

L'APPORT DES DONNÉES SATELITAIRES THERMIQUES DE NUIT À L'ÉTUDE DE LA POLLUTION AQUATIQUE DE L'OUED SEBBOU (MAROC)

Sébastien Gadai, Simona Niculescu

Mots clés : image thermique prise de nuit, cartographie de la distribution spatiale des températures radiatives en termes d'émissivité en milieu aquatique, explications géographiques, argumentations physiques et chimiques pour établissement des causes de la forte émissivité thermique aquatique de l'oued Sebhou.

REZUMAT

Imaginile termice de noapte pot constitui o sursa de informare spatiala ce contribuie la detectarea, identificarea si la localizarea zonelor acvatice poluate? Aceasta este problematica care se impune atunci cand emisivitatea termica a unui curs de apa, cum ar fi cel al *oued-ului Sebhou* din Maroc, se confunda cu portiunile poluate.

ABSTRACT

Thermal images taken of night constitute a spatial information source of which is brings to detect, to identify and to localise the polluted river zones? It is the question which settles when the peaks of thermal emissivity of oued *Sebhou* river in Morocco become confused with the polluted zones.

Introduction

La plupart des régions urbaines du monde sont touchées par les pollutions d'origines diverses. Elles sont le plus souvent des pollutions d'origines sonores, atmosphériques ou aquatiques. Leur identification, leur mesure et leur cartographie sont dans la plupart des cas aléatoires. La grande majorité des aires urbaines du monde sont mal ou pas équipés en stations de mesures au sol, fautes de volonté politique ou de moyen financier. Dans certaines aires métropolisées à l'instar de Paris, on estime à 25% le nombre de stations de mesures qui sont réellement aptes à donner une estimation réelle de la pollution à l'ozone (Ionescu, 1998). L'emploi des images satellitales infrarouges thermiques (IRT) pour détecter, mesurer et cartographier les zones de pollutions constitue une alternative à faibles coûts. Les images satellites forment une source d'information spatiale supplémentaire qui s'ajoute au réseau de mesure au sol.

Son utilisation en France s'est surtout focalisée sur l'identification des nappes de polluants aérosols comme l'ozone (O_3) ou le monoxyde de carbone (CO_2) et leur répartition spatiale (Bilgen, Gilg, Geroyannis, 1994). Ces recherches tendent à confirmer l'intérêt de cette source d'information pour la cartographie des sources de pollution, la mesure des concentrations des aérosols dans l'atmosphère et leur dynamique d'évolution spatio-temporelle. Cependant, l'utilisation des données IRT dans les études d'impacts de la pollution sur le milieu aquatique reste rare. Elle peut avoir, en conjugaison avec les résultats de divers prélèvements chimiques, une contribution importante pour la cartographie du degré de pollution de l'oued *Sebbou* qui traverse Kénitra, le centre urbain nord de la région métropolitaine Kénitra-Rabat-Casablanca au Maroc. L'étude de la distribution spatiale des températures radiatives au sol, notamment aux surfaces aquatiques, en étroite corrélation avec les résultats de toute une série de prélèvements chimiques de l'eau de cet oued tend à montrer un fort taux de pollution de l'oued *Sebbou* aux métaux lourds ainsi qu'aux rejets industriels des manufactures de textiles, des tanneries et des poteries qui se trouvent dans la région de Fès en amont de Kénitra.

Les données infrarouges thermiques

L'utilisation des données IRT à travers les mesures de l'émissivité thermique ou de la température radiative au sol ont fait l'objet d'importants travaux de recherches dans des domaines d'applications variés : répartition du voile de pollution aérosol (Bilgen, Gilg, Geroyannis, 1994), géologie (Stohr, Darmody, 1994), estimation de la densité de la population (Gadal, 2000). Elles constituent en ce sens une excellente source d'information environnementale et démographique.

