

APPORT DE LA BANDE INFRAROUGE THERMIQUE DU CAPTEUR ETM⁺ DE LANDSAT-7 DANS LA DÉTECTION DE LA POLLUTION DE L'EAU DE MER SUR LE LITTORAL LIBANAIS

GHALEB FAOUR ^{a,1}, AMIN SHABAN ^a et JEAN-MICHEL JAQUET ^{b,2}

^a *Conseil National Libanais de la Recherche Scientifique,
Centre National de Téledétection, B.P. 11-8281, Beyrouth, Liban
Téléphone : +961 4 409845/6 ; télécopieur : +961 4 409847 ;*

^b *Unité d'Observation de la Terre, DEWA-Europe/GRID-Genève
11, Chemin des Anémones, CH-1219 Genève, Suisse
Téléphone : (41 22) 917-8294/95 ; télécopieur : (41 22) 917-8029 ;*

courriel ^(1,2) : gfaour@cnrs.edu.lb ; jean-michel@grid.unep.ch

(soumis : 23 juin 2004 ; révisé : 5 juillet 2004 ; accepté 4 août 2004)

L'environnement marin au Liban a été récemment affecté par la pollution d'origine côtière. Ce problème concerne les régions où l'activité urbaine est dense. Cette pollution menace l'écosystème marin et affecte, par contrecoup, les populations humaines. Tout au long du littoral, s'étendant sur 225 km, 75 cours d'eau permanents ou temporaires déchargent des eaux usées et polluées dans la mer, à quoi s'ajoutent de nombreux rejets d'égouts. Ces apports polluants sont répartis en quatre classes principales : 1) eaux usées ; 2) sédiments et débris ; 3) effluents thermiques ; 4) liquides oléochimiques. L'étendue régionale réelle de ces pollutions n'est pas encore bien identifiée et nécessite donc une surveillance attentive et continue des eaux continentales. Les bandes thermiques des images satellitaires ETM⁺ de Landsat-7 peuvent être utilisées avec succès à cette fin. Le principe de cette identification est basé sur une discrimination thermique entre les températures de l'eau de mer et de l'eau polluée. Avec cette cartographie thermique, on a identifié 49 sources principales de pollution de l'environnement marin libanais, dont la nature a été vérifiée sur le terrain. La plupart sont liées à des activités humaines incontrôlées comme les déversoirs d'égouts, les raffineries et les usines. Ces résultats devraient fournir aux décideurs une base pour déterminer les mesures convenables à leur réduction.

Mots-clefs : pollution ; anomalies thermiques ; zone côtière ; images satellitaires ; ETM⁺ de Landsat ; océanographie.

CONTRIBUTION OF THE THERMAL INFRARED BAND OF LANDSAT-7 ETM⁺ IN THE DETECTION OF SEAWATER POLLUTION ALONG THE LEBANESE SHORELINE

The marine environment in Lebanon has been recently affected by land-derived pollution. This problem mostly concerns areas with dense urban activities. While threatening the marine ecosystem, it also affects, as a consequence, the human populations. Along the 225 km shoreline, 75 permanent or temporary watercourses discharge polluted and wastewater into the sea, with also numerous sewage outlets and oil spills. These pollution inputs are categorized under four major classes : 1) wastewater inflows ; 2) river-transported sediments and debris ; 3) thermal inflows ; 4) chemical and oily fluids. The true areal extent of these pollutions is not well identified yet, which requests a comprehensive and continuous observation of the coastal waters. The thermal bands of satellite images of Landsat-7 ETM⁺ can be successfully utilized for this purpose. The principle of this identification relies upon thermal discrimination between seawater and polluted water temperatures. This thermal mapping has identified 49 major sources of pollution in the Lebanese marine environment, the nature of which has been checked in the field. Most of them are related to uncontrolled human activities, such as sewage outfall, refineries and factories. These results should provide decision-makers with a sound base for implementing the necessary mitigation policies.

Keywords : pollution ; thermal anomalies ; coastal zone ; satellite images ; Landsat ETM⁺ ; oceanography.

1. INTRODUCTION

La pollution de l'eau de mer est un grave problème géo-environnemental qui touche aussi l'environnement côtier de l'est de la Méditerranée

(PNUE/MEDPOL, 2000). Elle affecte les régions à grande densité démographique, laquelle suscite souvent une forte activité industrielle. La côte libanaise est typique des régions où la pollution côtière menace l'écosystème maritime.

Au Liban, rares sont les années où une grave maladie liée à un aspect de la pollution marine, ne touche pas le pays (Kouyoumijian *et al.*, 2001). En effet, tout au long des 225 km de la côte, on trouve un grand nombre de cours d'eau distants l'un l'autre de moins de 3 km. Se jetant dans la mer, certains d'entre eux deviennent un véhicule de transport des polluants des résidus industriels ainsi qu'un déversoir pour les eaux usées. Outre ces cours d'eau, il existe un grand nombre de déversoirs d'égouts se déversant directement dans la mer et des dizaines de déversements de produits pétroliers. Les quatre principales sources de pollution, à savoir les eaux usées, les sédiments et débris transportés, les effluents thermiques ainsi que les liquides chimiques et pétroliers, sont en croissance continue (Shaban and Khawlie, 1998). Bien que la majorité des polluants soient faciles à repérer à leur lieu d'épanchement dans la mer, leur configuration et leur hydrodynamique ne sont pas identifiées. L'identification des déversoirs de la population tout au long du littoral aide à définir leurs sources sur terre et, par la suite, les décideurs peuvent élaborer des mesures adéquates pour réduire de tels problèmes environnementaux.

Au Liban, toutes les études précédentes sur la pollution de l'eau de mer ont suivi des méthodes d'analyses conventionnelles. Les études se sont concentrées uniquement sur les sites locaux pour traiter du contenu, de la chimie et de la pollution microbienne (Harakeh, 1978 ; Kayal, 1981 ; Yezbek, 1990 ; Kouyoumijian and Nuwayhed, 1995 ; Chatila, 2000) alors que les nouvelles technologies, telle la télédétection, n'ont pas été encore appliquées, à l'exception de quelques rares cas (NCRS, 1999 ; Faour et Shaban, 2002 ; Kabbara *et al.*, 2002).

La télédétection thermique apparaît comme une source d'information potentiellement importante pour la détection de la pollution marine. Le principe de la détection thermique dépend de la discrimination des différentes températures de l'eau de mer. En d'autres termes, l'eau polluée venant de la terre a, la plupart du temps, une température différente de celle de l'eau marine. Il est connu que l'analyse des radiations thermiques émises par l'eau pourrait apporter des informations utiles sur la présence d'eaux polluées (Khazenie and Richardson, 1993 ; Geraci *et al.*, 1997). Plusieurs capteurs satellitaires, tels AVHRR de NOAA, MERIS d'ENVISAT, TIR d'ASTER et TM de Landsat, sont actuellement disponibles pour la surveillance de la pollution avec des capacités diverses en termes de résolution spatiale, de sensibilité, de bandes spectrales et de fréquence de passage.

Le satellite Landsat-7, lancé en 1999, est équipé d'un nouveau capteur, ETM+, qui est muni d'une version améliorée de la bande infrarouge ther-

mique, laquelle est caractérisée par une résolution spatiale de 60 m, la meilleure actuellement, et qui fonctionne en deux modes, soit haute et basse résolutions radio métriques.

