

ESTIMATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE ET DE L'EMISSIVITE A PARTIR DES DONNEES SATELLITAIRES NOAA-AVHRR

Par HAMIMED Abderrahmane¹, LANSARI Abdeldjellil², MEDERBAL Khalladi¹,
BENHANIFIA Khatir² et LEUTREUCHI-BELAROUCCI Nouredine³

¹Laboratoire de Recherche sur les Systèmes Biologiques et la Géomatique, Centre universitaire de Mascara, B.P. 763, Mascara, 29000, Algérie, tél : +213 45 80 29 84, E-mail : hamimed@dr.com, kmederbal@hotmail.com.

²Laboratoire de Télédétection, Centre National des Techniques Spatiales, B.P. 13, Arzew, 31200, Oran, Algérie, tél. : +213 4147 22 17, E-mail : lansaria@cmts.dz, khatir@dr.com.

³Université de Tlemcen.

ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو استعمال تقنيات الاستشعار عن بعد المتمثلة في معطيات القمر الصناعي "نوا" وذلك لقياس درجة حرارة السطح بطريقة خطية دقيقة، مصححة من تأثير الظواهر الفيزيائية المشوشة الخاصة بغلاف الجوي و سطح الأرض، و جد ملائمة للظروف المناخية الشبه الجافة

Résumé :

Le but de cette étude est l'utilisation des techniques de télédétection qui sont les données du satellite "NOAA" pour l'estimation de la température de surface par une méthode linéaire précise, corrigée de l'effet des phénomènes physiques brouillés de la couche atmosphériques et de la surface de la terre. Cette approche est très appropriée aux conditions climatiques semi- arides.

Mot clés: NOAA-AVHRR, température de surface, émissivité, split-window.

Abstract :

This study aims at the use of the technique of télédétection which are data of "NOAA" satellite for the estimation of land surface temperature with a precise, linear method corrected from the effect of blurred physical phenomena of the atmospheric cover and the surface and too appropriate for Algerian semi-arid climatic condition.

I- Introduction:

La température est un paramètre essentiel pour décrire l'état hydrique et énergétique des écosystèmes terrestres. De par sa capacité à observer l'ensemble du globe, la télédétection infrarouge thermique s'avère être un outil potentiellement intéressant pour estimer, de manière régulière et à différentes échelles spatiales, la température des surfaces terrestres. Cependant, la température calculée à partir des données satellitaires n'est pas reliée de façon directe à la température de surface utilisée pour évaluer les différents termes du bilan d'énergie. En effet, en dehors de l'influence de l'atmosphère, la mesure radiométrique infrarouge, appelée température de brillance, est une quantité très complexe dépendant à la fois des propriétés physiques et thermodynamiques de la surface et de la configuration du système d'acquisition. L'extraction des températures à partir des données de télédétection nécessite des modèles complexes qui permettent d'établir le lien entre la mesure et l'ensemble des paramètres physiques qui l'expliquent (Becker et al., 1995). Une telle mesure obtenue à partir d'un seul canal ne peut être corrigée des effets atmosphériques et, par conséquent, elle est moins précise que celle obtenue par deux canaux. Plusieurs capteurs satellitaires possèdent deux bandes spectrales dans l'infrarouge thermique dont la combinaison par la méthode « split window » permet d'accéder à la température radiative, affranchie d'une partie des effets atmosphériques (Becker et al., 1990), qui est ensuite corrigée des effets de l'émissivité pour déduire la température de surface réelle. Notre travail a pour objectif l'utilisation des données NOAA-AVHRR pour estimer la température radiative de surface par calage d'un modèle *split-window* adapté aux conditions locales, ensuite de développer une méthodologie pour corriger cette température des effets de l'émissivité.

II- Bases théoriques de l'estimation de la température de surface et de l'émissivité

Le capteur AVHRR de NOAA mesure une luminance spectrale qui est reliée à la température de surface par la loi de Planck.

$$L_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT} - 1\right)} \quad (1)$$

Avec L_{λ} est la luminance spectrale propre de la surface, λ est la longueur d'onde, h est la constante de Planck, c est la vitesse de la lumière, k est la constante de Boltzmann et T est la température absolue du corps noir.

