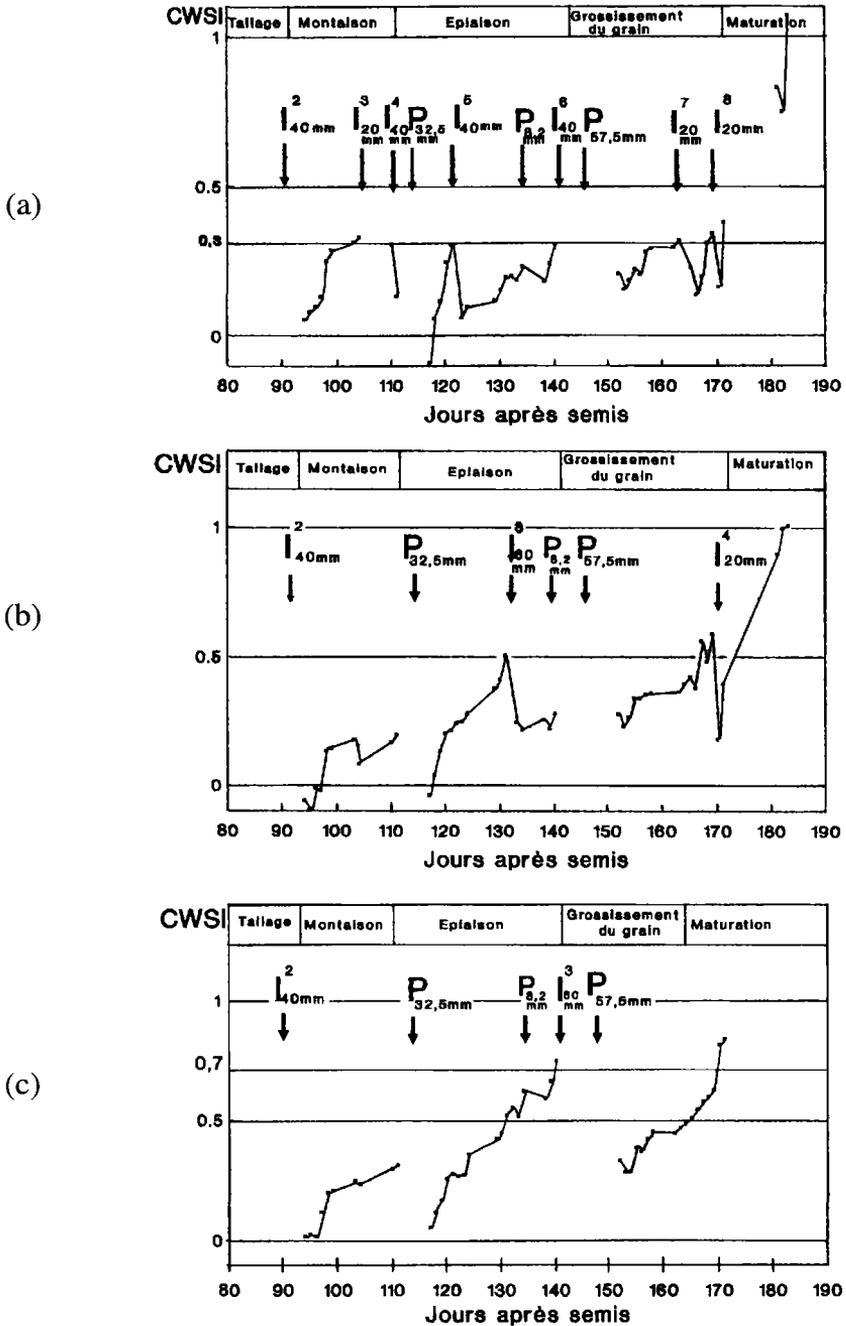


Figure 4. Évolution du CWSI au cours du développement du couvert blé tendre (Khémis Ezmamra, 1991-1992) : a) cas du régime hydrique CWSI = 0,3 ; b) cas du régime hydrique CWSI = 0,5 ; c) cas du régime hydrique CWSI = 0,7

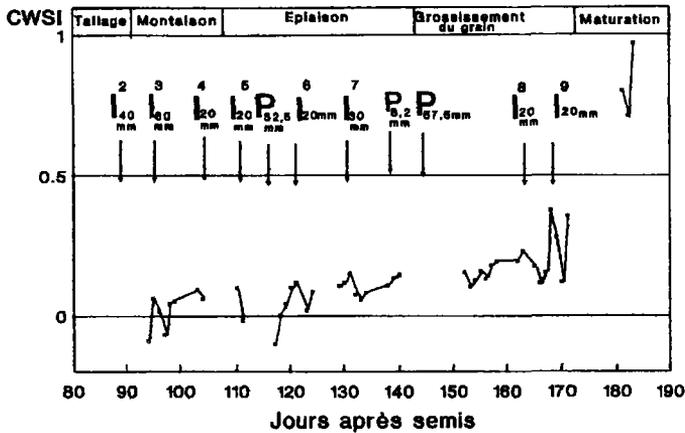


Figure 5. Évolution du CWSI au cours du développement du couvert blé tendre : cas du régime ETM (Khémis Ezmamra, 1991-1992)

Tableau 1. Les apports d'eau d'irrigation et les consommations en eau pour les quatre régimes hydriques : Khémis Ezmamra, 1991-1992

Régime hydrique	Nombre d'arrosages	Apport d'eau (mm)	Consommation en eau (mm)*
CSWI = 0,3	8	240	290,08
CSWI = 0,5	4	160	238,78
CSWI = 0,7	3	120	199,69
ETM	9	290	331,92

* Ces consommations en eau sont estimées par bilan hydrique à partir de la phase de tallage.

où ETR, Rn et (Ts-Ta) sont des valeurs moyennes sur la période séparant deux mesures du bilan hydrique du sol (4 à 7 jours). Ceci confirme la nécessité d'un calage de cette relation dans chaque contexte climatique.

Ce modèle a été sensiblement amélioré en faisant intervenir le déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) et nous avons obtenu :

$$ETR - Rn = -0,912 (Ts-Ta) - 0,614 DPVS - 1,485 \quad (r = 0,93) \quad (9)$$

Cette bonne corrélation fait entrevoir de grandes possibilités pour le suivi du bilan hydrique à partir de simples mesures des températures de surface et de quelques paramètres climatiques.

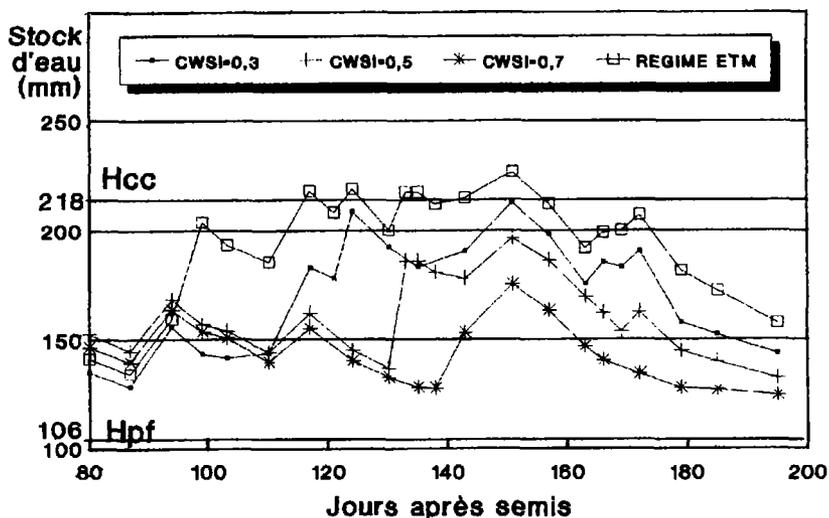


Figure 6. Évolution du stock d'eau dans le sol pour les différents régimes hydriques pour le couvert de blé tendre (Khémis Ezmamra, 1991-1992)

Tableau 2. Rendements et efficacité d'utilisation de l'eau pour les quatre régimes hydriques : Khémis Ezmamra, 1991-1992

Régime hydrique	Rendement grain (qx/ha)	Rendement paille (t/ha)	Efficacité utilisation (qx/ha·mm)*
CSWI = 0,3	43,85	8,59	0,15
CSWI = 0,5	39,85	7,20	0,17
CSWI = 0,7	32,53	6,08	0,16
ETM	40,35	9,18	0,12

* Représente le rapport rendement grain/consommation en eau. Les consommations en eau sont estimées par bilan hydrique du sol à partir de la phase de tallage.

4. Conclusions

Les résultats présentés confirment les possibilités offertes par la radiothermométrie IR pour l'appréciation du degré de stress hydrique d'un couvert de blé et la détermination des consommations en eau.

Les droites caractéristiques pour le calcul de l'indice thermique CWSI ont été déterminées pour deux contextes semi-arides marocains (la Chaouia et les Doukkala). Le CWSI s'avère un bon indicateur du stress hydrique qui peut être utilisé pour une gestion des apports d'eau de complément du blé.

L'étude a par ailleurs permis de calibrer le modèle simplifié pour l'estimation de l'ETR à partir de la température radiative de surface du couvert. Des corrélations hautement significatives ont été obtenues. Celles-ci ont été encore améliorées en prenant en compte le déficit de pression de vapeur saturante comme facteur climatique supplémentaire au rayonnement net et la température de surface.

5. Références

- AJAJ, M. 1991. Contribution à l'étude des températures radiatives de surface en tant que paramètre de gestion des apports de complément pour le blé. Mémoire de 3^e cycle Génie rural, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, 110 p.
- BELABBES, K. 1990. Études des critères de stress hydrique basés sur la température radiative de surface pour une gestion de l'irrigation de complément du blé. Communication au Séminaire international sur les applications de la télédétection à la gestion et au contrôle des grands périmètres irrigués, Kénitra, 19-23 novembre 1990.
- BELABBES, K. 1992. Estimation du rayonnement net à partir de la mesure directe du rayonnement solaire. Communication à la première rencontre nationale des climatologues Marocains, Casablanca, 11-13 février, 1992.
- DOORENBOS, J. and KASSAM, A. H. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33, Food and Agriculture Organization, Rome, 193 p.
- GARROT, D. J. Jr, RAY, T. D., LIVINGSTON, M., FANGMEIER, D. D. and HUSMAN S. M. 1990. Watermelon field irrigation management using the Crop Water Stress Index. Acta Horticulturae n° 278, p. 755-761.
- IDSO, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines : A key to measuring and interpreting plant water stress. Agricultural Meteorology, vol. 27, p. 59-70.
- IDSO, S. B., JACKSON, R. D., PINTER, P. J. Jr., REGINATO, R. J. and HATFIELD J. L. 1981. Normalising the stress degree day concept for environmental variability. Agricultural Meteorology, vol. 24, p. 45-55.
- ITIER, B., FLURA, D., BELABBES, K., KOSUTH, P., RANA, G. and FIGUEIREDO L. 1992. Relations between relative evapotranspiration and predawn leaf water potential in soybean grown in several locations. Irrigation Science, vol. 13, p. 109-114.
- JACKSON, R. D., REGINATO, R. J. and IDSO, S. B. 1977. Wheat canopy temperature : a practical tool for evaluating water requirements. Water Resources research, vol. 13, n° 3, p. 651-656.
- JACKSON, R. D., IDSO, S. B., REGINATO, R. J. and PINTER, P. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources research, vol. 17, p. 1133-1138.
- LYAMANI, M. 1992. Utilisation de la radiothermométrie IR pour la gestion des apports d'eau d'irrigation : cas de couverts du blé et de la betterave à sucre dans les Doukkala. Mémoire de 3^e cycle Génie rural, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, 142 p.
- PINTER, P. J. Jr. and REGINATO, R. J. 1982. A thermal infrared technique for monitoring cotton water stress and scheduling irrigation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering, vol. 25, n° 3, p. 1651-1655.
- SEGUIN, B. and ITIER, B. 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. International Journal of Remote Sensing, vol. 4, p. 371-383.

Cartographie de l'occupation du sol et des zones humides par télédétection dans la basse vallée de la Medjerda (Tunisie)

ABDELKADER EL GAROUANI ¹, MOHAMED ENNABLI ² et MOHAMED RACHED BOUSSEMA ¹

¹ *École nationale d'ingénieurs de Tunis, Laboratoire de télédétection et système d'information à référence spatiale, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie;*
téléphone : +216 (1) 514-700; télécopieur : +216 (1) 510-729; télex : 15 051

² *Agence nationale de protection de l'environnement (ANPE), 12, avenue Khéreddine Pacha, B.P. 52, 1002 Tunis-Bélvédère, Tunisie;*
téléphone : +216 (1) 797-559; télécopieur : +216 (1) 789-844; télex : 17 190

Résumé

L'exploitation des données HRV de SPOT et TM de Landsat a permis de discriminer la répartition des différentes classes d'occupation du sol et des zones humides dans la région de la basse vallée de la Medjerda. Les traitements numériques effectués ont permis d'obtenir une classification dirigée et la délimitation des zones humides par seuillage de l'image TM du 29 octobre 1989. À partir de la photo-interprétation d'une image HRV du 21 juin 1988, il a été possible d'établir une carte d'utilisation du sol et le calcul des surfaces des différentes classes thématiques mises en évidence. L'interprétation des photographies aériennes de 1985 au 1: 80 000 et les missions sur le terrain ont permis d'établir la réalité terrain à laquelle sont confrontés les résultats des traitements d'images et de la photo-interprétation. La précision globale du traitement est de l'ordre de 75,55 %. Les résultats de photo-interprétation ont été validés sur le terrain. L'image HRV a permis de reconnaître 21 principaux types d'occupation du sol. Les traitements automatiques ont permis d'identifier 10 classes thématiques. Enfin le seuillage sur l'histogramme de la bande TM5 discrimine les marécages et les garaets.

1. Introduction

Dans cette étude, nous utilisons l'imagerie satellitaire HRV et TM pour approcher le problème de l'évaluation et la cartographie de l'occupation des sols. Le premier objectif de la recherche est l'analyse des signatures spectrales des différentes entités rencontrées et l'évaluation des possibilités de discrimination entre les différentes entités par les techniques de traitement d'images et de la photo-interprétation. La région étudiée est une vaste plaine alluviale quaternaire caractérisée par la présence d'une nappe phréatique subaffleurante, ce qui entraîne une sensibilité élevée à la salinisation des sols. Elle est équipée par un système de drainage en vue de la mise en culture depuis plusieurs années. En effet, c'est dans le cadre d'un effort de réflexion sur les possibilités d'application de la télédétection en cartographie et pour le classement de l'occupation du sol que s'inscrit ce travail à travers un exemple de la région de la basse vallée de la Medjerda, située au nord de Tunis (fig. 1).

