



**Estimation de l'évapotranspiration par télédétection,
application au contrôle de l'irrigation**

Alain Vidal

USTL



ENGREF



INRA



CEMAGREF

I AV Hassan II



ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION PAR TÉLÉDÉTECTION, APPLICATION AU CONTRÔLE DE L'IRRIGATION

A. VIDAL

- ORMVAG** Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb, Centre de télédétection - BP 79 KENITRA, MAROC - Tél. : (212) 736 25 94 - Télécopie : (212) 736 42 86 - Télex : 92113 M
- IAV Hassan II** Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Département Equipement et Hydraulique - BP 6202 RABAT-INSTITUTS, MAROC - Tél. : (212) 777 43 51 - Télex : 31873 M
- ENGREF** Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts - BP 5093 34033 MONTPELLIER CEDEX 1, FRANCE- Tél. : (33) 67 54 46 96 - Télécopie : (33) 67 63 50 91
- USTL** Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Laboratoire d'Hydrologie Mathématique - Place Eugène Bataillon, 34060 MONTPELLIER CEDEX, FRANCE - Tél. : (33) 67 63 33 39 - Télécopie : (33) 67 52 28 29
- INRA** Institut National de la Recherche Agronomique, Département de Bioclimatologie - 78850 THIVERVAL-GRIGNON, FRANCE - Tél. : (33) 30 54 45 10 - Télex : 697388 F - Télécopie : (33) 30 54 31 31
- CEMAGREF** Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Laboratoire Commun de Télédétection - BP 5095 F - 34033 MONTPELLIER CEDEX 1, FRANCE - Tél. : (33) 67 52 43 43 - Télécopie : (33) 67 63 57 95 - Télex : 490990 F

Collection **ETUDES**

Série Hydraulique Agricole

N° 1. Etude de la qualité des eaux de drainage, R. Belamie et B. Vollat ; **Diagnostic de risque de lessivage d'azote en fin de campagne culturale**, T. Guérin ; **La tranchée de drainage**, D. Zimmer ; **Une nouvelle expression de la hauteur équivalente**, G. Guyon ; **A propos des coefficients de forme de la nappe libre drainée**, B. Lesaffre.

N° 2. Hydraulique au voisinage du drain. Méthodologie et premiers résultats. Application au diagnostic du colmatage minéral des drains, Ch. Lennoz et K. Zaïdi.

N° 3. Drainage. Secteurs de références. Recueil des expérimentations, B. Vincent.

N° 4. Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA, B. Lesaffre.

N° 5. Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement, D. Zimmer.

N° 6. Réseaux collectifs d'irrigation ramifiée sous pression. Calcul et fonctionnement, J. Béthery

N° 7. Géologie des barrages et des retenues de petites dimensions, D. Lautrin

Série Forêt

N° 1. Annales 1988 du département Forêt

N° 2. Le Massif Central Cristallin Analyse du milieu - Choix des essences, Alain Franc.

N° 3. Les stations forestières du Pays d'Othe, Denis Girault

N° 4. Cultures d'arbres à bois précieux en prairies paturées en Auvergne, J.-L. Guitton, G. Brethière, S. Saar.

A paraître :

Annales 1989 du département Forêt

Typologie forestière de la bordure Sud-Ouest du Massif Central, Thomas Curt

Série Ressources en eau

N° 1. Potentiel d'électrode de platine en épuration biologique, A. Héduit

N° 2. Le phosphore et l'azote dans les sédiments du fleuve Charente : variations saisonnières et mobilité potentielle, Marc Despreaux

Série Equipement des IAA

N° 1. Carbonisateur à pailles et herbes pour les pays en développement, Catherine Esnouf.