L'objectif de cette étude est de tester la capacité du nouveau capteur thermique amélioré ETM+ de Landsat-7 guidée par une base de données cartographiques dans la détection de la pollution marine du littoral libanais. Un modèle de calibrage sera appliqué pour déterminer la température de la surface de la mer à partir de sa bande thermique. La transformation de la bande thermique en carte de température de surface est nécessaire afin de mesurer la différence en température entre les anomalies thermiques et l'eau de mer. En effet, cette différence permet d'aider dans l'analyse et l'interprétation des données. De plus, une base de données géographiques sur les différentes sources de pollution est montée.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

La région étudiée se situe entre les latitudes 33° N et 35° N et les longitudes 35° E et 36° 30' E (figure 1). L'altitude de la côte s'élève rapidement, surtout dans le centre (plus de 1 000 m d'altitude à moins de 8 km du rivage derrière Jounieh). De ce fait, la plaine côtière est très étroite, sauf au nord dans Akkar et au sud autour de Tyr, voire absente (massif Ras ech-Chaqaa).

Le trait de côte, orienté du sud-ouest vers le nord-est, est très peu échancré. Il présente toutefois un tracé marqué par une succession de promontoires rocheux, dont le plus important est celui de Beyrouth.

Le rivage est soumis localement à une érosion importante. Il subit de plein fouet les tempêtes hivernales, à cause de la situation du Liban à l'est de la Méditerranée. Ce risque a été aggravé par l'extraction du sable des plages et, sans doute, par la réduction de la recharge en sédiments de la côte depuis l'installation des grands barrages sur le Nil. En effet, le courant principal qui se dirige d'ouest en est, depuis le détroit de Gibraltar en passant par les côtes nord-africaines, atteint la région du delta du Nil pour s'infléchir vers le NNE. De là, le courant épouse les côtes levantes en se dirigeant vers le littoral libano-syrien. Ce courant principal prend une vitesse considérable en contournant le cap Ras Beyrouth à cause de la configuration des côtes et des vents très forts soufflant vers le NE. Les remblais, récents ou en cours, du littoral nord de Beyrouth sont un autre facteur de modification de l'hydrodynamique littorale.

TÉLÉDÉTECTION ET POLLUTION DE L'EAU

Les activités humaines et, par conséquent, les effets environnementaux sur la région sont bien observables. Une série d'industries, de raffineries et de centrales électriques se concentrent sur le littoral, en plus d'une concentration démographique

dense (60 % de la population). Plus haut sur les pentes le long de la côte, l'agriculture est dominante ainsi que l'extraction dans quelques carrières.

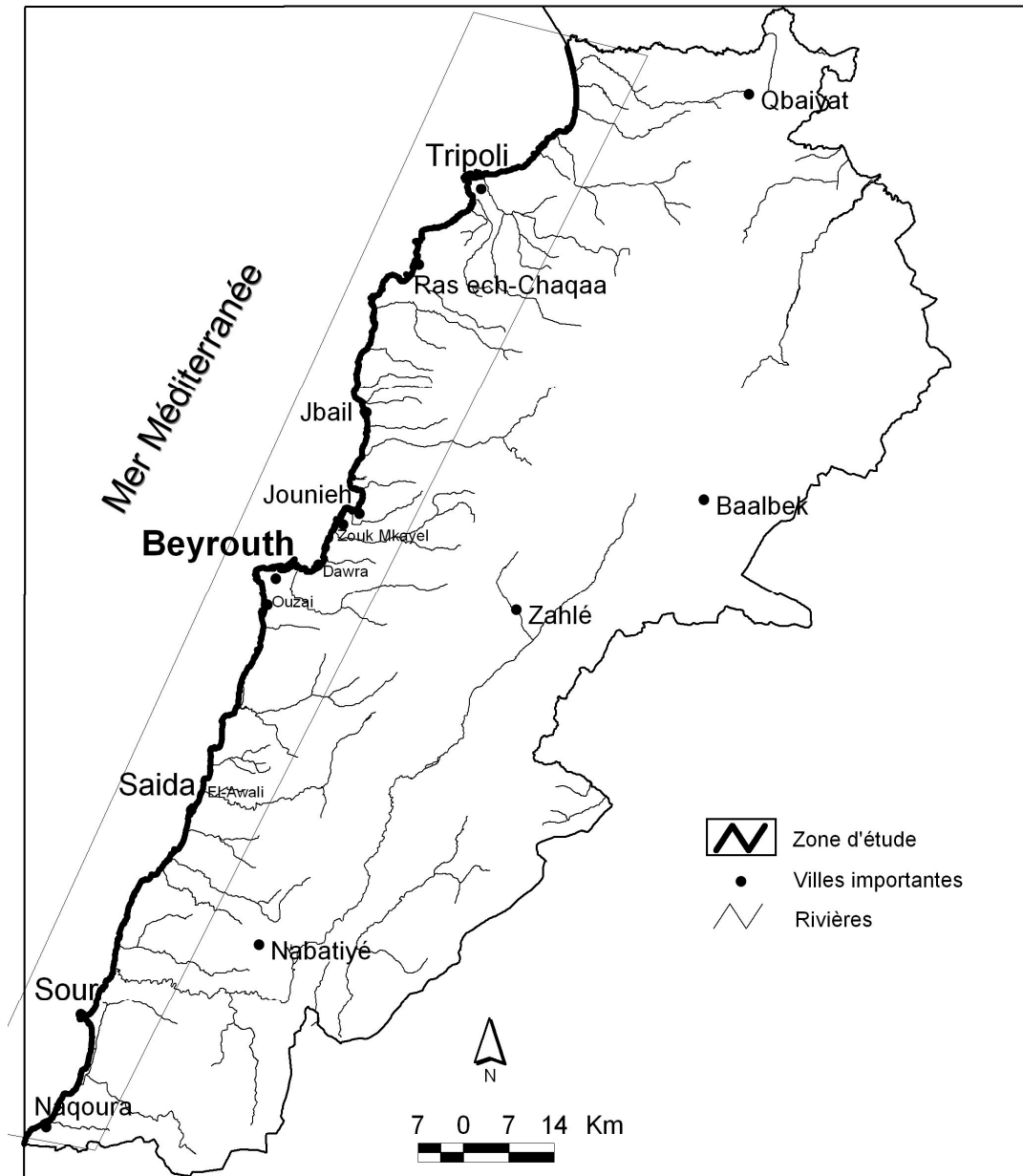


FIGURE 1 Localisation de la région d'étude. *Localization of the study area.*

3. MÉTHODOLOGIE

La télédétection infrarouge thermique consiste à mesurer l'énergie radiative émise par la surface terrestre, ce qui permet de déduire la température de surface. Par conséquent, en détectant le rayonnement émis, il est possible de cartographier de petites variations de température à la surface de la mer et d'identifier les anomalies thermiques (Jensen, 2000). La plupart des travaux menés ces dernières années ont permis d'obtenir des cartes de la température de surface de la mer d'une résolution spatiale de 1 km avec les données du capteur AVHRR de NOAA. L'utilisation de telles données présente l'avantage de proposer un suivi temporel quasi journalier. Cependant, la résolution spatiale considérée est confrontée à un problème d'hétérogénéité à l'intérieur des pixels, ce qui est un facteur limitant pour la détection et l'identification de la pollution côtière. Le capteur TM du satellite Landsat-5 possède également une bande spectrale thermique dont la résolution spatiale est de 120 m. Les images obtenues à cette résolution sont utilisées pour les études plus détaillées en milieu côtier (Thomas *et al.*, 2002).