La luminance reçue au niveau du capteur dépend à la fois de l'émission propre de la surface (qui se distingue de celle d'un corps noir par son émissivité) et de celle de l'atmosphère.

$$L_{\lambda} = \tau_{\lambda} [\varepsilon B_{\lambda}(Ts) + (1-\varepsilon)L_{a\lambda} \downarrow] + L_{a\lambda} \uparrow \quad (2)$$

Avec $L_{a\lambda} \downarrow$ est la luminance spectrale propre de l'atmosphère reçue par la surface, $L_{a\lambda} \uparrow$ est la luminance spectrale propre de l'atmosphère reçue par le capteur, $\varepsilon B_{\lambda}(Ts)$ est la luminance de la surface, ε est l'émissivité spectrale de la surface et τ est le coefficient de transmission atmosphérique.

Pour accéder à la température de surface réelle, il est donc nécessaire de connaître l'émissivité de la surface et le rayonnement atmosphérique. L'émissivité varie suivant le type de la surface, l'humidité, l'angle de visée, les bandes spectrales, etc. Sa mesure ne se fait que très localement (Stoll, 1988).

Un autre problème pour l'utilisation des données satellitaires est celui des perturbations par l'atmosphère. Dans la bande infrarouge thermique, les effets atmosphériques sont estimés par des modèles de transfert radiatif qui sont difficilement envisageables en routine (Courault et al., 1994). Il existe une autre méthode, dite de *split-window*, qui permet d'éliminer une partie des effets atmosphériques lorsque l'on dispose de deux canaux thermiques comme c'est le cas pour le satellite NOAA.

La température radiative de surface (T_{CN}) est alors calculée à partir d'une combinaison linéaire des températures dans les deux bandes spectrales du satellite (C4 : 10.3-11.3 μm et C5 : 11.5-12.5 μm).

$$T_{CN} = a_0 + a_1 T_4 + a_2 T_5 \quad (3)$$

avec T_4 et T_5 sont les températures du corps noir dans les canaux 4 et 5 de NOAA-AVHRR et a_0 , a_1 , a_2 sont des coefficients. Une analyse bibliographique fait ressortir deux algorithmes *split-window* obtenus par utilisation des modèles de transfert radiatif :

$$T_{CN} = T_4 + 2.6(T_4 - T_5) - 2.2 \quad (\text{Deshamps et al., 1980}) \quad (4)$$

$$T_{CN} = T_4 + 2.68(T_4 - T_5) - 0.5 \quad (\text{Li et al., 1988}) \quad (5)$$

Généralement, ces équations ont été calées sur la surface de la mer, c'est-à-dire avec des températures plus faibles, et ne sont pas forcément transposables aux surfaces continentales. En se basant sur l'analyse de l'image des différences $T_4 - T_5$, évaluant les effets différentiels de l'atmosphère dans les canaux 4 et 5 de NOAA, Price (1984) et Vidal (1990) ont proposé les équations :

$$T_{CN} = T_4 + 3.03(T_4 - T_5) \quad (\text{Price, 1984}) \quad (6)$$

$$T_{CN} = T_4 + 2.78(T_4 - T_5) \quad (\text{Vidal, 1990}) \quad (7)$$

Ces deux algorithmes sont évidemment plus adaptés aux conditions locales, puisqu'ils sont développés à partir des données réellement acquises (Vidal, 1990).

Bien que les équations de *split-window* permettent d'évaluer une température du corps noir (T_{CN}) affranchie des effets de l'atmosphère, une correction de cette température des effets de l'émissivité de surface conduit à une estimation de la température de surface réelle.