L'image utilisée est une donnée LANDSAT 5 TM (canal 6 IRT) prise de nuit pendant la haute marée, le 10 juillet 1995 et qui a une résolution spatiale de 120×120 mètres. Elle couvre une bande spectrale allant de 10.4 à $12.5 \mu m$. La prise de vue de la scène satellitale durant la période crépusculaire, c'est-à-dire dans la phase orbitale ascendante du satellite, répond à trois exigences :

La première exigence est d'avoir une image prise lorsque les voiles de pollution aérosol et les effets de serres sont réduits au minimum. Ce qui est souvent le cas pour les aires métropolisées durant la période nocturne. L'effet de serre et les pollutions aérosols ont tendances à "voiler" l'émissivité IRT des objets au sol.

La différence de température radiative entre les objets qui ont une inertie thermique⁸ faible et les objets qui ont une inertie thermique élevée permet de mieux discriminer les objets géographiques comme les centres urbains grâce à leur activité nocturne ou la pollution touchant les zones aquatiques.

L'inertie thermique dépend d'une série de paramètres : la conductivité thermique - K (la quantité de chaleur qui peut traverser un volume défini de matière), la capacité thermique ou chaleur spécifique - C (la capacité d'un matériau d'emmagasiner de la chaleur) et la densité globale - δ (elle tient compte de la porosité du matériel, du volume global et du poids spécifique). Dans notre cas, a une température de $20^\circ C$ pour l'eau, on a calculé les suivantes valeurs pour ces paramètres : $K = 0.0013$, $C = 1.01$ et l'inertie thermique $P = 0.037$.

L'obstruction visuelle des objets au sol par les entrées de masses d'airs maritimes est limitée la nuit. Le centre urbain de Kénitra est soumis à un climat méditerranéen de type californien (Viers, 1993). Il est marqué l'été par d'intenses périodes de brouillards diurnes. Ils ont une influence considérable sur la mesure de l'émissivité IRT des objets car la nappe de brouillard s'interpose entre la surface du sol et le capteur du satellite et détermine des zones froides sans aucun rapport avec la température des objets au sol en sachant que la vapeur d'eau est le principal élément qui perturbe le signal et influence la mesure de la radiance des objets au sol. C'est pourquoi, il est recommandé de travailler pour cette région sur des images de nuit prises avant la formation du brouillard, d'où l'importance de l'heure de prise des images.

Méthode d'analyse

La méthode d'analyse de la pollution de l'oued *Sebbou* s'est fait en trois temps :

La première phase consiste, à partir des méthodes de traitement du signal et de traitement d'image, de reconnaître les zones touchées par la pollution. Elle fait appel au modèle de corrections atmosphériques de França et Cracknell pour réduire les perturbations induites sur le signal électromagnétique par la vapeur d'eau. On transforme ensuite l'émissivité thermique des objets au sol⁹ en température de brillance¹⁰. Les températures radiatives des objets¹¹ sont ensuite étalonnées par rapport à la seule donnée de référence disponible : la température de la surface de l'Océan Atlantique à ce moment ($20-21^\circ C$). Elle possède la qualité d'être stable du point de vue thermique, sa variabilité spatiale et temporelle sur la journée est faible. Ainsi, on obtient une spatio-carte des températures des objets au sol (Land Surface Temperature ou LST). Les différents objets (la ville et d'autres catégories d'occupation et d'utilisation du sol qui ont les mêmes températures radiatives au sol) sont ensuite masqués pour ne faire apparaître que l'oued.

L'intégration des gradients de température de l'oued *Sebbou* obtenus avec l'image IRT avec les prélèvements chimiques fait à la même période sur place.

L'intégration du marnage, de la topographie¹² et des sources de polluants dans l'explication de la répartition des émissions de flux thermique de l'oued *Sebbou*.

⁹ L'émissivité se définit comme l'énergie émise par le corps sous forme de radiations électromagnétiques étant dépendante d'un facteur qui leur est propre et qui en général est inférieur à l'unité. L'eau pure a, par exemple, une émissivité de 0.993.