La bande 6 du capteur ETM+ est conçue pour détecter la température de la surface terrestre. Cette bande thermique est sensible à la radiation émise dans l'intervalle des longueurs d'ondes de 10,4-12,5 μm où l'effet de l'atmosphère est minimal (Bartolucci *et al.*, 1988). L'amélioration de la résolution spatiale à 60 m, ainsi que l'amélioration de la sensibilité radiométrique sont susceptibles de favoriser l'utilisation de ce capteur. De plus, les paramètres de calibrage pour calculer la radiance sont périodiquement mis à jour et corrigés. D'autres capteurs satellitaires comme AVHRR de NOAA et ATSR de ERS permettent aussi d'obtenir des images thermiques, mais ETM+ est plus adéquat pour les applications thermiques à plus grande résolution, tel qu'il est requis dans notre étude.

La méthodologie suivie se résume en trois étapes :

- 1) traitement des images thermiques ;
- 2) cartographie des sources de pollution ;
- 3) interprétation des anomalies thermiques.

3.1. Traitement des images thermiques

Dans cette section, sont présentées les étapes de traitement permettant d'obtenir les cartes de températures de surface de la mer, soit le prétraitement des images, les transformations intermédiaires en radiance et la conversion finale en températures.

3.1.2. Prétraitement des images thermiques

Plusieurs images du capteur ETM+, couvrant la zone côtière au Liban, ont été acquises les 21 mars 2003, 16 juin 2001, 26 octobre 1999 et 14 janvier 2000.

Une analyse préalable de ces images a été effectuée et a montré clairement que les images acquises en juin 2001 et en mars 2003 permettent de détecter seulement les pollutions thermiques provenant des deux usines électriques présentes sur la côte. Les images acquises en octobre 1999 et en janvier 2000, elles, ont été utilisées pour cartographier la température de surface de la mer. Les images ont été projetées dans le système libanais *Lambert Conformal Conic* (ellipsoïde : Clark 1880). Ce système a été choisi puisque la majorité des données spatiales disponibles au Liban sont disponibles dans cette projection. L'orthorectification a été appliquée en utilisant un modèle numérique d'altitude d'une précision verticale de 10 m. Les points de calage ont été prélevés des cartes topographiques à l'échelle du 1/20 000. La bande 4 dans le proche-infrarouge de ETM+ a été utilisée pour créer un masque séparant la terre de la mer.

3.1.2. Modèle de calibrage des températures

Le capteur ETM+ a un calibrage radiométrique absolu de 5 % (NASA, 2000 ; Barsi *et al.*, 2003). Il permet l'acquisition des deux bandes dans l'infrarouge thermique, soit en haute (HRR) et basse résolutions (BRR) radiométriques. La différence entre ces deux modes correspond à une différence de précision ΔT , meilleure dans le mode haute résolution, et qui est proportionnelle à la différence entre deux comptes numériques (CN) successifs. Dans le mode haute résolution, l'intervalle des mesures est réduit (3,2-12,65 W.m^{-2}), ce qui permet d'avoir une carte de température plus fine (un CN équivaut à 0,3 °C). L'intervalle des mesures en mode de basse résolution est plus large mais moins précis (0-17,04 W.m^{-2}).

Un des problèmes concernant le mode haute résolution est que le capteur peut être plus facilement saturé. Dans le mode faible résolution, l'échelle est étendue pour permettre plus de contraste dans l'image (ex : neige) et sans le risque de saturation du capteur.

La neige et le verglas peuvent produire des valeurs négatives. Nos couples d'images ont été pris en automne et en hiver, périodes où la masse d'air sur la terre est très froide. Ceci peut aussi affecter les températures calculées (fausse valeur négative aux données s'approchant de 0). Nous avons vérifié les deux modes pour les deux couples d'images et avons trouvé que les capteurs n'étaient pas saturés. En outre, nous avons vérifié l'absence

de brouillard en utilisant la combinaison des bandes 5-3-1 de ETM+.

La conversion des CN en 8 bits à des radiances et des températures « au capteur », passe par les étapes de conversion en radiances et de conversion en températures.

A) Conversion en radiances

Les pixels des images sont convertis en des unités de radiance absolue. L'équation suivante est utilisée :

$$\text{Radiance} = \text{Gain} * \text{CN} + \text{compensation}$$

Pour les calculs, nous avons utilisé l'expression équivalente :

$$\text{Radiance} = \left(\frac{\text{LMax} - \text{LMin}}{\text{QCALMax} - \text{QCALMin}} \right) \times (\text{QCAL} - \text{QCALMin}) + \text{LMin}$$

Où :

QCALMin = 1 ;
QCALMax = 255 ;
QCAL = CN ;
Lmin = 0 (BRR), 3,2 (HRR) ;
Lmax = 17,04 (BRR), 12,65 (HRR) ;

où LMin et LMax sont les paramètres d'étalonnage radiométrique (NASA, 2000) aux CN 1 et 255 (*i.e.* QCALMin, QCALMax).

Un biais a été trouvé dans le calibrage de pré-lancement par l'équipe de chercheurs de Landsat-7. Le calibrage a été corrigé dans le système de traitement LPGS qui a commencé le 20 décembre 2000 (NASA, 2000). Pour les données traitées avant cette date, les radiances des images données par la transformation susmentionnée sont trop élevées, soit de 0,31 W.m⁻² sr⁻¹ µm⁻¹.

B) Conversion en températures

Les données de la bande 6 de ETM+ peuvent être ainsi converties de la radiance spectrale à une variable plus utilisable physiquement : il s'agit de la température effective du système terre-atmosphère, avec l'hypothèse d'une émissivité unitaire, et en utilisant les constantes du calibrage pré-lancement (NASA, 2000). La formule de conversion est :

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

où :

T = température effective au capteur en Kelvin ;
K₂ = 666,09 ;
K₁ = 1 282,71 ;
L_λ = radiance spectrale en W m⁻² sr⁻¹ µm⁻¹.

Deux algorithmes ont été écrits pour ERDAS Model Maker en vue d'appliquer la conversion des valeurs de CN à la température dans les deux modes d'acquisition de la bande infrarouge thermique, soit HRR et BRR.

3.2. Cartographie des sources de pollution

Des données géographiques diverses ont été collectées et traitées afin d'aider dans l'interprétation des anomalies thermiques extraites des images ETM+. En association avec Greenline et Greenpeace, nous avons ainsi effectué une campagne en bateau le long de la côte afin de saisir au moyen d'un GPS les coordonnées des sources de pollution directes (égouts, décharges, centres balnéaires et industries). Ces données ont été classifiées et intégrées dans un SIG en projection Lambert. Nous avons aussi converti les coordonnées des sources de l'eau douce en mer cartographiées durant une campagne aérienne effectuée le 17 septembre 1997 par notre Centre dans le cadre d'un projet exécuté en coopération avec le Ministère de l'eau au Liban.

De même, les cartes des cours d'eau, des usines et de l'utilisation du sol à l'échelle du 1/50 000 (CNRS, 2000) ont été utilisées dans la classification des différentes anomalies thermiques. Plusieurs données extraites des études précédentes (El-Souri, 1996) ont été intégrées au SIG afin de l'exploiter dans l'interprétation des résultats.

3.3. Notions de signature et anomalies thermiques

Pour être utilisables, les signatures thermiques (Bonn et Rochon, 1992) liées à la pollution doivent marquer un contraste clair par rapport à celles de l'ensemble de l'eau marine. On parlera ainsi d'anomalies thermiques positives lorsque la température de l'eau polluée est supérieure à celle de la mer (par exemple point A sur la figure 2) et d'anomalies négatives dans le cas contraire (point B sur la figure 2).