Becker (1987), en se basant sur le fait que les émissivités dans les canaux 4 et 5 de NOAA-AVHRR, notées respectivement ε_4 et ε_5 , étaient différentes (Salisbury, 1986) et en comparant les températures de surfaces obtenues par la méthode de *split-window* avec et sans tenir compte de l'émissivité, et pour une large gamme de températures de surface, a montré que :

$$T_s - T_{CN} = 50 \frac{1 - \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}} - 300 \frac{\varepsilon_4 - \varepsilon_5}{\bar{\varepsilon}} \quad (8)$$

avec T_s est la température de surface réelle, $\bar{\varepsilon}$ est l'émissivité moyenne dans les canaux 4 et 5 de NOAA-AVHRR et ε_4 et ε_5 sont les émissivités dans les canaux 4 et 5 de NOAA-AVHRR.

III- Matériel utilisé

III-1- Contexte physique de l'étude

La zone d'étude est une région agricole correspondant à la plaine de la Macta. Elle couvre une superficie de 900 km^2 environ, essentiellement occupée par une végétation spontanée halophyte dominée par l'atriplex et des cultures irriguées (maraîchage et arboriculture fruitière) sur un sol argileux riche en sels minéraux. Cette zone est située dans l'ouest algérien entre les coordonnées $0^\circ 16' \text{ W}$ et $0^\circ 13' \text{ E}$ et $35^\circ 30' \text{ N}$ et $35^\circ 47' \text{ N}$ (figure 1).

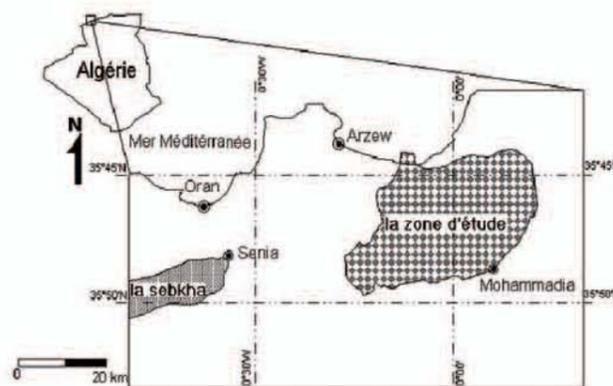


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude

Le climat est de type méditerranéen caractérisé par un régime pluviométrique très variable avec des occurrences de sécheresse estivale d'où le recours à l'irrigation de complément des cultures pendant les périodes marquées par un déficit hydrique.

III-2- Données utilisées

Le jeu de données est constitué de trois scènes de NOAA-14, datant du 13, du 14 et du 15, juillet 2000 et des variables météorologiques collectées au niveau des stations Senia, Arzew et port d'Oran et correspondant aux instants d'acquisition des images : la température de l'air, la température de point de rosée et la température psychrométrique, la tension de vapeur, la pression au niveau de la mer et la vitesse du vent.

Pour les rendre superposables, les images satellitaires ont été corrigées géométriquement par un polynôme premier degré à partir de 5 points de calage.

IV- Modélisation de la température de surface et de l'émissivité

Les données brutes de NOAA 14, codées en comptes numériques CN allant de 0 à 1023, sont transformées en radiance selon la formule :

$$L = a \text{ CN} + b \quad (9)$$

avec v est la radiance reçue par le capteur ($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$) et a et b sont des coefficients de calibration donnés en en-tête du fichier image.

Cette radiance est convertie ensuite en température du corps noir équivalent (T) dans les canaux 4 et 5, notées respectivement T_4 et T_5 , par l'équation :

$$T = \frac{C_2 v}{\log \left[1 + \frac{C_1 v^3}{L} \right]} \quad (10)$$

avec v est le nombre d'onde central du canal considéré (cm^{-1}) ; pour $275 \leq T \leq 320 \text{ K}$, on a, respectivement pour les canaux 4 et 5 de NOAA 14, $v = 929.3323 \text{ cm}^{-1}$ et $v = 835.1647 \text{ cm}^{-1}$, $C_1 = 1.191 \times 10^5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}^4$ et $C_2 = 1.4388 \text{ cm} \cdot \text{K}$.