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

THESE

Présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

(Spécialité : Aménagement, Sciences de l'eau)

**ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION
PAR TELEDETECTION**

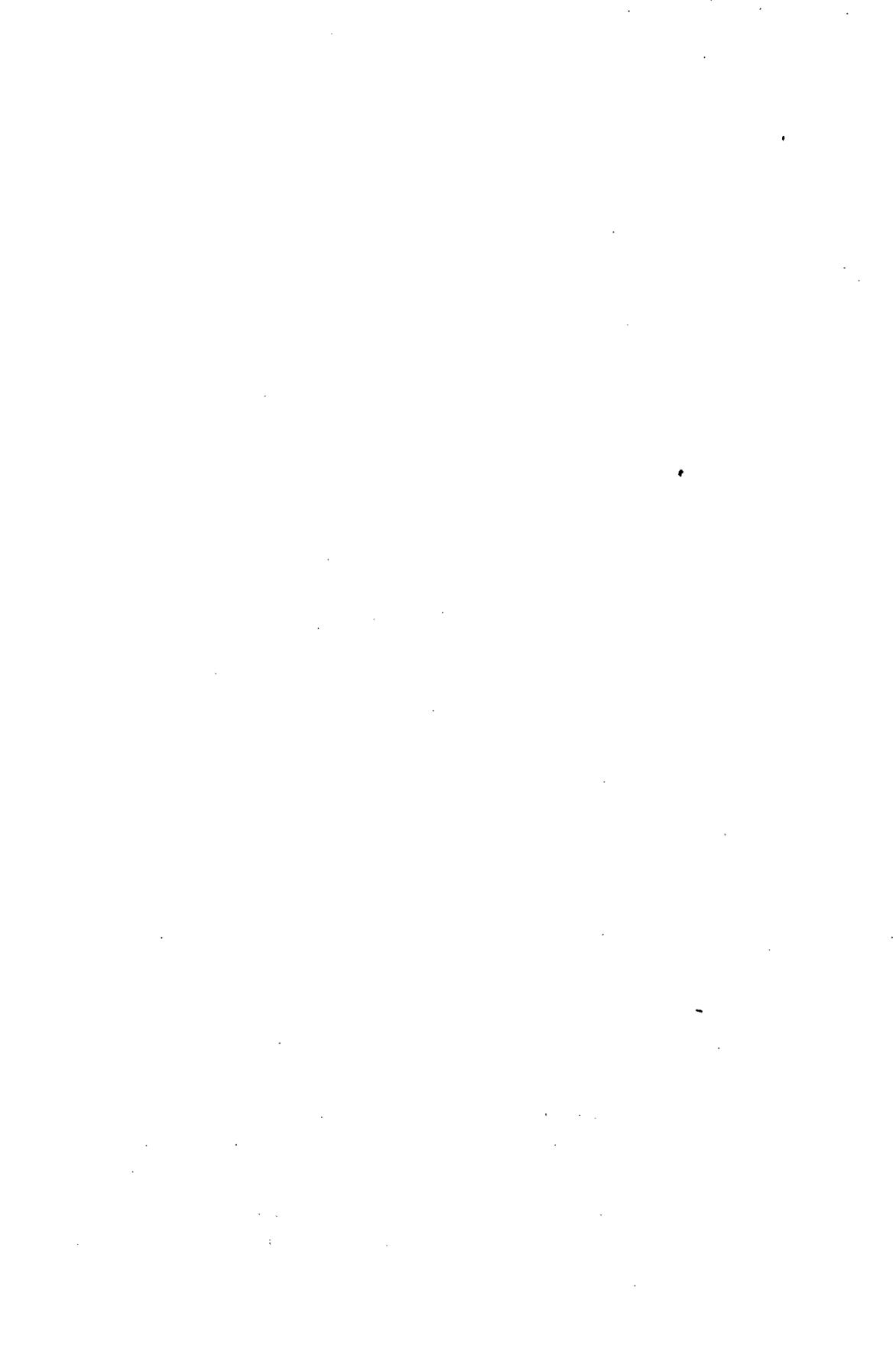
APPLICATION AU CONTROLE DE L'IRRIGATION

PAR

Alain VIDAL

Soutenue le 4 décembre 1989 devant le Jury composé de :