Ces anomalies peuvent être d'origine diverses : fronts thermiques liés à la dynamique marine, apports d'eau douce des cours d'eau et des sources sous-marines (NCRS, 1999) ou encore effluents pollués.

En ce qui concerne les anomalies thermiques liées à la pollution, elles existent toute l'année pour la signature des effluents liés aux centrales thermiques (point A sur la figure 2), alors qu'elles sont limitées à la période hivernale pour celles des cours d'eau et des égouts. Nous les avons classifiées selon quatre types (Faour and Shaban, 2002) précisés dans la section 3.4.

La vérification et l'échantillonnage des anomalies thermiques ainsi identifiées seront nécessaires

pour confirmer leur existence et leur emplacement ainsi que pour discerner les différents aspects de la pollution. Ceci sera obtenu par une reconnaissance

sur le terrain pour analyser leur composition chimique, et confirmer ainsi leur origine.

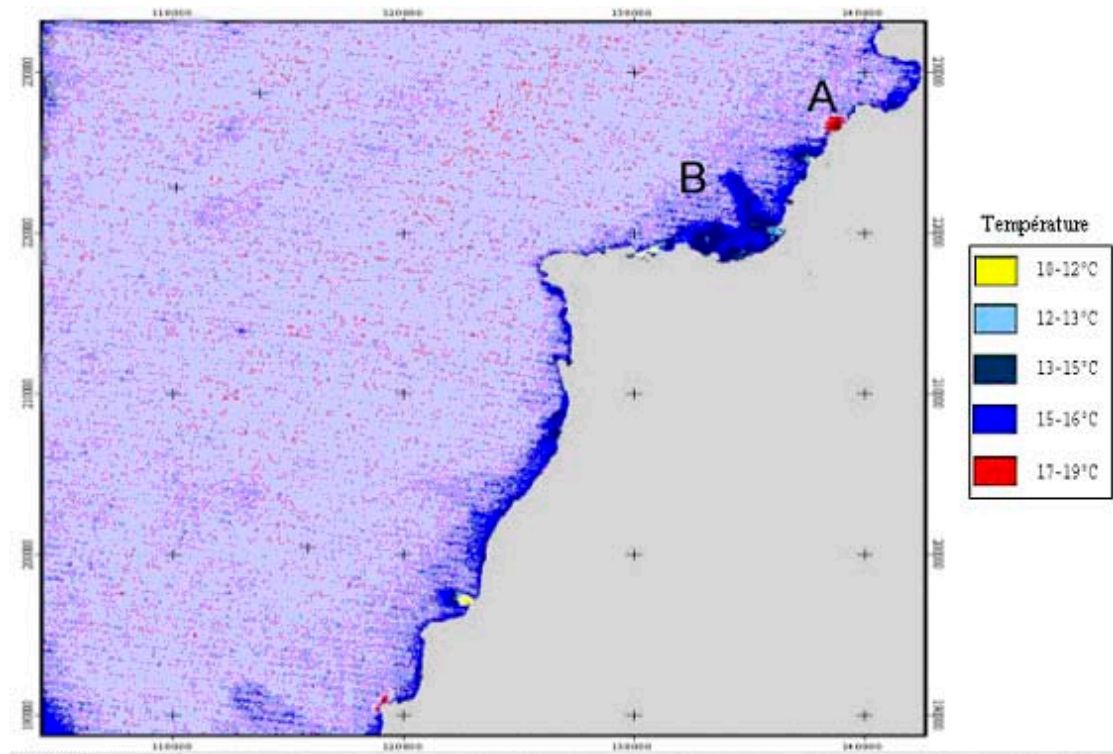


FIGURE 2 Série d'anomalies thermiques de l'eau de mer extraite de la bande thermique de ETM⁺ de Landsat-7. *Thermal anomalies of seawater extracted from thermic band of Landsat-7 ETM⁺.*

3.4. Typologie de la pollution

La pollution de l'eau de mer peut être identifiée à partir de la forme et de la différence de température des anomalies détectées sur les images satellitaires (figure 3), d'analyses de laboratoire et de la vérification de terrain. L'interprétation visuelle et l'analyse des différentes anomalies thermiques extraites de la carte des températures de surface nécessitent la reconnaissance des caractéristiques spatiales de chaque type de pollution. Une série de visites sur le terrain et l'analyse des photographies aériennes thermiques (NCRS, 1999) ont permis d'établir ses caractéristiques.

3.4.1. Eaux usées

À part le cas de Beyrouth, où il existe une station de traitement primaire, les eaux usées des agglomérations urbaines se déversent sans traitement dans la mer (PNUE/MEDPOL, 2000) : on en trouve de trois types :

- Déversements à travers des conduits construits spécialement dans ce but ; sur la figure 3 (point A),

il y a bon exemple dans la région d'Ouzai-Sud de Beyrouth, où l'écoulement longitudinal est clair à partir des deux déversements parallèles le long des conduits ;

- Rejet des égouts et eaux résiduelles des usines dans les cours d'eau, avec transport ultérieur des polluants vers la mer ;

- Apports diffus résultant des fuites et des déperditions provenant de l'habitat dispersé.

3.4.2. Sédiments et débris transportés des rivières

Au Liban, il existe 12 rivières à régime permanent se déversant dans la Méditerranée, ainsi que 35 wadis temporaires. Ces cours d'eau transportent des sédiments et des débris avec l'eau turbide et les matériaux transportés peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres en mer. Normalement, ce phénomène s'accroît durant les périodes de pluies torrentielles, ce qui explique pourquoi leur identification est restreinte à ces périodes. Sur la figure 3 (point B), on aperçoit une grande différence de température à cause de l'énergie élevée du flux le long de la rivière El-Awali.