Les températures radiatives T_4 et T_5 sont corrigées des effets de l'atmosphère. La méthode la plus courante de la correction atmosphérique consiste à combiner ces deux températures selon la technique de *split-window*, qui donne une température de surface du corps noir équivalent affranchie des effets atmosphériques. Il est possible, en conditions locales, d'obtenir des équations *split-window*, soit par calage des données satellitaires sur des mesures de températures de surface au sol, soit par utilisation directe des données satellitaires elles-mêmes.

IV-1- Obtention d'une équation split-window à partir des mesures au sol et des images NOAA

Cette méthode repose sur la confrontation des données de température radiative mesurées au sol à l'instant de passage du satellite aux températures radiatives T_4 et T_5 de NOAA 14. Pour notre cas, ces mesures au sol ne sont pas disponibles. Or, la méthode de Penman (1948), qui utilise les données du réseau météorologique, permet d'estimer les températures de surface d'équilibre résultantes du bilan énergétique sur une surface d'eau libre (n'opposant aucun frein à l'évaporation). Trois sites (1, 2 et 3) ont été choisis pour estimer les températures de surface les jours d'acquisition des images NOAA qui correspondent à des surfaces d'eau libre (la sebkha, les surfaces de la mer adjacentes au port d'Oran et d'Arzew). Ensuite, par le biais de l'émissivité, ces températures peuvent être converties en températures radiatives de surface (T_{CN}) (Hamimed, 2001). Enfin, l'équation *split-window* est établie par régression linéaire multiple entre T_{CN} , T_4 et T_5 (tableau 1) de la forme :

$$T_{CN} = 0.89T_4 + 1.1(T_4 - T_5) - 5.88 \quad (n=9 \text{ et } r^2=0.95) \quad (11)$$

Par application du test du signe aux résidus de la régression linéaire multiple, on obtient une erreur type d'estimation de 1.5 K.

Date	Site de mesure	Données NOAA		T_{CN} estimée au sol (Penman) (K)
		T_4 (K)	T_5 (K)	
13 juillet 2000	1	301	299	317
	2	296	294	304
	3	297	295	303
14 juillet 2000	1	308	306	315
	2	302	301	307
	3	300	298	306
15 juillet 2000	1	309	307	313
	2	297	296	301
	3	298	297	302

Tableau 1 : Données utilisées pour établir l'équation *split-window*

IV-2- Obtention d'une équation split-window directement à partir des images NOAA

L'analyse de l'image NOAA du 14 juillet 2000 montre une forte variation de la différence ($T_4 - T_5$) qu'on peut attribuer à un fort gradient d'humidité atmosphérique. La méthode consiste à chercher des transects où T_{CN} et ε sont quasiment constantes (même occupation du sol, par exemple), et où les différences $T_4 - T_5$ seront a priori seulement dues aux effets atmosphériques. Pour notre expérimentation, 12 pixels de l'image NOAA du 14 juillet 2000 couvrant un couvert uniforme d'atriplex (développé sur des sols salés dans la plaine de la Macta) ont été choisis.

Price (1984) a montré que $T_i - T_{CN}$ ($i=4$ ou 5) peut s'écrire comme le produit d'une fonction de la quantité de gaz absorbant dans l'atmosphère U_T (indépendante de la longueur d'onde) et une fonction de longueur d'onde $C(\lambda_i)$ ($i=4, 5$), soit :

$$T_i - T_{CN} = -C(\lambda_i).U_T \quad (8)$$

On introduit alors, pour éliminer U_T , le terme R , tel que :

$$R = \frac{C(\lambda_5)}{C(\lambda_4)} = \frac{T_5 - T_{CN}}{T_4 - T_{CN}} \quad (12)$$