¹⁰ On mesure la luminance correspondant à l'émission d'énergie thermique.

¹¹ On calcule la température radiative au sol selon la formule : $T = [k_1 / \log(k_2/L_v + 1)] - 273$, où $k_1 = 1260.56$ et $k_2 = 60.776$ et représentent les constantes spécifiques de calibration du capteur TMS, $L_v = ax - b$, où $x =$ digital number et $a = 0.0056321$, $b = 0.1238$ (constantes pour le calcul de la luminance vraie). La précision est de 1 degré centigrade.

¹² Le dénivelé du lit mineur de l'oued est de 3m sur 10000m et sa pente moyenne sur un transect de E - W est de 0.03%.

Interprétation du gradient de température de l'oued *Sebbou*

La spatio-carte des répartitions des températures radiatives de l'oued *Sebbou* montrerait-elle la répartition des concentrations de la pollution de l'oued traversant la ville de Kénitra ? L'intensité de la pollution aquatique détectée à partir de l'image de télédétection correspond-elle à des émissivités de flux thermiques qui sont in normalement élevées pour un cours d'eau¹³ (On remarquera que ces émissivités thermiques on des gradients de températures qui sont plus élevées que ceux observés sur la ville de Kénitra¹⁴) ?

Trois interprétations peuvent être formulées quant aux fortes émissions de flux thermiques détectés sur l'oued *Sebbou* et à leur répartition spatiale.

Ces fortes températures radiatives peuvent s'expliquer premièrement d'un point de vu géographique. La première interprétation, la plus logique d'un point de vue physique, résulte de la conjonction de considérations topographique, climatique et géomorphologique. Le faible débit de l'oued associé en cette saison à un faible tirant d'eau, ainsi que la pente moyenne réduite d'écoulement et la géomorphologie particulière du cours de l'oued à plusieurs méandres déterminent les prémices de réchauffement des eaux de l'oued auxquelles il faut ajouter le fort rayonnement solaire auquel le cours d'eau est soumis pendant le jour. Le mois de juillet, date de la prise de vue de l'image est dans la période où l'on observe les plus forts taux d'ensoleillement au Maroc (19.1 - 21.2 w/m² - taux radiatifs nets du mois de juillet).

Un autre aspect géographique qui contribue à l'explication de l'état de lieux présenté par notre spatio-carte est la remontée à marée haute des eaux marines de l'Atlantique qui sont beaucoup plus froide par rapport aux eaux de l'oued, qui finalement explique le fort contraste de température observé à l'embouchure de l'oued (les eaux de l'oued étant beaucoup plus chaudes).

La deuxième hypothèse qui concoure à l'explication de l'existence des températures radiatives nocturnes élevées de l'eau de cet oued est la présence dans l'oued de corps (particules) qui ont une forte émissivité¹⁵. L'analyse par prélèvement de ses corps montre leur provenance et donc leur nature chimique qui correspondent au déversement de rejets industriels des manufactures de textiles, des tanneries des poteries et des métaux lourds qui se trouvent dans la région de Fès en amont de Kénitra.

Si l'on suit cette hypothèse, on peut dire que les fortes concentrations de polluants se localisent en amont du méandre qui traverse la ville de Kénitra et les plus faibles sont observées à l'embouchure de l'oued *Sebbou* avec l'Océan Atlantique. La différence de concentration de polluant entre l'amont et l'aval du méandre s'explique d'une part, par le marnage et l'heure de prise de vue de l'image et d'autre part, par la

¹³ On notera que des études sur la qualité de l'environnement des espaces aquatiques et marécageux utilisent même procédé pour détecter les aires aquatiques polluées.

¹⁴ Elles correspondent aux émissivités thermiques des matériaux de constructions des bâtiments : béton, briques, tuiles. Les cours d'eau ont, en l'absence de corps polluant, une thermicité moins importante que les bords construits.