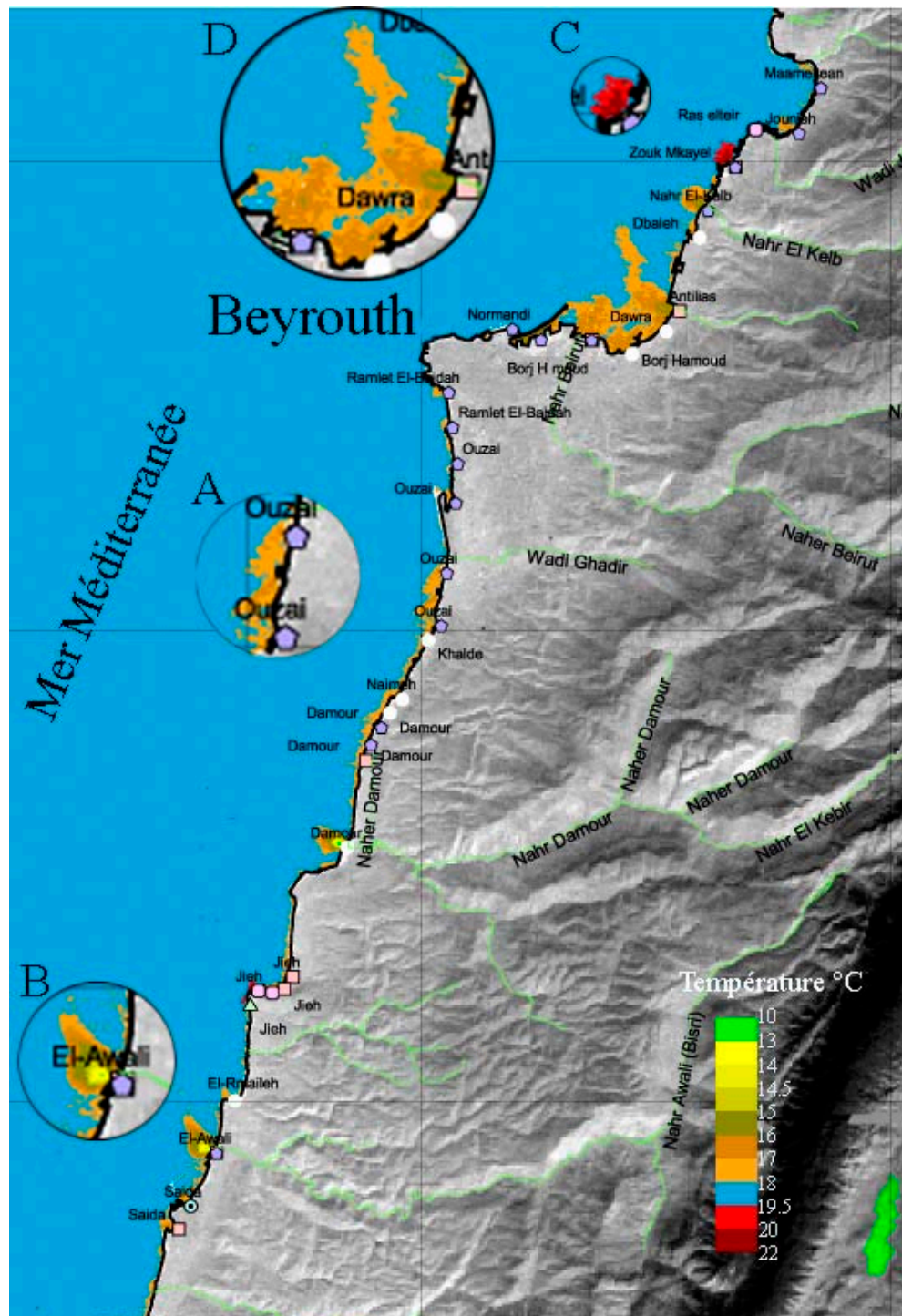


FIGURE 3 Aspects de la pollution le long du littoral libanais. A) Exemple de déversoirs des eaux usées ; B) Exemple des sédiments et débris transportés le long des rivières ; C) Exemple des eaux chaudes provenant d'une centrale électrique ; D) Exemple des liquides chimiques et pétroliers mélangés à l'eau des ruisseaux. *Pollution aspects along the Lebanese shoreline. A) Water outfalls ; B) Transported sediments and debris along rivers ; C) Warm waters from an electric power station ; D) Chemical and petroleum fluids mixed with stream waters.*

3.4.3. Pollution thermique

L'emplacement de quelques centrales électriques sur la côte produit une pollution de type thermique qui peut être nuisible pour la faune et la flore marine (MEDD, 2003, chap. 4.2). Les pompes de décharge sont toujours situées sur des digues pour tenter d'éloigner l'eau chaude à plusieurs centaines de mètres de la côte. D'autres sources d'eau chaude émanent de petites usines dispersées le long de la côte et ayant une décharge intermittente et de portée limitée (Faour and Shaban, 2002). Un exemple de cartographie de l'impact d'une centrale thermique par télédétection est donné par Gibbons *et al.* (1989). Sur la figure 3 (point C), on présente un exemple de pollution thermique produite par la centrale électrique de Zouk Mkayel, détectée par une température plus élevée sur le point de rejet que l'eau avoisinante.

3.4.4. Liquides oléochimiques

Des usines, raffineries, tanneries, réservoirs pétroliers, centres hospitaliers et nombre d'autres

implantations industrielles sont dispersés directement sur le littoral de la côte libanaise. Toutes ces activités produisent des déchets liquides, essentiellement des produits chimiques, des eaux usées et des huiles.

Bien que leur décharge soit normalement intermittente et restreinte à quelques périodes, elles occupent de larges surfaces. La présence de liquides huileux provient aussi de déversements, accidentels ou non, de produits pétroliers en mer. On en trouve un bon exemple dans la baie de Saint-Georges (figure 3, point D).

Notons qu'il existe encore un type supplémentaire d'anomalie thermique provenant de la terre. Il est provoqué par les sources d'eau douce sous-marines, dont l'existence a été mise en évidence par une campagne aéroportée de mesures thermiques (NCRS, 1999). Les critères d'identification des eaux polluées sur les images utilisées sont résumés sur le tableau 1.

TABLEAU 1 Critères d'identification de l'eau de mer polluée sur les images thermiques de ETM+ de Landsat-7.
Criteria of identification of seawater pollution using ETM+ thermal images.

Aspects de la pollution de l'eau de mer	Aspect de l'afflux vers la mer seaward	Différences de températures détectables		Forme du modèle thermique	Dimensions approximatives (m)	
					Longueur	LARGEUR
Eaux usées	Le long des déversoirs d'égouts	Normalement inférieure à l'eau de mer environnante de 2-2,5 °C		Forme d'éventail, presque perpendiculaire au littoral	Jusqu'à 600	Jusqu'à 200
	Le long des cours des rivières	Normalement inférieure à l'eau de mer environnante de 0,5-1 °C		Idem	Jusqu'à 1 500	Jusqu'à 500
	Sources diffuses	Normalement inférieure à l'eau salée environnante de 1-2 °C		Chaotique, en épanchement presque parallèle à la côte	Jusqu'à 200	Plusieurs kilomètres le long du littoral
Sédiments et débris transportés	Afflux le long des cours des rivières et des sources	-Température inférieure à l'eau salée environnante de 2-2,5 °C -Optiquement, les bandes 2, 3 et 4 montrent une couleur bleue *		Forme de flamme, élongée et perpendiculaire à la côte	Jusqu'à 5 000	Jusqu'à 2 000
Pollution thermique	Afflux des eaux pompées	Supérieure à l'eau de mer environnante de 2-3 °C		Forme de flamme, élongée et perpendiculaire à la côte	1 000-1 500	50-500
Liquides chimiques et pétroliers	Afflux le long des conduits, spécialement pour ce but ou afflux irrégulier	Température supérieure à l'eau de mer environnante de 1-5 °C (selon le type du liquide). Dans certains cas, des températures inférieures ont été détectées		Soit élongée perpendiculaire à la côte (taux de décharge élevé); ou fuite parallèle/ou irrégulière à la côte (taux de décharge bas)	Jusqu'à 250	Jusqu'à 50
		Une configuration remarquable des liquides chargés est la dimension de l'afflux, qui est plus large au déversoir et devient plus étroite en s'étendant vers la mer				
	Déversement dissipé, discontinu	Normalement température inférieure aux alentours		En boucle, allongée, formes circulaires; presque à étendues régionales différentes	Jusqu'à 1 500	Portée de 100

4. RÉSULTATS

Sur le tableau 2, on présente la liste de la cinquantaine d'anomalies majeures marquant des apports polluants dans le milieu marin, sur la centaine identifiée sur les images. Sur la figure 4, on montre la carte des anomalies thermiques classées suivant le type de pollution.

Les principaux apports polluants (60 %) sont concentrés près de la capitale, Beyrouth. Parmi ces sources, il y en a 22 pour les eaux usées, 6 pour les effluents thermiques, 14 pour les sédiments et les débris ainsi que 7 pour les liquides oléochimiques. Par ailleurs, près de 60 autres anomalies ont été reconnues dans cette étude, mais elles sont toutes attribuées à des sources d'eau douce sous-marines.