MM. Alain PERRIER, Professeur de Bioclimatologie INAPG, Président
François BECKER, Professeur Université de Strasbourg, Rapporteur
Bernard SEGUIN, Directeur de recherches INRA Avignon, Rapporteur
Claude BOCQUILLON, Professeur Université de Montpellier
Reinder FEDDES, Professeur Université de Wageningen
Benoît LESAFFRE, Chef du Département Hydraulique Agricole CEMAGREF



Le CEMAGREF est un organisme de recherches dans les domaines de l'eau, de l'équipement pour l'agriculture et l'agroalimentaire, de l'aménagement et de la mise en valeur du milieu rural et des ressources naturelles.

En contact permanent avec les agents économiques et les collectivités, il cherche à constituer des outils mieux adaptés dans différents secteurs d'activités :

- eau
- risques naturels et technologiques
- montagne et zones défavorisées
- forêts
- machinisme agricole
- équipement des industries agroalimentaires
- production et économie agricoles.

Le CEMAGREF est un Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique sous la tutelle des ministères de la Recherche et de l'Agriculture.

Il emploie 970 agents dont 420 scientifiques répartis en 10 groupements : Aix-en-Provence, Antony, Bordeaux, Clermont-Ferrand, Grenoble, Lyon, Montpellier, Nogent-sur-Vernisson, Outre-Mer (La Martinique), Rennes.

TABLE DES MATIERES

PREFACE D'OTHMANE LAHLOU, M'HAMED SEDRATI ET YVES LE BARS	13
REMERCIEMENTS	14
RESUME - ABSTRACT	16
INTRODUCTION	19
CHAPITRE I : DEFINITIONS ET BASES THEORIQUES	25
1 - ESTIMATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE PAR TELEDETECTION	28
1.1. LE RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE DANS L'INFRA-ROUGE THERMIQUE	28
1.1.1. Emission du corps noir	29
1.1.2. Absorption et transmission	31
1.1.3. Réflexion	32
1.2. SIGNAL RECU PAR UN CAPTEUR	33
1.2.1. Formulation générale	33
1.2.2. Cas des mesures de température de surface au sol	33
1.2.3. Cas des mesures de température de surface par satellite	35
1.2.3.1. Utilisation des données du capteur AVHRR du satellite NOAA 9	36
1.2.3.2. Corrections atmosphériques	37
1.2.3.3. Corrections d'émissivité	39
2 - BILAN D'ENERGIE ET EVAPORATION D'UNE SURFACE "MINCE"	41
2.1. RAYONNEMENT NET R_n	43
2.2. LE FLUX CONVECTIF H	45
2.3. LE FLUX CONDUCTIF G	47
2.4. LE FLUX DE CHALEUR LATENTE LE	47
2.5. TERMES D'EQUILIBRE T_s ET C_s (TEMPERATURE ET CONCENTRATION DE VAPEUR D'EAU A LA SURFACE)	49

CHAPITRE II : MODELISATION DES BILANS ENERGETIQUE ET HYDRIQUE	51
1 - BILAN D'ENERGIE ET EVAPORATION D'UN COUVERT DEVELOPPE	54
1.1. FLUX CONVECTIF H	56
1.2. FLUX DE CHALEUR LATENTE LE	57
2 - MODELE PHYSIQUES : BILAN D'ENERGIE - BILAN HYDRIQUE	58
2.1. DONNES D'ENTREE	58
2.1.1. Données météorologiques	58
2.1.2. Données du couvert végétal	59
2.1.3. Cas particulier des couverts développés	60
2.2. BILAN D'ENERGIE	61
2.2.1. Rayonnement net R_n	61
2.2.2. Flux convectif H	62
2.2.3. Température de surface T_s et évapotranspiration ETR	63
2.2.4. Flux conductif G	63
2.3. BILAN HYDRIQUE DU SOL	64
2.4. SYNTHESE : SCHEMA GENERAL DU MODELE	66
3 - MODELE SIMPLIFIE	67
3.1. PRESENTATION ET JUSTIFICATION THEORIQUE	67
3.2. INTERET	68
3.3. APPROCHE CHOISIE PAR RAPPORT AUX APPROCHES PRECEDENTES	69