Bien que T_{CN} soit supposée constante (Price, 1984), on calcule une valeur moyenne qui vérifie donc :

$$T_5 = R.T_4 + (1 - R)T_{CN} \quad (13)$$

On obtient, par régression linéaire simple entre T_4 et T_5 , une valeur de R égale à 1.34 avec un coefficient de détermination $r^2 = 0.98$ et par conséquent, une équation de *split-window* de la forme :

$$T_{CN} = T_4 + 2.94(T_4 - T_5) \quad (14)$$

IV-3- Correction des effets de l'émissivité

Pour calculer la température radiative de surface, nous avons supposé que la différence $T_4 - T_5$ est seulement due aux effets atmosphériques. Mais, en règle générale, cette différence est due également aux différences d'émissivités (Vidal, 1990).

L'émissivité dans la bande i peut s'écrire sous la forme :

$$\varepsilon_i = \frac{L_i(T_i) - L \downarrow_i}{L_i(T_s) - L \downarrow_i} \quad (15)$$

avec i est l'indice du canal utilisé de NOAA (4 ou 5), L_i est la radiance de la surface et $L \downarrow_i$ est la luminance atmosphérique reçue par la surface.

$L \downarrow_4 + L \downarrow_5$ peut être estimé à partir de la formule d'Idso (1981), limitée sur la gamme $10.5 - 12.5 \mu\text{m}$, qui correspond approximativement aux canaux 4 et 5 de NOAA-AVHRR.

$$L \downarrow_4 + L \downarrow_5 = (0.10 + 3.53 \times 10^{-8} e_a^2 e^{3000/T_a}) \sigma T^4 \quad (16)$$

avec e_a est la tension de la vapeur d'eau dans l'air et T_a est la température de l'air à 2 m (K).

Par l'intégration graphique de la courbe du spectre d'émission de l'atmosphère, Vidal (1990) a proposé une approche pour la répartition de $L \downarrow_4$ et $L \downarrow_5$ entre les canaux 4 et 5 de NOAA, soit :

$$L \downarrow_4 = 0.55(L \downarrow_4 + L \downarrow_5)$$

$$L \downarrow_5 = 0.45(L \downarrow_4 + L \downarrow_5)$$

Dans notre zone d'étude et pour la journée du 14 juillet 2000 à 16h02 GMT, nous avons $L \downarrow_4 = 7.27 \text{ (mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{cm)}$ et $L \downarrow_5 = 8.88 \text{ (mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{cm)}$.

D'autre part, L_i peut être estimé, à l'échelle du pixel, par inversion de l'équation (6).

On peut ensuite calculer $\varepsilon_4 - \varepsilon_5$ et $\bar{\varepsilon}$ d'une manière itérative. Au premier passage, on suppose $\varepsilon_4 - \varepsilon_5 = 0$ et on estime $\bar{\varepsilon}$ en fonction de l'indice de végétation (NDVI) par le formule empirique (Cilhar *et al.*, 1997) :

$$\bar{\varepsilon} = 0.9846 + 0.0239 \log(\text{NDVI}) \quad (17)$$

On calcule la température de surface (T_s) à partir de l'équation (4), puis $\varepsilon_4 - \varepsilon_5$ et ε à partir de l'équation (11). L'algorithme converge vers la valeur $\varepsilon_4 - \varepsilon_5 \approx -0.011$ (Becker et al, 1990). Enfin, la température de surface obtenue en sortie du modèle itératif permet de déduire l'émissivité spectrale de la surface (ε) à l'échelle du pixel par l'expression de Stefan-Boltzmann :

$$\varepsilon = \frac{T_{CN}^4}{T_s^4} \quad (18)$$

V- Résultats et discussion:

Notre objectif était d'établir une équation split-window adaptée au site d'étude. Pour cela, nous avons réalisé à partir des données NOAA, suivant deux méthodes différentes, deux équations *split-window* (équations 11 et 14) qui sont proches aux équations 6 et 7 obtenues sur des surfaces agricoles par Price (1984) au Texas et par Vidal (1990) sur le périmètre du Gharb au Maroc. Sur la figure 2, on compare les équations 11 et 14 avec celles proposées par Deschamps et al. (1980), Price (1984) et Vidal (1990) (équations 4, 6 et 7). L'équation 7 a été prise comme référence, car elle a été établie sur une surface agricole sous des conditions similaires aux nôtres. Il apparaît que l'équation 11 donne des résultats très satisfaisants et les valeurs obtenues ne diffèrent pas de celles prise comme référence. En revanche, l'équation (4), en dépit de son utilisation fréquente, entraîne une sous estimation moyenne de 2.6 K.