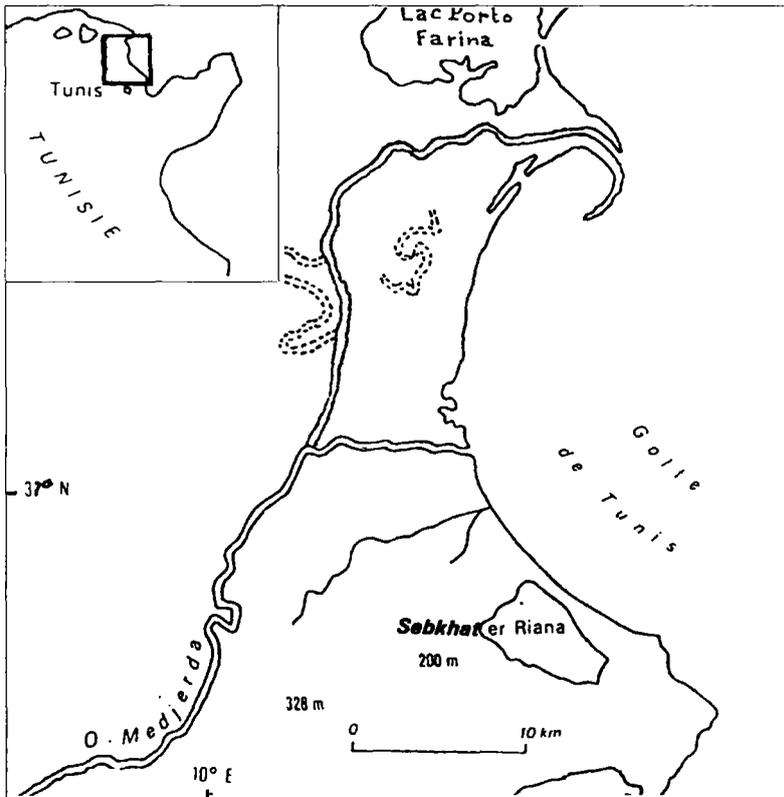


Figure 1. Situation géographique de la région d'étude

2. Matériel et méthode

La méthode consiste à combiner les phases de photo-interprétation, d'observation au sol et de traitement analogique et numérique des images satellitaires (fig. 2). Une image HRV du 21 juin 1988 à la fois sur support photographique au 1: 100 000 et restituée sur imprimante au 1: 50 000, et une image numérique TM du 29 octobre 1989 sont utilisées. Après report des limites des zones humides et des types d'occupation du sol sur calque, la numérisation puis la rastérisation des données saisies à l'aide du logiciel PC ARC/INFO permettent de constituer un document cartographique numérique. Les traitements numériques s'appuient sur une analyse factorielle en composantes principales des images satellitaires, une classification, un seuillage, puis un calcul automatique des surfaces des différentes classes d'occupation du sol et des zones humides. Cette analyse découle des traitements numériques à l'aide du logiciel de traitement d'images IDRISI sur micro-ordinateur équipé d'une carte graphique 32 bits. L'interprétation des photographies aériennes de 1985 au 1: 80 000 et des missions sur le terrain ont permis d'établir la réalité terrain à laquelle sont confrontés les résultats des traitements d'images et de la photo-interprétation.

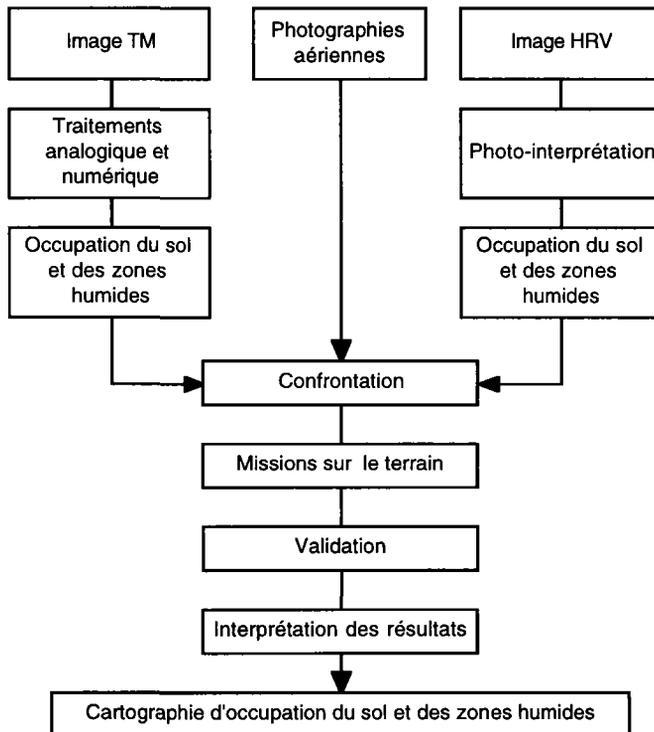


Figure 2. Démarche appliquée

3. Traitement des données TM

3.1. Traitements numériques

Une correction géométrique a été effectuée sur l'image TM pour la ramener au système de représentation cartographique LAMBERT. La méthode de déformation géométrique utilisée repose sur des points repères terrestres (points amers) pour lesquels on connaît les coordonnées dans l'image satellitaire à corriger et ceux dans le document de référence (image HRV corrigée).

Par la suite, plusieurs combinaisons de bandes spectrales et de types de rehaussements des images ont été effectuées pour augmenter le contraste et faciliter l'identification des classes d'occupation du sol. Finalement, la combinaison des bandes spectrales TM4, TM5, et TM3 a été retenue pour l'affichage et la visualisation des classes à l'écran (fig. 14-3, voir cahier couleur). Les traitements numériques sont basés sur la classification des images à partir des zones d'entraînement identifiées à l'aide des missions sur le terrain et d'études antérieures (BOUSSEMA, ROUI et BALAIS, 1988; BOUSSEMA, 1989), et le seuillage. L'opération de la classification consiste à regrouper des objets en fonction d'un ou de plusieurs caractères communs préalablement définis. Dans la classification dirigée, la nature des groupes d'objets est connue, par exemple : forêt, zone urbaine, culture, plan d'eau, etc. Le traitement consistera à reconnaître les pixels qui représentent une signature spectrale connue correspondant aux classes sélectionnées ou, aux classes thématiques. Dans le cas de la classification non dirigée, seules les caractéristiques spectrales des pixels sont connues sans référence à d'éventuelles classes thématiques. C'est après l'opération de classification que l'opérateur s'intéressera à relier les classes. À partir de la visualisation des composantes principales et des zones d'apprentissages numérisées, une classification dirigée par la méthode de distance minimale a été effectuée (fig. 14-4, voir cahier couleur).

Le seuillage est une technique qui permet d'extraire de l'image tous les pixels dont les valeurs radiométriques sont comprises entre deux seuils minimal et maximal (MOKADEM et DAUTREBANDE, 1992). Les zones humides présentent des valeurs radiométriques faibles dans le proche infrarouge (TM5) et le moyen infrarouge (TM7). Il s'agit essentiellement de plans d'eau et de zones marécageuses. Le seuillage appliqué au canal TM5 permet de distinguer deux classes en fonction de l'état de submersion (fig. 14-5, voir cahier couleur).

3.2. Analyse des signatures spectrales des différentes entités

Sur la figure 6, on donne la moyenne des valeurs radiométriques dans les canaux 1, 2, 3, 4, 5 et 7 de TM et ce pour les 10 composantes du paysage identifiées. On constate que la différenciation entre les classes est plus grande dans les canaux 2 et 4, ce qui permet une bonne discrimination. Par contre, dans les autres canaux, les signatures spectrales sont assez proches les unes des autres, ce qui rend assez difficile la classification des zones correspondantes.

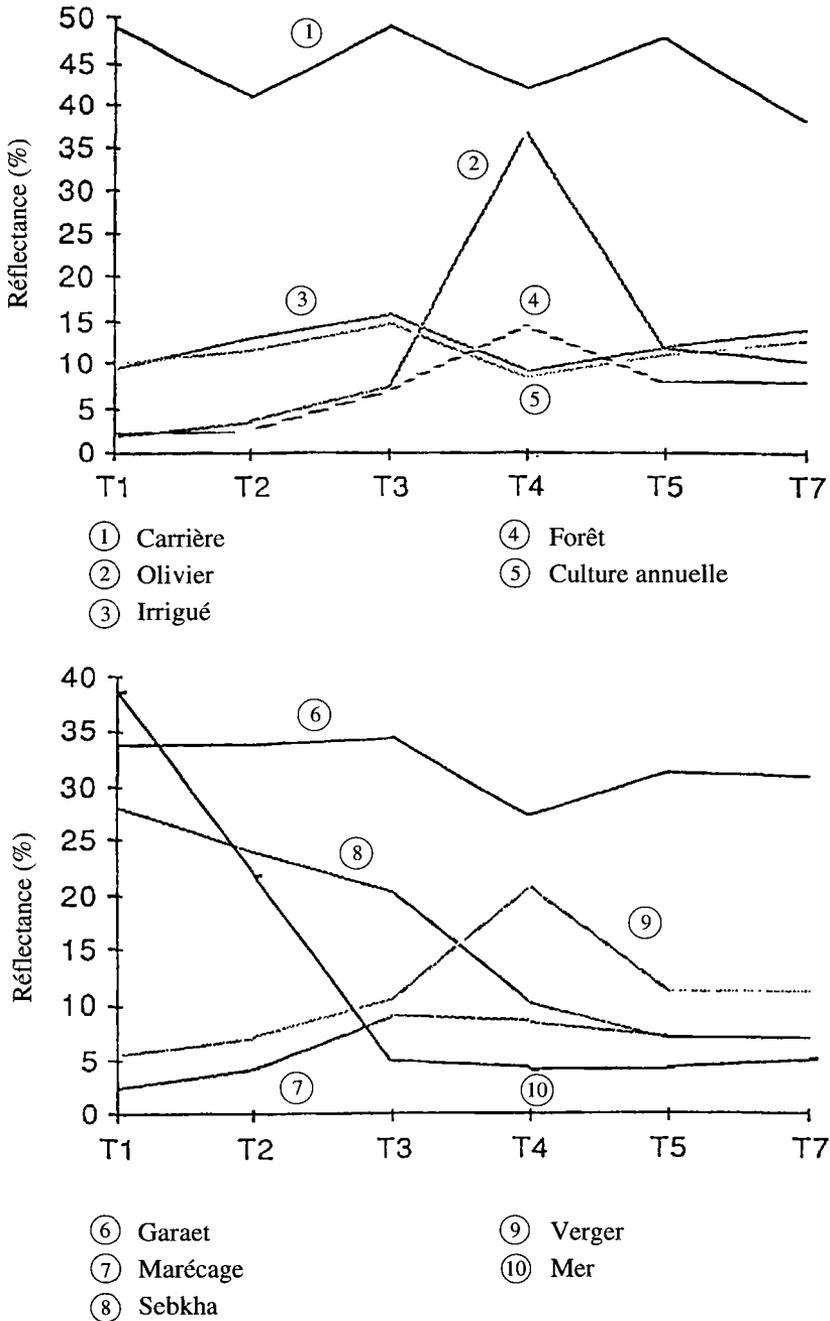


Figure 6. Comparaison des signatures spectrales des différentes entités : moyenne des valeurs radiométriques en fonction des canaux TM

4. Photo-interprétation de l'image HRV

Une image HRV (composition colorée) du 21 juin 1988 a été étudiée. L'image se situe dans le temps à la fin de la saison culturale. Dans les zones humides, les plans d'eau et les marais se réduisent sous l'action de l'évaporation. La récolte des cultures faisant place à des sols nus bien réfléchissants.

L'image utilisée a subi, par le fournisseur, les traitements nécessaires pour produire les images de la photo-interprétation, à savoir : le délignage, la suppression des artefacts, la correction géométrique, le rééchantillonnage, l'amélioration de l'image et la production de l'image au 1: 100 000. La photo-interprétation des images satellitaires est un processus de généralisation avec contrôle itératif (CCE, 1988). La généralisation consiste à :

- délimiter sur l'image «fausses-couleurs» une zone d'occupation du sol;
- identifier cette zone à un poste de la nomenclature (à l'aide soit de clés d'interprétation soit à l'aide des photographies aériennes);
- étendre cette délimitation-identification à l'ensemble des zones de l'image qui présente des caractéristiques voisines (teintes, structures et textures).

Le contrôle itératif consiste à vérifier en permanence les résultats de la généralisation à d'autres informations, par exemple aux photographies aériennes.

Le traitement consiste à délimiter les zones humides et les différentes occupations du sol en se basant sur la teinte, la forme et la taille des unités. Après report des limites des zones humides et des types d'occupation du sol sur calque, la numérisation puis la rasterisation des données saisies permettent de restituer un document cartographique numérique (fig. 14-7, voir cahier couleur). Les surfaces des différents types d'occupation du sol sont portées sur le tableau 1.

5. Résultats

L'évaluation des classifications est à la fois qualitative et quantitative. En effet, une estimation visuelle par comparaison du résultat obtenu à l'aide des photographies aériennes a été jugée suffisante. En plus, les résultats ont été confrontés aux données de terrain afin d'en déduire les pourcentages de reclassements de différentes entités dans leurs propres zones d'occupation. La matrice de confusion entre les thèmes observés sur le terrain et ceux des traitements d'images satellitaires est présentée sur le tableau 2. D'après cette matrice, la confusion est plus importante entre les garaets, les terres arables et les cultures irriguées, car une grande partie des garaets est sèche en été et se confond avec des sols nus. La précision globale du traitement est de l'ordre de 75,55 %. Les résultats de photo-interprétation ont été validés sur le terrain. L'image HRV a permis de reconnaître 21 principaux types d'occupation du sol. Les traitements automatiques ont permis d'identifier 10 classes thématiques. Enfin le seuillage sur l'histogramme de la bande TM5 discrimine les marécages et les garaets.

Tableau 1. Les surfaces des différentes classes thématiques identifiées par photo-interprétation sur l'image HRV du 21-06-1988

Occupation du sol	Surface (km ²)
Zones urbanisées	21,64
Zones industrielles	0,50
Carrières	1,75
Terres arables hors périmètre irrigué	153,12
Terres arables dans le périmètre irrigué	8,17
Terres arables dans les zones de drainage	60,20
Vergers	87,04
Cultures annuelles et permanentes	15,17
Agriculture et végétation naturelle	42,87
Territoire agro-forestier	1,12
Forêt	28,92
Végétation herbacée et/ou arbustive	5,95
Plages	2,69
Garaets	39,76
Sebkhas	36,79
Marécages	9,68
Marais maritimes	27,42
Eau usée	1,02
Lagunes littorales	12,20
Mer	268,74
Oliviers	23,18
TOTAL	847,93

6. Conclusion

L'étude entreprise vise à mettre en valeur les possibilités offertes par la télédétection en vue de la cartographie de l'utilisation du sol et des zones humides dont la représentation spatiale peut être utilisée comme indicateur de l'hydrologie de surface au niveau d'un bassin versant. L'utilisation de la carte d'occupation du sol facilite également le choix d'emplacements de nouvelles surfaces d'aménagement en vue d'une meilleure exploitation des terres et d'orienter les communautés rurales vers les activités qui leur conviennent.

Ces résultats ne sont qu'une première étape en vue de l'utilisation des données satellitaires. Ils nous ont permis d'établir une carte d'occupation du sol et d'en déduire la rugosité de surface. En se basant sur ces résultats, ces travaux se poursuivront par l'application des données AVHRR de NOAA pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle.

Tableau 2. Matrice de confusion sur les principales composantes de la zone étudiée pour la classification dirigée de l'image TM du 29 octobre 1989; en colonne, l'échantillonnage de terrain et en ligne, les résultats de traitement

	Mer	Gar.	Mar.	Sebk.	Verg.	Oliv.	Car.	For.	Irr.	Ar.	Total
Mer	534	0	0	0	0	0	0	0	0	0	534
Garaet	0	312	0	0	9	0	0	0	1	0	322
Marécage	0	0	162	0	0	2	0	43	10	27	244
Sebkha	0	11	3	126	6	0	0	0	10	1	157
Verger	0	0	0	0	122	0	0	12	0	0	134
Olivier	0	0	0	0	0	58	0	0	0	0	58
Carrière	0	0	0	0	5	8	62	4	0	0	79
Forêt	0	0	0	0	56	0	0	132	0	0	188
Irriguée	0	0	2	0	0	0	0	0	95	69	166
Arable	0	201	13	15	44	0	0	1	54	273	601
Total	534	524	180	141	242	68	62	192	170	370	1876

7. Références

- BOUSSEMA, M. R., ROUI, B. et BALAIS, J. L. 1988. Analyse par télédétection de l'hydrographie de la région de Tunis (Tunisie). Photo-interprétation, n° 88-6, p. 11-18.
- BOUSSEMA, M. R. 1989. Intégration de données multisources pour l'étude du système hydrographique du delta de la Médjerda et de la sebkhet er Riana. *in* LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. (réd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Journées scientifiques de Thiès, 21-24 novembre 1989, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 29-34.
- COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES (CEE). 1988. Projet Corine Land Cover. Guide technique. Première partie. Direction générale de l'environnement, la sécurité nucléaire et la protection civile, Bruxelles, Belgique, 200 p.
- MOKADEM, A. et DAUTREBANDE S. 1992. Application de la télédétection à l'agrohydrologie. Cas d'étude sur la submersion et l'engorgement des sols. MARISY'92, Rabat, Maroc, p. 129-142.