CHAPITRE III : PROTOCOLE EXPERIMENTAL	71
1 - MESURE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE AU SOL	73
1.1. OBJECTIFS	73
1.1.1. Correction des données satellitaires	73
1.1.2. Calage des modèles d'estimation de l'évapotranspiration	73
1.2. DESCRIPTION	74
1.2.1. Sites de mesures	74
1.2.2. Matériel et méthode	75
1.3. CORRECTION DES DONNEES MESUREES AU SOL (Cas où $\epsilon = 0,96$)	76
1.3.1. Mesures directes du rayonnement atmosphérique	77
1.3.2. Résultats et discussion	77
1.4. PREMIERES CONCLUSIONS - INCERTITUDE SUR LA MESURE	79
2 - MESURES DE BILAN HYDRIQUE SUR LA CANNE A SUCRE	80
2.1. OBJECTIFS	80
2.2. DESCRIPTION	80
2.3. INCERTITUDE SUR LA MESURE	81

CHAPITRE IV : ESTIMATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE PAR SATELLITE	83
1 - IMAGES UTILISEES	86
2 - CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES	87
2.1. OBTENTION D'UNE EQUATION SPLIT-WINDOW DANS LA PLAINE DU GHARB	87
2.1.1. Obtention d'une équation split-window à partir des mesures au sol et des images NOAA	87
2.1.2. Obtention d'une équation split-window directement à partir des images NOAA	88
2.2. DISCUSSION : COMPARAISON AVEC LES EQUATIONS EXISTANTES	91
2.3. CONCLUSIONS	93
3 - CORRECTIONS D'EMISSIVITE	94
3.1. ESTIMATION DE LA DIFFERENCE ENTRE EMISSIVITES DANS LES CANAUX 4 ET 5 ($\epsilon_4 - \epsilon_5$) A PARTIR DES IMAGES NOAA	96
3.2. DISCUSSION	96
3.3. CONCLUSIONS	97
4 - CONCLUSION	98

CHAPITRE V : ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION ET SUIVI DU BILAN HYDRIQUE A PARTIR DE LA TEMPERATURE DE SURFACE	99
1 - CALAGE DU MODELE PHYSIQUE BILAN D'ENERGIE - BILAN HYDRIQUE	101
1.1. CALAGE DU MODELE SUR GAZON	102
1.2. CALAGE DU MODELE SUR CANNE A SUCRE	104
1.2.1. Méthode générale de calage	104
1.2.2. Conditions aux limites sur le flux dans le sol	104
1.2.3. Calage sur le bilan hydrique mesuré	109
1.2.4. Calage sur les températures de surfaces mesurées	110
2 - CALAGE ET VALIDATION DU MODELE SIMPLIFIE	115
2.1. ANALYSE STATISTIQUE	115
2.2. APPROCHE THEORIQUE	120
2.2.1. Analyse du terme A	120
2.2.2. Analyse du terme B	122
2.2.3. Extension de la relation simplifiée à l'ensemble de la période de mesures	124
2.3. CONCLUSIONS	127
3 - CONCLUSION	129

CHAPITRE VI : APPLICATION AU CONTROLE DE L'IRRIGATION	131
1 - DONNEES UTILISEES	134
1.1. DONNEES DE TERRAIN	134
1.1.1. Données agroclimatiques	134
1.1.1.1. Données permettant le calcul des paramètres du modèle simplifié	134
1.1.1.2. Données d'entrée du modèle simplifié	135
1.1.2. Estimation de l'évapotranspiration maximale ETM	135
1.2. DONNEES SATELLITAIRES	136
2 - TRAITEMENT DES DONNEES	137
2.1. CARTOGRAPHIE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE	137
2.2. CARTOGRAPHIE DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE ETR	138
3 - CONTROLE DE L'IRRIGATION	141
3.1. CONTRAINTES	141
3.2. CONSEQUENCES METHODOLOGIQUES	143
3.3. METHODE PROPOSEE	143
3.4. MISE EN OEUVRE A PARTIR DES DONNEES SATELLITAIRES	145
3.5. CONCLUSIONS	149
4 - CONCLUSION	150
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	155
BIBLIOGRAPHIE	161
TABLE DES FIGURES	171
TABLE DES TABLEAUX	175
TABLE DES SYMBOLES	176