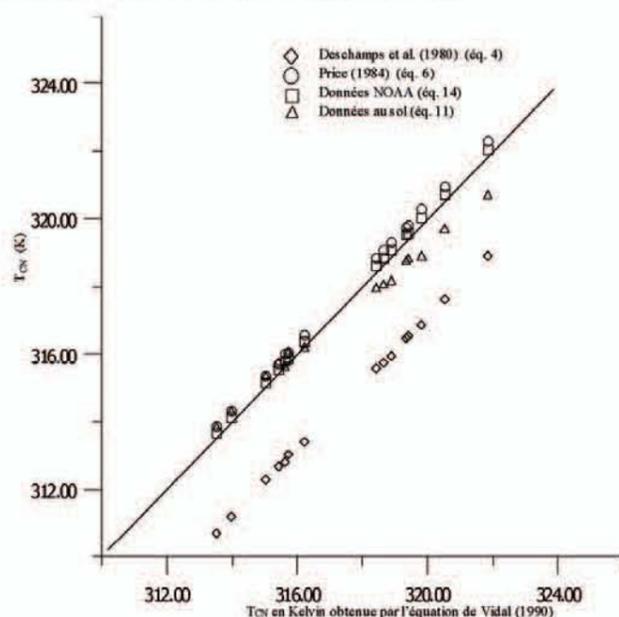


Figure 2: Comparaison des différentes équations split-window obtenues avec celles de Price (1984), Deschamps et al. (1980) et Vidal (1990)

L'émissivité de la surface dans les canaux 4 et 5 de NOAA-AVHRR peut donc être estimée à partir des données NOAA dans l'infrarouge thermique où les effets atmosphériques différentiels entre ces deux canaux sont négligeables, à condition d'estimer une valeur initiale moyenne à l'échelle du pixels.

Il est intéressant de signaler que le modèle d'estimation de l'émissivité ainsi déduit est à considérer avec précaution, car il n'existe pas de méthode de validation à des échelles de temps et d'espaces aussi larges. En fait, l'image de la température de surface obtenue a mis en évidence les observations suivantes (figure 3) :

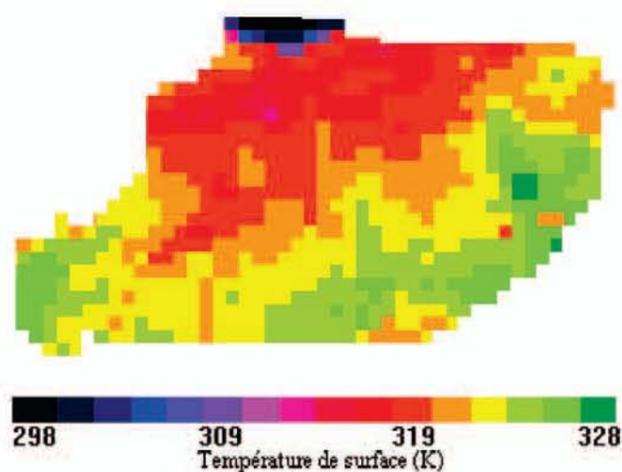


Figure 3: Image de température de surface dans la plaine de la Macta du 14 juillet 2000

- Les secteurs où les sols nus sont dominants, présentent des températures de surface supérieures à celles de secteurs où la couverture végétale est dense ainsi que les surfaces humides;
- La proximité des côtes est caractérisée par une température moyenne de surface relativement faible qui est due aux vents et à l'humidité de l'air qui sont forts et ont pour effet d'abaisser les écarts entre les températures de surface et les températures de l'air.