¹⁵ Si l'eau est considérée comme cible d'étude, il est important de tenir compte des autres composantes qui la caractérisent. En effet, la réflectance de l'eau se décompose en réflectance intrinsèque de l'eau - réflectance chimique qui dépend de la chlorophylle (O'Neill et Miller, 1988), de la turbidité, de la réflectance de surface des corps polluants de l'eau.

morphologie du méandre (bien alambiquée avec plusieurs boucles) et la topographie du site (pente moyenne d'écoulement très réduite). L'heure de prise de vue de l'image en infrarouge thermique correspond à la marée haute, donc à la fin de la période de remontée des eaux marines dans l'embouchure de l'oued *Sebbou* ainsi que les eaux marines plus froides et moins polluées se mélangent avec les eaux de l'oued *Sebbou* modifiant la concentration des polluants drainés par les eaux de l'oued. Elle se traduit par une modification, réduction de l'émissivité thermique sur la zone de mélange des eaux marines et fluviales.

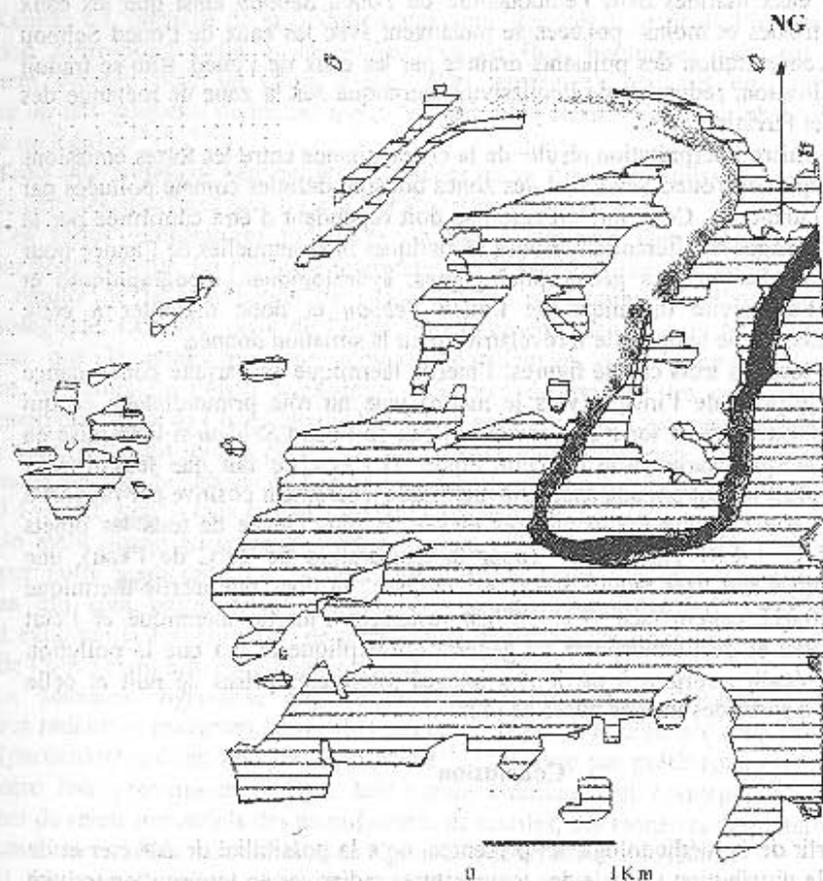
La dernière interprétation résulte de la concomitance entre les fortes émissions de flux thermiques de l'oued *Sebbou* et des zones qui sont définies comme polluées par prélèvements chimiques. Cette interprétation se doit cependant d'être confirmée par la prise de vue d'images à différentes périodes climatiques intra annuelles de l'année pour évaluer l'impact des facteurs géomorphologiques, hydrologiques, topographiques et radiatifs sur l'émissivité thermique de l'oued *Sebbou* et donc d'ajouter à cette dimension spatiale ce le temporelle si révélatrice pour la situation donnée.