PREFACE

La gestion des grands périmètres irrigués, qui représentent aujourd'hui environ 250 millions d'hectares irrigués, constitue un enjeu capital, à la fois pour l'économie de l'eau et la production agricole, en particulier dans les pays en développement. Cette gestion nécessite d'avoir une vision fréquente, globale et localisée des zones irriguées, que seule la télédétection spatiale est en mesure d'apporter.

La mise en commun, depuis 1985, des compétences et des efforts du Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb, et de l'Institut National Agronomique et Vétérinaire Hassan II, a permis de réaliser des progrès notables dans l'utilisation de la télédétection pour la gestion des grands périmètres irrigués.

La thèse d'Alain VIDAL, réalisée en collaboration avec l'Institut National de la Recherche Agronomique (France), constitue une contribution importante à ces progrès, et un exemple original de recherche débouchant sur une application opérationnelle au service du gestionnaire.

Nous remercions Benoît LESAFFRE, Chef du Département Hydraulique Agricole du CEMAGREF, et Alain PERRIER, Chef du Département Bioclimatologie et Télédétection de l'INRA (France), d'avoir bien voulu accepté de relire ce document, version modifiée de la thèse originale.

Othmane LAHLOU
Directeur de l'ORMVAG



M'Hamed SEDRATI
Directeur de l'IAV Hassan II
Le Directeur de l'Institut Agronomique
et Vétérinaire Hassan II



Yves LE BARS
Directeur Général du CEMAGREF



Signé | Dr. M'Hamed SEDRATI



REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Alain PERRIER, qui, il y a quatre ans, a accepté de diriger mes recherches, et qui a toujours été disponible, même durant mon séjour au Maroc, pour m'aider à mener à bien ce travail.

Je remercie également Bernard SEGUIN et Jean-Pierre LAGOUARDE, qui ont encadré mon Diplôme d'Etudes Approfondies, et m'ont inoculé le "virus" de l'infrarouge thermique, dont j'ai tenté de montrer par ce travail que toutes les ressources n'étaient pas épuisées.

Je tiens aussi à remercier Emmanuel CHOISNEL : c'est sur la base de son modèle EARTH que j'ai réalisé ma modélisation, et nous avons eu souvent l'occasion d'en discuter tout au long de ce travail. Merci aussi aux spécialistes de l'irrigation qui m'ont aidé à voir ce que la télédétection pouvait apporter d'opérationnel dans ce domaine : je pense en particulier à Robert HLAVEK, Léopold RIEUL et Jean-Robert TIERCELIN.

Ce travail est aussi un travail d'équipe, et je voudrais remercier tous ceux qui y ont participé, en donnant de leur temps et de leur énergie. Je pense ici à mes collègues de l'ORMVAG, MM. EL HAKMY, BEL BACHIR et BEN MOUMEN, qui m'ont aidé à réaliser les mesures de terrain, sans oublier Ahmed BAQRI, qui continue d'approfondir ces recherches et qui a accepté de me décharger du suivi du projet Gharb durant la phase finale de ce travail. Je pense aussi à Kamal BEL ABBES, et à mes collègues du CEMAGREF et de l'ENGREF : Hervé PIATON, Pierre MAUREL, Alex POLO, et particulièrement Jacques CHABAS, Albert OLIOSO et Christian PUECH qui ont accepté de relire ce document, et m'ont souvent éclairé de leurs conseils.