15

Évaluation de la consommation d'eau d'un espace irrigué par interprétation d'images satellitaires : cas de la vallée du Taje (centre de l'Espagne)

JAVIER GARCÍA-ABAD, JOSÉ SANCHO et FERNANDO MORENO

Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares, C/ Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares, Espagne;

téléphone : +34 (1) 885-44-29; télécopieur : +34 (1) 885-44-00

Résumé

Cet article fait une évaluation de l'analyse visuelle d'images, obtenues depuis des plateformes spatiales et associées à d'autres données géographiques, de l'impact des ressources hydriques sur le secteur agricole. On choisit une zone pilote dans la vallée du Taje (secteur d'Almoguera-Fuentidueña de Tajo), zone de transition évidente au climat semi-aride. L'irrigation est nécessaire là où les pluies ne sont pas suffisantes pour satisfaire les besoins des cultures. Là, où la ressource eau est plus accessible, tout près du Taje, on a installé une infrastructure d'irrigation au moyen de petits barrages et des aspersoirs modernes. En dernier lieu, on a fait une évaluation des besoins en eau pour l'irrigation, selon les différents espaces cultivés. Finalement, on estime la consommation absolue d'eau pour l'orge, la luzerne et le maïs respectivement à 32 dam³, 893 dam³ et 11 338 dam³.

1. Introduction

Comme il est bien connu, l'eau est une ressource précieuse et primée dans les pays semi-arides. Les rivages de la mer Méditerranée souffrent de la sécheresse à certaines périodes

de l'année, spécialement en été, où il n'est pas rare de voir celle-ci prolonger son action durant plusieurs années. La rareté et l'irrégularité des pluies sont des constantes. À cela s'ajoutent les hautes valeurs thermiques; cette condition favorise spécialement le développement végétatif des plantes à condition que celles-ci puissent satisfaire leurs besoins en consommation d'eau. L'irrigation se convertit ainsi en facteur clé du système agraire dans les espaces irrigués sur lesquels les rendements se multiplient par rapport aux terrains non irrigués.

Cependant, les pays de la Communauté européenne vivent aujourd'hui des moments d'incertitude. Paradoxalement, la surproduction d'aliments crée de graves problèmes : les directives qui émanent de la Politique agraire commune encouragent à faire des usages agraires du sol moins intensifs; les impacts sur l'environnement dont souffrent les espaces soumis à une forte pression, déconseillent le maintien de systèmes aussi agressifs. Dans le cas de l'Espagne, avec plus de trois millions d'hectares irrigués (17 % des terres labourées), un plan hydraulique à instaurer peut rendre possible l'augmentation des terrains irrigués de façon très importante. L'administration correcte d'un bien rare, comme l'eau, n'est pas facile à cause des multiples intérêts qu'il suscite, mais il est tout à fait nécessaire d'utiliser correctement les investissements et d'éviter ainsi l'augmentation des problèmes dans la campagne espagnole.

Nous avons évalué la consommation d'eau d'un espace irrigué à l'intérieur de l'Espagne. Sur les basses terrasses de la vallée du Taje, s'est développée une bordure de terrains irrigués qui accompagne le cours fluvial depuis son entrée dans la plaine du plateau central espagnol jusqu'à la frontière portugaise. À mi-parcours du Taje, entre Almodovar et Fuentidueña (provinces de Guadala-jara et Madrid), les terrains non irrigués et les terrains irrigués forment un paysage qui appartient à la plus fidèle tradition méditerranéenne (fig. 1).

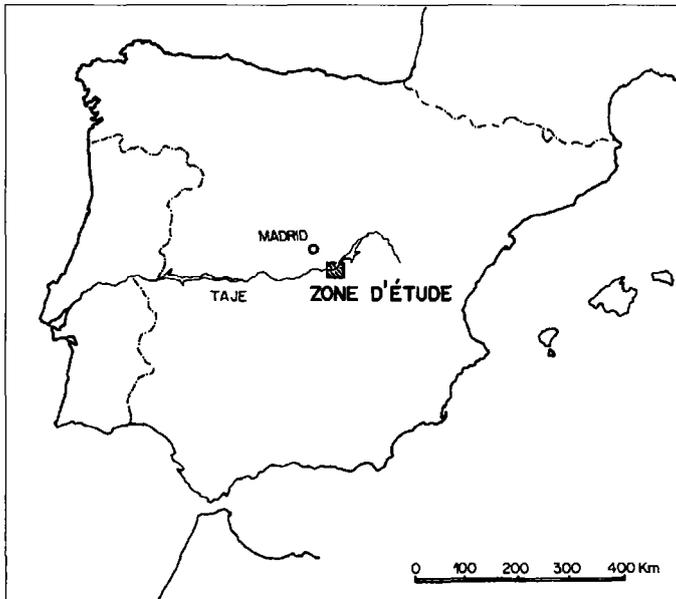


Figure 1. Carte de localisation

2. Méthodologie

L'évaluation des ressources hydrauliques consommées s'appuie sur une méthode indirecte : la reconnaissance des espaces irrigués à partir de la télédétection et de son utilisation spécifiquement par des espaces cultivés avec l'aide des travaux des champs.

La première démarche a consisté à cartographier l'occupation du sol à partir de renseignements fournis par les images satellitaires. Concrètement, tout a reposé sur les images corrigées géométriquement à l'échelle du 1: 100 000, obtenues par le satellite Landsat-5 à deux dates différentes, le 7 mai et le 4 août 1987. Le travail a été effectué au sein du projet CORINE Land Cover dans le cadre du Programme CORINE de la Communauté européenne (SANCHO, 1988-1989). Les objectifs de ce programme sont clairs : recueillir une information relative à l'environnement sur certains thèmes prioritaires, et organiser cette information depuis une gestion coordonnée au niveau de la Communauté européenne et garantir la cohérence et sa compatibilité avec les renseignements. L'un des aspects clés du point de vue méthodologique, c'est la légende de l'occupation du sol que l'on doit utiliser dans le procédé d'analyse d'images. Celle-ci doit réunir certaines conditions : tout l'espace doit être cartographié, les objectifs sur l'environnement satisfaits, la terminologie dépourvue d'ambiguïtés et les types d'occupation encadrés logiquement dans un organigramme.

La carte d'occupation du sol que nous présentons et sur laquelle apparaissent clairement les espaces irrigués susceptibles de faire l'objet d'analyse, a été obtenue du document final cartographique à l'échelle du 1: 100 000 qui a été élaboré dans le cadre du projet CORINE Land Cover. Dans ce cas-ci, quelques occupations ont souffert l'agrégation (zones résidentielles, vignobles et oliveraies, garrigues, landes et systèmes agro-forestiers, etc.). L'application des techniques de télédétection à la cartographie de l'occupation du sol a été positive mais il n'est pas inutile de rappeler quelques-unes des expériences.

En ce qui concerne le document de base (image TM et informations auxiliaires) :

- on exige une qualité excellente;
- la date d'obtention la plus adéquate est l'été, bien qu'il est souhaitable d'avoir une autre image de printemps;
- la documentation auxiliaire devient indispensable, notamment la photographie aérienne.

En ce qui concerne la légende :

- d'une manière générale, un haut degré d'exigence est nécessaire; au niveau de la Communauté il y a 44 rubriques différenciées et il faut en ajouter 20 de plus pour l'Espagne;
- bien qu'on ait toujours insisté sur le fait que la légende doive s'appuyer sur des critères d'occupation et non d'utilisation du sol, quelques nuances pouvant prêter à confusion persistent cependant dans ce domaine (systèmes agro-forestiers, landes et pâturages);
- parfois dans certaines occasions, au critère strict d'occupation, se sont superposés d'autres critères comme l'association végétale lande/garrigue ou la situation prairie/prairie supra-forestière;
- en marge des considérations générales dont il a été question le problème authentique réside dans les seuils de séparation entre des classes similaires, il faut aussi signaler la difficulté à identifier avec certitude certains types d'occupation;
- l'irrigation s'étend au-delà des périmètres avec une infrastructure permanente; dans notre cas, il y a lieu de signaler les aspersoirs qui peuvent rendre mobile l'espace susceptible de recevoir de l'eau.

3. Cadre naturel

La zone pilote choisie est un territoire qui se situe dans une zone de transition entre les climats sub-humides et semi-arides à l'intérieur de l'Espagne (GARCIA DE PEDRAZA, 1989). Cette zone se trouve sur la bordure méridionale d'Alcarria, région physiographique qui appartient à la cuvette sédimentaire de la Dépression du Taje. L'Alcarria est un plateau topographiquement élevé sur les parties les plus basses de cette cuvette, formées par des vallées étroites et encaissées (plaines fertiles) et d'autres parfois plus larges (vallée du Taje) avec des dénivellations qui oscillent entre 200 et 300 m.

Les principaux affleurements lithologiques (calcaire, gypses, anhydrites et marnes) contribuent à former un modelage karstique qui réduit considérablement l'écoulement superficiel des eaux de pluie (NICOD, 1976). Les ressources en eaux souterraines sont très pauvres à l'intérieur du plateau.

Les régosols et les cambisols sont prédominants, mais il est très habituel de rencontrer des luvisols, là où il reste encore des calcaires et des argiles mélangés, ainsi que des litosols dans des espaces marginaux et escarpés. C'est seulement dans le fond alluvial des plaines fertiles et de vallées que l'on peut trouver des fluvisols, sols de plus grand intérêt et de plus grand rendement agricole, qui occupent les espaces réduits des plaines d'inondation (JIMENO y GONZALEZ, 1987).

Les données climatiques de la vallée du Taje nous indiquent des conditions extrêmes dans son régime thermique, car la situation dans le centre de la péninsule Ibérique dote cette zone d'un indice important de continentalité (indice de Gorczynski = 20,4, selon GARCIA-ABAD, 1993). Nous présentons sur le tableau 1 les données climatiques de base des deux stations thermopluviométriques les plus proches de la zone d'étude : Salto de Zorita et Salto de Almoguera.

Quant aux précipitations, elles se trouvent autour des 400 mm. On observe une importante sécheresse estivale. À l'irrégularité saisonnière, il faut ajouter une variabilité interannuelle des précipitations de 25 %. Avec cela, l'évapotranspiration potentielle atteint des valeurs supérieures à 750 mm, ce qui implique un déficit d'eau annuel à Salto de Almoguera pour un climat déjà pratiquement semi-aride. L'indice d'aridité de Martonne (entre 16,7 et 18,1) situe la zone d'étude dans la zone de transition entre le désert et l'excès d'écoulement, avec des écoulements temporaires (HERAS, 1976), ce qui rend nécessaire l'arrosage artificiel pour les cultures agricoles. Tenant en compte tous ces facteurs, l'unique recours hydrique capable de pourvoir de façon adéquate aux besoins pour l'approvisionnement humain et agricole est l'apport en eau du fleuve Taje.

Pour le fleuve Taje, à la station de jaugeage de Salto de Almoguera, on a enregistré un débit moyen de 14,6 m³/s durant l'année hydrologique 1986-1987, ce qui suppose un apport total de 458,2 hm³. Vingt kilomètres en aval de la zone d'étude, une autre station, celle de Villarrubia de Santiago, a enregistré cette même année un débit moyen de 11,9 m³/s, ce qui suppose un apport total à ce point de 373,1 hm³ d'eau.

4. Occupation du sol

Les images nous montrent un espace clairement différencié entre les terrains non irrigués et les terrains irrigués. Ce contraste est plus accentué sur l'image d'août, époque où les cultures d'été requièrent un plus grand apport d'eau d'arrosage. Mais, avant cela, il y a lieu de distinguer les autres types d'occupation du sol, comme le reflète la légende de la carte

Tableau 1. Données climatiques de base (période 1971-1992)

Paramètres	Salto de Almoguera	Salto de Zorita
Température moyenne annuelle	13,5 °C	14,3 °C
Température moyenne mensuelle (juillet)	24,1 °C	24,7 °C
Température moyenne mensuelle (janvier)	4,4 °C	5,4 °C
Moyenne des températures moyennes maximales (annuel)	21,3 °C	22,0 °C
Moyenne des températures moyennes maximales (juillet)	33,9 °C	34,4 °C
Moyenne des températures moyennes minimales (annuel)	5,9 °C	6,6 °C
Moyenne des températures moyennes maximales (janvier)	-1,6 °C	-0,8 °C
Nombre de jours/an avec gelée	88,1	79,5
Précipitations moyennes annuelles	393 mm ± 100	439 mm ± 111
Précipitations (printemps)	28,7 %	29,3 %
Précipitations (été)	14,3 %	14,4 %
Précipitations (automne)	29,4 %	29,2 %
Précipitations (hiver)	27,6 %	27,1 %
Nombre de jours/an avec de la pluie	70	72
Évapotranspiration potentielle	760 mm	778 mm
Évapotranspiration réelle	393 mm	432 mm
Excédent d'eau	0 mm	7 mm

(fig. 2). D'abord, il existe un espace résidentiel face à un espace agricole. Dans ce cas, aux petits noyaux de population, il faut ajouter l'installation de résidences secondaires durant la décennie des années 70. Sa localisation, de préférence aux approches du fleuve Taje, répond clairement à la nécessité d'approvisionnement en eau, moins accessible et plus coûteuse à l'intérieur de l'Alcarria. Dans la légende originale du projet CORINE Land Cover, on distingue un tissu urbain continu, qui correspondrait à ces petits emplacements de population, et un tissu urbain discontinu relatif à l'urbanisation (tab. 2). Dans notre cas, dans le but de simplifier la légende, nous avons regroupé les deux catégories.