Certaines anomalies thermiques suspectes n'ont pas pu être clairement interprétées sur la base des critères mentionnés sur le tableau 1. Jusqu'à maintenant, la détermination de leur emplacement et la délimitation de leur forme par télédétection a été faite essentiellement à des fins d'inventaire, avant de pouvoir préciser leur type de pollution. Ceci devra être vérifié sur le terrain et par des analyses de laboratoire. Pour cela, certaines anomalies ont été directement reconnues sur le terrain, notamment celles attribuées à l'eau chaude des centrales électriques et celles reliées aux sédiments transportés par les rivières. Certaines autres anomalies ont été comparées aux informations des études précédentes obtenues pour les mêmes endroits. La majorité de celles-ci ont été faites par le Centre national de télédétection (NCRS, 1999), basées sur un balayage infrarouge thermique par vol à basse altitude. En outre, les études appliquées aux sites locaux par analyses chimiques et bactériennes ont été également utilisées pour l'identification dans bien des cas (Greenpeace, 1997). De même, une campagne de reconnaissance de terrain par bateau a été effectuée en collaboration avec les deux associations Greenpeace et Greenline en utilisant un système de positionnement global (GPS).

5. DISCUSSION

La côte libanaise est une région d'une surface relativement limitée à concentration démographique assez dense (900 à 1 000 personnes/km²) ; s'y débarrasser des déchets liquides et solides pose un grave problème environnemental. Il n'est pas exagéré de dire qu'en l'absence de contrôles, la décharge des déchets se fait de manière sauvage et sans traitement sur terre et dans la mer. L'impact de la pollution marine se reflète ainsi sur la santé humaine, causant des maladies fréquemment

dénoncées par les habitants (Kouyoumijian *et al.*, 2001). Une législation et des politiques gouvernementales sont proposées, mais leur application est insuffisante pour atténuer ce problème croissant. L'absence d'études adéquates à cet égard aggrave aussi la situation défavorable.

Notre étude représente la première évaluation globale de la pollution des eaux côtières libanaises. Grâce à son caractère synoptique et répétitif, ainsi qu'à sa richesse spectrale et son prix raisonnable, l'imagerie ETM⁺ est prometteuse. Le principe de la détection de la pollution que nous avons appliqué dépend d'une différence de température entre l'eau de mer et les eaux polluées. Les résultats obtenus par cette étude sont considérés comme des informations préliminaires en vue de piloter des enquêtes ultérieures sur les sites sélectionnés, qui représentent une menace en termes de pollution de l'eau de mer.

La méthodologie utilisée ici pourrait se fonder sur d'autres types d'images satellitaires, en particulier celles fournies par le capteur ASTER, possédant 5 bandes thermiques et donc une plus grande capacité de discrimination des températures. En outre, au vu de la limitation de l'approche thermique avec des images d'hiver, il serait avantageux de la compléter par le recours aux signatures de couleur et de turbidité, comme l'ont fait Weber *et al.* (2004) dans la même région que la nôtre. Ces signatures peuvent être extraites, dans le domaine du visible, des bandes de ETM⁺ de Landsat, ainsi que de QuickBird et IKONOS, dont la résolution spatiale très fine devrait permettre l'identification d'apports polluants d'une taille réduite.

La pollution thermique est la plus facile à détecter à partir des images satellitaires par rapport autres types de pollution signalés dans cette étude quelque soit la date d'acquisition. Par contre, les eaux usées, les sédiments et débris transportés par les rivières ainsi que les liquides oléochimiques peuvent être détectés uniquement durant la période hivernale à cause de l'intensité des pluies qui accélèrent l'écoulement des eaux transportant ces polluants.

6. CONCLUSION

Cette étude montre la capacité du capteur thermique ETM⁺ de Landsat-7 en donnant des résultats similaires aux photographies aériennes (NCRS, 1999) pour détecter les anomalies thermiques. L'identification de ces anomalies thermiques a nécessité l'utilisation de données auxiliaires comme la carte des sources de pollution, la carte des sources d'eau douce en mer etc. De même, des visites sur le terrain ont été nécessaires pour identifier quelques anomalies.

TABLEAU 2 Anomalies thermiques identifiées des polluants et de leurs sources présumées sur terre, adaptées de l'interprétation des images satellitaires au littoral libanais. *Identified thermal anomalies of pollutants and their presumed sources on land, adapted from satellite image interpretation for the Lebanese shoreline.*

Site	Emplacement	Coordonnées		Étendue régionale			Anomalie thermique	Temp. moyenne (°C)	Source présumée (sur terre)	Vérification/ou source des informations utilisées
		X	Y	Surface (m²)	Longueur (m)	Largeur (m)				
1	Frontière libano-syrienne	-291 144	52 673	1 697 170	1 640	1 270	Sédiments et débris	13,5	Rivière El-Kabir	Détection sur le terrain
2	Nahr elBared	-293 444	39 366	971 230	1 160	920	Sédiments et débris	13,0	Rivière El-Bared	Détection sur le terrain
3	El-Bedawi	-296 867	35 754	610 090	670	790	Chimiques et Pétroliers	13,7	Raffineries pétrolières+centrale électrique	Analyses chimiques et NCRS
4	Mina – Tripoli	-304 891	32 998	2 481 660	1 160	2 260	Sédiments et débris	14,0	Rivière Abou Ali	Détection sur le terrain
5	El-Bahsas	-306 186	29 426	852 130	510	1 450	Sédiments et débris	15,3	Un des rares écosystèmes de la région méditerranéenne	Idem
6	El-Kalamoun	-311 863	25 343	106 490	410	360	Eau chaude	20,0	Centrale électrique de Qalamoun	NCRS
7	El-Herri	-315 725	18 207	546 300	470	1 560	Produits huileux et égouts	16,2	Usine de ciment de Chekka et activités industrielles	Analyses chimiques et bactériennes
8	Batroun	-321 496	10 254	253 070	600	640	Sédiments et débris	16,8	Rivière El-Jouz	Détection sur le terrain
9	Jbeil	-323 647	-1 985	85 410	810	170	Produits oléochimiques	17,0	Nombre d'usines	Analyses chimiques
10	Halate	-323 019	-6 288	120 140	220	660	Eaux usées	15,0	Présence de déversoirs	Analyses chimiques et bactériennes
11	Halate	-323 113	-7 254	355 190	350	1 140	Eaux usées	16,5	Sources sous-marine, déversoirs & différentes industries	Idem
12	Nahr Ibrahim	-323 796	-9 585	902 530	1 000	780	Sédiments et débris	14,2	Rivière Ibrahim	Détection sur le terrain
13	Maameltean	-323 837	-16 138	1 800	30	60	Eaux usées	16,5	Égouts de Maamelteine	Analyses chimiques et bactériennes
14	Jounieh	-324 766	-18 068	8 100	60	150	Eaux usées	16,5	Égouts de Jounieh	Idem
15	Jounieh	-325 731	-18 187	105 300	150	800	Eaux usées	17,0	Bain militaire	Idem
16	Ras elteir	-326 619	-17 904	25 200	80	300	Eaux usées	17,0	Bain militaire	Idem
17	Zouk Mkayel	-327 474	-19 493	930 600	1 000	2 800	Eau chaude	20,5	Centrale électrique de Zouk Mkael	Idem
18	Ajaltoun	-327 981	-20 237	31 200	150	300	Eaux usées et chimiques	16,5	Égouts du Zouk & usines à Ejaltoune	Idem
19	Nahr El-Kalb	-328 637	-21 348	289 800	850	550	Sédiments et débris	15,5	Rivière El-Kaleb	Détection sur le terrain
20	Dbaieh	-328 999	-22 518	94 500	225	360	Eaux usées	16,3	Égouts de Dbaieh	Analyses chimiques et bactériennes
21	Antilias	-329 858	-25 640	670 500	1 500	700	Sédiments et débris	15,7	Rivière d'Antilias	Détection sur le terrain
22	Dawra	-330 429	-26 502	138 000	250	1 000	Chimiques et Pétroliers	17,3	Stockage de pétrole et serrureries, tanneries d'el-Dawra, raffineries de Dawra	Analyses chimiques
23	Borj Hamoud	-331 876	-27 449	732 600	500	1 000	Sédiments et débris Eaux usées	16,3	Rivière d'Antilyas, enfouissement des déchets de Bourj Hamoud	Analyses chimiques et bactériennes et NCRS
24	Borj Hamoud	-333 598	-26 870	201 780 0	1 800	1 000	Sédiments et débris Eaux usées	16,5	Rivière de Beyrouth, enfouissement des déchets de Bourj Hamoud	Idem