Je remercie, enfin, tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce document, ainsi que MM. BOCQUILLON, BECKER, FEDDES et LESAFFRE, qui ont accepté de faire partie du jury.

A Pascale,

Alexandrine et Céline

A mes parents

RESUME

Dans le cadre d'un projet de coopération franco-marocain, on cherche à cartographier l'évapotranspiration réelle de la canne à sucre à partir des données infra-rouge thermique du satellite NOAA-AVHRR. L'objectif en est le contrôle des irrigations de la canne à sucre dans le périmètre irrigué du Gharb (Maroc).

La température de surface d'un couvert peut être estimée par télédétection rapprochée ou satellitaire. On présente les méthodes d'estimation utilisées, qui incluent les corrections atmosphériques et les corrections d'émissivité. L'erreur sur la température de surface mesurée par satellite est de 3 K.

La formulation des bilans énergétique et hydrique d'un couvert développé permet de relier sa température de surface à son évapotranspiration réelle. Le modèle agrométéorologique utilisé dans ce but est calé sur des mesures de terrain de température de surface et de bilan hydrique. Il permet ensuite de proposer un modèle simplifié, dont les paramètres et les variables d'entrée peuvent être obtenus à partir de données agrométéorologiques facilement mesurables. On estime ainsi l'évapotranspiration journalière de la canne à sucre à 1 mm près.

On réalise ainsi des cartes d'évapotranspiration réelle, qui, rapportées à l'évapotranspiration maximale de la culture, mesurée sur parcelles de référence, permettent de contrôler les irrigations et de prévoir les baisses de rendement.

Mots-clés : télédétection, évapotranspiration, irrigation, température de surface, infra-rouge thermique, NOAA-AVHRR, atmosphère, canne à sucre

ABSTRACT

Within the framework of a co-operative project between France and Morocco, evapotranspiration of sugar cane is mapped using thermal infra-red data from NOAA-AVHRR satellite. The objective is to monitor irrigated sugar cane of the irrigation project of Gharb (Morocco).

The crop surface temperature may be estimated by ground or satellite remote sensing. The methods used, including atmospheric and emissivity corrections, are presented. The error on satellite remote sensed surface temperature is 3 K.

Derivation of energy and water balance of a developed crop results in a relation between its surface temperature and its evapotranspiration. The agrometeorological model used for this purpose is fitted to ground measurements of surface temperature and of water balance. It then leads to a simplified model, whose parameters and inputs may be obtained from agrometeorological data easy to measure. Daily evapotranspiration of sugar cane is estimated with an error of 1 mm.

Maps of evapotranspiration are carried out and then compared to the maximal evapotranspiration of the crop, measured on reference plots, which results in irrigation monitoring and yield loss forecasting.

Key-words : remote sensing, evapotranspiration, irrigation, surface temperature, thermal infra-red, NOAA-AVHRR, atmosphere, sugar cane .

QUESTION

1. The following table shows the number of people who visited the National Gallery in London in each year from 1990 to 2000. The number of people is given in thousands.

Year: 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000
Number of people (in thousands): 12.5, 13.2, 14.1, 15.0, 16.0, 17.0, 18.0, 19.0, 20.0, 21.0, 22.0

2. The following table shows the number of people who visited the British Museum in each year from 1990 to 2000. The number of people is given in thousands.

Year: 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000
Number of people (in thousands): 10.0, 10.5, 11.0, 11.5, 12.0, 12.5, 13.0, 13.5, 14.0, 14.5, 15.0

3. The following table shows the number of people who visited the Tate Gallery in each year from 1990 to 2000. The number of people is given in thousands.

Year: 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000
Number of people (in thousands): 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5, 12.0, 12.5, 13.0

4. The following table shows the number of people who visited the Victoria and Albert Museum in each year from 1990 to 2000. The number of people is given in thousands.

Year: 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000
Number of people (in thousands): 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5, 12.0

5. The following table shows the number of people who visited the Natural History Museum in each year from 1990 to 2000. The number of people is given in thousands.