D'autre part, les espaces agricoles peuvent se différencier en espaces forestiers et agricoles. Dans la légende, apparaissent d'un côté des zones boisées qui regroupent les catégories originales du CORINE Land Cover (conifères et feuillus) : elles occupent une étendue très réduite à cause de l'intense utilisation pour l'agriculture et pour le bétail, imposée par l'homme, et seules de petites zones ont été repeuplées de pins. D'un autre côté, les zones de landes, dans leurs différentes strates arborescentes, arbustives et subarbustives, occupent de plus grandes extensions; leur utilisation actuelle est la chasse et, dans une moindre mesure, le pâturage. De nos jours, on observe une légère tendance à

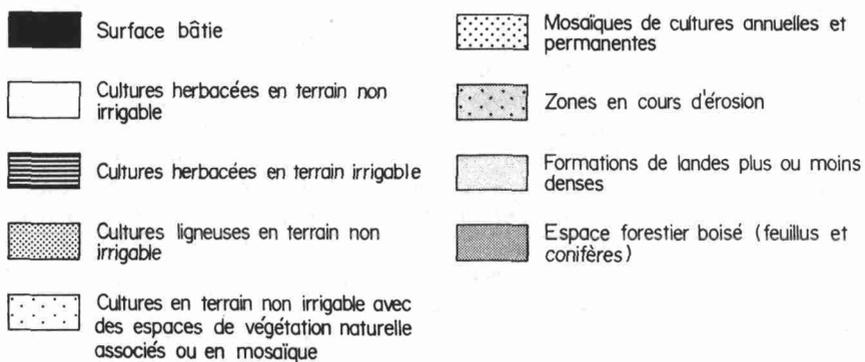
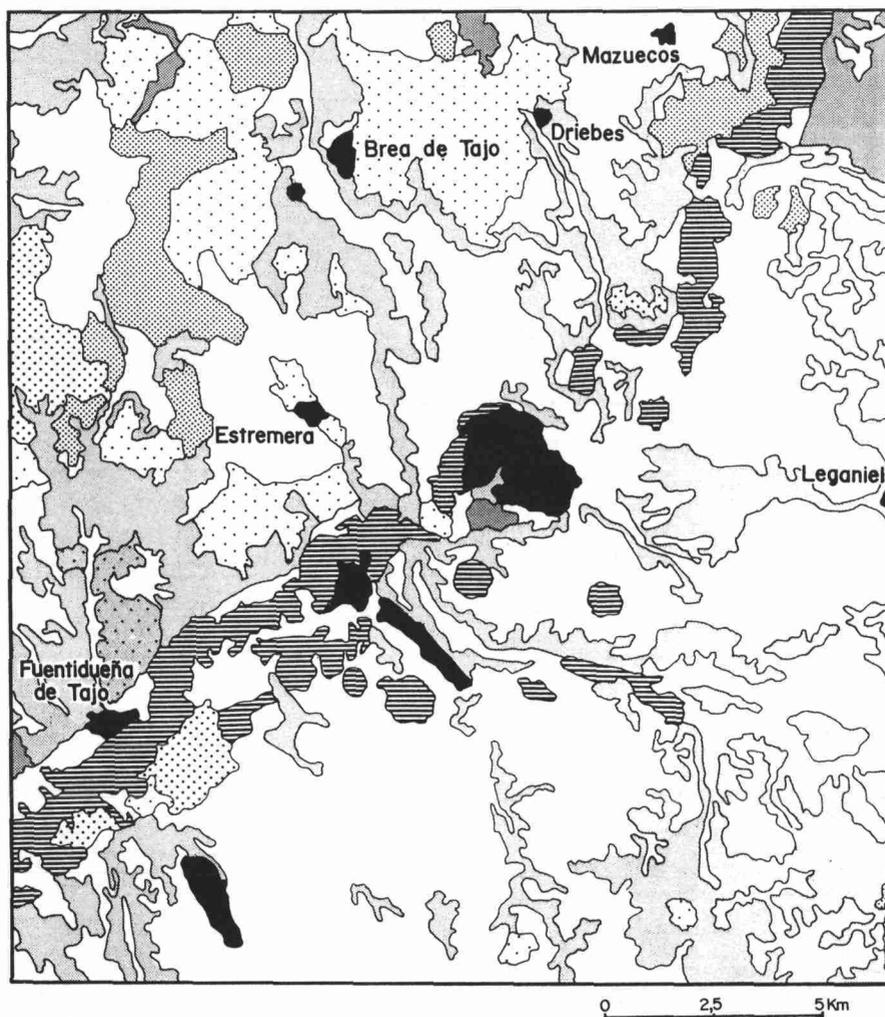


Figure 2. Croquis d'occupation du sol

Tableau 2. Nomenclature de la légende du projet CORINE Land Cover

NIVEAU 1	NIVEAU 2	NIVEAU 3
1. Territoires artificialisés	1.1. Zones urbanisées 1.2. Zones industrielles, commerciales et réseaux de communication 1.3. Mines, décharges et chantiers 1.4. Espaces verts artificialisés, non agricoles	1.1.1. Tissu urbain continu 1.1.2. Tissu urbain discontinu 1.2.1. Zones industrielles ou commerciales 1.2.2. Réseau routier et ferroviaire, et espaces associés 1.2.3. Zones portuaires 1.2.4. Aéroports 1.3.1. Extraction de matériaux 1.3.2. Décharges 1.3.3. Chantiers 1.4.1. Espaces verts urbains 1.4.2. Équipements sportifs et de loisirs
2. Territoires agricoles	2.1. Terres arables 2.2. Cultures permanentes 2.3. Prairies 2.4. Zones agricoles hétérogènes	2.1.1. Terres arables hors périmètres d'irrigation 2.1.2. Périmètres irrigués en permanence 2.1.3. Rizières 2.2.1. Vignobles 2.2.2. Vergers et petits fruits 2.2.3. Oliveraies 2.3.1. Prairies 2.4.1. Cultures annuelles associées aux cultures permanentes 2.4.2. Systèmes culturaux et parcellaires complexes 2.4.3. Territoires principalement occupés par l'agriculture, avec présence de végétation naturelle importante 2.4.4. Territoires agro-forestiers
3. Forêts et milieux semi-naturels	3.1. Forêts 3.2. Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée 3.3. Espaces ouverts sans ou avec peu de végétation	3.1.1. Forêts de feuillus 3.1.2. Forêts de conifères 3.1.3. Forêts mélangées 3.2.1. Pelouses et pâturages naturels 3.2.2. Landes et broussailles 3.2.3. Végétations sclérophyles 3.2.4. Forêts et végétation arbustive en mutation 3.3.1. Plages, dunes, sable 3.3.2. Roches nues 3.3.3. Végétation clairsemée 3.3.4. Zones incendiées 3.3.5. Glaciers et neiges éternelles
4. Zones humides	4.1. Zones humides intérieures 4.2. Zones humides maritimes	4.1.1. Marais intérieurs 4.1.2. Tourbières 4.2.1. Marais maritimes 4.2.2. Marais salants 4.2.3. Zones intertidales
5. Plans d'eau	5.1. Eaux continentales 5.2. Eaux maritimes	5.1.1. Cours et voies d'eau 5.1.2. Plans d'eau 5.2.1. Lagunes littorales 5.2.2. Estuaires 5.2.3. Mer et océan

la régénération progressive de ces zones de végétation du fait de la diminution du cours des dernières années de l'activité du bétail.

Finalement, dans la zone agricole, on observe l'opposition terrains irrigués–terrains non irrigués. Les cultures en terrains non irrigués, autant herbacées (céréales) que ligneuses (oliveraies et, dans une moindre proportion, les arbres fruitiers et les vignobles) se disposent sur le territoire de façon complexe. Parfois, elles se présentent de façon isolée et d'autres fois en mosaïque ou avec de petites zones de végétation naturelle ou, encore, associées à l'un ou l'autre type d'occupation. Dans l'un de ces cas, il apparaît un pâturage comme un système agroforestier, qui consiste en la coexistence sur le même espace de cultures herbacées et d'arbres isolés. L'utilisation d'autres données géographiques, principalement les photographies aériennes, nous a permis d'ébaucher le tableau suivant de l'évolution de l'occupation du sol au cours des trois dernières décades :

- l'oliveraie maintient, de façon approximative, les mêmes zones d'occupation, bien qu'au cours des dernières années, il existe une tendance à cesser de labourer certaines de ces terres;

- les vignobles ont toujours occupé de minuscules parcelles distribuées de façon aléatoire à travers les cultures pour l'auto-consommation;

- les cultures herbacées sur la rive du Taje se sont multipliées par deux au cours de ces trois décades; aux années 50 et 60, le type d'irrigation communément employé était le système à pied, facilité par une infrastructure de canaux et la construction des réservoirs d'Almoguera et d'Estremera. Postérieurement, l'introduction et la généralisation de nouveaux systèmes d'irrigation, où les pivots sont les techniques fondamentales, ont permis une augmentation remarquable de la surface irrigable.

Dans la légende définitive, on montre neuf catégories d'occupation du sol (fig. 2) où se sont regroupées les quinze catégories originales du projet CORINE. La correspondance entre les deux légendes est présentée au tableau 3.

5. La consommation d'eau des terrains irrigués

Une fois obtenue la carte d'occupation du sol, on aboutit à la planimétrie des espaces irrigués. Dans la zone d'étude, on localise 2 797 ha irrigués; presque tous reçoivent l'arrosage par aspersion; l'irrigation à pied est réduite aux petits potagers existants sur la plaine d'inondation. Nous avons réalisé, par conséquent, les calculs sur l'hypothèse de la dominance de plus de 95 % du système d'aspersoirs.

La dotation annuelle pour l'arrosage dans la zone d'étude, pour une précipitation moyenne annuelle de 400-450 mm, prend des valeurs maximales de 7 000 m³/ha pour la luzerne, de 6 000 m³/ha pour le maïs et 400 m³/ha pour l'orge. Le maïs est la culture dominante, couvrant approximativement 85 % de la zone irriguée. Il faut tenir compte que, dans plus de 90 % des cas, l'irrigation sur le terrain irrigable se fait par aspersion, une circonstance qui altère l'efficacité de la dépense hydrique jusqu'à la situer autour de 85 %, dix points de plus que s'il s'agissait de l'arrosage à pied. Nos calculs, pourtant, se basent sur l'hypothèse du système d'aspersion.

Cela vaut la peine de mener l'analyse au niveau mensuel pour remarquer les moments de demande maximale et effectuer ainsi les travaux de régulation adéquats. D'abord, nous avons calculé à partir de la méthode Blaney-Criddle (HERAS, 1976) l'évapotranspiration potentielle pour les cultures signalées (tab. 4). Sur le tableau 5, on présente les précipitations moyennes mensuelles.

Tableau 3. Correspondance entre les deux légendes : la légende définitive et la légende originale (projet CORINE Land Cover)

Légende définitive	Légende originale (CORINE Land Cover)
Surface bâtie	Tissu urbain continu
	Tissu urbain discontinu
Cultures herbacées en terrain non irrigable	Cultures herbacées en terrain non irrigable
Cultures herbacées en terrain irrigable	Cultures herbacées en terrain irrigable
Cultures ligneuses en terrain non irrigable	Oliveraie
	Vignoble
Cultures en terrain non irrigable avec des espaces de végétation naturelle associés ou en mosaïque	Cultures de terrain non irrigable en mosaïque avec une végétation naturelle
	Systèmes agro-forestiers
Mosaïques de cultures annuelles et permanentes	Mosaïques de cultures annuelles et permanentes
Zones en processus d'érosion	Zones en processus d'érosion
Formations de végétation sclérophyle	Formations de garriges denses ou moyennement denses
	Buisson subarbusier ou arbustier peu dense
	Lande boisé de transition
Espace forestier (feuillus et conifères)	Chêne vert et rouvre
	Conifères

Tableau 4. Évapotranspiration potentielle (mm)

	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Total
Luzerne	80	95	120	135	155	140	115	90	70	1 000
Mais				130	145	130	110	85		600
Orge	75								65	140

Tableau 5. Précipitations moyennes mensuelles (mm)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
(mm)	35	40	45	60	40	20	15	15	20	35	45	40	410

Durant la période automne-hiver-printemps, la réserve d'eau dans le sol se reconstitue, atteignant les 100 mm qui, à partir de mars, se réduiront par le déficit produit entre les besoins des cultures et les faibles précipitations. Les besoins nets à fournir par l'arrosage apparaissent au tableau 6.

La transformation de ces données en consommation absolue pour la zone d'étude a été réalisée en rapportant ces données à l'extension des zones d'irrigation (tab. 7).

Tableau 6. Besoins nets par arrosage (mm)

	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Total
Luzerne	50	115	140	125	95	55	25	555
Maïs		30	130	115	90	50		415
Orge							20	20

Tableau 7. Consommation absolue d'eau par arrosage (dam³)

	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Total
Luzerne	79,8	184,8	225,4	201,6	152,6	88,2	50,4	893,2
Maïs		808,2	3 565,5	3 137,7	2 448,0	1 379,0		11 338,0
Orge							32,2	32,2

6. Conclusion

L'évaluation effectuée a le grand avantage de disposer d'une technologie, la télédétection, qui, avec la rapidité et la périodicité désirée, peut offrir des données très actualisées sur des aspects d'importance vitale dans les pays semi-arides comme la consommation d'eau par l'irrigation. En plus, le traitement numérique des images pourrait aider à maintenir à jour la couverture des plantes, des terrains irrigués et, par conséquent, la précision du bilan hydrique.

7. Références

- GARCIA DE PEDRAZA, L., 1989. Climas de transición al árido. Climas áridos, dominios áridos y semiáridos en España in Zonas Aridas en España. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, p. 45-63.
- GARCIA-ABAD, J. J. 1993. El interfluvio Tajo-Tajuña en el sector de Yebra, Mondéjar y Mancomunidad de Almaguera : un estudio del medio físico. Thèse de doctorat. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares. 3 tomos, 926 p.
- HERAS, R. 1976. Hidrología y recursos hidráulicos. Dirección General de Obras Hidráulicas, 2 tomos, Madrid, 1580 p.
- JIMENO, L. y GONZALEZ, R. (dir.), 1987. La fertilidad de los suelos de mayor interés agrícola de la provincia de Guadalajara. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, Madrid, 290 p.
- NICOD, J., 1976. Karsts des gypses et des évaporites associées. Annales de géographie, 471, vol. 85, p. 513-554.
- SANCHO, J., 1988-1989. El proyecto CORINE LAND COVER. Boletín de la Real Sociedad Geográfica, tomo CXXIV-CXXV, Madrid, p. 261-268.

16

Caractérisation du comportement hydrique des sols dans un couloir fluvial à l'aide de données multidates TM de Landsat : vallée de la Garonne (France)

ÉTIENNE MULLER et MAGALI JAMES

Centre d'écologie des ressources renouvelables (CERR), Unité propre de recherche n° 8211 du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), 29, rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse cedex, France; téléphone : +33 61-25-40-87; télécopieur : +33 61-55-05-55

Résumé

L'objectif de cette étude était de voir si des données multidates TM permettaient de caractériser le comportement hydrique des sols dans le couloir fluvial garonnais. Treize images ont été utilisées dont huit de la même année. Les réponses spectrales des unités morpho-hydrogéologiques, déjà cartographiées au 1:25 000 avec des méthodes conventionnelles, se sont montrées toujours très proches sur les terrasses et dans la plaine alluviale, et n'ont pas pu être corrélées à l'humidité des sols mesurée simultanément à l'acquisition d'une image en 1992. Les essais de classifications sont restés peu satisfaisants dans l'ensemble. Cependant, entre les terrasses et la plaine d'inondation, et entre certains secteurs de la plaine, il existe des contrastes spectraux assez stables dans le temps. Une nouvelle typologie du couloir fluvial a alors été définie en s'appuyant sur quatre catégories de sols, où dominant un ou deux éléments texturaux et qui présentent des comportements hydriques très typés. Cette typologie a permis de classer le corridor fluvial et de révéler la structure qui existe dans le paysage, au niveau des sols. Les classifications ont été effectuées à partir d'images composites multidates obtenues par incrustation successive des pixels de sols nus avec un calage radiométrique des données.

1. Introduction

Les réponses spectrales des sols résultent d'interactions multiples entre des facteurs intrinsèques assez stables, comme les teneurs en argiles, limons, sables et matières organiques (HOVIS, 1966; HOFFER and JOHANNSEN, 1969; CONDIT, 1970; STONER and BAUMGARDNER, 1981), et d'autres plus variables, comme l'humidité (BOWERS and SMITH, 1972; LINDBERG and SNYDER, 1972; PROST *et al.*, 1983), la couleur (ESCADAFAL *et al.*, 1989), la structure et la rugosité de surface (COURAULT, 1989; BOISSARD *et al.*, 1989). L'extraction de chacun de ces paramètres est souvent difficile, en particulier l'humidité des sols dont la mesure sur le terrain ou en laboratoire peut prêter à confusion (FOODY, 1991). Il n'existe semble-t-il pas d'étude montrant l'existence de corrélations fiables entre les réponses spectrales des sols observées par satellite et leur humidité, ce qui rend assez difficile la cartographie de vallées fluviales par télédétection malgré des résultats intéressants obtenus avec des données SPOT (TRAUTMAN, 1991) et TM de Landsat (GARGUET-DUPORT et GIREL, 1993; VOGT and LENCO, 1993). Nous nous proposons donc de suivre ici une approche plus qualitative de l'humidité des sols dans le couloir fluvial garonnais.

La vallée de la Garonne, à l'aval de Toulouse et jusqu'à la confluence avec le Tarn, comprend une série de terrasses étagées d'âge quaternaire et une plaine d'inondation toujours active d'environ 3 km de large. Dans le couloir fluvial, les dépôts sont quasi-horizontaux avec une pente longitudinale de 0,08 % sur près de 50 km. Le signal n'est donc pas perturbé par des effets topographiques. Cette zone présente l'un des plus faibles taux de boisement de France et une forte emprise agricole avec un grand parcellaire, ce qui est favorable à une étude des sols par télédétection.