VI- Conclusion:

Les résultats présentés dans cette étude confirment les possibilités offertes par les données NOAA pour l'estimation fine de la température de surface et de l'émissivité.

Le modèle utilisé pour l'estimation de telles mesures apparaît donc finalement assez indiqué pour une réelle exploitation des données de satellite NOAA-AVHRR. La seule limitation est l'aspect spatial.

En perspective, nous envisageons à analyser la relation entre la température de surface avec l'albédo et l'indice de végétation afin de modéliser les échanges turbulents entre la surface et l'atmosphère.

VII- Remerciement:

Les auteurs remercient l'Office National Météorologique d'Oran pour leur avoir mis à leur disposition les données climatiques.

VIII- Références Bibliographiques:

- [1] **Becker, F. and Li, Z.L. (1995)** Surface temperature and emissivity at various scales : definition, measurement and related problems, *Remote Sensing Review*, Vol. 12, pp. 225-253.
- [2] **Becker, F. (1987)** The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperatures from a satellite, *Int. J. Remote Sens.* Vol. 8 no. 10, pp. 1509-1522.
- [3] **Becker, F. and Li, Z.L. (1990)** Towards a local split window method over land surface, *Int. J. of Rem. Sens.*, Vol. 11, pp. 369-393.
- [4] **Cihlar, J., Li, Z.L., Chen, J., Pokrant, H. and Hung, F., (1997)** Multi-temporal, Multi-channel AVHRR data sets for land biosphere studies-Artifacts and corrections, *Remote Sensing and Environment*, Vol. 60, pp. 35-57.
- [5] **Courault, D., Clastre, P., Guinot, J.P. et Seguin, B. (1994)** Analyse des sécheresses de 1988 à 1990 en France à partir de l'analyse combinée de données satellitaires NOAA-AVHRR et d'un modèle agrométéorologique, *Agronomie*, Vol. 14, pp. 41-46.
- [6] **Deschamps, P.Y. and Phulpin, T. (1980)** Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3, 7, 11 and 12 μ m, *Boundary Layer Meteor.* Vol. 18, pp. 131-143.
- [7] **Hamimed, A., Mederbal, K. et Khaldi, A. (2001)** Utilisation des données satellitaires TM de Landsat pour le suivi de l'état hydrique d'un couvert végétal dans les conditions semi-arides en Algérie, *Téledétection*, Vol. 2, no. 1, pp. 29-38.
- [8] **Idso, S.B. (1981)** A set of equations for full spectrum and 8-to 14- μ m and 10.5- to 12.5- μ m thermal radiation from cloudless skies, *Water Resources Research*, Vol. 17, no.2, pp. 295-304.
- [9] **Li, Z.L. and McDonnel, M. J. (1988)** Atmospheric correction of thermal infrared image, *Int. J. of Rem. Sens.*, Vol. 9 no. 1, pp. 107-121.
- [10] **Penman, H. L. (1948)** Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 194, pp. 120-145.
- [11] **Price, J.C. (1984)** Land Surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA-7/AVHRR, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, pp. 7231-7237.
- [12] **Salisbury, J. W. (1986)** Preliminary measurements of leaf spectral reflectance in the 8-14 μ m region, *Int. J. Remote sensing*, Vol. 7, no. 12, pp. 1879-1886.
- [13] **Stoll M. (1988)** Mesures de la température et de l'émissivité de surface par télédétection : Modèles et méthodes, *Télédétection Spatiale : Aspects physiques et modélisation*, CNES, Ecole d'été, pp. 845-904.
- [14] **Vidal, A. (1990)** Estimation de l'évapotranspiration par télédétection : Application au contrôle de l'irrigation, *Etude du Centre national du machinisme agricole du génie rural des eaux et des forêts, Montpellier, Série Hydraulique Agricole*, vol. 8, 180 p.
-