TÉLÉDÉTECTION ET POLLUTION DE L'EAU

25	Port de Beyrouth	-335 742	-26 857	607 500	2 000	300	Eaux usées/huile	15,7	Port de Beyrouth	Analyses chimiques et bactériennes
26	Normandie	-336 965	-26 397	297 000	240	1 000	Eaux usées	17,7	Enfouissement des déchets de Normandie	Idem
27	Ramlet El-Baidah	-339 673	-29 079	54 000	370	150	Eaux usées	17,7	Égouts I de Ramlet El Baidah	Idem
28	Ramlet El-Baidah	-339 502	-30 578	16 200	60	300	Eaux usées	16,0	Égouts II de Ramlet El Baidah	Idem
29	Ouzai	-339 278	-32 124	32 400	200	240	Eaux usées	17,5	Égouts I d'Ozai	Idem
30	Ouzai	-339 360	-33 788	111 600	200	400	Eaux usées	17,5	Égouts II d'Ozai	Idem
31	Ouzai	-339 751	-36 767	245 700	840	180	Eaux usées	17,5	Égouts III d'Ozai	Idem
32	Ouzai	-339 915	-37 794	192 600	900	150	Eaux usées	17,0	Égouts IV d'Ozai	Analyses chimiques et bactériennes et NCRS
33	Ouzai	-339 997	-39 007	7 200	30	200	Eaux usées	16,5	Plage d'Ozai	Analyses chimiques et bactériennes
34	Khaldé	-340 552	-39 643	27 900	200	60	Eaux usées	17,0	Club de Varna	Idem
35	Khaldé	-340 716	-40 363	30 600	50	350	Sédiments et débris Eaux usées	13,5	Rivière temporaire, Deauville, plage sablonneuse, Mirador, Villa Mar, plage du Liban	Analyses chimiques et bactériennes et détection sur le terrain
36	Naimeh	-341 660	-42 151	39600	60	450	Sédiments et débris Eaux usées	13,5	Rivière temporaire, plage de prince	Idem
37	Damour	-342 174	-42 729	4 500	30	60	Sédiments et débris	16,5	Rivière temporaire	Détection sur le terrain
38	Damour	-342 527	-43 338	31 500	30	540	Sédiments et débris	15,0	Rivière temporaire	Idem
39	Damour	-342 976	-44 077	21 000	60	430	Eaux usées	16,5	Plaine de Damour	Analyses chimiques et bactériennes
40	Damour	-343 201	-44 751	40 500	200	800	Eaux usées	16,5	Plaine de Damour	Idem
41	Jieh	-346 315	-53 964	11 700	38	280	Produits pétroliers	16,5	Stockage de pétrole	Analyses chimiques et bactériennes
42	Jieh	-346 668	-54 478	12 600	60	100	Produits pétroliers	16,5	Stockage de pétrole	Analyses chimiques
43	Jieh	-347 182	-54 639	21 600	60	180	Produits pétroliers	15,0	Stockage de pétrole	Idem
44	Jieh	-347 772	-54 554	69 600	520	270	Eau chaude	20,5	Centrale électrique de Jieh	Idem
45	Jieh	-348 114	-55 117	468 00	300	100	Eau chaude	20,5	Centrale électrique de Jieh	Détection sur le terrain
46	El-Awali	-349 548	-61 450	1 637 410	1 900	1 220	Sédiments et débris	12,5	Rivière El-Awali	Détection sur le terrain
47	Saida	-350 640	-63 711	273 810	370	850	Eaux usées et déversements de pétrole	16,7	Égouts, déversoirs et port de Saida	Analyses chimiques et bactériennes
48	Saida	-351 158	-64 708	258 580	520	480	Eaux usées	16,0	Enfouissement des déchets de Saida	Analyses chimiques et bactériennes
49	El-Zahrani	-352 610	-69 356	493 360	270	1 960	Produits huileux	16,3	Centrale électrique et raffineries pétrolières	Analyses chimiques

NCRS = Étude thermique faite par le Centre national libanais de télédétection (Lebanese National Center for Remote Sensing) en 1999.

Le capteur ETM⁺, permet de fournir un inventaire des formes de pollution en utilisant des images multidates mais sans pouvoir appréhender une surveillance continue de ces formes. Le couplage de l'imagerie thermique et de l'imagerie optique (couleur de l'eau) devra nous permettre dans le futur d'aider à la classification des anomalies thermiques. La base de données géographiques (sources de pollution, utilisation du sol, cours d'eau, usines, *etc.*), qui a été utilisée dans

l'interprétation des anomalies thermiques, pourra servir ultérieurement à mieux gérer l'environnement côtier. Le nouveau capteur thermique de ETM⁺ de Landsat-7 présente, par rapport à l'ancien capteur TM de Landsat-5, plusieurs avantages : résolution spatiale de 60 m à la place de 120 m et deux modes de résolution radiométrique (haute et faible) à la place d'un seul mode (faible pour TM).