Notre objectif était de voir si les données TM permettaient de caractériser le comportement hydrique des sols dans ce paysage fluvial. Deux approches complémentaires ont été retenues. D'une part, nous avons voulu vérifier si les principales unités morpho-hydrogéologiques qui avaient été cartographiées au 1:25 000 par des méthodes conventionnelles (LAMBERT, 1988), présentaient des caractéristiques texturales, hydriques et spectrales homogènes susceptibles d'être identifiées dans les images. Ce premier travail portait sur six classes d'alluvions (trois sur les terrasses et trois dans la plaine d'inondation). D'autre part, nous avons cherché à identifier des structures spectrales stables dans le paysage, en espérant que de telles structures révéleraient des caractéristiques texturales et des comportements hydriques cohérents susceptibles d'être expliqués *a posteriori*. De la confrontation de ces deux approches, nous espérons pouvoir définir une typologie du couloir fluvial basée sur les caractéristiques hydriques des sols.

2. Méthode

2.1. Acquisition et traitement des données TM

La zone d'étude a été choisie dans la bande de recouvrement de deux traces d'images TM, afin de doubler les chances d'obtenir des images de bonne qualité. Quelques 13 images ont été analysées sur une période allant de 1985 à 1992, dont 8 images en 1987. Ces données ont été acquises sous forme de mini-scènes de 45 km x 45 km. Les 13 images ont été superposées géométriquement avec une précision moyenne proche du demi-pixel sur un système Multiscope. Pour une comparaison absolue des données issues de cette série

temporelle, il était nécessaire de normaliser les comptes numériques entre eux. L'efficacité de la transformation en réflectance dépend de la précision avec laquelle sont connus les coefficients de calibration absolue et les paramètres atmosphériques. En fait, ces coefficients ne sont connus qu'approximativement et les seuls paramètres atmosphériques disponibles étaient des visibilités horizontales évaluées dans les deux grands aéroports de la région. L'incertitude sur les données en réflectance était donc importante.

C'est pourquoi une méthode de calage radiométrique a été préférée (MULLER, 1993). Avec cette méthode, on considère que la moyenne et l'écart-type d'un ensemble varié d'objets radiométriquement invariants (ou considérés comme tels) restent stables dans le temps. Le calage consiste alors à ajuster les histogrammes des objets pseudo-invariants sur ceux d'une image choisie comme référence. Les données calées sont ensuite transformées en réflectance puis corrigées des effets atmosphériques avec le modèle 5S (TANRÉ *et al.*, 1986) en appliquant les coefficients de calibration (HILL and AIFADOUPOULOU, 1991) et les paramètres atmosphériques correspondant à l'image choisie comme référence (2 mai 1987). On dispose ainsi de données multitudes exprimées soit en comptes numériques calés, soit en réflectances calées, ce qui évite les imprécisions de la calibration absolue seule.

2.2. Extraction des données spectrales sur les sols nus

Au cours de l'ère quaternaire, la Garonne mit en place des terrasses successives, étagées les unes par rapport aux autres, les plus anciennes étant les plus hautes, les plus récentes les plus basses. LAMBERT (1988) distingue, par ordre d'âge décroissant, 6 unités géomorphologiques, trois sur les terrasses (Pléistocène) et trois dans la plaine d'inondation (Holocène) :

- FW : terrasse Mindel;
- FX : terrasse Riss, subdivisée en FX1 (ancienne) et FX2 (plus récente);
- FY : terrasse Würm (non visible dans la zone d'étude);
- FZ1 : plaine d'inondation exceptionnelle (ou hauteure), $f < 0,01$;
- FZ2 : plaine d'inondation décennale (ou bassure), $f < 0,1$;
- FZ3 : plaine d'inondation saisonnière (ou lit majeur actif) avec une fréquence d'inondation, $f < 1$.

La période favorable pour observer les sols nus s'étend de novembre à juin sur les parcelles prévues pour recevoir les cultures de printemps qui dominent. Ces cultures sont semées en avril ou en mai et récoltées de septembre à novembre. Les cultures d'hiver sont semées en novembre et récoltées en juillet ou en août. Dans chacune des 6 unités de sols alluviaux, ont été tracées 62 parcelles d'entraînement de 3×3 pixels, soit l'équivalent de 50 hectares (sauf dans FZ3, où les boisements riverains dominent et où les sols nus sont donc peu fréquents; le nombre de parcelles a dû y être limité à 17). La sélection de ces parcelles a été faite après des seuillages sur les indices de végétation. Les images de juillet à septembre ont été analysées malgré l'absence de sols véritablement nus afin de vérifier si des différences entre les sols pouvaient s'exprimer par des différences dans les pratiques culturales ou dans le comportement de la végétation.

2.3. Réalisation de profils texturaux et hydriques

Des analyses de sols disponibles ont été dépouillées sur une soixantaine de sites. Des échantillons supplémentaires ont été prélevés (tous les 25 cm jusqu'à 1 m de profondeur)

sur 13 sites afin de mieux tenir compte des 6 unités morpho-hydrogéologiques précédemment définies. Comme il n'était pas possible de disposer de contrôles de terrain réalisés simultanément à ces images d'archives, nous avons admis que les sols devaient conserver des comportements hydriques cohérents d'une année à l'autre. Nous avons alors suivi leur comportement hydrique sur les 13 sites au cours d'une campagne de mesures de février à mai 1992. Sur chaque site, les humidités pondérales ont été mesurées tous les 10 jours à 5 niveaux de profondeur (0 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm), avec deux répétitions par sites (soit en tout 130 prélèvements à chaque date). Le 6 mai 1992, lors d'une prise d'image TM, ces mesures n'ont été effectuées qu'en surface, en portant le nombre d'échantillons à 5 par site au lieu de 2.

Les humidités pondérales ont été déterminées à partir d'échantillons de 400 à 500 g de sol, pesés humides (Ph) puis secs (Ps) après un passage à l'étuve à 105 °C pendant 24 h. Les humidités pondérales (exprimées en % du poids de sol sec) ont été calculées par la formule :

$$H_p = 100 (Ph - Ps) / Ps$$

3. Résultats

3.1. Caractéristiques texturales et hydriques des unités morpho-hydrogéologiques

Sur les terrasses FX et FW dominant des sols lessivés hydromorphes, caractérisés par un horizon superficiel battant appauvri en argiles, fer, matière organique et calcaire, mais riche en limons : «les boubènes». Dans la plaine inondable, les sols sont moins évolués : sols bruns faiblement lessivés à texture d'argiles limono-sableuses en FZ1, sols bruns calcaires et sols sableux en FZ2 et FZ3. Au cours de la campagne de 1992, les humidités pondérales des 6 unités de sols sont restées très proches les unes des autres en surface et ont subi une évolution fortement liée aux précipitations (fig. 1). Par contre, à 25 cm de profondeur, les humidités restaient très stables dans le temps et ont permis de discriminer les différents types d'alluvions. Cette tendance a été confirmée à 50 cm et à 75 cm, mais non à 100 cm où existe une plus grande hétérogénéité dans les textures (JAMES, 1992). Entre deux pluies, par exemple entre le 14 et le 24 février 1992, on constate que le dessèchement n'affecte que l'horizon superficiel. Les humidités passent de 20-27 % à 8-15 %, tandis qu'en profondeur, les humidités ne sont pratiquement pas modifiées (fig. 2). Sur l'ensemble des sites, l'erreur résiduelle (précision) sur ces valeurs a varié, selon la date, de 1,6 à 3,4 % d'humidité en surface et de 1,6 à 4,2 % d'humidité à 25 cm de profondeur. Cette erreur est souvent plus forte que les écarts moyens observés entre deux unités de sol. L'humidité reste donc un paramètre peu précis et peu efficace pour discriminer correctement en surface les unités de sols entre elles. On constate cependant que les sols sableux (FZ2) sont souvent les plus secs et les sols argileux les plus humides (FZ1) tandis que les sols limoneux des terrasses ont des humidités intermédiaires.

3.2. Évolution des réponses spectrales des unités morpho-hydrogéologiques

Sur les images les sols ne sont perçus que par leur horizon superficiel. Les réponses spectrales des 6 unités sont toujours restées très proches les unes des autres tout au long de l'année (fig. 3). L'erreur résiduelle moyenne sur ces données, calculée à partir des 327 sites tests, est près de 10 en comptes numériques calés (CNC) dans les bandes du visible et près

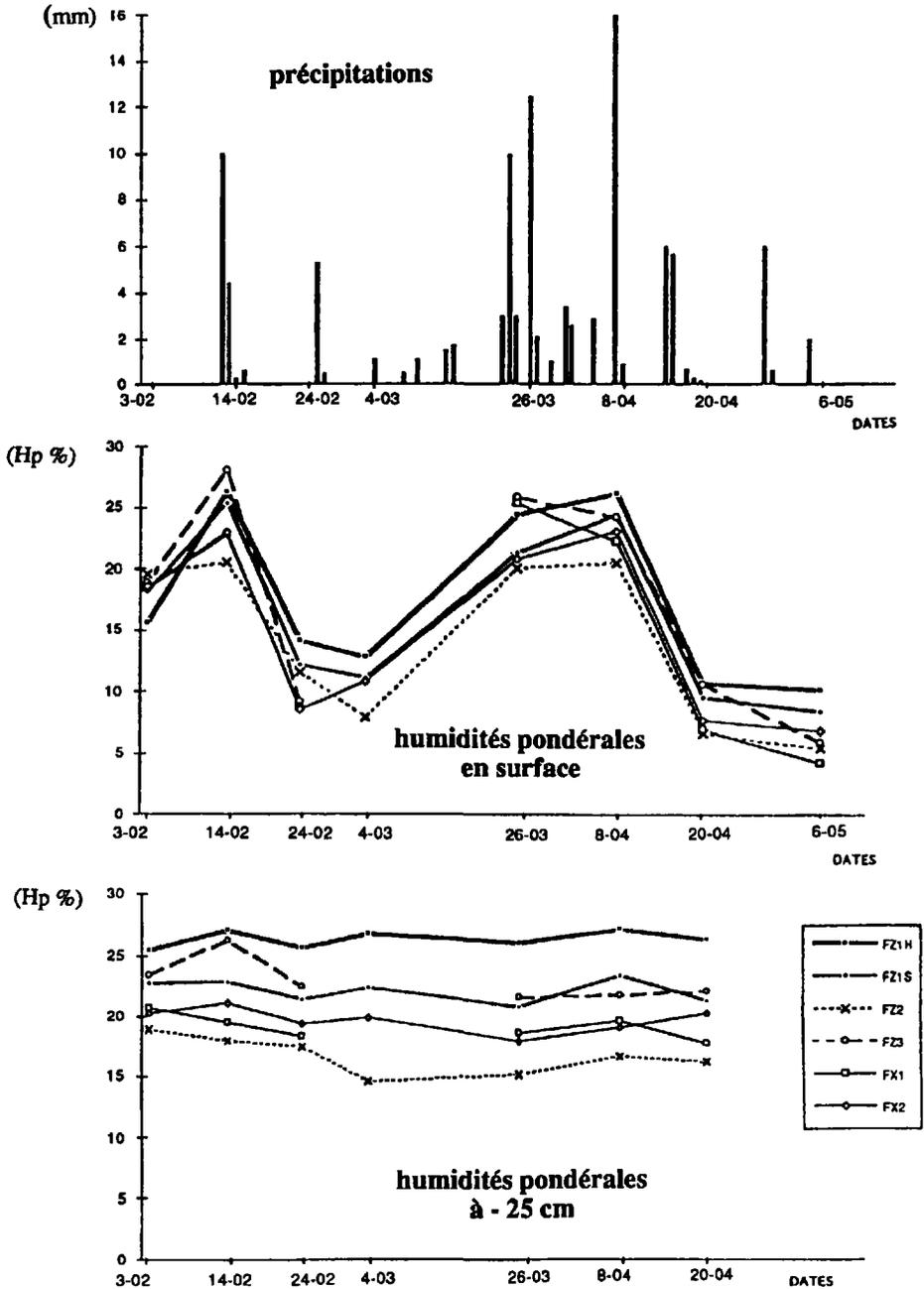


Figure 1. Évolution des humidités pondérales des principales unités morpho-hydrogéologiques entre février et mai 1992; la catégorie FZ1 a été subdivisée en FZ1 H (plus humide) et FZ1 S (plus sec); certaines mesures n'ont pas pu se faire le 4 mars

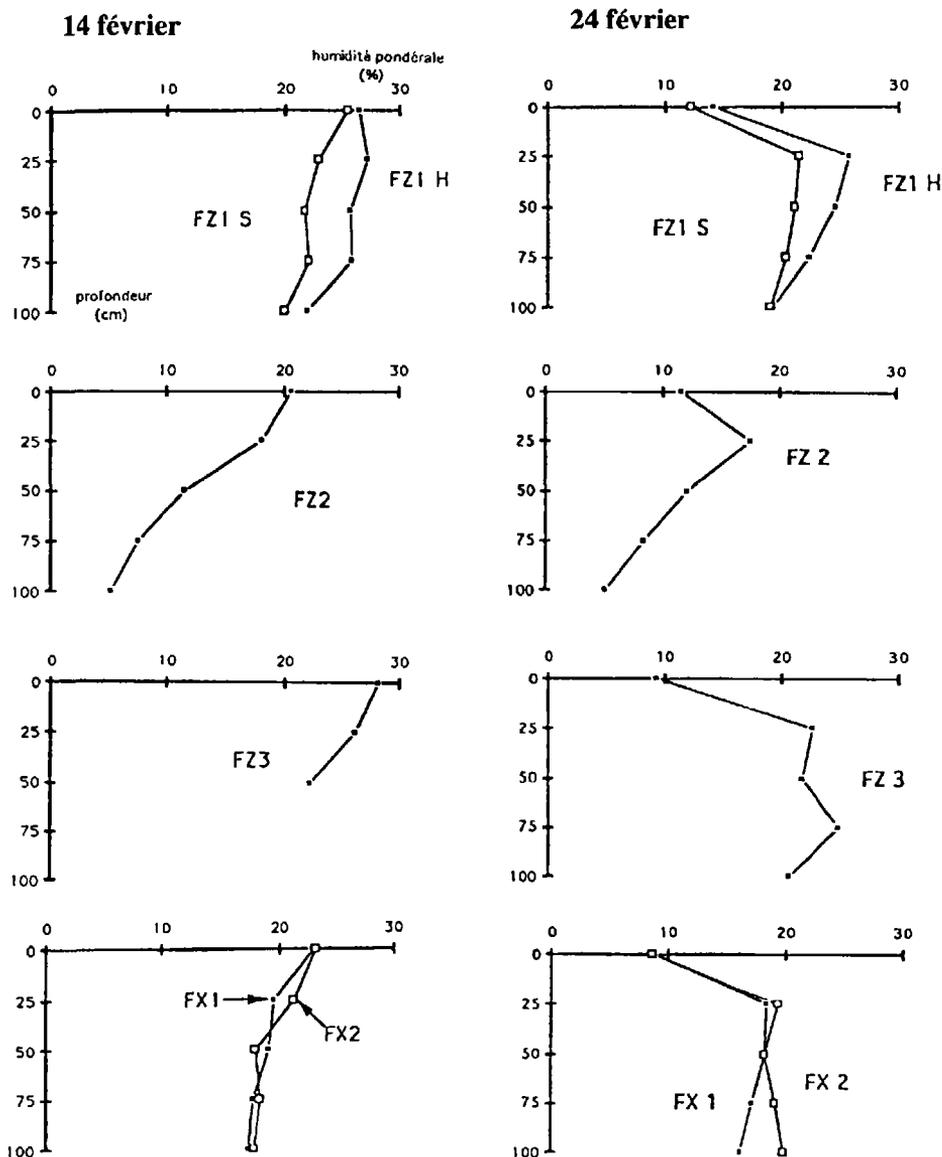


Figure 2. Évolution des profils hydriques des unités morpho-hydrogéologiques au cours d'une phase de dessèchement

de 25 CNC dans les bandes infrarouges. Des différences entre unités apparaissent mieux dans le domaine infrarouge que dans le domaine visible, mais les bandes TM5 et TM7, supposées sensibles à l'humidité, ne semblent pas renfermer d'information vraiment originale. On constate plutôt une grande redondance d'information d'une bande spectrale à l'autre, avec des coefficients de corrélation interbandes toujours supérieurs à 0,8 (sauf de juillet à octobre lorsque le végétation perturbe le signal des sols). Le 6 mai 1992, les