Dans tous les trois cas de figures, l'inertie thermique en parfaite concordance avec l'heure de prise de l'image (vers le matin) joue un rôle primordial en ce qui concerne l'explication de la forte émissivité de l'eau de l'oued *Sebbou* si bien mise en évidence sur la spatio-carte issue de cette étude. Il s'agit du fait que les surfaces aquatiques pendant la nuit ont une anomalie thermique légèrement positive par rapport à leurs berges - une capacité thermique très élevée, la plus élevée de tous les objets géographiques $C = 1.01 \text{ cal./gr}^{\circ}\text{C}^{-1}$ (pour la température de 20°C de l'eau), une diffusivité thermique très, très réduite $k = 0.001 \text{ cm}^2/\text{sec}^{-1}$ et donc une inertie thermique élevée $P = 0.037 \text{ cal/cm}^2/\text{sec}^{-1/2}/^{\circ}\text{C}^{-1}$. C'est justement l'inertie thermique et l'état physique de l'eau et de l'atmosphère en général qui explique le fait que la pollution aquatique soit étudiée surtout à partir des images satellitaires prises de nuit et celle atmosphérique à partir des images prises de jour.

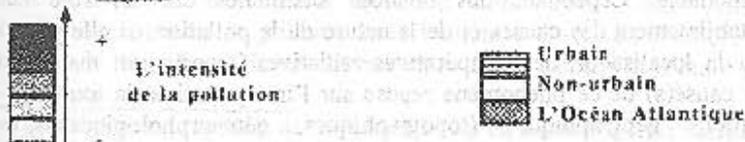
Conclusion

A partir de la méthodologie ici présentée, on a la possibilité de détecter et de cartographier la distribution spatiale des températures radiatives en termes d'émissivité en milieu aquatique sur des images prises de nuit et d'en évaluer indirectement l'intensité de ce phénomène. Cependant, les données satellitaires ont un rôle complémentaire sur l'établissement des causes et de la nature de la pollution, si elle y existe. Elles permettent la localisation des températures radiatives importantes, mais l'établissement de(s) la cause(s) de ce phénomène repose sur l'interprétation de toute une série de conditions géographiques (topographiques, géomorphologiques, météorologiques, climatologiques) qui contribuent à cette situation et aussi sur l'interprétation des résultats des prélèvements chimiques aquatiques qui confirment ou infirment l'existence de la pollution.

L'INTENSITE DE LA POLLUTION DE L'OUED SEBBOU (MAROC)



Légende



BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

1. Bilgen P., Gilg J. P., Geroyannis H. (1994). *Évolution de la répartition de la pollution atmosphérique d'Athènes*. Rapport pour le ministère de l'Environnement.
2. Gadal S. (2000). *Études des phénomènes de métropolisation et leur télédétection*. Rapport d'étude DGA.
3. Ionescu, Anda (1999). Thèse de doctorat de l'université d'Orsay.
4. O'Neill, Miller (1988). *On calibration of Passive Bathymetry through Depth Soundings: Analysis and Treatment of Errors Resulting from the Spatial Variation of Environmental Parameters*. International Journal of Remote Sensing, vol. 75, n°3.
5. Sthor C., Darinody R. G., Frank T. D., Elhance A. P., Lunetta R., Worthy D., O'Connor-Shoresman K. (1994). *Classification of depression in landfill covers using uncalibrated thermal-infrared imagery*. Photographic engineering & remote sensing, vol. 60, n°8, pp. 1019-1028.
6. Viers J. (1993). *Éléments de climatologie*. Paris : Nathan.
7. Zhihao Q., Karnieli A. (1999). *Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data*. International journal of remote sensing, vol. 20, n°12, pp. 2367-2393.