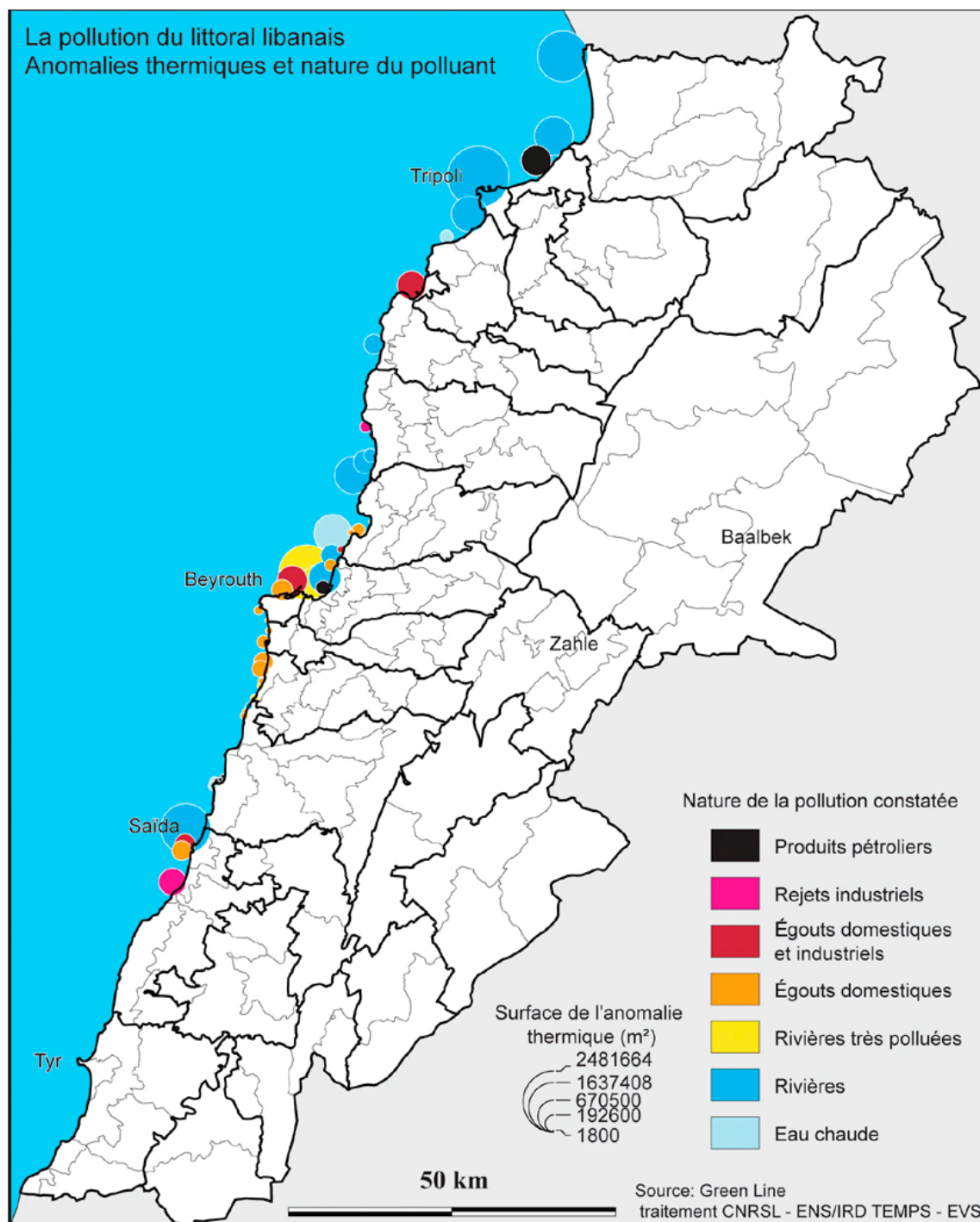


FIGURE 4 Carte des anomalies thermiques et nature de la pollution. *Map of thermal anomalies and type of pollution*

Remerciements

Ce travail a pu être mené à bien grâce à l'appui financier du Conseil National de la Recherche Scientifique Libanais et du GRID-Genève, qui est l'un des centres de programme des Nations-Unies pour l'environnement (PNUE). Nous présentons tous nos remerciements aux responsables de ces deux organismes.

Références

- Barsi, J.A., Schott, J.R., Palluconi, F.D., Helder, D.L., Hook, S.J., Markham, B.L., Chander, G. and O'Donnell, E.M. (2003) Landsat TM and ETM⁺ thermal band calibration. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n° 2, p. 141-153.
- Bartolucci, L.A., Chang, M., Anuta, P.E. and Graves, M.R. (1988) Atmospheric effects on Landsat TM thermal IR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, p. 171-175.
- Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de télédétection. Vol. 1: Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF-UREF, Sainte-Foy et Montréal, 512 p.
- Chatila, J. (2000) Analysis of the relation between floristic diversity and landscape physical components on the Lebanese coastal zones. *Rapport, Arab Water World, Beyrouth*, 23 p.
- CNRS (Conseil national de la recherche scientifique) (2000) Carte de l'utilisation du sol. Centre national de la télédétection, Beyrouth, 1 : 50 000.
- El Sour, M. (1996) Biological Environment of the Lebanese Coastal Waters. Mémoire de maîtrise, American University of Beirut, 61 p.
- Faour, G. and Shaban, A. (2002) Coastal sea pollution detection using thermal Landsat images. Final report, GRID (Global resource information database), Geneva, 31 p.
- Geraci, A.L., Fargione, G.A., Axiak, V. and Adami, E.T. (1996) Monitoring of environmental water quality of Maltese coastal waters using remote sensing techniques. In Spiteri, A. (éd.) *Remote Sensing 96 : Integrated applications for risk assessment and disaster prevention for the Mediterranean*. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 241-246.
- Gibbons, D.E., Wukelic, G.E., Leighton, J.P. and Doyle, J.M. (1989) Application of Landsat Thematic Mapper data for coastal thermal plume analysis at Diablo Canyon. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, n° 6, p. 903-909.
- Greenpeace (1997) Heavy metal and organic screen analysis of environmental and waste samples associated with industrial activities in Lebanon. Greenpeace Research Laboratories, University Exeter (UK), Technical Note, 16 p.
- Harakeh, M. (1978) Mercury content of fish and seawater in Lebanon. Mémoire de maîtrise, American University of Beirut, 154 p.
- Jensen, J.R. (2000) Remote sensing of the environment: An earth resource perspective. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ), 544 p.
- Kabbara, N., Yan, X., Klenas, V. and Pan, J. (2002) Temporal and spatial variability of the surface temperature anomaly in the Levantine basin of the Eastern Mediterranean. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, n° 18, p. 3745-3761.
- Kayal, S. (1981) Cadmium levels in seawater, sediments, limpets and shrimps along the coast of Lebanon. Mémoire de maîtrise, American University of Beirut, 205 p.
- Khazenie, N. and Richardson, K.A. (1993) Detection of oil fire smoke over water in the Persian Gulf region. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, p. 1271-1276.
- Kouyoumijian, H. and Nuwayhed, M. (1995) A revue of Marine Research in Lebanon. *Lebanese Science Bulletin*, vol. 8, n° 1, p. 77-107.
- Kouyoumijian, H.H., Tilbian, M. and Najjar, E. (2001) Exposure of the Lebanese population to mercury through fishery products and a proposal for a screening standard. *Lebanese Science Journal*, vol. 2, n° 1, p. 37-44.
- MEDD (Ministère français de l'environnement et du développement) (2003) Mise en oeuvre de la Directive-cadre sur l'eau. Identification des pressions et impacts : guide méthodologique. Version 4.1. C^o Aquascop, Paris 147 p.
- NASA (2000) Landsat 7, Science Data Users Handbook, Data Products. Chapter 11, <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/LAS/handbook/handbook.html#chapter11/chapter11.html>
- NCRS (National Council for Scientific Research) (1999) TIR survey for freshwater sources in the marine environment. Project held in the National Center for Remote Sensing, Beirut, Lebanon, Final Report, 103 p.
- PNUE/MEDPOL (Programme des Nations-Unies pour l'environnement/Mediterranean Pollution Programme) (2000) Les stations d'épuration des eaux usées municipales dans les villes côtières de la Méditerranée. Série rapports techniques du PAM (Plan d'action pour la Méditerranée), n° 128, Athènes, 65 p.
- Thomas, A., Byrne D. and Weatherbee R. (2002) Coastal sea surface temperature variability from Landsat Infrared. *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, p. 262-272.
- Weber, B., Jaquet, J.-M. et Faour, G. (2005) Couleur de l'eau en zone côtière de la Méditerranée orientale : comparaison et interprétation des données SeaWiFS et Landsat TM. À paraître dans *Télédétection*, vol. 5, n° 1-2-3.
- Yezbek, J. (1990) Nutrients input and cycles on the coast of Jouneih bay. Unpublished Mémoire de maîtrise, American University of Beirut, 96 p.