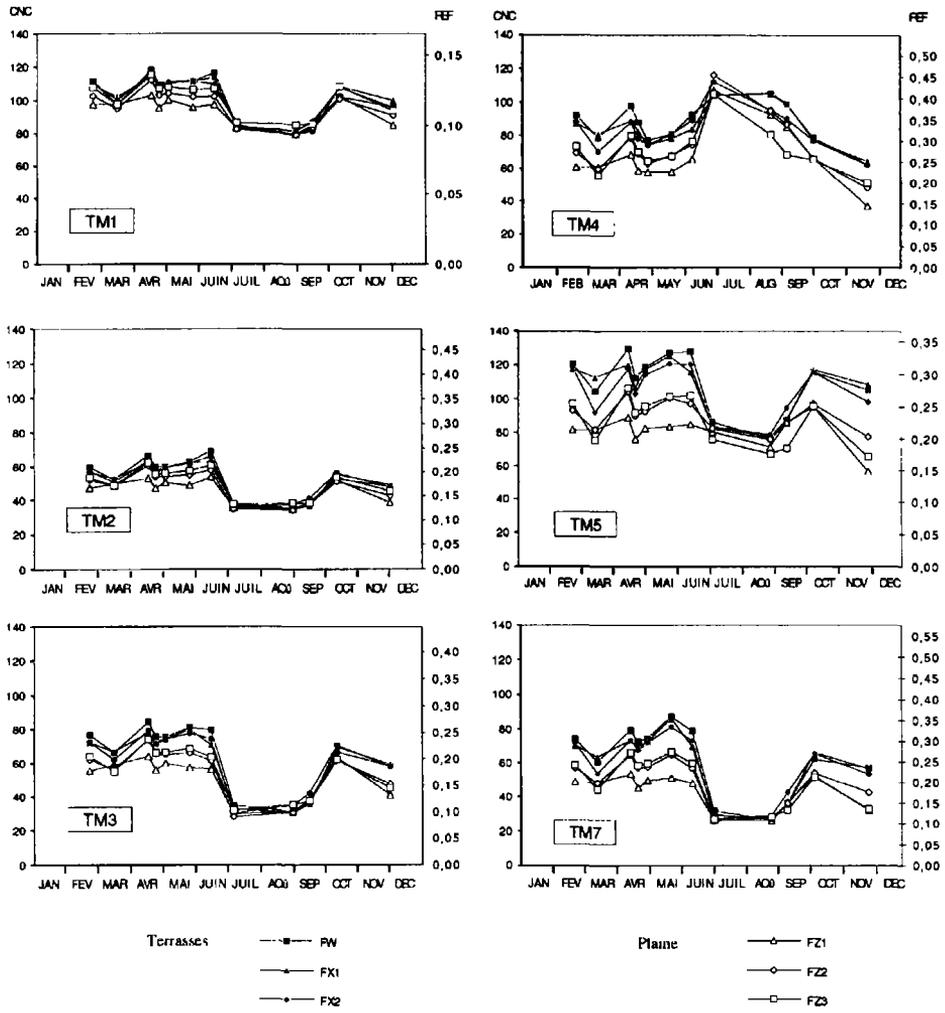


Figure 3. Évolution des valeurs radiométriques moyennes des unités de sols

humidités pondérales n'ont pas pu être corrélées de façon satisfaisante aux données spectrales (JAMES, 1992). Les sols de terrasses (FW, FX1 et FX2) ont des signatures spectrales très semblables et systématiquement supérieures à celles des sols de la plaine (FZ1, FZ2 et FZ3). La catégorie FZ1, pourtant la plus éloignée du fleuve et la moins fréquemment inondée, présente les radiométries les plus faibles. En juillet, la confusion entre les 6 unités est totale, les signatures spectrales étant typiques de la végétation en phase active de croissance (maïs, tournesol, sorgho).

L'efficacité individuelle des bandes spectrales pour discriminer les sols entre eux a été évaluée aux différentes périodes de l'année par des tests F de Fisher, en conservant le même degré de liberté (fig. 4). Les bandes TM5 et TM7 se révèlent les plus efficaces, surtout en mai, lorsque la structure des sols est fine et homogène en surface (préparation des semis).

L'efficacité globale des données, basée sur la combinaison de plusieurs bandes spectrales, ne peut être évaluée par une simple addition des valeurs F. Les données ont donc été soumises à des classifications dirigées. Trois combinaisons de bandes ont été comparées : TM2, TM3 et TM4 (équivalentes aux données actuelles XS de SPOT); TM2, TM3, TM4 et TM5 (équivalentes aux futures données HRVIR de SPOT 4) et enfin les 7 bandes TM. Dans chaque cas, des axes factoriels discriminants ont été calculés, par combinaison linéaire des bandes spectrales d'origine, et ont servi de nouveaux repères pour classer les données. Les résultats des classifications sont globalement insuffisants. On ne dépasse jamais 73 % de pixels bien classés même en combinant toutes les bandes (MULLER et JAMES, 1993). D'autres méthodes de classification (maximum de vraisemblance ou hypercubique) n'ont pas permis d'améliorer ces résultats et l'analyse des matrices de confusions révèle que les confusions apparaissaient essentiellement entre les sols de terrasses et entre les sols de la plaine alluviale.

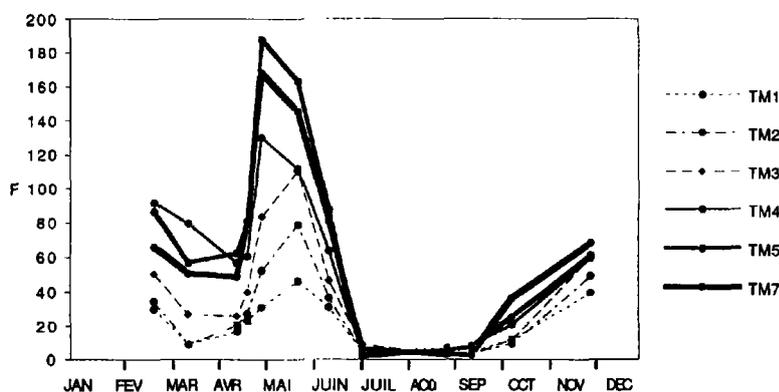


Figure 4. Comparaison de l'efficacité des différentes bandes spectrales pour discriminer les 6 unités de sols (tests F de Fisher calculés avec le même degré de liberté)

3.3. Mise en évidence de signatures spectrales stables dans le paysage

3.3.1. Stabilité du contraste entre les terrasses et la plaine alluviale

Les unités FX1 et FX2, qui correspondent aux premières terrasses, sont en contact direct avec la plaine alluviale et ont des valeurs radiométriques toujours très proches. Elles ont donc été regroupées en une nouvelle catégorie (FX), où domine une structure battante en surface. Les trois formations FZ1, FZ2 et FZ3 de la plaine alluviale, ont également été regroupées en une nouvelle catégorie (FZ), car leurs réponses spectrales sont le plus souvent semblables, comparées à celles des terrasses. Tout au long de l'année, on constate alors un écart radiométrique important entre ces deux groupes FX (terrasses) et FZ (plaine d'inondation), de l'ordre de 5 à 15 CNC dans les trois bandes visibles et de l'ordre de 15 à 30 CNC dans les bandes infrarouges. Les plus forts contrastes étant observés dans TM5 et TM7. De juillet à octobre, les contrastes sont très faibles car les cultures masquent les différences entre les sols. Le contraste spectral qui existe au niveau des sols, entre la plaine alluviale et les terrasses, peut donc être considéré comme une caractéristique stable du

paysage; il apparaît dans toutes les bandes spectrales. La meilleure période pour le cartographe se situe en mai-juin, la meilleure bande étant TM5 (fig. 5).

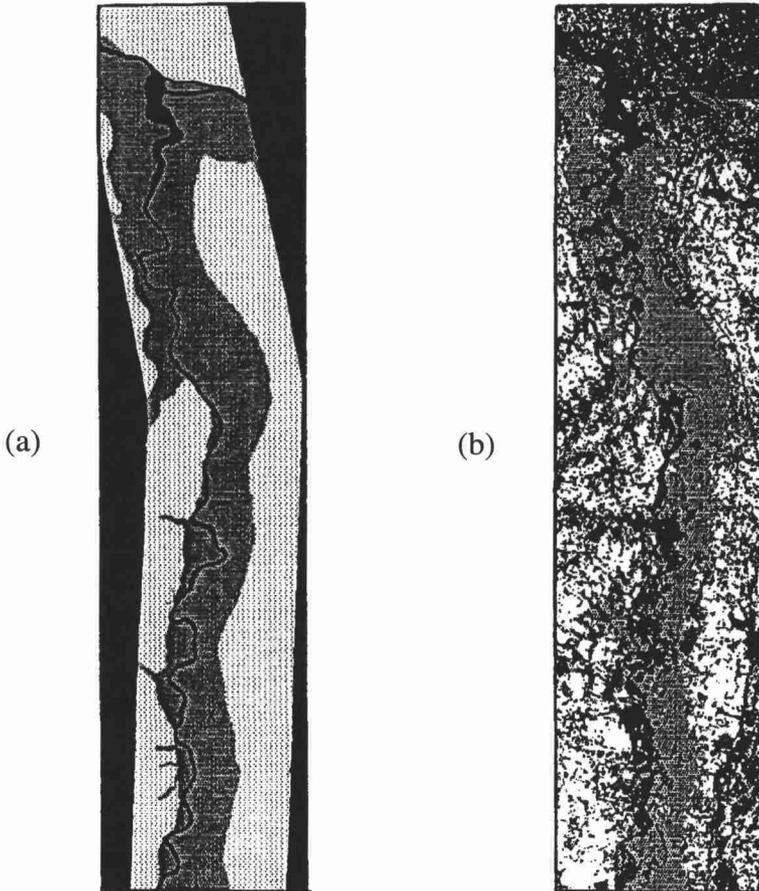


Figure 5. Mise en évidence du contraste spectral entre les terrasses et la plaine d'inondation: a) carte géomorphologique numérisée; b) une image classée; en gris : la plaine d'inondation; en blanc : les terrasses et collines; en noir : les zones non cartographiées ou non classées (eau, végétation)

3.3.2. Stabilité des contrastes dans la plaine alluviale

Dans la plaine alluviale, les signatures spectrales des sols présentent de plus forts contrastes que sur les terrasses, avec de fréquentes confusions entre les dépôts les plus récents FZ2 et FZ3. L'analyse visuelle des images confirme qu'il n'est pas toujours facile de trouver des limites très nettes ou continues entre ces deux catégories qui ont été définies par des critères statistiques et correspondent à des catégories «moyennes». La coïncidence entre une crue particulière et les crues moyennes est bonne lorsqu'il existe, dans le paysage, une matérialisation des limites (levées de terres, petites digues ou d'anciens chenaux qui forcent le passage des eaux). Dans la catégorie FZ2, on peut identifier visuellement des

secteurs très clairs correspondant à des sols très sableux. Ce sont souvent d'anciennes îles de la Garonne, aujourd'hui isolées du lit du fleuve par suite de sa stabilisation et de son enrochement.

Les sols de la catégorie FZ3, caractérisés par des inondations annuelles, sont particulièrement difficiles à analyser car ils sont surtout occupés par des boisements riverains (peupleraies ou saulaies). Leurs réponses spectrales restent très proches de celles de la catégorie FZ2 (inondations décennales).

La catégorie FZ1 (qui n'est inondée qu'une ou deux fois par siècle) présente, en moyenne, une signature spectrale plus faible que celles de FZ2 ou FZ3. Les limites avec FZ2 ne sont pas toujours perceptibles de façon nette ou continue. Par contre, l'analyse visuelle de FZ1 révèle, au pied des terrasses, l'existence des zones aux radiométries les plus basses. Ce contraste local est maximal dans TM5 et il atteint 10-15 CNC en mai-juin. Ces zones n'apparaissent sur aucune carte (ni sur la carte géologique au 1 : 50 000, ni sur la carte géomorphologique au 1 : 25 000). Elles sont toujours plus humides (3 à 5 % d'humidité en plus) et plus argileuses (jusqu'à 40 % d'argile) que le reste de la plaine.

4. Discussion

Ces observations sur les caractéristiques hydriques et spectrales des sols dans le couloir fluvial montrent qu'il existe une structure stable dans le paysage et qu'il est facile de la mettre en évidence en mai-juin lorsque l'hétérogénéité interne de chaque catégorie ne dépend pratiquement plus que des variations locales de facteurs intrinsèques, comme la texture, l'humidité et la couleur. Ceci nous amène à revenir sur les choix des unités de sols admis au début de ce travail et à proposer une nouvelle typologie basée sur les caractéristiques texturales et hydriques plutôt que sur les fréquences d'inondation. Quatre classes ont été retenues :

- L : alluvions à dominante limoneuse, lessivées et battantes, regroupant essentiellement les terrasses (FX1, FX2 et FW);
- SL : alluvions grossières sablo-limoneuses (elles dominent dans les catégories FZ2 et FZ3);
- AL : alluvions franches argilo-limoneuses (fréquentes dans FZ1);
- A : alluvions fines argileuses.

Ces quatre catégories de sols alluviaux ont pu être extraites des images par des classifications dirigées (fig. 16-6, voir cahier couleur), après avoir réalisé, pour chaque image, des masques de sols nus, puis une image composite multidate, en complétant progressivement les vides après un calage radiométrique des données. En combinant six dates, on peut ainsi cumuler les surfaces en sols nus sur plus de 75 % du corridor fluvial, contre 40-45 % avec une seule date. Les masques sur les sols nus sont facilement obtenus après conversion des compositions colorées (TM4-rouge, TM5-vert, TM3-bleu) en intensité, teinte et saturation. En effet, à chaque date, l'histogramme des fréquences des valeurs de teinte possède trois modes bien distincts : les sols nus (et le thème urbain), la végétation et l'eau. Un simple seuillage permet alors d'isoler les sols nus. Les masques obtenus sont en parfait accord avec des seuillages sur NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Cette méthode par seuillage sur les valeurs de teinte peut donc être considérée comme simple, rapide et robuste. Pour la réalisation d'une image multidate, il est préférable de respecter un ordre de priorité dans les dates; cet ordre de priorité étant choisi en fonction des tests de Fisher ou des tests de classification. Les résultats des classifications obtenus sont assez proches de la carte géomorphologique numérisée, avec

cependant d'importantes différences à la confluence avec le Tarn, où dominent des sols sablo-limoneux secs et au pied de certaines terrasses, où apparaissent des sols très argileux et humides.

5. Conclusion

Les résultats de cette étude confirment qu'il est difficile d'extraire, des images de télédétection spatiale, des données quantitatives, précises et fiables sur les teneurs en eau, argiles, limons ou sables des sols. Par contre, il est possible de mettre en évidence des sols aux caractéristiques texturales très typées (dominance de sables fins, dominance de limons ou dominance d'argile), car ceux-ci ont aussi des comportements hydriques spécifiques. Ces sols maintiennent pratiquement toute l'année des contrastes spectraux importants entre eux avec des signatures spectrales qui apparaissent de façon idéale en mai-juin dans la vallée de la Garonne. Ces signatures sont la résultante d'interactions entre la texture, la couleur et l'humidité des sols. Elles restent stables dans le temps si elles ne sont pas trop perturbées par des paramètres de surfaces (travail du sol, pluies localisées, présence de débris végétaux ou de jeunes pousses). Les contrastes disparaissent totalement lorsque la végétation domine.

Lorsque de tels sols coexistent dans un même paysage sur des surfaces homogènes, horizontales et suffisamment grandes, comme c'est le cas dans le couloir fluvial garonnais, on peut alors espérer les cartographier à partir d'images satellites HRV de SPOT ou TM de Landsat. Cette cartographie est facilitée par la création préalable d'images composites multitudes avec un calage radiométrique sur des objets pseudo-invariants. L'utilisation de deux images choisies en mai (sur deux années différentes pour tenir compte de l'assolement cultures d'hiver-cultures de printemps) nous semble suffisante pour mettre en évidence les grandes catégories de sols dans la vallée, révélées par les interactions qui existent entre leur texture, leur humidité et leur couleur. L'utilisation d'un grand nombre d'images ne permet pas de mettre en évidence des catégories supplémentaires ou de mieux les discriminer. Elle permet simplement d'analyser de plus grandes surfaces en sols nus. Cette cartographie par télédétection des grandes unités de sols pourrait s'intégrer dans une base de données sur les sols (ZINCK and VALENZUELA, 1990).

6. Remerciements

Nous sommes très reconnaissants au Centre national d'études spatiales (CNES) d'avoir soutenu financièrement cette étude dans le cadre du projet SPOT 4 MIR (91/CNES/0434).

7. Références

- BOISSARD, P., POINTEL, J. G., RENAUX, B. et BEGON, J. C. 1989. Zonage et quantification de la stabilité structurale de sols cultivés basés sur des données du satellite Landsat-TM, Application au cas d'une parcelle d'orge en Beauce. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Série II, pédologie, vol. 309, p. 145-152.
- BOWERS, S. A. and SMITH, S. J. 1972. Spectrophotometric determination of soil water content. Soil Science Society of America journal, vol. 36, p. 978-980.

- CONDIT, H. R. 1970. The spectral reflectance of american soils. *Photogrammetric Engineering*, vol. 36, p. 955-960.
- COURAULT, D. 1989. Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection, analyses spectrales, spatiales et diachroniques. Collection Sols (17), Institut national agronomique, Paris, 237 p.
- ESCADAFAL, R., GIRARD, M. C. and COURAULT, D. 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 27, p. 37-46.
- FOODY, G. M. 1991. Soil moisture content ground data for remote sensing investigations of agricultural regions. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, p. 1461-1469.
- GARGUET-DUPORT, B. et GIREL, J. 1993. Analyse par télédétection de la structure du paysage alluvial en fonction des conditions hydrologiques et géomorphologiques. Programme avals-ERS : utilisation des données «ERS» pour l'étude des milieux alluviaux de la vallée du Rhône de Genève à Lyon. (1^{ère} partie). Ministère de l'Environnement, Délégation de la qualité de la vie, Paris, 23 p.
- HILL, J. and AIFADOPOULOU, D. 1990. Comparative analysis of Landsat-5 TM and Spot HRV-1 data for use in multiple sensor approaches. *Remote Sensing of Environment*, vol. 34, p. 55-70.
- HOFFER, R. M. and JOHANNSEN, J. 1969. Ecological potentials in spectral signature analysis, *in* *Remote Sensing in Ecology*, (P.L. Johnson ed.), University of Georgia Press, Athens, p. 1-16.
- HOVIS, W. A. Jr. 1966. Infrared spectral reflectance of some common minerals. *Applied Optics*, vol. 5, p. 245-248.
- JAMES, M. 1992. Essai de caractérisation de la vallée de la Garonne par le comportement hydrique et spectral des sols. Mémoire de DEA, Université Paul Sabatier, Toulouse, 51 p. + annexes.
- LAMBERT, R. 1988. Atlas géomorphologique de la vallée de la Garonne. Université Le Mirail, Toulouse, 1: 25 000.
- LINDBERG, D. R. and SNYDER, D. G. 1972. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. *The American Mineralogist*, vol. 57, p. 485-493.
- MULLER, E. 1993. Evaluation and correction of angular anisotropic effects in multitemporal SPOT and Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 45, p. 295-309.
- MULLER, E. et JAMES, M. 1993. Évaluation de la bande TM5 pour la cartographie morpho-hydrogéologique de la moyenne vallée de la Garonne. Rapport final du projet SPOT 4 / MIR (91/CNES/0434), CERR, Toulouse, 47 p.
- PROST, R., KING, C. et LEFEBVRE D'HELLENCOURT, 1983. Propriétés de réflexion diffuse de pâtes de kaolinite en fonction de leur teneur en eau. *Clay Minerals*, vol. 18, p. 193-204.
- STONER, E. R. and BAUMGARDNER, M. F. 1981. Characteristic variations in reflectance of soils. *Soil Science Society of America journal*, vol. 45, p. 1161-1165.
- TANRÉ, D., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J. J., PERBOS, J. and DESCHAMPS, P. Y. 1986. Simulation of the satellite signal in the solar spectrum (5 S). Université des sciences et des techniques, Laboratoire d'optique atmosphérique, Lille, 148 p.
- TRAUTMANN, J. 1991. L'apport des données satellitaires SPOT pour la cartographie hydrogéomorphologique : l'exemple de la vallée de la Durance (France). *Revue de géomorphologie dynamique*, p. 65-75.
- VOGT, T. and LENCO, M. 1993. Mapping and monitoring wetlands in the Rhine alluvial plain to the south of Strasbourg (France) with Landsat TM. 25th International Symposium, Remote Sensing and Global Environmental Change, Graz, Austria, 4-8 April 1993, 12 p.
- ZINCK, J. A. and VALENZUELA, C. R. 1990. Soil geographic database : structure and application examples. *ITC Journal*, vol. 3, p. 270-293.

Suivi des ressources hydriques de la zone méditerranéenne du nord : premiers résultats du projet HYDRE

JÜRGEN VOGT et PAUL VOSSEN

*Institut des applications de la télédétection, Centre commun de recherche (CCR),
Commission des communautés européennes, TP 440, 21020 Ispra (Va), Italie;
téléphone : +39 (332) 78-9205; télécopieur : +39 (332) 78-9074*

Résumé

Dans le cadre du projet HYDRE, le Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes collabore avec quatre régions pilotes de la zone méditerranéenne pour le développement d'un système de suivi des ressources hydriques par des modèles agrométéorologiques et des données satellitaires du capteur AVHRR de NOAA. Le but du projet est de fournir en temps réel des informations sur la situation hydrique actuelle pouvant servir de base pour la prise de décision de gestion de l'eau. Depuis mars 1993, un bulletin mensuel est édité contenant des cartes des paramètres météorologiques, des paramètres sur le développement des cultures et des paramètres environnementaux dérivés à partir des images satellitaires. Les résultats des premiers mois ont confirmé que le modèle agrométéorologique permet la détection d'occurrence de stress hydrique et une simulation réaliste de la croissance des principales cultures. Cependant, il est apparu que des problèmes liés à la répartition des stations météorologiques et à l'interpolation des données météorologiques limitent la représentativité spatiale des résultats. Les données satellitaires sont traitées jusqu'au niveau d'une mosaïque journalière des indices de végétation et de la température de surface. Leur interprétation et l'analyse des séries temporelles des différents paramètres ont montré leur capacité pour la détection des zones souffrant de stress hydrique.

1. Introduction

Au cours de ces dernières décennies, la zone méditerranéenne a connu une intensification progressive de l'activité humaine permanente ou saisonnière. L'extension de périmètres irrigués, l'implantation d'industries ainsi que la croissance de la population et le développement du tourisme entraînent des besoins en eau constamment croissants. Cependant, cette zone est caractérisée par une forte variabilité des ressources hydriques en cours de l'année et entre les années. Les variations interannuelles et spatiales de la pluviométrie et de l'état hydrique des cultures et de la végétation naturelle sont donc à surveiller avec une attention particulière.

Devant cette situation, la Commission méditerranéenne de la Conférence des régions périphériques maritimes de l'Union européenne (CRPM de l'UE) et la Direction générale des politiques régionales de la Commission des communautés européennes (DG XVI de l'UE) ont lancé le projet HYDRE (Suivi des ressources hydriques au service des politiques régionales de l'agriculture et de l'environnement). Dans le cadre de ce projet, l'Institut des applications de la télédétection (IATD) du Centre commun de recherche (CCR) de l'UE collabore avec quatre régions pilotes de la zone méditerranéenne pour développer un système de suivi des ressources hydriques par des modèles agrométéorologiques et des données satellitaires du capteur AVHRR de NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer*, US National Oceanographic and Atmospheric Administration). La zone couverte par le projet et les régions pilotes, soit l'Andalousie (E), le Languedoc-Roussillon (F), la Sardaigne (I) et la Sicile (I), sont illustrées sur la figure 1.

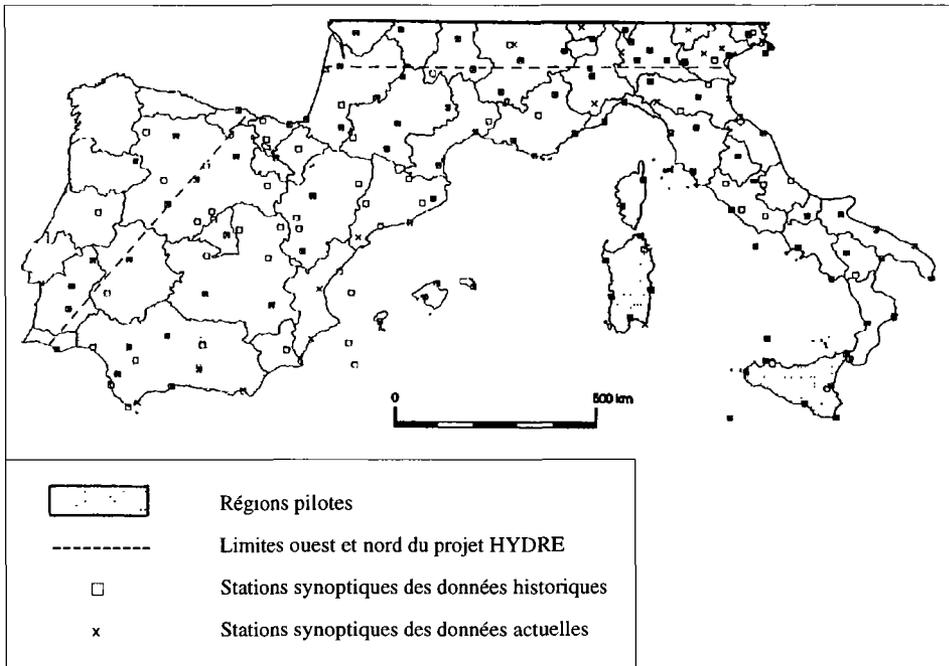


Figure 1. Zone couverte par le projet HYDRE

Le but du projet est de créer des cellules de suivi des ressources hydriques au niveau de chaque région du réseau. Une activité clé pour ces cellules sera la production d'un bulletin mensuel de suivi conjoncturel, permettant d'évaluer la situation hydrique actuelle, lequel servira de base pour des décisions de la gestion de l'eau. Afin de réaliser également une analyse structurelle des besoins en eau de chaque région, des informations régionales, relatives à la couverture végétale, la distribution de la population et la répartition de l'industrie sont colligées et seront intégrées dans le SIG.

L'article présente l'approche méthodologique choisie ainsi qu'une discussion des premiers résultats obtenus.

2. Approche méthodologique

L'approche choisie doit satisfaire à la fois trois nécessités imposées par le caractère des ressources en eau :

- l'acquisition et l'analyse en temps quasi-réel des données;
- l'intégration et l'analyse spatiale des paramètres environnementaux;
- la modélisation des phénomènes qui ont une influence sur les variations temporelles des conditions hydriques.

Ces exigences sont satisfaites par l'utilisation des données satellitaires et des modèles agrométéorologiques en combinaison avec un SIG.

2.1. Modèle agrométéorologique

À l'origine, le modèle agrométéorologique est le modèle WOFOST (*World Food Studies*) (VAN KEULEN and WOLF, 1986; VAN DIEPEN *et al.*, 1989). Il fut modifié et validé pour une application à l'échelle régionale par le CCR Ispra (BURRILL and VOSSEN, 1992; VOSSEN, 1990 et 1992) sous le nom ASM (*Agricultural Season Monitoring*). À partir des données météorologiques journalières, d'une carte numérisée des sols, d'un modèle numérique du terrain (MNT) et des informations régionales sur l'agriculture, le modèle (fig. 2) est capable de simuler la croissance d'une dizaine de cultures européennes.

Les données météorologiques du projet proviennent d'environ 150 stations synoptiques (fig. 1). Ces données constituent une base de données journalières historiques sur 20 à 30 années avec 12 paramètres météorologiques. Elle est actualisée quotidiennement. Au cours du projet, elle sera élargie avec des données journalières sur la pluviométrie et les températures de l'air mesuré par une cinquantaine de stations dans chaque région pilote.

D'autres données d'entrée sont la carte des sols de l'UE au 1: 1 000 000 et le MNT ETOPOS 5 du US NGDC (United States National Geophysical Data Centre), avec une résolution de 5' en latitude et en longitude. La carte des sols est numérisée et complétée par des informations sur la profondeur du sol et sa capacité maximale de rétention en eau. Ces données permettent de travailler avec une maille régulière d'une résolution de 25 km x 25 km.

Au niveau de chacune des régions pilotes, les différentes couvertures du SIG sont complétées par des données régionales plus détaillées, soit les cartes régionales des sols, les cartes d'occupation du sol, les MNT avec une résolution plus fine. Ce perfectionnement de la base de données permet de travailler avec des mailles plus fines ou bien avec des polygones représentatifs d'unités écologiques.

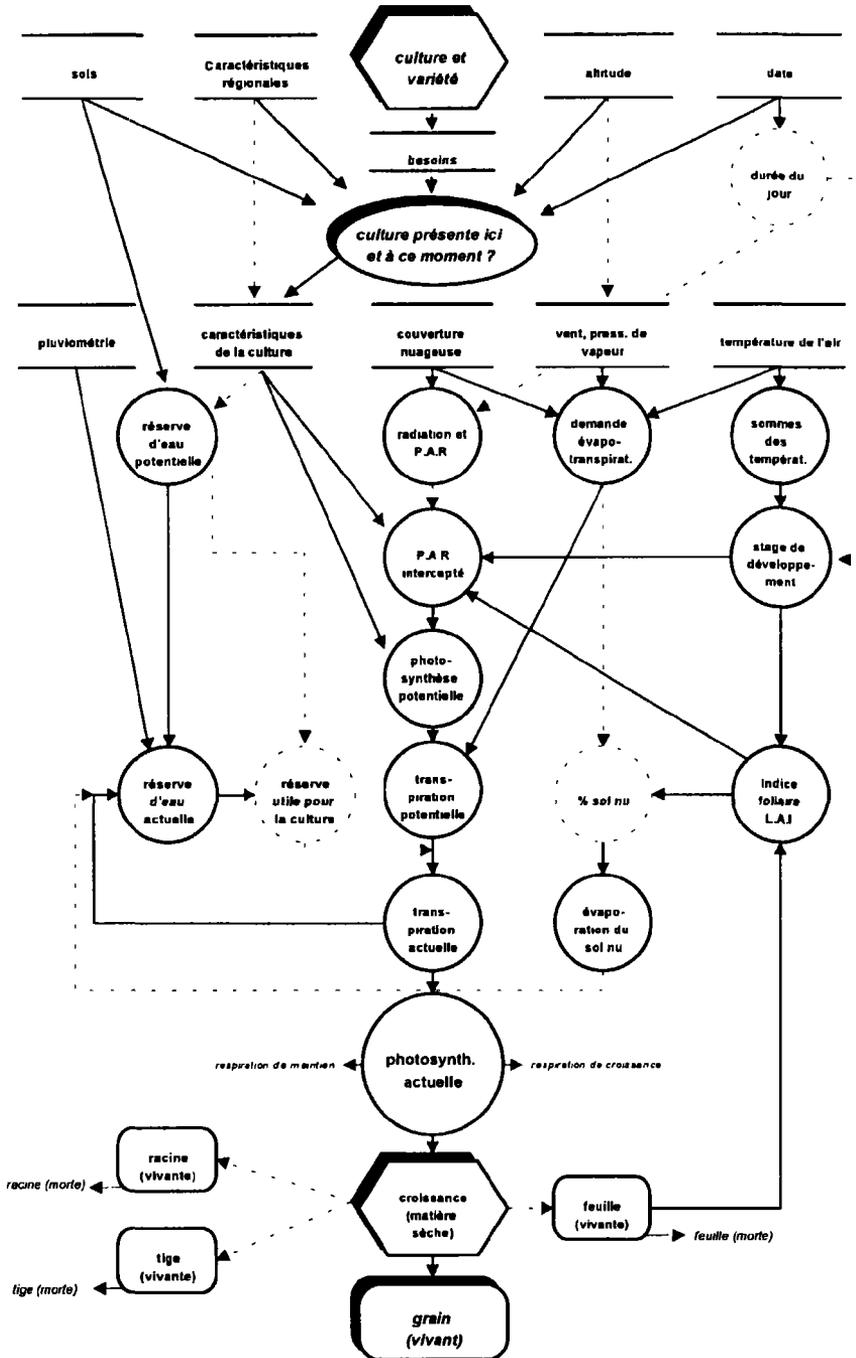


Figure 2. Vue schématique du modèle agrométéorologique (P.A.R. : *Photosynthetic Active Radiation*)

Les modules du système sont gérés par des programmes écrits sous ARC/INFO. Ce SIG est aussi utilisé pour la gestion et la présentation des résultats sous forme de cartes ou de tableaux. Les paramètres retenus sont les suivants :

- pour les données météorologiques : température (moyenne, minimum et maximum), rayonnement, pluies, évaporation et bilan hydrique climatique; chaque paramètre peut être présenté sous forme de cartes journalières, décadaires ou mensuelles ainsi qu'intégré pour la période végétative;
- pour les données agrométéorologiques : la phase de développement des cultures, l'indice foliaire, le poids cumulé de matière sèche et le poids cumulé de grain.

Tous ces paramètres sont représentés comme valeur absolue et par rapport à une valeur de référence calculée à partir des données historiques.

2.2. Données satellitaires

Les données satellitaires utilisées sont enregistrées par le capteur AVHRR en orbite sur des satellites NOAA. L'AVHRR donne une couverture complète du monde deux fois par jour avec une résolution spatiale maximale de 1,1 km x 1,1 km. Dans le projet HYDRE, on utilise des images de l'après-midi, enregistrées entre 13 h 30 et 16 h 00 solaire au nadir.

L'AVHRR enregistre la radiation électromagnétique dans cinq canaux, soit dans le visible, dans le proche infrarouge et dans l'infrarouge thermique; cela permet le calcul ou l'estimation de différents paramètres environnementaux comme des indices de végétation, la température de surface et l'albédo hémisphérique (GOWARD *et al.*, 1991; GUTMAN, 1991; PRICE, 1984 et 1989; GUTMAN *et al.*, 1989; SAUNDERS, 1990; VOGT, 1992). Chacun de ces indices porte des informations indicatives sur l'état hydrique de la surface. L'indice de végétation donne des informations sur la couverture végétale et sa vigueur, la température sur le bilan énergétique, et l'albédo sur le bilan radiatif.

L'IATD traite toutes les images de l'après-midi qui couvrent une partie du territoire de l'UE. Le logiciel SPACE (*Software for Processing AVHRR Data for the Communities of Europe*), utilisé pour le prétraitement des images, fut développé par le CCR (SHARMAN, 1990). Le résultat du prétraitement est une mosaïque journalière de cinq canaux, couvrant l'ensemble de l'Europe avec une résolution nominale de 1,1 km x 1,1 km. Les données sont calibrées et corrigées pour les influences de l'atmosphère et de la géométrie. De plus, des informations auxiliaires, comme un masque des nuages et l'angle de vue, sont enregistrées. D'autres logiciels permettent l'accès à cette base de données, l'extraction d'une zone d'étude et le calcul des paramètres environnementaux décrits précédemment. Finalement, ces paramètres peuvent être agrégés à des mailles ou polygones définis par l'utilisateur. La gestion et la présentation du dernier niveau des résultats sont réalisées sous ARC/INFO en vue de faciliter l'analyse par rapport aux données météorologiques et agrométéorologiques.

3. Premiers résultats

Pour l'année 1993, un bulletin mensuel est réalisé sous forme de test. Ce bulletin contient des cartes des différents paramètres météorologiques et agrométéorologiques (valeurs absolues et déviations par rapport à la moyenne interannuelle) pour des mailles de 50 km x 50 km et 25 km x 25 km. Sur la figure 3, on montre un exemple du bilan hydrique climatique absolu, calculé pour la période du 1^{er} octobre 1992 jusqu'au 31 juillet 1993. On voit bien les forts déficits sur de grandes parties de l'Espagne, de la Sardaigne et de la Sicile.

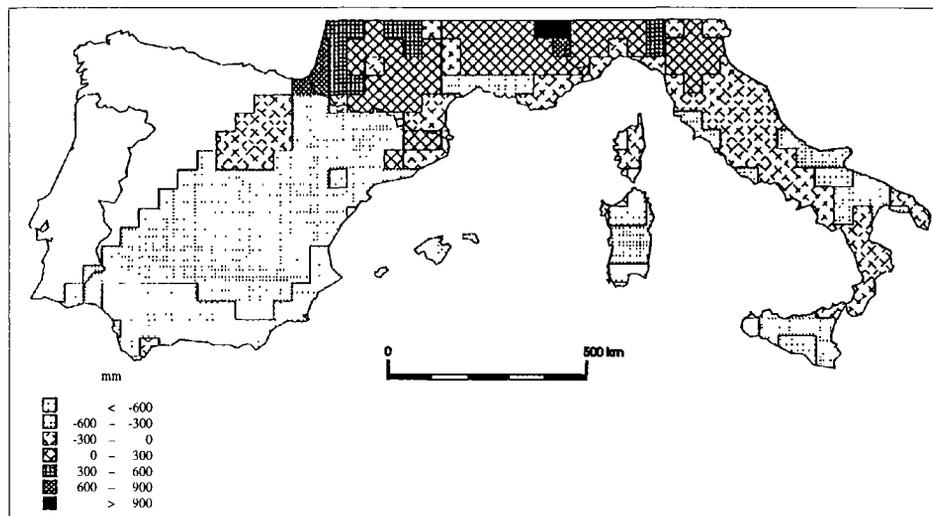


Figure 3. Bilan hydrique climatique calculé pour la période du 1^{er} octobre 1992 au 31 juillet 1993 (maille : 50 km x 50 km)

Ces déficits, représentant parfois des valeurs de plus de 25 % inférieures à la moyenne historique, montrent une situation grave pour l'année courante. Parallèlement, le poids de matière sèche et le poids de grain, calculé par le modèle agrométéorologique, indiquent des pertes significatives des récoltes dans ces régions. Les prévisions du modèle - actualisé mensuellement - ont été confirmées par des observations sur le terrain et les informations des équipes régionales du projet. Ces premiers essais de calcul du bilan hydrique et de prévision qualitative des récoltes au niveau régional sont encourageants, surtout si l'on considère la faible résolution spatiale de la base de données.

Sur les figures 17-4 et 17-5 (voir cahier couleur), on donne des exemples d'images de la température de surface et de l'indice de végétation (NDVI) du 29 juillet 1993, calculé à partir des mesures effectuées par l'AVHRR. On y montre bien la résolution spatiale plus détaillée par rapport aux cartes des données météorologiques. Le gradient nord-sud et les variations même au niveau des régions sont documentés clairement par les valeurs de la température de surface, variant entre 25 °C au sud de la France et au nord d'Italie et plus de 50 °C dans certaines zones de l'Andalousie, de la Sardaigne et de la Sicile. En général, les températures sont corrélées aux valeurs du NDVI qui donnent une indication sur la présence ou l'absence de la végétation photosynthétiquement active. La présence de la végétation (NDVI élevée) cause des températures relativement basses, tandis que le manque de végétation se traduit par des températures plus élevées (voir, par exemple, la situation en Sardaigne ou en Sicile).

L'analyse des séries temporelles de ces données permet un suivi de l'évolution de la végétation et une première évaluation de la situation hydrique au niveau régional. Sur la figure 6, on donne un exemple des séries temporelles du NDVI pour la région de Salamanque en Espagne. Les courbes montrent bien la différence entre les années 1991 et 1993, d'une part, et l'année 1992, d'autre part. Cette dernière était caractérisée par une forte sécheresse.

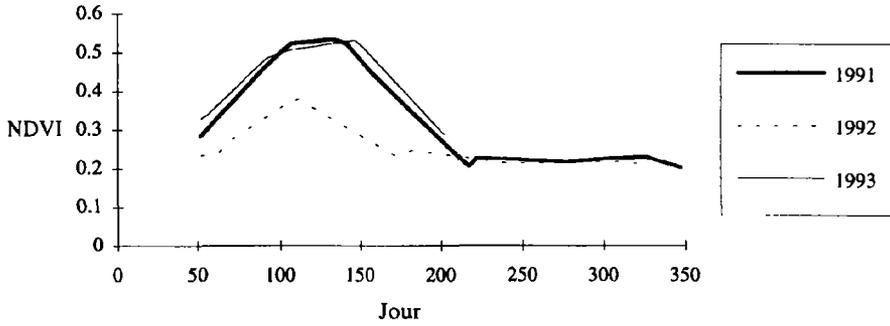


Figure 6. Courbes temporelles du NDVI pour la région de Salamanque en Espagne; données extraites des images AVHRR prétraitées par SPACE

La relation entre température de surface et bilan hydrique a été étudiée par plusieurs chercheurs dont GUTMAN (1990), JACKSON (1982), SEGUIN *et al.* (1991), et VIDAL *et al.* (1987). Leurs résultats montrent que les séries temporelles de la température de surface et de leur différence par rapport aux températures de l'air, offrent la possibilité pour un suivi de la situation hydrique au niveau régional. Bien que dans la première phase du projet HYDRE ces données sont utilisées seulement dans un sens qualitatif pour la comparaison avec les résultats du modèle agrométéorologique, ultérieurement elles seront utilisées de manière quantitative pour le suivi de la satisfaction des besoins en eau des plantes cultivées au niveau régional.

4. Discussion

Bien qu'actuellement des cartes et des images permettant une évaluation qualitative de la situation hydrique sont fournies mensuellement, il reste plusieurs problèmes à résoudre.

Un des points les plus importants est l'agrandissement de la base de données météorologiques et l'amélioration de leur interpolation. Les premiers mois du projet HYDRE ont montré que le nombre de stations synoptiques disponibles et leur répartition ne sont pas satisfaisants pour une interpolation représentative de la zone méditerranéenne. La topographie très variable et les variations climatiques spatiales, parfois très fortes, demandent une densité plus élevée de stations, ceci surtout pour la pluviométrie qui est caractérisée par une variabilité spatiale très forte. Cette amélioration de la représentation spatiale des paramètres météorologiques est très importante pour leur analyse en combinaison avec des paramètres dérivés à partir des mesures du AVHRR.

Actuellement, les températures de surface sont estimées selon l'algorithme de PRICE (1984). Cet algorithme n'est pas adapté à la zone d'étude et des informations sur l'émissivité de surface ne sont pas disponibles. En conséquent, la précision de l'estimation n'est que de 3 à 4 °C. D'autres problèmes sont liés à l'analyse des séries temporelles des températures et à la comparabilité des températures mesurées dans les différentes parties de la trace du satellite. Le premier problème est dû au décalage du temps de passage des satellites qui est de l'ordre de 30 minutes par an. Le deuxième est dû au changement de l'heure solaire locale sur la trace du satellite qui est de l'ordre de 1 h 40 min. Une correction de ces aspects sera indispensable pour une analyse quantitative des séries temporelles.

5. Conclusion

Malgré les problèmes méthodologiques à résoudre, la première phase du projet HYDRE a montré la possibilité de traiter en temps réel un grand nombre des données de différentes sources pour le suivi de la situation hydrique à l'échelle régionale. Le projet permet pour la première fois d'appliquer et de tester l'utilisation combinée de modèles agrométéorologiques et de données satellitaires journalières pour le suivi des ressources hydriques dans un cadre opérationnel et au niveau de régions étendues.

6. Remerciements

Nous remercions P. Loopuyt qui a préparé les cartes pour les figures 1 et 3 et M. Sharman, P. Gervais, H. de Groof et J.-M. Dubois pour des commentaires critiques sur une première version du manuscrit.

7. Références

- BURRILL, A. and VOSSSEN, P. 1992. Development of an Operational Agro-Meteorological Monitoring System. Proceedings of the Second Conference on the Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, 26-27 November 1991, Belgirate, Italy; Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication no 14262, Brussels/Luxembourg, p. 357-360.
- GOWARD, S.N., MARKHAM, B, DYE, D.G., DULANEY, W. and YANG, J. 1991. Normalised Difference Vegetation Index Measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, p. 257-277.
- GUTMAN, G., GRUBER, A., TARPLEY, D. and TAYLOR, R. 1989. Determination of the Clear-Sky Planetary Albedo from AVHRR Using a Bi-Directional Reflectance Model. *Advances in Space Research*, vol. 9, n° 7, p. 251-254.
- GUTMAN, G. 1990. Towards Monitoring Droughts from Space. *Journal of Climate*, vol. 3, n° 2, p. 282-295.
- GUTMAN, G. 1991. Vegetation Indices from AVHRR : An Update and Future Prospects. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, p. 121-136.
- JACKSON, R.D. 1982. Canopy Temperature and Crop Water Stress. *in* D. HILLES (ed.). *Advances in Irrigation*. New York, p. 43-85.
- PRICE, J.C. 1984. Land Surface Temperature Measurements from the Split-Window Channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *Journal of Geophysical Research*, vol. 89, n° D5, p. 7231-7237.
- PRICE, J.C. 1989. Quantitative Aspects of Remote Sensing in the Thermal Infrared. *in* G. ASRAR (ed.). *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. New York, p. 578-603.
- SAUNDERS, R.W. 1990. The Determination of Broad Band Surface Albedo from AVHRR Visible and Near-Infrared Radiances. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, p. 59-67.
- SEGUIN, B., LAGOUARDE, J.P. and SAVANE, M. 1991. The Assessment of Regional Crop Water Conditions from Meteorological Satellite Thermal Infrared Data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, p. 141-148.

- SHARMAN, M. 1990. Exploiting the AVHRR for Agricultural Monitoring. Proceedings of the Conference on The Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, 10-11 October 1989, Varese, Italy; Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication n° 12581 EN, Brussels/Luxembourg, p. 163-170.
- VAN DIEPEN, C. A., WOLF, J., VAN KEULEN, H. and RAPPOLDT, C. 1989. WOFOST : A Simulation Model of Crop Production. Soils Use and Management, vol. 5, n° 1, p. 16-24.
- VAN KEULEN, H. and WOLF, J. 1986. Modelling of Agricultural Production : Weather, Soils and Crops. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Pudoc, Wageningen (NL), 479 p.
- VIDAL, A., KERR, Y., LAGOUARDE, J.P. et SEGUIN, B. 1987. Télédétection et bilan hydrique : utilisation combinée d'un modèle agrométéorologique et des données de l'IR thermique du satellite NOAA AVHRR. Agriculture and Forest Meteorology, vol. 39, p. 155-177.
- VOGT, J. 1992. Characterizing the Spatio-Temporal Variability of Surface Parameters from NOAA AVHRR Data. A Case Study for Southern Mali. Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication n° 14637 EN, Brussels/Luxembourg, 263 p.
- VOSSSEN, P. 1990. Modèles agrométéorologiques pour le suivi des cultures et la prévision de rendements des grandes régions des Communautés européennes. Proceedings of the Conference on the Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, 10-11 October 1989, Varese, Italy; Commission of the European Communities-Joint Research Centre, EUR Publication n° 12581 EN, Brussels/Luxembourg, p. 75-84.
- VOSSSEN, P. 1992. Forecasting National Crop Yields of E.C. Countries : The Approach Developed by the Agriculture Project. Proceedings of the Second Conference on the Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, 26-27 November 1991, Belgirate, Italy; Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication n° 14262, Brussels/Luxembourg, p. 159-176.

